



文章栏目：工程创新与行业动态

DOI 10.12030/j.cjee.202111134 中图分类号 X52 文献标识码 A

齐飞, 陈森, 王振北, 等. 国家水体污染控制与治理科技重大专项产出城镇降雨径流污染控制技术的成熟度评估及该技术体系发展中面临的挑战[J]. 环境工程学报, 2022, 16(9): 3144-3156. [QI Fei, CHEN Miao, WANG Zhenbei, et al. Assessment of urban rainfall runoff technological readiness level improvement and challenges in technological development produced by “Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment”[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(9): 3144-3156.]

国家水体污染控制与治理科技重大专项产出城镇降雨径流污染控制技术的成熟度评估及该技术体系发展中面临的挑战

齐飞[✉], 陈森*, 王振北, 皇甫子正, 李晨, 孙德智

北京林业大学水体污染源控制技术北京市重点实验室, 北京 100083

摘要 系统梳理了国家“水体污染控制与治理科技重大专项”在“十一五”和“十二五”期间有关课题产出的城镇降雨径流污染控制关键技术, 通过对其进行技术和系统成熟度评价来解析我国城镇降雨径流污染控制技术的发展水平和面临挑战, 为进一步推进相关技术的发展提供参考。结果表明: 我国在城镇降雨径流污染控制技术领域已开展了大量研究工作, 研发和应用的大部分单项关键技术的技术成熟度已达到 7 级, 可在一定程度上解决我国城镇径流污染问题; 在城镇降雨径流污染控制技术体系中, 支撑技术系统成熟度为 4 级, 达到系统发展验证阶段, 能够用于开展系统的工程设计, 减少集成风险; 4 个关键技术环节和城镇降雨径流污染控制技术系列的系统成熟度分别为 3 级和 2 级, 在技术环节和系列方面仅仅形成系统及设计开发策略, 能在一定程度上降低系统集成风险, 形成组合技术。因此, 我国城镇降雨径流污染控制技术的单项技术成熟度还需进一步提高, 以加强技术和系统的集成, 并开展集成创新, 使整体技术系列能达到满足任务需求的设计、运行和处理能力, 在系统生命周期内向应用效益最佳的方向优化和发展。

关键词 技术成熟度; 系统成熟度; 城镇降雨径流污染; 海绵城市建设; 黑臭水体治理

近年来, 我国城镇一级注重点源污染(生活源和工业源)的控制与治理, 取得了阶段性成果。然而, 城镇内水体水质并未从根本上得到扭转、改善^[1]。而城镇降雨径流污染未被有效控制是水体黑臭频发和水环境质量恶化的重要原因^[2]。此外, 大量径流雨水涌入污水管道和合流制管道造成生活污水被稀释并溢流至水体, 导致大部分城镇“生活污水集中收集率”和“污水进厂浓度”偏低, 大大降低了污水处理厂的运行效率、影响了污水处理的效果, 还增加了污水处理的能耗和药耗^[3]。因此, 解决好城镇降雨径流污染问题对我国城镇水环境质量改善、实现城镇污水提质增效具有重大意义^[4]。为更好地改善我国城镇水环境质量, 我国实施了“水体污染控制与治理科技重大专项”(以下简称“水专项”), 期间产出了大量关于城镇降雨径流污染控制的技术。这些技术已在海河、太湖、巢湖、三峡库区、滇池、京津冀和粤港澳等重点流域开展了工程示范, 为我国城镇水体的水质改善提供了技术支撑^[5]。然而, 当前城镇降雨径流污染控制技术的发展具体处于何种水平, 尚存在哪些问题, 并未开展系统性研究。

收稿日期: 2021-11-23; 录用日期: 2022-03-11

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07401001-03)

第一作者: 齐飞(1980—), 男, 教授, qifei_hit@163.com; ✉通信作者

共同第一作者(执笔人): 陈森(1994—), 男, 硕士研究生, 952646272@qq.com

本文通过梳理水专项在“十一五”和“十二五”期间相关课题产出的城镇降雨径流污染控制技术，并对其进行技术成熟度和系统成熟度评估，解析当前城镇降雨径流污染控制技术的发展水平，分析其面临的挑战，并提出针对性的建议，以期为我国城镇降雨径流污染控制技术的发展提供参考。

1 技术评估依据及方法

1.1 城镇降雨径流污染控制技术体系的建立及评估依据

技术体系指各种技术间相互作用、相互联系，并按一定目的和结构方式组成的技术整体。通过梳理水专项“十一五”和“十二五”期间有关课题产出的城镇降雨径流污染控制技术，根据其类型和特点，建立了城镇降雨径流污染控制技术体系(如图 1 所示)。该体系包含 1 项技术系列、4 项技术环节、11 项支撑技术和 72 项单项技术，涵盖了当前城镇降雨径流污染控制技术的全流程架构，以便于进行技术梳理、分类与评估。其中，技术环节是指在一个体系中起到重要作用且不可或缺的环节或技术；支撑技术通常是针对某类关键性问题而完成的整体性技术突破；单项技术则是针对具体技术细节，用以解决工艺单元或模块中的具体技术问题或技术提升。本文涉及的技术成熟度评估依据为“十一五”和“十二五”水专项中城市主题城镇降雨径流污染控制技术相关课题的成果报告，以及现场调研情况。



图 1 城镇降雨径流污染控制技术体系
Fig. 1 Urban rainfall runoff pollution control technology system

1.2 单项技术成熟度和系统成熟度评价方法

城镇降雨径流污染控制单项技术成熟度 (Technology Readiness Level, TRL) 采用国际上常用的九级评价准则进行^[6]，具体等级对应的标准见表 1。集成的系统成熟度 (System Readiness Level, SRL) 采用系统成熟度矩阵算法及六级评价准则进行^[7]。系统成熟度六级评价准则如表 2 所示。

系统成熟度矩阵算法是利用技术成熟度和技术集成成熟度 (Integration Readiness Level, IRL) 相联系的矩阵函数算法^[8]。具体计算步骤如下。

1) 构建技术成熟度矩阵。设技术系统中包含 n 项技术，构建技术成熟度矩阵如式 (1) 所示。

$$[TRL]_{n \times 1} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： T_i 为第 i 项技术的成熟度等级。

2) 构建技术集成成熟度矩阵。IRL 指技术两两之间的集成程度。构建集成成熟度矩阵时，若两种技术不能进行集成，则 IRL 为 0；单项技术与自身进行集成时的集成时，则 IRL 为 9；集成技术与自身集成时，则 IRL 为 6。在实际应用时，治理的效果一般会受到最薄弱技术的影响，因此，IRL 取两种技术中成熟度较低的值。依据此原则构建 IRL 矩阵如式 (2) 所示。

$$[IRL]_{n \times n} = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & \cdots & I_{1n} \\ I_{21} & I_{22} & \cdots & I_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{n1} & I_{n2} & \cdots & I_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： I_{ij} 为技术 i 与技术 j 之间的集成成熟度等级。

表1 技术就绪度等级评价准则

Table 1 Technical Readiness Level Evaluation Criteria

等级	等级描述	等级评价标准	成果形式
1	发现基本原理或看到基本原理的报道	治理需求分析, 技术原理清晰, 研究并证明技术原理有效	需求分析及技术基本原理报告
2	形成技术方案	提出技术概念和应用设想, 明确技术的主要目标, 制定研发的技术路线、确定研究内容、形成技术方案	技术方案、实施方案
3	通过小试验证	关键技术、参数、功能通过实验室验证	小试研究报告
4	通过中试验证	在小试的基础上, 验证大规模后关键技术的可行性, 为工程应用提供数据	中试研究报告
5	形成工艺包或产品、平台整体设计, 技术方案通过可行性论证或验证	形成治理技术工艺包整体设计、技术方案通过可行性论证或验证	论证意见或可行性论证报告
6	通过技术示范/工程示范	关键技术、参数、功能在示范企业、流域示范区中进行示范, 达到预期目标	技术示范/工程示范报告、专利、软件著作权
7	通过第三方评估或用户验证认可	通过第三方评估或经用户试用, 证明可行	第三方评估报告, 示范工程依托单位应用效益证明
8	得到推广应用	在其他污染企业或其他流域得到广泛应用	形成技术指南、规范标准或者一定规模的工程应用
9	规范化/标准化	通过专业技术评估和成果鉴定, 在地方治污规划或可研中得到应用, 或形成技术指南、规范	形成技术指南、规范标准并且得到较大规模的工程应用

表2 系统成熟度等级评价准则

Table 2 System Readiness Level Evaluation Criteria

等级	SRL取值	对应阶段	描述
1	0.00~0.10	基础技术研究	进行新技术的实验分析以及应用构想
2	0.10~0.39	概念定义	定义初始概念, 以及系统和技术开发策略
3	0.40~0.59	技术开发	降低技术风险并确定合适的技术组合
4	0.60~0.79	系统开发与验证	开发系统功能, 验证系统的协同性、安全性、有效性
5	0.80~0.89	生产	达到满足任务需求的生产能力
6	0.90~1	使用与保障	在全寿命周期内保证系统以应用效益最佳方式运行

3) 构建系统成熟度矩阵。系统成熟度矩阵 SRL 如式 (3) 所示。

$$[\text{SRL}]_{n \times 1} = \begin{bmatrix} \text{SRL}_1 \\ \text{SRL}_2 \\ \vdots \\ \text{SRL}_n \end{bmatrix} = [\text{IRL}]_{n \times n} [\text{TRL}]_{n \times 1} \quad (3)$$

SRL_i 为 $0 \sim n$, 经过标准化处理。SRL 的数值为 $0 \sim 1$ 。数值越高表示技术越成熟。

4) 系统成熟度等级计算。系统成熟度等级按如式 (4) 进行计算。

$$\text{SRL} = \frac{\frac{\text{SRL}_1}{n_1} + \frac{\text{SRL}_2}{n_2} + \dots + \frac{\text{SRL}_n}{n_n}}{n} \quad (4)$$

式中: n_i 为与第 i 项技术有集成关系的技术个数。

将式 (4) 中的 SRL 计算结果与表 2 对比, 可得出系统成熟度等级。采用上述评估方法开展技术成熟度评估, 结果见表 3。

表3 城镇降雨径流污染控制技术成熟度等级评估结果

Table 3 Evaluation Results of Urban Rainfall Runoff Pollution Control Technology Readiness Level

编号	评估技术	依托课题	立项初		项目验收		现状	
			TRL	SRL	TRL	SRL	TRL	SRL
1	城镇降雨径流污染控制技术	—	2		2		2	
1.1	诊断评估技术	—	2		3		3	
1.1.1	污染解析技术	—	2		4		4	
1	降雨径流对受纳水体污染程度估算技术	天津中心城区景观水体功能恢复与水质改善技术开发及工程示范	1		6		6	
2	山地城市面源污染负荷模型预测技术	重庆主城排水系统安全与城市面源污染控制技术研究与综合示范	2		6		7	
3	绿色建筑与小区低影响开发雨水系统产汇污模型与预测技术	绿色建筑与小区低影响开发雨水系统研究与示范	4		6		6	
4	基于径流系数和污染物削减系数的城市径流水量水质过程表达技术	城市地表径流减控与面源污染削减技术研究	1		7		8	
5	植草沟径流污染削减模拟与预测技术	天津中心城区景观水体功能恢复与水质改善技术开发及工程示范	3		5		5	
6	渗透型路面削减雨水径流模型模拟技术	天津中心城区景观水体功能恢复与水质改善技术开发及工程示范	1		6		6	
1.1.2	系统方案设计技术	—	2		4		4	
7	基于“浓度控制”雨水调蓄的初期雨水污染控制最佳综合运转技术	天津中心城区景观水体功能恢复与水质改善技术开发及工程示范	2		6		8	
8	城区雨水滞留利用适用性技术	巢湖流域城区雨污收集、处理及径流污染控制技术示范	3		7		8	
9	城区排水系统溢流污染控制适用性技术	巢湖流域城区雨污收集、处理及径流污染控制技术示范	3		7		7	
10	基于改进型SWMM和单位投资环境效益的截流倍数优选技术	巢湖流域城区雨污收集、处理及径流污染控制技术示范	2		6		6	
11	城市面源污染水量水质同步监测与模型模拟技术	城市地表径流减控与面源污染削减技术研究	1		8		9	
12	城市道路雨水口的过流能力测试装备与技术	城市排水系统溢流污染削减及径流调控技术研究	3		8		8	
13	集成截流-调蓄-处理的排水系统设计关键技术	城市排水系统溢流污染削减及径流调控技术研究	5		8		8	
1.1.3	监测评估技术	—	2		3		4	
14	雨水花园填料渗透系数测试设备及关键技术	天津中心城区景观水体功能恢复与水质改善技术开发及工程示范	3		5		5	
15	低影响开发设施效能评估技术	绿色建筑与小区低影响开发雨水系统研究与示范	2		7		8	
16	监测与模拟耦合的调蓄系统效能评估技术	昆明主城区污染物综合减排与水质保障关键技术研究示范	2		7		9	
17	低影响开发设施性能分析评价模型与技术	城市地表径流减控与面源污染削减技术研究	2		6		8	
18	低影响开发设施削减径流污染性能评估技术	城市排水系统溢流污染削减及径流调控技术研究	3		6		6	
1.2	源头削减技术与设施	—			2		2	3

续表 3

编号	评估技术	依托课题	立项初		项目验收		现状	
			TRL	SRL	TRL	SRL	TRL	SRL
1.2.1 渗透技术			—		2	3	4	
19	强化径流污染控制的渗透路面构建技术	天津中心城区景观水体功能恢复与水质改善技术开发及工程示范	3		6		6	
20	路面地表径流促渗技术	重庆主城排水系统安全与城市面源污染控制技术与综合示范	3		7		7	
21	不透水下垫面径流处理技术	绿色建筑与小区低影响开发雨水系统研究与示范	4		7		8	
22	新型大孔隙开级配排水式沥青磨耗层路面结构和优化技术	城市道路与开放空间低影响开发雨水系统研究与示范	3		7		8	
23	透水路面促渗技术	合肥市滨湖新区低影响开发与水环境整治技术及工程示范	3		7		7	
24	植生型多孔混凝土绿色渗透技术	城市道路与开放空间低影响开发雨水系统研究与示范	2		7		7	
25	组合式多介质渗滤净化树池技术	城市道路与开放空间低影响开发雨水系统研究与示范	2		7		9	
26	基于雨水冲击和水位变化的低影响开发植物种植与养护技术	城市道路与开放空间低影响开发雨水系统研究与示范	3		7		7	
27	多孔基质植草沟技术	合肥市滨湖新区低影响开发与水环境整治技术及工程示范	3		7		7	
28	山地城市面源污染迁移段控制集成技术	重庆两江新区城市水系统构建技术与示范	4		7		7	
29	山地城市地表径流源区生物促渗减流技术	重庆两江新区城市水系统构建技术与示范	4		7		7	
30	强化雨水渗透及净化的渗透浅沟构建技术	天津中心城区景观水体功能恢复与水质改善技术开发及工程示范	3		6		7	
31	土壤增渗减排技术	河网城市雨水径流污染控制与生态利用关键技术研究及工程示范	4		7		8	
1.2.2 滞蓄技术			—		2	3	4	
32	绿色屋顶构建技术	重庆主城排水系统安全与城市面源污染控制技术与综合示范	2		6		8	
33	屋顶径流分流净化技术	重庆主城排水系统安全与城市面源污染控制技术与综合示范	3		6		7	
34	适用性绿色屋顶源头控污截流技术	绿色建筑与小区低影响开发雨水系统研究与示范	4		8		9	
35	绿色建筑小区雨水湿地径流控制技术	绿色建筑与小区低影响开发雨水系统研究与示范	4		7		8	
36	绿色建筑小区阶梯式绿地截缓径流技术	绿色建筑与小区低影响开发雨水系统研究与示范	4		7		8	
37	城市绿地多功能调蓄-滞留减排-水质保障技术	城市道路与开放空间低影响开发雨水系统研究与示范	2		6		7	
38	融雪剂自动弃流功能的生物滞留带技术	城市道路与开放空间低影响开发雨水系统研究与示范	2		7		8	
39	北方城市道路的生物滞留技术	低影响开发雨水系统综合示范与评估	2		6		6	
40	同步脱氮除磷两相生物滞留技术	低影响开发雨水系统综合示范与评估	2		6		7	
41	花园式雨水集水与促渗技术	合肥市滨湖新区低影响开发与水环境整治技术及工程示范	3		7		7	
42	城市暴雨径流与雨洪利用的雨水花园技术	缺水城市雨污水再生处理和不同途径用水的关键技术与工程示范	3		7		7	

续表 3

编号	评估技术	依托课题	立项初		项目验收		现状	
			TRL	SRL	TRL	SRL	TRL	SRL
43	初期雨水生态滞留硅藻土快速处理技术	合肥市滨湖新区低影响开发与水环境整治技术研究及工程示范	3		7		7	
1.2.3	利用技术	—			1		4	4
44	路面雨水集蓄净化利用系统与	缺水城市雨污水再生处理和不同途径用水的关键技术研究与工程示范	3		7		7	
45	停车位雨水原位净化与回用技术	污水处理系统区域优化运行及城市面源削减技术研究	1		6		7	
1.3	过程控制技术与设施	—			2		2	3
1.3.1	分流技术	—			1		4	4
46	雨水径流时空分质收集处理技术	快速城市化新区水环境综合保护技术与示范	2		6		7	
47	无线广播式初期雨水弃流技术	城市道路与开放空间低影响开发雨水系统研究与示范	3		7		7	
48	合流制溢流分流控制装置与	重庆主城重污染河流污染控制与水质改善技术研究	4		7		7	
49	合流制溢流污水末端综合处理技术	河网城市雨水径流污染控制与生态利用关键技术研究	5		7		8	
1.3.2	截污技术	—			2		4	4
50	雨水口高效截污装置与关键技术	城市道路与开放空间低影响开发雨水系统研究与示范	3		7		7	
51	雨水口除污装置与应用技术	低影响开发雨水系统综合示范与评估	2		7		7	
52	基于新型雨水篦的道路雨水高效净化技术	污水处理系统区域优化运行及城市面源削减技术研究	1		7		7	
53	基于检查井的自动净化雨水技术	城市道路与开放空间低影响开发雨水系统研究与示范	3		7		8	
54	雨水检查井智能截污装置与	城市道路与开放空间低影响开发雨水系统研究与示范	3		7		7	
55	雨水管道旋流沉砂技术	城市道路与开放空间低影响开发雨水系统研究与示范	2		7		7	
56	初期雨水专管调蓄储存技术	城区水污染过程控制与水环境综合改善技术集成与示范	6		7		7	
57	分流制排水系统末端漂浮介质过滤净化技术	河网城市雨水径流污染控制与生态利用关键技术研究	2		7		7	
58	城市溢流污染及管道沉积物削减技术	巢湖市城市水环境质量改善研究与综合示范	2		6		6	
1.3.3	调蓄技术	—			2		3	4
59	合流制系统溢流量控制技术	合肥市南淝河水质提升与保障关键技术研究及工程示范	4		6		7	
60	基于降雨特征的溢流污染控制调蓄池设计技术	昆明主城区污染物综合减排与水质保障关键技术研究	3		8		9	
61	基于水力模型的初期雨水调蓄池设计方法与技术	巢湖流域城区雨污收集、处理及径流污染控制技术及示范	3		6		7	
62	基于降雨特征的初期雨水调蓄池设计技术	昆明主城区污染物综合减排与水质保障关键技术研究	2		6		9	
1.4	后端治理技术与设施	—			2		3	3
1.4.1	物理化学处理技术与装备	—			2		3	4
63	强化混凝沉淀过滤净化泵站雨水技术	天津中心城区景观水体功能恢复与水质改善技术开发及工程示范	3		6		8	

续表 3

编号	评估技术	依托课题	立项初		项目验收		现状	
			TRL	SRL	TRL	SRL	TRL	SRL
64	基于旋流分离及高密度澄清装备的初期雨水就地处理技术	巢湖流域城区雨污收集、处理及径流污染控制技术及示范	2		7		7	
65	初期雨水水力旋流-快速过滤技术	老城区水环境污染控制及质量改善技术与示范	3		6		8	
1.4.2	生态处理技术与装备	—		2		4		4
66	复合流人工湿地处理系统与技术	缺水城市雨污水再生处理和不同途径用水的关键技术与工程示范	4		7		7	
67	山地陡峭岸坡带梯级湿地净化技术	重庆主城重污染河流水污染控制与水质改善技术研究及示范	3		7		7	
68	分流制排水系统末端渗蓄结合污染控制技术	河网城市雨水径流污染控制与生态利用关键技术研究及工程示范	4		8		8	
69	三带系统生态缓冲带技术	重庆主城重污染河流水污染控制与水质改善技术研究及示范	3		7		8	
70	多塘系统生态缓冲带技术	重庆主城重污染河流水污染控制与水质改善技术研究及示范	4		7		7	
71	基于调蓄的雨水补给型景观水体水质保障技术	绿色建筑与小区低影响开发雨水系统研究与示范	4		7		7	
72	城市面源污染净化与生态修复耦合技术	巢湖市城市水环境质量改善研究与综合示范	4		7		7	

2 结果与讨论

2.1 单项技术成熟度评估结果概况

图 2 和图 3 为城镇降雨径流污染控制技术 72 项单项技术成熟度等级评估结果及其统计分析。在立项初期，72 项单项技术的技术成熟度为 1~6 级，其中小于等于 4 级的技术数量占总数的 96%，即绝大部分技术处于发现机理、通过小试或中试验证的阶段。在项目验收阶段，单项技术成熟度得到不同程度提升，介于 5~8 级，其中大于等于 7 的单项技术通过了第三方评估，占 65%。在完成项目验收后，项目承担单位和工程运维单位依然在推进技术的发展和推广应用。而现阶段，单项技术成熟度在 5~9 级时，大于等于 7 的单项技术已提高至 86%。从立项初期到当前，单项技术成熟度提升 4 级和 5 级的占 60%，提升 6 级和 7 级的占 17%，提升 8 级的占 1%。综上所述，随着水专项的实施推进，城镇降雨径流污染控制单项技术的成熟度有了极大提升，由立项初的实验阶段提升至当前的工程示范阶段，且部分已形成了标准文件，并得到推广应用。这表明水专项在城镇降雨径流污染控制领域积累了丰富的成果，包括关键技术、标准规范文件和示范工程案例等。

2.2 各类技术系统成熟度发展特点

2.2.1 诊断评估技术成熟度发展的特点

在单项技术成熟度分析的基础上，逐步针对支撑技术、技术环节和技术系列开展集成技术成熟度评估与分析。图 4 表明，在污染解析技术中，单项技术成熟度的立项初为 1~4，项目验收时提升为 5~7，当前阶段达到 5~8，提升等级为 2~7。水专项实施期间，相关学者在借鉴国外模型的基础上对径流系数、径流污染负荷、生物滞留设施径流减排效果等领域开展了研究^[9-12]，形成了一系列水质水量模拟技术，有效指导了重庆、北京和上海等地城镇降雨径流污染控制技术的选用及相关工程建设。相关成果印证了该技术的发展。在系统方案设计技术中，单项技术成熟度在立项初为 1~5，项目验收时提升为 6~8，当前达到 6~9，提升等级为 3~8。相关学者在低影响开发技术优化组合设计、雨水口优化设计、截留倍数优选、调蓄池规划设计和溢流污染就地处理技术选择方面均开展了大量研究^[13-15]，基本形成了源头削减、过程控制和后端治理相结合的全过程综合治理方案设计技术^[16]。相关技术支撑了《雨水口》图集 (16S518)、《城镇雨水调蓄工程技术规范》(GB 51174

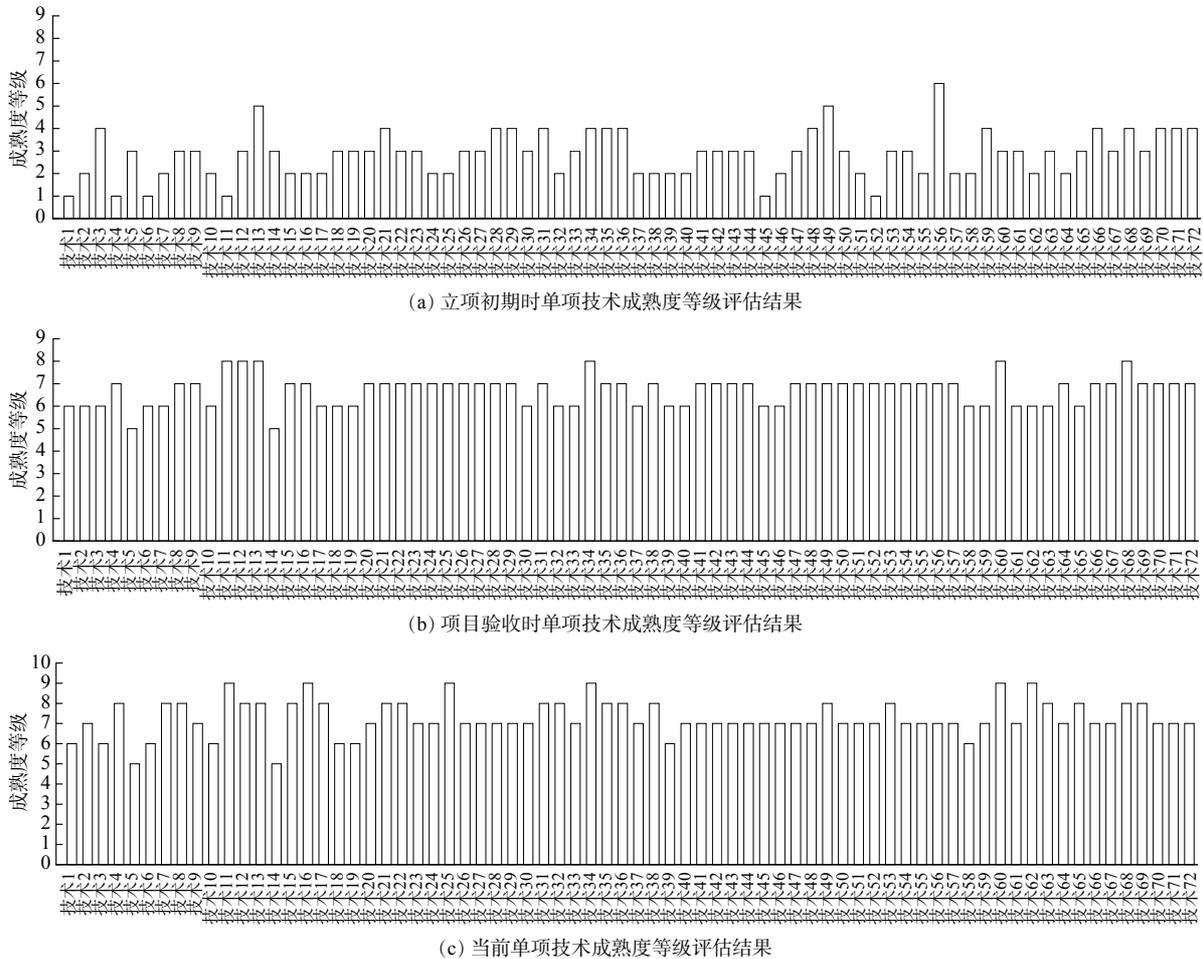


图 2 单项技术成熟度等级评估结果

Fig. 2 Evaluation results of technical readiness levels for individual technology

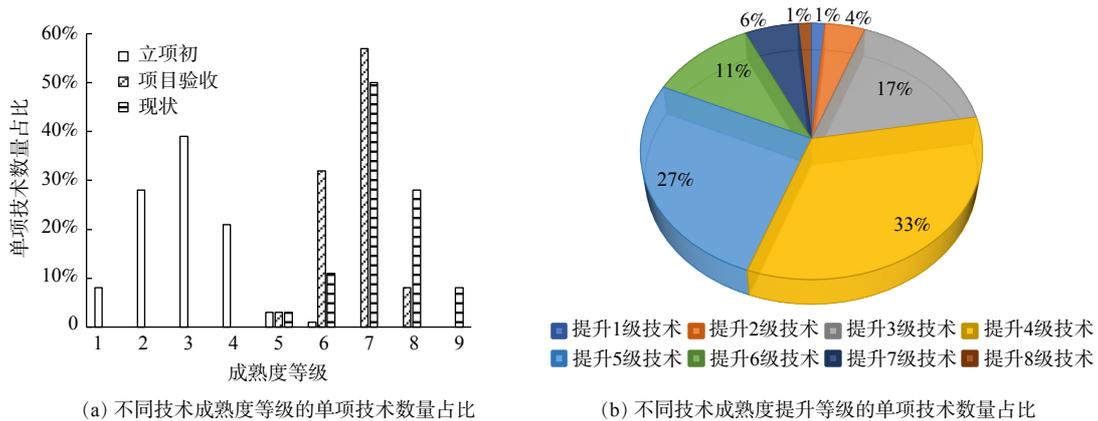


图 3 单项技术成熟度等级评估结果统计分析

Fig. 3 Statistical analysis of evaluation results of individual technology readiness levels

-2017) 等标准规范的编制。在监测评估技术中，单项技术成熟度在立项初为 2~3，项目验收时提升为 5~7，当前阶段达到 5~9，提升等级为 2~7。相关学者已在该领域开展了低影响开发设施效能评估研究^[17]和调蓄系统效能评估研究^[18]，并构建了效能评估体系，有效应用于深圳市海绵城市建设和昆明市老城区改造之中。

图5表明,污染解析技术、系统方案设计技术和监测评估技术的系统成熟度立项初均为2级,处于概念定义阶段;到了项目验收时,分别为4级、4级和3级,提升至技术开发和系统开发验证阶段;当前均已提升至4级,处于系统开发验证阶段。这表明以上3类技术已在支撑技术层面开展设计,以减少技术集成风险,具有技术的协同性、有效性和安全性。

2.2.2 源头削减技术与设施成熟度发展的特点

图6表明,在渗透技术中,单项技术成熟度在立项初为2~4、项目验收时为6~7、当前已达到6~9,其提升等级为3~7,并已在透水铺装、植草沟、生态树池和土壤改良^[19-20]等领域实现了技术突破。此类技术不仅具有良好的雨水减排效果,还能去除径流雨水污染,并已在深圳和嘉兴进行了工程示范。在滞蓄技术中,单项技术成熟度在立项初为2~4,而项目验收为6~8、当前为6~9、提升等级为4~6。相关学者重点研发了绿色屋顶、下凹式绿地、阶梯式绿地和雨水花园^[21-24]等一系列技术,以期通过多重阻碍延缓径流流速来强化径流下渗量并拦截吸附污染,并显著减少示范区域外排洪峰峰值及排放总量,减轻下游市政管网的负担。相关技术已在深圳和重庆进行了工程示范。在利用技术中,单项技术成熟度的立项初为1~3、项目验收为6~7、当前为7,其提升等级为4~6。相关学者研发了路面雨水和停车位雨水回用技术^[25],可实现雨水的收集、处理和资源化利用,并已在西安和无锡进行了工程示范。

图5表明,渗透技术、滞蓄技术和利用技术的系统成熟度在立项初均为2级,处于概念定义阶段;而项目验收时分别升至4级、4级和3级,已提升至技术开发和系统开发验证阶段;当前均已提升至4,处于系统开发验证阶段。

这表明渗透技术、滞蓄技术和利用技术等支撑技术,已可开展技术组合,进行集成技术验证性能,从而减少技术集成风险,且整体具有技术的协同性、有效性和安全性。

2.2.3 过程控制技术与设施成熟度发展的特点

图7表明,在分流技术中单项技术成熟度的立项初为2~5、项目验收为6~7、当前为7~8,提升等级为3~5。水专项实施期间,突破了初期雨水分流和合流制系统分流技术。此类技术能够将雨天初期和中后期径流分流、将生活污水和雨天径流分流,并已在深圳、济南和重庆得到示范。在截污技术中,单项技术成熟度在立项初为1~6、项目验收为6~7、当前为6~8,提升等级为1~6。相关学者重点研发了雨水专管和雨水口截污技术^[26-27],提高了雨水口的截污能力并实现了雨水系统的分质截流,并已在常州和北京得到示范。在调蓄技术中,单项技术成熟度立项初为2~4、项目验收为6~8、当前为7~9,提升等级为3~7,突破了较为滞后的调蓄池设计技术,为昆明市主城17座

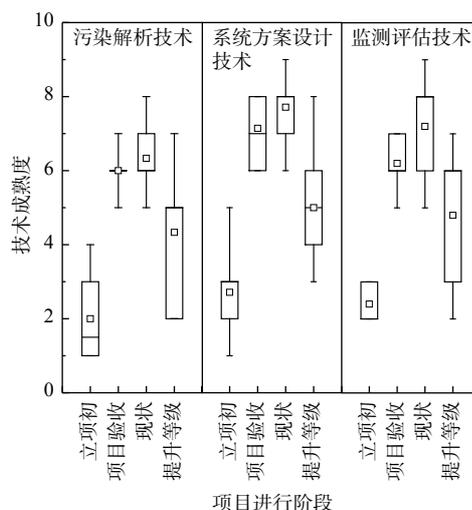


图4 诊断评估技术环节中单项技术成熟度等级评估结果

Fig. 4 Evaluation results of single technology readiness levels in diagnostic evaluation technology link

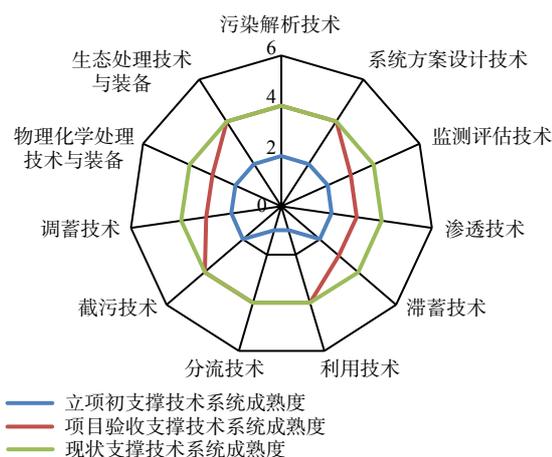


图5 支撑技术系统成熟度的评估结果

Fig. 5 Supporting technology system readiness assessment results

调蓄池设计提供支撑，重点支持了《城镇径流污染控制调蓄池技术规程》(CECS416: 2015)的编制。

图 5 表明，当前分流技术、截污技术和调蓄技术的系统成熟度立项初在 1~2 级水平，处于基础技术研究或概念定义阶段。很多技术仅有雏形，不具备集成条件；在项目验收时提升至 3~4 级，当前均已提升至 4 级，已处于系统开发验证阶段，填补了国内部分空白，并针对地区特点形成组合工艺并集成，具有较好的协同性和治理能力。

2.2.4 后端治理技术与设施成熟度发展的特点

图 8 表明，在物理化学处理技术与装备领域，单项技术成熟度在立项初为 2~3、项目验收为 6~7、当前达到 7~8，提升等级为 5。在传统水处理技术基础上，突破了适合溢流污染就地处理和初期雨水净化的混凝沉淀、旋流分离和快速过滤等物理化学处理技术，故成熟度较高。相关技术已在合肥、常州和上海等地得以示范。在生态处理技术与装备中，单项技术成熟度在立项初为 3~4、项目验收为 7~8、当前为 7~8，提升等级为 3~5。针对城镇径流污染特点，水专项将具有调蓄和净化能力的生态技术移植到径流污染控制领域，并推动研发了人工湿地、岸边带和雨水塘^[28-29]等生态处理技术，充分利用植物和微生物的滞留和吸收作用来去除径流污染物，并提供城镇亲水景观。相关技术已在西安、重庆、嘉兴和天津等地得到示范。

图 5 表明，虽然物理化学处理技术和生态处理技术均源于传统水处理技术，但其对于径流污染控制依然缺乏实践研究，立项初期系统成熟度仅为 2 级。在水专项支持下，项目验收时分别为 3 和 4 级，处于技术开发或系统开发验证阶段；当前已提升至 4 级，处于系统开发验证阶段。这表明这两个技术领域已能够开展技术组合与集成，并展现出技术间的协同作用。

3 城镇降雨径流污染控制技术体系的整体发展与挑战

3.1 整体发展

图 9 表明，4 项技术环节的系统成熟度在立项之初均为 2 级，处于概念定义阶段；到项目验收后为 2~3 级，处于概念定义或技术开发阶段；而当前已提升至 3 级，处于技术开发阶段，能在各自技术环节内形成技术组合。相关学者已将技术进行应用，在环太湖、海河、三峡库区、巢湖、滇池、京津冀和粤港澳等流域落实了 42 项工程示范，并总结凝练了编制 22 项标准规范类文件。其中，7 项文件正式发布，包含国标 1 项、行标 2 项和地标 4 项。然而，这些应用仅限于部分技术组

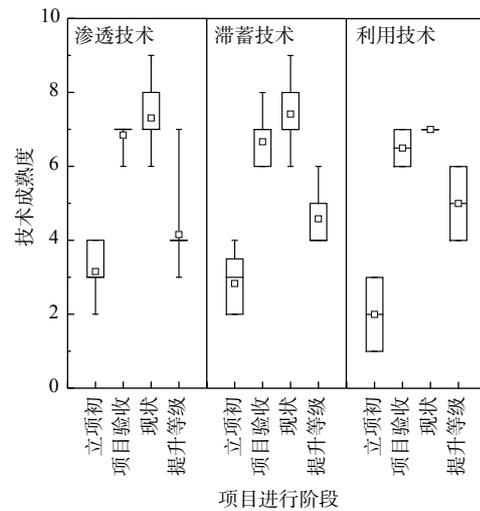


图 6 源头削减技术与设施环节中单项技术成熟度等级评估结果

Fig. 6 Assessment results of single technology readiness levels in source reduction technology and facility link

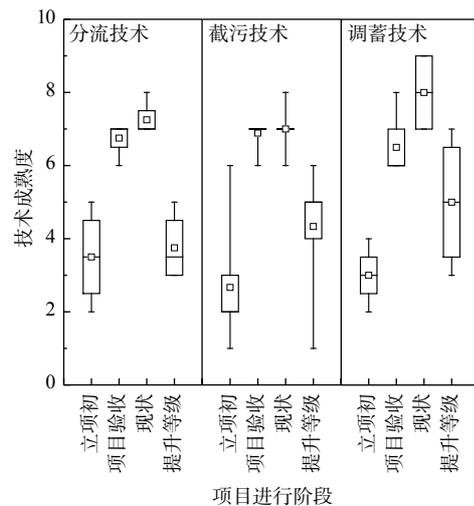


图 7 过程控制技术与设施环节中单项技术成熟度等级评估结果

Fig. 7 Assessment results of single technology readiness levels in process control technology and facility link

合及其在小范围或个别城镇区域的应用, 尚未形成4项技术环节全链条的技术集成, 且集成度较为有限, 尚缺乏在技术环节层面治理技术的应用模式, 故存在集成应用风险。

整体来说, 城镇降雨径流污染控制技术系列系统成熟度的立项初、项目验收和当前均为2级, 处于概念定义阶段。但根据系统成熟度矩阵算法得到的技术系列在3个阶段的评估结果并不相同, 分别为0.17、0.22和0.31。这表明城镇降雨径流污染控制技术系列正在向形成全链条的集成技术这一方向稳步发展。然而, 由于单项技术依然缺乏大量的推广应用, 且标准化规范化程度低, 尚未形成全链条的技术系列集成, 而已形成的组合或集成技术示范应用规模有限, 缺乏对集成技术风险的有效评估, 仍有待于进一步协调被集成技术, 因此, 还未能发展至系统成熟度为3级的技术开发阶段。

3.2 面临的挑战

通过对系统成熟度进行评估, 发现单项技术成熟度的发展水平, 极大地限制了支撑技术、技术环节和技术系列的集成。主要表现为, 城镇降雨径流污染控制单项技术成熟度大部分为7级, 处于通过第三方评估阶段, 依然存在技术的推广应用程度有限、技术标准化和规范化程度偏低的问题。

1) 在诊断评估技术方面, 污染解析技术主要依赖于国外引进的数值模拟模型和软件工具, 其运行参数并不完全适用于我国国情。在监测评估技术中, 污染物监测基础数据多来源于特定区域, 缺乏城镇流域尺度范围的污染物监测数据库支持, 致使研发出的技术仅适用于本地, 难以大规模推广应用。

2) 在源头削减技术与设施方面, 渗透技术和滞蓄技术多借鉴国外低影响开发技术。由于国内降雨形式、下垫面特征、土壤性质和地下水水位等与国外差异大, 国外的技术与工程设计参数并不完全适用于我国, 因此, 亟待根据我国国情开展创新的自主研发。在雨水利用技术方面, 我国仍“以排为主”, 缺乏资源利用的工程设计指导思想。

3) 在过程控制技术与设施方面, 分流技术和截污技术常常需要开挖现有的雨水管道和雨水井, 在老城区改造难度大。

4) 在后端治理技术与设施方面, 生态处理技术的占地面积大, 且造价高, 运行受环境影响较大, 出水水质易受影响出现波动。

4 结论与展望

1) 对“十一五”和“十二五”期间产出的城镇降雨径流污染控制关键技术进行了成熟度评价后发

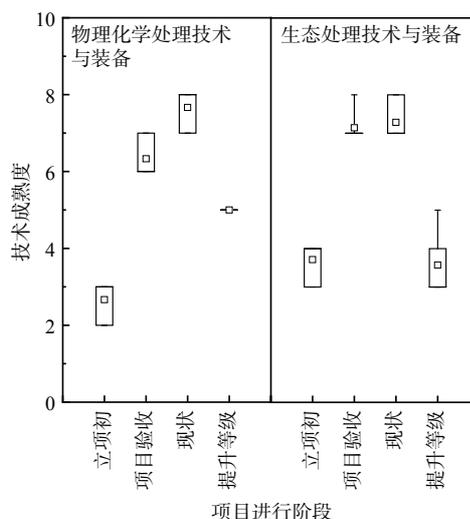


图8 后端控制技术与设施环节中单项技术成熟度等级评估结果

Fig. 8 Assessment results of single technology readiness level in final control technology and facility link

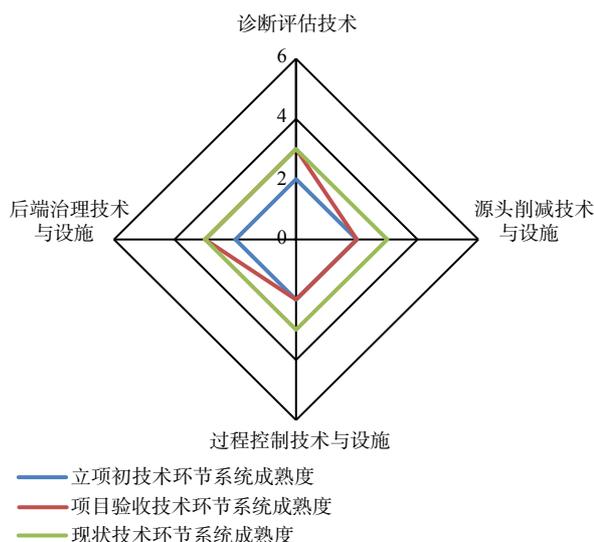


图9 技术环节系统成熟度等级评估结果

Fig. 9 Evaluation results of system readiness level of technical links

现,我国城镇降雨径流污染控制单项技术成熟度大部分已达到7级,处于通过第三方评估阶段,形成了42项具有一定代表性径流污染控制示范工程,累计编制了22项径流污染控制标准规范类文件,技术覆盖面很大,推动了海绵城市建设和黑臭水体治理。

2)通过系统成熟度评估,已有11项支撑技术的系统成熟度均达到了4级,已处于系统开发验证阶段,能在各自支撑技术内,开展单项技术组合与集成,并展现出单项技术间的协同作用,但在支撑技术层面的系统还未能达到满足任务需求的运行能力。

3)4项技术环节的系统成熟度为3级,尚处于技术开发阶段,能够在各自技术环节内,形成支撑技术组合,但仍缺乏在技术环节层面治理技术的应用模式,存在集成应用风险。

4)城镇降雨径流污染控制技术系列的系统成熟度虽有一定程度的发展,但整体依然处于2级,即概念定义阶段。这表明技术系列的集成度较低,仅形成系统设计的开发策略,亟待开展技术环节组合的合理性研究。

5)在单项技术方面,应加快符合我国自然特征参数率定,实现模型工具的国产化;加强低影响开发技术的设计参数率定,以及雨水利用新技术的研发;还应加强生态处理技术的高效净水填料的研究,推进植被搭配优化;开展集成创新,加强技术和系统的集成,使整体技术系列能够达到满足任务需求的设计、运行和处理能力,并向在系统生命周期内应用效益最佳的方向优化和发展。

致谢 本研究的数据来源于水专项“十一五”和“十二五”城市主题部分相关课题。感谢各课题研究团队在本研究的调研和评估过程中给予的大力支持!

参 考 文 献

- [1] 郝学凯,耿立馨.城市径流污染控制与治理的探讨[J].环境工程,2016,34(S1):112-113.
- [2] 杨柳,马克明,郭青海,等.城市化对水体非点源污染的影响[J].环境科学,2004,25(6):32-39.
- [3] 刘云帆,栗玉鸿,孔焯,等.基于清污分流的丘陵地区城镇污水提质增效方法与实践[J].中国给水排水,2021,37(8):107-113.
- [4] 孙永利.城镇污水处理提质增效的内涵与思路[J].中国给水排水,2020,36(2):1-6.
- [5] 刘龙严.城镇降雨径流污染控制技术综合评估及其在太湖流域的应用指导[D].北京:北京林业大学,2020.
- [6] 王心,姜琦,魏东洋,等.水专项技术的分类及其就绪度评价[J].科技管理研究,2017,37(1):69-74.
- [7] 王方.系统成熟度评估矩阵计算模型在机载制导武器研制中的应用[J].航空兵器,2014(3):59-63.
- [8] MAGNAYE R B, SAUSER B J, RAMIREZ - Marquez J E. System development planning using readiness levels in a cost of development minimization model[J]. Systems Engineering, 2010, 13(4): 311-323.
- [9] YIN H L, ZHAO Z C, WANG R Q, et al. Determination of urban runoff coefficient using time series inverse modeling[J]. Journal Of Hydrodynamics, 2017, 29(5): 898-901.
- [10] LIAO Z L, HE Y, HUANG F, et al. Analysis on LID for highly urbanized areas' waterlogging control: demonstrated on the example of Caohejing in Shanghai[J]. Water science and technology, 2013, 68(12): 2559-2567.
- [11] PENG H Q, LIU Y, WANG H W, et al. Urban stormwater forecasting model and drainage optimization based on water environmental capacity[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(14): 1-11.
- [12] 熊丽君,黄飞,徐祖信,等.基于SWMM模型的城市排水区域降雨及地表产流特征[J].应用生态学报,2016,27(11):3659-3666.
- [13] 王文亮,李俊奇,车伍,等.城市低影响开发雨水控制利用系统设计方法研究[J].中国给水排水,2014,30(24):12-17.
- [14] 刘雷斌,黄鸥,郭磊,等.城市道路雨水口收水量研究[J].给水排水,2016,52(S1):12-16.
- [15] 张显忠.合肥市老城区初期雨水污染调蓄工程方案[J].中国给水排水,2012,28(24):10-13.
- [16] 曾思育,董欣.城市降雨径流污染控制技术的发展与实践[J].给水排水,2015,51(10):1-3.
- [17] 王晓昌,王永坤,任欣欣,等.深圳市某体育中心低影响开发系统应用与模拟评估[J].给水排水,2016,52(5):91-96.
- [18] 佟举钢,冯江,郭婷.昆明市合流污水调蓄池效能评估指标体系的构建[J].中国给水排水,2019,35(8):34-38.
- [19] 许萍,司帅,张建强,等.深圳光明新区透水沥青道路与滞留带对径流水质水量控制效果研究[J].给水排水,2015,51(11):64-69.
- [20] 王贤萍.嘉兴市海绵城市建设实践与探索[J].中国给水排水,2016,32(14):33-35.
- [21] 段丙政,赵建伟,高勇,等.绿色屋顶对屋面径流污染的控制效应[J].环境科学与技术,2013,36(9):57-59.
- [22] 裔士刚,王祥勇,康威,等.改良型下凹绿地对小区雨水径流的调蓄净化效能[J].中国给水排水,2017,33(5):134-138.
- [23] 孔磊,康威,谭松明,等.绿色建筑小区阶梯式绿地设计与应用探究[J].中国给水排水,2016,32(1):90-93.
- [24] CHAI H X, SHEN S B, HU X B, et al. Effect of baffled water-holding garden system on disposal of rainwater for green building residential districts[J]. Desalination And Water Treatment, 2014, 52(13/14/15):

- 2717-2723.
- [25] 王晓璐. 快速城市化区域径流污染特征与综合控制技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [26] 朱红生. 城市道路初期雨水截流与处理技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [27] 刘超, 李俊奇, 王淇, 等. 国内外截污雨水口专利技术发展及其展望 (责任编辑: 靳炜)
- [28] 熊家晴, 杜晨, 郑于聪, 等. 表流-水平流复合人工湿地对高污染河水的净化[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(11): 5167-5172.
- [29] 邵知宇, 郑卓乐, 李霜, 等. 多功能雨水塘水位-流量曲线的构建及水力学原理[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(9): 128-132.

Assessment of urban rainfall runoff technological readiness level improvement and challenges in technological development produced by “Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment”

QI Fei*, CHEN Miao*, WANG Zhenbei, HUANGFU Zizheng, LI Chen, SUN Dezhi

Beijing Key Lab for Source Control Technology of Water Pollution, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

*Corresponding author, E-mail: qifei@bjfu.edu.cn

Abstract This article carefully sorted out the key technologies of urban runoff pollution elimination researched or developed by the “National Science and Technology Major Project of China: Water Pollution Control and Treatment” in “Eleventh Five-Year Plan” and “Twelfth Five-Year Plan”. According the readiness assessment results of these key technologies, the level of development of urban runoff pollution control technology in China and the challenges it faced were discussed, which will provide effective guidance for further promoting the development of urban rainfall runoff pollution control technology and technical support for the construction of sponge cities, the treatment of black and odorous water bodies, and the improvement of urban water environment. The evaluation results showed that a lot of research work in the field of urban rainfall runoff pollution control technology has been carried out in China. Most of single key technologies which had been developed and applied had reached level 7 readiness, which could solve the problem of urban rainfall pollution to a certain extent in China. In the urban rainfall runoff pollution control technology system, the supporting technology system had a readiness 4th level, reaching the stage of system development and verification, enabling systematic engineering design to reduce integration risks. The system readiness of four key technical links and urban rainfall runoff pollution control technology series had reached 3rd and 2nd level, respectively. In terms of technical links and series, only systems, design and development strategies were formed to reduce system integration risks to a certain extent and form combined technologies. It is necessary to continue to improve the readiness of single technologies, strengthen the integration of technology and system, carry out integrated innovation, so that the overall technology series can achieve the design, operation and processing capabilities that meet the needs of the task, and optimize and develop in the direction of the best application benefit in the system life cycle.

Keywords technology readiness level; system readiness level; urban rainfall runoff pollution; sponge city construction; black and smelly water treatment