

水美中国：

共谱水与能源同美共生的 可持续新未来

本白皮书由国际水务智库(GWI)与
格兰富联合出版



责任
远见
创新
be think
innovate

格兰富
GRUNDFOS

作者

Max Howells, 钱颖佳, 沈雨佳博士
Global Water Intelligence (GWI)

目录

5 缩略语参照表

6 内容摘要

7 第一章 引言：水、能源与气候变化的2030年全球愿景

9 1.1 响应全球可持续发展：中国对绿色转型的承诺

11 第二章 供水保障

11 2.1 供水水量保障：连续充足的饮用水供应

15 2.2 供水效率保障：在居住地获得全天候无间断的饮用水供应

15 2.3 供水水质保障：高品质无污染的饮用水供应

16 第三章 水质改善

17 3.1 城镇污水管理：质效提升——排水管网是关键

18 3.2 工业废水资源化：绿色管理——回用和资源化是趋势

免责声明：

本白皮书所发布信息及所表达意见仅为提供参考之目的，所包含信息均为出版方于发布之时自可靠渠道获得。GWI与格兰富对本白皮书所包含信息、观点以及数据的准确性、可靠性、时效性及完整性不作任何明确或隐含的保证，故任何人不得对本白皮书所发布的信息、观点以及数据的准确性、可靠性、时效性及完整性产生任何依赖，未经GWI与格兰富许可不允许任何形式的内容引用和发布。

21 第四章 气候应对

21 4.1 减缓气候变化：城市水资源管理中的节能减排

25 4.2 适应气候变化：韧性城市建设

26 第五章 城市“水-能源-气候变化”体系的未来趋势展望

26 5.1 技术智能化：通过数字化技术的普及提高城市水系统运行效率

27 5.2 资源再生化：通过可再生资源的开发利用实现可持续发展

27 5.3 质效精细化：通过污水收集处理的提质增效优化城市水环境质量

28 5.4 价值体系化：通过资源价格的改革形成有利于绿色发展的价格机制

29 5.5 气候适应化：通过新时代海绵型城市规划提升应对气候变化的适应能力

29 采访致谢名单

30 参考文献

缩略语参照表

英文简称	英文全称	中文全称
GHG	Green House Gas	温室气体
SDG	Sustainable Development Goals	联合国可持续发展目标
NRW	Non-Revenue Water	产销差水（又称未计量水）
DMA	District Metering Area	分区管理计量
UV	Ultraviolet	紫外线
UF	Ultrafiltration	超滤
NF	Nanofiltration	纳滤
COD	Chemical Oxygen Demand	平均化学需氧量
CSO	Combined Sewer Overflow	合流制溢流污染
HVAC	Heating Ventilation Air Conditioning	供暖、通风和空调系统
GDP	Gross Domestic Product	国内生产总值

内容摘要

“水，是生命之源、生产之要、生态之基”。充足且可靠的水资源供应保障了城市的民用、商业和工业设施运行，而干净且循环的水环境质量则保障了人类的健康和生态系统的可持续发展。在过去二十年间的高速城市化和工业化进程中，水资源的保护与经济发展被放在了相对对立的位置，经济腾飞的同时却也加剧了中国水资源短缺、水污染严重、和水生态功能破坏等严峻问题，水环境的治理和修复已经刻不容缓。自2005年中国出台第一个重点关注生态问题的五年计划后，中国政府对环境保护的重视程度持续加码，并在2015年后密集出台供水十三五规划、新环保法、“水十条”及相关配套的多项强制措施，从供水保障、水质改善两方面发力整治，在市场驱动、企业施治和公众参与的多方配合下，取得了显著的治理效果和突破。

然而，水资源并不是独立的存在，它与能源和气候变化有着相辅相成而又相互制约的紧密联系——水的生产和处理离不开能源的消耗，能源的过度消耗所产生的温室气体是气候变化的主要原因，而能源的生产又需要水的支持。因此，在“水美城市”和“强化应对气候变化行动”的双重愿景下，协调和平衡“水-能源-气候变化”的三者共联共存的关系已然成为迈向可持续发展的基石。

与此同时，原定于在本世纪中叶实现的“人与自然和谐共生、绿色发展和生活方式全面形成，生态环境领域国家治理体系和治理能力现代化全面形成”的“美丽中国”目标被进一步提前至2035年。政策的不断收紧和目标的层层加严使“节水即治污”、“节水即节能”等系统性思维相继被推出，城市水环境和能源使用结构被放在气候变化的大背景下进行全过程的统筹管理，进一步驱动中国的供水系统与能源使用模式从粗放式的无规划管理向集约式的系统性管理转变。目前，中国在供水、水质、能效和气候变化方面正面临着如下的挑战：

- 供水挑战**：包含连续充足的饮用水供应、全天候无间断的饮用水供应、以及高品质无污染的饮用水供应等问题
- 水质挑战**：包含城市合流制下水道溢流污染严重、污水收集率低导致未处理污水直排入自然水体、管网破损造成地下水等外水入渗、污水厂进水水质复杂、处理效率低等问题

- 能效挑战**：包含城市水循环系统中各耗能关键设备的节能降耗以及高层建筑二次供水系统中泵送能耗控制的优化等问题

- 气候变化挑战**：极端天气频发带来的旱涝灾害对新时代的城市规划提出了挑战

为了更好地建立系统性的思维，将以上挑战在“水-能源-气候变化”的大背景下统筹考虑，本白皮书通过采访逾十位来自政府、市政设计院、高等院校、工业终端用户的行业专家，从供水保障、水质改善和气候应对三个方面着手，探索如何将国际先进经验和中国实际应用情况相融合，使中国的城市水环境和能效提升向更具技术智能化、资源再生化、质效精细化、价值体系化、气候适应化的方向转变：

- 技术智能化**：通过数字化技术的普及提高城市水系统运行效率

- 资源再生化**：通过可再生资源的开发利用实现可持续发展

- 质效精细化**：通过污水收集处理的提质增效优化城市水环境质量

- 价值体系化**：通过资源价格的改革形成有利于绿色发展的价格机制

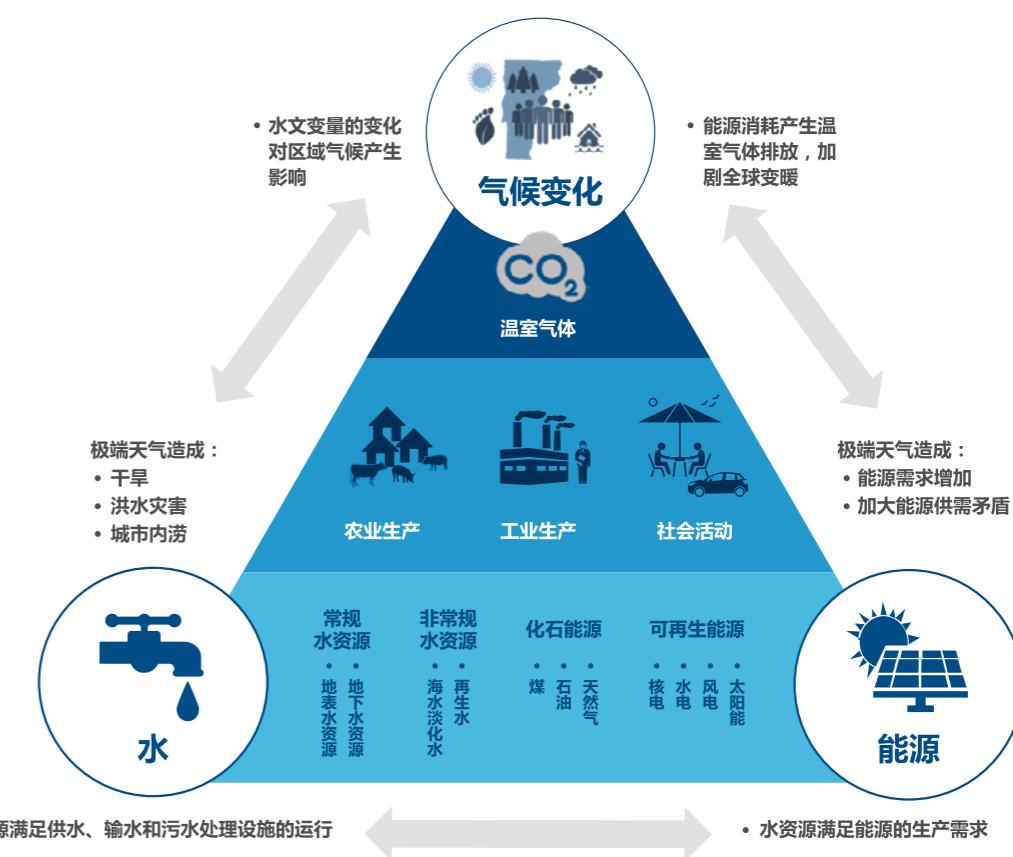
- 气候适应化**：通过新时代海绵型城市规划提升应对气候变化的适应能力

第一章 引言：水、能源与气候变化的2030年全球愿景

水是地球上所有生命得以发生、繁衍和延续的根源。随着全球人口增长、城市化进程的加快和消费模式的逐步转变，水资源和水生态双双遭到严重破坏。水资源的枯竭、污染和生态环境的失衡已成为了制约全球可持续发展的重要因素之一。虽然联合国早在2010年就将享有清洁的饮用水和卫生设施认定为一项基本人权，然而这一权利的普及依然任重而道远。截至今日，**水资源的供应和水污染的控制**仍是全球性的两大水环境难题。据联合国报告统计数据显示，2015年全球有**21亿人**（占全球人口的29%）没有安全管理的饮用水服务，**45亿人**（占全球人口的61%）没有安全管理的卫生服务¹，“水少”和“水脏”的问题依然威胁着全球数十亿人口的用水安全和所居住环境的生态平衡。

然而，将水的问题单一地放在水环境的范畴下讨论是远远不够的，它与能源和气候变化也有着相辅相成而又相互制约的紧密联系（见图1.1）。对于气候变化而言，能源在工业、社会生产活动中过度消耗所产生的温室气体排放过量是全球变暖的主要影响因素。根据联合国数据，化石能源的使用占全球温室气体（GHG）排放总量的60%左右²。反之，气候变化所导致的极端气候一方面造成了水资源相关灾害的发生（如干旱、洪水和城市内涝等），另一方面也加大了能源供需矛盾。据联合国数据称，1995至2015年，旱涝灾害占所有记录在册的自然灾害的48%，严重威胁近34亿人口的生命安全，在二十多年的时间内共计造成高达7,620亿美元（约5.2万亿人民币）的经济损失³，这一数据触目惊心，如何建设气候适应型城市也成为了全球性的重要课题。

图1.1, 水、能源与气候变化的关系



图片来源：GWI

¹ 饮用水、环境卫生和个人卫生进展：2017年最新情况和可持续发展目标基准，世界卫生组织

² 联合国: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/energy/>

³ 《联合国世界水资源发展报告2019》<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367306>

而从水与能源的角度来看，能源的生产和加工离不开水资源——联合国统计数据显示，目前全球用于能源的生产用水共计占全球水资源消耗总量的 15% 左右，而水的相关生产和运输也是能源的主要消耗单元⁴。美国 2017 年能源消耗量约占全球总能源消耗的 16.5%，是仅次于中国的世界第二大能源消耗国家。在其当年 25,992 太瓦时的一次能源消耗中，约 520 太瓦时（2%）用于饮用水和污水处理系统，共计产生约 4,100 万吨温室气体⁵。

因此，为了在充分保障水资源供应和水污染控制的前提下实现全球可持续发展，进一步提高能源效率、增强气候变化的适应和应对能力已经刻不容缓。

“人们越来越认识到，节约能源可节约用水，反之亦然。”

-- 华东地区给水排水技术信息网秘书长李春光

为了统筹考虑水、能源、气候变化对可持续发展的影响，并且协调人类生活、社会生产和自然环境的和谐共存，联合国成员国于 2015 年 9 月 25 日共同通过了《2030 年可持续发展议程》，从社会、经济、环境三个方面制定了 17 项可持续发展目标（SDG）和 169 项具体目标。在 17 项可持续发展目标中，第 6、7、13 项目标分别对全球水、能源和气候变化发展提出了具体的要求。其中，

供水保障、水质改善、气候应对被列为重点目标：

- **供水保障**：到 2030 年，人人普遍和公平获得安全和负担得起的饮用水（详见《2030 年可持续发展议程》具体目标 6.1）；所有行业大幅提高用水效率，确保可持续取用和供应淡水，以解决缺水问题，并大幅减少缺水人数（详见具体目标 6.4）。
- **水质改善**：到 2030 年，联合国成员国需通过以下方式改善水质：减少污染、消除倾倒废物现象、把危险化学品和材料的排放减少到最低限度、将未经处理废水比例减半、并大幅增加全球废物回收和安全再利用（详见具体目标 6.3）；到 2020 年，保护和恢复与水有关的生态系统，包括山地、森林、湿地、河流、地下含水层和湖泊（详见具体目标 6.6）。
- **气候应对**：主要包括减缓和适应气候变化两个部分，一是要进一步节能减排以减缓气候变化，要求到 2030 年全球各类能源的能效改善率提高一倍（详见具体目标 7.3）；二是增强适应气候变化的能力，加强各国抵御和适应气候相关的灾害和自然灾害的能力（详见具体目标 13.1）。

1.1. 响应全球可持续发展：中国对绿色转型的承诺

随着实现联合国 2030 年可持续发展目标的时间不断临近，中国也在逐步推进其实现水资源全面覆盖和应对气候变化的承诺。过去三十年，中国经济持续快速增长，取得了举世瞩目的经济成就——1987 至 2017 年，中国国内生产总值（GDP）年均增长 9.8%，成为世界第二大经济体。

“以前政府官员往往只谈 GDP，但现在关注点已转移到环境上，大家逐渐认识到保护生态环境就是保护生产力。”

-- 衷楠，厦门大学经济学院和王亚南经济研究院（WISE）助理教授

然而，过度生产、大量消费和废弃物随意排放的粗放型经济发展模式，也使中国的生态资源和环境质量受到了不可忽视的重创，工业生产过程产生的污水和未经妥善处理的污染物成为水污染的主要来源。在水资源短缺、水污染严重、和水管理低效的多重挑战下，中国政府积极加速水资源保护和环境治理方面的改革和转型，通过密集出台新环保法、“水十条”及相关配套的多项强制措施，使市政基础设施规划和工业生产模式向更加绿色和可持续的方向转变，旨在为人民提供更高的生活质量，朝着“美丽中国”的未来发展愿景稳步推进。

“党的十八大以来，实现生态文明的理念已成为中国总体规划的重要方面。通过减轻水、空气、土壤污染问题的综合行动计划，在全国范围内共同努力建设美丽中国。未来还将针对水环境综合治理，包括黑臭河道治理和长江水生态系统恢复项目，进一步推进水资源的生态建设。”

-- 张涛，中国环境规划院水环境规划部副研究员

在 2017 年中国共产党第十九次全国代表大会上，中国国家主席习近平进一步制定了国家生态保护蓝图，同时在生态建设各个方面作出高度承诺，促进绿色发展（节约能源和节约用水）、解决污染问题、保护“蓝天碧水”、以及推动清洁能源革命等。与此同时，“十三五”规划（2016~2020 年）分别在供水保障、水质改善、气候应对三方面对水资源、能源和气候变化领域拟定了更为详细的目标（见图 1.2）。在中央政府的政策总要求下，这些目标进一步落实到不同的工业行业中，并层层下放至各省

市的地方政府进行实施和规划，通过行业性和地方性的新指标，对工业生产、社区活动和个人生活中水资源和能源的使用提出了更为细化的要求：

供水保障：

- 农村饮用水：到 2020 年，将农村集中式供水人口比例提高到 85%
- 城镇饮用水：提高饮用水水质——到 2020 年，93% 以上的地级及以上城市集中式饮用水水源水质应达到或优于 III 类，到 2030 年比例达到 95%

水质改善：

- 大幅降低污染严重的水体比例——到 2020 年，长江、黄河、珠江、松花江、淮河、海河、辽河等全国七大重点流域水质优良比例（达到或优于 III 类）比例总体达到 70% 以上，到 2030 年，总体比例达到 75% 以上。劣 V 类水体比例小于 5%
- 到 2030 年，地级及以上城市建成区黑臭水体总体得到消除
- 地下水质极差的比例控制在 15% 左右
- 近岸海域水质优良比例达 70% 左右

气候应对：

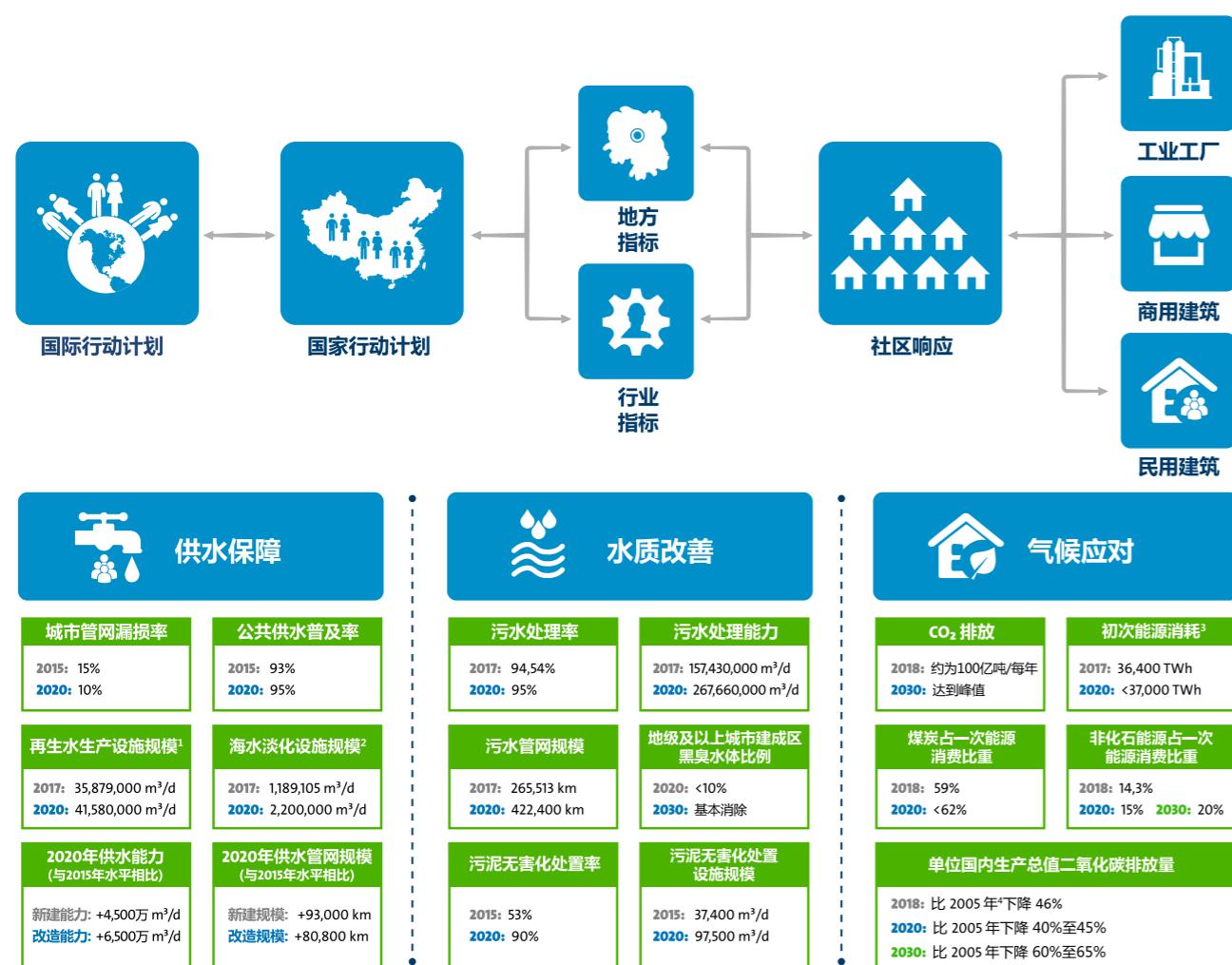
- 到 2020 年，将单位国内生产总值（GDP）的总能耗降低到 2015 年的 85%
- 到 2030 年，努力将碳排放量减少到关键指标 0.355-0.311 千克 / 美元（购买力平价）/ 年（相较 2005 年下降 60-65%）
- 到 2020 年，非化石能源将占到一次能源消费的 15% 左右。在可再生能源技术创新中发挥主导作用
- 到 2030 年，二氧化碳排放达到峰值
- 到 2020 年，试点地区适应气候变化基础设施得到加强，适应能力显著提高，公众意识显著增强，打造一批具有国际先进水平的典型范例城市，形成一系列可复制、可推广的试点经验。

⁴ 联合国, https://www.un.org/waterforlifedecade/water_and_energy.shtml

⁵ United States Environmental Protection Agency, <https://www.epa.gov/sustainable-water-infrastructure/energy-efficiency-water UTILITIES>
(如果将加热、冷却、加压、工业运营等最终用户流程包括在内，这一数字将上升至 12%。)

第二章 供水保障

图1.2, 中国供水保障、水质改善、气候应对目标应对目标



备注:

1. 此处再生水生产设施指城市和县城，不包含建制镇数据
2. 此处海水淡化设施指开始投运的设施规模总和
3. 这里的初级能源包含燃料、用于发电的现代可再生能源等
4. 中国2005年单位美元国内生产总值二氧化碳排放量约为0.888千克/年

图片来源：GWI、世界银行、强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献、应对气候变化规划(2014~2020年)、最严格水资源管理制度、水污染防治行动计划、BP2018年世界能源统计综述

联合国《2030年可持续发展议程》中的第6项目标规定：截至2030年，人人普遍和平获得安全和负担得起的饮用水，从饮用水的供水水量、供水效率和供水水质三方面提出了要求。在全球可持续发展计划的总纲领下，中国政府积极作出响应，通过制定饮用水水源地保护和城市管网漏损控制等多项行动计划，从以下三个重要标准着手，进一步对全国供水体系的安全保障和质效提升进行规划：

- 供水水量保障：连续充足的饮用水供应
- 供水效率保障：在居住地获得全天候无间断的饮用水供应
- 供水水质保障：高品质无污染的饮用水供应

2.1. 供水水量保障：连续充足的饮用水供应

要保证安全的饮用水，首先要保证充足的淡水资源。中国有世界上20%的人口，但是却只有7%的世界水资源，面临着严重的水资源短缺问题。2014年中国人均可再生内陆淡水资源仅为2,062立方米⁶，为全球平均水平的三分之一不到。而在全球气候变化、人口增长、城市和工业迅

速发展等因素的综合影响下，全国淡水资源的供应愈加紧张。这些不断升级的问题迫使中国更加重视水资源的保护和开发——通过加大非常规水资源的开发和提高现有水资源的利用效率等“开源节流”的措施来保障连续充足的饮用水供应。

2.1.1. 加大非常规水资源的开发

在用水需求不断增长和常规的淡水资源匮乏的巨大供水缺口下，中国政府从提高水资源的可再生性着手，鼓励开发多种非常规水资源（如海水淡化水、再生水等）作为补充水源，并通过区域性调水工程，确保居民生活饮用水和工农业生产用水连续充足的供应。

目前，地表水是中国城市地区的主要水源，根据《2017年中国水资源公报》，地表水源供水量占总供水量的81.8%（图2.1）。其次是地下水，占总供水量的16.8%。地下水的过度开采导致地面沉降等问题现已威胁到包含天津和北京等在内的北方城市。为了缓解北方地区的缺水压力，中国启动了历史性的南水北调工程——中部和东部的调水路线均已通水，通过运河和管道，将长江水从南方输送到北京、天津等北方城市以及河北和山东等省。

除了区域性调水工程之外，为了进一步解决缺水难题，中国同时加大力度开发海水淡化和污水回用等非常规水资

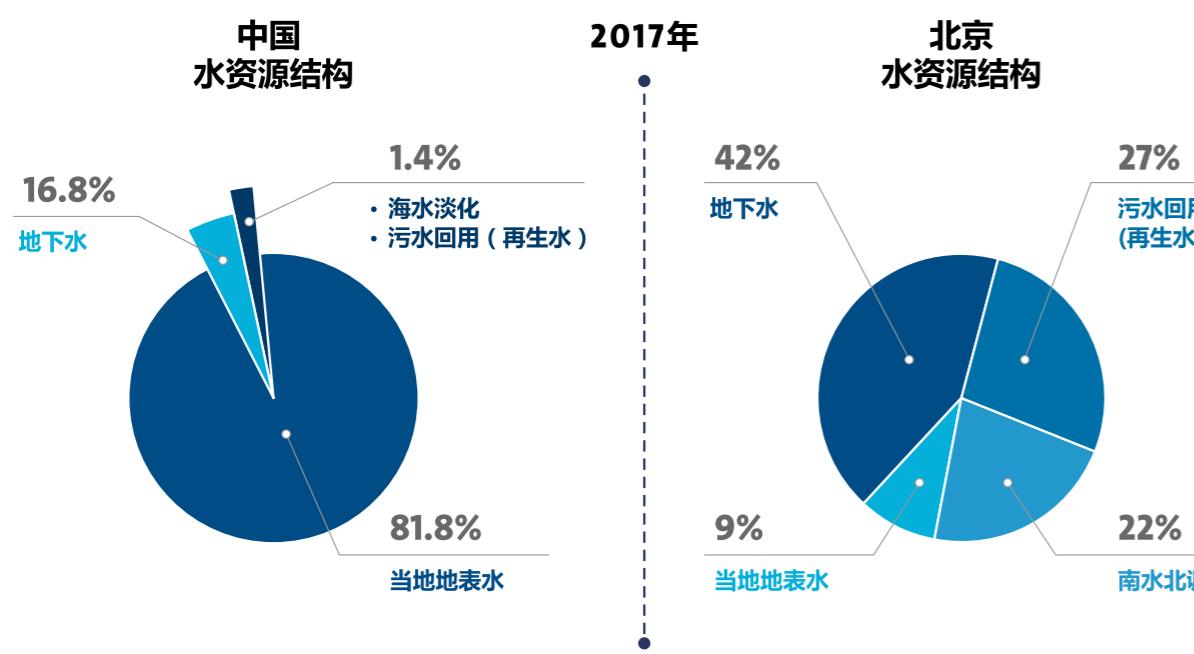
源。污水再生利用是“十三五”规划的一项重要内容：截至2020年底，缺水城市再生水利用率应超过20%（2015年再生水利用率低于10%）。规划同时对京津冀地区提出了更加严格的要求，即再生水利用率必须达到30%以上。

北京作为中国水资源再利用计划的先行城市，其再生水利用率在2017年已占所有用水水源的27%（图2.1）；截至2019年6月底，全市年再生水供水量已达到11亿立方米，约为2009年6.5亿立方米的两倍⁷。然而，相比于其他水资源紧张的发达国家，如海水淡化水与再生水（或称为新生水）分别占总水源的25%与45%的新加坡，中国在非常规水资源的开发优化方面仍有很大的改善空间。

⁶ 世界银行 <https://data.worldbank.org/indicator/ER.H2OINTR.PC>

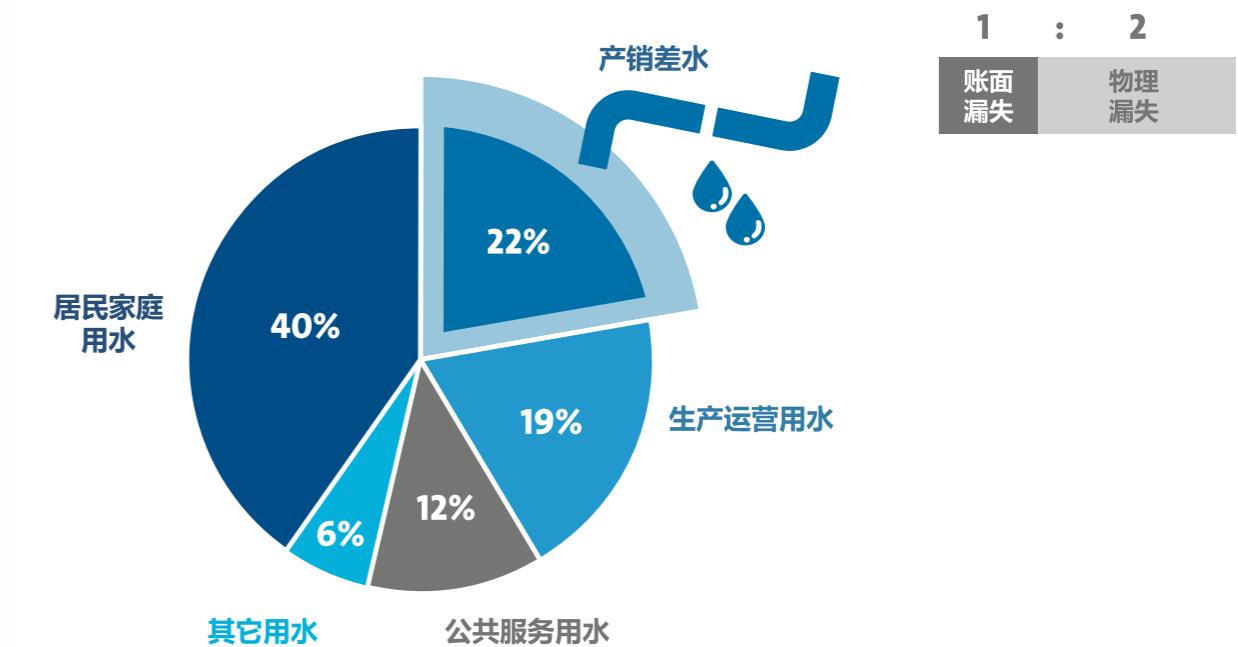
⁷ 北京市水资源公报，2017

图2.1, 中国与北京2017年水资源结构图



图片来源：《2017年全国水利发展统计公报》、《2017年北京市水资源公报》

图2.2, 中国2016年城市供水分布图



图片来源：《2017年全国供水年鉴》

2.1.2. 降低管网漏损率

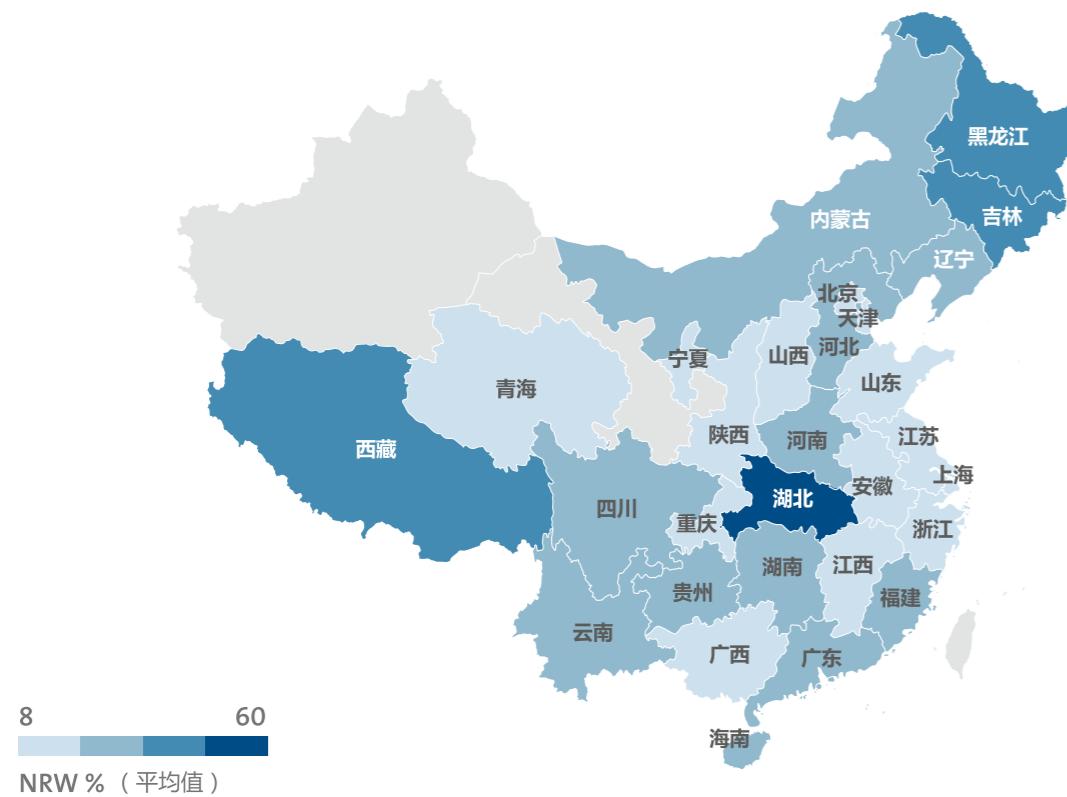
“过高的产销差不仅仅是水资源的浪费，也是产水过程中能源与人力成本的浪费，这是供水端亟待解决的非常重要的问题。”

-- 李春光，华东地区给水排水技术信息网秘书长

漏损控制一直是保障水资源供应的最具成本效益的手段。根据《2016年中国城市供水统计年鉴》数据，在全国各省市自来水公司所生产的421.8亿立方米水中，有90亿立方米的水在到达消费者用水端之前就已经“流失”（见图2.2）。这一部分在供水输送过程中损失的水被称为产销差水（又称未计量水，non-revenue water，简称NRW）。其中物理漏失（由管网漏损等输水系统的物理性损坏所造成的供水损失额）为61.5亿立方米，占总产销差水的68%，剩下的账面漏失（也称商业漏失，指由偷盗或水表计量误差而造成的供水损失额）为28.5亿立方米，占总产销差水的32%。

虽然2016年我国的平均产销差率约为22%，但由于各地输水情况差异较大（图2.2），一些北方城市由于使用水泥制成的老化基础设施，其漏损失率甚至超过50%，与某些发达国家7%-9%的产销差率相比仍然差距甚远。过高的产销差率背后，反映的是城镇供水系统依然存在的巨大供水效率问题，水的漏损不仅仅是水资源的浪费，同时也是供水设施的低效利用，对供水企业和国有资产都造成了不可忽视的经济损失，已然成为困扰城镇供水系统生产和运营的瓶颈问题。

图2.3, 中国2016年各省市产销差情况



图片来源：《2017年全国供水年鉴》

为了更好地应对高产销率的棘手问题，中国于2016年10月颁布了《全民节水行动计划》，旨在呼吁公众提高水资源保护意识、参与水资源保护行动。此外，该计划同时制定详细的城镇节水降损的行动方案，要求在2020年前有效控制全国公共供水管网的漏损率，从2015年超过15%的漏损率水平分别于2017年降至12%、于2020年降至10%。为了实现这一目标，该计划敦促地方政府改造受损修、材质落后和使用年限超过50年的供水管网，并在100个城市开展分区管理计量（District Metering Area，简称DMA）以及漏损节水改造等工作。在这些国家目标的推动下，地方政府纷纷针对这一问题制定详细计划。例如，上海市计划到2020年建设和改造总长2,200公里的供水管网；天津市计划铺设980公里的供水管网；黑龙江省则计划建设1,900公里的供水管网；北京和天津等水资源格外紧张的城市则规定必须率先实施分区计量管理。

然而，分区计量管理的实施并不简单。虽然采用分区计量后，使用仪表数据可将管网漏损范围缩小到特定区域，但仍需耗费大量的时间和人力来精确定位漏损点。

针对这一问题，目前全球范围内已有多家水务公司开始将智慧水务的数字化解决方案应用于供水网络系统优化和管网漏损率控制——即通过智能的实时供水网络监控系统，对供水管网的运行状态进行监测和管理，不仅可以检测出管道漏损的位置，同时也可以对潜在的漏损风险进行提前警报实现预防。例如，总部位于英国的安格利安水务公司（Anglian Water）通过安装永久性管网监控系统，利用噪声测井功能，对英国萨福克郡纽马基特镇的供水网络进行连续的监控，成功地实现了24小时内发现、警报并协助修复的漏损控制效果。

在2020年漏损率降至10%的目标压力下，许多自来水公司已经开始尝试采用和研究智能管网监测技术，并积极对供水系统进行优化和升级。目前，这一智慧水务解决方案的进一步推广仍面临两大挑战需要进一步解决：其一为水厂及管网运行的历史数据的缺乏，其二为商业模式的不明确。充足的历史数据量有助于智能系统更好地分析和预测潜在漏损点，而清晰的商业模式也有利于创造供水企业和第三方技术公司共同获利的双赢局面。

2.2. 供水效率保障：在居住地获得全天候无间断的饮用水供应

由于城市环境中人均土地资源的日益稀缺，中国高层建筑的数量在近几年中飞速增长。高层居住率的日益增长对供水系统提出了更高的要求——常规的供水系统难以将水送至地面以上超过8-12米的地方，高层建筑通常因过高而超出市政自来水供水压力范围。在中国某些地区，由于建筑物内的泵送效率低下，白天只能在有限时段内向高层建筑中的家庭供水，严重影响全天候无间断的水资源供应。

在这一背景下，除了从自来水厂将干净的自来水通过供水管网输送至民用建筑之外，高层建筑内部通过采用增压系统安装二次供水系统已经成为一个必然的要求。然而，目前的二次供水系统由于历史问题也面临着饮用水水质安全的几大问题，其中包括：供水系统材料质量差、缺乏清洗和维护、主体责任不清（水务公司、房地产开发商还是物业管理公司三方责任不清）等。

针对这些问题，中国已在大多数地区开展大规模的建筑二次供水改造工程，并敦促水务公司接管负责。以上海为例，2010年，上海对中心区域的建筑进行改造，这一工程由上海城投水务（集团）有限公司负责，服务片区人口约为1,600万，这一改造项目也将从中心城区进一步延伸至郊区。

除了改造之外，定期维护也是防止二级供水系统中饮用水二度污染的关键措施。目前业内主要关注的两大问题为：

- 精度高、成本低的水质监测系统
- 在二级供水系统中实施数字解决方案，以提高监测和运行效率

2.3. 供水水质保障：高品质无污染的饮用水供应

“目前中国的概念是高品质供水。”

-- 李春光，华东地区给水排水技术信息网秘书长

2006年，国家卫生和计划生育委员会（原卫生部）颁布了GB5749-2006《生活饮用水卫生标准》，用于取代1985年的旧标准。新标准中监测项目数不仅从前的35个增加到106个，同时对部分现有指标进一步加严，其中许多指标甚至与欧美国家的直饮水标准一样严格。新标准

要求供水设施在2012年底之前完成水质达标，对已有供水系统处理工艺的升级改造、及水质管理提出了更加精细的要求。

在新饮用水标准和“高品质饮用水”目标的双重推动下，许多自来水厂开始引入臭氧和活性炭等高级净水技术。这些技术首先在东部一些发达城市推广，如上海（见下文案例）和浙江等地区。深圳市甚至制定了到2025年实现全市直饮水供应的发展目标，其在盐田区的第一个试点项目已于2019年4月正式上线，盐田区成了深圳首个自来水直饮示范区。

案例研究：上海于2018年出台了中国首个地方性饮用水标准

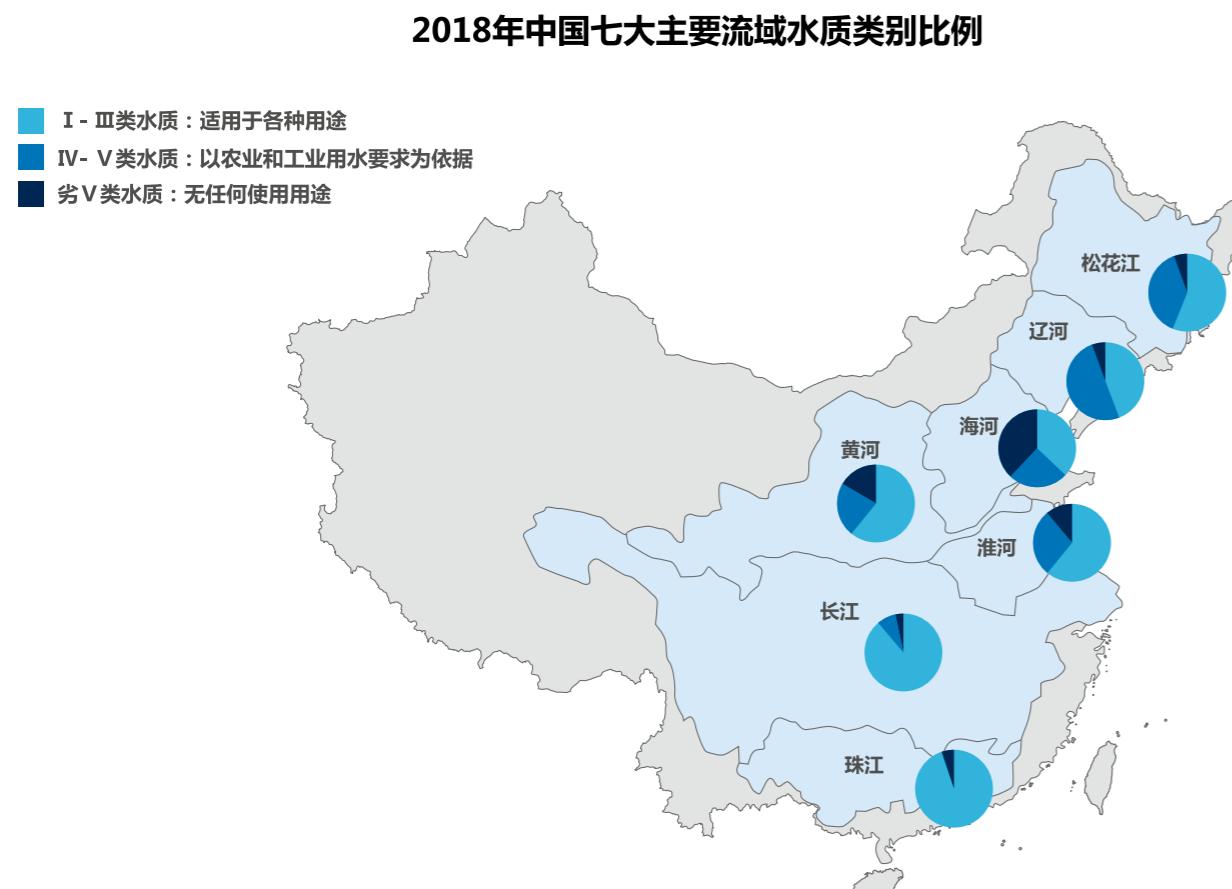
上海于2017年制定了2035年城市发展目标，其中包括饮用水安全保障计划。为了进一步配合该计划的实施，上海在2018年颁布了符合美国和欧洲标准的新饮用水标准，其中的监测项目数量比国家标准多出五项，成为中国首个地方性饮用水标准。截至2017年底，上海共有36家供水厂，综合处理能力为1,184万立方米/日⁸。超过三分之一的水厂采用先进水处理技术，如臭氧、紫外线(UV)消毒、活性炭吸附、超滤(UF)和纳滤(NF)膜过滤技术等。预计这些技术将在全国范围内逐步实施。

第三章 水质改善

除了充足、安全且可获得的水资源外，干净、健康且可持续的水环境也是后工业时代生态文明建设之路上的重要一环。过去，中国一直奉行“经济发展优先”的原则，间接导致环境问题被忽视或边缘化。2018年中国七大主要流域水质情况如图3.1所示，部分地区劣V类水质高比例的问题严重危害了居民的健康和生活环境质量。

城市排水系统及配套基础设施的老旧和破损、各类工业废水的偷排漏排和低效监管等诸多问题，极大地损害着水环境的质量和生态平衡，而水环境的恶化也对国家经济的发展产生严重影响和制约。随着国家对生态文明建设的日益重视、公众和政府环保意识的提高，中国对于水环境质量的关注程度和保护措施正在发生着翻天覆地的变化。

图3.1, 2018年中国七大主要流域水质类别比例



图片来源：《2018中国生态环境状况公报》，中国生态环境部

中国于2015年出台《水污染防治行动计划》（“水十条”），针对环境水质改善和城市黑臭水体消除等问题制定了详细治理目标，并严格设置相应时间节点。在“水十条”的基础上，相关配套措施也先后落地，如2019年1月发布的《长江保护修复攻坚战行动计划》和同年5月所出台的《城镇污水处理提质增效三年行动方案（2019-2021年）》。前者对长江流域的生态系统修复和环境质量改善提出了更加明确的要求，后者则标志着政府全面提升城镇污水系统处理效率和出水水质的重大决心。在这些措施的压力下，无论是城镇污水还是工业废水，都将执行愈加严格的排放标准，以确保所有生活、生产污水在排放进入水循环或重复使用之前，先进行高效的收集和处理，为建设清洁、可持续的城市水环境提供保障。

3.1. 城镇污水管理：质效提升——排水管网是关键

如何妥善且高效地处理城市污水已成为当前中国城市化进程中各界关注的焦点问题之一。据《2015年全国环境统计公报》数据显示，2015年全国直接排放至自然环境中的污水总量（含处理和未处理污水）高达735.3亿立方米/年，相当于黄河的年径流总量。巨大的污水排放量不仅需要城镇污水系统达到同等或更大的处理规模，并配以足以将污水水质处理至排放标准的污水处理技术，同时也对配套污水管网系统的收集、分类和排放效率提出了相当

高的要求。在多轮政策的相继驱动下，中国的城镇污水处理系统正在向具有更高效率、更高质量的精细化模式转变。

“黑臭水体表现在河道，问题在岸上，核心是管网。”

-- 张显忠，上海城市雨洪管理工程技术研究中心常务副主任

3.1.1. 城镇污水管理的困境与挑战：

如果将污水处理厂比作城市污水系统的“器官”，那么污水管网便是城镇污水系统的“血脉”所在，二者共同支撑城镇污水的处理和运输，缺一不可。据全国城镇污水处理管理信息系统统计，在2007年至2017年间，中国的污水处理量从176.5亿吨增加至569.8亿吨，实现了逾三倍的惊人增长。然而，与全国范围内的污水排放总量相比，这一处理规模仍然有所不足。不仅如此，现有污水厂的低效运行和空置等现象对实际污水处理能力的削弱，使污水处理规模的进一步提升愈发紧迫。除污水处理厂之外，所配套的污水管网的“数量”和“质量”也存在部分问题亟待解决，如新建管网铺设长度不足、已建管网雨水和污水混接现象严重、以及因管网材质差和维护不力等原因造成的管道破损等问题。总体而言，目前城镇污水系统大致面临以下挑战：

挑战一，城市合流制下水道溢流污染严重

暴雨天气下合流制污水溢流所产生的污染，将街道和农田的营养物和沉积物以及农药和重金属等其他污染物带入水体。国际上许多国家面临着这个困境，中国也已将这点确定为水环境的一大挑战。2017年，中国分流制排水管网长度为265,513公里，合流制排水管网总长度为111,149公里。管网系统的改造和升级依然任重而道远。根据十三五规划，2016年到2020年，中国预计将新建和铺设125,933公里的排水管道。

挑战二，污水收集率低导致未处理污水直排入自然水体

城镇污水处理系统的不完整覆盖、不健全收集以及管理上的疏忽，导致原本应纳入污水系统的污水未经处理就直接排放入地表水体中，给社区带来严重的环境和健康风险。据国际水务智库（GWI）研究数据显示，2016年中国的城镇污水收集率仅为56.6%，远低于发达国家水平——美国污水收集率为78.2%、英国为85.8%、新加坡则为100%。常见的污水直排包含沿河的生活污水、垃圾渗滤

液、及各种道路清扫污水经雨水收集口而排入雨水管道从而进入地表水体，是造成水体污染的重要原因。

挑战三，管网破损造成地下水等外水入渗

在高地下水位的地区，由于污水管网埋设在地下水中，老旧的管道系统因断裂、破损和塌陷等问题，会使地下水从破裂口直接渗入污水管道内部，而引起污水稀释使潮湿天气条件下合流排水系统的流量明显上升。这一问题不仅增加了污水处理厂的能源消耗，同时也可能对污泥管理过程中的处理效率和能量回收产生不利影响。据《2015城镇排水统计年鉴》所统计的约2,600家污水处理厂数据显示，当年城镇污水厂进水的平均化学需氧量（COD）浓度为255毫克/升左右。而其中近20%的污水处理厂的进水COD水平却低于150毫克/升。这一矛盾显示，目前中国的城市污水管网系统中地下水入渗现象依然严重，排水管道的漏损排查和老旧替换非常重要。低水平的有机化合物除了影响处理效率外，同时也是污泥管理厌氧消化过程中沼气产气速率低的主要原因。与此同时，因管网漏损造成的污水直排也会对附近的地下水造成污染。

挑战四，污水厂进水水质复杂、处理效率低

除了以上城市污水管网系统存在的三大挑战外，污水处理厂也面临进水水质复杂、污水处理效率低，出水水质有待提高等问题。目前，中国的城镇污水管网系统除了接受主要的生活污水外，同时还接收部分工业废水、垃圾渗滤液、初期雨水、以及其他非生活污水。这一污水收集来源不明确的问题，致使城镇污水系统的进水成分相当复杂，其中可能含有易干扰市政污水处理厂运行的污染物，如难降解有机物、重金属等有毒有害物质。仅依赖于城镇污水厂的生物处理技术较难将这些污染物去除，不仅大幅增加了污水处理设施的运行负担，同时导致一些有毒有害成分大量残余在污水处理过程中所产生的污泥中，进一步增加污泥处置和管理的困难。

3.1.2. 未来技术和管理发展趋势：

趋势一，污水系统厂网一体化

过去，污水处理厂通常与污水管网分开建设、分开管理，规划的不周密导致许多污水处理厂的处理量不到其最大处理能力的一半。在政府政策的支持下，将污水处理厂和配套管网捆绑在一起的“厂网一体化”项目越来越普遍，具有相当大的项目规模和投资额。然而，由于管道建设和维护成本高，势必需要适当的风险分担和定价机制。物理集成是一方面，改善排水管网系统和污水处理厂运营部门之间的信息沟通和及时反馈也同样重要。

趋势二，排水系统智能化

采用智能化的软件系统对城市雨水和污水排水系统进行管理和控制，最早在欧洲和美国等发达国家开始流行，如今在中国也日益受到关注。智能化的管理系统不仅可以提高污水厂的运行效率，还可以通过有效的能耗控制成本。一般地，智能系统在污水收集管道中主要通过安装传感器对各项指标进行监测，然后将数据传回中央指挥中心进行分析、同时提出解决方案。比如在某些情况下，当流量达到峰值或过量时，中央控制系统能够通过智能化的分析决定应打开或关闭哪些阀门，重新引导污水流。

案例：威尔士拉内利市 WELSH WATER 公司

2017年，威尔士自来水公司（Welsh Water）在拉内利市的整个合流排水系统和泵站中部署了传感器，以优化网络运行，并使用算法泵站控制来优化流量，使得每年的合流制溢流污染（combined sewer overflow, 简称CSO）次数从414次减少到140次，溢流污染流量成功削减95%。由于这些优化措施，为该市节省了一座50,000立方米的污水蓄水池的投资。

趋势三，管理标准趋严化

“美丽中国”目标的实现对污水处理厂的运营提出了更高的挑战，不仅反应在日益趋严的排放标准上，也体现在不断提高的监管要求上。在城镇污水处理厂的排放标准上，

已经从一级B、一级A，逐渐向地表准四类、四类水体、甚至是三类水体水质标准提升；在监管标准上，污水处理厂运营数据的公开机制以及2016年推行的中央环保督察机制，使得监管体系形成了全流程、全天候、全社会的标准，更加促进了城镇污水处理的质效提升。

3.2. 工业废水分册：绿色管理——回用和资源化是趋势

“近5年之间，工业生产取水单价增幅已超过80%，北方部分地区的增幅已超过100%。很多火电厂水费已占到发电运行维护费用的27%以上，个别地区的水费已超过发电运行维护费用的30%。电厂智能化水务管理+废水‘零排放’的实施，可大大降低电厂的取水费和排污费，使电厂取得良好的经济效益。”

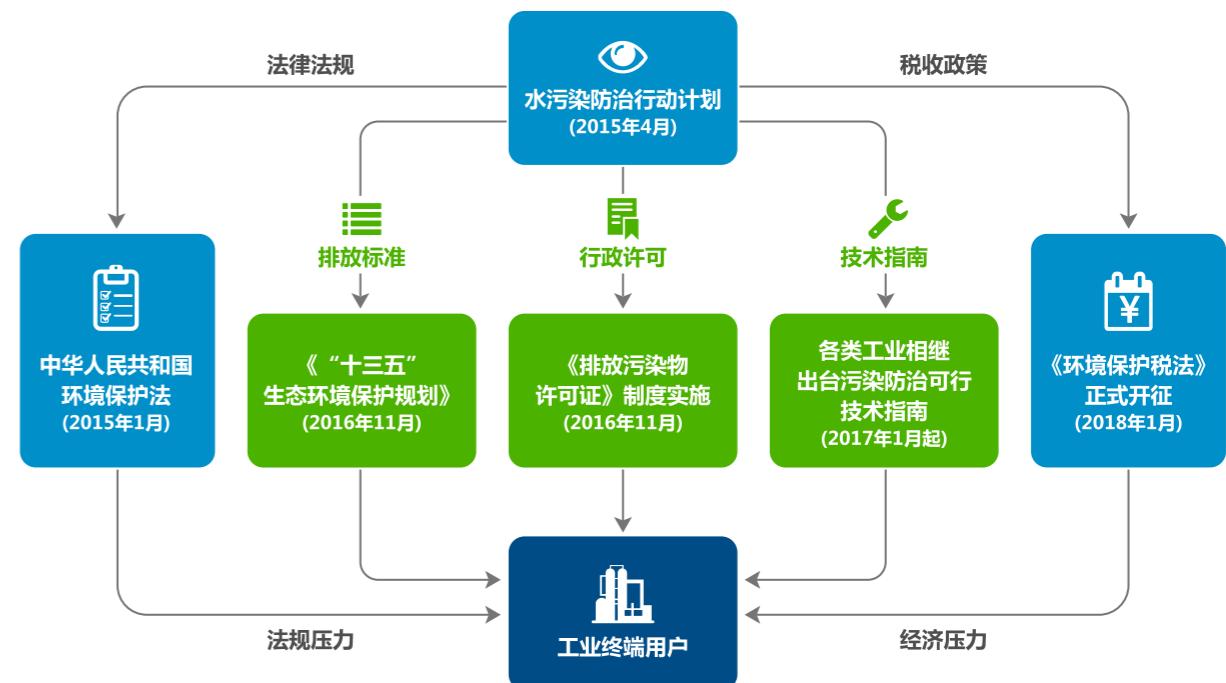
-- 电力行业专家

“显示面板工厂的制程回用率大约在65%-75%之间。回收过程的回用效率低，效果不佳，回收成本高是目前存在的主要挑战。”

-- 胡春明，中国光学光电子行业协会液晶分会副秘书长

工业污水未经适当处理直接排放是造成中国环境污染严重的另一个重要原因。过去由于优先考虑经济发展，执法不力阻碍了环境监管。随着公众和政府意识提高，这一情况开始发生变化。在政策方面，除了颁布了史上最严的《新环境法》之外，中国政府还努力通过多种措施改善工业废水污染对自然环境的恶劣影响，主要体现在罚款和处罚力度的加大和监管制度的改进方面（图3.2）。

图3.2, 工业废水分册未来走向的政策



图片来源：GWI

“政策的持续加严推动了工业废水回用和节水的需求，比如取水和排水总量的严管，也就是排污许可证的要求。”

-- 晋卫，北京燕山威立雅水务有限公司副总经理

措施一，工业污染物排放许可制度

过去，污染控制按年度计划进行，而目前很大的转变在于从过去的任务型目标措施转变为现在直接对水体本身提出质量目标的要求，相对应地，工业污染的排放也将根据环境承载力综合评价确定。为了对整体区域排污情况有所控制，“水十条”提出所有企事业单位都必须获得排污许可证，禁止无证排污和超标准、超总量排污，该计划首先应用于热电厂和造纸厂的污水排放，并计划在2020年之前所有其他工业企业完成排污许可证的申请工作。

实行排污许可制的同时，《中华人民共和国环境保护税法》于2018年正式生效，自此污染物排放量收费由行政性排污费改为强制性税收。这些措施不仅激励企业要更认真考虑污水管理，更迫使企业从源头上减少污水的产生以实现循环化资源化发展。

措施二，规范工业企业取水、排水管理。

为了有效防止不达标的工业污水排入市政管网，《城镇污水处理提质增效三年行动方案》提出将杜绝工业企业通过雨水口、雨污水管网违法排污，同时将对将污水排入市政排水系统的工业设施进行系统性排查，禁止排放市政污水处理厂无法处理的污染物。

• 更严格的排放标准：

生态环境部已经为各个行业制定了更加严格的污水排放标准。“十三五”规划中针对个别行业制定了40多项新的排放标准以取代旧标准，并响应国际发展趋势，将新型微污染物同样纳入监管范围。

- **惩罚性水价和鼓励再利用、有效使用水资源的措施：**

根据“水十条”要求，中国应在2020年底之前公布高耗水行业每单位产品的淡水取用定额标准，并达到该标准。在政府对高耗水行业取用水量的严格控制下，工业用户必须安装污水回用设施，以保证足够的水资源满足新增生产需要或新工厂的建立。此外，为遵守更加严苛的污水排放标准和环境保护法，工业企业不得不安装先进处理技术，将污水处理到更适合再利用的水平，尽可能地减少污染物的排放，降低处置成本和违法风险。

措施三，工业布局优化。

根据国际经验，环境问题的治理成效很大程度上取决于经济转型和产业转移，这是一项长远性的政策。在污染严重

地区、敏感地区以及城市建成区，污染企业均被要求逐步退出。这一政策自2014年推行以来，许多违规排污的小工厂已经关停，而分散的同类型工业工厂也逐步搬迁至工业园区进行统一规划和管理，工业污染直排对环境造成的负担取得了显著的改善。然而，企业的搬迁需要巨大的工程投资和较长的实施时间，未来工业布局的优化在实际的操作上依然任重而道远。

在水资源稀缺与政策约束的双重压力下，工业企业对环保的重视程度逐日增高、减少废水排放与中水回用的意愿也愈加强烈。许多的高耗水产业纷纷安装废水再利用设施，以满足其不断增长的生产用水需求，并尽可能地减少污染物的排放，降低处置成本和违法风险。与此同时，随着工业水处理的重心不断地向废水回用和资源化倾斜，市场对相应的处理技术也提出了更精细化的要求。

案例：南通经济技术开发区工业废水零排放

南通经济技术开发区集中了造纸、纺织印染等高耗水工业企业，是中国工业废水回用的节水、节能的示范工程项目之一。在其二期的中水回用项目中，通过创新地采用超滤、一级五段连续反渗透浓缩系统、电渗析和盐水浓缩等先进工艺所组成的综合解决方案，每年可减少废水排放量约1154万吨，废水回收利用率超过80%。大大降低了水资源消耗。同时，为了更大程度地降低零排放系统的能耗，该项目在反渗透系统中采用一级五段连续浓缩系统，一次浓缩可达90%以上回收率，成功将能耗降低三分之一以上，有效地控制了投资成本。高效地降低能耗的同时，多段的连续浓缩系统也对增压泵的耐腐蚀性和增压效果提出了高要求。格兰富的BM增压泵承接系统3.5MPa的入口压力后，增压实现出口压力达到4MPa至4.5MPa，并在高盐浓度的操作条件下稳定运行。该零排放系统充分发挥各段先进工艺的优势，通过设备的高度集成和协同，成功地将运行费用控制在其他同类零排放运行费用的三分之二，实际运行成本低于4元/吨，在实现工业废水可持续发展的同时，提供了节能降耗的新思路。

第四章 气候应对

中国在针对应对气候变化的政策与行动中一直坚持减缓和适应并重。将两者视为应对气候变化的两个有机组成部分。在水资源领域，针对气候变化的行动通常分为两类：一是通过在城市水管理的过程中提高能效、减少温室气体的排放以减缓气候变化，二是通过增强气候适应性城市的能力建设，增加城市韧性，以适应气候变化的影响，如城市河网水系的修复，海绵城市建设的推广，及构建科学合理的城市防洪排涝体系等。

4.1. 减缓气候变化：城市水资源管理中的节能减排

水与能源作为世界上公认的两大关键资源，是推进工农业生产和社会发展的重要物质基础。随着可持续发展理念的不断推进，无论是政府、自来水公司还是工业终端用户，都开始重新审视这两个原本所认为的相对独立的体系，水与能源之间的相互依存性和制约性也因此得到了更为广泛的认知和重视，“节水即节能”的概念应运而生。

据亚洲开发银行统计数据显示，2017年中国用水部门（包含城市用水和工业用水）的能源消耗约为260太瓦时，占全国总电力供应的4%左右。在用水部门的能源消耗结构中，取水部分约占20%，而输水和运水则占40%¹⁰。城市水管理中的能源消耗已经不容忽视。

那么，优化城市综合水系统中的能耗究竟能起到多大的作用？以下数据很好地说明了节能降耗的重要性：

- **15%~30%：**节能措施的应用能降低多少总能耗？
据美国国家环境保护局估计，电力成本通常是城市自来水公司继人工成本之后的第二大运营支出项目。而通过节能措施的合理应用，可以降低约15%至30%的总能耗¹¹。

- **15.2%：**就市政部门而言，2001年中国市政自来水公司供水总量为270亿立方米，相关能耗为8.9太瓦时（0.33千瓦时/立方米）。而在2016年，随着供水量攀升至422亿立方米（0.28千瓦时/立方米），用于城市供水的电力已上升至11.8太瓦时¹²。换言之，尽管2016年城市水行业的能耗比2001年高出32.5%，但每立方米供水的单位能源消耗却下降了15.2%。在过去十多年间国家对节能的日趋重视，进一步提高了城市水管理中的能源效率。

图4.1列出了整个城市水循环体系中供水、水处理、输水和污水处理等关键阶段所对应的电力消耗和关键的耗能设备。在取水阶段，不同的水源种类所对应的能源消耗也大不相同：地表水开采的能耗范围约为每立方米水耗能0.05-1.23千瓦时；地下水的开采能耗范围则约0.21-0.66千瓦时/立方米；而海水淡化则耗能最高，约3.2-3.5千瓦时/立方米，较高的能源成本也是海水淡化在整个供水水源中占比较小的主要限制因素。而在水处理和输水阶段，根据《2017年全国供水年鉴》对各省市逾2000座水处理厂的统计数据显示，水处理阶段的能耗约在0.013-1.785千瓦时/立方米范围内，而输水阶段的能耗则大致为0.014-1.686千瓦时/立方米。其中，水处理厂的总处理水量、所用处理技术和消毒水平、输水过程中基础设施新旧等因素，都对这两阶段能耗的大小起到决定性的作用。同样地，在污水处理阶段，由于不同的污水处理厂所用的处理技术级别、设备类型和总厂规划不同，每个厂的能耗也差别较大。据《2015年城镇排水统计年鉴数据》显示，全国城镇污水处理厂的能耗范围约在0.01-2.014千瓦时/立方米。

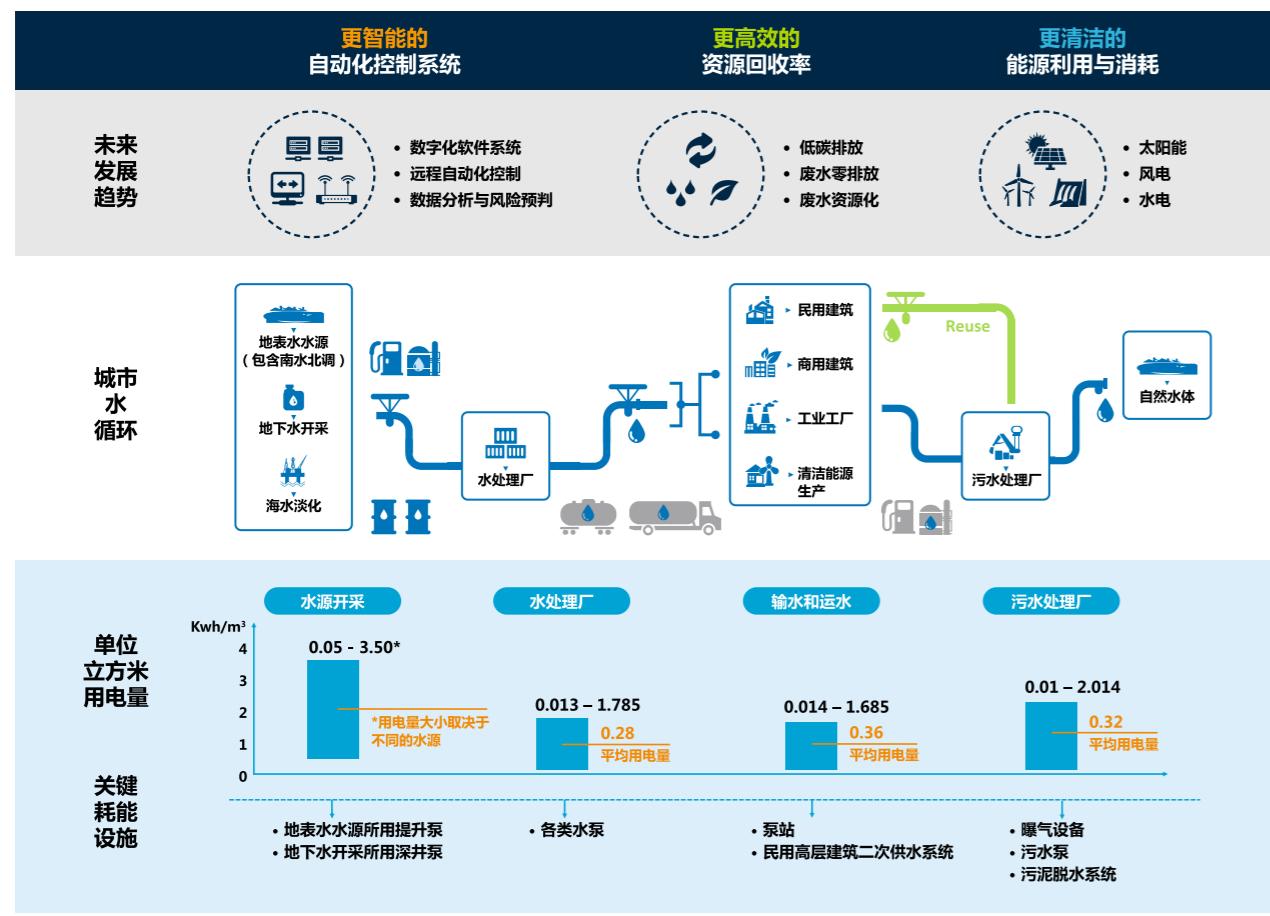
各类水泵的使用贯穿于以上各个阶段，为城市水系统的主要耗能设备之一。因此，如何更好地规划泵的使用，并结合创新的数字化智能技术进行有效的自动化控制和流程优化，将大幅降低这部分的运营能耗，从全生命周期的角度帮助自来水公司节省成本。

¹⁰ Water-Energy Nexus in The People's Republic of China and Emerging Issues, Asian Development Bank, 2017.

¹¹ Copeland (2017) Energy-Water Nexus: The Water Sector's Energy Use

¹² 《全国供水统计年鉴》

图4.1, 城市水系统与能耗



图片来源：《2017年全国供水年鉴》、《2015年城镇排水统计年鉴数据》、Wang J.X., et al, 2012, China's water-energy nexus: Greenhouse-gas emissions from groundwater use for agriculture, Environmental Research Letters 7(1), 1-10

案例解读：

澳大利亚墨尔本水务公司的能效优化方案：

采用人工智能（AI）提升供水和污水处理厂的能源效率

澳大利亚墨尔本水务公司（Melbourne Water）的 Winneke自来水厂位于澳大利亚舒格洛夫（Sugarloaf）水库，为墨尔本地区提供四分之一的自来水供给，该水厂由于每日目标流量水平各不相同，因此每天必须采用不同的泵送方案。为提高运营效率，该厂于2015年开始研究自动化能效解决方案，并最终开发出其独有的 Optimiser 数字化控制系统。该系统通过利用水库水位、流速和功率数据对泵送流量和速度的组合参数进行评估，以将达到目标流量所消耗的能源水平降到最低。在对模型进行了几个月的改进并加入机器学习的功能后，这一数字化解决方案有效帮助墨尔本水务公司节省高达20%的能源成本，6个月内共计节省开支高达11万澳元（约52.6万人民币）。

4.1.1. 建筑供水中的能源消耗

中国在过去二十年间所经历了大规模和快速的城镇化进程，2001至2016年间城镇人口总量增加了74%，城镇住宅规模增加了逾2倍之多。目前，中国约有8.2亿的城镇居民（约占总人口数量的59.2%），联合国预计到2050年这一数字将继续增加2.55亿至10.75亿¹³。城镇人口密度的上升、建筑物数量、楼层高度和建筑面积的增长，带来了大量的建筑能源需求，以支持其供暖、通风和空调系统（HVAC，简称暖通空调）、照明、生活热水及其他建筑服务项目的日常运行。而随着人民基本居住需求逐步得到满足，中国的建筑设计也将从过去的对供应不足的居住矛盾的响应进一步向对能源可持续发展的节能降耗理念的响应转型。

“对于中国南方的建筑能耗分布而言，空调的能耗大约占50%-60%左右，泵的能耗约占6-7%。”

-- 于立军，上海交通大学能源研究院副院长

表4.1, 民用建筑供水系统及其对应供水方式

系统名称	供水方式说明	预计能耗水平 (千瓦时/立方米/月)
“生活水池+工频泵组+高位生活水箱”联合供水	将来自市政供水管网的自来水储存在地面或附近的生活水箱中，然后用工频泵组将水送到屋顶高位生活水箱，再由水箱重力供给各用户用水，属上行下给的供水方式。生活水池、生活水箱与建筑物功能、设计人数及用水器具等决定。建筑物最高几层可能存在供水压力不足的情况，一般需为其增设专用变频增压泵组。	0.007 ¹⁴
“生活水池+变频泵组”供水方式	将来自市政供水管网的自来水储存在地面或附近的生活水箱中，然后用变频泵组将水增压供水给各用水点，属下行上给的供水方式。这种系统比“高位水箱+水泵”联合供水耗能更多。	0.019 ¹⁵
无负压（叠压）供水方式	这种系统是与市政给水管网经供水管（引入管）直接串接、不与外界空气连通、全封闭运行的给水方式，因充分利用市政压力，故耗能更低。因此，与其他供水方式相比，这种系统的能量需求最低。	0.010 ¹⁴

¹³ 联合国, 2018 Revision of World Urbanization Prospects

¹⁴ Cheng (2002), Study of the Inter-Relationship between Water Use and Energy Conservation for a Building

¹⁵ Smith (2016), Reducing energy use for water supply for China's high-rises

大来源为建筑泵送和内部管道系统。目前商用建筑节能增效主要可分为两部分，一部分是安装具有节能功能的新设备，另一部分则为对已有的传统耗能设备进行改造和更替。然而，仅仅安装这些设施是远远不够的，长期的绿色节能行动需要配合用户的合理使用。而在传统的能耗设备节能改造方面，暖通空调系统是大多数商业、公共、工业建筑的最大能耗源，使用高效的内部水泵、冷却器、锅炉和其他暖通空调设备对现有建筑进行改造，可以较大程度地节约用水和降低能源的使用。

据丹麦的国际水泵制造商格兰富集团发布的数据显示，水泵消耗的能源占所有与水相关的设施能耗的10%左右。专家指出，通过对水泵的节能改造，可以帮助该部分系统节省近40%的能耗。而通过使用具有数字化智能监控、计量和数据分析等功能的水泵，则可帮助商用建筑的供水系统节能20-50%。

4.1.2. 水与能源的未来发展趋势

《2018年中国可再生能源展望》表明，由于总能源需求减少和可再生能源（特别是风能和太阳能技术）的成本降低，中国的化石燃料消耗可能在2020年达到峰值。为了使这些预测成为现实，水和能源之间相辅相成的关系将发挥重要作用。那么，对于水务行业而言，该如何更好地探寻水与能源的平衡点，减少各阶段设施的能源消耗呢？本文总结了4点关键的未来技术和管理发展趋势，旨在为城市水系统的节能降耗和未来可持续发展提供一定的借鉴和参考：

趋势一，取水节能：循环化促进废水回用

水土资源与国家工业生产分布不相匹配的供需矛盾使中国面临着异常严峻的缺水问题，特别是在人口密集、工业化集中的北方等水资源稀缺地区，当地地表水资源无法满足当地居民的生活用水和日益增长的工业用水需求，大量的用水依然依赖于远距离区域性供水输送工程与地下水的开采。然而，长距离的输水和地下水的开采均需要消耗大量的能源，同时长距离输送也面临管网漏损和腐蚀性污染等问题。在此背景下，工业废水的就地高效循环再利用不仅有利于解决水资源短缺的难题，同时也可以削减对高能耗取水方式的依赖，已经成为当前工业水管理的新趋势。

趋势二，输水节能：智能化降低管网漏损率

在城市水系统中，自来水的输送以及污水的收集和排放涉及大规模的管网铺设和较长距离的输送，需要大量的能耗用以支持日常的运行和维护。为了最大可能地降低这部分的能耗，除了输水水泵的管材优化和运行效率提升之外，如何有效地对输水管网的漏损点进行勘测、定位、维修和潜在漏损风险的预防对于输水能效的进一步优化非常重要。目前，国际上许多先进的技术公司开发出各种类型的智能化解决方案来解决漏损问题，如以色列的Utilis公司创新地利用卫星影像技术对供水和输水系统的管网漏损进行检测、以及西班牙专业从事漏损检测的技术公司Aganova尝试开发其Nautilus专利技术，通过内部安装

有具有漏损检测功能的球状探测器，专门识别直径范围在250至1600毫米的大尺寸管道内部的泄露情况，而管网漏损率的降低同时也帮助自来水公司减少产水和输水中无收益能源的消耗，提高能源效率并增强收益。水十条中提出到2020年，全国公共供水管网漏损率要控制在10%以内。在这一目标的压力下，智能化漏损检测和预防控制技术将更加普及，并成为输水管网能效优化的主要解决方案之一。

趋势三，污水处理节能：资源化增加污水及污泥处理的能量补偿

除了废水的回用之外，污水处理厂中各处理环节所产生的废热、沼气等能量也可以通过有效的措施进行回收，从而实现更好的节能和能源补偿。例如，可以增加污水厌氧消化处理阶段的能量回收、或通过改进收集、预处理、消化来提高污泥处理质量、加强污水处理的沼气回收、以及增加可再生能源在污水处理厂中与常规能源的协同使用等，对污水处理厂整体的能源使用效率进行优化。

在全球的污水处理领域，许多先进的技术、工艺正在被应用到污水处理领域，以增加可利用能源的回收。比如泰晤士水务公司位于英国伦敦的贝辛斯托克污水处理厂在2017到2018年的时候对其污泥处理设施进行了升级改造，通过引入先进的热水解技术以及厌氧消化技术，大大增加了沼气的回收，每天收集的沼气可以产生高达62兆瓦时的电力，足以为整个污水厂供电，并将50%的额外剩余电力输出到社区，不仅降低了运营成本，更减少了碳足迹。

趋势四，建筑节能：高效化实现泵送系统节能改造

中国的城镇化建设已经进入一个向遵循可持续发展理念的节能型建筑转型的崭新阶段。随着高层建筑中泵送系统的使用受到越来越多的关注，其能耗的控制也成为未来建筑节能的重点改良方向之一。2010年，美的对其位于中国

南部佛山市顺德区的总部大楼进行了改造。在138米32层的大楼内，通过采用各种节能技术如：办公智能灯光控制体系、VAV变风量空调系统、智能控制监控系统等，大大提高了总部大楼的节能率。而其中，建筑楼宇对节能水

泵的升级更新的需求也逐日增加，格兰富帮助美的制定了水泵替换方案，通过将原有的高耗能、高噪音的水泵进行替代，使得大楼运营成本立即减半。经过大概测算，美的总部大楼民用建筑节能示范工程（一期）节能高达60%。

4.2. 适应气候变化：韧性城市建设

全球范围内气候变化的影响正在加速，随着气候变化导致的热浪、干旱和暴雨等极端天气增多，地球正面临着日趋严重的干旱和洪涝威胁，为城市带来了巨大的水资源管理挑战。如何加强城市水系统管理，建设气候韧性城市已经是全球性的课题。各大城市都在积极探索气候适应性的综合水资源管理战略，加强应对气候变化的韧性。中国在2017年启动气候适应型试点城市建设工作，旨在出台城市适应气候变化行动方案，优化城市基础设施规划布局，针对强降水、高温、干旱、台风、冰冻、雾霾等极端天气气候事件，修改完善城市基础设施设计和建设标准。

据2014年一项对全球500大城市的调查估算，每四个城市中就有一个面临“水源压力”。干旱带来的水资源短缺危机，已经席卷了全球各大城市，如澳大利亚东南部的千年干旱（2001-2009）、美国加州持续六年的干旱（2011-2016）、以及使南非第二大城市开普敦面临饮用水枯竭的特大干旱（2017-2018）等。面对这些挑战，各大城市分别因地制宜地采取不同的开源节流的方式来缓解危机：澳大利亚建设大规模海水淡化设施、美国加州启动污水回用计划、而开普敦则是通过水价的调整来控制用水量。在最干旱的时期，开普敦修改了其水价策略，每户家庭第一阶梯使用水量为每月6吨水，超过这一使用量之后水价将增加390%。

而除了气候变化带来的干旱挑战之外，更多的城市正面临着强降雨带来的城市洪涝风险，比如丹麦哥本哈根2011年遭遇的400年一次的特大暴雨、北京2012年的特大暴雨、美国2017年的两大飓风哈维(Harvey)和伊玛(Irma)等，暴雨的极端气候造成了巨大的社会经济损失的同时，也倒逼和敦促各大城市开始探索更为适应气候变化的创新发展之路。

为了更好地应对这些极端气候，中国在城市的规划设计方面提出了“海绵城市”的设计理念（海绵城市指城市能够像海绵一样，在适应环境变化和应对自然灾害等方面具有良好的“弹性”），旨在通过建设雨水径流调蓄、排水等设施进一步完善城市排洪排涝体系。海绵城市这一概念虽起源于国外低影响开发（LID）的雨水管理理念，但由于中国独特的城市发展历程，海绵城市的内涵已远远超出了这一范围，是一项涵盖了与水环境相关的各个方面跨

领域跨专业的综合型建设理念。中国的海绵城市建设被视为城市发展规划的倡议，通过将绿色基础设施（如透水铺装，人工湿地和生物滞留设施等）与灰色雨洪基础设施（如污水处理厂、地下管网、深层隧道等）相结合，将城市设计从过去的钢筋混凝土丛林转变为宜居、绿色和健康的生态环境。

为了更好地落实这一理念，中国自2015年全面启动海绵城市建设试点工作，分别定下2020年与2030年两项建设目标——“到2020年，中国城市20%以上建成区要自然存储70%的降雨；到2030年，全国城市80%以上建成区要达到这一指标”，共计投资约6.72万亿元人民币。30个城市于2016年被选为首批海绵城市试点城市，通过模仿自然水循环，采用具有渗透性和吸水功能的材料（例如绿色屋顶、雨水花园、人工湿地等）取代地面的不透水表面，以收集、引导、和保存雨水以备将来使用，从而进一步加强城市水资源管理，以解决不必要的径流等问题。除了使用绿色空间、绿色屋顶等各种设施减轻城市下水道和排水系统的压力之外，试点城市同时对市政灰色基础设施（如污水厂、污水管网、地下隧道等）来构建科学合理的城市防洪排涝体系。

“中国的海绵城市建设进程正处于试点城市三年建设绩效评估检查的阶段，海绵城市建设从概念性的探索、到规划设计、工程实施与运营维护，均取得了不错的成效，但同时也发现了一些需要进一步解决的问题。以上海为例，未来的海绵城市建设将在试点期建设经验的基础上，逐步进入更广泛的理念式推进和更精细化规划建设管理阶段。”

-- 郭羽，上海市浦东新区规划建筑设计公司
规划四所副所长

第五章 城市“水-能源-气候变化”体系的未来趋势展望

将水、能源和气候变化这三大原本独立的全球性议题放在同一个体系中进行规划、修复和完善，不仅是促进人类生活与生态环境协同发展的必然趋势，也是响应习近平总书记所提出的“美丽、繁荣、可持续发展的中国梦”的努力途径。随着政策的相继出台与资金的持续支持，全国范围内的生态环境治理在过去十年中取得了巨大的进步，同时也从过去的末端治污逐步向未来前端防治的可持续发展阶段迈进。本白皮书分别从技术、政策、管理三方面提出以下五大发展趋势，旨在为新时代背景下中国的生态文明建设提供一定的借鉴和参考：

- **技术智能化**：通过数字化技术的普及提高城市水系统运行效率
- **资源再生化**：通过可再生资源的开发利用实现可持续发展
- **质效精细化**：通过污水收集处理的提质增效优化城市水环境质量
- **价值体系化**：通过资源价格的改革形成有利于绿色发展的价格机制
- **气候适应化**：通过新时代海绵型城市规划提升应对气候变化的适应能力

5.1. 技术智能化：通过数字化技术的普及提高城市水系统运行效率

“...数字化对于提高效率至关重要.....提高我们的数字和机械组件水平是提高性能的关键。”

-- 丁琦，北京供热协会技术部主任

智慧城市是未来发展的必然趋势。数字化解决方案对中国实现水资源方面的可持续发展目标将起到重大作用。目前除小规模智能计量项目外，在水资源方面采用数字技术的比例依然很低，仍有巨大的应用空间。而从全球范围来看，目前市场新兴的技术如下：

- **节能水泵系统**：
水泵消耗的能源占所有与水相关的设施能耗的10%左右。随着高层建筑的增多，配送水所需的能源也大大增加。在这一趋势下，许多水泵制造商提出将节能元件与基于数据的控制软件相结合的解决方案，根据负载调整功率输出对能效进行不断的优化。
- **智能管网监测系统**：
城市供水排水基础设施老化和维护不善引发了大量问题，例如供水管网漏损导致过高的产销差、污

染物渗入供水管网、排水管网的漏损导致的地下水污染问题等，这些都造成了巨大的经济和生态损失。国际上有部分水务公司已率先实施独立计量区(DMA)管理模式，即通过可远程操作的阀门将供水网络分成一个个不连续的部分，以精确定位出现问题的地方并加以隔离。而随着中国对管网漏损控制的日趋重视，未来DMA模式也将在中国得到更加普及的运用，为其他智能技术的普遍应用提供坚实基础——如流量和压力传感器、高级计量基础设施(AMI)等，以提供更好的管网智能化和城市资产管理。

• 自动化污水厂：

目前国际上已有许多污水厂自动化运行的案例，自动化技术的应用不仅可保证出水水质，又可大大优化污水处理厂的能源和化学品消耗。截至2019年，国际解决方案提供商纷纷表示有意将其污水处理厂的优化方案带到中国市场来，其中许多先进方案在欧洲、中东、拉丁美洲的缺水地区已成功实施，有的已实现节能(千瓦时)高达40%、降低能源成本高达50%、降低化学品消耗量高达35%的显著成果。自动化污水厂的先进功能包含实时过程监控、智能能源计费跟踪系统、与过程控制自动化技术，这些功能可在保证出水质量的同时，大大提高中国水行业的流程效率。

5.2. 资源再生化：通过可再生资源的开发利用实现可持续发展

可再生资源的发展是全球性的趋势，是实现可持续发展的必然选择。正如太阳能和风能是可再生能源一样，海水淡化和水回用则是水资源的可再生。可再生资源的发展不仅对于气候变化的缓解有非常重大的作用，对于水资源、能源本身的保护和可持续发展也有着重大的意义。

化石能源的生产需要耗费大量的水，而水的生产也需要大量的能源支持。在这种情况下，水与能源之间是竞争的关系。而当能源结构从化石能源调整为与可再生能源以适当的比例相互共存时，传统的水与能源的相互制约的竞争关系将向互相辅助的合作关系进行转变——可再生能源的开发利用将使耗能较大的非常规水资源的开发得以普及，比如能源成本占据50%的海水淡化。目前，中东地区的部分国家已纷纷寻求太阳能等可再生能源的应用来进一步降低海水淡化的能耗成本，使当地的大规模海水淡化系统更加经济可行，从而缓解全球水资源短缺的巨大压力。由此可见，可再生能源的快速发展将带来可再生水资源的快速发展。

中国是目前世界上最大的可再生能源生产国，2017年，中国风能、地热能、太阳能、生物质能、垃圾衍生能源产生的能源占全球总量的21.9%¹⁶；非化石燃料衍生能源与水力和核能发电一起，满足了中国13.6%的能源需求，高于2016年0.8%。而据《中国应对气候变化规划(2014~2020年)》所定目标，到2020年中国非化石能源计划占一次能源消费比重达到15%左右。

为了响应可再生能源的开发目标，中国政府自2015年开始给予了很大的资金补贴支持——如太阳能、风能、生物质能等，也使得可再生能源的使用出现了爆发式的增长。然而，仅仅依赖于政府的财政补助对于可再生能源的可持续市场化发展是远远不够的，如若没有完善清晰的商务模式用以规范化可再生能源的使用，这一增长态势未来的走向依然不甚明朗。上海交通大学能源研究院副院长于立军表示：“在过去的两年，政府的补贴和国家对新能源的大力支持推动了这个市场迅速地发展起来。但未来政府是否能持续维持这个补贴，其实还不好说，虽然江苏和浙江政府都承诺了还会按照原先的补贴继续补助三年，但像上海还没出台相应政策。”

为了更好地推行可再生能源的开发，并建立可再生能源与化石能源相共存的最好组合模式，政府的补贴依然不可或缺，但同时也有一些问题亟待解决。其一是可再生能源使用的商务模式需要进一步明晰化，从而使整条供应链上的利益相关方得到应有的收益。其二是可再生能源商用的优势性有待进一步提升，在其他相应的能源收费体系(如传统的电费)较低的情况下，需探寻可行的调整方案增加地产开发商或建筑运营商对可再生能源的使用，以更好地减少对有限化石能源的依赖及温室气体排放，从而提高生态稳定性。

5.3. 质效精细化：通过污水收集处理的提质增效优化城市水环境质量

全国范围内城市基础设施建设，正从大规模设施建设阶段进入精细化的运行阶段，各个城市都在努力提高基础设施安全高效的运行水平。城镇污水处理作为城市基础设施的重要组成部分，也在从过去的“规模化提升”向“质效化提升”的模式转型。

尽管中国的城市污水能力在过去二十年间得到了大幅提升，与全国范围内的污水排放总量相比，这一处理规模仍然有所不足。除此之外，现有污水厂的低效运行和空置等现象，也进一步削弱了实际的污水处理能力，导致各地区依旧有污水未经处理直接排放。各类污水包括垃圾渗滤液、初期雨水、工业污水以及其他非生活污水等混合排放进入城镇污水管网，也造成了污水处理厂处理效率低下，

进一步导致了城市黑臭水体的形成。因此，市政污水的精细化管理成了必然趋势。

“市政污水的处理正在变得越来越精细化，从过去各种污水混合收集进入城市污水处理厂进行处理，慢慢向分类收集和分类处理转变，比如初雨污染会采取一些就地处理或者进入市政污水处理厂的处理方式，工业污水则将由专业的污水处理设施进行处理。”

-- 李春光，华东地区给水排水技术
信息网秘书长

“未来，初雨的调蓄与处理将是一个很大的趋势，如截流井、调蓄池等，因为这将显著控制源头的污染。”

-- 张显忠，上海城市雨洪管理工程技术研究中心常务副主任

5.4. 价值体系化：通过资源价格的改革形成有利于绿色发展的价格机制

如何提高水资源的价值一直是全球范围内水资源管理的一大挑战。在水资源严重短缺、各地用水负荷居高不下、以及供水水质要求不断提高的多重压力下，不合理的水价征收水平已经无法覆盖市政水处理、污水处理及供水管网等基础设施的建造和日常运行成本。面对全球性的水资源危机，越来越多的城市开始重新建立水资源的价值体系，并且通过价格的调整和用户的沟通来实现水资源的节约和生态环境的保护。开普敦在面临旱灾时制定的水价策略也被许多城市效仿，用以应对干旱导致的水危机。

根据国际水务智库(GWI)每年针对全球191个国家512座城市的水价调研显示¹⁷，目前全世界有三个完全按照自由市场经济条件下投入和产出模式运作来制定水价的国家（但是水价受政府宏观调控），分别为英国(2018年平均水价为每吨3.97美元)，澳大利亚(2018年平均水价为每吨5.59美元)和智利(2018年平均水价为每吨1.37美元)。其他一些国家如美国、葡萄牙、巴西等，则是部分市场化操作。这一健全独立的经济调控系统既能保证有足够的工程和运维投资来确保供水的安全性与可靠性，同时也能保证每个用水客户能够利益最大化。这种经济调控如果能够很好地运作，则可以进一步驱动水务行业模式与技术创新。以英国为例，这种适应市场经济模式的推行完全改变了水务行业的采购系统，同时创立了更优的风险分担模式，使得既能保证新的基础设施的投资又能保证节约用水户的成本。虽然完全市场化的行为在很多国家由于水资源的公益属性无法完全照搬复制，但是利用价格杠杆来引导资源优化配置，体现水资源的稀缺程度和生态价值的理念则越来越在全球普及。

中国在2019年出台的《城镇污水处理提质增效三年行动方案》对工业污水排放入市政管网、以及城市污水厂网不统一的问题提出了具体的行动计划和整改目标，力求达到污水100%收集和处理，最大限度提高再利用潜力，尽量减少污染物未经处理直接排放造成的生态破坏。这一行动方案的提出，不仅继续收紧所有行业的污水排放标准，鼓励采用先进处理技术，使更多的污水得到更高标准的处理，同时根据处理技术的发展定期审查排放质量法规，并将这些更严格的标准反映在惩罚性排放税上加以执行。

5.5. 气候适应化：通过新时代海绵型城市规划提升应对气候变化的适应能力

随着气候变化日益影响城市的建设和发展，气候适应型的综合水资源管理策略已然成为全球性趋势。

据包括世界银行在内的七大发展银行联合发布的数据报告显示¹⁸，2017年共投入了26亿美元（约180亿人民币）用于气候适应型的水资源管理领域，包括极端干旱下的水资源供给保障和防洪排涝等。世界银行更是在联合国气候变化框架公约第二十四次缔约方会议(COP24)上承诺将2021-2025年针对气候变化的投入资金增加至2016-2020年总投资的一倍，总额高达2000亿美元（约1.4万亿美元），其中很大一部分将用于气候适应型的水资源管理领域。同时，联合国绿色气候基金(The Green Climate Fund)也在2018年末宣布已投入9亿美元（约60亿人民币）用于应对气候变化的各种与水有关的项目，并计划新增20亿美元（约140亿人民币）用于具有重大影响的水资源项目，实现其2020年的目标。

除了各大国际机构的投资总额增加，气候变化导致的极端天气对城市的影响也在敦促各大城市采取海绵城市的理念重新考虑城市的规划设计。海绵城市作为城市规划的新时代发展趋势，基于“山水林田湖是生命共同体”的城市水生态开发和保护理念，将自然生态各要素进行统筹治理。其中，湿地、雨水花园、绿色屋顶和生物沼泽等绿色基础设施的建设，使城市环境更具吸引力，创造了更为宜居和健康的生态环境。澳大利亚最近的一项研究表明，绿色基础设施在身心健康方面具有显着的附加价值，激励更多的人在室外享受大自然。自2015年中国启动海绵城市试点工作之后，海绵城市构建在关键领域取得了良好的效果。目前正值海绵城市试点城市考核时期，希望未来能够在对各试点城市的先进经验与不足之处有效评估的基础上，最大限度地发挥城市和建成环境的能效潜力，因地制宜，实施最为经济有效的可行措施。

采访致谢名单

感谢以下专家对于本白皮书的支持。

- 李春光 华东地区给水排水技术信息网秘书长
- 沈亚东 国家能源集团科技部高级工程师
- 晋卫 北京燕山威立雅水务有限责任公司副总经理
- 胡春明 中国光学光电子行业协会液晶分会副秘书长
- 于立军 上海交通大学能源研究院副院长
- 衷楠 厦门大学经济学院和王亚南经济研究院(WISE)助理教授
- 丁琦 北京供热协会技术部主任
- 李绅豪 必维集团绿色建筑与可持续发展部门经理
- 张涛 中国环境规划院水环境规划部副研究员
- 张显忠 上海城市雨洪管理工程技术研究中心常务副主任
- 郭羽 上海市浦东新区规划建筑设计公司规划四所副所长

参考文献

- 《城镇污水厂提质增效三年行动方案（2019-2021）》
http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201905/t20190509_240490.html
- 《关于创新和完善促进绿色发展价格机制的意见》，2018，国家发展改革委
http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/gfxwj/201806/t20180629_891044.html
- 《关于关于印发气候适应型城市建设试点工作的通知》，2017，国家发展改革委，住房城乡建设部
http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201702/t20170224_839212.html
- 《全民节水行动计划》，2016
<http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1652858/n1652930/n4509650/c5335420/content.html>
- 2009年北京市水资源公报及2017年北京市水资源公报
<http://swj.beijing.gov.cn/search/pcRender?pageId=f5261418ddc74f03b27e3590c531102b>
- 北京市进一步加快推进污水治理和再生水利用工作三年行动方案(2016年7月-2019年6月).
<http://www.beijing.gov.cn/gongkai/guihua/2841/6590/6630/1700290/1532710/index.html>
- 全国城市黑臭水体整治信息发布在线平台
<http://www.hcstzz.com/>
- BP, 2018年世界能源统计综述
<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>
- 2018年中国生态环境状况公报
<http://www.mee.gov.cn/hjzl/>
- 2017年全国水利发展统计公报
http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/slfztjgb/201811/t20181116_1055056.html
- 2017年中国建筑节能年度发展研究报告，清华大学建筑节能研究中心<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=2ahUKEwjBl5uLgbXhAhW8UhUIHRMgA2MQFjACegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fberc.bestchina.org%2FFiles%2FCBEU2017.pdf&usg=AOvVaw378jHCAuEabrOVtLx8PYiO>
- 2018年中国建筑节能年度发展研究报告，清华大学建筑节能研究中心<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjBl5uLgbXhAhW8UhUIHRMgA2MQFjADegQIBRAC&url=https%3A%2F%2Fberc.bestchina.org%2FFiles%2FCBEU2018.pdf&usg=AOvVaw0gZGuEtVXD4tiCkGsqnR3s>
- 中国的绿色革命——以技术探索能源和环境可持续性发展
<https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/chinas-green-revolution-prioritizing-technologies-to-achieve-energy-and-environmental-sustainability>
- 中国落实2030年可持续发展议程国别方案, 2017
<https://www.fmprc.gov.cn/web/zyxw/W020161012709956344295.pdf>
- 强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献
http://www.china.org.cn/chinese/2015-07/01/content_35953590.html
- 中国可再生能源展望 , 2018.
<http://boostre.cnrec.org/wp-content/uploads/2018/11/China-Renewable-Energy-Outlook-2018-Folder-ENG.pdf>
- 全国城市市政基础设施建设“十三五”规划, 2017
http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201705/t20170525_231994.html
- 2017年中国统计年鉴
<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2017/indexeh.html>
- 2017年国际能源信息展望 , 美国能源情报署
[https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf)
- 能源发展战略行动计划 (2014-2020 年), 2014
http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/19/content_9222.htm
- 水务公用事业的能源效率 , 美国环境保护局
<https://www.epa.gov/sustainable-water-infrastructure/energy-efficiency-water-utilities>
- 能源与水的关系 : 水务部门的能源使用 , 2014 年 , 美国国会研究服务中心。
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiLI_3Jg7XhAhUfShUIHeIDIQQFjAAegQIABAC&url=https%3A%2F%2Ffas.org%2Fsgp%2Fcrs%2Fmisc%2FR43200.pdf&usg=AOvVaw1Bje_m0258Dvn4shKNVwTa
- 可持续水务基础设施的能源效率 , 美国环保局
<https://www.epa.gov/sustainable-water-infrastructure/energy-efficiency-water-utilities>
- 国家环境保护标准 “十三五” 发展规划, 2017
<http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201704/W020170414581772760139.pdf>

- 泵与可持续发展，格兰富水泵
<https://www.grundfos.com/water-energy/meet-the-water-and-energy-challenge-now/facts-about-pumps-and-sustainability.html>
- 2018年全球各国二氧化碳排放情况研究，欧洲联合研究中心(JRC)
<https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/fossil-co2-emissions-all-world-countries-2018-report>
- 全球水务数据库WaterData，GWI 国际水务智库
<https://www.gwiwaterdata.com/>
- He, G., et al (2018), 'The water-energy nexus: energy use for water supply in China', International Journal of Water resources Development, DOI: 10.1080/07900627.2018.1469401
- Hong, T., et al (2015), 'Updates to the China Design Standard for Energy Efficiency in public buildings' , Energy Policy, 87, 187–198
- Hou, J., et al (2015) 'Comparative study of commercial building energy-efficiency retrofit policies in four pilot cities in China' , ECEE Summer Study Proceedings, 549-558
- 工业绿色发展规划 (2016-2020年), 2015
<http://www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057267/n3057272/c5118197/content.html>
- Interpretation of the Water Pollution Action Plan, Ministry of Ecology and Environment, 2015.
<http://zfs.mee.gov.cn/fq/gwyw/201504/W020150416535477311118.pdf>
- Keitsch, M., et al (2012), 'An Overview of Chinese Green Building Standards' , Sustainable Development, 20, 211–221
- Li, H., et al (2017), 'Sponge City Construction in China: A Survey of the Challenges and Opportunities' , Water, 9, 594
- Lin, G., et al (2017), 'Water Use of Fossil Energy Production and Supply in China' , Water, 9, 513
- 国家应对气候变化规划 (2014-2020 年)
Available at: <http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201411/W020141104591413713551.pdf>
- Poniewski, M., et al (2015), 'Operation of pumps in a district heating system supplying a distant major industrial user' , Journal of Power Technologies, 95, 68-74
- 饮用水、环境卫生和个人卫生进展：2017年最新情况和可持续发展目标基准，世界卫生组织
<https://www.who.int/mediacentre/news/releases/2017/launch-version-report-jmp-water-sanitation-hygiene.pdf>
- Qiu, G., et al (2014), 'Water and Energy Nexus in China: Current Situation and Future Perspective in Energy Industry, Water Industry and Agriculture' , Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications, 4.2, 138.
- Sacić, D., & Ferrari, G., (2014), 'Design and performance of district metering areas in water distribution systems ' , Procedia Engineering, 89, 1136-1143.
- 上海市城市总体规划 (2017-2035), 2017
<http://www.shanghai.gov.cn/newshanghai/xxgk/j/2035004.pdf>
- Smith, K., & Liu, S., (2017) 'Energy for Conventional Water Supply and Wastewater Treatment in Urban China: A Review' , Global Challenges, 1, 1600016.
- Smith, K., et al (2018), 'Can China reduce energy for water? A review of energy for urban water supply and wastewater treatment and suggestions for change' , Renewable and Sustainable Energy Reviews, 91, 41-58.
- South-to-North Water Diversion Project.
<http://www.nsbd.gov.cn/>
- Sun, Y., et al (2018), 'Strengths and Weaknesses of Existing Building Green Retrofits: Case Study of a LEED EBOM Gold Project' , Energies, 11, 1936.
- Sustainable Development Goals Knowledge Platform, United Nations.
<https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs>
- 最严格水资源管理制度, 2012
<http://www.mwr.gov.cn/zwgk/zfxxgkml/201305/P020170718487120571109.pdf>
- Tong, Q., et al (2019), 'Forecast and Analysis on Reducing China's CO₂ Emissions from Lime Industrial Process' , Int. J. Environ. Res. Public Health, 16, 500UN Environment District Energy in Cities Initiative, UNEP-DTU Partnership (UDP).
- [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=2ahUKEwj7rNqPLXhAhXRRxUIHfe2DFgQFjABegQIChAE&url=http%3A%2F%2Fwww.unepdtu.org%2F-%2Fmedia%2FSites%2FUneprisoe%2FNews-Item-\(pdfs\)%2FTOR_des_MRV-Consultant_Aug18.ashx%3Fla%3Dda%26hash%3D1EA5B664D520DD58C062D06ACADFF10BF8BAB27&usg=AOvVaw0UM18hDcyC0gaii4cjM5Ko](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=2ahUKEwj7rNqPLXhAhXRRxUIHfe2DFgQFjABegQIChAE&url=http%3A%2F%2Fwww.unepdtu.org%2F-%2Fmedia%2FSites%2FUneprisoe%2FNews-Item-(pdfs)%2FTOR_des_MRV-Consultant_Aug18.ashx%3Fla%3Dda%26hash%3D1EA5B664D520DD58C062D06ACADFF10BF8BAB27&usg=AOvVaw0UM18hDcyC0gaii4cjM5Ko)

- Udimal, T., et al (2017), 'China' s water situation; the supply of water and the pattern of its usage' , International Journal of Sustainable Built Environment, 6, 491-500
- 住建部城市建设统计年鉴
<http://www.mohurd.gov.cn/xytj/tjzlsxtytjgb/jstjn/>
- 城镇节水工作指南, 2017
<http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201701/W020170106085153.pdf>
- Wang, F., & Yin, H., (2011) 'The Future of Renewable Energy Development in China – A Policy Perspective'
- Modern Energy Review, 3.1, 17-19.
- Wang, S., et al (2018a), 'Water Use Efficiency and Its Influencing Factors in China: Based on the Data Envelopment Analysis (DEA)—Tobit Model' , Water, 10, 832.
- Wang, S., et al (2018b), 'Water Demand Framework and Water Development: The Case of China' , Water, 10, 1860.
- Water-Energy Nexus in The People' s Republic of China and Emerging Issues, Asia Development Bank, 2017.
<https://www.adb.org/publications/water-energy-nexus-prc>
- 水污染防治行动计划, 2015
http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content_9613.htm
- 城市供水统计年鉴, 2017
<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2017/indexeh.htm>
- 十三五”全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划, 2017
<http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbghwb/201701/W020170123357043245145.pdf>
- 世界银行公开数据
<https://data.worldbank.org/>
- 2019年全球水资源发展报告
<http://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2019/>
- Yan, P., et al (2016), 'Net-Zero-Energy Model for Sustainable Wastewater Treatment' , Environmental science & technology, 51. 10.1021/acs.est.6b04735.
- Yu, S., et al (2014), Analysis of the Chinese Market for Building Energy Efficiency, US Department of Energy
- Yuan, X., et al (2017), The Development of Building Energy Conservation in China: A Review and Critical Assessment from the Perspective of Policy and Institutional System' , Sustainability, 9, 1654
- Zevenbergen, C., (2018), Transitioning to Sponge Cities: Challenges and Opportunities to Address Urban Water Problems in China. Water. 10. 1230. 10.3390/w10091230
- Zhang, Y., et al (2018), 'A Review of Green Building Development in China from the Perspective of Energy Saving' , Energies, 11, 334
- 可再生能源“十三五”规划
<http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbghwb/201612/W020161216661816762488.pdf>

责任 远见 创新
be think innovate



Global Water Intelligence
Suite C, Kingsmead House,
Oxpens Road,
Oxford OX1 1XX, United Kingdom
Tel: +44 1865 204 208 / +86 (0)21 53681239
Fax: +44 1865 204 209
Email: shanghai@globalwaterintel.com

格兰富水泵(上海)有限公司
中国上海市闵行区苏虹路33号
虹桥天地3号楼10层
邮编:201106
销售及售后咨询电话:400 920 6655
销售咨询邮箱:saleschina@sales.grundfos.com
www.grundfos.cn

格兰富
GRUNDFOS The Grundfos logo symbol is a stylized, horizontal 'X' or checkmark shape composed of three thick, dark blue lines.