

城市水文过程演变对水生态环境的干扰机制与适应性调控策略

白瑞泉 马商瑜 张冲 赵一鸣

江苏省水文水资源勘测局苏州分局, 中国·江苏 苏州 215000

摘要: 城市水文过程因不透水面扩展和排水系统刚性化发生显著演变, 改变降水径流、产流模式与地下水补给过程, 造成水量波动、水质恶化与生态结构失衡。论文分析水文变化对水生态系统的干扰机制, 提出包括低影响开发、绿色基础设施、生态缓冲构建与多尺度治理在内的适应性调控策略, 以提升城市水生态系统的稳定性与韧性。

关键词: 城市水文过程; 水生态干扰; 绿色基础设施; 水质退化; 适应性调控

The Interference Mechanism and Adaptive Regulation Strategy of Urban Hydrological Process Evolution on Aquatic Ecological Environment

Ruiquan Bai Shangyu Ma Chong Zhang Yiming Zhao

Suzhou Branch of Jiangsu Hydrological and Water Resources Survey Bureau, Suzhou, Jiangsu, 215000, China

Abstract: Urban hydrological processes have undergone significant evolution due to the expansion of impermeable surfaces and the rigidity of drainage systems, changing precipitation runoff, runoff patterns, and groundwater recharge processes, resulting in fluctuations in water quantity, deterioration of water quality, and ecological structure imbalance. This paper analyzes the interference mechanism of hydrological changes on aquatic ecosystems and proposes adaptive regulation strategies including low impact development, green infrastructure, ecological buffering construction, and multi-scale governance to enhance the stability and resilience of urban aquatic ecosystems.

Keywords: urban hydrological processes; water ecological disturbance; green infrastructure; water quality degradation; adaptive regulation

0 前言

在城市地区而言, 因道路、屋顶及硬质广场等不透水面显著增加, 大量降水无法在地表顺利就地下渗, 反而是迅速汇集进而形成地表径流, 导致城市径流系数显著得以提高。降雨初期径流起始时间大大提前了, 峰值流量随之升高, 洪峰出现时间提前, 径流历时却缩短。另外, 暴雨径流强度增强, 地表汇流路径变得短促而集中, 不仅使城市排涝系统承压增加, 且增加了下游水体的洪涝风险。此变化不但削弱城市区域自然调蓄能力, 而且加剧城市面源污染负荷的输出。

1 城市水文过程演变特征分析

1.1 地表产汇流特性演变

城市地表结构改变促使产汇流过程趋于具备“快响应”特征。城市开发使得天然植被被硬化覆盖, 雨水从而失去在土壤中缓慢下渗与滞蓄的过程。原有的天然汇流路径被人工排水系统替代, 从点源集水转变为面源集中, 使得产流单元范围得以扩大。雨水快速集中导致局地内涝频繁发生, 城市排水系统常常在短时间内超负荷运行, 增加污染物的冲刷和迁移速率。此外, 不同片区地表排水不均衡, 进而造成局部

水体供需失衡以及水动力格局被破坏。

1.2 地下水补给与动态变化

不透水地表的扩展直接对雨水下渗形成抑制, 导致地下水补给量显著减少, 浅层地下水位普遍出现下降。在部分城市, 长期超采以及补给不足相叠加, 致使地下水漏斗效应加剧, 进而引发地面沉降、河湖萎缩等一系列地质与生态问题。与此同时, 地下水与地表水体之间的水力联系减弱, 作为调节枯水期生态需水重要来源的地下水, 其功能正逐渐丧失。一些城市地下水被动恢复能力下降, 转而依赖外部调水来维持生态系统运行, 水资源安全因此面临更大挑战。

1.3 城市灰绿基础设施变化影响

伴随城市功能布局日趋密集, 灰色基础设施占比持续上升, 如管渠式排水、硬质挡墙等工程设施主导着城市水文调控过程。这种仅以排涝为目的的单一系统, 削弱城市的水文弹性, 难以应对极端降水的频繁发生。相对来说, 如雨水花园、生物滞留设施、下凹式绿地等绿色基础设施, 在城市中布局不足或者运行效果有限, 未能形成有效补充。除此之外, 城市绿地系统被碎片化分割, 致使其生态服务功能下降, 不利于区域水文循环的重构。灰绿系统之间缺乏统筹规划以及耦合设计, 成为制约城市水文过程良性演化的重要因素。

2 水文过程演变对水生态环境的干扰机制

随着城市化水平持续不断地提升,水文过程那种原本具有的自然格局遭受各种不同因素破坏,从而致使水生态系统所具备的承载能力出现下降的情况。在水量、水质、水动力以及水生栖息地等多个维度上发生复杂而难以预测的变化,这些变化以一种渐进的方式逐步诱发一系列生态失衡相关问题,进而形成从物理过程一直延伸到生态结构的系统性干扰机制体系。

2.1 水量变化对生态系统结构与功能的影响

城市水文过程产生的演变对河流和湖泊原有的自然径流量过程进行了改变,最终造成枯丰水期水量分配呈现出失衡的状态。虽然径流总量由于雨水迅速汇集的因素从而在短期内表现出增加的情况,但有效生态水量却显现出下降的发展趋势。在雨季的时候,径流洪峰出现增高现象,短时间内水体流速产生极为剧烈的变化,会对水体边界以及底部沉积物形成冲刷作用,最终导致底栖生物的生境遭到破坏。在旱季期间,因为下渗水量不断减少以及地下水补给受到限制,所以导致基流出现断流、河道处于干涸状态,部分依赖恒定水量而生存的水生植物和鱼类面临着生存层面的威胁;水量的剧烈波动对于河流系统所具备的缓冲与稳定功能产生削弱作用,使得原有的水生态结构难以继续维持,生态系统的多样性与功能也逐步走向退化。

2.2 径流污染负荷提升与水质恶化

城市径流因快速汇集从而携带大量面源污染物,特别是在降雨初期阶段,地表长期积存的油污、重金属、颗粒物以及有机污染物等被大量冲刷进而进入水体;这种被称作“初期雨水效应”的现象显著增加了污染物的浓度,并且借助排水系统快速传导到河湖当中,最终造成短时间高强度的污染输入情况。除此之外,城市排水系统当中混流溢流现象频繁发生,在雨季时污水处理系统处于超负荷运行状态,那些未经处理的生活污水与工业废水通过雨水口被排入水体。从长期角度来看,水体当中的氮、磷浓度持续升高,富营养化现象呈现出不断加剧的态势,藻类暴发的频率明显增加,水体溶解氧随之下降,从而造成鱼类死亡、底栖动物数量减少等生态退化相关现象。水质的持续恶化对水体自身具备的自净功能起到抑制作用,导致生态系统逐渐陷入一种负反馈循环当中,难以恢复到原本良性的状态。

2.3 水体连通性破坏与生态碎片化

城市建设过程中由于大量去实施诸如河道硬化、箱涵化以及河道截断之类的工程,致使水体之间自然所具备的连通格局被无情打破,其中纵向河流上游朝着下游的水体流动遭遇阻碍,这就对鱼类洄游还有营养物质输送形成了阻碍之势,而横向河道同洪泛区以及湿地之间存在的联系也被人为切断,进而限制了生态系统扩展与物种迁移应有的空间,水体连通性的这般破坏直接导致栖息地出现缩小与破碎化的状况,使得物种分布被局限起来、种群交流亦受到阻碍,并

且由此降低生物多样性,水生植物群落逐渐走向单一化,局部的优势种非常易于爆发开来,然而弱势种却逐步地走向消失,生态碎片化不但削弱了生态系统原本具有的稳定性以及抵御外部扰动的能力,同时也削减了像水质净化、生物调节还有洪水调蓄之类的生态系统服务功能。

2.4 极端水文事件频发对生态系统扰动增强

城市水文过程令极端水文事件的频率与强度都有所加剧,其具体表现为暴雨洪水显得更加集中、干旱期持续的时长有所延长,在暴雨期间,大量高能径流会形成强冲击流,这引发破坏水体岸线稳定性、冲刷河床底栖生物、扰动沉积污染物以及致使重金属再悬浮等一系列问题。干旱期的时候,地表水体干涸、湿地发生萎缩,生态系统出现水源短缺的情况,进而导致生物生长停滞甚至走向死亡,城市生态系统原本对于极端气候是具备一定缓冲能力的,可水文过程被人为重构之后,这种缓冲功能出现大幅下降,极端事件所带来的扰动打破了生态系统的适应边界,使得部分物种难以完成自身生命周期,从而导致生态位消失与种群崩溃。而且在频繁扰动之下,生态系统难以进入稳定演替阶段,生态恢复周期被反复打断,长时间处于“干扰—恢复—再干扰”这般的恶性循环当中。

3 适应性水生态环境调控策略

城市水文过程的异常演变对水生态系统构成持续性扰动,迫切需要构建科学、系统的适应性调控策略,实现城市开发与生态安全的协调统一。在“灰绿融合”理念指引下,应从空间格局、设施布局、系统管理与政策制度等多个维度,推进水生态环境调控向综合性、韧性和生态化方向转型。

3.1 低影响开发(LID)与绿色基础设施建设

低影响开发(LID)理念着重于城市规划建设进程中尽可能留存及模拟自然水文流程、降低不透水面扩展并提升雨水就地调蓄净化渗透能力,其中典型 LID 措施包含像雨水花园、绿色屋顶这种透水铺装还有生物滞留设施和植被沟渠之类的,这些设施能够对削减地表径流峰值、延缓汇流速度以及降低污染物浓度产生有效作用,而绿色基础设施不但承担着水文调控功能且还提供生境支持与美学价值,是达成城市生态化建设的关键载体。凭借系统化布局以及多点散布这种方式,LID 设施可以形成多层次且网格化的生态水文调节网络,它在缓解内涝压力同时,对维持河道基本生态流量、提升水体自净能力也有帮助,若将绿色基础设施与城市道路、公园、住宅区等空间融合来设计,那么对于实现海绵城市功能以及为城市水文过程良性演化奠定基础都有益处。

3.2 雨水管理与城市排水系统优化

传统城市排水系统所强调的快速排出并集中输送这种方式,忽视了雨水生态利用与调蓄能力,进而容易造成局内地内涝以及下游洪涝压力增加的状况。现代雨水管理需从“径流控制”朝着“雨水资源管理”转变,强调将源头减排、过

程控制和末端治理相互结合起来,借助设置蓄水池、调蓄塘、雨水回用设施这些工程手段,来提升城市对雨水吸纳、存储与循环利用能力,从而降低暴雨期间的峰值流量负荷。在排水系统优化范畴内,应当推动分散式与集中式系统并行发展,强化管网通量监测与预警能力以此适应极端降水频发的趋势,智慧排水系统能够通过实时水位与流量监测去动态调整排水节奏,提高排涝效率与系统弹性。在老旧城区,则应当结合雨污分流改造来解决溢流污染问题,提升污水处理系统承载力并减少水体污染风险。

3.3 生态缓冲带与生态护岸构建

城市水体边界所在区域构建起的生态缓冲带,此对于保障水生态系统稳定性来说极其重要的一项策略,而这些缓冲带一般由湿地、滩涂还有植被带等多种部分共同组成,它们能够对径流里的污染物展开有效过滤,进而削减其中的氮磷负荷,将面源污染进入河湖的相应通道予以阻截;与此同时,生态缓冲带具备调节微气候以及增强水岸带生物多样性这样的能力,是作为水陆交互带重要生态节点而存在。

再说护岸结构的生态化改造这件事,其同样显得尤为关键,与传统硬质护岸形成对比,生态护岸借助种植水生植被、设置碎石滩面、构建阶梯水岸等一系列手段,达到提供多样化栖息地并且恢复水体边缘生态功能的目的,生态护岸不但具备缓冲冲刷、改善水动力条件、稳定岸坡之类的功能,而且还能够提升城市滨水景观所具有的宜人性,通过把护岸设计和流域水动力分析相结合,能够使城市河湖系统对于极端气候的适应能力得到增强。

3.4 政策协同与多尺度水生态管理机制建立

在政策协同以及多尺度水生态管理机制建立这个范畴,由于水生态环境调控所涉及的是多个不同部门与多种空间尺度,所以极度需要具备完善特性的政策给予支持以及协同治理机制;在管理理念层面而言,应当始终坚持“生态优先、系统治理、综合施策”这样的理念,将水务、环保、城市建设等多个领域存在的管理壁垒打破,以此推动跨部门信息实现共享以及责任共同承担;建立起以流域当作单元的那种统筹治理模式,对流域上中下游之间的协同与联动进行强化,从而保障生态用水的优先权。

在制度设计的角度来讲,应该完善水生态补偿机制、绿色发展激励政策还有生态绩效考核体系,以此推动城市开发行为朝着生态友好型的方向转变;地方政府可以去制定基于生态安全底线的城市水资源管控指标,把生态流量保障、水体连通性维护列入规划的强制性内容;从技术方面来说,应该支持城市水生态信息平台方面的建设,提升相关数据的支撑能力,进而实现调控策略能够动态调整以及精准落地。

另外,多尺度管理机制还需要关注社区以及公众的参与情况,致力于推动水生态保护意识朝着社会化方向发展,借助政策引导以及激励的方式,鼓励企业、居民和非政府组织参与到绿色设施建设以及水环境监督工作当中,从而形成全社会共同建设、共同享有的生态治理格局。

4 结语

城市水文过程所发生的异常演变,由于其在多种情形下对诸多方面产生复杂影响,已然成为在整个复杂体系内能够显著影响水生态系统稳定性的一类极其重要因素,其中像是水量出现骤变这一状况、污染负荷呈现增加趋势、生态连通性遭受削弱以及极端事件发生频率不断增大等这些情形构成了较为复杂的复合干扰机制;而实现城市水环境质量朝着改善方向发展以及生态功能得到有效恢复的关键路径呢,就在于构建起一套以低影响开发这种理念为核心,同时涵盖生态缓冲相关措施、排水系统优化策略以及政策协同推进办法等多个方面有机结合的适应性调控体系,且该体系必须依据实际情况动态调整并确保各要素之间相互协调与配合。

参考文献:

- [1] 张俊凯.生态水文过程对水环境的影响分析[J].科技创新与应用,2016(4):229.
- [2] 殷芳芳,沈永嵘.浙江省水环境治理多元化生态补偿机制实践研究与对策建议[J].水资源开发与管理,2025,11(3):53-59.
- [3] 王会,杨光,程宝栋.长三角地区省级流域生态补偿制度研究[J].环境保护,2020,48(20):24-30.

作者简介:白瑞泉(1992-),男,中国山东枣庄人,本科,工程师,从事水文水资源调查评价和水资源论证研究。