

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.16.002

城镇污水处理厂污染物排放标准的科学性实施路径

沈 珺, 刘 亮, 王 哲, 张晶晶, 许 晨, 李 骛, 梁爽静,
高 伟, 章林伟
(中国城镇供水排水协会, 北京 100048)

摘 要: 《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的颁布执行,有效促进了污水处理设施的建设和运行,对改善水环境质量发挥了重要作用。但在该标准执行过程中存在“一刀切”导致的标准分级失效、取样评价的执行偏差,以及过度提高标准所引发的碳排放增加和消毒副产物等隐性风险。重点探讨了如何科学发挥标准的作用,并建议从强化分级排放标准体系、放宽微生物指标排放限值、明确取样评价体系、嵌入碳排放核算与资源化导向4个方面提升标准的科学性实施水平,以更好地适应我国水环境管理的实际需求,推动城镇排水行业的高质量发展。

关键词: 城镇污水处理; 污染物排放标准; 水环境容量; 标准实施

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)16-0006-07

Scientific Implementation Path of Pollutant Discharge Standards for Municipal Wastewater Treatment Plants

SHEN Jun, LIU Liang, WANG Zhe, ZHANG Jing-jing, XU Chen, LI Ao,
LIANG Shuang-jing, GAO Wei, ZHANG Lin-wei
(China Urban Water Association, Beijing 100048, China)

Abstract: Since its promulgation, the *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002) has effectively promoted the construction and operation of wastewater treatment facilities, playing a significant role in improving water environment quality. However, during the implementation of the standard, issues have arisen, including the failure of its graded standards due to “one-size-fits-all” enforcement, deviations in sampling and evaluation practices, and hidden risks such as increased carbon emissions and hazardous disinfection byproducts caused by excessively stringent requirements. This paper focuses on how to scientifically leverage the role of the standard. It proposes enhancing its scientific implementation in four key aspects: strengthening the graded discharge standard system, relaxing emission limits for microbial indicators, clarifying the sampling and evaluation system, and embedding carbon emission accounting alongside resource-oriented approaches. These improvements aim to better align with the practical needs of China’s water environment management and promote the high-quality development of the urban drainage sector.

Key words: municipal wastewater treatment; pollutant discharge standard; water environmental capacity; standard implementation

1 背景

《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—

2002)是我国首个针对城镇污水处理厂的强制性排放标准,该标准根据不同水环境功能区保护需求,将

污染物排放限值分为 4 个等级,为城镇污水处理厂的建设、运行、管理等各环节提供了重要指导。面对 21 世纪初快速城镇化带来的污水排放量激增、水体污染加剧等严峻挑战,该标准系统构建了城镇污水处理厂的污染物管控框架,在其引导下,我国城镇污水处理能力实现跨越式增长。根据《中国城市统计年鉴》和《中国城镇水务行业发展报告(2024)》,截至 2023 年,我国城市和县城已建成污水处理厂 4 816 座,处理能力提升至 $2.7\times 10^8\text{ m}^3/\text{d}$,污水处理总量达 $759.86\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ 。同时,对改善水环境质量也发挥了重要作用。2002 年七大水系国控断面优良水质(地表水 I~Ⅲ类)占比仅 29.1%,而根据中国生态环境状况公报,2023 年全国地表水国控

断面优良水质比例已跃升至 89.4%,劣 V 类水体比例从 9.7% 降至 0.7%。

该标准自公布实施至今已 20 余年,在“双碳”目标全面推进的新阶段,旨在通过剖析标准执行现状与问题,提出科学实施路径,推动城镇水务行业向低碳化与资源化加速转型,为美丽中国建设提供制度保障。

2 标准执行过程中的问题

2.1 “一刀切”执行导致标准分级失效

2015 年,国务院发布《水污染防治行动计划》后,全面加大水污染防治力度,多个地区和流域根据自身环境特点和需求,陆续出台了地方排放标准。国内污水处理排放限值对比见表 1。

表 1 GB 18918—2002 与地方水污染物排放标准限值对比

Tab.1 Comparison of pollutant concentration limits between GB 18918—2002 and local water pollutant discharge standards

标准名称	标准分级	TN 限值/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TP 限值/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
《城镇污水处理厂污染物排放标准》 (GB 18918—2002)	一级 A	15	2006 年前建设:1;2006 年新建:0.5
	一级 B	20	2006 年前建设:1.5;2006 年新建:1
《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)	Ⅲ类	1	0.2(湖、库 0.05)
	Ⅳ类	1.5	0.3(湖、库 0.1)
	V 类	2	0.4(湖、库 0.2)
北京市《城镇污水处理厂水污染物排放标准》 (DB 11/890—2012)	A 级	10	0.2
	B 级	15	0.3
山东省《城镇污水处理厂水污染物排放标准》 (DB 37 4809—2025)	A 标准(日均值)	10(12)	0.3
	A 标准(瞬时值)	15	0.5
安徽省《巢湖流域城镇污水处理厂和工业行业 主要水污染物排放限值》(DB 34/2710—2016)	现有	15	0.5
	2017 年新建	10(12)	0.3
昆明市《城镇污水处理厂主要水污染物排放限值》 (DB 5301/T 43—2020)	A 级	5(10)	0.05
	B 级	10(15)	0.3
《湖南省城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》 (DB 43/T 1546—2018)	一级标准	10	0.3
	二级标准	15	0.5
浙江省《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》 (DB 33/2169—2018)	现有	12(15)	0.3
	2019 年新建	10(12)	0.3
上海市《污水综合排放标准》(DB 31/199—2018)	一级标准	10(15)	0.3
	二级标准	15(20)	0.5
《四川省岷江、沱江流域水污染物排放标准》 (DB 51/2311—2016)		10	0.3
天津市《城镇污水处理厂污染物排放标准》 (DB 12/599—2015)	A 标准	10	0.3
	B 标准	15	0.4
江苏省《城镇污水处理厂污染物排放标准》 (DB 32/4440—2022)	A 标准	10(12)	0.3
	B 标准	10(12)	0.3

注: ① 所列标准,分级未完全列出,污染物仅列出 TN、TP 作对比。② TN 限值括号内为低温排放限值;GB 18918—2002 和安徽省、昆明市、湖南省、四川省水温 $\leq 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 执行;北京市 12 月—3 月执行;山东省、浙江省、天津市、江苏省 11 月—3 月执行;上海市 11 月—2 月执行。

为确保本地区水环境质量持续改善,这些标准通常比 GB 18918—2002 一级 A 标准更为严格。例

如:北京市 DB 11/890—2012、天津市 DB 12/599—2015、四川省 DB 51/2311—2016 等都规定了 $\text{TN}\leq 10$

mg/L的排放限值。昆明市滇池流域由于对水环境质量提升的需求,执行全国最严的DB 5301/T 43—2020 A级标准,除TN限值设置为5 mg/L外,其他主要污染物的各项指标均已达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅲ类标准。

根据中国水协《2023年城镇水务统计年鉴(排水)》,我国执行GB 18918—2002一级A及以上排放标准的污水处理厂数量和处理水量占比分别达到91.90%和97.72%。GB 18918—2002中一级A排放标准原针对水资源回用而设定,而目前“一刀切”的执行情况显然违背了初衷^[1],也忽视了不同水体的环境容量和受纳水体的承载力差异,标准的分级制度形同虚设。

更重要的是,较高的排放标准需要增设难降解有机物去除、过量消毒、深度脱氮除磷单元,这些深度处理单元虽能显著提升污染物去除率,但也导致

电耗和除磷剂、碳源、消毒剂等药剂成本的激增,从而拉高了污水处理厂的建设成本和运营成本,加剧了水价与成本倒挂程度,排水企业的经营压力日趋增大。

我国目前污水价格实际仅局限于污水处理费,未包括污水收集环节,各市政管网的建设、运维费用多由政府承担。此外,污水处理费价格审定与排放标准有关,较高的排放标准意味着政府需要支出更多的污水处理运营费,污水处理厂排放标准逐步提高、收集管网长度逐年增加,都导致财政需承担的费用持续上涨,加剧水价倒挂,加大政府债务风险。近年来,多个城市出现财政资金紧缺,无法及时拨付污水处理厂服务费和排水设施运维费的现象,此问题已成为行业可持续发展的瓶颈。

2.2 取样评价的执行偏差

国内外市政污水处理排放限值对比见表2。

表2 中国与欧盟、德国、美国、日本的市政污水处理排放标准对比

Tab.2 Comparative analysis of municipal wastewater treatment discharge standards: China vs. EU, Germany, USA, and Japan

国家或地区	COD		BOD ₅		TN		TP	
	限值/(mg·L ⁻¹)	去除率/%	限值/(mg·L ⁻¹)	去除率/%	限值/(mg·L ⁻¹)	去除率/%	限值/(mg·L ⁻¹)	去除率/%
中国 ^①	50	—	10	—	15	—	0.5(1)	—
欧盟 ^②	125	75	25	70~90	10	70~80	1	80
德国 ^③	75	—	15	—	18	70	1	—
美国 ^④	—	—	30(30日平均);45(7日平均)	不低于85	各州及污水处理厂执行不同排放限值			
日本 ^⑤	—	—	10/15(分流制);40(合流制)	—	10/20	—	0.5/1.0/3.0	—

注: ① GB 18918—2002 一级A排放标准;② 欧盟城市污水指令(91/271/EEC, 2014修订), 所列为人口当量>1×10⁵(污水处理厂规模>2×10⁴ m³/d)情况;③ 德国废水排放条例, 所列为污水处理厂规模>2×10⁴ m³/d情况;④ 美国公共处理设施二级处理标准, 美国各州及污水处理厂根据其水环境水质标准、排水和受纳水体特性、经济情况等执行不同排放限值;⑤ 日本《下水道法》《下水道法实施令》规定的市政污水处理设施排放限值, BOD₅、总氮、总磷的容许浓度限值按处理工艺分类。

与国际标准相比,我国GB 18918—2002一级A标准普遍严于德国、美国、法国、欧盟等标准。此外,我国污水处理厂的脱氮除磷及深度处理设施占比也远超西方国家^[2]。

在取样要求上,国外一般采取出水多日平均值或概率的排放限值,如欧盟标准统一采用24 h混合样,且规定每年取样中不合格样品的最大允许数量;美国二级处理标准采用7 d或30 d等多日的平均值。GB 18918—2002标准要求取样频率至少1次/2 h,取24 h混合样,以日均值计。但在实际监管过程中,往往以一次瞬时采样的结果作为评判标准,且在评价方法中无达标率要求,即视同需要全

部达标。通常污水处理厂的进水变化、自然条件、设施设备等因素都会导致出水指标波动,特别是进水中含工业废水的污水处理厂,水质波动较大,更易受到冲击。为了满足出水瞬时样的100%达标,污水处理厂通常会将标准限值的70%~80%作为内控值,进一步推高了建设成本和运行成本。

2.3 过度提高标准引发隐性风险

① 碳排放增加

GB 18918—2002的一级A及以上排放标准对TN、TP的严格管控,直接决定了污水处理厂必须采用生物强化与化学协同处理等复杂工艺,不仅导致建设成本和运行成本增加,而且由此带来的药剂生

产运输、额外曝气能耗以及增加的污泥处理负荷,会大幅提升全过程的温室气体排放强度。

根据中国城镇水务行业发展报告(2019),目前我国城镇污水处理厂为实现一级 A 及以上、一级 B 排放标准,外部碳源的平均投加量分别为 30.30、22.15 mg/L。全球大气研究排放数据库(EDGAR)数据^[3]显示,2018 年污水处理厂直接排放的温室气体占全球总排放量的 3%,其中,CH₄和 N₂O 直接排放量约占总温室气体排放量的 50%~60%。Huang 等^[3]核算了污水处理厂包括运输、污水处理、污泥处置等全链条的温室气体排放量,发现温室气体排放量增速是污水处理量增速的 3.13 倍。由于我国城镇年污水处理总量高,吨水处理成本、碳排放的微小增加都将通过处理规模产生显著的经济乘数效应和环境影响。

② 消毒副产物风险

GB 18918—2002 标准中粪大肠菌群指标限值设定为 1 000 个/L,对比《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)、《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)和国际相关标准(见表 3),其严格程度已显著偏离国内水环境管理实际需求,并远超多数发达国家标准。

表 3 部分国家和地区的微生物指标限值对比

Tab.3 Comparative analysis of microbial indicator limits in selected countries and regions

国家或地区	微生物指标限值	备注
中国	《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)	粪大肠菌群数: 1 000 个/L
		一级 A
		粪大肠菌群数: 10 000 个/L
		一级 B
	《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)	粪大肠菌群数: 2 000 个/L
		Ⅱ类(饮用水源)
	《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021)	粪大肠菌群数: 10 000 个/L
		Ⅲ类(人体接触水域)
		粪大肠菌群数: 10 000 个/L
		灌溉生食类蔬菜和瓜果用水
		粪大肠菌群数: 40 000 个/L
		灌溉一般农作物的用水
美国	粪大肠菌群数: 200 个/100 mL	二级生化处理出水
欧盟	粪大肠菌群数: 2 000 个/100 mL	浴场水指导准则
日本	总大肠菌群数: 1 000 个/100 mL	水污染环境质量标准(二级);渔业标准(一级)

要满足城镇污水处理厂出水粪大肠菌群数<1 000 个/L 的要求,出水总余氯浓度推荐控制在 0.5 mg/L^[4],而维持 0.2 mg/L 有效氯残留需投加 2~4 mg/L 的次氯酸钠,高浊度水体则需更大投加剂量^[5]。残余的消毒剂随污水排入自然水体,稍有不慎甚至会造成局部水生态系统的破坏,与国家倡导的生态河湖理念相悖。同时,过量的氯消毒还会产生多种消毒副产物,即使在低浓度下,也会对水生生物产生毒理效应,导致污水处理厂出水的下游水体微生物多样性显著低于上游^[6]。消毒副产物还会改变微生物的群落结构,对水生生物的保护和水生生态系统的稳定性产生不利影响^[6]。Li 等^[7]系统分析了氯消毒出水中 44 种消毒副产物(DBPs),主要分为 6 类:三卤甲烷(THMs)、卤乙酸(HAAs)、卤代酮(HKs)、卤代硝基甲烷(HNMs)、卤乙腈(HANs)、亚硝胺(NAs),结果表明,HAAs 和 HANs 对绿藻呈现高风险,应引起足够的重视。

3 如何科学发挥标准的作用

3.1 立足科学性

自然水体中含有大量的微生物、植物和动物,它们分别承担着分解者、生产者和消费者的角色,共同维持着局部生态系统平衡稳定。排放到受纳水体中的污染物,可以通过水体自净能力,使其浓度逐渐降低并恢复到正常水平,自净过程包括稀释、扩散、氧化还原、分解合成、吸附凝聚以及微生物对有机物的降解等机制。但水体自净能力有限,气象条件、地形地貌、水文条件(如流速、流量)、水温、复氧能力、溶解氧含量以及污染物的性质和浓度等都会对水体自净能力产生影响^[8],排入水体的污染物浓度需与受纳水体的承载力相匹配,否则超过其上限,水体正常的生态平衡被打破,就会导致水质恶化。

常言道“水至清则无鱼”,其本质就是水体生态系统稳定性的科学映射。不同的水体,因其所处的地理位置和自然环境不同,稀释能力和水环境容量具有很大差异,故从科学的角度出发,污水处理排放标准中污染物限值的确定,应该因地制宜。借鉴国际经验,欧盟、日本等经济体均实施差异化排放标准:欧盟按水体功能分区制定限值;日本结合污水处理规模分级管控;美国在对不同水体的受纳能力进行深入研究的基础上,甚至制定了因厂而异的

污水处理排放标准。

GB 18918—2002标准也根据出水的用途和排放接纳水体的不同,建立了一、二、三级标准,其中一级标准又进一步分为A标准和B标准,标准的制定原则是非常科学的。但现实状况是我国大部分地级市,甚至大部分地区的县级市全部执行一级A标准,这使得标准的分级形同虚设。因此,应恢复并强化GB 18918—2002标准原有的分级排放思想,区分排污去向和对应的污染物排放标准,避免“一刀切”。

3.2 强调系统性

污水治理作为复杂的系统性工程,其效能取决于污水收集、处理、排放全流程的协同运作。当前我国污水治理存在显著的“木桶效应”,即尽管污水处理环节已普及脱氮除磷及深度处理技术,走在世界前列^[2],但前端收集系统的滞后与后端排放标准“一刀切”式的执行,共同制约了整体效能的提升。

① 收集

根据中国生态环境状况公报,截至2023年,我国城市污水处理率达98.69%,但生活污水集中收集率仅为73.63%,收集系统仍有很大差距。污水处理厂的进水水质也印证了收集系统的短板。根据《2023年城镇水务统计年鉴(排水)》,全国污水处理厂进水BOD₅浓度呈现显著差异:浓度范围10~369 mg/L,平均值100 mg/L,中位值96 mg/L,共有52.69%的污水处理厂进水BOD₅浓度低于100 mg/L,表明大量本应通过污水管网收集的污染物未能有效输送至处理设施,导致污染物或淤积在管道、化粪池等节点,或溢流排入城镇水环境,或渗漏至地下,造成土壤和地下水污染。同时,低进水浓度使污水处理厂生化处理效率低下,需额外投加碳源维持运行,显著增加了能耗、药耗及碳排放。另外,在污水资源化转型背景下,未收集或流失的污水不仅是未被处理的污染物,也是流失的能源和资源,如污泥厌氧消化沼气发电、水源热泵提取出水余温用于供热、污泥磷回收。

② 排放

污水处理厂的排放标准作为系统终端的关键环节,其严苛程度并非衡量环境管理合理性的标尺,需统筹考虑其回用需求和环境效益。污水处理厂出水排放至接纳水体时,污染物的排放管控应与水环境承载力建立动态匹配关系。

我国在过去很长的时间里,都将经济发展放在更为重要的位置,没有合理控制水资源的开发。水资源开发临界强度为30%,但2020年我国“三北”地区平均水资源开发利用率已达40.04%,其中华北地区水资源开发利用率甚至达到64.44%^[9]。水资源开发利用强度的差异必然造成水环境容量的差异,开发利用强度越低,水环境容量越大,反之亦然。因此,我国现行排放标准限值严于多数发达国家,实质上是水资源过度开发背景下的被动选择。标准的执行也应结合我国水资源开发利用规划进行系统性考虑。当水资源开发利用强度得到合理的控制时,降低污染物排放标准中的限值自然水到渠成。

此外,自然水体的水环境容量具有显著的时空动态特征,其阈值并非固定值,而是受水文周期、污染物迁移转化特性、流域下垫面特征及气候变化等的综合影响,呈现“丰水期>平水期>枯水期”的周期性波动规律。以高寒脆弱河流为例,杨文心等^[10]基于SWAT-WASP耦合水质模型的量化分析表明,洮河源头区域BOD₅、TP、DO的水环境容量分别仅相当于下游的10.5%、13.1%和9.9%;1月枯水期各项指标容量分别仅为7月丰水期的10.1%(BOD₅)、10.3%(TP)和34.2%(DO)。因此,建议以水文周期内持续时间最长的平水期容量值作为基准限值,同时以枯水期最小容量值作为生态安全阈值进行动态校核,确保排放负荷始终处于水环境承载力的安全区间。

③ 系统性优化

前端收集系统的完善是提升整体效能的基础,而后端排放标准的动态调整则是保障环境效益的关键。陈玮等^[11]依据全国城镇污水处理厂的运行数据,基于产污系数法理论测算,对比了污水处理厂从现有一级A、一级B、二级标准统一提标到地表准Ⅳ类和改善污水收集管网两种情形下的污染物削减效能,结果显示,对于COD和氨氮指标的年削减量,采用完善污水管网措施分别是污水处理厂提标措施的21.9倍和33.3倍。这表明,在资源约束条件下,优先优化前端收集系统可能比单纯一味提高末端排放标准更具环境效益和经济效益。

3.3 兼顾经济性

氮、磷是造成水体富营养化的重要元素,封闭或半封闭型的缓流水体(如湖泊、水库)因水力交换

能力弱,氮磷易蓄积甚至引起藻类暴发。Gibson 等^[12]指出,湖泊和水库中总氮、总磷浓度分别超过 0.15、0.01 mg/L 即有可能发生蓝藻水华。因此,对于封闭或半封闭的水体应采用更严格的排放标准,而开放型的非缓流水体(如大江、海洋)因稀释扩散能力强,富营养化风险显著降低,自净能力可消纳常规污染负荷。

另外,污水处理主要采用生物处理,受温度影响较大。污水温度每降低 10℃,微生物的活性下降 50%^[13]。对于低温地区,为达到相同处理效果,处理成本将大幅增加。

欧盟对非敏感水体不强制脱氮除磷,对海拔超过 1 500 m 且因低温难以有效进行生物处理的地区,在通过研究证明不会对环境造成负面影响的前提下,可放宽排放标准。我国城镇污水处理厂污染物排放标准的确定,也应在满足环境要求的大前提下,充分考虑经济性。对于排放到水环境容量较高受纳水体的城镇污水处理厂和年平均气温较低地区,可视情况适当放宽氮、磷等指标的排放限值,平衡经济成本和环境要求。

4 对标准进一步科学实施的建议

作为城镇排水行业需要遵守的重要准则和依据,城镇污水处理厂污染物排放标准的发展关乎城镇排水行业的兴衰,更肩负着保障美丽中国目标实现的重大使命。为提升 GB 18918—2002 标准的科学性实施,并以此为契机,引领全国纠正“限值越高就越先进”的错误认知,提出以下 4 个方面建议:

① 重构分级排放标准体系,强化分类指导。当前标准的分级制度因“一刀切”执行而失效,忽视受纳水体环境容量差异,导致资源浪费与成本高企。建议结合受纳水体水文条件,引入季节性动态限值,设立基准值和安全阈值;建立动态分级机制,对生态敏感水域,应执行严格标准;对水环境容量大、稀释扩散能力强的非敏感水域,可适当放宽常规污染物(如氮、磷)限值,充分利用水体的自净能力。

② 放宽微生物指标排放限值,降低隐形生态风险。现行粪大肠菌群限值过高,迫使消毒剂过量投加,建议放宽该限值,增加消毒工艺技术路线多元化,允许采用紫外线、臭氧等低副产物消毒工艺。

③ 明确取样评价体系。GB 18918—2002 标

准要求污染物限值以 24 h 混合样日均值为评价依据,但实际执行普遍以瞬时采样结果作为处罚依据。鉴于污水处理厂进水水质波动、工艺间歇性运行(如 SBR 工艺)等因素导致瞬时值频繁波动,建议明确评价模式。若以日均值评价,可基于受纳水体自净能力计算年均环境容量,反推日均限值;若以瞬时值评价,可设定允许波动区间及年超标次数阈值。

④ 嵌入碳排放核算与资源化导向。在“双碳”目标全面推进,城镇水务行业向低碳化与资源化加速转型的新阶段,建议标准引入碳排放评价指标,强化污水处理厂资源化导向(再生水回用、污泥资源化利用、污水热能利用等),推动污水处理厂从污染治理单元向三位一体(水源—能源—资源)的价值工厂转型。

参考文献:

- [1] 夏青. 城镇污水处理厂污染物排放标准修改完善的思考[J]. 水资源保护, 2020, 36(5):22-23.
XIA Qing. Thoughts on revision and perfection of pollutant discharge standards for urban sewage treatment plants[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 22-23(in Chinese).
- [2] 王洪臣. 坚持和发展中国特色城市治水路线[J]. 给水排水, 2025, 51(1):1-12.
WANG Hongchen. Adhere to and develop China's characteristic urban water pollution control approach[J]. Water & Wastewater Engineering, 2025, 51(1): 1-12(in Chinese).
- [3] HUANG Y J, MENG F L, LIU S M, *et al.* China's enhanced urban wastewater treatment increases greenhouse gas emissions and regional inequality[J]. Water Research, 2023, 230:119536.
- [4] 张旻,徐瑛,缪绎,等. 城镇污水氯消毒 CT 值应用及除磷药剂的影响[J]. 中国给水排水, 2024, 40(17): 79-83.
ZHANG Min, XU Ying, MIAO Yi, *et al.* Utilization of CT value in urban sewage chlorine disinfection and the impact of phosphorus removal agents[J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(17):79-83(in Chinese).
- [5] GALLANDAT K, STACK D, STRING G, *et al.* Residual maintenance using sodium hypochlorite, sodium dichloroisocyanurate, and chlorine dioxide in laboratory waters of varying turbidity[J]. Water, 2019,

- 11(6):1309.
- [6] 马瑜,杨超,陈玲. 地表水中余氯的潜在生态风险及监测必要性初探[J]. 中国给水排水, 2021, 37(14): 8-12.
- MA Yu, YANG Chao, CHEN Ling. Preliminary study on the potential ecological risk of residual chlorine in surface water and its monitoring necessity [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(14): 8-12 (in Chinese).
- [7] LI Z G, LIU X Y, HUANG Z J, *et al.* Occurrence and ecological risk assessment of disinfection byproducts from chlorination of wastewater effluents in East China [J]. Water Research, 2019, 157: 247-257.
- [8] ZHANG X Q, CHEN P, HAN Y H, *et al.* Quantitative analysis of self-purification capacity of non-point source pollutants in watersheds based on SWAT model [J]. Ecological Indicators, 2022, 143: 109425.
- [9] 黄晓家,单聪,卢金锁,等. 基于统计数据的我国水资源承载力研究[J]. 中国给水排水, 2025, 41(6): 1-8.
- HUANG Xiaojia, SHAN Cong, LU Jinsuo, *et al.* Water resources carrying capacity in China: a statistical analysis [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(6): 1-8 (in Chinese).
- [10] 杨文心,梁众鑫,裴自成,等. 基于SWAT-WASP的高寒流域水环境容量模拟分析——以洮河碌曲为例[J/OL]. 中国环境科学, 2025: 1-15 [2025-05-23].
- YANG Wenxin, LIANG Zhongxin, PEI Zicheng, *et al.* Simulation analysis of water environmental capacity in an alpine watershed based on SWAT+WASP: a case study of Luqu Section of Tao River [J/OL]. China Environmental Science, 2025: 1-15 [2025-05-23] (in Chinese).
- [11] 陈玮,徐慧玮,高伟,等. 基于产污系数法测算城镇污水处理系统的主要污染物削减效能提升潜力[J]. 给水排水, 2018, 44(7): 24-29.
- CHEN Wei, XU Huiwei, GAO Wei, *et al.* Calculating potential in enhancing major pollutants' removal efficiency in urban wastewater treatment system based on pollutants producing coefficient [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(7): 24-29 (in Chinese).
- [12] GIBSON G, CARLSON R, SIMPSON J, *et al.* Nutrient Criteria Technical Guidance Manual Lakes and Reservoirs [M]. Washington, DC: EPA, 2000.
- [13] RAJESHWARI K V, BALAKRISHNAN M, KANSAL A, *et al.* State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2000, 4(2): 135-156.
-
- 作者简介: 沈珺(1989-), 女, 安徽亳州人, 硕士, 中级职称, 主要研究方向为水处理理论与技术等。
- E-mail: 13011009836@163.com
- 收稿日期: 2025-06-11
- 修回日期: 2025-06-29

(编辑: 衣春敏)

综合运用自然恢复和人工修复,
持之以恒推进生态建设