



水利水电国际资讯摘要

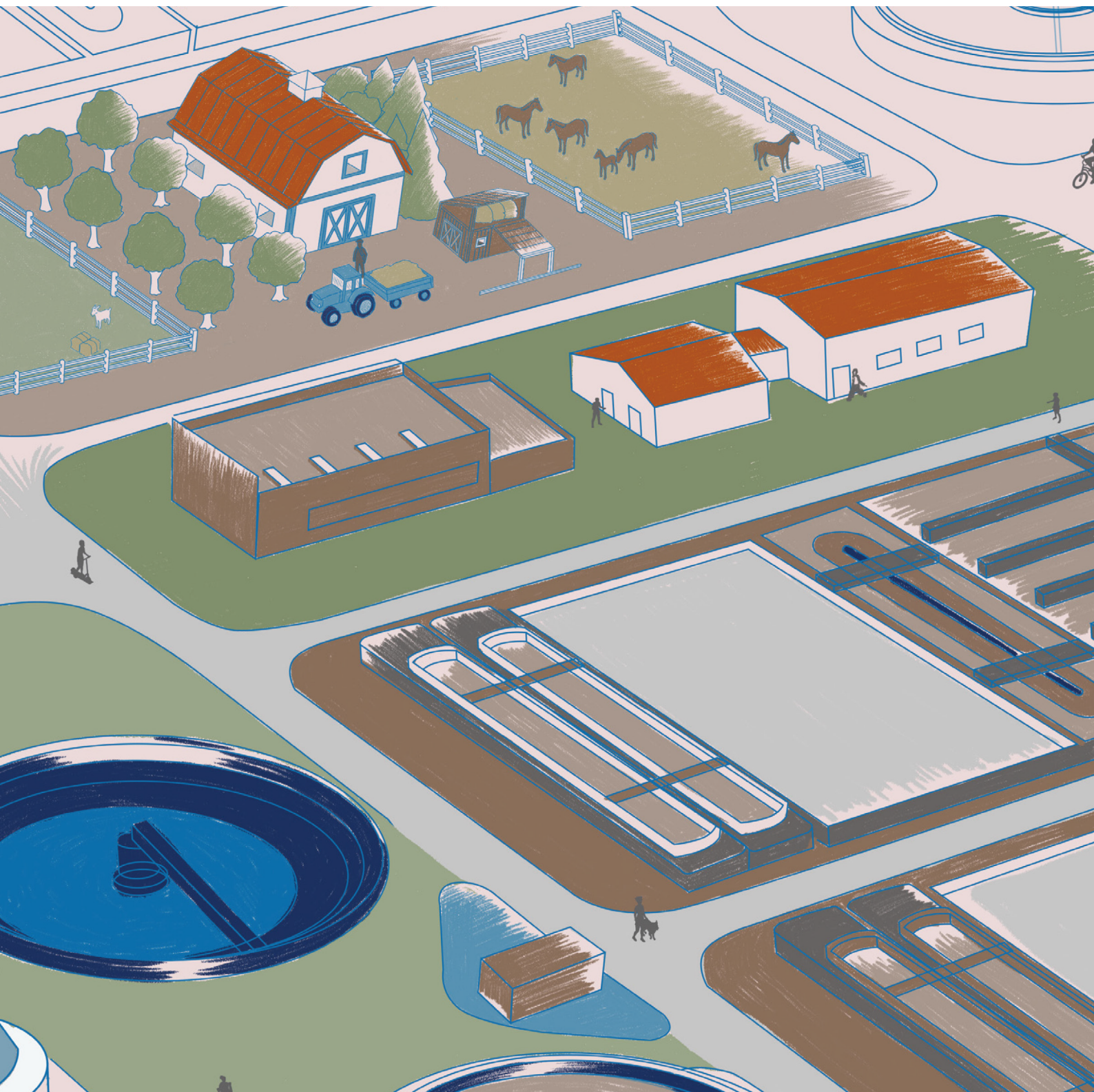
IWHR International Digest

中国水利水电科学研究院 主编：蒋云钟 执行主编：王妍炜 责编：何鑫 李文洋

2026
8
总378期

联合国可持续发展涉水目标：
十年回顾与迈向2030年之路

气候变化加剧
城市水费负担



联合国可持续发展涉水目标： 十年回顾与迈向2030年之路

执行摘要

2015 年, 联合国可持续发展 SDG 6(以下简称“SDG 6”)正式通过并开始实施, 标志着全球首次把水循环纳入一个统一的、受国际社会认可的全球性框架。过去十年中, SDG 6 推动各国积极部署政策、设定目标、调动资源、跟踪进展、认识差距, 基于事实证据采取相关行动, 改善水与环境卫生状况。

SDG 6 实施十年后, 数十亿人的生活得到改善。各国的有关规划成效持续显现, 利益相关方所提供的支持也达到前所未有的水平, 但仍有大量工作有待完成。目前取得的成果在各子目标之间尚不均衡, 且多为小幅的渐进式进展, 差距仍旧存在。

SDG 6 提出的“为所有人提供水 and 环境卫生设施并对其进行可持续管理”愿景, 带来诸多积极影响, 创造前所未有的机遇。距离《联合国2030 年可持续发展议程》结束已不足 5 年, 当前正是加速落实各目标的关键节点。通过加大资源投入、提高执行精准度、深化伙伴关系和加强多边合作, 有望在迈向 2030 年及更远未来的过程中, 为造福人类与地球、促进繁荣带来更多切实成果。为弥合巨大的资金缺口, 需要持续的政治意愿和更广泛的伙伴关系, 以充分挖掘包括民间资本在

内的各行业资金。

本报告发布之际, 正值 2030 年议程最后几年战略机遇窗口期。报告提供了加速落实 SDG 6 所需的最新数据与评估结果。报告面向 2030 年及未来, 系统总结了 SDG 6 十年以来的行动经验, 将为水与卫生在未来多边议程中发挥更大作用奠定坚实基础。

成果显现, 各国正取得可量化进展

SDG 6 实施十年后, 数十亿人获得更安全的饮用水、环境卫生和个人卫生服务; 用水效率有所提高; 更多国家正在开展水资源综合管理, 用以协调人类、经济和自然生态之间相互竞争的用水需求。虽然各地实施进展不一, 但总体方向是积极的:

1. 超过 9.61 亿人获得了安全的饮用水, 使用未经处理地表水源的人数减少了 1.41 亿(对应 SDG 6.1)。

2. 12 亿人获得了安全的环境卫生服务, 16 亿人获得了基本个人卫生服务。露天排便人口减少 4.29 亿; 在城市地区, 这一现象现已不足 1% (对应 SDG 6.2)。

3. 截止 2024 年, 56% 的家庭污水得到安全处理; 在 120 个国家受监测的水体中, 56% 被评定为“环境水质良好”(对应 SDG 6.3)。

4. 2015—2022 年, 得益于经济增长, 全球用水效率提高了 19.5%; 全球平均水资源压力水平几乎没有变化, 仍约为 18% (对应 SDG 6.4)。

5. 截至 2023 年, 近 60% 的国家在水资源综合管理方面至少达到“中高”实施水平, 2017 年这一比例为 40%; 全球 59% 的跨界流域以面积计) 已建立可执行的跨境水合作机制(对应 SDG 6.5)。

6. 2017—2021 年, 有大约 50% 的国家在报告中指出至少有一种淡水生态系统出现退化, 相较 2015—2019 年的 61% 有所改善(对应具体 SDG 6.6)。

7. 2023—2024 年, 政府承诺的涉水领域开发援助资金增加了 6%。一半以上的国家报告显示, 外部融资与国家规划资金基本相等(对应 SDG 6.a)。

8. 多数国家已在法律或政策中明确参与程序; 在可持续发展目标实施期间, 参与程度较高的国家比例有所增加(对应 SDG 6.b)。

SDG 6 推动了具有历史意义的全球行动, 围绕衡量、管理并改善水与卫生状况开展大量工作。自 2015—2019 年以来, 有关数据的可获得性大幅提升。2023—2024 年, 报告 SDG 6 数据的国家数量增长约 60%; 各国报告指标的数量平均从 5 项增至 9 项。

SDG 6 数据仍存在一些重大缺口。2023 年, 只有 17 个国家报告了工业废水的处理情况, 所覆盖人口仅占全球人口的 5%。环境水质监测也存在数据缺口, 北非和亚洲大部分地区尤为突出。2023 年用于水质报告的 200 万条数据记录中, 只有约 6 万条来自全球低收入国家。

进程加快, 但整体滞后且差异显著

若干 SDG 6 指标的实施进程已经开始加速。越来越多国家实现了可量化的增长。与 2015—

2019 年相比, 一些国家和地区的进展速度有所提高。虽然这种加速趋势并非普遍存在, 但仍然表明在一些领域加强实施、监测和机构执行力, 有可能实现更快进展。

然而, 若干地区的水资源压力仍处于极高水平。北非和西亚的趋势继续恶化, 中亚和南亚也新成为水资源问题的焦点区域。自 2015 年以来, 全球跨境水合作的实施范围仅小幅扩大; 在世界各地, 年最小净流量呈下降趋势的流域比例均有所增加。

要实现全球目标, 亟须加速行动。若要到 2030 年实现普遍覆盖, 需要将安全饮用水目标的进度提速 8 倍、安全环境卫生目标提速 6 倍、基本个人卫生目标提速 2 倍。按当前速度, 全球至少要到 2049 年才能实现水资源综合管理指标 6.5.1, 距今还有 23 年。

预测显示, 到 2030 年, 一些地区可能部分实现若干 SDG 6 的具体目标。若把预测期延长至 2045—2050 年, 大多数具体目标的完全实现是可能的, 但也需要大幅提高实施速度。

十年回顾, 实施成效与启示

除上述提到的量化成果外, SDG 6 还对政策制定和实施产生了广泛影响, 并为各国取得相应进展指明了路径。过去十年来, SDG 6 的实施获得以下成效与启示:

1. 提升了水与卫生议题在各层级的政策优先级。作为可持续发展目标框架的一部分, SDG 6 提高了水与卫生议题的显示度和正当性, 提供了一个得到广泛认可的标准, 并推动各国做出国家和国际承诺。

2. 指导了政策制定, 促进了协调统一, 并激发创新方法。各国参照 SDG 6 制定有关政策、设定国家目标、对接国际定义、统一技术标准, 提升了执行体系效能与制度管理水平。

3. 为加强统筹与合作提供了切入点。更多国家已经具备有利基础, 可在不同行业和层级之

间更好统筹水管理,包括开展跨境水资源合作。SDG 6 也为在其他政策领域和政府间进程中考考虑并纳入涉水议题提供了入口。

4. 促进利益相关方采取行动,支撑为 2030 年及未来建立水与卫生的专门目标。SDG 6 有助于调动政治承诺、推动开展有关行动;同时呼吁建立更有力的执行机制、投入更多资源,并加强政策承诺与实际运行之间的联系。

5. 加强了联合国全系统对水与卫生优先事项的协调和落实。通过成立联合国水机制、“SDG 6 综合监测倡议”、《联合国全系统水与卫生战略》、“SDG 6 全球加速框架”“水行动十年”、任命联合国秘书长水特使以及连续举行联合国水大会等举措,联合国全系统强化了不同机构之间的协调与联合行动。

6. 受到资源不足的制约。能力建设、运营治理、融资等方面长期存在的缺口,限制了 SDG 6 的进展。要加快实施,必须从碎片化的项目融资转向更全面、体系化的可持续投资模式。

全球格局不断变化,机遇与制约并存

全球环境的重大变化正在重塑水与环境卫生挑战的规模、性质及各挑战之间的相互联系:

1. 科学、技术和创新方面的进步,为更好认识水循环的持续变化、消除过去长期拖慢进展的阻碍提供了机会。

2. 融资和能力建设方面的环境变化带来了新的方法和实施路径,有助于建立合理的金融架构、培养机构能力,持续为 SDG 6 进展提供支持。

3. 水越来越被视为可持续发展目标加速和转型的“超级连接器”,并将成为决定 2030 年后可持续发展议题走向和新兴经济行业发展的关键因素。

4. 水议题被提上了更高的国际议程,促进联合国成员国在各互动讨论中提及水议题,并将水议题纳入其他政策领域。

5. 当前联合国各成员国对涉水议程越来越重视,并逐步扩大《联合国全系统水与卫生战略》的实施规模。然而,政府部门开发援助的减少日益影响到联合国水与卫生相关项目的推进。

2030 年后,从渐进式转向变革性转变

若要从当前小幅的渐进式进展迈向真正的变革性转变,既要坚持行之有效的措施方法,也要为未来更好落实 SDG 6 继续改善所需的体系和程序。面向 2030 年及更远的未来,可从以下几方面加强水与卫生目标的实施路径:

1. 加速改进并转变 SDG 6 的实施方式。推动水与环境卫生融资和能力建设方法的变革性转变,支持各国扩大实施规模;充分利用 2026 年和 2028 年联合国水大会,汇聚各方力量,加强政治意愿及国际伙伴关系。

2. 把水作为可持续发展的系统性驱动因素。加强跨部门协调和决策,确保水问题被统一纳入国家政策和规划。通过加强宏观政策、具体目标和细分指标之间的一致性,继续把水相关议题纳入现有政府间进程。

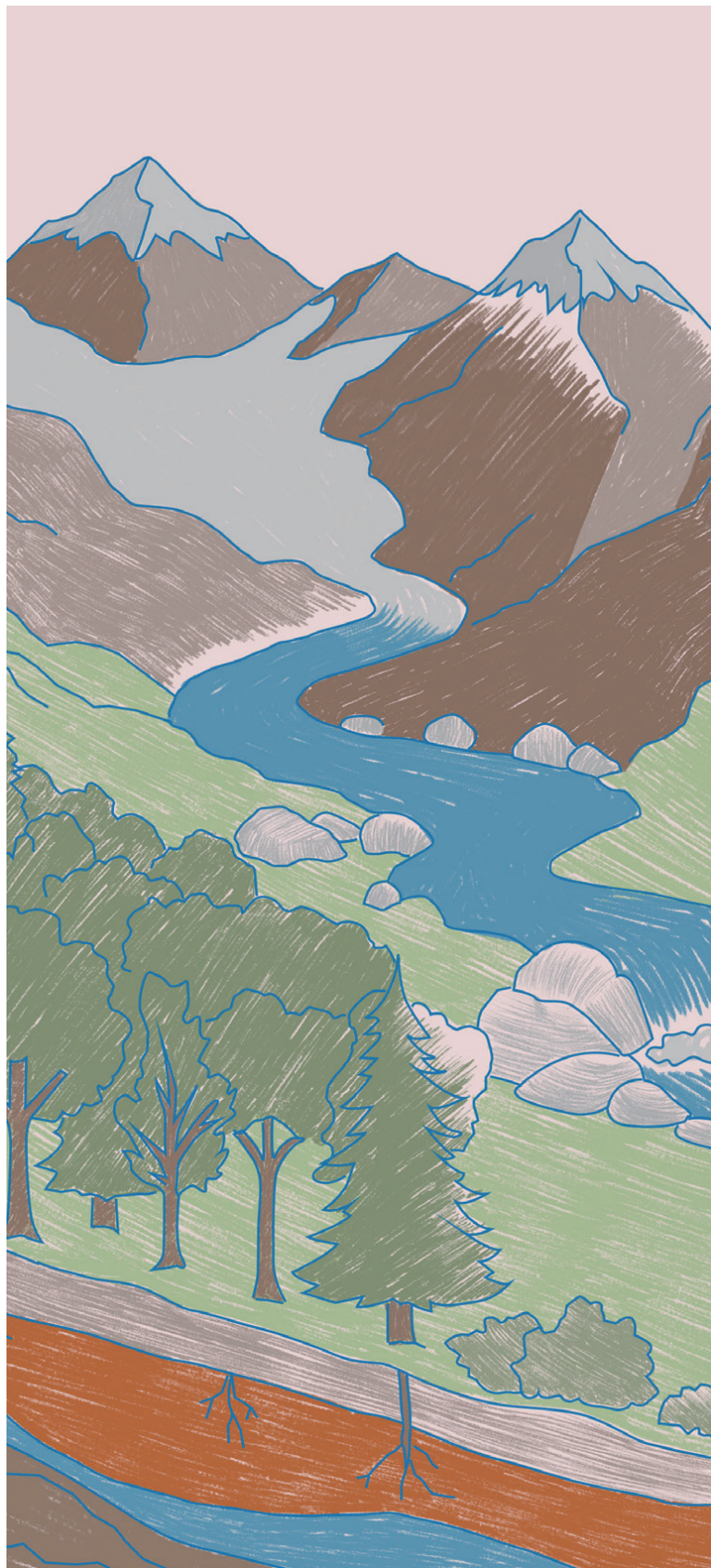
3. 促进更加体系化、更有实质意义的多利益相关方参与和对话。提升利益相关方在水与环境卫生政策、规划和决策过程中的作用,加强利益相关方在联合国现有和未来水相关政府间进程中的参与度。

4. 借鉴 SDG 6 经验,改进与水相关的目标制定,使宏观政策、具体目标、落地实施之间更紧密的衔接。整合实际案例与数据,强化面向未来的目标和指标,包括能够对 2030 年之后制定框架做出贡献的候选指标。

5. 确保 2030 年后联合国继续开展涉水政府间进程。该类进程可在联合国大会或经济及社会理事会上提出推进,并形成实质性成果,包括政府间可能会商定发布的宣言。

6. 扩大联合国系统内对水与卫生议题

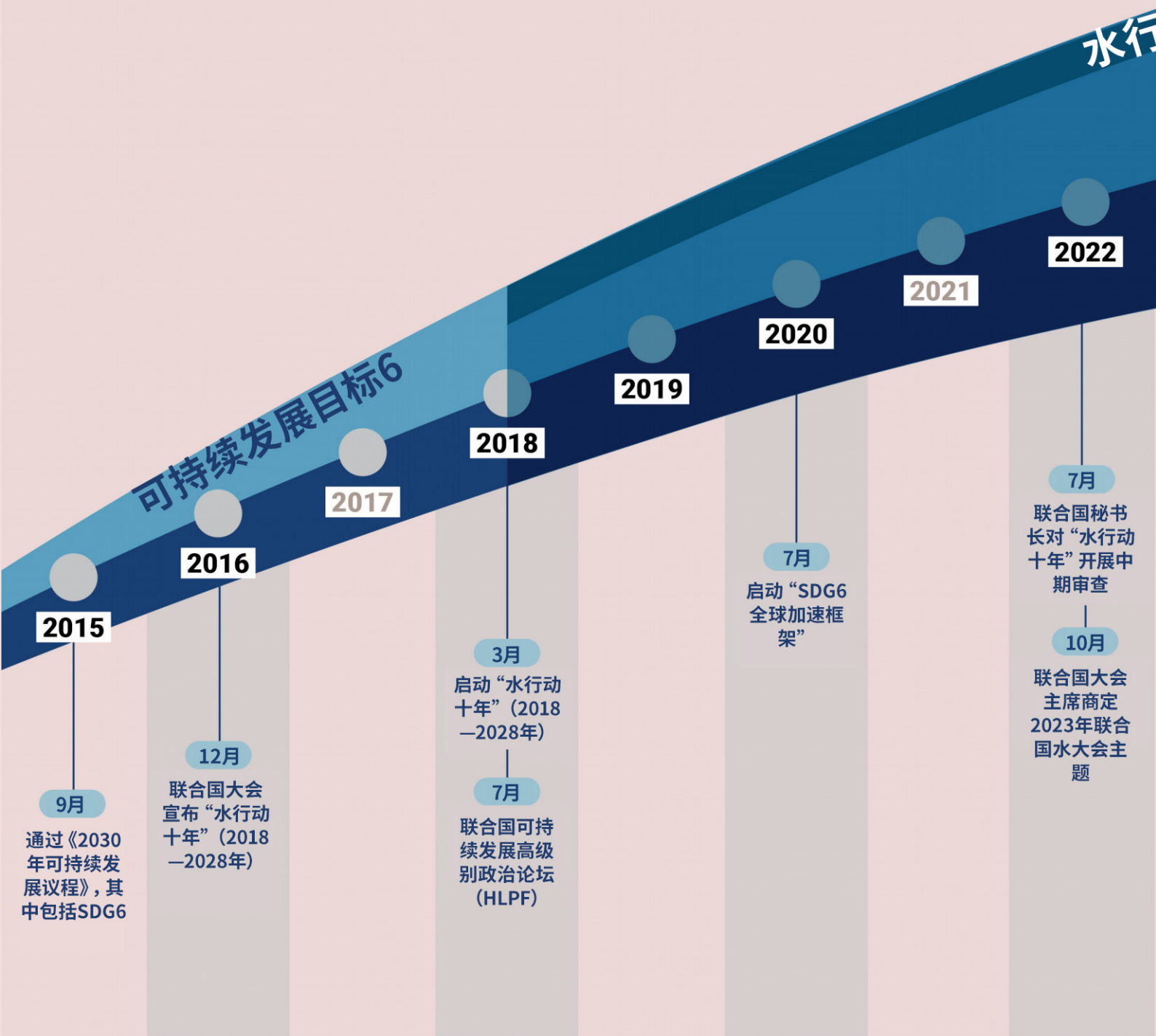
支持的灵活性与有效性,以便协调和落实工作。加强联合国各机构的水与卫生项目,加大《联合国全系统水与卫生战略》在地方层面的实施。强化联合国水机制的作用,把其秘书处逐步发展为服务于各机构间协调的联络窗口。



可持续发展目标6与水行动十年的关键节点 (2015-2030年)

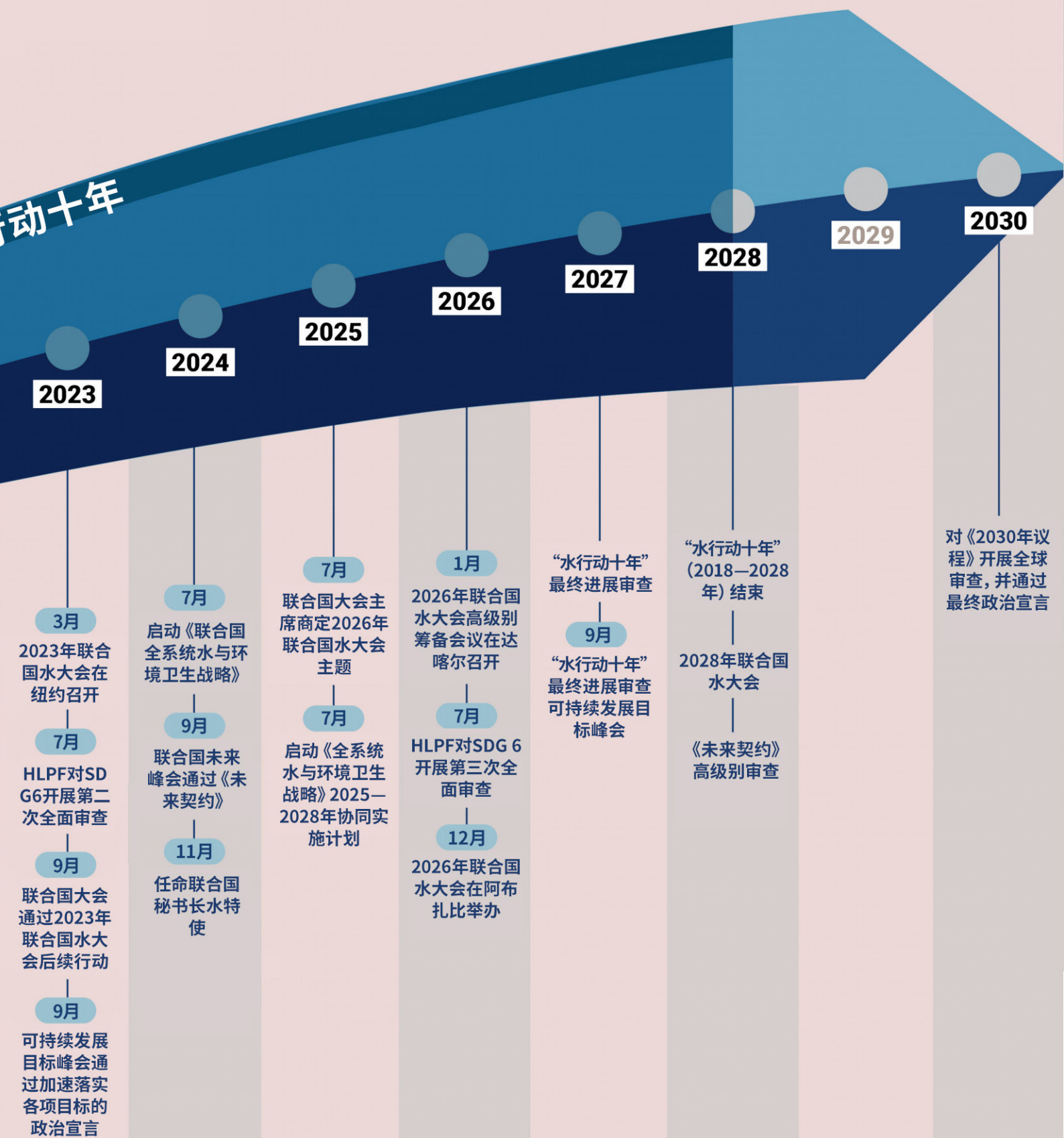


WATER
ACTION DECADE
2018-2028



2015—2022年 | 从奠定基础到形成势头

水行动十年



2023年 | 全球转折点

2024—2026年 | 从承诺迈向全系统行动

2027—2030年 | 迈向2030年及未来

气候变化加剧城市水费负担

气候变化正在加剧全球水资源压力。为保障稳定供水,需要采取高成本干预措施来维护基础设施。因此,为筹集有关资金,公用事业部门通常会上调水价,从而增加低收入家庭的用水负担。气候变化对水费可负担性的影响取决于公用事业成本,以及水价结构、融资安排、气候条件和家庭用水需求等要素之间的相互作用。本文构建了一个城市尺度的模型框架,将气候、公用事业部门适应决策和用水需求整合起来,用于估算气候变化对水费可负担性的影响。研究以美国加利福尼亚州圣克鲁斯市为例,结果表明到本世纪中叶仅气候变化一项因素就可能使水费翻倍,并使圣克鲁斯市在现有基础上多出 7%—16% 的家庭面临水费负担。在供水系统易受气候变化影响的热点地区,气候变化造成的水费可负担性可能比以往的预测更为严峻。为确保气候适应措施不以牺牲水费可负担性为代价,亟须开展政策干预并提供融资支持。由于气候所导致的水费负担问题取决于地方条件,因此需要在城市尺度开展评估。

在全球高收入国家,水费负担挑战日益突出。过去 20 年间,由于供水基础设施老化和维护拖延问题,水价上涨速度约为通货膨胀率的 3 倍。如果这一趋势延续,未来 10 年内,美国可能有三分之一以上的家庭无法承担水费。与此同时,新兴污染物对处理技术提出更高要求,加之气候变化带来新的供水需求,正在进一步加重供水公用事业部门长期面临的成本压力。水费负担会给家庭带来饮用水和卫生用水困难,不得不在水费与医疗等其他生活必需支出之间作出艰难取舍,并

可能对健康造成不利影响。这对低收入群体和少数族裔社区的冲击尤其严重。

在许多城市,气候变化一方面造成供水紧张,另一方面又因气温升高推升需求,使得供水公用事业在提供可靠且可负担供水服务时面临挑战。从供给侧看,气候变化会改变干旱发生的频率、强度和持续时间,并造成更加干燥的基准气候条件。公用事业部门通常通过降低需求或扩充供给加以应对;后者往往需要建设昂贵的基础设施,并最终推高用户水价。公用事业部门也会在干旱早期采取限水措施或通过用水效率项目来进行需求管理,但为弥补售水量下降造成的收入损失,或支付节水改造和监测设备有关费用,仍会通过附加费等方式上调水价。

既有研究已关注到了水费可负担性问题的加剧,但对未来趋势的认识仍然有限。现有预测通常依据历史趋势进行推断,未能识别气候等未来可能发生变化的成本驱动因素,也往往忽视用水模式、水价结构等社会和制度因素。现有研究关注了成本和需求的相互影响,阐述了针对低收入群体援助项目有可能增加用水量。此外,多数实证研究只考察某一时间点,未充分考虑可能加重短期问题的季节和时间变化。若要在城市、州和联邦层面制定有效、可持续的政策方案,必须提升对未来水费可负担性的预测水平。

干旱和气候变化可能推高供水基础设施的投资,但这些投资对水费可负担性的影响仍未被充分研究。大量研究关注气候变化下的供水基础设施需求,主要评价社会尺度的成本与绩效,而

非家庭尺度的支付能力。基础设施融资和水价设计也多从公用事业部门视角分析。近期研究深化了气候相关基础设施对低收入家庭影响的认识,但未考虑需求反馈或融资机制;另有研究探讨了因干旱导致水价上涨对居民可负担性的影响,但侧重于短期影响而非气候变化的影响。

本研究旨在量化气候变化对城市水费可负担性的影响。研究构建了一个缜密的的城市尺度模型框架,以显示气候、公用事业部门适应性决策和需求这几项综合因素如何共同影响美国家庭的水费负担。该框架将水文与供水系统模型、基础设施融资和水价设计模型,以及家庭用水需求计量经济模型相耦合,评估在未来气候条件下,为维持稳定供水而采取的适应性决策所产生的水费可负担性影响。相关决策涉及新建基础设施、融资机制、水价结构、援助措施、限水政策和用水效率等。研究假设在供水脆弱、需求管理空间有限的城市区域,气候变化可能造成用水负担热点地区进一步加剧已有的水费负担问题。

研究以加利福尼亚州圣克鲁斯市为案例,重点考察到本世纪中叶的气候变化影响。圣克鲁斯市因过去多次经历干旱,居民用水量已较低,因而通过限水或效率政策进一步低成本压减需求的空间有限。同时,该市高度依赖本地地表水,对干旱十分敏感。通过研究一个已基本用尽低成本气候适应措施的城市,本研究聚焦于昂贵的长期基础设施决策,揭示出具有相似气候、行为和管理条件的其他城市都可能面临的挑战。

研究结果

气候适应措施的可负担性影响

如图 1a 所示,研究提出的模型框架用于量化气候变化及相关供水及用水需求适应措施所产生的可负担性影响,并同时考虑气候、公用事业适应性决策、融资和需求之间的相互作用。第一步,将气候模式集合与随机天气发生器相结合形成未来气候情景,并输入供水系统模型,模拟

进入水库及引调水工程的河川径流,以及从引调水工程向水处理厂分配的水量。第二步,采用失效风险(ROF)方法模拟公用事业部门适应性决策,即在库容下降时触发相应行动。第三步,利用基础设施融资和水价设计模型评估这些干预措施对水价的影响。以圣克鲁斯市为例,重点研究基础设施投资相关的公用事业决策,通过评估多种规划方案来确定何时建设何种新型基础设施。第四步,根据人口特征、气候、水价和住房特征模拟家庭用水模式,从而捕捉家庭行为、供水和公用事业决策之间的动态反馈。例如,城市新建基础设施需要通过提高水价筹资;水费上涨后,家庭用水会减少,进而改变系统所需供水量。最终,这一框架可估算不同收入群体的水费及其可负担性,即家庭收入中用于支付水费的占比。

利用这一框架,研究评估了不同气候情景对水费可负担性的影响。图 1b 和 1c 直观展示了两组具有对比性的气候模拟结果,说明了基础设施建设对两个样本家庭水费可负担性影响的作用机制。在温和、凉爽气候下,即便不新建基础设施,样本低收入家庭的水费支出已经超过美国环境保护署所建议的 2.5% 可负担性阈值。在另一种可能的干热气候下,水库蓄水量下降触发建设一座日供水能力 400 万加仑(约 1.51 万立方米)的海水淡化厂,继而导致水价和水费上涨。在第二种情景下,低收入家庭的水费负担率由 4% 升至 6%,而高收入家庭受到的影响可以忽略。这说明气候压力会加重低收入家庭原已存在的水费负担。

干旱气候下的水费负担

如图 2 所示,在大量随机模拟的汇总结果中,圣克鲁斯的情景表明,气候变化可能使水费几乎翻倍,并使另有 7%—16% 的家庭无法承担水费。研究考虑截然不同的气候条件与基础设施规划适应策略,设置了四种合理的情景:一是与当前相近、无新增基础设施的温和凉爽“基准”情景;二是在同样气候下按需建设基础设施的“温和气

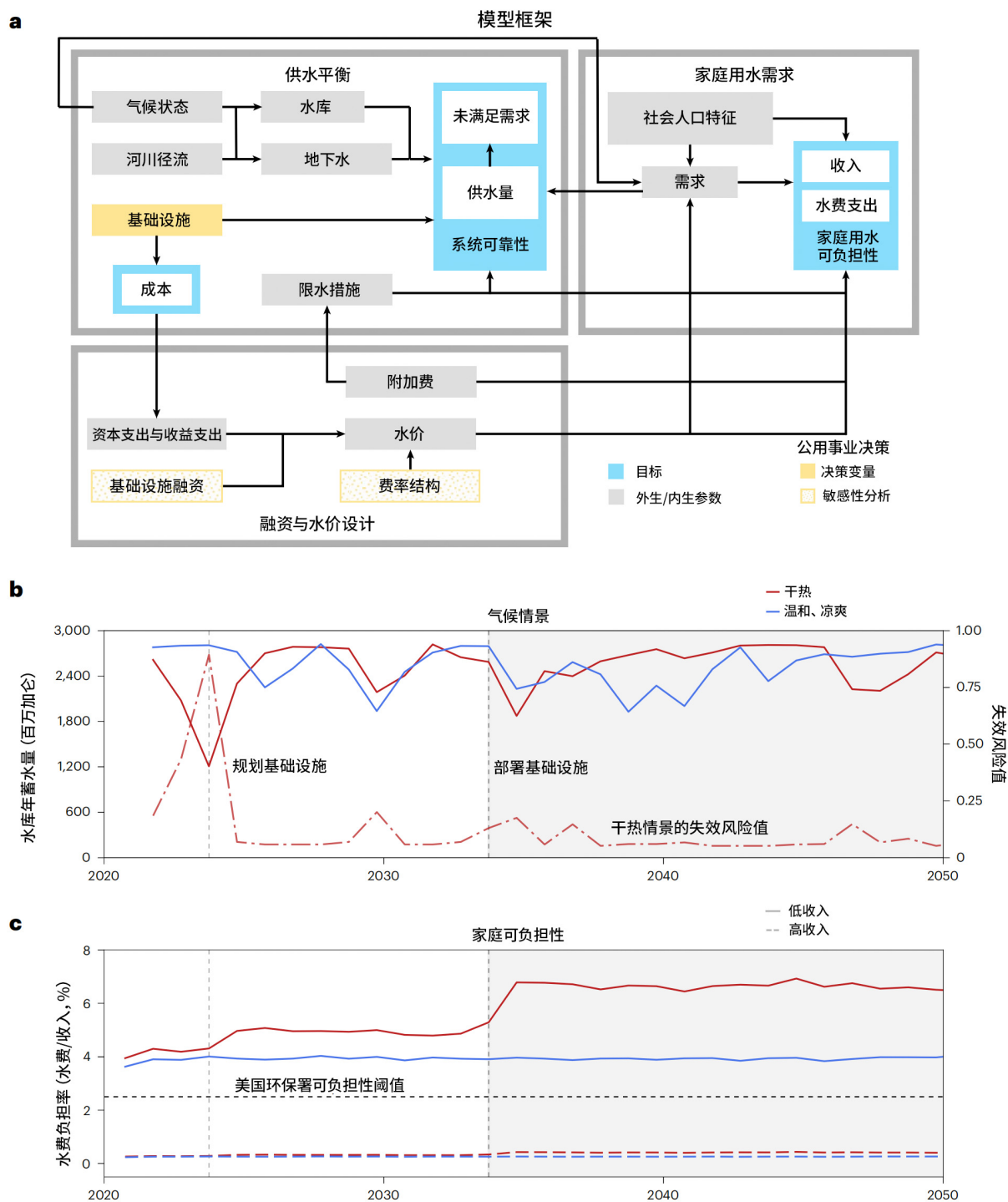


图1 | 模型框架与模拟示例。图1a为可负担性模型框架，将供水系统与基础设施融资、水价设计及家庭用水需求模式相结合。黄色框表示公用事业部门决策，其中实心框表示本研究评估中的决策变量，点状底纹框表示为匹配此案例研究而选定并随后在敏感性分析中进行检

验的参数；蓝色框表示模型目标；灰色框表示外部和内部参数。图2b为基础设施开发对水费可负担性影响的作用机制的模拟示例，包括干热和温和偏凉气候下水库蓄水量及干热情景下的失效风险（ROF）值。图1c为不同气候情景下低收入和高收入样本家庭的年度水费负担率。

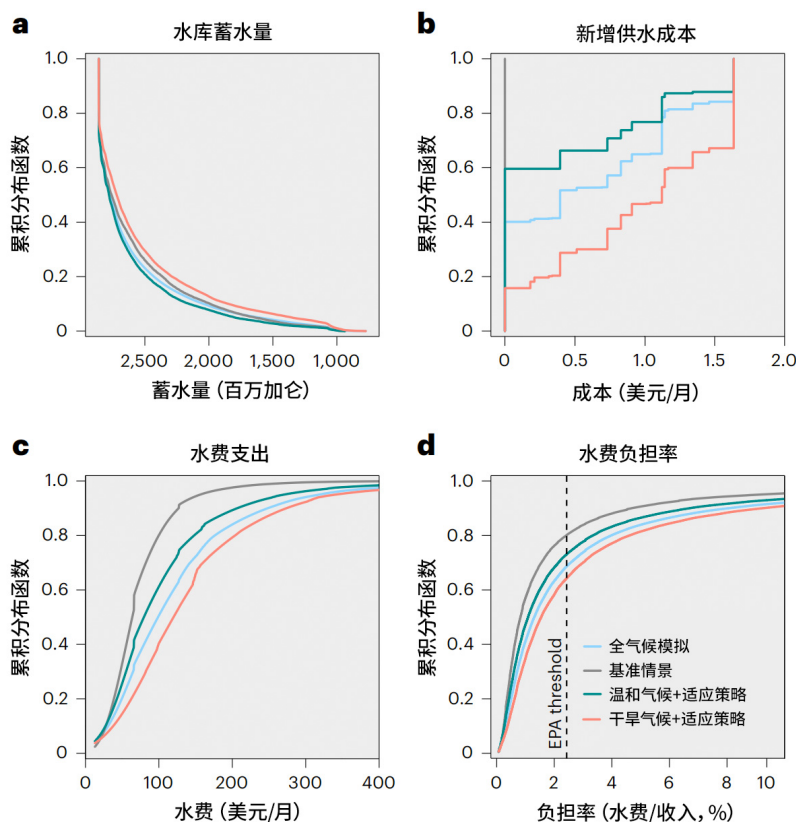


图2 | 气候变化及适应性措施对家庭水费可负担性的影响。图2a-d是针对四种不同气候情景(每种情景均包含多项随机气候模拟)所绘制的累积分布函数(CDF)。这四种情景分别为:与当前气候状况相似的基准情景,有适应策略的温和气候情景,有适应策略的干旱气候情景,以及对不同指标的全气候情景模拟。这些指标包括城市水库总蓄水量(图2a)、新增的供水成本(图2b)、家庭水费(图2c)及家庭水费负担率(图2d)。出于清晰度考虑,对图2c和图2d中的横坐标进行了截断处理。

候+适应策略”情景;三是在干热气候下按需建设基础设施的“干旱气候+适应策略”情景;四是涵盖全部气候模拟范围的“全气候模拟”情景。各情景均处于CMIP6给出的可能范围内。在每个气候情景下,研究依据CMIP6集合中的降水和气温变化,利用随机天气发生器构建50年随机气候模拟。在有适应策略的情景中,当预期水库蓄水量在两年内跌破临界阈值的风险超过设定水平时,即采用失效风险法部署新基础设施。本研究假定的规划策略首先会建设一座海水淡化厂,后续还将对其他替代方案进行比较。研究分析了基础设施投资导致水价发生最大涨幅的时段,并利用这些时段来估算水库的月蓄水量、新增基础设施带来的额外供水成本、月度水费以及各家庭的水费负担,从而得出每种情景下的结果分布情况。

研究评估了在无政策干预的情况下,气候变化所驱动的基础设施投资对水费及其可负担性所产生的影响。图2a显示,与基准情景相比,“温

和气候+适应策略”这一情景通过修建更多基础设施,从而提高水库蓄水量、增加了可供水量。图2b显示,“干旱气候+适应策略”情景的水库蓄水量则更低、波动更大。低库容带来供水短缺风险触发新增基础设施投资。如图2c所示,在“温和气候+适应策略”情景中,60%的月份无须新增供水成本;在“干旱气候+适应策略”情景中,为维持稳定供水,超过一半月份需要增加100万美元以上的供水成本。研究假定在无政策干预情况下,成本的压力会全部转移到家庭,因此基础设施投资会直接转化为水费大幅上涨。水费账单中位数由64美元增至80美元(温和气候+适应策略)或120美元(“干旱气候+适应策略”);第80百分位的水费账单由100美元增至148美元(“温和气候+适应策略”)或204美元(“干旱气候+适应策略”)。在“干旱气候+适应策略”情景下,水费账单中位数较当前水平几乎翻倍。

图2d显示,水费上涨使超过EPA可负担性阈值的家庭比例增加。目前圣克鲁斯已有19%

的家庭超过该阈值,体现了已有的用水负担问题。为保障供水而建设额外基础设施后,这一比例在温和气候下可能升至 26%,在干旱气候下可能升至 35%。也就是说,在缺少政策干预的情况下,干旱气候可能使该市三分之一以上家庭难以支付水费。

气候变化下低收入家庭的水费负担

如图 3 所示,研究分析了圣克鲁斯市低收入家庭与其他群体在模拟需求、水费支出和负担能力趋势方面的差异。研究发现,低收入家庭的用水需求和水费支出虽然低于其他家庭,但水费负担率明显更高。首先,结果显示不同收入群体在不同情境下的用水需求差异较小,这是上文提到的圣克鲁斯市经历多次干旱后长期节水所造成的。如图 3a 所示,各情景中,低收入家庭平均用水量比其他家庭少约 40 立方英尺(约 1.13 立方米)每月,第 80 百分位用水需求量较其他所有家庭高出约 60 立方英尺(约 1.7 立方米)每月。在“温和气候 + 适应策略”情景中,新建基础设施使需求减少约 50 立方英尺(约 1.42 立方米)每月,主要是水价上涨和家庭需求价格弹性所致。在有适应策略的情景下,温和与干旱气候之间的需求差

异可忽略不计(小于 10 立方英尺每月,约 0.28 立方米),因为升温 and 降水减少抵消了成本上升引起的需求下降。这些结果表明,气候变化对圣克鲁斯市带来的水费负担影响主要来自供给侧,而非需求侧。对模型需求侧参数进行的敏感性分析表明,尽管价格弹性与每个家庭需求的变化会影响用水费可负担性,但在本案例研究中,气候因素所起的作用更为显著。

图 3b 与 3c 显示,不同气候情景间的水费差异以及不同收入群体间的水费负担率差异远大于用水需求差异。各情景下低收入家庭与其他家庭的水费中位数每月仅相差 5-11 美元。但与基准情景相比,“干旱气候 + 适应策略”情景下低收入家庭水费中位数由每月 60 美元增至 111 美元,第 80 百分位由 92 美元增至 186 美元。尽管低收入群体的水费账单要低于其他收入群体,但在水费负担方面受到的影响更为显著。基准情景下低收入家庭水费负担率中位数已达 3.9%,高于 EPA 阈值,凸显了圣克鲁斯已存在的水费负担问题。在“温和气候 + 适应策略”情景下,修建基础设施使低收入家庭水费负担率中位数升至 5.1%,对于其他收入群体来说,由 0.6% 升至 0.8%。在“干旱气候 + 适应策略”情景下,低收入

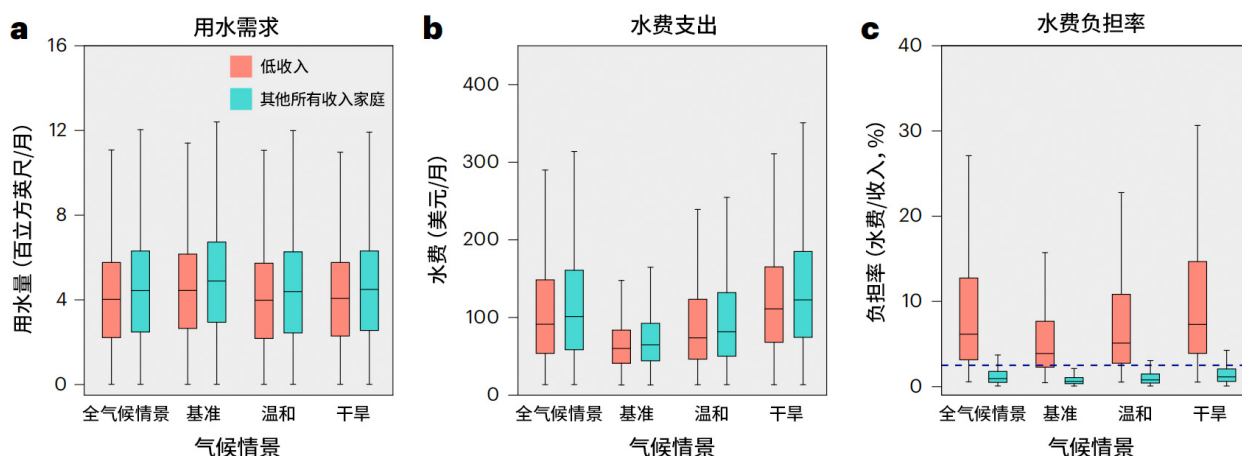


图3 | 低收入家庭水费可负担性影响。此箱型图对比了低收入家庭(年收入低于39,900美元)与其他收入家庭在不同气候情景下的用水需求(图3a)、水费

(图3b)和水费负担率(图3c)。各分布图显示了多次随机气候模拟中,所有家庭的月度数值。图3c中的虚线表示EPA的2.5%阈值。

家庭的这一数据进一步升至 7.3%，其他收入群体则为 1.1%。

此外，低收入家庭中处于第 90 百分位数的水费负担率已从 16% 增至 30%，这一涨幅可能会迫使这些家庭在各项生活支出之间作出取舍，进一步说明了低收入家庭在面对气候变化引发的水价上升时具有脆弱性。

降水不确定性与低收入家庭水费负担

如图 4 所示，研究进一步评估了不同气候因素对水费负担性的影响，发现平均降水量下降引起的水费负担增幅最大。研究通过数百次随机气候模拟，分别筛选不同气候特征，以识别影响水费可负担性的最关键因素。由于降水量是决定水资源可用性的主要因素，平均降水量下降会推升新建基础设施的需求。降水变化也会产生中等程度影响，即使平均降水不变，更高的降水变化也可能增加极端干旱风险，迫使城市建设额外基础设施。比如圣克鲁斯市，全市只有一座水库，跨年调蓄能力有限，面对极端波动难以缓冲。升温会同时会增加蒸发、减少可用水量并推高家庭用水需求，因而也会影响水费可负担性。但受需求刚性影响，供给侧作用更为显著。

研究分析了整个气候因素差异的极值，可负担性差异最大的区域出现在上百分位区间，这表明本就难以缴纳水费的家庭受到气候变化的冲击更大。水费负担率中位数介于 1.0 至 1.5 之间（差异为 0.5），对应箱型图的上界则从 5.5 升至 8.1（差异为 2.6）。水费支出方面也呈现类似趋势，用水量较高的低收入家庭，如果家庭人数较多，尤其容易受到气候驱动下用水成本变化的影响。

兼顾可靠性与可负担性的基础设施策略

基础设施建设的时机与类型，是影响模拟结果的重要因素，研究发现基础设施投资方式的不同也会决定供水系统的可靠性与可负担性。研究中基准假定优先建设一座 4 百万加仑 / 日的海水淡化厂（策略 A），之所以这样假设，是因为这样的策略在模拟中呈现的失效风险阈值（即在重大干旱事件期间供水系统可靠性显著下降的幅度），与 2013 年加州干旱时的情况相近。公用事业部门采取不同的策略也会部署规模不等的新基础设施，从而对供水可靠性产生不同影响。为探究这一问题，本研究设计了几种最优规划策略，目标是将供水的新增成本最小化，并尽可能减少需求未被满足的情况。每种策略均规定了何时以

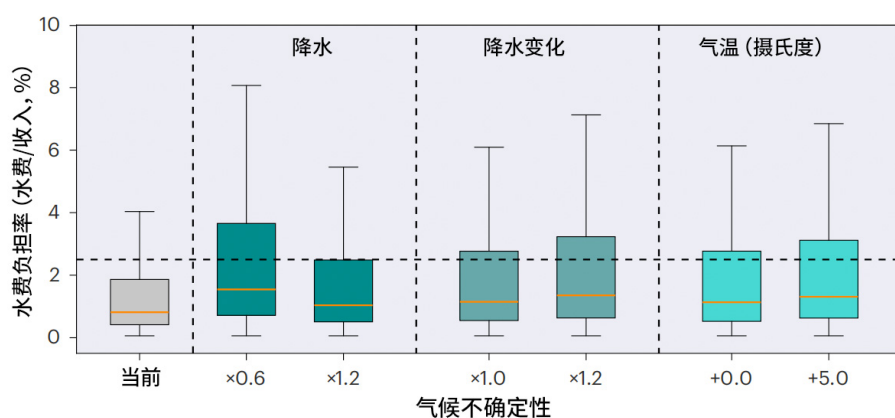


图4 | 气候不确定性对水费可负担性的影响。箱型图对比了基线情景下与考虑适应措施的全部分析范围内不同气候影响下的月度水费负担率分布差异。气候影

响因素包括：平均降水量的变化、年度降水量变化以及气温变化。各分布图展示了每个抽样随机气候模拟子集内所有家庭的月度数值。虚线为EPA的2.5%阈值。

及建设何种基础设施。策略的制定基于失效风险阈值,这一阈值是根据用水需求、水库蓄水量及既往投资所计算得出的。研究另外设计了两种策略来进行对比分析:一种是风险规避型(策略 B),通过设定较低的失效风险阈值,来更早建设大型设施;第二种是风险容忍型(策略 C),设定较高的阈值,先建设容量较小的设施。敏感性分析发现,规划策略的选择对用水需求、设施部署时间和建设成本的小幅变化均不敏感。

三种策略对供水成本、可靠性和可负担性有显著影响。策略 B 对风险的容忍度最低、基础设施开始建设的时间最早,对所有模拟结果进行平均计算,得出平均年度供水可靠率达到 98.8%,但每年至少会增加 940 万美元成本,并使第 80 百分位水费负担率增至 5.2%。策略 C 的基础设施建设更晚、投资更小,每年新增支出控制在 140 万美元,且第 80 百分位负担率降至 2.7%。其平均年度可靠率仍为 96.8%,但平均最低年度可靠率只有 61%——这会带来大规模缺水。以圣克鲁斯为例,供水短缺期间若用水量减少 30%,经济产出可能下降逾 1 亿美元,损失约 1.1%—2.4%。策略 A 采用中等风险投资策略,其成本分布范围较广,平均最低年度供水可靠率高于 70%。在美国现行水利基础设施融资模式下,气候变化会导致供水可靠性与可负担性难以共存,而两者又都是保障用水的关键条件。

讨论

本研究建立了城市尺度的模型框架,用于量化气候变化对城市水费可负担性的影响。现有研究虽涉及到了水负担问题,却未充分反映气候变化对供水成本结构、基础设施需求和家庭响应等关键因素的根本性影响。本文将气候驱动的水资源压力与公用事业部门适应性决策、基础设施融资、水价设计以及家庭需求和收入等一并考虑并建模,综合评估了气候变化将如何加剧城市水费可负担性问题。

本研究把水费负担问题与气候适应和基础设施规划过程相关联。以前的研究通过可靠性与成本之间的权衡来评估气候变化下的适应性策略,重点关注系统性能与总体供水支出。然而,成本上升并不会等比例转化为可负担性影响,家庭最终承受的负担取决于如何通过水价回收成本、如何因水价变化调整用水行为,以及各收入群体如何分布。因此,对可靠性与可负担性之间的权衡进行量化,能够揭示单纯靠成本分析难以察觉的动态变化,并呈现适应性规划中经常被忽视、却直接关系到水量分配的因素。

了解气候驱动的可负担性影响,对提出有效政策至关重要。如果只有少数家庭无法承担水费,当地的援助项目或许足以缓解问题。但若大量人口面临水费负担挑战,由公用事业部门出资的援助项目可能难以实施,此时可能更需要州或联邦政府层面通过基础设施融资、改革管理方式或直接向家庭提供支持等方式进行干预。圣克鲁斯市的案例表明,仅气候变化就可能额外增加 7%—16% 的家庭无法支付水费,因此必须从可负担性视角审视气候适应性策略。

可负担性结果并非仅由气候因素决定,而是由气候压力与水文、制度和社会特征共同作用的结果,这些因素共同决定了公用事业部门的应对方式及供水成本在各家庭的分配方式。表 1 汇总了这些因素,明确了本研究结果对哪些类别的城市水系统最具参考价值。从这个角度来说,圣克鲁斯并非所有城市的代表,而是作为某一类供水系统的典型案例。对圣克鲁斯这类城市而言,气候压力受限的适应措施及现有不平等现象相互作用,加剧了对水费可负担性的影响。

气候变化引发的水资源压力增加了对适应性措施的需求,以保障供水的可靠性。在美国加州及全球众多半干旱地区,气候预测表明气温将会升高、降水模式将发生变化、水文条件变率将会增大,从而更易发生供水短缺。供水系统的特性决定了公用事业部门适应性决策的实施方式与具体内容。比如,在圣克鲁斯等供水受限、水库

调蓄能力不足的城市, 往往只能选择海水淡化、饮用水回用或大规模调水等昂贵的供给扩张方案。与节水或运营措施相比, 这类措施成本较高, 从而导致水价涨幅更大。此前在用水效率方面的投资和长期节水形成的需求刚性进一步压缩了节水空间, 将压力转向了供给侧。

收入不平等又会放大水费负担带来的影响。当低收入家庭已有较大经济负担时, 即便水费小

幅上涨, 也会使大量家庭越过可负担性阈值。在圣克鲁斯, 低收入家庭有着高基线负担, 气候变化带来的水价上涨又加剧了现有的不平等问题。最后, 水价设计与负担缓解措施所受到的限制, 在决定分配性结果方面起着核心作用。监管行为对交叉补贴或按收入定价的限制, 还可能迫使公用事业部门采用对低收入家庭不利的方式回收成本。

表1 城市水可负担性的主要驱动因素。

驱动因素	对水可负担性的影响	圣克鲁斯 / 加州的具体情况	与圣克鲁斯有相似特征的城市
气候变化导致的水资源压力	为保障可靠供水, 为供给侧或需求侧进行必要的投资, 成本通常较高且需要通过提高水价进行回收。	全球气候模型显示该地区总体趋于更热、更干, 且极端干旱和降水事件增多。	加州: 洛杉矶、圣地亚哥、旧金山 全球: 南非开普敦、澳大利亚墨尔本
昂贵的供水扩容方案	建设大型基础设施的成本更高, 因此需要更大幅度调高水价, 导致家庭水费支出增加, 加剧水费负担。	圣克鲁斯正考虑实施项基础设施建设方案, 包括海水淡化厂、饮用水回用系统、含水层蓄水与回用系统, 以及相邻公用事业公司间的调水。	加州: 洛杉矶、旧金山 全球: 新加坡、以色列特拉维夫、澳大利亚墨尔本
有限的跨年度调蓄能力	难以把丰水年水量存至枯水年使用, 限制替代水源设施选择, 可能推高新增投资成本。	圣克鲁斯的主要水库洛蒙德湖仅能储存约 1 年的供水量。	加州: 东帕洛阿尔托、圣何塞 全球: 南非开普敦
有限的节水潜力	各户已使用节水型家电, 自主节水行为相对到位, 因此在干旱期或水价上涨的时段, 家庭再进一步减少用水量的空间已十分有限, 对水价的变化更为敏感。	圣克鲁斯已实施多项节水措施, 节水方面的新增投资所获得的收益较低。	加州: 旧金山、圣何塞、圣地亚哥、奥克斯纳德 俄勒冈州: 波特兰市 全球: 新加坡
收入不平等	低收入或弱势家庭比例越高, 整个供水系统中的可负担性影响越大。	圣克鲁斯有约 20% 家庭低于美国贫困线以下, 另有约 20% 家庭年收入超过 20 万美元。	加州: 奥克兰、旧金山、洛杉矶 全球: 西班牙巴塞罗那、巴西里约热内卢
水价设计的制度约束	水价补贴受限时, 基础设施建设成本的压力往往直接转嫁到了用水家庭, 通常会收取更高的费用。这使得公用事业公司无法保护低收入家庭免受水价上涨的影响。	加州第 218 号提案要求水价的设置要与服务成本成比例, 从而限制了交叉补贴和援助。圣克鲁斯地区目前的水价基线已处于较高水平, 因此在设计降低负担的定价策略时没有太多的灵活度, 加剧了新基础设施投资对家庭产生的影响。	加州: 所以受到影响的公用事业 全球: 巴西里约热内卢

以上条件共同界定了一类最容易因气候变化而加剧可负担性问题的城市供水系统。其他不具备此类特征的城市可能受到较小或不同性质的影响,但随着节水潜力耗尽、基准水价上升和气候压力增强,其他城市也可能逐渐呈现与圣克鲁斯相似的情景态。因此,圣克鲁斯并非特例,因为它代表了已用尽低成本适应方式的供水系统未来可能达到的一种状态。

本研究构建出的模型框架可广泛用于各类城市水系统的分析评估,并不局限于圣克鲁斯这一案例。该框架由三部分组成——水资源系统模型、公用事业部门融资和水价设计模型、以及家庭需求模型。虽然模型各部分需用地方的实际数据进行参数化,但框架结构及其所反映的相互作用具有通用性,可用于评估其他城市的气候驱动水价负担风险,并确保结果能反映当地的水文条件、治理状况和社会经济情况。

研究揭示了城市水管理中的一项根本矛盾:在现行融资和管理模式下,以保障供水可靠性为目标的气候适应性措施可能直接损害水的可负担性。若想应对水资源压力的同时避免加剧不平等问题,可能需要公用事业部门以外的干预,包括监管改革、扩大适应性基础设施公共融资,定向援助项目。更广义来说,本研究结果表明,气候适应性策略评估应把水的可负担性与可靠性共同纳入常规评价,否则即使适应措施成功缓解了缺水问题,也可能把成本转嫁给最无力承担的家庭。



欢迎关注中国水科院微信公众号
地址:北京市海淀区复兴路甲一号
本刊联系方式:中国水科院国际合作处
联系邮箱: dic@iwhr.com
2026年8月25日