

中国城市 水 蓝图

探索创新生态治水方案，应对中国水资源挑战

©The Nature Conservancy (Patrick McCarthy)

中国的生态治水之道



致谢

主要作者：丹尼尔·夏尔米，卡里·维杰斯托，穆泉，内森·卡雷斯，王龙柱

贡献作者（排名不分先后）：白晓睿，朱利奥·博卡莱蒂，罗伯特·麦克唐纳，冯明敏，斯科特·摩尔，单良，艾米莉·西蒙斯，梅根·斯诺，于倩，张海江，赵鹏，曾心滢，朱乐，科里·齐拉

编辑：约翰·沃克

设计：保罗·格曼特，阿帕切尔公司；汪冰，周墨，计画堂

特别感谢我们的研究合作伙伴世界自然保护联盟、北京师范大学和北京大学-林肯研究院城市发展与土地政策研究中心。



北京师范大学
BEIJING NORMAL UNIVERSITY



LINCOLN INSTITUTE
OF LAND POLICY

感谢艺康集团及其基金会对该研究报告的慷慨资助。



感谢世界资源研究所提供的青岛案例资料，感谢合作伙伴达能和世界自然保护联盟提供的龙门嘉泉案例资料，感谢阿里巴巴公益基金会和万向信托对龙坞水基金信托项目的支持。

本报告得到了来自环境保护部环境与经济政策研究中心、中国环境科学研究院、中国-东盟环境保护合作中心、中国科学院地理科学与资源研究所等诸多机构专家的大力支持，提供了宝贵建议，尤其感谢环保部政策研究中心环境经济与政策首席专家王华，中国环境科学研究院李俊生研究员，北京大学环境科学与工程学院张世秋教授，中国科学院地理科学与资源研究所贾绍凤研究员等几位专家为报告的修订和润色做出了重要贡献。感谢中国国家地球系统科学数据共享平台、中国科学院资源与环境数据中心等机构的数据支持。感谢中国 TNC 淡水部门的多个志愿者的支持与协助。

中国城市水蓝图，2016，大自然保护协会（TNC），中国，北京。报告可从 nature.org/waterblueprint 下载。

目录

序	6
执行摘要	8
引言	11
第一章：城市供水来源	12
规模最大、发展最快的中国城市	12
城市水源	12
城市水源集水区	13
水源集水区的重要性	14
水源集水区的规模	15
第二章：城市水源集水区现状	17
可使用水量	17
水污染：点源 vs. 非点源	17
集水区的人类影响	19
集水区面源污染	20
污染与土地开发给人类和大自然带来的影响	21
造成集水区环境退化的经济因素	23



第三章: 集水区保护的潜在价值	24
集水区保护涉及哪些方面	24
改善水污染所需的保护措施规模	25
保护措施的成本需求	26
防止污染可以降低处理成本	26
优先保护水资源安全同样能造福自然生态	27
影响城市水源的管理模式	29
第四章: 利用市场机制保障城市供水安全	30
协同行动, 共建水基金	30
地方政府和产业部门	31
投资中国的未来	31
案例	32
方法	46
参考文献	56

序

水资源是人类赖以生存所必不可少的重要自然资源。生活中，我们需要水来煮饭、洗澡；生产中，我们需要水来制作新产品、创造能量。更重要的是，我们每天都需要喝水。

但是，获取清洁的水资源变得越来越困难。事实上，50% 的世界人口都受到了水资源短缺的影响。与此同时，来自城市、农业、商业和生活方面的用水需求却不断增长。有限的水资源受到来自城市和商界领导者、农民、环保人士等多方面的争夺。寻求人与自然之间用水需求的平衡之法迫在眉睫。

中国正在经历来自水安全的全面挑战。在中国，至少有三分之一的湖泊和河流污染严重无法继续供人类使用，73% 的为快速发展的城市提供水源的集水区正面临着中高度污染。在城市规模不断扩增和水质挑战凸显的背景下，我们必须整合多方资源，携手为中国建造一个可持续的水未来而努力。

过去几年来，大自然保护协会（TNC）一直致力于世界各地水资源现状的研究。鉴于中国对全球经济、环境和人类发展的重要性及其面对的巨大的水资源挑战，今年，大自然保护协会决定聚焦于中国，深入了解水资源现状。在最新的中国城市水蓝图报告中，我们选取了 30 座中国发展最快、规模最大的城市作为研究对象，对其 135 个地表水源进行了分析，并从中发现了开展生态治水之道的机遇。

因土地开发利用和土壤退化所造成的面源污染，已经成为中国约半数水污染的重要元凶，特别是流入湖泊、河流、湿地、地下水和沿海水域的化肥、农药和农畜粪便的残余物。除了利用传统的水利基础设施外，我们发现通过恢复森林、改善农业管理实践和实施其他生态治水措施，可以提高中国 150 多万人口的用水水质，有效地减少污染对自然所产生的负面影响。此外，开展生态治水还可以有效地降低水处理费用，所节约的费用可用作部分生态治水的成本支出。

水基金模式为中国大规模实施上述生态治理方案提供了一条可行之路。从秘鲁到肯尼亚，这种管理和金融兼具的工具被广泛地应用在世界各地。如果设计得当，水基金不但可以改善水质，还可以为人类与自然带来如农业产量的提高、更可靠的能源产出以及碳汇等更多效益。水基金模式为满足经济的持续增持和自然资源的保护需求提供了双赢的解决方案。

中国已经开始着手解决其所面临的巨大的水资源挑战。但是值得注意的是，自然在解决水危机方面的力量亦不可忽视，生态治理是解决中国水安全挑战的重要组成部分。

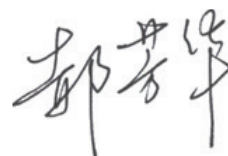


Giulio Boccaletti 博士
全球淡水管理总监
大自然保护协会

城市水源是城市基础设施的重要组成部分，与工业生产和居民生活息息相关。但是在中国，为城市发展和居民生活提供水资源的重要水源集水区已经受到了一定程度的污染，部分湖泊河流污染严重已经无法继续供人类使用。而造成城市水源污染严重的主要原因之一就是非点源污染，特别是大量使用化肥、农药和集约化农业生产所形成的污染源。因非点源污染更难控制、影响范围更广、使用传统工程技术较难清除；因此，治理非点源污染，保护城市水源集水区，确保城市供水的安全性，已经成为我国现阶段城市快速且健康发展的重要需求。

大自然保护协会（TNC）一直关注城市水源地的保护和非点源污染的控制工作，提倡在适宜的地方运用生态治理措施保护城市水源。大自然保护协会（TNC）以科学为基础，把这种理论广泛地应用在世界各地，并取得了一定效果。现在，大自然保护协会（TNC）聚焦中国城市水资源现状，对生态治理方法在中国的应用展开了研究，总结形成了中国城市水蓝图报告。报告以中国 30 个快速发展的城市为样本，关注小型地表水集水区，分析比较了提高城市水安全的生态治理措施和工程治理措施的效果、成本需求和经济价值。值得我们关注的是，水蓝图报告还强调了利用市场机制的重要性，引入水基金信托模式，为城市水源集水区的保护工作提供了金融和监管机制。

随着城市化进程的不断加快，城市规模和人口持续增加，城市供水需求也随之增加；与此同时，非点源污染对城市水源的危害日益严重。来自水量和水质的双重挑战严重制约了城市社会经济的可持续发展。在此背景下，大自然保护协会（TNC）在中国城市水蓝图报告中所提出的城市水源集水区的生态治水策略，以及利用市场机制保障城市的供水安全，对于中国保护城市水安全和治理流域非点源污染具有重要的意义。



郝芳华 教授
北京师范大学 副校长

执行摘要

中国的城市水源

城市水源是支撑中国城市经济发展和居民健康的一项重要资源。在中国，约三分之二的人口居住城市的水源来自本市所在的集水区内。2010 年城市及其水源集水区的国内生产总值共计约 2.7 万亿美元，占当年中国国内生产总值的 55%。集水区的生态系统功能直接影响城市供水水源的汲取、过滤和运输过程及效果，从而与生活在其中的 8.6 亿人口的社会经济状况息息相关。

中国城市水源对于自然和人类都至关重要。在全国范围内，30 个样本城市的水源集水区覆盖了中国 42% 的生物多样性优先保护区域和 40% 的优先保护的河流。同时，符合能为居民提供基础生态服务的中国重点生态功能区约有一半都包含在城市的集水区内。

城市的水源集水区面临的供水需求压力与日俱增。中国规模最大、发展最快的 30 座城市每年的地表水需求量为 296 亿立方米，相当于中国最大的淡水湖总水量。然而，实际上全国三分之二（69%）以上的供水仅由占国土面积 6% 的相对较小的水源集水区承担。因此，我们可以通过加大对中小型集水区（面积小于 10 万平方公里）自然基础设施的投入，来确保安全可靠的供水供应。

中国水源集水区现状

在三分之一城市水源集水区内，50% 以上的土地被用于农业和城市建设的开发，土地的开发和退化使得城市集水区上游的水质污染日益严重。在关注的 30 个城市水源集水区中，有 73% 的集水区的水质面临着中度或高度污染。例如，在规模最大、发展最快的这 30 个中国城市中，约 8200 万人的用水质量受到了沉积物的影响。

集水区内的土地退化同样影响着中国的生物多样性，其中包含生物多样性优先保护区域内的 8900 公里的河流，共计超过 650 种受威胁或濒危脊椎动物的栖息地分布在这些水源集水区内。通过分析发现，样本城市水源的集水区内有 1200 万公顷的国家保护区域和 3 个“零灭绝联盟”区域已受到环境退化的影响。

据估计，因土地使用不当和土壤退化所造成的面源污染，已成为中国多数城市水源地下水污染的主要元凶，特别是流入湖泊、河流、湿地和沿海水域的化肥、农药和农畜粪便的残余物。除此之外，这些污染物还会随着降雨和融雪进入地下蓄水层。当水质下降到一定阈值时，将会影响如饮用水、渔业或工业用水等社会需求。这种由水污染导致的水资源短缺，在中国被称为“水质性缺水”。

中国的生态治水之道

进行土地保护和改进土地使用模式能有效地减少营养物质和沉积物等非点源污染。经本报告分析发现，如果能在约 140 万公顷的土地上（小于 3% 的水源集水区总面积）采取特定保护措施，则至少可以将规模最大、发展最快的中国 30 个城市中的中小型水源集水区的污染水平（沉积物和营养物质）降低 10%。

在过去五年内，中国平均每年的生态补偿支出约为 80 亿美元。而通过计算发现，每年约 3 亿美元的成本支出就可取得上述治理效果。其花费少于当前中国国家生态补偿总支出的 4%。除此之外，在 34 万公顷的目标集水区内进行林灌草恢复，可为 4000 万城市人口有效解决供水区泥沙污染问题。若在目标集水区内开展农业最佳管理实践，则可显著降低下游 1.48 亿城市人口面临的水源营养物质负荷问题。值得注意的是，在城市水源集水区开展上述生态治水方案可以有效地减少面源污染提高水质。不仅不会对土地生产力产生负面影响，同时其直接经济收益还可以有效地降低供水处理成本。本报告评估显示，在 30 个中国发展最快的城市中，一半城市通过开展生态治水所节约的水处理费用可用作部分集水区生态治水的成本，而其中四个城市开展生态治水所带来的水处理经济收益与所需成本可达到平衡。

除了可以节省城市供水的处理成本外，投资水源集水区开展生态治水也会惠及城市生态系统。在这些城市供水集水区中，已明确的国家级生物多样性保护区域占集水区总面积的 25%，同时还与约占中国鱼类与陆生物种五分之一的生态区域相交叉。从而使得生态治水投入成本相比，改善城市居民的饮用水水质与生态系统的效益更为显著。

利用市场机制，服务人类和大自然

与多数国家相似，中国城市水源集水区的保护工作与责任由多个政府部门共同承担。因集水区保护同时涉及水域与陆地，使得相关政策的制定过程挑战重重。虽然在中国各政府部门的关注点有所差异，但开展城市水源集水区的保护工作，则需要各个政府部门间进行多方协调；同时在保护工作中，地方政府的作用也至关重要。

报告认为，采取能够整合多方资源的水基金信托模式将为规模化实施保护行动提供一个前所未有的金融和监管机制。基于已经普遍开展的生态系统服务付费（Payment for Ecosystem Service, 简称 PES）项目，由用户付费的模式能够激励地方政府和企业积极参与水源集水区的保护。通过参与水基金信托投资水源地保护，用水户的成本投入不但可以进行有效的水源集水区的保护，同时也能带来更广泛的社会经济和生态环境效益，例如，保护重要陆生生物物种的栖息地环境。这是一种在同时满足中国持续经济增长和自然遗产保护需求的背景下能够发挥重要作用的双赢解决方案。

评估城市治水策略 提供生态治水建议



前言

全球的城市都面临着日渐增长的水资源压力¹。绝大多数城市的饮用水都依赖于地表水资源，这些水通过蓄水池、运河和各种管道输送给城市居民。尽管建设了工程量浩大的供水系统，但是大部分城市水源集水区依然要依靠各种自然生态系统来保障水质——比如像森林和湿地这样的“绿色基础设施”。然而，随着城市规模不断发展，这种自然生态系统也在逐步退化。原有生态系统的水质保障功能不断减弱，从而导致保障城市居民洁净的饮用水供给变得越来越困难和昂贵²。

如何保护城市水源这个问题困扰着很多城市，特别是在面临着快速城市化和严重水污染的中国^{3,4}。近年来中国的城市人口增长率保持在4.5%，增长速度稳居世界前列⁵。到2050年，将会有近10亿中国人生活在城市中，40年内中国城市人口数量将增加3亿⁶。然而，目前中国的供水设施难以满足快速的城市化需求，需要大量的资金投入用于供水设施的建设和缓解生态系统的不断退化。从而保障数量庞大的城市人口的生活用水需求。“十二五”期间，中国政府总计投入4300亿人民币（约合690亿美元），比“十一五”期间增加了17%。其中57%的资金用于拓建输水管道，43%用于污水处理设备建设和维护⁷。

尽管中国经济发展迅速，但仍有近四分之一的城市居民无法获得合格的饮用水和卫生设施⁸。此外，根据中国环境保护部最新的国家环境质量公报显示，中国至少有三分之一的湖泊和河流污染严重无法继续供人类使用，而这个比例在城市地区更高⁹。新证据显示，中国有60%的地下水资源已经受到污染，这一数字凸显了中国水污染的严重性¹⁰。严重的水污染被认为与“癌症村”等现象有直接关系¹¹。文献评估表明，2003年由水资源污染引发的健康问题所造成的直接经济损失为80亿美元，这一数字有可能在未来的十年内继续增加¹²，最新的水污染年度损失评估值范围为340~440亿美元^{13,14,15,16}。

水污染已经成为导致水资源短缺的重要原因之一，中国专家甚至将其专门定义为“水质性缺水”¹⁷。从工业制造车间，到简易的排水设施，再到工厂排污设备，大范围的报道已经让人们对中国点源污染源有了充分的了解和认识¹⁸。但事实上，中国近半数的水污染是由土地不合理利用和退化所导致的面源污染而造成的，尤其是流入湖泊、河流、湿地和沿海水域的各种化肥、杀虫剂、家畜粪便等残留物。这些残留物还可以通过降雨和融雪进入到地下含水层，造成地下水污染¹⁹。尽管面源污染的治理一直都是一个世界性难题。但是越来越多的证据表明，自然生态系统在减少面源污染、保护和恢复水资源供应等方面可以发挥重要作用²⁰。

水源集水区的保护为控制污染物的载入了提供了可行性策略，特别是针对来自非点源污染的营养物质和沉积物，提供了可靠的解决方案。比如，森林能够有效防止水土流失，湿地则是一种可以帮助过滤污染物的天然水处理系统^{21,22}。同时，通过采用某些特定的土地管理方式，耕地等土地利用方式同样可以在水污染治理方面发挥重要作用。因此，通过水文模型识别水源集水区内的水污染治理的关键区域，采取适宜的生态治水方案，则能够使得整个水源集水区范围内的治理成本最小化²³。

在城市规模不断扩增和水质挑战凸显的背景下，这份报告将聚焦于讨论中国应如何通过投资集水区自然生态保护与恢复来保障城市的供水安全。报告的首要目标是在充分考虑了中国经济社会及制度特点的基础上，评估城市水源集水区的不同生态治水策略对于减少面源污染的潜力。报告由四章组成：第一章将分析总结中国规模最大、发展最快的30座城市供水的来源；第二章将分析总结小型地表水源集水区（中国城市水源）所面临的土地退化和非点源污染的威胁；第三章将定量评估城市水源集水区的生态治水方案中对改善水质中的沉积物和营养物的效果，并与工程类方案进行了成本有效性的对比；第四章将提供中国生态治水的机制建议，特别是针对引入市场机制，如建立多方合作的水基金信托和水权交易等方式进行讨论。

随着中国城市化进程的不断推进，中国人口和商业日趋集中于城市，使城市对清洁水资源的需求也随之增长²⁴，水资源是中国经济赖以增长的重要资源之一²⁵。因此报告旨在构建保护城市水源集水区的成本有效性分析框架，提出生态治水策略及建议，为保障经济增长与自然生态系统服务功能协同发展提供解决思路。

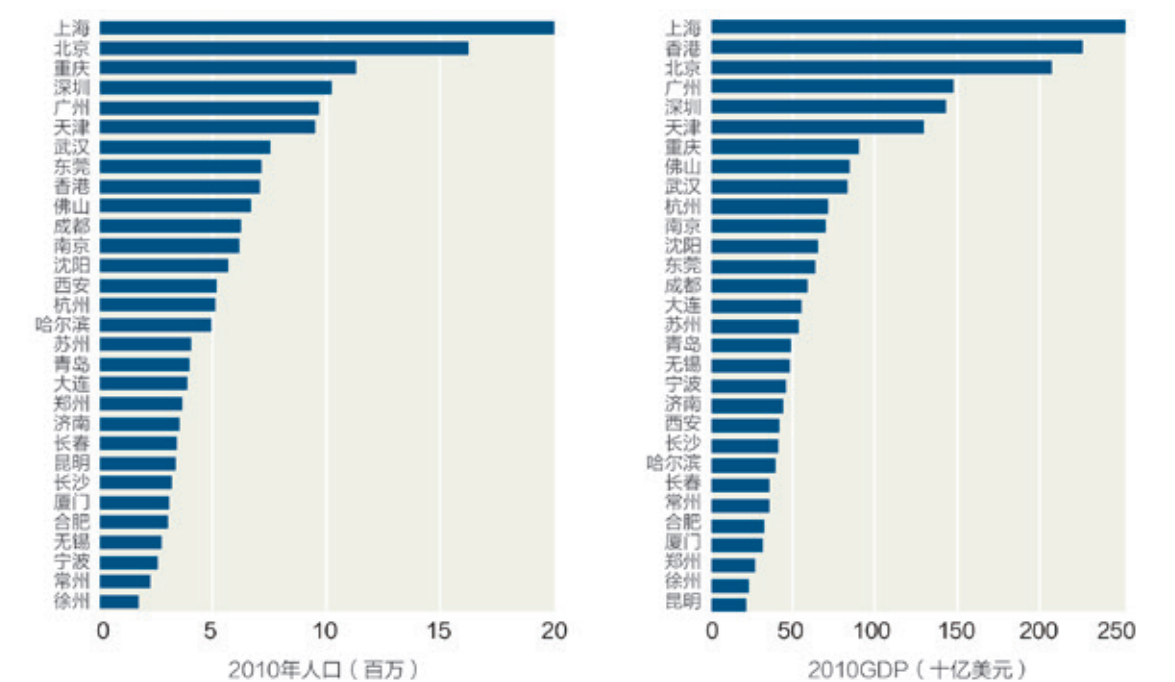
第一章：

城市供水来源

规模最大、发展最快的中国城市

今天，中国城市聚集了超过半数的中国总人口²⁶。预计到本世纪中，中国城市总人口将达到 10 亿²⁷，其中有三分之一将集中在中国发展最快的 30 个城市中，这些城市目前已为超过 1.8 亿人提供了生活场所并创造了高达 2 万亿美元经济效益，相当于整个中国国内生产总值的一半（图 1-1）。然而，持续且快速的社会经济发展也使这些城市面临着来自于环境与生态的双重挑战²⁸。

图 1-1. 样本城市的人口与经济



30 个样本城市 2010 年城市人口数量与国内生产总值（GDP）。

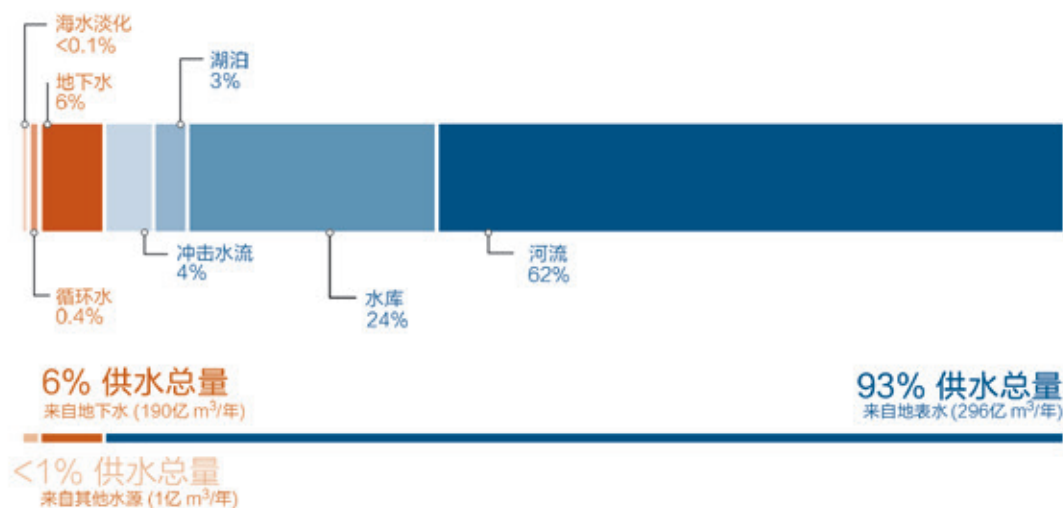
城市水源

每一个城市的发展都离不开充足的清洁水资源的供应。根据来自于各城市水资源公报及网站等公开的数据与资料，通过系统地总结各城市主要自来水公司及其他单位²⁹的取水总量³⁰发现在样本城市的市政供水中，有 93% 用水来自地表水源（图 1-2）。进一步估算显示，这些城市每年从地表水源中获取的饮用水和工业用水总量共计约 296 亿立方米，相当于中国最大的淡水湖鄱阳湖的总水量。同时这 30 个城市的居民和商业用水量已经超过了每人每天 400 升，与环境保护部公布的全国层面数值类似³¹。

与全国水资源利用数据相比，样本城市的地下水取水量占城市饮用水供应量比例并不高³²。然而，地下水资源对于中国的水资源安全却极为重要。事实上，约有四成的样本城市都在不同程度上利用了地下水资源。从省级层面来看，农业取水量所占比重大，而地下水资源则是农业用水的重要来源。联合国粮农组织数据显示，包括北京、天津、河

北、山西和内蒙古在内的北方五省市区的 2005 年总取水量中有 65% 来自地下水水资源³³。尽管地下水资源同样也是水源集水区保护的重要内容之一，但在多数样本城市供水多依赖于地表水的情况下（基于收集的公开数据资料显示），报告将城市水源的关注集中在市政和工业用水，涵盖水资源采集、处理及分配等水供给的全过程，使得保护城市水源集水区更具改善水质的潜力。

图 1-2. 城市饮用水源



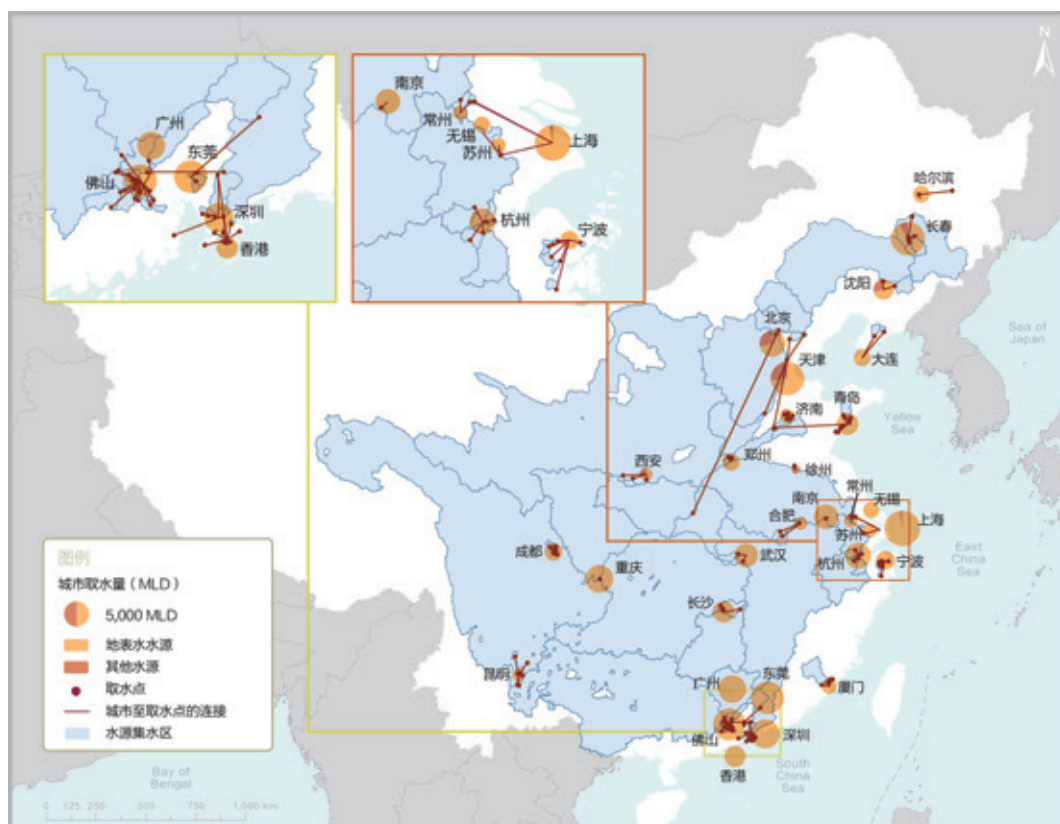
30 个样本城市饮用水源来源类型对比。

城市水源集水区

居民和工业用水的供应是城市环境、经济和民众健康的重要组成部分³⁴。这就使得中国城市的发展与水源地、以及水源地内的社区和野生动物种群紧密相连。30 个中国发展最快的大城市的供水主要依靠 135 个地表水源集水区，其总面积达 3.65 亿公顷，相当于中国国土陆地面积的 39%。水源集水区因肩负着水源在进入人工水利设施之前的收集、过滤和运输的任务而责任重大（图 1-3）³⁵。

随着中国城市人口和经济的不断增长，当地的天然水供应已经无法满足生产和生活需求，城市及水资源管理者需开发多个远距离水源。比如，“南水北调”工程每年将从水资源丰富的南方向水源匮乏的北方输送 448 亿立方米的水量³⁶，整个“南水北调”工程造价近 810 亿美元，运河与隧道总长 2400 公里，输水目的地涵盖包括首都北京在内的多个北方城市³⁷。

图 1-3. 城市及其水源集水区



30 个城市及其供水集水区地图。城市中心位置标注的饼图进一步说明了每个城市地表水在水源供应类别中所占的比例。

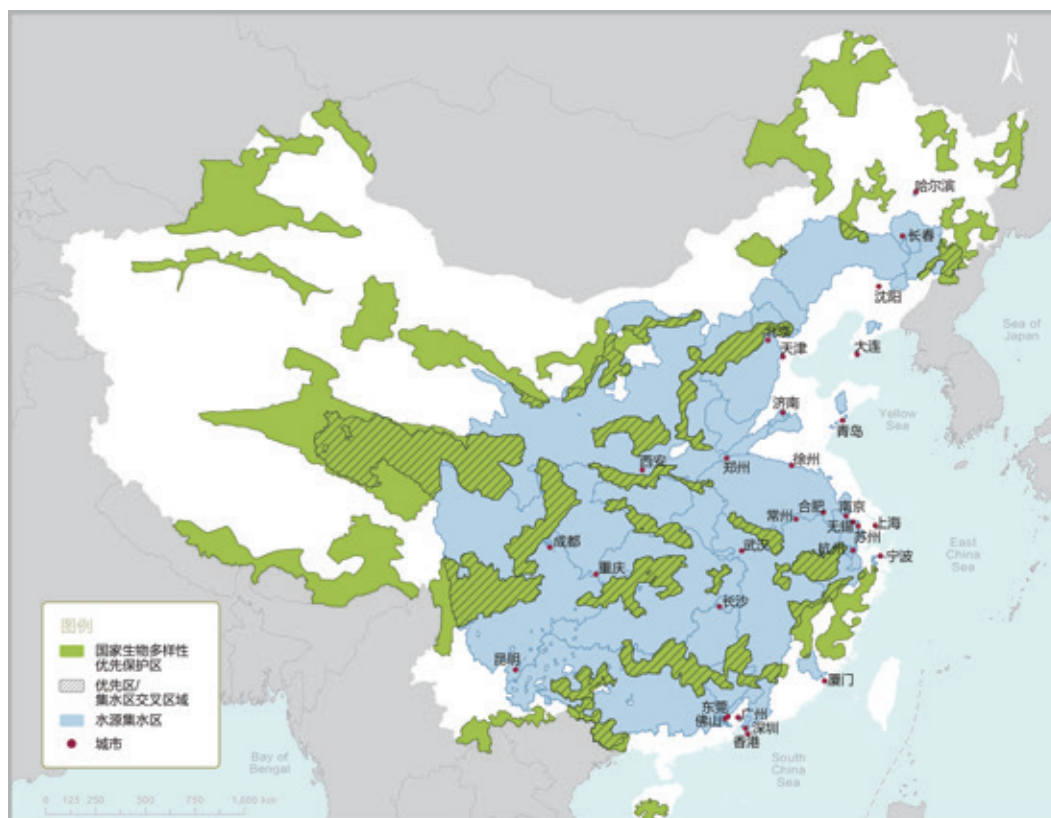
水源集水区的重要性

30 个样本城市的水源集水区在中国整个社会经济体系中十分重要。三分之二的中国总人口生活在城市供水集水区内。连同城市面积在内，这些集水区所在区域 2010 年的国内生产总值约为 2.7 万亿美元，相当于同年全国国内生产总值的 55%³⁸。也就是说，大约有 8.6 亿人的社会经济状态是与上述地区的生态环境密切相关的。而仅长江流域一带就贡献了全中国 70% 的大米产量、50% 的谷物产量和 70% 以上的渔业产量³⁹。

这些城市的水源集水区中也包括了一些对中国国家生态环境至关重要的地域。《中国生物多样性保护战略与行动计划》指出，中国的生物多样性优先保护区域同时涉及陆生环境多样性和水生环境多样性的保护。而上述城市水源集水区就涵盖了 42% 的国家生物多样性优先保护区，其中还包括优先区内 40% 的河流长度⁴⁰。因此，这些集水区的重要性不仅体现在为快速增长的城市人口提供水源，同时其土地和水源的质量还对于保护中国生态多样性具有重要意义。

水源集水区的生态系统正常与否对于整个中国的可持续发展意义重大。在 3000 多名中国科学家在 2011 年到 2014 年针对粮食生产、生物多样性保护和碳汇等七个方面开展的一项全国范围内的生态评估中⁴¹，中国能够为人们的日常生活提供生态服务（如水供给、水土保持和防洪等）的地域被统一定义为“生态功能保护区”。这类保护区共覆盖 782 个县。本报告分析显示，30 个城市的水源集水区与中国约超过半数的“生态功能保护区”重合。但根据目前的文献报道⁴²，这些重合区域的经济增长方式可能会对生态系统功能产生不利影响。例如，太湖流域是中国最富裕的地区，其 GDP 总量为全国平均水平的 3.5 倍，然而这样的经济成就背后却是惨重的环境代价，造成的水污染经常性超过当地污水处理负荷⁴³。

图 1-4. 国家生物多样性优先保护区域与水源集水区分布



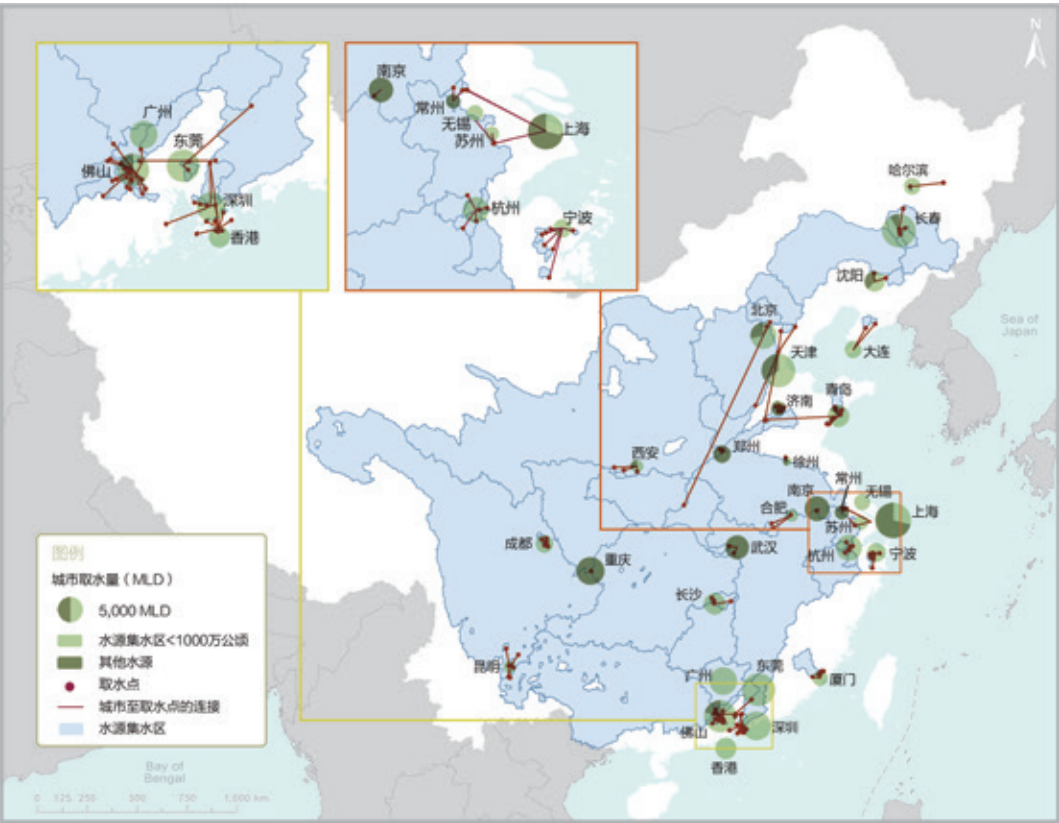
30 个城市的水源集水区与国家指定的生物多样性优先保护区位置重叠情况展示。

水源集水区的规模

集水区土地的使用模式很大程度上决定了中国城市供水的潜力和水质状况，以及相应的水源运输和处理的成本⁴⁴。健康的生态系统可以实现水质净化和水流调节等功能，而土地退化则会使杂质和污染物进入水源导致水质下降，同时干旱和洪水等极端天气状况的发生频率也会随之增加。土地的使用和管理与水质、水量密切相关，但在中国许多大城市中，水源集水区的土地利用管理都已经超越了水资源管理者本身的行政管辖范围。虽然城市管理者 and 水利设施决策者对水源的处理和分配拥有直接控制权，但负责监控水质和监管水源的部门对集水区的管理却鞭长莫及。中国大部分城市及其供水方缺乏对集水区保护的拨款权限。事实上，在中国水源集水区的保护常常都局限在水源取水口附近区域⁴⁵。

为帮助城市领导者、工业用户、水资源管理者和大众更好地了解他们所用的水到底来自哪里，以及他们能够进行改变的可能性，大自然保护协会（TNC）及其合作伙伴针对发展最快的 30 个中国城市的水源情况进行了详细的勘测和分析。此外，报告还将面积大于 1000 万公顷的区域定位为大型集水区，把面积小于 1000 万公顷的区域定位为相对较小的集水区，并分别进行了分析⁴⁶。像面积为 1.8 亿公顷的长江流域这样的大型集水区，单个城市取水量仅占总供水量的一小部分。于这些相对面积较大的集水区而言，即便是对城市水供应产生较小效果的举动也需要大量的保护投资。与此相反，在相对较小的水源集水区范围内，城市在水资源保护方面发挥的作用和影响力反而更大。事实上，无论是国外还是国内，城市在小型水源集水区的保护方面已经取得了初步成效。例如，首都北京就曾直接投入大量资金对其水源地——密云水库上游进行大规模的土地保护，从而确保下游饮用水的安全⁴⁷。

图 1-5. 水源集水区规模与城市饮用水供给



30 个样本城市及其饮用水地表集水区分布状况。以城市为中心的饼图显示了对面积小于 1000 万公顷的集水区以及其水源供应的水供应比例。

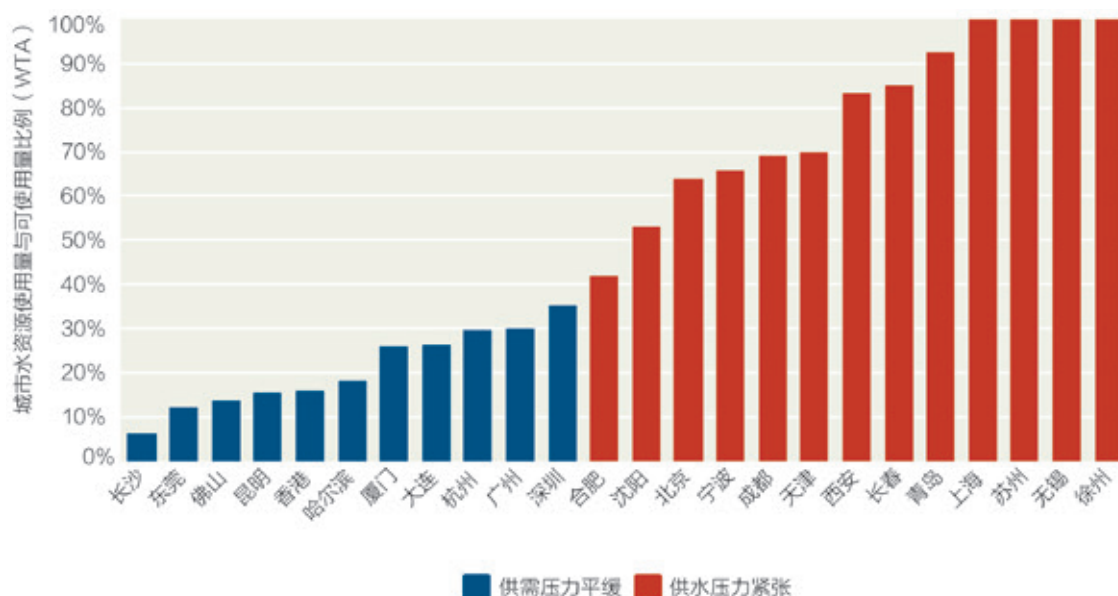
对上述数据的空间分析解释了区分大型和小型集水区的基本逻辑依据。虽然，小型集水区的总面积仅有 5200 万公顷（约占中国国土总面积的 5.6%），仅占 30 个样本城市水源地集水区总面积（65 亿公顷）的 14.4%；但是小型水源地集水区的供水量却能占比总供水量的 69%（图 1-5）。因此，小型水源地集水区在保障中国城市供水安全和相关经济活动方面相对更加重要。对样本城市而言，其中 24 个规模最大、发展最快的城市，其小型集水区在城市供水总量中的占比都至少达到了 25%。小型水源地集水区不仅对中国城市水安全有重大意义，也肩负起在实施保护措施的同时对地形环境进行可持续重建的重任。因此，在下文中，将对这 110 个小型集水区的现状进行深入的分析，为政府决策者和其支持者提供在人与自然和谐共处条件下保证水资源安全的发展机会。

第二章：

城市水源集水区现状

可使用水量

图 2-1. 水源集水区缺水压力情况



集水区面积小于 1000 万公顷的城市供水使用量与可使用量（WTA）比例指标估计值。

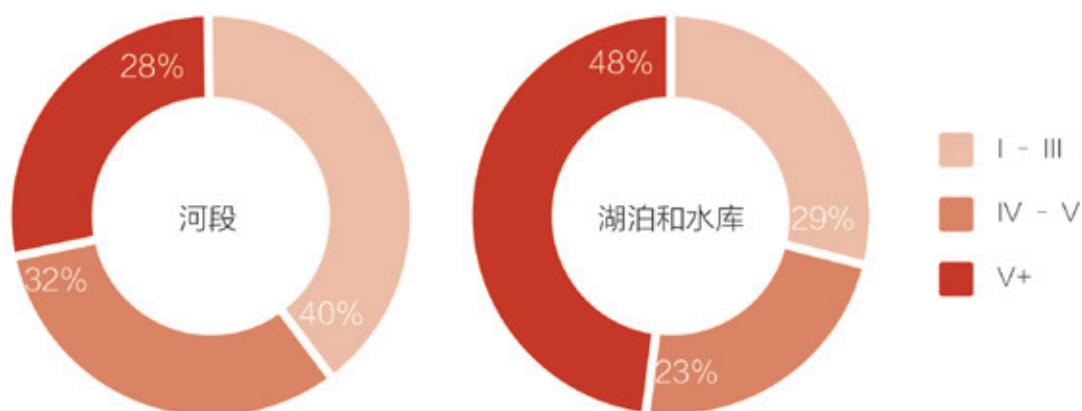
尽管近年来中国大力投资供水基础设施的建设，但保障充足且清洁的水资源供应所形成的来自水量与水质的双重压力，仍旧是中国社会经济持续发展所面临的极大挑战。中国人口总量占全球人口总量的 20%，但水资源总量却仅占世界水资源总量的 7%⁴⁸，人均水资源占有量更是远低于很多国家，中国的可用水资源仅有 G20 发达国家平均水平的 22%⁴⁹。

研究表明，中国有三分之二的城市面临着水资源供不应求的局面，有 17% 的城市面临严重的水资源短缺⁵⁰。事实上，通过我们的分析证实，在中国发展最快的 24 个城市中有近一半的城市目前每年都承受着水资源供小于需的巨大缺水压力。一般而言，当用水量占可用水量的 40% 以上⁵¹（如图 2-1 所示）时，这种供需不平衡的缺水压力就会出现。需要注意的是，虽然由某一月份的用水量超出了该月的可用水量所形成的季节性缺水压力影响的城市数量较多，但季节性缺水压力并不在年度缺水压力的定义范围内。

水污染：点源 vs. 非点源

当前中国现有可用水资源中有很一部分已经受到污染，不再适于人类使用。例如，尽管中国各地的地表水水质普遍有所提高，但依然有 28% 的河流和 40% 的湖泊、水库的水资源不适宜人类日常生活的使用^{52,53}（图 2-2）。而地下水水质则持续恶化，地下含水层水质“较差”和“极差”的比例已经从 2011 年的 55% 上升到了 2014 年的 61%⁵⁴。

图 2-2. 中国河流湖泊水质等级占比图



2006 年河流和湖泊 / 水库水质状况，1 到 3 级为适宜饮用，4 到 5 级为污染，5 级以上属于严重污染⁵⁵。

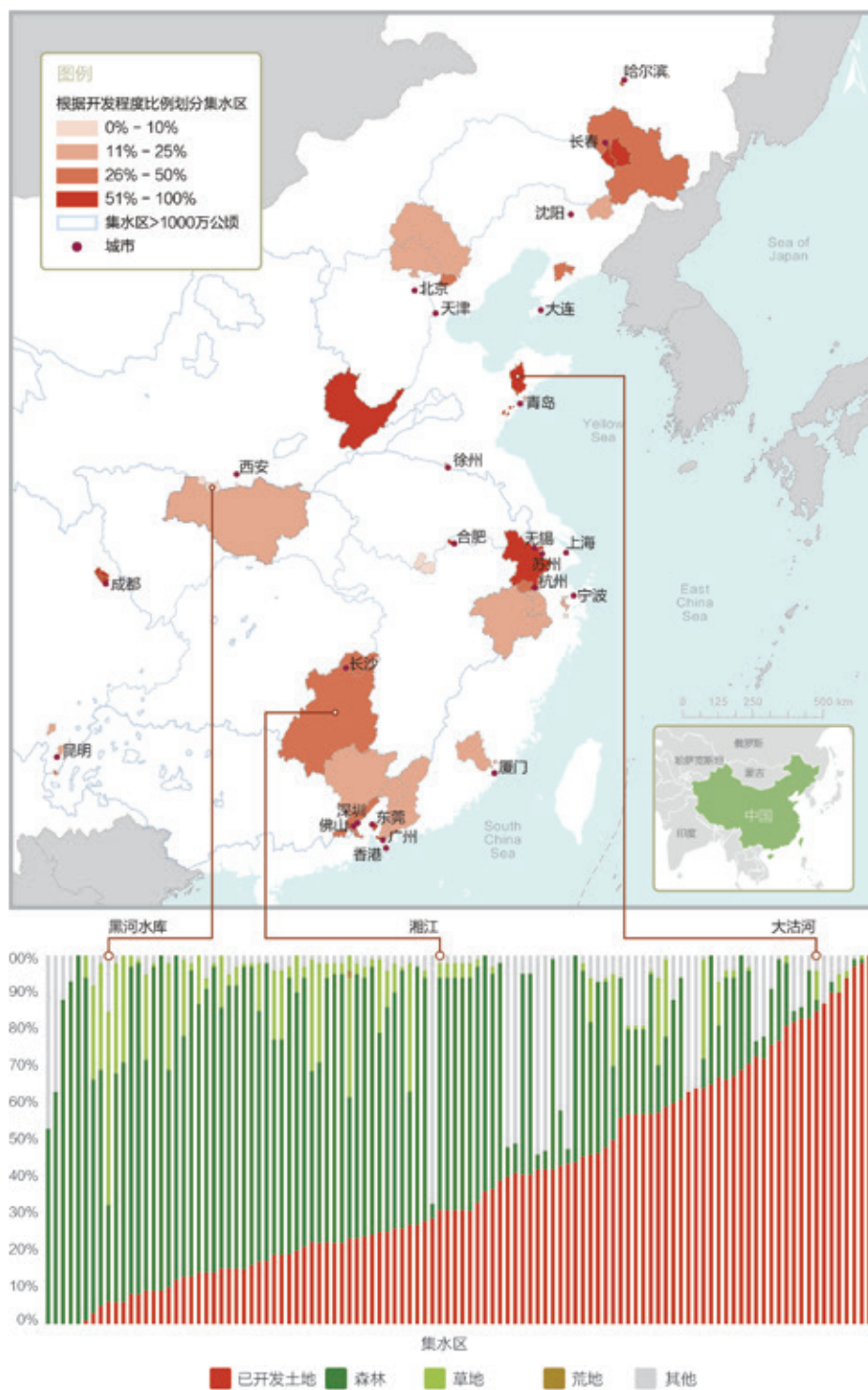
水资源生产力即每立方米用水的国内生产总值是国际通用的衡量水资源利用率的标准之一，目前中国水资源生产力仅达到 G20 国家平均水平四分之一⁵⁶。因此关注水量挑战，提高水资源的生产力是解决当前中国缺水问题且满足日益增长的用水需求的重要措施。当前，中国有四分之一的水资源都处于严重污染状态，甚至无法用于工业生产⁵⁷，严重的污染将极大地降低某些用途的可用水量。因此，中国还应在加大水资源生产力的同时，提高淡水水源地的水质，保证可用水的水量能够满足不同用途。在确保经济收益的同时，还能取得提高民众健康和福祉的效果。

当前，谈及中国的水质挑战，人们多关注于点源污染。然而，非点源污染所造成的影响亦不容小视。事实上，非点源污染是造成地表水富营养化的主要元凶。所谓富营养化是指溶解到水中的营养物质会刺激植物和藻类的生长，从而吸收大量的溶解氧，导致动物缺氧而死。非点源污染所造成的氮磷污染相当于、甚至是超过了点源污染和大气沉降所带来的氮磷污染的总和⁵⁸。过量的营养物质排放以及由此导致的水体富营养化已经引发了多次大规模的供水危机，如 2007 年太湖爆发的水华事件就造成无锡市长达一个多月的供水中断⁵⁹。总的来看，中国最大的 40 个淡水湖泊中，超过 57% 淡水湖泊已经出现富营养化甚至过度营养化的现象⁶⁰。因此，中国若想提高河流湖泊的水质，就必须将目标锁定在非点源污染的治理上。

土地利用方式的改变，特别是将森林和其他自然土地覆盖转变为农耕地，同样也会增加土壤侵蚀和溪流沉积物含量。例如，植被破坏就造成了长江上游流域大范围的水土流失⁶¹。因沉积物含量高会增加水资源管理的成本的原因，沉积物含量成为水资源保护的重点关注指标。例如，沉积物含量大和浑浊度高会导致凝集剂使用量的增加，水源在沉降池中处理所需的成本和时间也会相应增加，水处理厂所用的技术也会更为复杂。例如，纽约市通过开展水源集水区保护，避免了在流域源头新建过滤装置，从而每年可以节省 1.1 亿美元。水源地沉积物含量大会带来更多的难以处理和运输的污水与淤泥，同时沉积物含量大还意味着沉降池清淤的需求也会增加⁶²。此外，沉积物含量高造成的淤积会降低储水设施的使用效率，影响水源供应、水力发电和淡水生态系统的正常功能。

集水区的人类影响

图 2-3. 水源地集水区土地开发

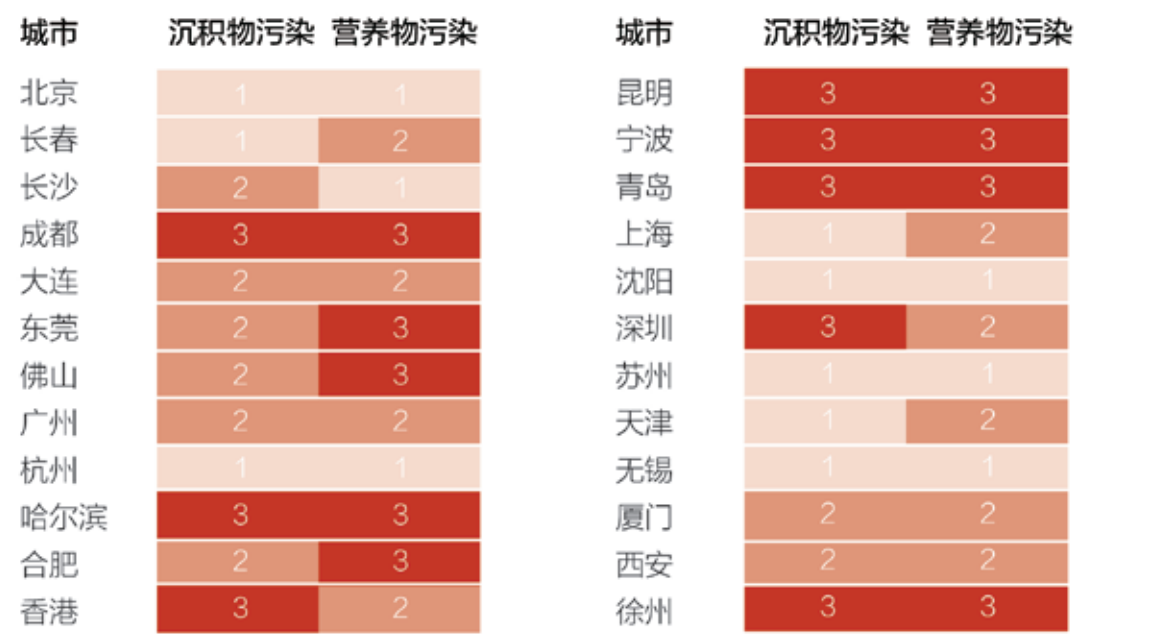


以开发比例为标准，面积小于 1000 万公顷的水源地集水区。开发土地的类型包括农业用地和城镇建设用地等。

图 2-3 是 2010 年 110 个为中国 24 个发展最快的城市提供水资源的相对较小的集水区的土地覆盖情况。这些集水区的土地利用方式各不相同，但是改变自然土地覆盖模式的总体趋势十分明显。事实上，这些集水区中有三分之一的地区都将半数以上的原有的自然土地覆盖区域变成了作业土地和城市用地。

集水区面源污染

图 2-4. 水源地流域沉积物和营养物污染情况图



各城市水源地沉积物和营养物污染情况。根据相对污染负荷分成等组，“3”代表污染级别最高。

随着水资源从水源集水区不断地流出，并汇入城市运转所需的地表水源，土地利用方式的改变对于水质的影响也就越加明显。集水区天然植被覆盖越少，供水水源中的沉积物和营养物含量就越多。图 2-4 总结了上述 24 个城市供水的平均沉积物含量和磷负荷，这些城市的集水区面积都相对较小（小于 1000 万公顷）。总体来说，集水区土地的开发使这些地区径流的沉积物污染和磷污染加剧，导致依靠这些集水区供水的城市中分别有 8200 万人和 8800 万人受上述两种污染的影响。实际上，氮、磷负荷（下文统称“营养物污染”）之间的空间相关性很高。鉴于二者之间这种联系，本报告将对磷进行重点分析，但是最终的研究结论和意见措施同样适用于氮。

污染物负荷上升会给城市人口带来多方面的负面影响。供水前的水质处理成本也会随着水质的下降而上升。相关设施的运营维护成本也会随着时间的推移而逐渐增加，甚至会在丰水期达到新高，并在未来产生较大的花费用于水处理系统的升级与更新。这笔费用的来源有两个，一是由市政府承担，挤占其他城市开支，二是由所有用水户共同承担，导致工业和居民用水成本的增加。

污染物负荷增加还有可能会造成供水系统的临时中断。比如，风暴来袭时沉积物负荷会急剧增加，甚至超过城市水处理设备的负载能力。2015 年 9 月，受台风杜鹃的影响，大量泥沙混入了台北市和新北市的城市水处理系统，导致水质浑浊，两地不得不停止市政供水⁶³。2013 年 7 月，在遭遇了山洪和泥石流后，成都同样采取了停水的措施⁶⁴。营养物负荷过量容易造成城市供水系统爆发水华，在高温期间尤其如此。水华造成的供水中断在全球范围内出现的频率越来越高^{65,66,67}。而这种非点源污染物爆发对城市经济和居民生活带来的影响将是难以估量的。

污染与土地开发给人类和大自然带来的影响

土地退化和由此产生的非点源水污染不仅会给依靠这些集水区供水的人类带来负面影响，同时也会对该地区的野生动植物造成严重威胁。以本研究覆盖的 24 个城市的水源集水区为例，其中有 73% 的区域已经处于中度或重度污染级别（图 2-5），受影响的流域总长度超过 8900 公里，覆盖了多个生物多样性优先保护区域⁶⁸。水质是关系到淡水生态系统完整性的一个重要因素，一旦出现退化，将会对水生生物造成毁灭性影响。除了对渔业等行业有着重要经济价值的物种外，受影响的物种中还包括濒危物种。

图 2-5. 受污染的水源集水区和生物多样性优先保护区域分布



污染水源地与生物多样性优先保护区域交叉对照图。根据相对沉积物或营养物质污染负荷对集水区进行等组划分。

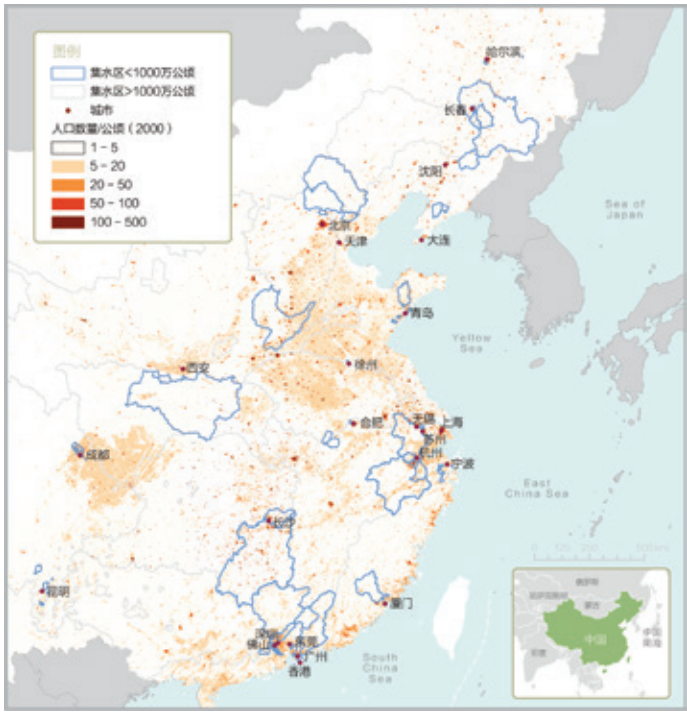
除水污染外，土地开发也会直接影响集水区的生物多样性，其中包括许多濒危陆地生物。总体来看，分布在这 24 个城市相关集水区的受威胁或濒危脊椎动物种类高达 650 个。根据《中国生物多样性保护战略与行动计划》以及“零灭绝联盟”（AZE）的概述，图 2-6 对城市水源地和保护区的情况进行了交叉分析。结果显示，遭遇土地退化的这些集水区中，国家级生物多样性优先保护区域达到 1000 万公顷，“零灭绝联盟”认定的保护地有三个。该结果进一步凸显了土地管理的重要性，因为这不仅关系到依靠这些水源供水的城市人口，也对在这片土地上生存的各种濒危物种至关重要。

图 2-6. 已经开发的集水区和重要的生物多样性优先保护区域分布



已开发的集水区与生物多样性优先保护区域及“零灭绝联盟”保护区的交叉对比。根据发展百分比对集水区进行等组划分。

图 2-7. 集水区人口分布



集水区人口数量估计值（2010 年）。注：集水区可以涵盖城市区域。

集水区污染和土地退化还会影响这一区域居民的日常生活，导致食品安全性下降，人民的生计受到影响。这 24 个大型城市（参见图 2-7）的 110 个小型集水区范围内的常驻人口总数高达 1.44 亿。相对于城市居民，这些人在面临污染和土地退化所带来的健康与生计的威胁时更加脆弱，对于数百万无法获得安全饮用水的人们来说更是如此。世界银行预计，水污染面积扩大造成的损失已经达到中国国内年生产总值的 1%⁶⁹。因此，从源头治理污染将会有效地减少由此带来的健康威胁。

抓紧时间才是更好地把握中国城市水源集水区土地利用问题的关键。根据预测，2050 年之前，中国的国内生产总值将以每年 3.5% 的速度增长。届时，包括粮食等原材料在内的能源、水资源的需求量也将成倍增长。为了满足这一增长而继续对城市水源集水区进行开发无疑将会加剧城市和非点源污染。在新的森林保护措施还没有落实之前，中国在 1970 年到 1996 年间每年的森林损失率为 3%，约 5000 万公顷⁷⁰。同样，1978 年到 2008 年间，中国的湿地总面积缩减了三分之一，面积超过 1000 万公顷⁷¹。1950 年以来，草原大开发使中国损失了近 2000 万公顷的高质量草原⁷²。综上所述，只有从根本上转变态度，采取措施保护和恢复自然土地环境，提高对作业土地的管理，才能缓解由土地过度开发所造成的持续的非点源污染。

对于城市来说，缺水压力、以及处于危险环境中的人口数量和经济环境总量在不断攀升。据估算，到 2050 年，中国城市人口数量将占总人口的 75% 以上^{73,74}。事实上，中国城市人口增速之快，相当于每个月都能建设一座 180 万人口的城市。除非城市水源集水区的土地使用方式发生改变，否则即便通过法规和强制措施对点源污染进行管控，非点源污染所造成的水质恶化还将持续下去，并对城市赖以生存的重要河流湖泊造成极大威胁。

造成集水区环境退化的经济因素

中国的经济发展战略正在发生历史性的转变，这也为以自然为本的方式应对水资源挑战提供了一个绝佳机会。不可否认，中国面临的水资源安全挑战在很大程度上是由过去 40 年长期忽视环境保护、以环境换增长的经济发展模式所导致的。

中国地方政府是中国经济增长的重要力量，长期以来主要以两大机制鼓励地方政府官员大力发展经济。其一就是“干部考核制度”，根据规定量化目标的达标与否来决定官员的升迁。以行政辖区内的国内生产总值（GDP）作为主要“考核”指标，而环境与生活质量的相关指标则一直未曾纳入审核范围内，从根本上造成了地方官员在进行投资规划时缺乏对保护自然资源和水源集水区环境长期考量⁷⁵。

另外一个影响集水区环境保护的地方决策机制就是房地产开发和销售。从财政角度来看，中国是世界上行政管理最为分散的国家之一。地方政府要负责绝大部分包括环境保护措施在内的各种服务。然而，中央下发的资金不足，使得地方政府需要自筹来满足其年度支出预算⁷⁶。

弥补这一资金缺口⁷⁷的主要渠道就是通过出售或开发地方政府名下的土地租赁权。在中国，这项收入约占地方政府总收入的 35% 左右，而在天津和重庆等地，这一比例更是高达 50%⁷⁸。这种对于土地出售和开发的依赖导致地方政府会更加青睐短期投资，而对于森林、湿地等自然资源的长期投资兴趣不大。在这两种机制的引导下，短期投资比长期投资更受欢迎，特别是在自然资源领域。这个过程也往往导致了城市水源逐步恶化。

然而，中国经济发展模式的历史性转变或许会改变这种不良的投资趋势。中国政府从“十二五”规划（2011 年—2015 年）开始就表明了将从以制造业为主、以出口为导向的发展模式转型为高附加值经济模式的决心，不仅要推动低污染型工业的发展，还要制定更加高效和严厉的环境保护法律法规。

新修订的《环境保护法》获得通过是这一转变的重要组成部分。2015 年 1 月 1 日起开始执行的新版《环境保护法》将环境绩效目标纳入了地方考核程序⁷⁹。同时，在房地产快速发展过程中积累的地方政府债务也引起了中国政府和外国投资者的广泛担忧。这一现象说明，中央政府可能很快会对激励机制进行修订，从而改变地方政府这种以牺牲环境和生态服务为代价的土地开发模式。

第三章：

集水区保护的潜在价值

水质和水量问题是 21 世纪许多城市都面临的一项核心挑战。对中国城市而言，不断开发新的甚至是远距离的水源却仍旧维持着有限水源的多种用途共享的现状，不但造成水资源管理成本的上升，而且未能从根本上解决城市所面对的水质和水量的挑战。

除去开发新水源以外，我们还可以用其他方式解决水质和水量问题。就水量而言，可以引入水源共享和用户补偿机制。就水质而言，通过集水区保护，改变土地利用模式，同时确保水质不受影响。在第三章里，我们将具体阐述集水区保护措施在帮助稳定水质方面的潜在影响，以及相对的成本效益分析。

集水区保护涉及哪些方面

水源集水区的保护采用多种生态保护措施，通过提高渗透率或在污染物进入地表水体前将其过滤等方法防止水源污染。从湿地建设到森林恢复的一系列生态保护措施都可以解决水源集水区的非点源污染问题（图 3-1）。

在分析中，依据过往表现和在自然与作业地形中的广泛应用，森林保护、森林再造、河岸带修复和农业最佳管理实践成为我们主要关注的四种保护措施。在聚焦于依靠面积小于 1 千万公顷的水源集水区进行供水的 24 个快速发展的城市，对上述四种保护措施在 24 个城市所涵盖的 110 个水源集水区的水源污染治理潜力进行了评估。每一种保护措施都在提高水质和规范水流方面发挥着自己独特的作用，其标准造价也各不相同（详见方法论部分）。经过测算发现，森林保护是最容易被接受的一种保护措施。不过适用性和污染削减能力等其他因素也会影响某一种保护措施在特定地区的实施效果。

图 3-1 城市安全用水的保护措施

策略	描述
 农业最佳管理实践	种植覆盖作物，实行等高种植，防止沉积物和土壤营养物质流失
 森林火管理	通过可控燃烧或者机械处理降低森林野火程度，以及由此产生的沉积物和粉尘污染
 森林保护	实行地役权购买、土地租赁、保护协议、规划并投资森林保护等措施，保证自然森林区域面积不缩减
 灌溉效率	放弃漫灌，采用多比率精准灌溉，建设灌溉沟渠，减少灌溉过程中的漏出量和净用水量
 牧业最佳管理实践	减少畜牧相关的土地退化，采用全新的Silvopasture模式，实行放牧和圈养循环更替，同时合理处理牲畜粪便，保证水质健康
 森林再造	进行森林再造，在关键区域种植当地树木和灌木，减少土壤侵蚀和相关的沉积物输移
 河岸带修复	进行河岸带恢复和保护，降低土壤侵蚀，提高水质
 道路管理	在道路沿线建造沉积物沉淀阱和涵洞，平整泥土和砂石路面，减少水流经过带走的沉积物
 湿地恢复	退耕还湿，截留土壤流失和消除污染

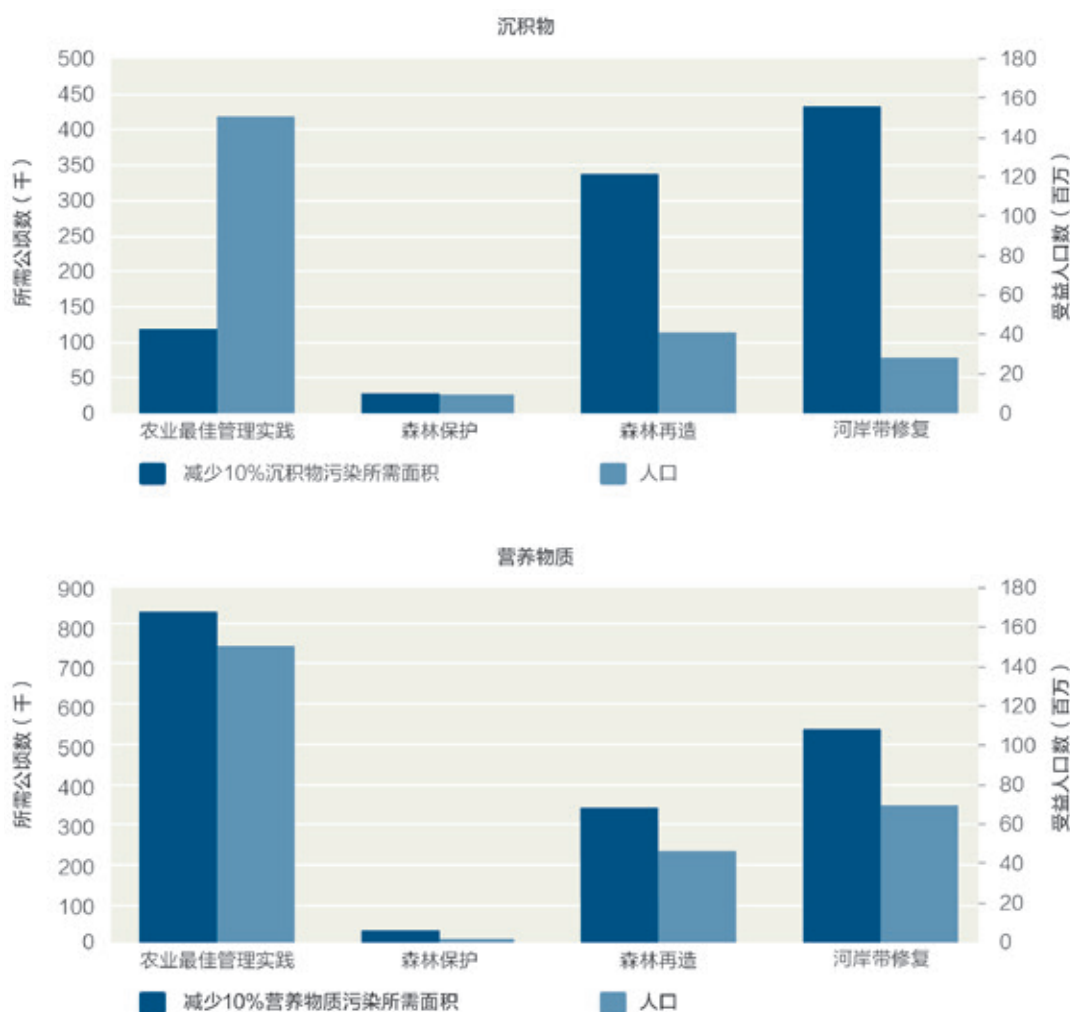
不同地形的集水区可采用的水质和水量管理保护措施有很多。本报告主要探讨蓝色高亮部分的措施。

改善水污染所需的保护措施规模

实行集水区保护将降低城市供水中的沉积物和营养物质污染。我们的分析显示，如果上文列举的四种措施都能够重要水文地区得到大规模有效落实，水污染问题将在中国最大、发展最快的城市区域得到有效遏制。为了进行比较，一般沉积物或营养物 (P) 负荷下降 10% 就可以定义为对非点源污染产生“重要影响”。

打造属于每个集水区的专属解决方案不仅能够减少沉积物和营养物污染，还可以实现通过集水区保护投资所希望取得的多种效果。尽管我们无法预测这些保护措施是否能够取得最佳成效，但可预计的是 24 个城市所在区域内近 140 万公顷的水源集水区累计削减至少 10% 的沉积物和营养物质污染。虽然听起来很大，但是这个面积仅占这 24 个城市水源集水区总面积的 3%。此外，除陡坡和河岸这类具有重要水文价值的地方会进行自然植被重建外，其他大多数集水区仍会在更加完善的管理下保持原有的使用方式。

图 3-2. 四种常见保护措施对沉积物和营养物质的减少程度



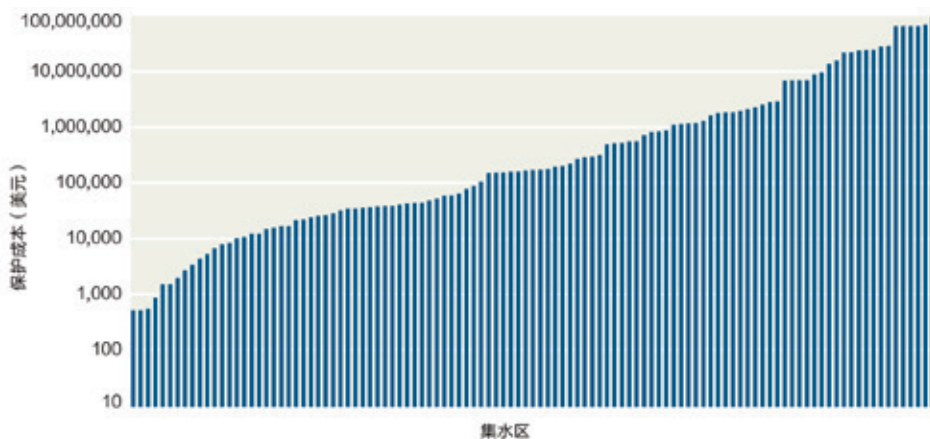
减少 10% 的沉积物（上图）或营养物质（下图）污染所需保护区面积比较，以及每种措施能够辐射的大致城市人口数量。

由于措施的落实受到地点的限制，不同集水区之间的保护措施的实施成效也各不相同（图 3-2）。落实农业最佳管理实践对于提升报告所关注的 110 个水源集水区水质的辐射范围最大。仅这一项措施，预计就可有效地降低 1.48 亿城市人口的水质营养物质负荷。也就是说，如果将农业最佳管理实践措施重点集中在土壤营养流失最严重的耕地上，则只需要保护 1% 的农田面积。重要的是，这些作业用地在继续保持生产力的同时，还能削减大约 10% 的营养物污染。与之相比，森林再造则需要进行部分退耕还林工作。与农业最佳管理实践一样，森林再造对水质的影响覆盖面也很广。我们的研究指出，每 34 万公顷的森林再造可以使为 4000 万城市人口提供水资源供应的水源降低 10% 的沉积物负荷。

保护措施的成本需求

对于需要大规模削减沉积物和营养物质污染的地区来说，我们可以帮助其估算出投资自然环境、改善水质的潜在成本（图 3-3）。基于由中国国家公共支出的文献综述所得出的平均保护成本，我们估算得出以上四种保护措施每年的总成本最高为 3 亿美元，其中农业生产用地和河道再造的投资成本最高。当然，每个城市和水源集水区之间的成本也各不相同。比如，上海黄浦江集水区的饮用水供水量占到了上海市总供水量的四分之一，所以每年的保护成本预计为 1400 万美元。相比之下，广州的水源集水区保护成本大概只有其一半左右。总的来说，3 亿美元是在中国所有规模最大、发展最快的城市中所削减水污染所需的投资总成本。值得注意的是，这个数字还不到中国已经进行的国家生态补偿计划投资总额的 4%，该计划在过去五年已经累计投资 80 亿美元⁸⁰。此外，城市地区的潜在人均年度财政负担为 2.3 美元，这个数字远低于中国人均年收入水平的 0.1%。

图 3-3. 集水区保护的潜在成本



保护措施实现削减 10% 的沉积物和营养物质污染的典型成本。按照小于 1000 万公顷集水区可采取措施的中间成本进行估算。

防止污染可以降低处理成本

如前文所述，提高水源地水质会直接影响水处理成本。就传统处理方式来说，把水质平均提高 10% 将带动水处理运营和维护成本下降 5%⁸¹。这些节省的成本可以用于抵消水源集水区的保护投资。把这些节约的资金与保护措施的成本投入相比较，预计有哈尔滨、青岛、宁波和徐州四个城市可以达到成本收益相当（图 3-4）。这四个城市的共同点都是从相对较小的水源集水区获取城市用水。对集水区保护措施的全面投资收益回报评价需要考量多个因素，包括水源集水区的水文详细信息，污染物源头状况，以及现有水处理设备的处理流程等等。只有通过详细的投资收益回报分析，我们才能够以案例为基础进行计算，预测投资回报率最高的城市，并且对各城市取得理想投资回报的潜力进行大致估算。对于中国规模最大、发展最快的这些城市来说，半数城市对水处理成本的节约可以抵消很大一部分的集水区保护费用⁸²。

图 3-4 投资于集水区保护的潜在回报

低回报率	中等回报率	高回报率
水处理运营成本节约款项 不足预计集水区保护费用的 10%	水处理运营节约款项能够 至少承担集水区保护费用的 10%	水处理运营节约款项可以 完全覆盖集水区保护所需全部成本
北京	长春	哈尔滨
长沙	成都	宁波
广州	大连	青岛
杭州	东莞	徐州
香港	佛山	
上海	合肥	
沈阳	昆明	
深圳	西安	
苏州		
天津		
无锡		
厦门		

如果不是由自来水公司完全承担集水区保护费用的话，那么会有更多的城市可以从水源集水区保护中获益。多数情况下，因为保护投资能够带动一系列经济活动，因此大型私人用水企业或者相关政府机构愿意为水源集水区的保护工作提供资金，使他们也可以从中受益。例如，美国的一项经济研究表明，向保护项目投资 1 美元即可带动两倍的经济活动⁸³。而针对我们的研究来说，这意味着水源集水区保护投资每年可以带来近 6 亿美元的经济效益。从更广的角度来看，水源集水区保护投资带来的好处远不止节省水处理投资一点，其潜在的经济价值也同样令人期待⁸⁴。

优先保护水资源安全同样能造福自然生态

从水源集水区保护中获益的不仅仅是城市。尽管水处理成本下降的确是一个重要的动机，但这种保护措施对大自然以及与自然密切相关的人类来说也具有非凡的意义⁸⁵。作为世界上生物多样性最丰富的国家之一，中国应把保护自然生态系统列为头等大事⁸⁶。事实上，政府的确已经承诺进行改革，并结合经济和环境产出，打造全新的“生态文明”⁸⁷。

森林保护和农业最佳管理实践等集水区保护措施将直接和间接地为生物多样性带来益处。栖息地保护和环境提升将直接造福当地陆生物种，而保护天然河岸和提升水质则会为水生物种打造更加适宜的生存环境⁸⁸。中国大规模森林保护项目（“天然林保护工程”）也体现了其在支持重要物种陆生栖息地保护的同时，提高地表水质的潜力，这其中还包括了生态系统支付组件⁸⁹。

图 3-6. 潜在保护投资收益和生物多样性优先保护区



水源集水区与生物多样性优先保护区对照图。集水区是依据剔除水处理成本之后的潜在投资回报进行分类的。

我们发现，约有 13 个城市（共涉及水源积水区面积 1600 万公顷）可以从集水区的保护投资中获得可观的回报，降低水污染处理的花费，这些水源集水区同时也从多个角度体现了生物多样性的重要价值。根据《中国生物多样性保护战略与行动计划》明确划定的中国陆生和水生生物优先保护区的区域范围，对于可获得可观保护投资回报的水源集水区来说，已明确的国家级生物多样性优先保护区大约占集水区总面积的四分之一。就物种丰富程度而言，实行保护措施的集水区更容易成为高效生物系统交叉区域，其拥有的渔业资源大约为全国总量的 20%，而陆生生物品种比例也达到 19%^{90,91}。因此，在这些集水区进行保护投资将同时为提高城市水质安全和生物多样性提供难得的机遇。

尽管我们的分析排除了将某种结果归咎于某个物种或栖息地的可能，但是集水区保护投资的规模及其与国家生物多样性优先保护区的结合证明，通过城市水源集水区的保护推动保护中国生物多样性的潜力巨大。通过保护生物多样性的成功、水处理成本的下降和相关经济活动的活力增强，为人类和自然创造一种双赢的局面。

影响城市水源的管理模式

在大多数国家，城市水源集水区的保护工作由中央和地方各级政府机构共同承担。因为集水区保护同时涉及水源与陆地两大方面，所以完成相关政策的制定具有极大挑战，各级政府单位依据自身动因采取广泛合作则变得十分必要。在中国，环境保护部对水污染和水质问题具有优先管辖权，因此也需要首先对城市水域保护承担起责任。然而大多数土地利用事宜归国土资源部管辖，而与建设相关的工作（包括可能造成城市集水区环境恶化的工程）则由住房与城乡建设部负责。除此之外，国家林业局负责林业资源管理与森林再造项目。以上这些部门都分别设有省级和其他行政级别的机构，负责相关土地利用、基础设施建设规划和财政行政事宜。而水利部则下设多个河流域委员会，除其他活动外，还负责所在区域范围内污染治理的规划和协调工作（图 3-7）⁹²。

图 3-7. 中国水源集水区管理状况

	农村	城市
土地	国土资源部 国家林业局	住房与城乡建设部 地 / 县级政府
水	水利部	环境保护部 水与环境卫生管理局（当地政府）

对各种水源集水区保护负有首要责任的公共机构。

尽管这些部门分别承担了中国水源集水区保护的不同责任，但是地方政府的作用也不容小视。在许多城市地区，水源供应和卫生保障都是由地方政府成立的水务部门和污水处理办公室来负责。但是近些年他们已经逐渐将大部分的业务承包给了国有或外商合资企业。仅 2007 年，私人资本就参与了中国 50 个水源项目、100 个污水处理项目⁹³。尽管大多数合作都需要与中国国企签订城市供水特许协议，但是这依然不能阻碍外商资本的参与，比如法国公司 Veolia 就已经与 22 个地级市和 9 个工业区签署了城市自来水供应协议⁹⁴。私有资本参与度的逐渐提高，虽然让城市水源集水区保护的难度进一步升级，但是同样也为集水区保护的财政机制创新提供了机会，特别是在自然资本和环境系统服务保护投资方面。

第四章：

利用市场机制保障城市供水安全

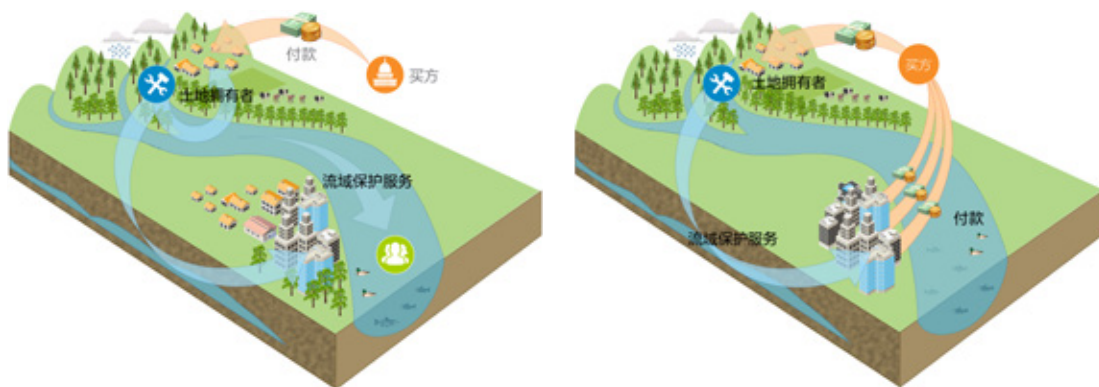
2013 年，党的十八届三中全会宣布中国即将进行一场“市场机制的重大转型”。经济增长不再依赖高水平的国家主导投资，而是推动国内消费成为新的市场活跃因素，让社会资本发挥更大的作用，让市场参与到国民经济领域的各个方面中来。这次变动还涉及环保政策领域，例如开始试行二氧化碳限额交易项目⁹⁵。这项政策与集水区保护直接的关系在于，市场化发展趋势同样也为生态系统服务付费项目（Payments of Ecosystem Services, 后文简称 PES）的发展注入了新的活力，因为集水区保护一直致力于实现自然资本资源（如森林和湿地）的商品化。人们希望通过多个 PES 项目提高城市饮用水质量，纽约市卡茨基尔保护倡议等成功的 PES 模式遵循的都是这一个目标。

PES 项目自上世纪八十年代起在中国开始流行，特别是在林业部门。自 1999 年开始进行集水区投资起，中国已经累计在这一领域投入了 416 亿美元⁹⁶。在大规模的退耕还林还草的过程中，政府利用国家补贴奖励实现加强或保护生态系统服务的土地管理人。尽管国家对这项工作非常重视，但是要完成这个任务，还将面临如土地和水源所有权不清、监管制度不完善、地方政府缺乏自觉、生态系统服务优势不明显、财政资源（尤其是地方财政）匮乏等挑战。此外，与纽约的卡茨基尔项目不同，上述这些项目的出资方不一定就是最终的受益者。因此，现有的集水区服务投资模式恐怕很难保障中国城市用水安全。

协同行动，共建水基金

当然我们还可以采用协同行动基金模式来增加地方用水户的责任感，由下游用水户为上游水源地的保护行动支付相关费用，确保上游水源地水质优良（图 4-1）。这种使用者付费的模式将财政负担转交给了生态系统服务的受益者。从南美到东非，对良好水源的诉求，使越来越多的用水者争先恐后地加入了“水基金”的投资热潮，同时在过程中还建立了一种财政和管理机制，用于确保资金在科学引导下直接流向特定的集水区保护项目中。无论是公共投资者还是私人投资者，都能够从这种机制中受益。当然，这种资源配置方式也起到了很重要的监督作用，既提供了集体规划和决策的空间，同时也让投资者有机会对水资源管理模式发表意见。

图 4-1. 从公共补贴到共建水基金



集水区保护的两种财政模式——公共补贴（左）和下游用户共建水基金（右）。数据来源森林趋势组织撰写的《深入调查：2014 年流域投资状态》一文。

目前，大自然保护协会（TNC）参与了 60 多个类似的水基金项目。在过程中，公共或私人用水户与政府一道积极参与了水源集水区的保护投资。这些项目中有三分之一已经开始正式运行，虽然项目目前主要集中在拉丁美洲，但是

已经开始逐渐走向世界各地。一旦时机成熟，现有的多种研究方法和工具就能帮助人们快速找到适合进行集水区投资的地点。比如，RiOs 就是这样一款免费公开的软件工具，它能够结合生物物理学、社会以及经济数据帮助用户实现集水区保护投资的生态回报最大化。

其实，由政府主导的生态系统服务付费项目在中国已有先例。例如，2005 年北京就与临近的河北省承德市达成了一项五年协议。根据协议规定，北京市每年需向承德市支付 2000 万人民币，用于减缓上游水域的水土流失，协议有效期截止于 2011 年⁹⁷。北京的这项“稻改旱”（后文简称 PLDL）项目旨在将需水量较大的稻田改造成需水量较少的玉米地，因为后者不需要排水设施，土壤营养物质负荷和沉积物流失也相对较少⁹⁸。

地方政府和产业部门

城市建设和工业生产通常会产各种各样的问题，而利用类似 PLDL 这种 PES 机制从问题中发掘价值的潜力却并未得到开发。在中国，区域合作是个例外，因为中国自上而下的政治体系并不鼓励地方的横向合作，这对在水源流域政策架构方面取得重大进展形成了阻力，同时也凸显了地方政府在水源保护过程中的重要性。除此之外，地方政府还在落实森林保护和农业管理实践等措施的资金筹措方面处于重要位置。以北京为例，一切行动都由当地的发展与改革委员会牵头。尽管取得上级机构的授权（以及财政支持）十分必要，但是地方官员才是最重要的把关人。

尽管农业用水仍然占用水总量的绝大部分，但工业和城市用水量也在以年均 3% 左右的速度快速增长⁹⁹。预计到 2030 年，工业用户的用水需求将占用水总需求的三分之一。因此，水量的减少和污染的增加也对工业生产构成了双重挑战，为了满足发展需求，人们不得不到更远的地方开采新的水源用于满足发展的需求。对于能源、矿业领域的大型工业用户来说，面对来自于水源和能源的双重挑战使这个问题显得尤其明显。例如，世界资源研究所就曾表示，中国筹建中的火电厂有超过半数最终都会落址在面临高度或极度供水压力的地区¹⁰⁰。因此地方政府可与工业用水户合作，寻求共同改善方法。同时，随着水质污染日益严重，食品饮料等高水质要求的企业生产成本也在逐渐走高。因此，许多大型私营用水户都愿意支持流域保护，并且在整个支付过程中表现出了很高的积极性¹⁰¹。

中央政府已经意识到了来自于水质和水量的挑战，并且已经在解决水质问题上表达了坚定立场。比如，中央政府最近就出台了“三条红线”政策，规定到 2030 年中国 95% 的河道水质必须达标。随着目标日期的临近，地方官员和工业用户都感到治理非点源污染（以及点源污染）的压力越来越大¹⁰²。

投资中国的未来

当前，中国需要对土地利用的政策和项目进行合理的投资，保护生态环境，为持续发展的城市和工业提供更好的水源供应。这份报告分析证实了，自然类的解决方案（森林保护、森林再造、农业最佳管理实践和河岸带修复）能够有效地降低常见的非点源污染（营养物质和沉积物污染）。

更重要的是，除了节约水处理成本外，投资自然解决方案还能够同时造福大自然和人类。比如，保护和提升重要的陆生栖息地环境，提高水生物种生态环境水质，改善城市集水区内部居住的农村人口用水卫生条件等。除了报告中提及的多种直接正面影响外，自然解决方案还能带来包括增加就业机会，提高偏远地区的公共卫生水平，增加旅游和娱乐机会，保护或强化土壤和植被的碳储存能力等其他益处。

在中国，多方合力共建的水基金模式为大规模落实上述各种方案提供了一种前所未有的机制和机会。鉴于 PES 项目的广泛社会认可度，水基金模式能让地方政府和工业用户考虑到由此带来的影响，并且帮助保护水资源，保护生活在其中的人类和野生动物。将城市水源集水区联系起来，并且有针对性地投资于这些地方的自然解决方案，就是在投资中国未来的水环境。

案例

密云水库

政策引导农业种植类型，改善北京水质

当地概况

密云水库位于北京市东北部，距市区约 80 公里。作为全国的政治中心北京的主要地表水源供应点，密云水库承担了北京市约 70% 的饮用水供应，满足了超过 2000 万城市人口的用水需求¹⁰³。密云水库由白河、潮河和黑河三大水系组成¹⁰⁴，其流域约五分之一位于北京市辖区内，其余部分则全部位于河北省境内。1960 年建成之初，密云水库大坝设计库容为 43.7 亿立方米，主要用于满足周边农业用水需求¹⁰⁵。然而自 80 年代以来，随着北京市经济发展所带来的用水需求量的增加，以及官厅水库等重要水源受到污染等原因，密云水库逐渐成为北京市重要的生活用水来源。

图 1：密云水库示意图。红线为北京市辖区，绿色为水库集水区，红线以外部分位于河北省境内。

(Zheng, H.; Robinson, B. E.; Liang, Y; et al., 2013)



近年来，密云水库流域面临着两大新挑战。其一，在气候变化的影响下，该地区降水量大幅下降，导致水库缺少可靠补给。由于持续干旱以及农业灌溉用水量不断上涨，密云水库目前的常规蓄水量仅为设计库容的三分之一。其二，由非点源污染而导致的可用水质量下降¹⁰⁶。尽管水库周边地区居民人口不到 100 万，但其中 92% 的居民从事与农业生产相关的工作¹⁰⁷。多年来，农田中化肥和农药的使用量不断上升，农业活动影响着水库周边地区的环境，这些都对入库河流水质造成了不利影响。截止到本世纪初，这些农业活动造成入库水中含有高浓度的总氮和总磷，数值几乎是上世纪 80 年代后期的四倍之多，当地社区的经济发展和居民的身体健康因此而受到威胁。

行动和机遇

截至 2003 年，密云水库周边单用于水稻种植的土地就达到 80,937 公顷，每年用水约 2 亿立方米，同时还不断地向水库系统中排放有害化学物质。同年，当地政府决定采取行动确保北京市的用水安全。之后，北京市分三步开展“稻改旱”项目（PLDL），对放弃水稻、改种低耗水型农作物的农民进行经济补偿。该计划首先在北京市辖区内的 2347 公顷集水区展开试点，预计每年节水量可达 400 万立方米。为扩大这一行动效果，“稻改旱”项目第二阶段工程于 2006 年开始实施。这期间，黑河流域共有 7041 公顷水稻田转种玉米、大豆等节水农作物。2006 年 1 月至 10 月期间，黑河入境水量增长近 900 万立方米，大大提升了密云水库的水质和水量¹⁰⁸。同年年末，北京市与河北省签署《北京市人民政府、河北省人民政府关于加强经济与社会发展合作备忘录》，决定在密云水库三大水源集水区（白河、潮河和黑河），共计 6867 公顷的范围内开展“稻改旱”项目，并确保农民在改革期间能够得到足够的经济补偿。

图 2：密云水库，北京，2010 年 8 月 28 日 (Tiger King /CC BY-NC-SA 2.0)



密云水库流域的“稻改旱”项目在非政府组织和当地社区的支持和鼓励下取得了可观的成果，这也是由政府主导的生态补偿机制的一大成功案例。北京城市居民人均收入是密云水库流域周边农民收入的三倍之多，因此通过资金鼓励农民进行农业活动转型，从而提高饮用水的安全性是值得的。北京方面的资金补偿确保了参加“稻改旱”项目的农民收入不仅不会下降，而且还能略有盈余。然而，通过“稻改旱”项目给民众和城市带来的不只是直接的金钱激励。同时，天然纯净的水资源可以改善公共健康状况，并且有助于防范使用污染水源可能造成的有害后果。此外，通过污水处理厂、水资源调配等人工手段来改善水质或提高供水量的成本也将因此大幅下降。中国科学院和北京水资源研究所的一项共同研究显示，在“稻改旱”项目实施以后，水库每年供水量增加 1820 万立方米，水中总磷和总氮也分别减少了 10.36 吨和 4.34 吨¹⁰⁹。

北京密云水库生态补偿机制能够取得成功的原因主要有两个。其一，由于北京政治地位的特殊性，北京市政府能够全权主导项目从设计到执行的整个过程。其二，政府通过调查研究，对此类项目可能给当地社区带来的环境和经济效益做出预估，为“稻改旱”项目的执行提供了动力和指导。

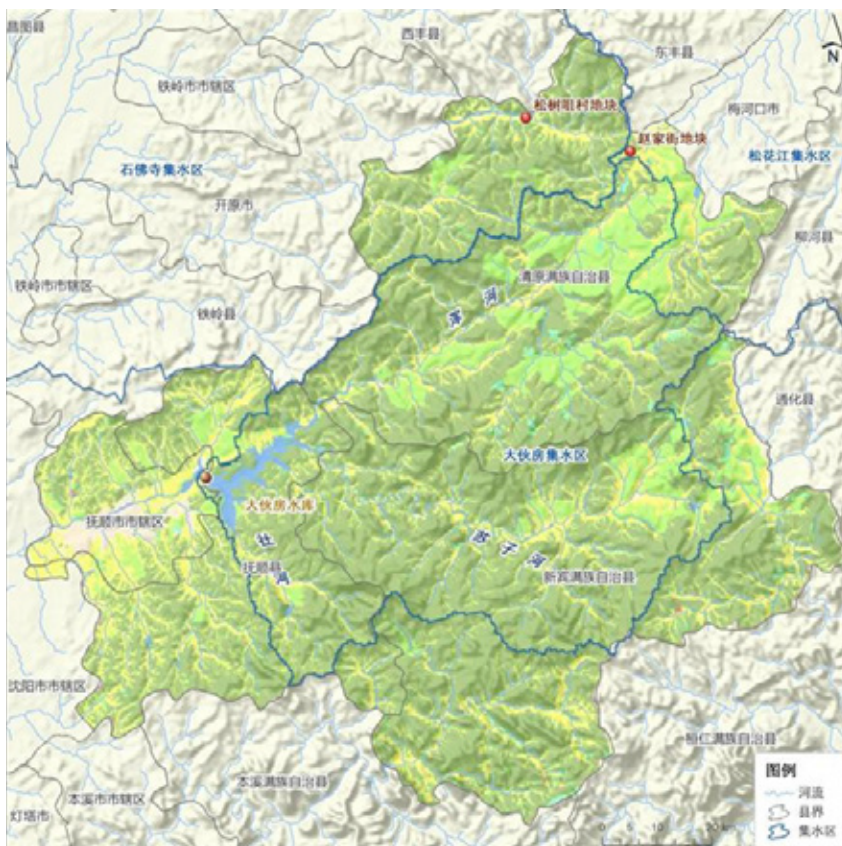
大伙房水库

农业最佳管理实践与合作的重要性

当地概况

大伙房水库是中国第一个五年计划期间兴建的第一座大型水库，始建于1954年，恰逢中国工业化快速发展初期。大伙房水库是辽宁省内最大的集中式饮用水源，水面面积91.2平方千米，年供水量达25亿立方米。主要入库河流为上游的浑河和苏子河两大河流。大伙房水库主要为沈阳、抚顺、辽阳、鞍山、营口以及大连约2500万居民提供生活用水。由于水量供不应求，该地区人均水资源占有量仅820立方米（不足全国平均值的三分之一）。根据一项省内新的供水工程计划，未来将新增5座城市加入大伙房水库的供水名单中。这一计划将进一步加大水库满足城市用水需求的压力。与此同时，大伙房水库还面临着因主导水库流域约54.2万公顷土地的农业生产所造成的水质下降的重大风险。

图1：大伙房水库的地理位置



据估计，因水库流域附近地区落后的工农业操作和管理技术，每年约有2556吨化肥和25吨农药进入大伙房水库库区水体，其总量相当于每年排放74979吨沉积物、1700吨总氮以及74吨总磷¹¹⁰。这些沉积物和营养物负荷的涌入大多发生在夏天，与农田污水排放密切相关¹¹¹。这类污染和水土流失不仅造成了水库集水区水质的下降，而且还破坏了集水区过滤有害物质和自我修复的自然能力。

行动和机遇

2014 年，辽宁省政府根据“调整、治理、培育、管理”四位一体的思路，采取措施保护水库资源，希望以此解决相关城市面临的水危机。其行动的第一步是确定一级保护区，实施退耕还林，将选定地区的农田转用于天然林的种植。一级保护区占地总面积 2213 公顷，政府采取财政奖励机制，从农民手中租借土地，种植树木、恢复湿地。针对一级保护区以外的区域，政府在鼓励发展有机农业的同时，还要求工业企业运作必须严格遵守生态标准，否则须搬迁。

辽宁省还推出了发展有机农业的五年规划，鼓励支持大智然（北京）生态农业有限公司发展“双零工程”。这一计划旨在实现清源县境内大伙房水库集水区超过 635 公顷试点农田的化肥、化学农药零施用 / 零增长。2015 年，大自然保护协会（TNC）与大智然签署合作备忘录，负责监督计划的开展工作，并计划于 2016 年试点面积达到 1300 公顷、2020 年达到 6.7 万公顷，同时分别对工程结果进行分析。工程实施一年后，发展有机农业取代传统农业的方法仅造成 10% 的产量下降。同时，大自然保护协会（TNC）在与清源县政府合作的过程中，也能协助该地区监督并展示健康的生态系统为民众和城市带来的服务。希望通过提供支持和指导，帮助中国了解水基金战略的实施方法，并在未来的若干年中从自然中获益。

图 2：大伙房水库，2012 (Patrick Lepetit)



通过改善地方法规、执行生态补偿机制以及设立专门的执法机构，受保护地区的可持续管理工作不断加强。

总的来说，辽宁省新的环境保护活动在减少农药和化肥流入库区水体的同时，还增强了森林和湿地过滤污染物的自然功能，并起到了阻挡沉积物的作用。得益于此，大伙房水库水质得以提高，造福当地居民及野生动物，同时城市内相应的水处理成本也因此降低。据最新的估算，大伙房水库上游流域生态系统服务的价值在 9000 万到 6.56 亿人民币之间¹¹²。

鹤庆草海

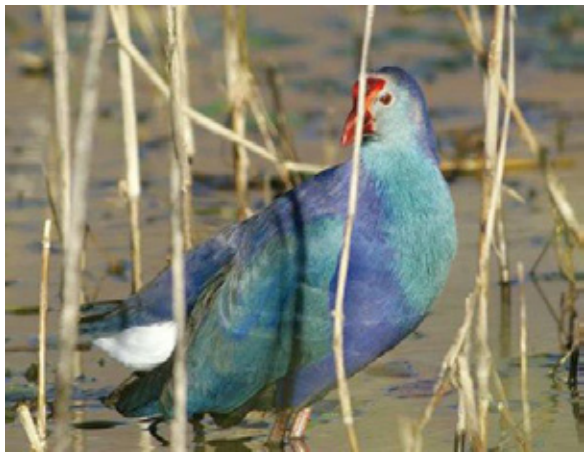
保护湿地，造福人类和野生动物

当地概况

湿地是城市水源地的重要组成部分，不仅能为城市居民提供饮用水，同时还兼具蓄洪防旱、调节气候、为野生动物提供栖息地、净化水体等功能。然而，国家林业局第二次湿地资源调查报告显示，过去十年间，中国自然湿地面积减少了近 337.62 万公顷¹¹³。除此之外，由于城市发展、工业活动、缺乏保护和规范等原因，许多现存湿地生态系统也遭到破坏，其供水功能随之减退。

“中国的淡水资源大部分储存在河流湿地、沼泽湿地、水库以及水塘湿地之中，以这些形式存在的淡水资源总量约 2.7 万吨，约占中国可用淡水资源总量的 96%。”¹¹⁴

图 1：草海的紫水鸡，2010 (WildChina)



鹤庆县位于中国云南省，境内湿地类型丰富多样，地下水资源较为丰富，曾形成上百个泉潭。因而，保护湿地资源成为该地区的首要任务。近年来，草海湿地及其周边流域成为鹤庆县关注的焦点。这片区域不但为周边将近 4500 公顷的农田提供农业灌溉用水，同时还需满足周边 2 万多居民的饮用水需求。除此之外，它还是滇西重要的候鸟迁飞通道和越冬栖息地。

中国大自然保护协会（TNC）近期调查结果显示，9570 只越冬水鸟会迁徙到草海湿地过冬。研究人员还在这里发现了稀有鸟类紫水鸡。据不完全统计，这里的紫水鸡种群数量为 300-500 只，是我国已知最大的紫水鸡种群¹¹⁵。

不幸的是，在人类活动的影响下，草海湿地逐渐演变成了湖泊，其作为自然缓冲，调节流量、过滤污染物质的能力也因此下降。草海湿地的进出水因经常受到人类活动的影响，不断接受来自农业和畜牧业的径流，使水中包含化肥、农药和激素等污染物。其次，当地村庄的生活废水、旅游业污染以及金银工艺品制造过程中所产生的有毒废料也是导致流域水质污染的主要因素。

行动和机遇

2013 年，四川省武平县老河沟自然保护区成为首个由政府监督、民间管理的保护区：大自然保护协会（TNC）则为该保护区的科学技术管理顾问。这种形式的行动和努力也很快催生了其他保护项目，如 2014 年 12 月，大自然保护协会（TNC）与鹤庆县政府、四川西部自然保护基金会签署了为期 3 年的合作协议，探索建立鹤庆西草海湿地社会公益型保护示范项目¹¹⁶。

新推出的战略计划大力推动退田还湿、在特定地区禁渔、修复野生动物自然栖息地等行动，甚至修建人工湿地，使周边农业废水在流入自然生态系统之前将其净化。为了减少污染，新计划还将针对污染的类型、源头和严重程度，采取不同的防治措施，包括：

- 为了治理农业面源污染，在入水渠内修建人工湿地。

- 为了减少周边社区的固体生活垃圾，政府将建立封闭式污水处理系统和配套的处理设备，同时加强对当地居民的环保意识教育，宣传环境保护的重要性。

- 由于工艺品制造过程所产生的污染物含有大量有毒物质，因此涉及废水分类处理的相关规定正在变得愈发严格，同时加强水文监测以及对相关影响和未来所需步骤的评估。

自元代（约 7000 年前）以来，当地少数民族白族就有敬水爱水的风俗传统。鹤庆西草海湿地保护项目计划复兴并鼓励白族这一生态传统，希望能够把水资源的可持续发展融入到当地居民的日常生活中。

为了有效地管理各项工作，草海项目还把湿地划分为保护区、教育区、生态农业区、农村民俗风情区以及旅游区，每块区域都配备有特定的管理办法和执行技巧。项目还计划提高栖息地的多样性，为 8000 到 10000 只越冬候鸟提供保护。

草海项目突出强调了保护湿地资源造福人类和野生动物的可行性，并着眼于发挥当地风俗传统的潜在力量。保护草海流域，改善流域水质，不仅有利于当地生物多样性的发展，而且能够服务周边社区，为社区居民提供清洁的灌溉、饮用和娱乐用水资源。

龙门嘉泉

社会多方合作保护水源

当地概况

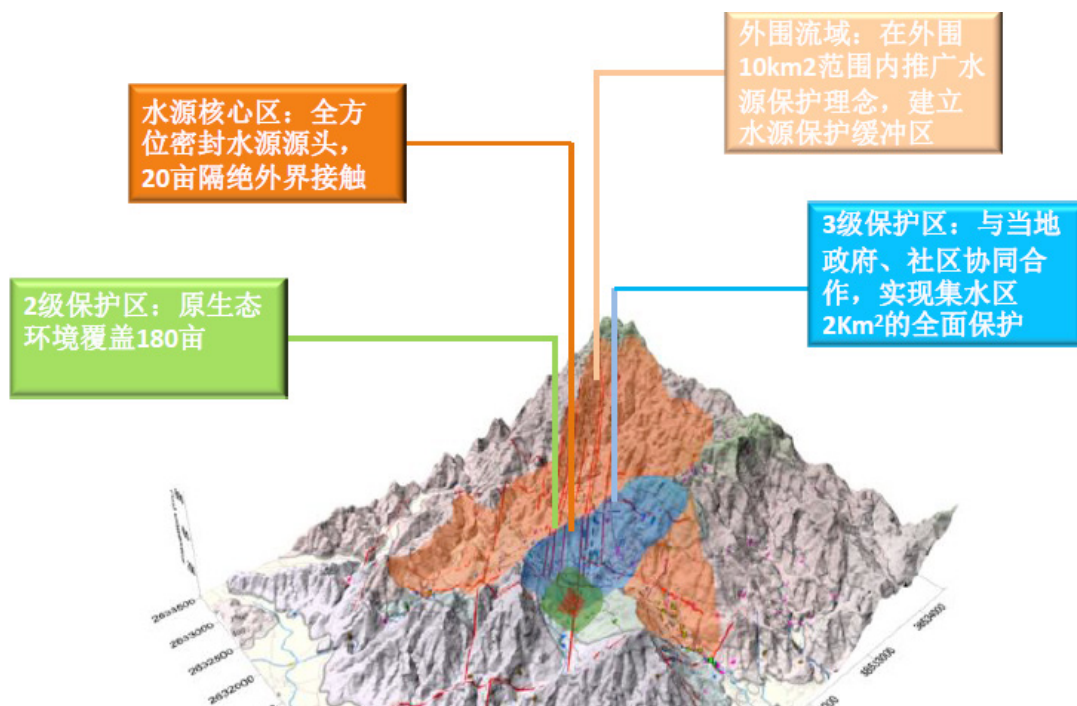
东江发源于江西南部，流经广东省，是香港、广州、深圳、惠州等大城市的重 要饮用水源地。嘉泉水源地位于广东省境内的龙门县，地处东江中游，是东江流域的一部分。

行动和机遇

达能中国饮料（DWC）是法国达能集团旗下的子公司，主营食品和饮料。2000 年代末，达能正式将龙门嘉泉作为其瓶装矿泉水的水源地。因此，达能愿意主动承担社会和环境责任，在世界自然保护联盟（IUCN）的帮助下与龙门县政府建立合作关系，努力把龙门建设成为一个生态区，使当地及下游居民从中受益。遵循达能全球水源保护条例，2011 年起达能连同 IUCN 和当地县政府一起，制定了嘉泉水源地的三级保护区计划。

第一级保护区为全方位封闭式管理区域。经龙门县政府允许，达能集团选定其矿泉水水源地周围的一公顷土地为水源核心区，进行全天候监控，保障水源安全。

图 1：公私合营项目：2011 年龙门嘉泉水源地保护计划，2015（达能）



第二级保护区是在水源周围圈定 12 公顷土地，用于种植生态公益林，特别是用于种植天然的本地植被。第三级即最后一级保护区覆盖面积更为广阔，达能集团与当地政府、社区和村民合作，共同推动农业的生态转型。在 IUCN 的帮助下，达能集团开展了相关项目试点，为当地农民提供相应的技术支持和管理指导，并用试验田比较施化肥的农业耕种方式与生态农业实践的实际成效。与此同时，达能集团还为当地农民提供了产品包装和营销方面的相关支持，帮助当地农民从可持续农业实践中获得收益。在这些保护措施下，嘉泉水源样本抽查从未发现有任何污染物的存在。

图 2：人工林旁的天然林，中国广东省龙门县，2011（Li Jia / IUCN）



值得注意的是，嘉泉水源地保护工作之所以能够取得成功，其主要原因在于参与保护的利益相关方都能从中受益。达能集团希望保证其产品质量，确保生产的可持续性，因而愿意为保护项目提供技术和资金支持；而龙门县政府则是希望在平衡当地经济发展与外部政治压力的同时保证当地的环境质量。因此，二者在世界自然保护联盟的帮助下所结成的公私合作伙伴关系就成了最佳解决方案。与此同时，当地农民获得了就业机会以及发展生态农业的技术成果，下游居民日常用水的质量也得到了改善与保障。

龙坞

中国水基金模式实施过程中的里程碑

当地概况

浙江省是中国经济最活跃的省份之一，强大的商品制造业是推动其经济发展的主要动力；同时浙江素有“鱼米之乡”的美称，农业产业也十分发达。但是随着经济和城市化的不断发展，其资源需求量亦不断增加且得不到根本满足，水资源也面临着过度消费和退化的威胁。近年来，为了保证城市供水，浙江省政府开始关注水资源的管理与保护，投资兴建大中型水库，但是却忽略了很多有重要意义的规模较小的水库。龙坞水库就是其中之一。

龙坞水库位于浙江省杭州市余杭区黄湖镇的东北角。上世纪 70 年代，龙坞水库曾是农业灌溉水源，如今其主要功能是为周围村民提供生活用水，特别是为青山村和赐壁村周边约 3000 名村民提供日常饮用水。龙坞水库的规模较小，总库容为 35.44 万立方米，日供水量仅为 340 立方米。

2014 年 7 月，北京农学院发布水文监测报告。报告显示，龙坞水库各项水质指标几乎（29 项中有 26 项）都达到了国家一、二类水质标准，仅总氮、总磷和溶解氧含量三项指标属于国家三类或者四类水质的标准。而这三项指标就直接导致水库整体水质下降，也对饮用供应造成了一定威胁。

龙坞水库集水区内没有居民居住，但毛竹产业占据了集水区内 107 公顷的土地，约占集水区总面积的 61%。有评估显示，毛竹种植过程中使用的肥料和除草剂是导致水库水源营养物污染的主要原因。

图 1：龙坞水库（Haijiang Zhang / TNC）



图 2：龙坞水库集水区 and 施肥地块示意图（红色）（Dezhi Wang / TNC）

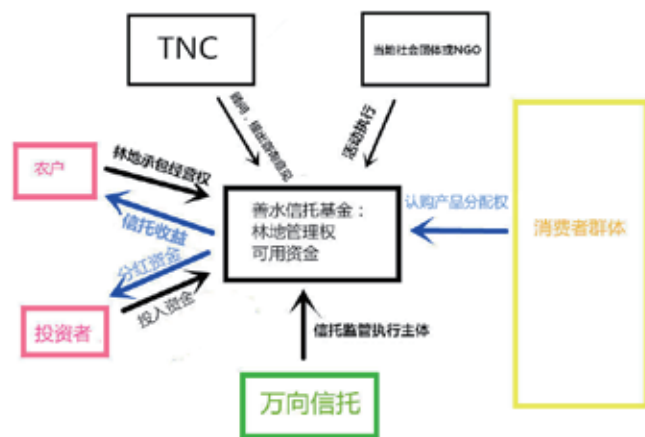


行动和机遇

大自然保护协会（TNC）于 2014 年开展的一项野外调查显示，施肥农户平均每年每公顷毛竹林纯利润为 23 元人民币，不施肥农户每年每公顷纯利润为 13.2 元人民币。相比较于其他农产品收入，毛竹收入通常只占农户总收入的 1%-20%，因而农户对毛竹产业依赖程度低，这就为政府向农民提供适量补偿费用、鼓励其转向生态竹笋的种植提供了很好的机会。同时经农户访谈获知，农户对饮用水问题较为关注，并且希望参与到保护水资源安全的实践中去。

为了治理水库污染、确保周边居民的饮用水安全，大自然保护协会（TNC）尝试在城市集水区管理中引入新型信托基金模式。2015 年，协会与黄湖镇政府签署协议，由当地政府、农民、非政府组织和一家信托公司合作建立一种新型商业模式，对土地进行更环保化的管理。龙坞项目就是中国大自然保护协会（TNC）首次使用水基金信托模式建立的水基金（图 3）。

图 3：龙坞项目的水基金信托结构图（Haijiang Zhang / TNC）



龙坞项目旨在消除非点源污染，解决下游居民饮用水安全问题，建立新型信托基金模式，采取保护措施管理水源。通过向农民提供种植生态竹笋以及发展生态体验式旅游等可行的替代方案，使当地竹类产业走上可持续发展的道路。这种新型土地信托项目如果能够成功改善集水区管理和水库水质，就极有可能辐射到周边地区，甚至可能为其他地区所效仿。

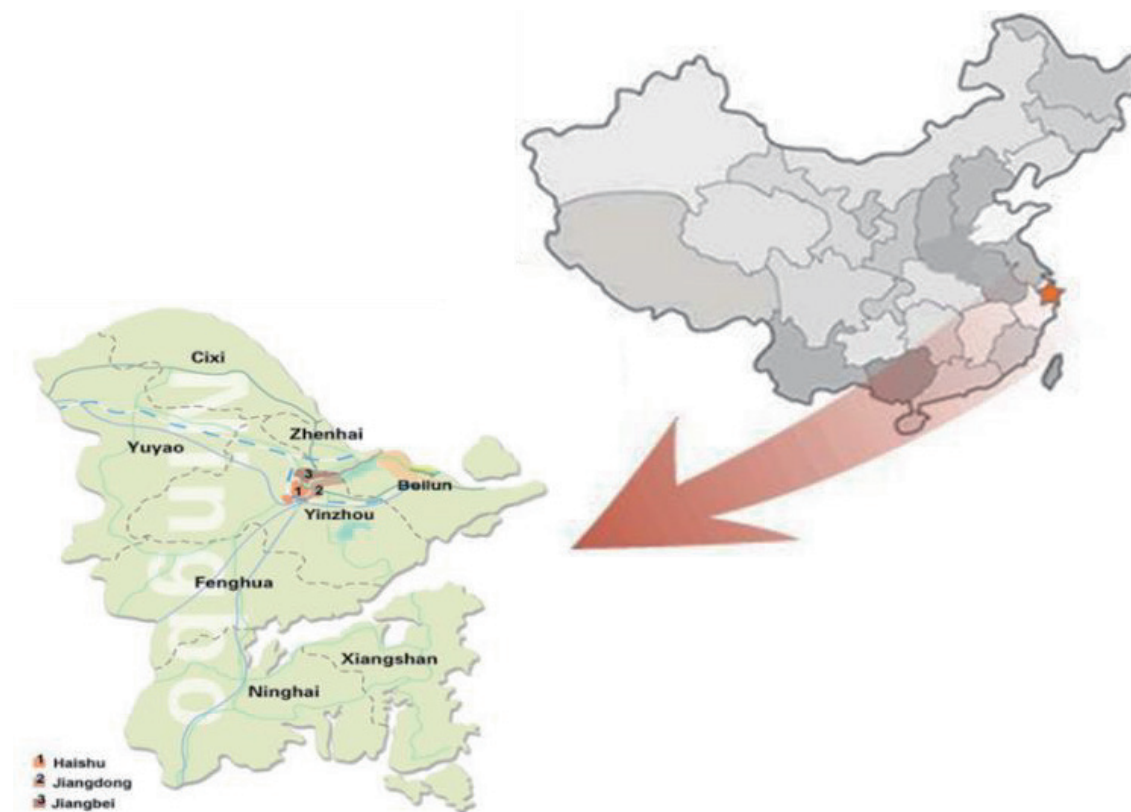
宁波

把握正确时机，确保水安全

当地概况

宁波市位于浙江省东部，地处长江三角洲南翼，是国家级历史文化名城，城市发展迅速¹¹⁷。宁波的字面意思为“海定则波宁”，暗指其位于中国东海沿岸。近几十年来，宁波市着力发展经济，推动城市化进程。在扩大基础设施的同时，宁波的制造业和农业也经历了前所未有的增长。2000 至 2010 年间，宁波市人口增长率达到了 27.56%。截至 2013 年，宁波市各区人口总和超过 1000 万¹¹⁸，GDP 达到 7128.9 亿人民币，人均生产总值为全国平均水平的三倍。

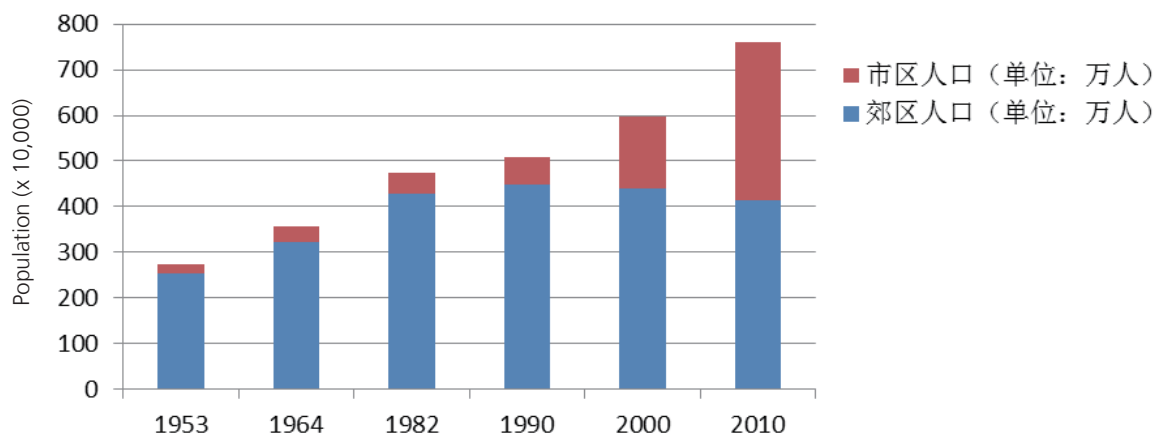
图 1：宁波市位于中国东南沿海地区



近几十年来，宁波市经历了两大主要变化。经过城市人口和土地使用的大规模增长，和城市经济从以第一、第二产业（农业和制造业）为主导向依靠第二、第三产业（服务业）的转型¹¹⁹。如今，宁波港已经成为世界上最繁忙的港口之一。但这种发展模式同时也导致了该地区资源严重减少和退化，并且威胁着宁波市的清洁水源。

宁波市的淡水主要来源包括地下水、余姚河、奉化江和甬江。尽管宁波地区在季风季节（5 月至 9 月）拥有充沛的降雨量，但其年地表径流为 73.36 亿立方米，人均可用水量相对较少¹²⁰。宁波市人均水资源占有量仅为 1260 立方米，为世界人均水资源占有量的 1/6，低于世界中度缺水警戒线 1700 立方米¹²¹。宁波市已经意识到了其水资源短缺以及水质下降等问题，正要开始朝着正确的方向前进努力。

图 2：宁波市 1953–2010 年间人口数据（中国国家统计局，2011）



行动和机遇

宁波市解决水危机问题的第一步，是根据水质和用水户类型的不同，采取不同的供水方案。饮用水供应源集中向大中型水库进行转移。

目前，宁波市政府与绍兴市新昌县合作投资 26.88 亿人民币建设钦寸水库，建成后通过隧洞引水至宁波市的亭下水库，每年平均可向宁波市区供应优质原水 1.26 亿立方米¹²²。然而，根据分质供水和远程引水仅仅能满足截止到 2020 年的预测城市饮水需求量。因此，政府可将新的工作重点放在改善宁波市现存集水区周边的农业活动上，减少污染水源的肥料、农药和除草剂的使用数量。为此，宁波市政府已经采取了以下行动：

- 出台新政策，实施新的水处理体系，解决五大核心问题（污水、洪水、涝水、供水和节水）。这一新体系需要所有政府相关部门通力合作，同时也需要通过河段责任政策分配领导工作。宁波市政府制定了《宁波市饮用水源保护和污染防治办法》、《饮用水源突发环境事件应急预案》、以及《宁波市农民饮用水工程长效运行管理考核办法（试行）》¹²³。

- 保护集水区。编制完成《宁波市水资源综合规划》、《宁波市饮用水水源地环境保护规划》，整合生态保护红线，修订了宁波市城市总体规划（2006 - 2020 年）¹²⁴。

- 筹措保护资金，积极探索生态补偿机制。2004 年，宁波市第一个生态公益林项目投入试点。此后，当地政府积极推广建设生态湿地系统、清洁型小流域、水土保持等项目，投入水资源保护资金 8000 余万元¹²⁵。

由于第一、第二产业耗水量巨大，对水处理要求较高，因此继续向第三产业过渡也能够有效地缓解用水需求，同时降低污染造成的压力。

近年来，城市集水区保护工作有了很大进步，但工业、农业生产和居民日常生活所造成的污染仍需解决。因此，水基金因其连接城市规划者、政府和上游农村用户的能力，很有可能成为未来一个可操作的机制。所有的利益相关者，包括城市居民、社会组织、企业和行业，只要投资支持生态系统的健康发展，就能从中获得生态效益。有了社会各界对水基金的支持，类似恢复自然栖息地、发展有机农业以及向农民提供森林补偿的这类行动就能够继续提高宁波市的水量 and 水质。

青岛

水资源配置的平衡

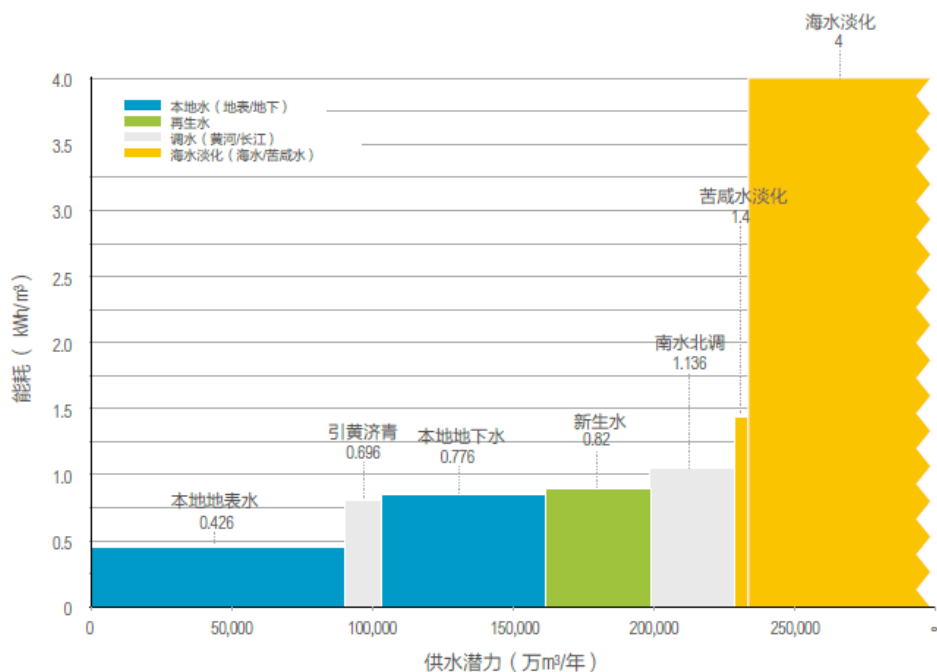
当地概况

青岛市地处胶东半岛沿海地区，是山东省最大的工业城市和经济中心。但同时青岛市也是严重缺水型城市，其淡水资源已经无法满足当地 871 万常住人口的正常用水需求。2010 年，青岛市人均 GDP 为 75,763 元人民币，相当于全国同年平均水平的 2.2 倍。当地居民虽然享受着经济强势发展带来的效益，但可用水资源却十分有限，青岛市人均水资源占有量是 313 立方米，仅为全国平均值的 12%。虽然当地居民有良好的节水习惯，但仍超出该市 171 立方米的人均可利用水资源量（相当于中东国家约旦的水平）¹²⁶。目前，当地水资源约有 40% 用于城市，但青岛全市用水量早已突破 10 亿立方米，并在持续增长中¹²⁷。

行动和机遇

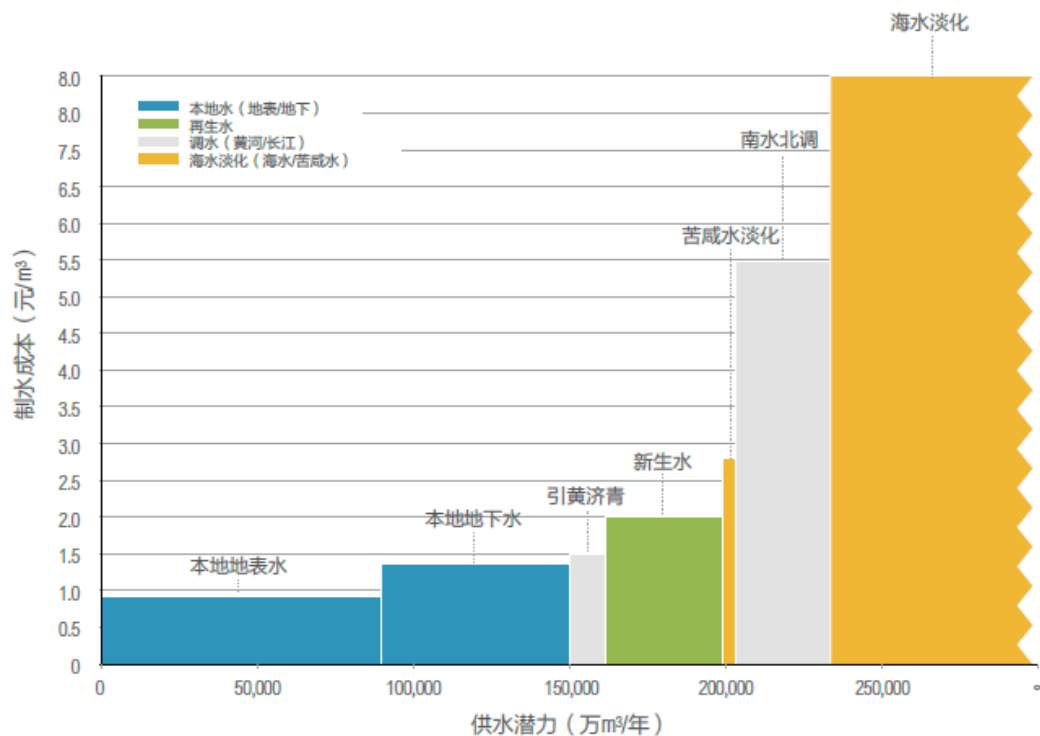
自 20 世纪后期以来，保护青岛市地表水源的水质和水量就已成为关系到其存亡的重要事情。青岛市最重要的本地水源大沽河是胶东半岛上最大的河流，其汇水区占到青岛市流域总面积的 78%。青岛市在其行政区内的流域上游建立了产芝和尹府两座水库，作为该市的主要地表水来源。然而，单一保护这一供水源已不足以持续满足青岛市不断上涨的用水需求。为了获得足够的淡水资源用于满足城市用水需求，青岛市已经开始采取其他策略，例如利用淡化海水、长距离跨流域调水、污水再生利用等方法来解决缺水问题。但这些方法都会造成一定的能源消耗并对温室气体排放造成直接影响，因此寻求正确合理的水资源配置方式是迈向成本和污染最小化的重要一步。

图 1：青岛市各种制水方式的能源需求量（温华，钟丽锦，付晓天,Simon Spooner, 2014）



世界资源研究所（WRI）的《城市水源选择的水-能源关联分析：以青岛为例》报告中显示，使用本地地表水源的单位制水成本最低，单位能耗仅为海水淡化的 1/10 左右¹²⁸。因当地以燃煤发电为主，最大限度地利用海水淡化技术将会导致青岛单位立方米制水的温室气体排放量增长 80%¹²⁹。因此，增加本地地表水库的可用水量，也会减少能源消耗和污染治理成本。保护本地地表水的水质和水量不仅有助于确保用水安全，而且能够在减少能源消耗、节约制水成本、降低温室气体排放的同时，确保城市供水更加清洁。

图 2：青岛市各种制水方式的成本（温华，钟丽锦，付晓天, Simon Spooner, 2014）



青岛案例说明，生态保护能否有效地保证城市饮用水供应实际上是具有一定条件性的，集水区生态保护并不是适用于所有地区的。类似青岛这类城市就需要从自身情况和自然资源出发，找到正确合理的解决办法。因此，开展系统筛选，确定水基金或其他替代机制所适用的城市是十分必要的。青岛市不仅需要建设新的水库，还必须找出替代的淡水资源，从而在成本效率和环境健康之间达到平衡。通过青岛案例可总结以下四点供其他城市学习借鉴：

- 本地水源通常是成本效率最高、能源消耗量最小的水源¹³⁰。
- 保护本地水源有助于规避主要的资本成本、减少重大污染。
- 随着人口的增加，城市不可避免地需要开发各种不同的新的供水源。

- 开发新的水源时，比较全部成本（包括污染和能源消耗成本）能够帮助城市找到正确的平衡，以较低的财政和环境成本保障用水安全。

方法

城市水源地

样本城市选择

本研究以大自然保护协会（TNC）之前在全球城市水蓝图中城市的水危机以及应对水危机的机会为基础¹³¹。在之前的研究中，大自然保护协会（TNC）整理了全球 500 多个城市的供水来源，其中包括 18 座中国城市。而本研究则基于之前的研究基础关注中国发展速度最快、规模最大的 30 座城市。

麦肯锡全球研究所（MGI）Cityscope 数据库将常住人口超过 200 万的城市定义为大城市¹³²。在该数据库中，我们以 2010-2025 年预测的 GDP 增长为标准（增速预测同样来自 MGI 的 Cityscope 数据库），选择了发展速度最快的 30 座城市为样本城市。样本城市如表 1 所示，其中带 * 号的城市与全球的《城市水蓝图》报告相同。如果某个城市的供水信息因数据匮乏无法获取，则会剔除该样本，按发展速度递推到下一个城市为样本。

表 1：中国样本城市名单。

受调查的中国城市	
北京 *	昆明 *
长春 *	南京 *
长沙	宁波
常州	青岛 *
成都 *	上海 *
重庆 *	沈阳
大连 *	深圳 *
东莞 *	苏州
佛山	天津 *
广州 *	武汉 *
杭州	无锡
哈尔滨 *	厦门
合肥	西安 *
香港 *	徐州
济南	郑州 *

带 * 号的城市同时也包含在 2014 年已发布的《全球城市水蓝图》报告中。

此外，样本城市信息的另一个挑战是界定城市边界¹³³。中国不同时期的行政区划有所不同，这种边界的模糊性可能会导致不同数据源之间出现不一致甚至矛盾的情况。在城市数据的收集过程中，本报告中界定的研究边界为城市的城区以及特定市或地级市的发展新区，城市辖区内的农村县市不在研究范围之内。

取水信息

本报告中样本城市的供水数据（表 2）全部来自各种公开的信息渠道。政府或自来水公司的出版物是主要原始数据的来源。当此类数据不可得或不完整时，我们会通过学术文献期刊及互联网搜索补充收集等。其次，如果同一个数据存在不同来源，我们会进行对比作为核查。总体而言，水源名称、类型以及供水企业信息的数据比较容易获取；而城市取水点坐标和取水量等数据收集则相对困难。极少数特定情况下，我们使用可信度较低的信息，如通过自来水公司网站或官方新闻稿中找到相关的水源信息。城市的水源地名称确定的情况下，我们就会使用谷歌/百度地图等地理地图进行定位。部分情况下，我们会在处理数据的地理信息系统 (ArcGIS 10.2) 中加入对这一水源的描述性文本，例如：“该水源位于流入这座城市河流的上游三英里处”。

表 2：各城市、水源和供水厂的原始数据变量

城市	水源	供水厂
名称 城市中心坐标 自来水供水厂	名称 水源类型 水源年取水量 取水点坐标	名称 取水水源 水源年取水量

我们将以上收集的数据与现有的城市相关属性数据库结合，形成城市水源地图（City Water Map）。城市水源地图为关系数据库，采用层级结构，能够清晰地展示城市、水源地和供水厂之间的多重对应关系。例如，一个自来水公司从多个水源地取水，供应的城市也可能不止一个。

确定集水区

本报告主要关注城市的地表水源，因此除非特别标注，所有的计算对象都是地表水源。但是，考虑到其它类型的水源对供水的影响，我们在分析中也计算了其它来源（包括地下水以及海水淡化）的水量占供水总量的比重。此外，冲击层地下水多由地表水通过河床渗滤的净水方式形成，因此我们将冲击层地下水取水点纳入为地表取水点。我们还会根据其所在的水文河流系统校正收集到的地表水源取水点位置，只有这样，才能使用全球高分辨率水文数据集 HydroSHEDS¹³⁴（HydroSHEDS 数字高程模型数据是美国国家航空航天局（NASA）太空梭雷达地形测量数据（SRTM）经过处理得到，以保证水文路径正确。）中来提取集水区。如果不对取水点进行水文系统校正，取水点定位稍有偏差就会导致可用水量预估出现很大误差。首先，针对离海岸 10 公里范围内的地表水源取水点，通过手动调整位置来确保它们对应的水文流域不与咸水区相重合。其次，将位于湖泊的取水口调整至湖泊的出水口，即全球湖泊、水库和湿地数据库（GLWD）¹³⁵所说的湖泊功能的最低点。此调整让我们能够正确地计算出湖泊集水区面积和相应的可用水量。最后，我们利用 ArcGIS 中的 Snap Pour Point 命令，对取水点位置调整为该点 5 个单元格内（2.5 公里）的最大汇水量位置。

水质

污染物

地表水质分析的主要对象是自来水公司关心的两大污染物：沉积物和磷。尽管其他污染物（如粪便大肠杆菌污染）对供水管理者来讲也很重要，但本报告中涉及的保护措施针对的主要对象限定为上述两种污染物。

在全球研究中同时关注了集水区氮（N）和磷（P）的污染负荷量¹³⁶。但事实上，我们发现氮和磷的污染度有着极高的相关性，无论是选择氮或磷作为衡量指标，其分析结果都相近。因此，为了保证报告的简洁，我们仅选择磷作为衡量营养物污染度的指标。

沉积物模型

全球沉积物污染评估使用的是改进版的通用土壤流失方程：沉积物负荷量 = RKLSCP。

其中 R 为降雨侵蚀力因子，当前气候下该因子的全球分布数据可在 climatewizard.org 网站获取。K 为土壤可侵蚀因子，估测这一因子主要采用 Roose¹³⁷ 的研究方法，将世界土壤数据库（Harmonized World Soils Database）中的土壤质地值转化为 K 值。LS 为坡长因子，我们基于 HydroSHEDS 中 15 秒分辨率 DEM，采用与自然资本项目（Nature Capital Project）的沉积物截留模型类似的方法进行估测¹³⁸。农田和利用活动（CP）因子涉及到植被覆盖和土地利用活动的情况，不同土地利用类型的平均价值取自 STEPL 模型以及水处理模型（Water Treatment Model）¹³⁹。本报告使用的土地覆盖数据来自中国国家地球系统科学数据共享平台 2005 年推出的中国 1:25 万土地覆盖遥感调查与监测数据库¹⁴⁰。土地覆盖主要分为 6 个大类：农业、草原/草地、森林、荒地、城镇、水体/其他。

为了评估集水区内的沉积物负荷量，我们曾采用了方法类似的在美国的污染负荷量估计值与建立在数以千计的河道观测值基础上的 SPARROW 数据集进行对比¹⁴¹。我们估计的负荷量与 SPARROW 的数据值相关性较强（ $R \sim 0.8$ ）。根据 SPARROW 的估计值，我们利用对数线性回归方程对中国城市的研究结果进行校正。本报告中所有的数据结果都已经经过了沉积物负荷量校正计算。

营养物模型

集水区中每种土地覆盖类型的单元中都会输出一定数量的磷，因此磷负荷量的估算使用了输出系数法。输出系数值来源于 STEPL 模型以及水处理模型（Water Treatment Model）中不同土地覆盖类型的平均值，即森林、荒地、城市、水/其他类型的土地覆盖的输出系数恒定不变。而针对农业、草原/草地的磷输出量，我们则以全球肥料和粪肥（GFD）v1 数据集的全球网格为基础数据¹⁴²，假定农业用地以 GFD 确定的速度使用粪肥和化肥，而草原/草地则只使用粪肥。营养物质利用效率（NUE，即被植物或土壤吸收、且没有输出的部分）的估计采用的是 Bouwman 等人的 NUE 陆地水平数据¹⁴³。

和沉积物负荷量的估算方法一样，我们采用了类似的在美国的污染负荷量估计值与 SPARROW 观测数据集进行对比，估计负荷量与 SPARROW 数值相关性较强（ $R \sim 0.8$ ）。根据 SPARROW 的估计值，我们利用对数线性回归方程对研究结果进行校正。本报告中所有的数据结果都经过了磷负荷量校正计算。

水质风险衡量指标

报告中水质风险的衡量指标为产沙量（吨/平方公里）和产磷量（千克/平方公里），即负荷量和集水区面积的比值。其中，污染物负荷量可通过刚才构建的沉积物和磷载入模型进行估算，集水区面积则已使用 HydroSHEDS DEM 的生成数据。

在做城市水源集水区保护对于减少污染物的可行性分析时，我们以污染物负荷量的数值变化作为衡量指标。水源中污染物浓度对净水处理厂的运营和维护（O&M）成本常常有着很大影响，其计算公式为

$$\text{污染物浓度} = \frac{\text{污染物负荷}}{\text{流量}}$$

值得注意的是，在研究过程中，我们关注的是某一集水区污染物负荷量的变化对水质带来的影响。假设集水区开展针对减少污染物的治理活动并不会影响水量，则污染物浓度变化量将等于实施污染治理前后的负荷量的比值。

$$\Delta \text{污染物浓度} = \frac{\text{污染物负荷}_{\text{终}}}{\text{流量}} \div \frac{\text{污染物负荷}_{\text{初}}}{\text{流量}}$$

水质改进方案

我们开发了四类常见的水源集水区生态保护方案，其介绍见下面的文本框（文本框 1）及报告正文第 3 章。

文本框 1. 四种代表性水质改进方案介绍

水质改进方案简介

森林保护是指保护特定自然栖息地不受经济发展或人类其他土地利用活动的破坏，不得将自然栖息地转作其他用途。虽然报告主要关注森林保护，但在不同背景下，其他类型的自然栖息地保护也十分重要。森林保护包括从土地所有者处购买土地，即在国家允许保护地役权的情况下购买土地的开发权，或者政府凭借征用权直接将土地指定为保护区。需要注意的是，尽管森林保护消除了未来沉积物增加或营养物质输移的风险，但并不能减少当前的年污染物负荷量。

森林再造指通过天然更新或植树，恢复目前已消失的林地。鉴于农业土地的经济重要性，大面积退耕还林会造成很大的经济损失，因此报告仅关注牧场的再造林情况。同时，我们仅关注以森林为自然土地覆盖的区域。森林再造能够稳定土壤从而减少沉积物和营养物的输送，同时牧场的森林再造也消除了牧场粪肥和化肥的沉积，进而减少营养物质输入水体。

农业最佳管理实践（BMPs）指农业土地管理中的一些能带来积极环境影响的活动。报告中特别关注农田最佳管理实践所带来的土壤流失和营养物径流的减少。现有的农田最佳管理实践种类繁多。因其可适用于多种农田类型且已得到广泛的应用，非庄稼季节的植物覆盖成为农田最佳管理实践的代表。但需要强调，如果考虑其他旨在减少土壤流失和营养物径流的最佳管理实践，最后将得出类似的计算结果。

河岸带修复，又称河岸缓冲带建设，指修复河流或溪流两边一小片区域内的自然栖息地。在报告中，我们主要关注农业土地上的河岸缓冲带建设，这些缓冲带在过滤农田径流、防止沉积物和营养物质流入河岸区域等方面发挥了重要作用。

每一项水质改进措施的效果评估结构都是类似的。每项措施在减少沉积物负荷量和磷负荷量的平均效果的参数值来自于文献综述（见表 3）。这篇综述也分析了每种水质改善措施在哪里可以有效地展开。我们在地理信息系统中测试了所有能够开展以上水质改善措施的单元格，并定量评估平均每公顷土地在开展各种措施后减少的沉积物和磷的负荷量。将每个单元格的负荷量叠加就得到了水源集水区减少的污染物的总负荷量。表 3 详细描述了水质改善措施的开展方式。

表 3：水质改善措施评估中所用参数

实践	适用区域	泥沙或磷负荷量的减少比例	文献来源
森林保护	按照 WWF 生态区边界，目前处于自然区域内的森林单元格。	污染物载入的预期增长，即栖息地减少的可能性乘以污染物载入的变化量。 在不采取保护行动的情况下，自然栖息地减少的可能性取 10 年来森林损失率的平均值一旦发生流失，变化值的计算方法如下： • 沉积物：CP 因子从自然土地覆盖到农业或草原的变化 • 氮磷：输出系数从自然土地覆盖到农业或草原的变化	通过 Global Forest Change dataset 中森林覆盖范围的减少量计算森林的流失 ¹⁴⁴ 参见上文 CP 因子的引文。
森林再造	按照 WWF 生态区边界，目前处于自然森林区域内的草原 / 草地单元格	沉积物：CP 因子从草地到森林的变化。 氮磷：输出系数从草地到森林的变化。	参见上文 CP 因子的引文。
农业最佳管理实践	所有农业单元格	沉积物：降低 72%。 磷：降低 77%。	以开展覆盖作物农业实践的平均结果为基础 ¹⁴⁵ 。
河岸带修复	使用 HydroSHEDS DEM 识别，沿河岸的农业单元格。	假设溪流或河流两岸的缓冲带宽 10 米，某一特定河段的上坡面贡献区域为一个 15 秒的单元格。	以建立 10 米缓冲带的平均结果为基础 ¹⁴⁶ 。

每个水源集水区都含有多个单元格，因而同一个改善措施可以在多个地方开展。由于资源有限，水质改善措施通常会优先集中在投资回报率最大的区域，因此，在某一集水区的一项实践投资回报的中位数或平均值可能并不是最有针对性的衡量指标。本研究中，假定水质改善措施从回报率最高的单元格开始，通过模型估算识别出为达到各项污染负荷量都下降 10% 而需要实施改善措施的区域。

值得注意的是，在某些情况下，仅开展一项水质改善措施可能无法实现污染物负荷量下降 10% 的目标。例如，某一集水区内适合森林再造的土地面积不够，这项措施可能就无法将该集水区的沉积物负荷量减少 10%，则这种情况下的集水区将会在模型的区域识别中略去。

与森林再造、农业最佳管理实践和河岸带修复能够减少当前的年污染物负荷量不同，森林保护措施消除的是未来沉积物增加或营养物输移的风险。从而开展森林保护的区域识别中，本研究中衡量的是为了将未来污染负荷量降低 10% 所需开展此项改善措施的土地面积。未来污染负荷量指的是当前的基线污染物负荷量加上未来 10 年间污染物的预期增长。

关注相对较小的集水区

正文第2章和第3章的分析结果表明，规模相对较小的城市水源集水区是开展水质改善措施的重点机会所在，所以我们将研究重点集中于面积相对较小的集水区以及主要依赖这些相对较小的地表水源的城市。如第一章中所言，水质改善措施只有在执行规模最可行的集水区才能达到其预期效果。一般而言，为了实现污染物浓度降低的可行性受到两个因素的影响，一是集水区污染负荷量的绝对值大小，二是需要开展水质改善措施的面积大小。例如，在其他因素都相同的情况下，要降低集水区10%的沉积物污染负荷量，长江集水区大小的区域（1.8亿公顷）所需要的保护面积就要远大于密云水库集水区（约150万公顷）。

相对较小的集水区是指面积不到1000万公顷的集水区，这个规模阈值是根据生态服务付费的文献界定的，文献中并没有发现面积超过1000万公顷的集水区的例子。极度依赖小型地表水源的城市指的是城市用水中至少有25%的水源供应来自这些小型水源地的城市（相对于地表水和其他所有供应源的总和）。针对报告之前所列出的发展最快的城市的135个水源中（详见正文第一章），有110个水源可认定为较小型水源，30个发展最快的城市中则有24个极度依赖较小型水源的供水。

城市数据汇总

报告以城市为基本单位开展分析，对所有从取水点层面收集到的信息汇总到城市数据中。在汇总过程中，可以通过该城市供水的所有取水点的取水量加权平均计算出城市总取水量。正如之前所讨论的，我们只考虑较小规模集水区的水质改善措施，在这些集水区之中某一特定的改善措施能够做到将沉积物污染或磷污染降低10%。在市级层面，我们对结果做出进一步限制，仅限于供水量占一座城市总供水量超过25%的集水区。只有改善措施能够减少一座城市总采水量中至少四分之一的水污染，且减少的数值达到10%，我们才对其进行结果度量。

针对某些市级度量标准（例如城市中需要保护的总面积），我们进一步汇总了每种污染物可用的保护实践的机会度量结果。在这些情况下，用中值来代表某一特定城市体量加权平均值的范围。对于进一步整合了沉积物和磷值的结果，报告给出的总量是沉积物和磷的中位数之和。例如，某一城市开展改善措施所需面积的中位数可能是沉积物3万公顷、磷4万公顷。估算保护总面积就是对这些数值求和，在这个例子中就是7万公顷。这里假设治理沉积物和磷污染的改善措施开展的区域互不重叠，因此我们给出的汇总总量可以被认为是对改善措施潜力的保守估计。

处理成本与水质对比

估算操作和维护成本

之前已经详细说明过¹⁴⁷，我们搜集了100多个美国城市和30多个其他国家城市约500家净水处理厂（WTPs）使用的处理技术信息，通过30多次实地考察，记录了具体处理过程的缺失情况以及水处理量的相关信息。针对美国城市，我们记录了自来水公司的净水处理成本（O&M）信息。根据Kawamura和McGivney所给出的标准¹⁴⁸，净水处理厂可分为七种处理类型。分类之后，我们以工厂规模、处理类型以及是否存在额外的处理步骤为基础，对样本中500家净水处理厂的操作和维护成本进行了估算。所有成本估算均采用ENR工程造价指数（ENR-CCI），标准化到2007年的美元价值。

针对中国的水源样本，我们掌握的处理技术信息仅覆盖一部分引水渠和净水处理厂。假设使用传统的处理技术进行水处理，并采用上文所述的估算方法对操作和维护成本进行计算，从而保持不同水源和城市之间的一致性。我们进一步假设，每个取水点都由不同的处理厂进行处理的话，就会低估整体处理多个水源节省的规模成本，进而可能会高估工程净水处理成本。

处理成本和水质对比

如前文所述¹⁴⁹，我们将操作和维护成本与全球模型的沉积物含量和含磷量估值进行了对比。详细分析请参见《城市水蓝图》的附录 B 和附录 C。

简单地说，就是将沉积物含量和含磷量与 100 多座美国城市的净水处理厂的操作和维护成本数据进行比较。对于主要水源为地表水的净水处理厂，沉积物含量越高，处理成本就越高。沉积物每减少 10%，操作和维护成本平均下降 2.6%。这一估值并不涵盖疏浚处理厂外部大型水库的大额成本。例如，Crowder¹⁵⁰ 估计，1987 年美国水库因沉积物导致的供水能力下降损失了 5.97 到 8.19 亿美元。在营养物含量（磷）与操作和维护成本进行对比发现，从营养物含量低的水源取水的工厂的处理成本要低于从含量高的水源取水的工厂。营养物污染每减少 10%，处理成本平均可下降 1.9%。

估算执行成本

保护成本估算利用了当地的数据源，并且在条件允许的情况下采用了现有保护项目或 PES 项目的数据。本报告中分析的四项保护实践的成本和参考文献，以及成本的计算方法如下（详见表 4）。除非特殊说明，否则呈现的成本均为每年单位公顷的成本，货币单位为美元。

表 4. 通过文献综述得出的本报告中保护行动的执行成本

保护实践	每公顷成本 (美元 / 年)	参考成本
农业最佳管理实践	202 美元	美国国家自然资源保护局 ¹⁵¹
森林保护	27 美元	《中国林业统计年鉴》 天然林保护工程 (2011-2013) ¹⁵²
修复 (森林和河岸带)	273 美元	国家发展和改革委员会 (2014) 《中国林业统计年鉴》(2011-2013) ¹⁵³

农业最佳管理实践

正如文本框 1 中所述，农业最佳管理实践 (BMPs) 是出现在农业土地管理中的一些有望带来积极环保成果的改变。而其执行成本的计算主要基于美国国家自然保护局 (NRCS) 在美国选定区域开展的若干研究¹⁵⁴。每公顷成本 (202 美元) 的计算主要是取这些研究结果的平均值 (均以美元计算)。

森林保护

中国森林保护成本的数据直接从中国林业统计年鉴所得¹⁵⁵。具体来说，每公顷森林平均保护成本的计算方法是用 2009-2011 年每年的总成本之和除以总面积，然后取所得数值的平均值。为了概念上加以区分，我们将年鉴中汇总的成本数据分为四类 (图 1)：管理成本、维护成本、资本支出以及补贴ⁱ。2011-2013 年间，森林保护平均总成本为 32.99 亿 (美元 / 年)，平均总面积为 1.225 亿公顷。

ⁱ 成本分类的详细界定如下：

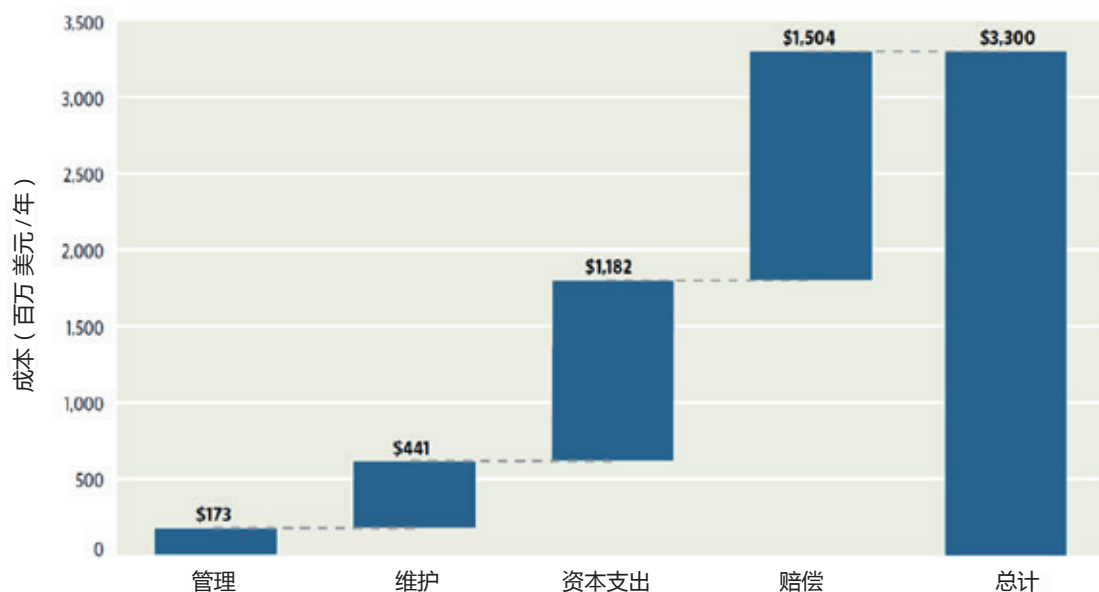
管理成本包括与森林保护实践的执行或维护没有直接联系的成本 (即“其他”成本)。

维护成本包括与森林改善措施的保养和维修相关的成本。

资本支出包括森林保护操作、储备资源以及公益林管理相关的成本。

补贴成本包括对受实践活动影响各方的赔偿，包括生态补助、社会补助以及政治补助。

图 1. 中国森林保护平均总成本以及分项成本（中国林业统计年鉴）¹⁵⁶。



森林再造和河岸带修复

这两项修复的成本数据来源于中国国家发展和改革委员会 2014 年出台的一项旨在统一森林管理方法，使所有类型的森林共享统一的补助系统的政策¹⁵⁷。这项政策明确规定在 5 年内为修复项目提供 1500 元人民币/亩的补助金，其中 1200 元为收入补助，300 元为播种补助。因此，修复成本计算方法为汇总该政策 5 年内的总成本（3530 美元/公顷）以及未来 25 年内森林保护的总执行成本（以森林保护章节中涉及的 25 年年成本数据为基础计算得出 674 美元/公顷）。最后再按 5% 的年利率将 30 年间的总成本年度化，得出报告所使用的最终计算结果为每公顷每年 273 美元。

投资回报率

投资回报率（ROI）的计算需要自来水公司的效益值和保护成本两项信息。假设自来水公司的效益值等同于达到沉积物和磷负荷量下降 10% 的操作和维护成本（详见操作和维护成本的估算），保护成本的估算方法则如上文所述（详见执行成本的估算）。投资回报率就是自来水公司的收益与改善措施成本的比值。

需注意，这只是为筛选而对投资回报率进行的粗略估算。如果想要对保护投资的回报率做更加全面细致的分析，还需和城市自来水公司一起进行详细规划。此外，这只是市级层面的平均排名，许多城市拥有多个水源集水区，可能会出现城市排名较低但个别水源集水区投资潜力较高的情况。

同样需要强调的是，这种投资回报率的估算仅以提高原水水质所降低的净水处理成本的节约方式为主。自来水公司还可以采用其他方式节约成本，例如避免资本支出、避免水库疏浚支出等。此外，集水区内的其他利益相关方和部门也可能得益于水质的提高。例如，水源沉积物含量的降低可使大坝的蓄水能力得到提高，从而提高水力发电的效率。

其他集水区参数

除了水质度量标准外，我们还利用了其他数据来描述集水区保护所面临的挑战和机遇。

水量风险

我们采用之前所描述的方法评估了样本城市的水量风险¹⁵⁸。在集水区层面，我们使用全球水文模型 WaterGAP 对水资源使用量和可用量之比进行估算¹⁵⁹，比值如果大于 0.4 则说明集水区用水紧张。关于衡量水量风险的 0.4 界限值也应用在其他许多地表水分析研究中（关于这一界限值的历史和使用，请参见 Vörösmarty 等人的讨论¹⁶⁰），其权威性较高。利用之前所说的方法，我们将这些水资源压力值汇总到了市级层面。

土地使用

关于土地覆盖和使用的信息，我们使用了与沉积物模型相同的数据集，这些数据集代表的是 2005 年的土地覆盖情况¹⁶¹。同时我们还进一步采取了先前所述的土地覆盖分类法（农业、草原/草地、森林、荒地、城市、水/其他）。

社会经济数据

城市人口数据来自于联合国世界城市化前景数据库对相应城市群估计¹⁶²。为了估计经济活跃度，我们使用了上文（详见城市选择）提到过的麦肯锡全球研究所（MGI）的 Cityscope 数据库。MGI 数据库对城市市区的 GDP 做出了评估。鉴于特定城市的行政区域通常包括市区和农村两个区域，因此这一区分十分重要。估算每座城市当前及未来国内生产总值（GDP）采用的是专有的计量经济模型。有关 MGI 估算方法的详情，可查看研究所发布的名为《准备迎接中国十亿城民》（Preparing for China's Urban Billion）的报告¹⁶³。

在集水区层面，我们使用了 2010 年全国人口¹⁶⁴和 GDP¹⁶⁵的空间数据集。这些数据集来源为中国科学院资源与环境数据中心（RESDC）。全国人口普查数据为 1 公里网为基础。GDP 数值采用世界发展指标数据库的年度汇率换算成 2010 年的美元价值¹⁶⁶。

生物多样性数据

鉴于中国物种分布的空间数据难以获取，而现有数据不全面的特点，我们在评估水资源危机和集水区保护对生物多样性产生的潜在影响时使用了一些全球数据集。针对陆地生物多样性，我们使用的是世界自然基金会（WWF）开发的 WildFinder 数据库¹⁶⁷，其中包括了四种主要生物类群（哺乳动物、两栖动物、爬行动物和鸟类）的生态区分布信息。同时，我们还引用了零灭绝联盟（AZE）关于濒危物种的信息¹⁶⁸。针对水生生物多样性，我们采用的是 WWF 和 TNC 等组织和个人共同开发的世界淡水生态区（FEOW）数据库¹⁶⁹。

针对生态区层面的生物多样性数据（WildFinder 和 FEOW），我们通过简单的叠加分析推导出物种的潜在重要性。需要注意的是，生态区生物多样性数据和集水区保护数据均不可用于下一层级的结果推导。对于生态区数据而言，某一生态区域内物种的实际分布以及栖息范围是未知的。而相似的是，针对集水区保护数据，特定保护实践类型的实际活动地点也是未知的。在这种情况下，使用叠加分析对生态区域和集水区域的数据的潜在协同进行推导，但这类推导结果具有不确定性。例如，鳍刺类鱼龙州鲤被认为是中国东南部西洋生态区特有的物种。虽然这一生态区内佛山供水集水区的保护实践可能有利于提高龙州鲤生存的水质条件，但没有河流层面的生物多样性和保护实践数据，我们无法得出确定的结论。因此，这里所呈现的生物多样性结果仅是为了描述潜在的可能性，而非预测未来的效益。

除了生态区和物种数据外，我们还将集水区和《中国生物多样性保护战略与行动计划》（2011-2030）确定的生物多样性优先保护区域叠加在一起¹⁷⁰。这些优先保护区域的确定考虑到了陆地和淡水生物多样性两项因素。为了推导陆地生物多样性的效益，我们把 32 个优先保护区域的边界和供水集水区进行叠加，得出重叠领域。为了推导淡水生物多样性的效益，我们还利用 HydroSHEDS 数据集确定这些重叠区域内河网的总长度。

参考文献

- 1 McDonald, R., and D. Shemie, Urban Water Blueprint: Mapping conservation solutions to the global water challenge. 2014, Washington, D.C.: The Nature Conservancy. Available from: nature.org/waterblueprint/
- 2 McDonald, R.I., et al., Water on an urban planet: Urbanization and the reach of urban water infrastructure. *Global Environmental Change*, 2014. 27: P. 96-105. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378014000880>
- 3 Keshan, P., China Water Resource Crisis in the 21st Century. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2000.
- 4 Zhang, L., Research on main problems and solution of urban drinking water safety. *Journal of Environmental Hygiene*, 2011. 1(1).
- 5 UNDP. World Urbanization Prospect's report, 2014. Available from: <http://esa.un.org/unpd/wup/Country-Profiles/>
- 6 Woetzel, J., et al., Preparing for China's Urban Billion. McKinsey & Company, 2009 [cited 2014 1 April]; Available from: http://www.mckinsey.com/insights/urbanization/preparing_for_urban_billion_in_china
- 7 Bharat Book Bureau. China: Wastewater Treatment Industry. PRN Newswire, 2013 [cited 2015 10 April]; Available from: <http://www.prnewswire.com/news-releases/china-wastewater-treatment-industry-232347491.html>
- 8 World Bank. Urban Development Indicators 2014. 2014 [cited 2015 1 April]; Available from: <http://data.worldbank.org/indicator/SH.STA.ACSN.UR/countries>
- 9 Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, State of the Environment 2011, 2013 [cited 2015 1 April]; Available from http://english.mep.gov.cn/standards_reports/soe/soe2011/201307/t20130715_255508.htm
- 10 Kaiman, J., China says more than half of its groundwater is polluted. 2014. Available from: <http://www.theguardian.com/environment/2014/apr/23/china-half-groundwater-polluted>
- 11 Wu C., et al., Water Pollution and Human Health in China, *Environmental Health Perspectives*, 1999. 107(4): p 251-256.
- 12 Kan, H., Environment and Health in China: Challenges and Opportunities, *Environmental Health Perspectives*, 2009. 117(12): p. A530-A531.
- 13 The World Bank and the State Environmental Protection Administration. Cost of Pollution in China: Economic Estimates of Physical Damages, 2007. Available from: http://siteresources.worldbank.org/INTEAPREGTOPENVIRONMENT/Resources/China_Cost_of_Pollution.pdf
- 14 Wang, J., et al., 2004 China National Green Economy Accounting Report, China Population, Resources and Environment. 2006.
- 15 Guo, X., et al., Pollution damage cost assessment: theories and methodologies, China Environmental Science Press, 2009.
- 16 Shi, M., et al., Resource and environmental costs of China's economic development. 2008.
- 17 Ivanova, N., Toxic Water: Across Much of China, Huge Harvests Irrigated with Industrial and Agricultural Runoff. Available from: <http://www.circleofblue.org/waternews/2013/world/toxic-water-across-much-of-china-huge-harvests-irrigated-with-industrial-and-agricultural-runoff/>
- 18 Liu, Q., 'Blue Sky' app to get China's public thinking about solutions to pollution crisis. China Dialogue. Available from: <https://www.chinadialogue.net/article/show/single/en/7870--Blue-Sky-app-to-get-China-s-public-thinking-about-solutions-to-pollution-crisis>
- 19 Food and Agriculture Organization. Guidelines to Control Water Pollution from Agriculture in China: Decoupling Water Pollution from Agricultural Production. 2013 [cited 2015 20 November]; Available from: <http://www.fao.org/docrep/019/i3536e/i3536e.pdf>
- 20 Ernst, C., PROTECTING THE SOURCE. 2004. Available from: https://www.tpl.org/sites/default/files/cloud.tpl.org/pubs/water-protecting_the_source_final.pdf
- 21 Millennium Ecosystem Assessment, MEA. Ecosystems and human well-being: Wetlands and water synthesis. World Resources Institute, 2005. Washington, DC.
- 22 Evans, R., J.W. Gilliam, and J.P. Lilly, Wetlands and Water Quality. North Carolina Cooperative Extension Service, 1996. Available from: <http://www.bae.ncsu.edu/programs/extension/evans/ag473-7.html>
- 23 Urban Water Blueprint. About the project. Available from: <http://water.nature.org/waterblueprint/about.html>
- 24 Guli, M., and R. Yampolsky, Urbanization and its Impact on China's Water Resources. Thirst4Water and The Paulson Institute, 2014 [cited 2015 20 November]; Available from: http://www.paulsoninstitute.org/wp-content/uploads/2015/05/Thirst-Paper-121014_vF.pdf
- 25 Water Pollution in China: study on the relationship between economic development and water pollution. 2003. Available from: <http://hkr.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A639851&dsid=1257>
- 26 UN Population Division, World Urbanization Prospects, 2014.
- 27 Zhang, Y., and Z. Huang, Re-evaluation on the Level and Pace of China's Urbanization. *Urban Studies*. 2010. 17.
- 28 Muse-Fisher, A., THE ENVIRONMENTAL COSTS OF CHINA'S URBANIZATION. 2013. Available from: <http://prospectjournal.org/2013/11/08/the-environmental-costs-of-chinas-urbanization/>
- 29 Methodology for a summary of references used to build urban water intake volumes.
- 30 'Urban water sources' refers to the water bodies a city depends on for its water supply. The sources could be rivers, lakes or aquifers.
- 31 FAO. AQUASTAT website. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2015 [cited 2015 12 November]; Available from: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/Profile_segments/CHN-WU_eng.stm
- 32 Ibid.
- 33 Ibid.

- 34 Kahlrl, F., and D. Roland-Holst, China's water-energy nexus. The International Water Association, 2008 [cited 2015 20 November]; Available from: http://are.berkeley.edu/~dwrh/Docs/Cn_H2O_Erg_KRH080109.pdf
- 35 A 'catchment' is the area of land that drains to a specific water body or aquifer. For example, the Dong River catchment is comprised of all the land where, when precipitation falls, water drains to the Dong River. Catchment boundaries are set by topography, as the direction a land is sloped determines which direction a drop of precipitation will drain to.
- 36 The Guardian. China's water diversion project starts to flow to Beijing. 2014 [cited 2014 12 December]; Available from: <http://www.theguardian.com/world/2014/dec/12/china-water-diversion-project-beijing-displaced-farmers>
- 37 Circle of Blue. Photo Slideshow: China Completes Second Line of South-North Water Transfer Project. [cited 2015 8 January]; Available from <http://www.circleofblue.org/waternews/2015/world/photo-slideshow-china-completes-second-line-south-north-water-transfer/>
- 38 Huang, Y., D. Jiang, and J. Fu, 1 KM Grid GDP Dataset of China. Glob. Change Res. Data Publ. Repos. 2014.
- 39 WWF Global. Yangtze River summary page. 2015 [cited 2015 29 December]; Available from: http://wwf.panda.org/about_our_earth/about_freshwater/freshwater_problems/river_decline/10_rivers_risk/yan_gtze/
- 40 China National Biodiversity Conservation Strategy and Action Plan (2011-2030). [cited 2015 29 December]; Available from: <https://www.cbd.int/doc/world/cn/cn-nbsap-v2-en.pdf>
- 41 Natural Capital Project. Ecosystem Planning in China. [cited 2015 29 December]; Available from: <http://www.naturalcapitalproject.org/china-case-study/>
- 42 Yang, D., Crises and Opportunities. The China Environment Yearbook, 2009. 3.
- 43 Ministry of Environment. China Environment Report. 2014. Available from: <http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/qt/201506/W020150605384146647135.pdf>
- 44 Ernst, C., PROTECTING THE SOURCE. 2004. Available from: https://www.tpl.org/sites/default/files/cloud.tpl.org/pubs/water-protecting_the_source_final.pdf
- 45 Ministry of Environment. 2010 Water source protection areas of drinking water pollution prevention and control regulations. 2010. Available from: http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bl/201012/t20101224_199104.htm
- 46 The cutoff of 10 million hectares between 'large' and 'comparatively smaller,' or 'moderately sized,' catchments was selected based on a survey of past experience of catchment PES programs, in which no example had been developed for catchments 10 million hectares or larger.
- 47 Zheng, H., et al., Benefits, costs, and livelihood implications of a regional payment for ecosystem services program. Proceedings of the National Academy of Science, 2013. 110: doi: 10.1073/pnas.1312324110.
- 48 Li, J., Woodrow Wilson International Center for Scholars. China's water crisis. 2013. Available from: http://www.wilsoncenter.org/index.cfm?topic_id=1421&fuseaction=topics.documents&doc_id=496229&group_id=233293; Peng, K., China Water Resource Crisis in the 21st Century. Advances in Science and Technology of Water Resources. 2000.
- 49 National Bureau of Statistics of China. Statistics for the year 2008. 2009. Available from: http://www.stats.gov.cn/was40/gjtj_en_detail.jsp?searchword=water&channelid=9528&record=8; Linden J. Ellis, Jennifer L. Turner and Ma Tianjie, Seeking Solutions for Water Scarcity in China. 2008. Available from: <http://www.wilsoncenter.org>
- 50 Carmoday, L., Issues for Responsible Investors. Water in China, 2010.
- 51 A city is considered 'water stressed' if the total annual water consumption is 40 percent, or greater, of the total water available. Consumption differs from water demand in that it is water lost from the system rather than water that is diverted but may be returned to the system after use. See Vörösmarty, C.J., et al., Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth. Science, 2000. 289(5477): p. 284-288 for an explanation of the 40 percent cutoff for water stressed cities.
- 52 China Ministry of Environmental Protection, 2014 State of the Environment Report. 2014.
- 53 Xie, J., et al., Addressing China's water scarcity: recommendations for selected water resource management issues. 2008, Washington, DC: World Bank. Available from: <http://documents.worldbank.org/curated/en/2009/01/10170878/addressing-chinas-water-scarcity-recommendations-selected-water-resource-management-issues>
- 54 China Ministry of Environmental Protection, 2014 State of the Environment Report. 2014.
- 55 Xie, J., et al, Addressing China's Water Scarcity. 2009.
- 56 Carmody, L., Issues for Responsible Investors. Water in China. 2010.
- 57 Stanway, D., Pollution makes quarter of China water unusable: ministry, 2010. Available from: <http://www.reuters.com/article/us-china-environment-water-idUSTRE66P39H20100726>
- 58 Yin, D., Eutrophication Treatment Challenges. 2011. Available from: <http://chinawaterrisk.org/opinions/eutrophication-in-china%E2%80%99s-lakes-%E2%80%93-the-treatment-challenges/>
- 59 Duan, H., et al., Two-Decade Reconstruction of Algal Blooms in China's Lake Taihu. Environmental Science and Technology, 2009.
- 60 Xie, J., et al., Addressing China's water scarcity: recommendations for selected water resource management issues. 2008, Washington, D.C.: World Bank. Available from: <http://documents.worldbank.org/curated/en/2009/01/10170878/addressing-chinas-water-scarcity-recommendations-selected-water-resource-management-issues>

- 61 Yin, H., and C. Li, Human impact on floods and flood disasters on the Yangtze River. *Geomorphology*, 2001. 41(2–3): p. 105–109.
- 62 Edzwald, J.K. and J.E. Tobiasson, Chemical properties, source water composition, and watershed protection, in *Water quality and treatment: A handbook on drinking water*, J.K. Edzwald, Editor. 2011, McGraw Hill: New York.
- 63 Lin, E., New Taipei City water supply to be fully restored today. *The China Post*, 2015 [cited 2015 30 September]; Available from: <http://www.chinapost.com.tw/taiwan/national/national-news/2015/09/30/447176/Taipei-New.htm>
- 64 NEWSSC. Chengdu rain caused large-scale water supply water repair company is expected to resume to- night pressure. 2013. Available from: <http://scnews.newssc.org/system/2013/07/13/013810731.shtml>
- 65 Sifferlin, A., Toledo's Contaminated Water: Here's What Went Wrong. *Time Health section*, 2014 [cited 2014 4 August]; Available from: <http://time.com/3079516/toledos-contaminated-water-heres-what-went-wrong/>
- 66 Yeager-Kozacek, C., Great Lakes Drinking Water Fouled by Toxic Algae. 2013. Available from: <http://www.circleofblue.org/waternews/2014/world/choke-point-index-great-lakes-drinking-water-fouled-by-toxic-algae/>
- 67 Algae World News, It's Not Just Utah Lake: Toxic Algae Plagues 20 Waterways, Including Drinking Water Sources. 2015 [cited 2015 20 August]; Available from: <http://news.algaeworld.org/2015/08/its-not-just-utah-lake-toxic-algae-plagues-20-waterways-including-drinking-water-sources/>
- 68 Priority Conservation Areas that are designated as high value based on spatial assessment and agreed upon factors. The PCAs designated in Figure 2.5 were selected as part of the China National Biodiversity Conservation Strategy and Action Plan.
- 69 World Bank. Cost of pollution in China: economic estimates of physical damages. 2007, Washington, DC: World Bank. Available from: <http://documents.worldbank.org/curated/en/2007/02/7503894/cost-pollution-china-economic-estimates-physical-damages>
- 70 Ren, G., et al., Effectiveness of China's national forest protection program and nature reserves. *Conservation Biology*, 2015.
- 71 Niu Z., et al., Mapping Wetland Changes in China between 1978 and 2008. *China Sci Bull*, 2012. 57. doi:10.1007/s11434-012-5093-3.
- 72 Wang, Z., Strategic thinking of protecting grassland ecology in China. *Grassland of China*, 2005. 27(4): p. 1-9.
- 73 PricewaterhouseCoopers. The World in 2050: Will the shift in global economic power continue? 2015. Available from: <https://www.pwc.com/gx/en/issues/the-economy/assets/world-in-2050-february-2015.pdf>
- 74 United Nations, World Urbanization Prospects, 2014 Revision. 2014.
- 75 Moore, S., Hydropolitics and Inter-Jurisdictional Relationships in China: The Pursuit of Localized Preferences in a Centralized System. *The China Quarterly*, 2014. 219: p. 760-780.
- 76 Solinger, D.J., Despite Decentralization: Disadvantages, Dependence and Ongoing Central Power in the Inland - the Case of Wuhan. *The China Quarterly*, 1996, 145: p. 1-34.
- 77 Lu Y., et al., Local Government Financing Platforms in China: A Fortune or Misfortune. IMF Working Paper WP-13/243, International Monetary Fund, 2013 [cited 2015 1 April]; Available from: <http://www.imf.org/external/pubs/ft/wp/2013/wp13243.pdf>
- 78 Ibid.
- 79 Finamore, B., New Weapons in the War on Pollution: China's Environmental Protection Law Amendments. *Natural Resources Defense Council*, 2014 [cited 2015 1 April]; Available from: http://switchboard.nrdc.org/blogs/bfinamore/new_weapons_in_the_war_on_poll.html
- 80 Bennett, G., and N. Carroll, Gaining Depth: State of Watershed Investment 2014. 2014. Available from: www.ecosystemmarketplace.com/reports/sowi2014
- 81 McDonald, R., and D. Shemie, Urban Water Blueprint: Mapping conservation solutions to the global water challenge. 2014, Washington, D.C.: The Nature Conservancy. Available from: nature.org/waterblueprint/
- 82 For the purpose of comparison, "significant portion" is defined here as a 10 percent conservation cost.
- 83 Moseley, C., and M. Nielsen-Pincus, Economic Impact and Job Creation from Forest and Water- shed Restoration: A Preliminary Assessment. *Ecosystem Workforce Program*, University of Oregon. 2009. Available from: <http://ewp.uoregon.edu/sites/ewp2.uoregon.edu/files/downloads/BP14.pdf>
- 84 Carmody, L., Water in China: Issues for Responsible Investors. *Responsible Research*, 2010. Available from: http://www.sustainalytics.com/sites/default/files/water_in_china-issues_for_responsible_investors_feb2010.pdf
- 85 Daily, G., *Nature's Services: Societal dependence on natural ecosystems*. 1997, Washington, D.C.: Island Press.
- 86 China National Biodiversity Conservation Strategy and Action Plan (2011-2030). Available from: <https://www.cbd.int/doc/world/cn/cn-nbsap-v2-en.pdf>
- 87 Zhang, C., China's New Blueprint for an 'Ecological Civilization'. *The Diplomat*, 2015 [cited 2015 13 November]; Available from: <http://thediplomat.com/2015/09/chinas-new-blueprint-for-an-ecological-civilization/>
- 88 Postel, s., and B. Thompson, Watershed protection: Capturing the benefits of nature's water supply services. *Natural Resources Forum*, 2005. 29.
- 89 Liu, J., et al, Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services. *Proc Natl Acad Sci*, 2008. 105(28).
- 90 World Wildlife Fund. WildFinder: Online database of species distributions, ver. Jan-06. 2006 [cited 2015 29 December]; Available from: www.worldwildlife.org/WildFinder
- 91 World Wildlife Fund and The Nature Conservancy, *Freshwater Ecoregions of the World*. 2013. [cited 2015 29 December]; Available from <http://www.feow.org/>
- 92 This description of bureaucratic responsibility was obtained principally from the websites of each ministry and is also based on the author's general knowledge of environmental policy and governance in China.
- 93 Browder, G., *Stepping Up: Improving the Performance of China's Urban Water Utilities*. 2007. Washington, D.C.: World Bank Group.

- 94 Veolia Water. Veolia in China. 2015 [cited 2015 1 April]; Available from <http://www.veolia.cn/en/about-us/about-us/country-presentation-0>
- 95 Moore, S., China must strengthen its institutions before unleashing market forces. South China Morning Post, 2013 [cited 2015 1 April]; Available from: <http://www.scmp.com/comment/insight-opinion/article/1360262/china-must-strengthen-its-institutions-unleashing-market>
- 96 Bennett, G., and N. Carroll, Gaining Depth: State of Watershed Investment 2014. 2014. Available from: www.ecosystemmarketplace.com/reports/sowi2014
- 97 Lin, F., A Comparative Study on Payment Schemes for Watershed Services in New York City and Beijing. Consilience: The Journal of Sustainable Development, 2014. 11(1): p. 27-40.
- 98 Liu, J., and Y. Wu, Integrated assessments of payments for ecosystem services programs. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013. 110(41): p. 16297-16298.
- 99 2030 Water Resources Group, Charting our Water Future. 2009.
- 100 Luo, T., B. Otto, and A. Maddocks, Majority of China's Proposed Coal-Fired Power Plants Located in Water Stressed Regions. World Resources Institute, 2013. Available from: <http://www.wri.org/blog/2013/08/majority-china%E2%80%99s-proposed-coal-fired-power-plants-located-water-stressed-regions>
- 101 IUCN. IUCN and Danone Launch Project to Protect Critical Watersheds in Dongjiang River Basin. 2014. Available from: <http://www.iucn.org/zh/china/?14347/wwwiucnorgchinaecolongmenen>
- 102 Jia, S., J. Nickum, and S. Moore, China's Three Red Lines Water Resource Management Policy. Handbook on China's Environmental Policy. Routledge, (forthcoming).
- 103 IUCN. Restoring landscapes to support cities' growth. 2012 [cited 2015 6 December]; Available from: http://www.iucn.org/what/priorities/nature_based_solutions/economic_social/?11367/Restoring-landscapes-to-support-cities-growth
- 104 Zheng, H., B.E.Robinson and Y. Liang., Benefits, costs, and livelihood implications of a regional payment for ecosystem service program. Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), 2013. 110(41): p. 16681-16686.
- 105 Probe International Beijing Group, Beijing's Water Crisis 1949 — 2008 Olympics. 2008, Beijing: Probe International.
- 106 Bennett, G., Can Katoomba-18 Help The Miyun Reservoir? 2013 [cited 2015 6 December]; Available from: <http://www.ecosystemmarketplace.com/articles/can-katoomba-18-help-br-the-miyun-reservoir/>
- 107 Zheng, H., B.E.Robinson, and Y. Liang., Benefits, costs, and livelihood implications of a regional payment for ecosystem service program. Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), 2013. 110(41): p. 16681-16686.
- 108 北京市水务局. 2007.
- 109 Zheng, H., B.E.Robinson, and Y. Liang., Benefits, costs, and livelihood implications of a regional payment for ecosystem service program. Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), 2013. 110(41): p. 16681-16686.
- 110 Alam, R.Q., et al., Nonpoint Source Pollution. Water Environment Research, 2013. 85(10). Available from: <http://www.ingentaconnect.com/content/wef/wer/2013/00000085/00000010/art00030?crawler=true>
- 111 汤洁等,《辽河大伙房水库汇水区农业非点源污染入库模拟》.《吉林大学学报(地球科学版)》2012. 42(5): p. 1462-1468.
- 112 Asian Development Bank (ADB), Payments for Ecological Services and Eco-Compensation: Practices and Innovations in the People's Republic of China. In Q. Zhang, M. Bennett, K. Kannan, & L. Jin (Ed.). Proceedings from the International Conference on Payments for Ecological Services, 2010, Mandaluyong City, Philippines: ADB, National Development and Reform Commission. Available from: <http://www.adb.org/sites/default/files/publication/27468/payments-ecological-services-prc.pdf>
- 113 中国国家林业局.《第二次湿地资源调查结果》.2014 [2014年12月4日检索]: http://www.china.com.cn/zhibo/zhuanli/ch-xinwen/2014-01/13/content_31170329.htm
- 114 中国国家林业局.《中国林业》.2013. http://english.forestry.gov.cn/uploads/Information_Services/Latest_Publication/Forestry_in_China.pdf
- 115 大自然保护协会,中国.《鹤庆开展科学调查改善湿地保护计划》.2015. http://tnc.org.cn/#News#schedule#iframe99dc279553caa332ce189f135c73958badb882f1d830750843d3799e6d9d6f00ef78af0_5397fb1
- 116 云南省林业局.《云南省首份 NGO 组织参与湿地公益保护合作协议在鹤庆签订》.2014 [2015年12月7日检索]: <http://www.forestry.gov.cn/main/72/content-729048.htm>
- 117 宁波市人民政府.《中国宁波》.2009 [2015年12月4日检索]: http://english.ningbo.gov.cn/art/2009/7/25/art_55_84421.html
- 118 中国国家统计局.《中华人民共和国第六次全国人口普查》.2011.
- 119 <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2011/indexeh.htm>: 中国统计出版社.
- 120 Tang, Y.T., F.K. Chan, and J. Griffiths, City profile: Ningbo. Cities, 2015. 42: p. 97-108.
- 121 徐强 夏晖,《宁波水资源利用效率现状及趋势分析》.《浙江工商职业技术学院学报》2007. 6: p. 1-6.
- 122 Jianxu, Z., Research on Improving and Ensuring City Water Supply of Ningbo. 2006 National Water Conservation Academic Workshop and Annual Meeting Memoir, 2006: p. 114-117.
- 123 Baidu. Chin-inch reservoir, Retrieved January 29th. 2015. Available from: https://translate.google.com/translate?sl=auto&tl=en&js=y&prev=_t&hl=en&ie=UTF-8&u=http%3A%2F%2Fbaike.baidu.com%2Flink%3Furl%3D_YXuAMuni11Jkzs_mmlx6_WwrsHZsJeOEbJ32IE-VpTDdZUGHElE10Gd0tLFnqj5vAOwt9KfLo4gYwCP9TsEq&edit-text=&act=url
- 124 Ningbo Municipal People's Congress. Report on the Ningbo city drinking water source protection enforcement and inspection. 2013 [cited 2016 29 January]; Available from: http://www.nbrd.gov.cn/art/2013/7/4/art_5263_1002740.html
- 125 Ningbo Municipal Planning Bureau. Ningbo City Master Plan (2006-2020) (2015 Amendment) (post-grant publication). 2015 [cited 2016 29 January]; Available from: <http://www.nbplan.gov.cn/zhzh/news/201504/n64540.html>

- 126 Bao, H., Conservation status investigation on Urban Water Source in Ningbo, *Journal of Ningbo Polytechnic*, 2015. 19(2).
- 127 温华等,《城市水源选择的水-能源关联分析:以青岛为例》. 2014. <http://www.wri.org.cn/en/publication/water-energy-nexus-urban-water-source-selection-case-study-qingdao>: 世界资源研究所 (WRI)
- 128 温华等,《城市水源选择的水-能源关联分析:以青岛为例》. 2014. <http://www.wri.org.cn/en/publication/water-energy-nexus-urban-water-source-selection-case-study-qingdao>: 世界资源研究所 (WRI)
- 129 温华等,《城市水源选择的水-能源关联分析:以青岛为例》. 2014. <http://www.wri.org.cn/en/publication/water-energy-nexus-urban-water-source-selection-case-study-qingdao>: 世界资源研究所 (WRI)
- 130 Zhong, L., W.H. Wen, and E.G. Smith, Energy-gulping Desalination Can't Solve China's Water Crisis Alone. 2014 [cited 2015 4 December]; Available from: <http://www.wri.org/blog/2014/12/energy-gulping-desalination-can%E2%80%99t-solve-china%E2%80%99s-water-crisis-alone>
- 131 McDonald, R., and D. Shemie, Urban Water Blueprint: Mapping conservation solutions to the global water challenge. 2014, Washington, D.C.: The Nature Conservancy. Available from: nature.org/waterblueprint/
- 132 Dobbs, R., et al., Urban World: Mapping the Economic Power of Cities. 2011. Available from: http://www.mckinsey.com/insights/urbanization/urban_world; Jonathan Woetzel et al., Preparing for China's Urban Billion. McKinsey Global Institute, 2009.
- 133 Chan, K.W., Misconceptions and Complexities in the Study of China's Cities: Definitions, Statistics, and Implications. *Eurasian Geography and Economics* 2007. 48(4): p. 383–412.
- 134 Lehner, B., K. Verdin, and A. Jarvis, New Global Hydrography Derived From Spaceborne Elevation Data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2008. 89(10): p. 93–94, doi:10.1029/2008EO100001.
- 135 Bernhard Lehner and Petra Döll, Development and Validation of a Global Database of Lakes, Reservoirs and Wetlands. *Journal of Hydrology*, 2004. 296(1): p. 1–22.
- 136 McDonald, R., and D. Shemie, Urban Water Blueprint: Mapping conservation solutions to the global water challenge. 2014, Washington, D.C.: The Nature Conservancy. Available from: nature.org/waterblueprint/
- 137 Roose, E., Land Husbandry: Components and Strategy. 1996. 70. FAO Rome. Available from: <http://www.betuco.be/CA/Land%20husbandry%20-%20Components%20and%20strategy%20erosion%20FAO.pdf>
- 138 Sharp, R., et al., InVEST 2.5.6 User's Guide. 2015. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.
- 139 Tetra Tech, Inc., Spreadsheet Tool for Estimating Pollutant Load (STEPL). 2015. Available from: <http://it.tetratech-ffx.com/stepweb/>
- 140 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research. China Geodata Land Cover Dataset for Year 2005. Earth System Science Institute Data Sharing Platform, n.d., Available from: <http://www2.geodata.cn/data/datadetails.html?dataguid=65171724156007&docid=1152>
- 141 Preston, S., R. Alexander, and D.M. Wolock, Sparrow Modeling to Understand Water-Quality Conditions in Major Regions of the United States: A Featured Collection Introduction1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2011. 47(5): p. 887–90.
- 142 Potter, P et al., Characterizing the Spatial Patterns of Global Fertilizer Application and Manure Production. *Earth Interactions*, 2010. 14(2): p. 1–22.
- 143 Bouwman, A.F., A. H. W. Beusen, and G. Billen, Human Alteration of the Global Nitrogen and Phosphorus Soil Balances for the Period 1970–2050. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009. 23(4): GB0A04, doi:10.1029/2009GB003576.
- 144 Hansen, M.C., et al., High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 2013. 342(6160): 850–53, doi:10.1126/science.1244693.
- 145 Kladvko, E.J., and D.R. Mutch, Potential and Limitations of Cover Crops, Living Mulches, and Perennials to Reduce Nutrient Losses to Water Sources from Agricultural Fields in the Upper Mississippi River Basin. 2008. Available from: http://www.tetratech-ffx.com/tfmeeting/sept2013_pub/downloads/Potential.pdf
- 146 Zhang, X., et al., A Review of Vegetated Buffers and a Meta-Analysis of Their Mitigation Efficacy in Reducing Nonpoint Source Pollution. *Journal of Environmental Quality*, 2010. 39(1): p. 76–84.
- 147 McDonald, R., and D. Shemie, Urban Water Blueprint: Mapping conservation solutions to the global water challenge. 2014, Washington, D.C.: The Nature Conservancy. Available from: nature.org/waterblueprint/
- 148 Kawamura, S. and W. McGivney, Cost Estimating Manual for Water Treatment Facilities. 2008, Hoboken: Wiley.
- 149 McDonald, R., and D. Shemie, Urban Water Blueprint: Mapping conservation solutions to the global water challenge. 2014, Washington, D.C.: The Nature Conservancy. Available from: nature.org/waterblueprint/
- 150 Crowder, B.M., Economic Costs of Reservoir Sedimentation: A Regional Approach to Estimating Cropland Erosion Damage. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1987. 42(3): p. 194–97.
- 151 Natural Resources Conservation Service, Field Office Technical Guide. United States Department of Agriculture, n.d., Available from: <https://efotg.sc.egov.usda.gov/>
- 152 中国国家林业局,《中国林业统计年鉴》. 2011.
- 153 中国发展和改革委员会,《关于下达 2014 年退耕还林还草年度任务的通知》. 2014, 中国国务院.
- 154 Natural Resources Conservation Service, Field Office Technical Guide.
- 155 中国国家林业局,《中国林业统计年鉴》.
- 156 中国国家林业局,《中国林业统计年鉴》.
- 157 中国发展和改革委员会,《关于下达 2014 年退耕还林还草年度任务的通知》.

- 158 McDonald, R., and D. Shemie, Urban Water Blueprint: Mapping conservation solutions to the global water challenge. 2014, Washington, D.C.: The Nature Conservancy. Available from: nature.org/waterblueprint/
- 159 Alcamo, J., et al., Development and Testing of the WaterGAP 2 Global Model of Water Use and Availability. *Hydrological Sciences Journal*, 2003. 48(3): p. 317–37.
- 160 Vörösmarty, C.J., et al., Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. *Science*, 2000. 289(5477): p. 284–88.
- 161 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, China Geodata Land Cover Dataset for Year 2005.
- 162 United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division., World Urbanization Prospects: The 2014 Revision. 2014. Available from: <http://esa.un.org/unpd/wpp/>
- 163 Woetzel, J., et al., Preparing for China's Urban Billion.
- 164 Fu, J., D. Jiang, and Y. Huang, 1 KM Grid Population Dataset of China, Global Change Research Data Publishing & Repository, 2014, doi:DOI:10.3974/geodb.2014.01.06.V1.
- 165 Huang, Y., D. Jiang, and J. Fu, 1 KM Grid GDP Dataset of China, Global Change Research Data Publishing & Repository, 2014, doi:DOI:10.3974/geodb.2014.01.07.V1.
- 166 World Bank. Official Exchange Rate (LCU per US\$, Period Average). World Bank Open Data Catalog, 2015. <http://data.worldbank.org/indicator/PA.NUS.FCRF>
- 167 World Wildlife Fund. "WildFinder: Online Database of Species Distributions, Ver. Jan-06," 2006, Available from: <https://www.worldwildlife.org/science/wildfinder/>
- 168 Alliance for Zero Extinction. 2010 AZE Update. 2010. Available from: www.zeroextinction.org
- 169 Robin Abell et al., Freshwater Ecoregions of the World: A New Map of Biogeographic Units for Freshwater Biodiversity Conservation. *BioScience*, 2008. 58(5): p. 403–14, doi:10.1641/B580507.
- 170 环境保护部,《中国生物多样性保护战略与行动计划》(2011-2030)。2011,中国环境科学出版社。

nature.org/waterblueprint

©The Nature Conservancy (Brian Richter)

The Nature
Conservancy
大自然保护协会

研究合作伙伴



大自然保护协会北京办公室
北京市朝阳区建外大街9号
齐家园外交公寓B4-2
电话: (010) 8531 9528
www.tnc.org.cn

主要资助方



水基金合作伙伴

