



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 李桐

2026
6
总376期

沿海地下水位变化揭示全球海水
入侵趋势

水质：社会结构性不平等的放大镜



沿海地下水位变化揭示全球海水入侵趋势

沿海地下水这一重要的淡水资源正受到过度开采和海平面上升的威胁。全球范围内地下水位下降格局及海水入侵的易发性目前仍存在较大不确定性。本研究基于约 48 万个沿海监测点的现场观测数据,开展了全球尺度评估。研究表明,1990 年至 2024 年期间,在所研究的沿海区域中,有 21% 的区域呈现出统计上可识别的地下水位上升或下降趋势,变化幅度不低于每年 0.1 米。其中,地下水位下降现象在最近 9 年更加频繁。地下水埋深较大的地区变化更为显著 ($\rho_s=0.63$),干旱地区呈现较为明显的变化 ($\rho_s=0.56$),部分农村地区也表现出较强变化特征。

在地下水向海淡水排泄较弱或水力梯度指向陆地方向的地区,海水入侵易发性更高。这意味着当地对海水入侵的水力阻抗有限,地下水系统更容易受到咸化威胁。基于观测到的趋势进行外推分析表明,上述情况大多将持续存在 (93.4%),同时有 3.5% 的区域将新出现此类风险,另有 3.1% 的区域趋于稳定,即水力梯度向海方向增强。研究结果为沿海地下水监测和管理提供了全球尺度的依据。

引言

地下水是沿海地区重要的淡水来源。全球沿海地区居住着 28.6 亿人口,地下水不仅支撑着沿海生态系统及其服务功能,也对海洋生物具有重要意义。然而,随着沿海人口持续增长,沿海含水层正承受日益加大的压力,并且越来越容易受到海水入侵的影响,从而威胁可利用水资源的水量 and 水质。

地下水咸化会降低水资源被人类利用的适宜性。当饮用水盐度升高时,会对人体健康产生不利影响;当灌溉水盐度升高时,会降低土壤肥力和农作物产量,进而威胁农业生产;在沿海生态系统中,盐度升高还会影响植被和土壤生物群落,并可能导致物种组成发生变化。气候变化及其引发的海平面上升、地下水补给变化和用水强度增加,正在进一步加大沿海地下水系统面临的压力。因此,识别哪些沿海地下水资源容易受到海水入侵影响,以及哪些区域应作为监测和管理重点,以便及时发现并应对新出现的威胁,正变得愈发重要。

在沿海环境中,陆海交界处的水力梯度决定着地下水排泄至海洋与海水向近岸含水层入侵之

间的平衡。因此,长期指向陆地的水力梯度,或接近于零的向海水力梯度将有利于横向海水入侵,成为控制沿海地下水—海洋交换的一项首要因素。本研究将水力梯度作为一个可在大尺度应用的指标,用以判断淡水是否倾向于向海排泄,或海水是否倾向于向陆入侵。水力梯度概括了沿海地区地下水水头差异,因而综合反映了多种控制因素的共同作用。

含水层性质及其结构特征(包括与地表水之间的连通关系)会调节自然补给、人类活动压力、以及海平面上升对水力梯度变化的影响。其中,人类活动压力包括地下水开采、灌溉排水,以及会改变补给条件的土地利用变化等。尤其需要指出的是,两类自然环境更容易使沿海地区形成指向陆地或接近于零的向海水力梯度,因为它们会限制淡水水头的形成:一类是受地形限制的地区,通常为低海拔的沿海平原,另一类是受补给量限制的地区,通常为干旱或水资源匮乏地区。

在受地形限制的地区,淡水水头已接近地表,因此在海平面上升背景下,水头进一步升高的空间有限。在受补给量限制的地区,地下水补给不足会抑制淡水水头,并限制水头恢复。在这类地区,地下水响应时间较长,即具有较强的“水力记忆”,这可能延缓并缓冲地下水系统对气候变率的响应。与此同时,地下水位对补给或降水变化的敏感性可能较高,并会随干旱程度加剧而增强。预计未来干旱趋势和降水格局变化将进一步减少受补给量限制的沿海地区地下水补给,从而增加海水入侵易发性。

尽管我们对相关过程机理已有总体认识,对全球范围内易发生海水入侵条件的时空分布仍缺乏充分描述。这限制了我们预判未来气候变化和

人类活动影响下地下水咸化可能发生的地点,以及以何种方式加剧发生。这反映出当前全球地下水评估中存在的普遍局限,即缺乏足够的清晰度、系统整合能力和观测数据支撑,因此难以准确反映地下水系统的复杂性。

现有沿海地下水系统评估大多聚焦于地方或区域案例研究,在试图将研究结果上升到全球尺度时,会带来可比性不足的问题。全球尺度海水入侵模拟方法仍具有较高不确定性,主要源于边界条件假设和水文地质参数化处理的不确定性;同时,由于地下水位时序数据空间分辨率较低,且可获得性存在空间差异,相关模型结果也较难得到有效验证。GRACE 卫星观测能够为地下水盆地提供有价值的信息,但其空间分辨率较低,在海岸附近容易出现陆海信号失真问题,而且地下水储量变化通常是基于模型划分后的各类水文组分残差推算得出,可能产生物理上不合理的估计结果,从而限制其适用性,尤其是在较小尺度或沿海系统中应用的时候。

相比之下,反映沿海地下水海水入侵易发性的关键指标可从现场地下水位观测中获得,特别是有利于横向海水入侵的水头状况,以及会降低淡水水头的地下水位下降趋势。然而,由于管理职责分散、数据数字化程度有限、数据获取存在障碍以及数据集缺乏标准化等问题,地下水位数据仍难以在大尺度上进行整合,因此目前利用大样本现场地下水位数据开展研究的工作仍然较少。

现有研究汇编了全球地下水位观测数据,并以此为基础开发了具有全球覆盖范围的地下水埋深模拟估计产品,目前已广泛用于与地下水相关的环境研究。近期,一些基于现场观测数据的综合研究量化了全球陆地含水层系统以及欧洲西南

部区域的地下水位变化趋势，但并未专门聚焦沿海地区。另有研究利用全球分布的数千条沿海地下水位时间序列，识别地下水位动态的共同特征，并指出全球数据集在解释这些模式方面存在局限，因此未推导地下水位变化趋势，也未明确评估海水入侵易发性。

总体来看，现有研究既凸显了地下水位原位观测数据的重要价值，也表明在全球尺度上，针对沿海含水层开展基于观测数据的综合评估仍存在明显不足。本研究汇集了规模空前、来源多样的全球沿海现场地下水位观测数据，推导陆海水力梯度和近期变化趋势，并将其汇总到统一空间网格中，用于全球尺度制图，作为基于观测的海水入侵易发性指标。同时，本研究还分析这些指标如何随全球不同干旱条件和不同沿海区域而变化。

易发海水入侵的水文气候条件

在本研究框架中，沿海地下水发生横向海水入侵的水文气候易发性由两个变量决定：一是陆海水力梯度，本研究将其作为可通过观测数据获取的筛查诊断指标；二是干旱度，本研究将其作为自然补给量受限程度的实用替代指标。

本研究将陆海水力梯度量化为内陆监测点与海岸线之间的水头差值，再除以观测点至海岸线的距离。当水力梯度指向陆地方向，或虽指向海洋但强度较弱 ($\leq 10^{-3} \text{ m m}^{-1}$) 时，将其归类为“平缓”梯度。这类“平缓梯度”条件有利于横向海水入侵。其余梯度则归为陡峻梯度 ($> 10^{-3}$)，代表更强的向海水头梯度，通常能够抵御海水向内陆入侵。尽管陡峻梯度类别本身涵盖了较宽范

围的向海流动条件，本研究为了更加简明的构建全球尺度筛查手段，不再将其细分。

干旱度以干旱指数 (AI) 表示，即降水量与潜在蒸散量之比。本研究将水分受限气候 ($\text{AI} \leq 1$ ，偏干) 与能量受限气候 ($\text{AI} > 1$ ，偏湿) 进行对比分析。平缓梯度与水分受限气候的组合，构成本研究分析中最易发生海水入侵的水文气候因素集合 (C1) (图 1)。

地下水埋深为理解上述风险提供了重要背景。地下水埋深较浅，意味着包气带蓄水空间有限，因此，即便地下水位出现小幅下降，也可能更容易削弱陆海水力梯度，并增加地下水咸化风险。从全球来看，沿海地区含水层通常埋深较浅：沿海地下水埋深中位数为 6.1 米，近一半观测点的地下水埋深小于 5 米。

约三分之一的受观测沿海区域存在平缓梯度条件，这类条件会削弱地下水向海洋的自然流动。尽管总体上陡峻梯度占主导地位，但即便在距离海岸数十公里的内陆地区，平缓梯度仍然较为常见，占全部观测值的 34%—37% (图 1c)。

与全球沿海地区干旱度分布相比，本研究数据集在干旱指数约为 1 的过渡值附近呈现出明显聚集特征。该数值大致标志着水分受限气候与能量受限气候之间的分界。在这一过渡带，地下水补给预计对长期干旱程度的轻微变化尤为敏感。相较之下，中度干旱地区 ($\text{AI} \approx 0.3-0.7$) 和湿润地区 ($\text{AI} > 1$) 在本研究数据集中代表性不足 (图 1b)。总体而言，74% 的观测值位于水分受限环境 ($\text{AI} \leq 1$) 中。

值得注意的是，平缓梯度且水分受限的条件 (C1) 在距海岸 1 公里范围内最为频繁，占该范围内观测值的 28%；但这类条件也出现在更远离

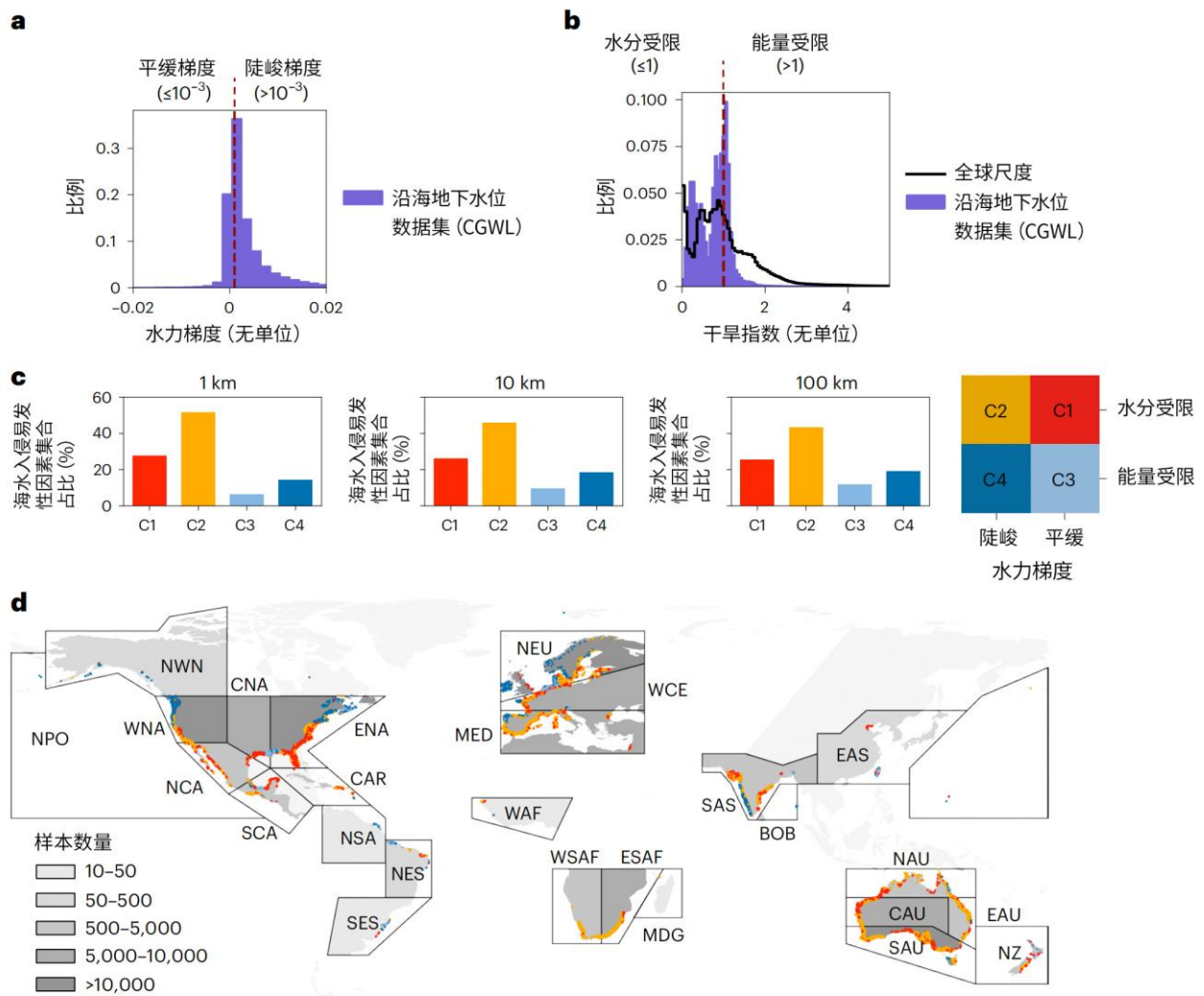


图1 | 沿海地下水系统海水入侵易发性的全球水文气候格局。

a, 基于CGWL数据集推导的陆海水力梯度分布; 红色虚线表示平缓与陡峻向海梯度的阈值, 平缓梯度指 $\leq 10^{-3}$ 。

b, CGWL数据集及全球沿海区域的干旱指数 (AI) 分布; 红色虚线表示水分受限与能量受限气候状态的阈值 ($AI \approx 1$)。

c, 距海岸线三个距离范围内 (1公里、10公里和100公里) 四类海水入侵易发性因素集合 (C1—C4) 的占比。

d, 观测点的全球分布情况, 同步展示观测数不少于10个的IPCC参考区域内样本数量。图中的陆地和海岸线几何数据来自HydroBASINS, IPCC参考区域几何数据来自既有研究。

海岸的内陆地区 (图 1c)。在图 1d 中, 平缓梯度且水分受限条件在联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 参考区域内形成连续的沿海带, 例如美国东南部 (ENA)、墨西哥湾沿岸地区 (CNA 和 SCA) 以及澳大利亚东北部 (CAU 和 NAU 部

分地区)。

陡峻梯度且水分受限的条件 (C2) 在所有海岸距离范围内均占主导地位 (图 1c)。在近海岸区域, C2 占观测值的 52%。相比之下, 在梯度平缓但补给并不受限的条件下形成的易发性条件 (C3)

最为少见。

变化趋势的普遍性及其对观测数据时长的敏感性

地下水位变化会改变淡水水头，进而影响陆海水力梯度。针对 1990—2024 年共 34 年研究期，趋势分析显示，在 9 年时间窗口内，28% 的观测点呈现出统计上显著的地下水位变化，变化幅度超过 ± 0.1 米/年。在 19 年时间窗口内评估时，21% 的观测点呈现出此类变化趋势。

在两个时间尺度上，地下水位上升和下降变化的出现频率总体较为均衡，但在较短时间尺度内略偏向下降趋势。在具有明显变化趋势的观测点中，9 年窗口内地下水位上升占 42%，下降占 58%。

为评估观测数据时长对趋势判断的影响程度，本研究选取同时具备 9 年和 19 年时间窗口数据的观测点，对重叠时间窗口内的趋势斜率进行比较。结果显示，不同时间窗口内趋势斜率呈中等程度相关 ($\rho_s=0.58$)。多数观测点的变化方向保持一致 (76%)，约 19% 的观测点趋势判断存在不确定性。对于这部分观测点，9 年和 19 年窗口的趋势斜率符号相反，但至少有一个斜率接近于零 ($|\text{斜率}| < 0.1$ 米/年)，因此表面上的斜率方向转换主要反映某一时间窗口内接近稳定的状态，而非明确的趋势反转。仅约 5% 的观测点在两个时间窗口内均表现出方向相反且幅度明确的趋势，即两个窗口内均满足 $|\text{斜率}| \geq 0.1$ 米/年。

在 IPCC 参考区域尺度上，不同时间窗口之间的一致性也较为相近 ($\rho_s=0.58$; 78% 保持一致)。但少数区域的趋势中位数出现方向变化，较为明显的是澳大利亚东部 (EAU)，以及北中美洲

(NCA)、南亚 (SAS) 和马达加斯加 (MDG) (图 2)。较大幅度的变化趋势，即明显上升或明显下降趋势 ($|\text{斜率}| > 0.5$ 米/年)，在 19 年窗口内出现的频率低于 9 年窗口。这与较长观测数据能够整合低频波动和偶发事件影响的特点相一致。

在后续分析中，本研究采用合并后的趋势结果：凡具备 19 年趋势结果的观测点，优先采用 19 年趋势，其余观测点则采用 9 年趋势。从全球来看，24% 的观测点呈现出显著地下水位变化趋势，其中 54% 为下降趋势。图 2 展示了地下水位变化的幅度和方向。地下水位下降和上升的分布具有明显空间差异，其出现比例从不足 10% 到超过 40% 不等：例如，北欧 (NEU) 低于 10%；南非相关区域 (WSAF 和 ESAF) 以及北美和中美部分区域 (WNA、CAN 和 NCA) 则超过 40%。单个观测点结果还显示，同一区域内部存在较强差异，局地尺度上常形成变化方向和幅度相反的集聚区。

农村与城市沿海地区的变化趋势

城市和农村地区在土地利用与水资源管理等方面往往存在明显差异，这些差异可能影响地下水动力机制。因此，本研究按照“农村—城市”类型划分方法对数据集进行分层分析。图 2 显示，农村和城市地区的地下水位变化存在差别。

总体来看，与城市地区相比，农村地区出现显著地下水位变化趋势 ($|\text{斜率}| \geq 0.1$ 米/年) 的比例更高；同时，趋势幅度与人口密度之间呈弱负相关关系 ($\rho_s=-0.17$)。这种全球尺度上的城乡差异主要由若干特定区域驱动，包括印度所在的南亚区域 (SAS)、北中美洲 (NCA)、澳大利亚部分区域 (SAU、EAU 和 NAU) 以及新西兰 (NZ)。

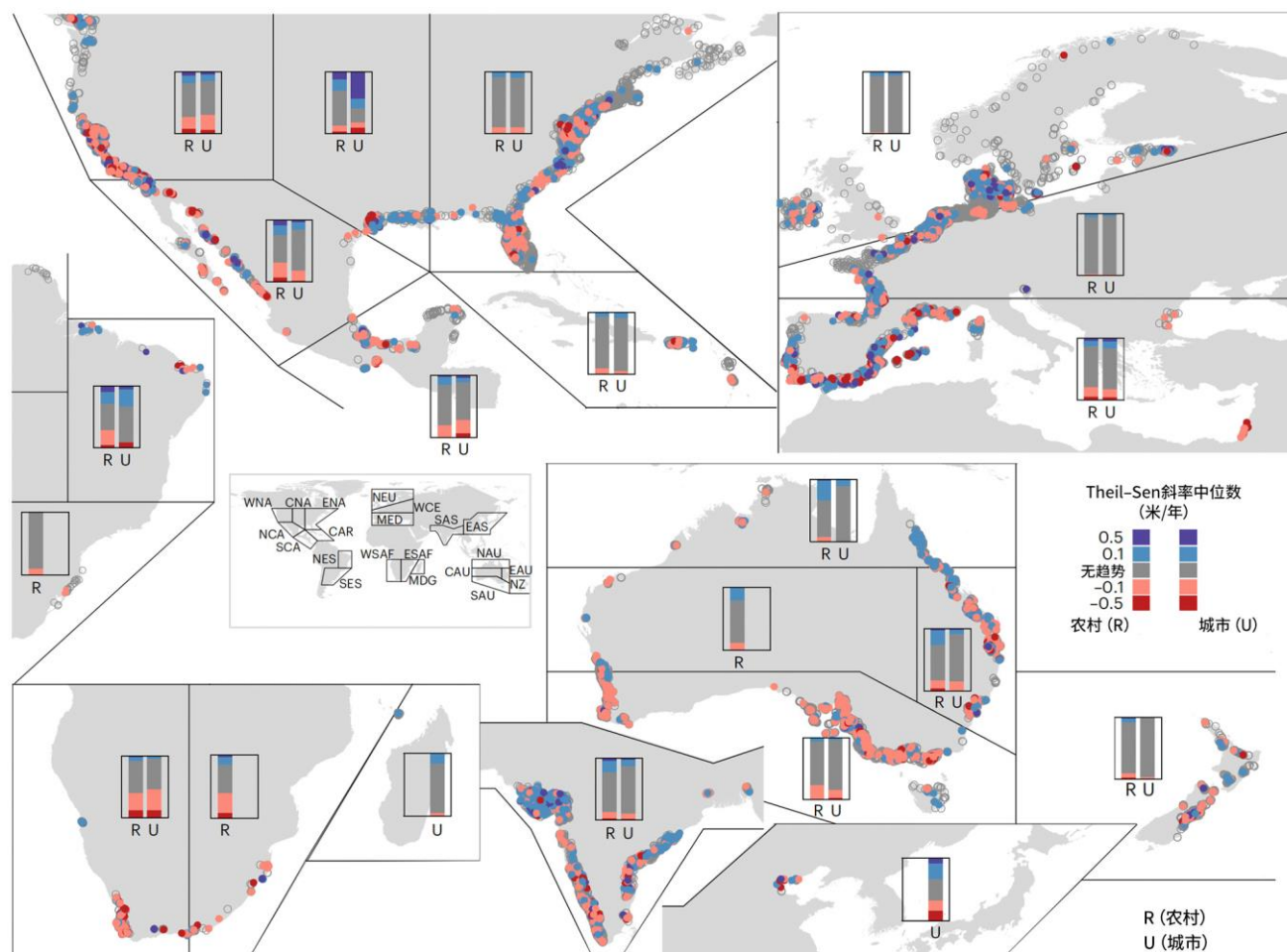


图2 | 按IPCC区域划分的全球沿海地区近期地下水位变化趋势。

全球沿海地区近期地下水位变化趋势的空间分布，按IPCC参考区域分组。彩色点表示单个观测值，绘制于网格单元中心：强下降 (<-0.5 米/年，深红色)、中等下降 (-0.5 米/年至 -0.1 米/年，浅红色)、无趋势 (-0.1 米/年至 0.1 米/年和/或统计上不显著，灰色)、中等上升 (0.1 米/年至 0.5 米/年，浅蓝色) 以及强上升 (>0.5 米/年，深蓝色)。柱状图显示各区域不同趋势类别的占比 (观测数 ≥ 10)，并按农村地区 (R; ≤ 300 人/平方公里) 和城市地区 (U; >300 人/平方公里) 进行分类。陆地和海岸线几何数据来自HydroBASINS, IPCC参考区域几何数据来自既有研究。

城市观测点在较少数区域内表现出更高的趋势出现频率，尤其包括中南美洲 (SCA)、墨西哥湾周边的北美中部地区 (CAN) 以及南非东部 (WSAF)。总体而言，这些区域差异叠加后，使得全球农村

地区显著趋势的出现比例高于城市地区，分别为 26% 和 22%；在存在显著趋势的观测点中，农村地区和城市地区的下降趋势分别约占 54% 和 55%。

识别海水入侵易发性热点区域

将干旱度和水力梯度界定的水文气候易发性因素集合 (C1—C4) 与海水入侵动态变化相联系, 本研究进一步分析了不同易发性因素集合与不同离岸距离影响下, 地下水位变化趋势差异。

首先, 研究采用斯皮尔曼相关系数 (Spearman correlation coefficient) 量化地下水位趋势绝对幅度 (|斜率|) 与干旱度、地下水埋深和水力梯度之间的关系。结果显示, 内陆地区比海岸地区的相关性更强。在距海岸线 100 公里处, 趋势幅度与干旱条件呈正相关关系 ($\rho_s=0.56$), 与地下水埋深呈正相关关系 ($\rho_s=0.63$), 与陆海水力梯度呈正相关关系 ($\rho_s=0.36$)。干旱度与地下水埋深之间也存在协同变化关系 ($\rho_s=0.50$)。这表明更干旱的条件往往与更深的地下水埋深同时出现。在距海岸 1 公里处, 上述关联有所减弱, 但干旱度和地下水埋深的影响仍可识别 (ρ_s 分别为 0.19 和 0.41), 与水力梯度之间的关联则基本可以忽略。

其次, 与上述单一相关性分析一致, 不同易发性因素集合的趋势出现频率也存在差异 (图 3)。水分受限集合 (C1 和 C2) 通常与干旱地区地下水埋深变化同时出现, 地下水位上升和下降趋势出现频率分别为 36% 和 34%。尽管在本研究基于“水力梯度—干旱度”的筛查框架中, C2 由于具有陡峻梯度而被判定为易发性较低, 但该集合地下水位下降的出现比例最高, 且这种下降趋势在靠内陆地区的表现更为明显。相反, 能量受限集合 (C3 和 C4) 的整体变化趋势性较低, 分别为 3% 和 12%。

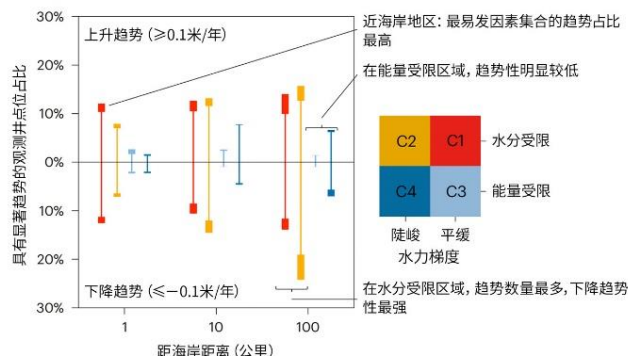


图3 | 按距海岸距离和海水入侵易发性划分的地下水位变化趋势占比。 具有显著上升趋势 (上部, ≥ 0.1 米/年) 和显著下降趋势 (下部, ≤ -0.1 米/年) 的观测井点占比, 与距海岸距离 (1公里、10公里和100公里) 呈函数关系。图中顶部和底部较粗的柱段分别表示强上升 (>0.5 米/年) 和强下降 (<-0.5 米/年) 观测值所占比例。不同颜色表示不同的海水入侵易发性因素集合 (C1—C4)。

在近海岸区域, 易发性条件与海水入侵动态变化之间的重合度最为明显: 在距海岸 1 公里范围内, C1 观测点中有 28% 呈现显著变化趋势, 其中地下水位下降略多于上升。

多数趋势分析的斜率处于中等水平 ($|\text{斜率}| < 0.5$ 米/年), 意味着即便水头发生小幅变化, 也可能推动陆海水力梯度偏离当前条件。因此, 本研究通过推导未来地下水位变化趋势, 分析当前各平缓水力梯度的观测点 (C1、C3) 未来十年是否会发生趋势性变化 (图 4a)。

研究表明, 当前已经表现出海水入侵易发条件, 且预计未来十年仍将持续海水入侵易发条件的区域 (即持续热点区) 占全部观测点的 93.4%。另有较小比例区域 (3.1%) 地下水位上升趋势持续, 这些区域可能从热点地区中退出 (退出热点区)。还有 3.5% 的区域成为新兴热点区, 即预计未来十年将转变为海水入侵易发区域。

讨论

本研究基于现场原位地下水位观测数据，提取具有明确物理意义的海水入侵易发性指标。本研究构建的水文气候易发性框架，将陆海水力梯度与干旱条件联系起来，并纳入近期地下水位变化趋势，用以评估即使在详细水文地质信息有限的情况下，海水入侵易发状态的演变。该框架在方法上拓展了基于高程的筛查方法，聚焦沿海含水层环境，是对以往大尺度地下水位趋势综合研究的补充。

在美国，本研究识别出的海水入侵易发区与既有研究所强调的区域在空间分布上高度一致：在距海岸线 10 公里范围内，本研究 20% 的观测点地下水位低于海平面，既有研究中相应观测井比例为 27%。从全球来看，本研究识别的平缓梯度且水分受限集合（C1）涵盖了已有研究中记录的主要海水入侵地区。这些地区包括美国东南部沿海、中美洲、地中海地区、南非开普敦地区、印度部分地区以及澳大利亚东南部。在本研究分析中，这些地区均表现出较高比例的地下水位下降趋势。

在现有文献记录的海水入侵热点地区外，本研究提出的“水力梯度—干旱度”分析框架刻画了全球范围海水入侵易发性的空间分布及其相对出现频率，为确定监测位置和重点管理区域提供了定量依据，有助于减轻既有研究中向城市偏倚的问题，因为已发表的海水入侵案例研究过多集中于城市地区和经济较发达地区。

需要注意的是，本研究所用地下水位观测数据在全球空间分布上并不均衡。欧洲和美国等温带地区数据覆盖最为充分，而非洲大部分地区、赤道地区、南美洲和亚洲大部分地区以及许多小

岛屿国家和地区的观测点仍然稀少，甚至完全缺失。因此，亚洲、非洲和南美洲已有报告的若干海水入侵点并未纳入本研究分析数据集。综上所述，本研究识别的海水入侵易发性格局反映的是现有观测资料的空间覆盖范围，在数据不足地区未能绘制出热点区域，但这并不意味着这些地区不存在海水入侵易发性。

本研究进一步表明，持续的地下水位变化可以在十年尺度内形成与海水入侵相关的水力梯度；在近海岸地区，当平缓水力梯度与水分受限条件同时出现时（C1），地下水位变化往往最为显著。虽然本研究基于观测的指标并未量化淡水体积损失，但即便水头围绕梯度阈值发生小幅偏离和波动，在更长时间尺度上也可能具有关键意义。

无论在全球尺度还是区域尺度，地下水位上升与下降出现的频率大体相当。因此，沿海含水层并非整体上都在朝着更高海水入侵易发性的方向演变。相反，易发性可能在局地增强，也可能在局地减弱。即便没有持续下降趋势，地下水位的短期波动也可能暂时推动系统转向平缓梯度、易受海水入侵影响的状态。这种时空变化特征凸显了有必要持续开展地下水位观测，以识别出符合地方实际情况的海水入侵易发条件。

未来海洋边界水头进一步升高，可能使更多海岸带转入海水入侵易发的梯度状态。目前，全球平均海平面正以约每年 4.5 毫米的速度上升；预计到 2100 年，相对于 1995—2014 年基准期，全球平均海平面将上升约 0.3—1.0 米，具体幅度取决于碳排放情景。随着变暖幅度增加，更长时间尺度上还可能出现数米级海平面上升。抽取地下水可能引发的海水入侵进一步加剧，使海水入侵发生在离海岸更远的内陆地区。本研究显示，

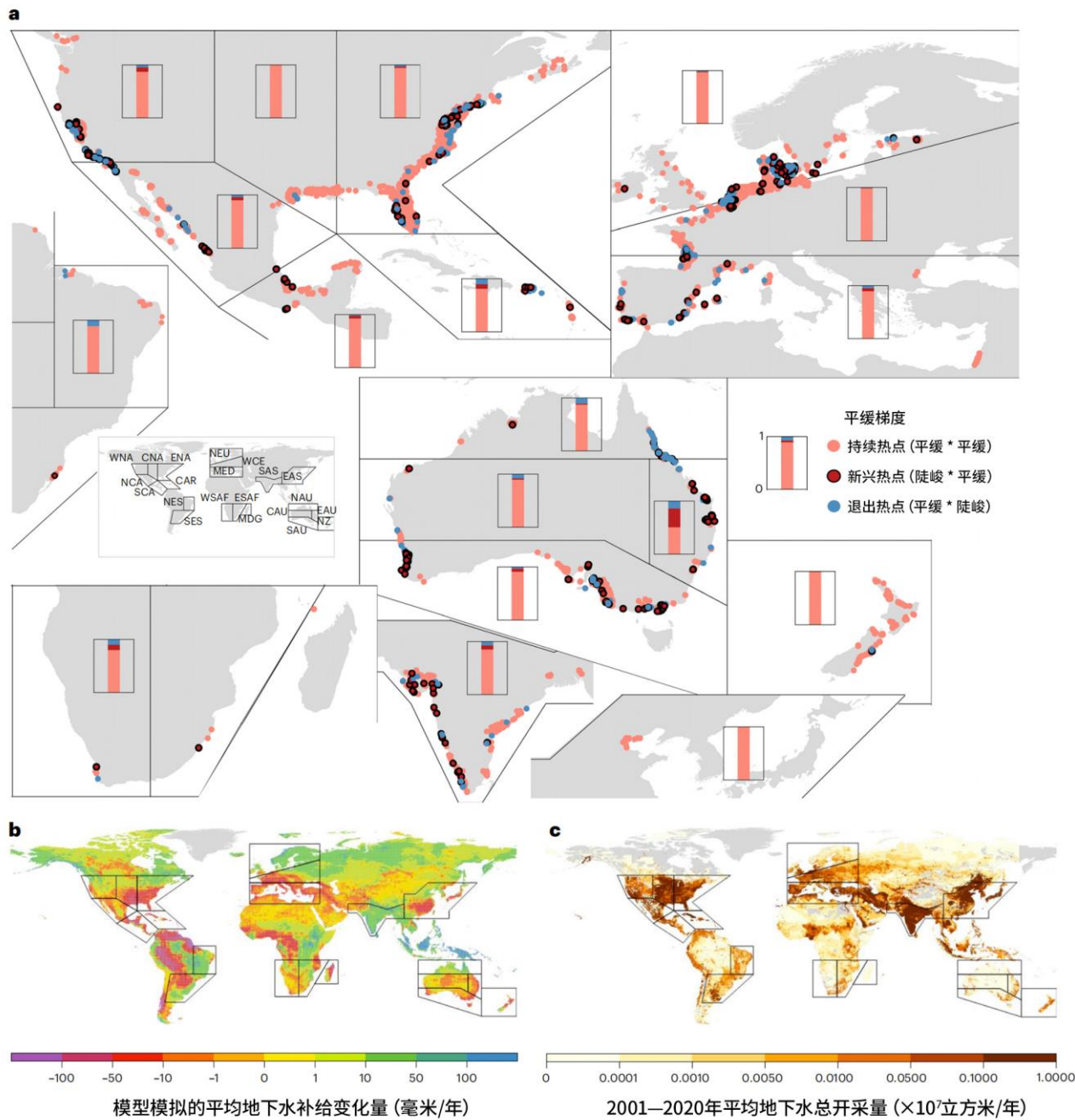


图4 | 全球海水入侵易发性热点及地下水补给和开采量变化。

a, 基于趋势外推得到的IPCC区域内海水入侵易发性热点空间格局。彩色点表示单个观测值(网格单元中心)。柱状图显示各区域内不同热点类型的相对占比(观测数 ≥ 10)。**b**, 基于ISIMIP2b多模式集合模拟得到的平均地下水补给变化量(毫米/年)。**c**, 基于数据驱动的全球地下水开采模型得到的长期平均地下水总开采量(2001—2020年; $\times 10^7$ 立方米/年)。a—c图中的陆地和海岸线几何数据来自HydroBASINS, IPCC参考区域来自既有研究。

农村干旱地区的深层含水层地下水位下降更为普遍。由于地下水系统响应通常较为缓慢, 管理干预可能需要数年乃至数十年才能转化为可测量的

水头恢复。因此, 在研判海水入侵易发性和制定监测策略时, 需要充分考虑治理效果滞后的问题。

此外, 显著地下水位变化的空间分布与人口

密度并不一致。因为城市用水需求有一部分是通过城市外部地区抽取地下水来满足的，所以地下水位信号不能直接视为当地地下水利用强度的指标。本研究结果与既有研究相一致的地方在于，干旱区含水层，特别是耕地下方含水层，普遍存在地下水位下降的情况。因此，在地下水依赖型农业地区，如果高强度开采压力与监管不足同时存在，海水入侵易发性可能明显升高。

在本研究中，持续存在或新出现的平缓水力梯度格局（即海水入侵易发性上升）往往与地下水取用量已经较高的地区相重合。其中，农业是地下水的主要使用部门，且自 2001 年以来，许多地区的地下水农业灌溉开采量持续增加。

除海水入侵外，一些基于水力梯度判断海水入侵易发性较低的沿海地区，例如南非部分地区，

也表现出显著地下水位下降，并伴随未来地下水补给减少，表明这些地区正在出现地下水压力风险。在干旱驱动的水资源短缺危机背景下，这一点尤其值得关注：持续的水文气候型缺水与高用水需求叠加，可能将供水系统推向急性供给短缺，此时地下水可被视为一种备用水源；但在沿海地区，如果本研究指标显示该地区同时存在海水入侵易发性，则这一备用选项可能受到约束。

（本文摘编自 Nature Water 2026 年第 4 期）

水质：社会结构性不平等的放大镜

在许多旨在改善全球南方水质状况的倡议中，普遍存在一种假设，即经济发展水平提高和性别平等改善将带来更好的水环境质量。然而，这种默认存在的因果关系往往忽视了影响环境健康的复杂且具有差异性的因素。

本报告由联合国大学水、环境与健康研究所（UNU-INWEH）在成立 30 周年之际发布，对这一认知缺口进行了审视。报告对有关经济发展、性别平等与水环境质量之间的决定关系提出异议，揭示了影响水安全的“社会—环境”复杂结构。

报告基于全球七个区域 138 个国家的数据，综合采用三项关键指标：饮用水安全指数（DWSI）、国际财富指数（IWI）和性别不平等指数（GII），构建了一个新的综合评价指标水质脆弱性指数（WQVI）。

这一综合性指标涵盖环境、经济和性别等多个维度，着重评估脆弱性特征及韧性模式。研究结果表明，尽管饮用水安全水平与财富水平及性别平等程度均呈现较强相关性，但二者之间的因果关系远非简单直接。

研究发现，即使处于相同级别收入水平的国家，其 WQVI 得分也往往存在显著差异；即使在高收入经济体内部，其表现同样参差不齐。这些差异表明，除财富水平和性别平等状况外，还存在一系列隐性驱动因素，包括治理质量和治理效能、基础设施投资、文化规范、气候变化以及冲突等。这些因素可能对财富和性别平等产生影响，甚至削弱或抵消其效果。

部分高脆弱性热点国家（如尼日尔、尼日利亚、纳米比亚、圭亚那）表明，即使经济发展水平或性别平等指标表现较好，结构性短板、环境条件约束以及根深蒂固的社会政治因素仍可能削弱饮用水安全保障水平。相较之下，一些国家和地区，如毛里求斯、摩洛哥、约旦、斯里兰卡和越南，尽管收入水平并不突出，却能够保持较高的饮用水安全水平，充分体现了有效政策、资源公平配置及精准智能投资的重要作用。

基于 WQVI 开展的四象限分析显示，在全球南方，仅有 39% 处于“三赢”状态，即同时具备较高饮用水安全水平、较高财富水平和较高性别平等水平，其余大多数国家和地区则面临中度至极高程度的脆弱性问题，受影响人口约达 20 亿。约三分之一的受评估国家和地区在饮用水安全、财富水平和性别平等三个维度上同时存在明显短板（即“三重失利”状态）。

上述研究结果揭示了一个重要的政策盲点：如果不能识别真正的因果机制，而仅仅依赖相关性指标制定政策，便可能导致干预措施偏离重点，固化既有的不平等现象，错失能够带来长期效果改善的系统性杠杆。

本报告是在联合国大学水、环境与健康研究所（UNU-INWEH）成立 30 周年之际编制完成的。报告摒弃过去将经济发展、性别平等与饮用水安全之间关系简单视为线性演进的传统认知，转向基于证据的综合治理策略，将这三者视为相

重点数据摘要

61%的国家同时面临社会经济和水安全挑战，约20亿人口受到影响。

61%

54%

在138个全球南方国家中，超过一半（54%）的国家饮用水安全指数（DWSI）得分较低，表明水质普遍较差。

四象限分析识别出关键的“三重失利”问题，即：饮用水安全水平低、财富水平低、性别差距大，涉及约30%的国家，凸显出一种以牺牲可持续性为代价、偏向短期收益的发展倾向。

30%

±0.5

欧洲的脆弱性最低，其次是南美洲、亚洲、中美洲、加勒比地区、太平洋岛屿和非洲国家。各地区脆弱性差异在±0.5范围内。

73%

水问题反映出不平等现象：全球饮用水质量差异中，73%与财富和性别差异相关。

互关联但非决定性变量。报告建议将 WQVI 纳入国家发展规划，以支持公平和可持续发展；同时将 WQVI 数据与访谈调查、案例研究等定性分析结合使用，以深入识别问题产生的根本原因。此外，研究提倡优先实施兼顾地方实际需求并吸收区域经验的精准干预措施，建立区域水安全联盟，共同应对干旱化、盐渍化等具有明显地域特征的问题。报告还建议将环境正义理念融入水治理体系，确保决策过程和资源配置更加公平，提议设立“全球水韧性基金”，重点支持以社区为基础、优先促进女性参与的项目。

上述策略与联合国可持续发展目标（SDGs）高度契合，特别是目标 5（性别平等）、目标 6（水

与卫生）以及目标 10（减少不平等）。同时，这些策略也有助于避免仅依据统计相关性制定政策所带来的局限性。

通过将叙事逻辑从“财富增长和社会平等会带来更安全的饮用水”重新构建为“水安全由多个相互作用的系统共同塑造”，本报告为理解全球南方水资源与不平等问题提供了更加细致、全面的分析框架。这一框架既承认变量之间存在统计相关性，也关注其背后更深层次的因果关系。

饮用水质量是一个国家社会结构的映射，更是其放大镜。有效解决饮用水安全问题，不仅需要推进公平发展，也需要持续加强基础设施建设。报告提出了明确的行动倡议：投资于水就是投资

社会公平，其回报将惠及世世代代。

背景简介

水质状况能够深刻反映权力由谁掌握，安全用水并非单纯的环境问题，它反映的是资源如何被共享。在世界许多城市，富裕社区可享有经过处理的供水，而贫困社区则往往只能使用受到污染的水源。这些差距凸显了财富、阶层等更广泛的不平等。正因如此，“水”为评估正义与公平提供了重要视角。

当政府优先在某些地区开展基础设施投资，而忽视另外一些地区的公共服务不足时，意味着存在对脆弱群体的系统性漠视，这种漠视会进一步强化贫困循环，给公共健康带来更严峻挑战。此类格局的形成很少是偶然的，通常是有意为之，因此，水既成为社会福祉的象征，也成为衡量社会福祉的重要标尺。

过去，获取安全用水的不平等现象通常是对社会等级结构的反映，其中许多来源于殖民历史。殖民时期设计供水系统，为殖民者的资源开采型产业服务，导致面向原住民和当地人民的供水质量下降。这些不平等现象在许多后殖民国家延续至今，殖民时期遗留的基础设施和治理结构仍持续边缘化部分群体，使水权问题冲突加剧。干旱等环境压力进一步加剧了这些挑战。弱势群体生活的地区本已受到治理能力薄弱等因素的制约，气候变化更对这些地区造成了成倍的影响。在这种背景下，歧视性政策将加深气候变化影响，从而进一步增加弱势群体的边缘化。

关于水治理的讨论中，核心议题之一是处理“将水视为一项基本人权”与“将水视为一种商

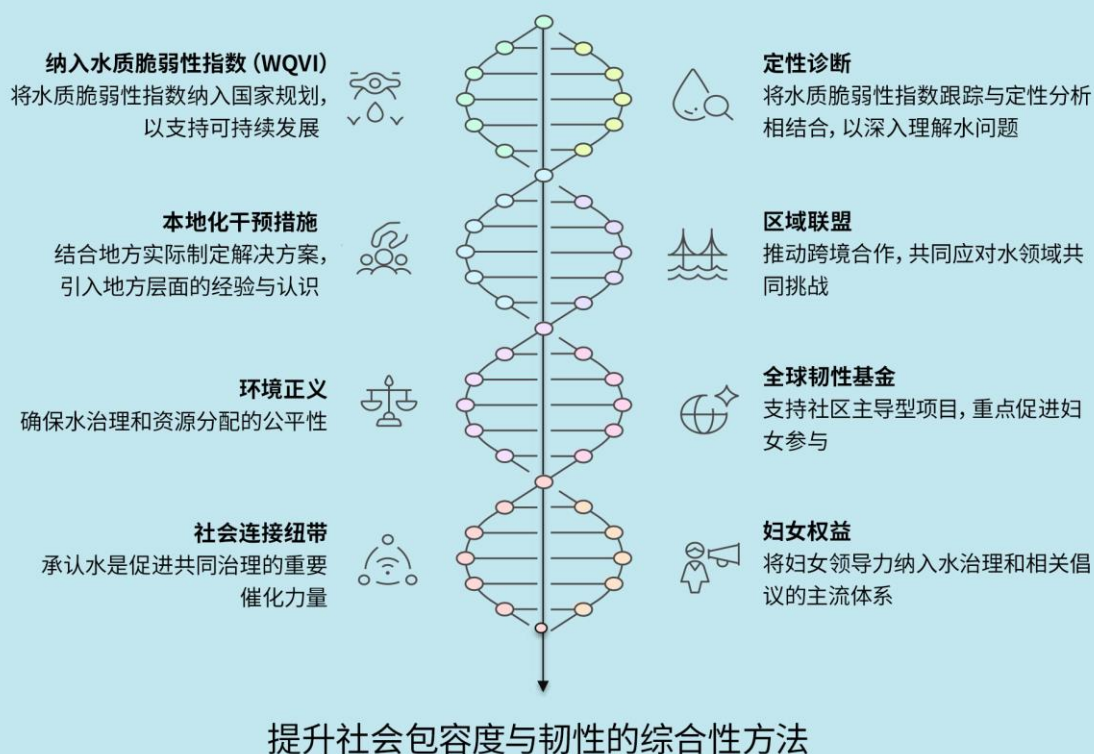
品”这两种观点之间的对立。2010 年，联合国承认水是一项基本人权，标志着讨论风向的重要转变，强调无论经济状况如何，人人都应享有获取安全用水的权利。然而，许多国家仍在继续采用市场驱动模式，将水视为可交易的商品。私营供水企业往往将利润置于公共福祉之上，使边缘化的人群只能使用不安全的替代水源，从而进一步扩大了健康和经济上的差距。

一些观点认为，将水商品化会把维系生命所必需的资源转化为一种特权，从而削弱社会凝聚力。将水界定为一项基本人权有助于推动更具包容性的政策，有助于解决结构性不平等问题。例如，妇女在取水活动中承担不平等负担，以及经济问题阻碍弱势群体获得安全用水等。归根结底，各国对水问题的处理，在某种程度上反映了其对公平与正义的整体承诺。在这一背景下，安全用水的可及性映射出更深层次的伦理现实和制度现实。

在全球南方，近 20 亿人口面临水安全和社会问题挑战，这进一步增加了他们的脆弱性。安全用水可及性不足将损害健康、教育和经济机会，对弱势群体影响更为突出。许多人日常生活中仍需从远距离水源取用受污染的水，从而增加霍乱、腹泻等可预防疾病的发生风险，这些疾病每年夺走数百万人的生命。上述风险不成比例地落在了农村地区和正规城市居住区的居民身上。在这些地区，基础设施不足使贫困持续固化，并进一步强化了用水匮乏的状态。

非洲、亚洲和拉丁美洲的许多区域反映出殖民主义遗留和发展不平衡问题。在撒哈拉以南非洲，殖民时期的供水系统优先服务于出口导向型农业，导致当地居民的基本用水服务被边缘化，

采取综合性方法构建具有韧性的水系统， 促进包容性发展



固化了族群和阶层分化。在南亚，快速的城市化扩大了特大城市与其郊区之间的经济差距，水资源优先向工业园区输送。在拉丁美洲安第斯地区，原住民高地与沿海城市精英社区之间存在鲜明反差，前者河流受到污染、基础设施匮乏，后者则受益于现代化供水系统。

这些失衡现象推动人口向城市中心迁移，使本就脆弱的供水系统更加不堪重负，加剧了社会紧张。较富裕家庭往往能够通过私人方式保障用水，例如打井或购买瓶装水，而较贫困社区则面临更高风险。性别因素进一步放大了这些挑战，家庭用水管理责任通常由妇女承担，她们因此承

受更大的体力负担和时间成本，在气候变化压力加剧的情况下更是如此。

由此可见，水既是社会分化的结果，也是其驱动因素。作为社会分化结果，水质恶化表明治理不力和经济疏忽；作为驱动因素，水问题会激化冲突、削弱信任，并以水资源的可及性差异分化不同社区。在许多地方，水资源纠纷已引发抗议和暴力事件，破坏社会凝聚力，阻碍包容性发展。面对这些挑战，需要采取综合性方法，在单纯的技术修复之外，直面不平等和社会分化的深层根源。

从单纯依赖技术方案转向更加深入地理解社

会背景至关重要。大坝、净水厂等工程措施往往容易忽视影响水资源获取和使用方式的文化、经济和社会关系因素。外来技术如果不能与本地知识相衔接,就可能导致效率低下,使社区缺乏参与感。水问题并不只是水资源本身的问题,而是与社会信任、参与和公平密切相关。社会学和人类学研究有助于政策制定者理解为何一些改革会遭遇阻力,以及人际关系和社会互动如何影响水资源管理。采取综合性方法将有助于形成更加灵活、包容的治理策略,以及帮助我们重新认识水的作用:水不仅是一种商品,也是一种连接社会关系的纽带。

此外,水、性别和财富之间相互交织的关系也凸显了采取整体性视角的必要性。例如,性别不平等往往体现在用水获取方面:低收入家庭的妇女可能每天花费数小时取水,从而限制其受教育和参与经济活动的机会。财富差距又会进一步加剧这一问题,较富裕群体通常能够获得更高质量的供水服务,而贫困社区则不得不使用受污染的水源,进而固化健康和社会不平等。在全球南方,这些因素相互作用,形成一种复杂关联,即贫困制约水基础设施投资,性别差异进一步加剧妇女群体的脆弱性,而气候变化又加剧了水资源压

力。

因此,水治理干预的成效不仅取决于技术方案本身,也取决于一个社会的经济基础是否稳固——包括经济能力、信任网络、合作关系,以及将社区凝聚在一起的共同价值观。在社会凝聚力较强的地区,社区更有能力组织集体行动,这在成功的流域合作实践中表现得尤为明显。包容性的决策机制有助于促进水资源公平分配,并保障水资源的长期维护。相反,在社会体系较为薄弱,排斥现象、腐败问题或历史冲突持续存在的地区,强势群体更容易掌控资源和决策过程,进而对水治理成效产生负面影响。增强社会凝聚力需要持续对教育、社会对话等进行投入,同时,水治理政策的设计也应促进公众参与、提升系统韧性,使其逐步成为推动社会进步的平台。

本报告提出水质脆弱性指数(WQVI),用于量化全球南方饮用水安全、性别不平等和经济因素之间的相互关系,揭示地区脆弱性和韧性格局。同时,报告深入剖析了塑造水安全的复杂社会环境结构,并提出可操作的政策建议,以支撑更加公平的水资源管理。

(本文摘编自联合国大学官方网站)



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

2026年6月