北京林业大学

城市降雨径流污染负荷评估与控制技术创新与实践

中国水协青年专用

齐 飞

“水体污染源控制技术”北京市重点实验室
北京林业大学

2023.4.20

汇报提纲



1. 研究背景
2. 污染负荷评估
3. 对水环境质量的影响
4. 污染净化关键技术
5. 应用模式

中国水协专用平台

01 研究背景

中国水利学会岛年会专用



道路雨水



绿地积水



雨水排口



溢流污水

极端气候引发的城镇内涝与水体黑臭

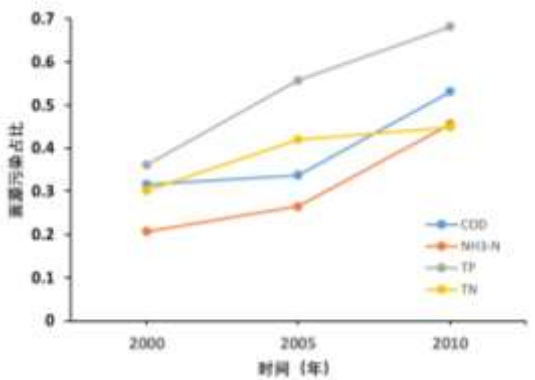
- 极端气候变化引起的暴雨事件，成为城市排水系统管理的难题之一；
- 城市径流污染已经成为城市水体黑臭的重要因素。

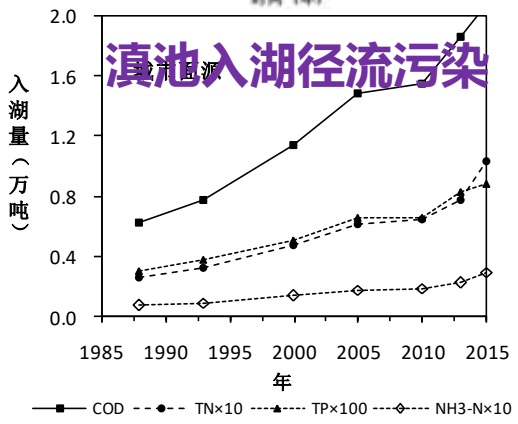








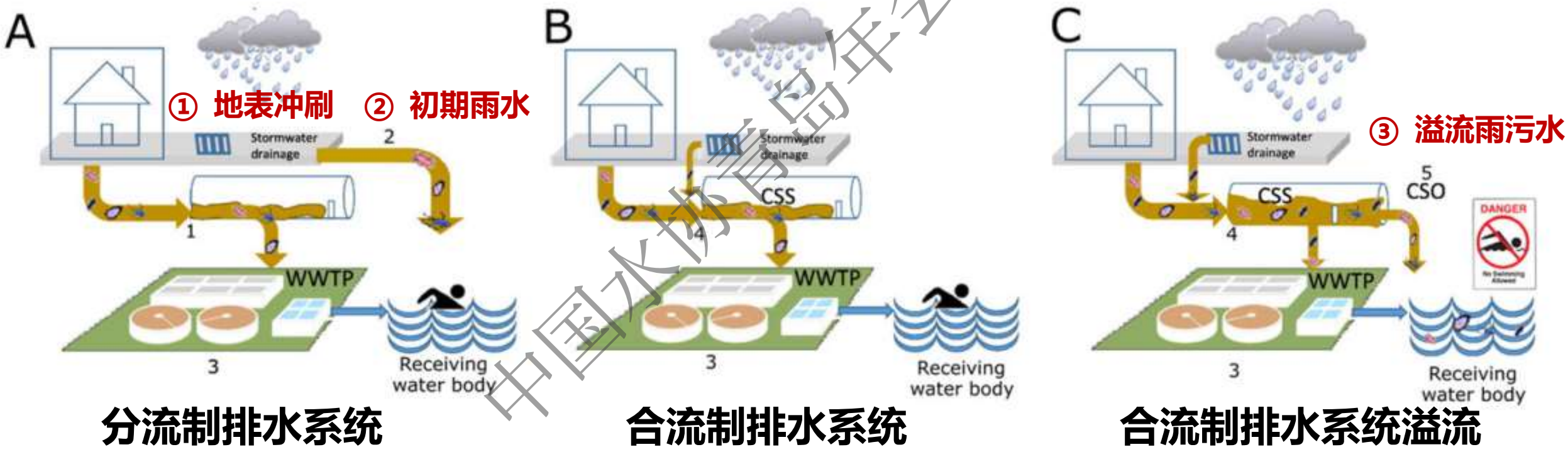




中国水利学会

径流污染与城镇排水系统

百科全书（辞海）定义：在水体的集水面上，因降雨冲刷形成的污染径流从而使水体污染的发生源，SS和COD占城镇水环境的20-30%，氮磷约10%。



分流制排水系统　　合流制排水系统　　合流制排水系统溢流

1-Wastewater sewer; 2-Stormwater sewer; 3-Wastewater treatment plant;
4-Combined sewer system (CSS); 5- Combined sewer overflow (CSO)

中国水协青岛年会专用

城镇径流污染特征

① **随机性：**气候环境、降雨情况(**降雨量、强度、时间间隔**)、区域地理地形、土壤渗透性、土壤结构、用地类型和植被类型等随机性和不确定性。

② **间歇性：**晴天污染物累积，降雨产流时发生时，污染物受到降雨冲刷引发面源污染。

③ **差异性：**

- 不同地区的污染类型有所差异；
- 同一地区，不同用地性质的面源污染特点有所差异；
- 同一用地性质，在不同场次降雨产生的环境污染荷载有所差异；
- 即使在同场次降雨中，降雨不同时期的污染物浓度也有所差异。

中国水协青岛工委专用

城镇径流污染治理举措

- 国家已经出台多个文件，要求开展径流污染治理与管理

1970s 美国率先开展城市径流污染研究

1990s 德国完成城市雨水径流污染控制

2000 美国、德国出版雨水径流与面源污染技术手册

2012 《低碳城市与区域发展科技论坛》首次提出“海绵城市”

2013.12 习总书记强调“建设海绵城市”

2015 《关于推进海绵城市建设的指导意见》

2017 李克强总理指出“海绵城市建设不限于试点城市”

2019 《城镇污水处理提质增效3年行动方案》

2020 《城镇生活污水处理设施补短板强弱项实施方案》

2021 《“十四五”城镇污水处理及资源化发展规划》

2022 深入打好城市黑臭水体治理攻坚战实施方案

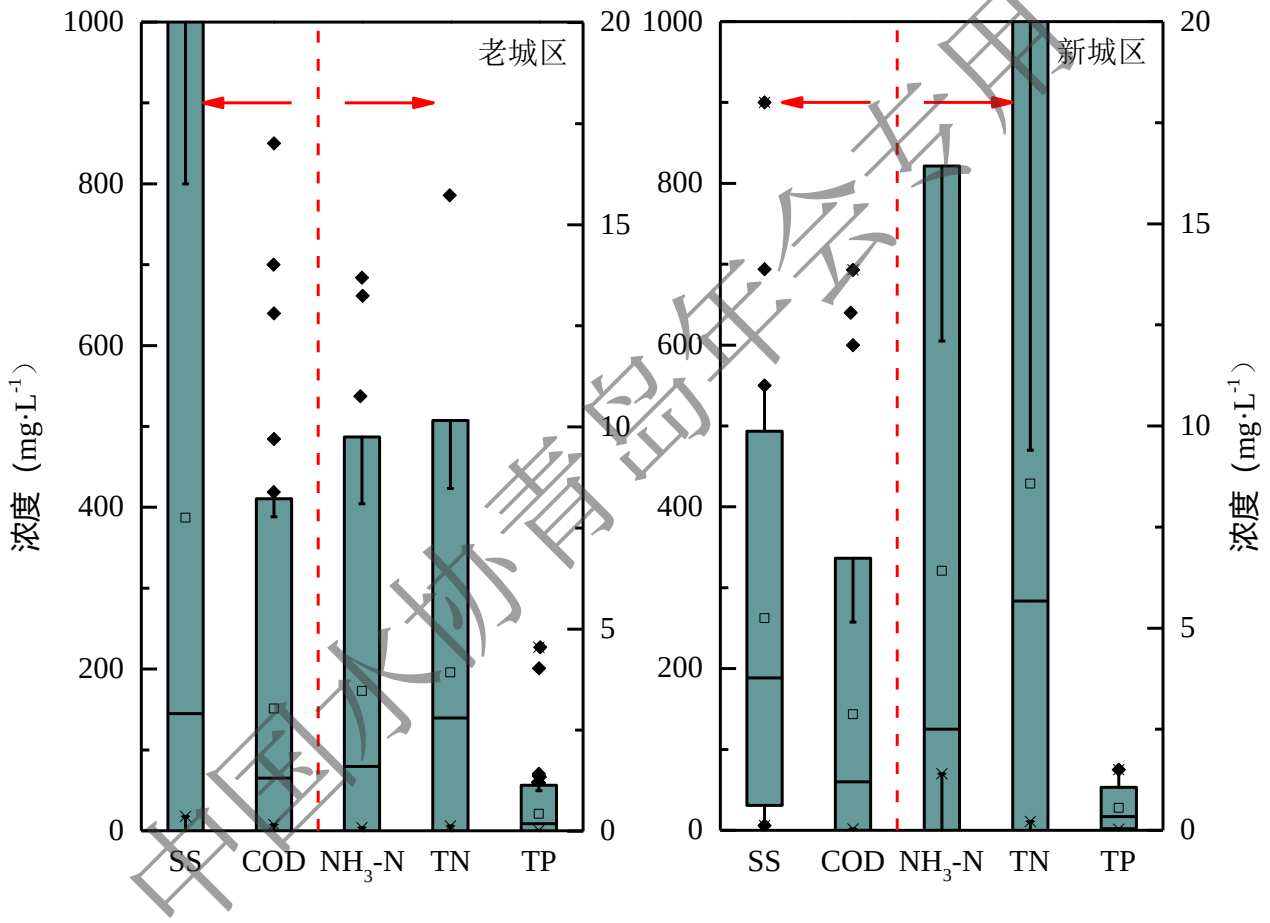


中国水协青岛年会专用

02 污染负荷评估

中国水协青岛年会专用

城镇径流污染特征

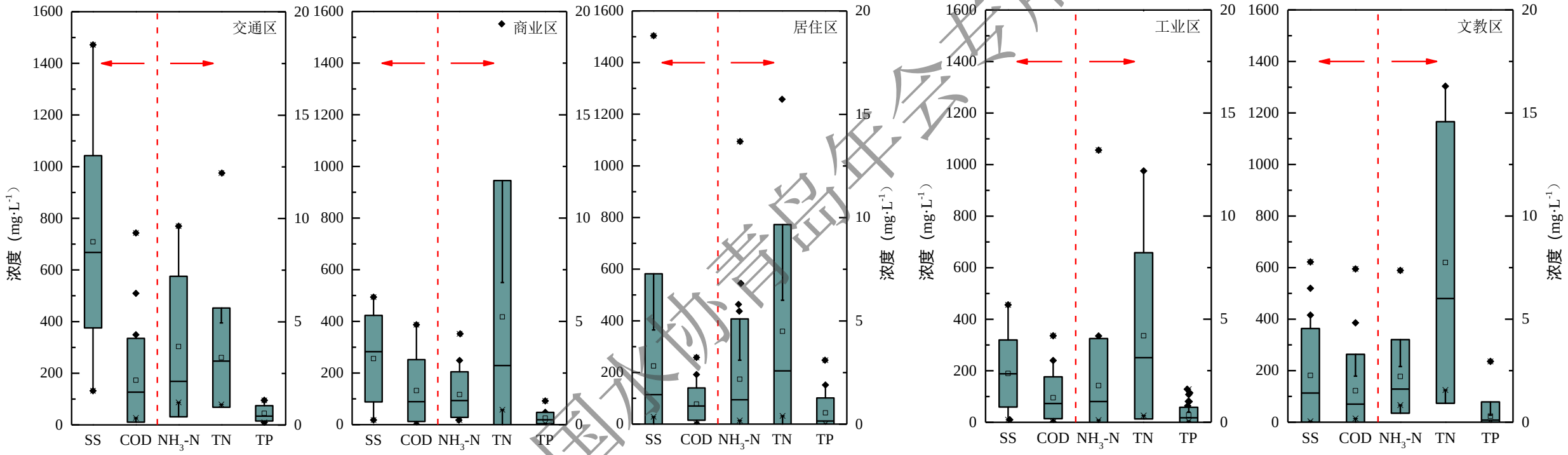


中国水协青岛年会专用

老城区SS和COD的平均浓度均高于新城区

新城区的NH_3-N 、TN和TP的平均浓度均高于老城区

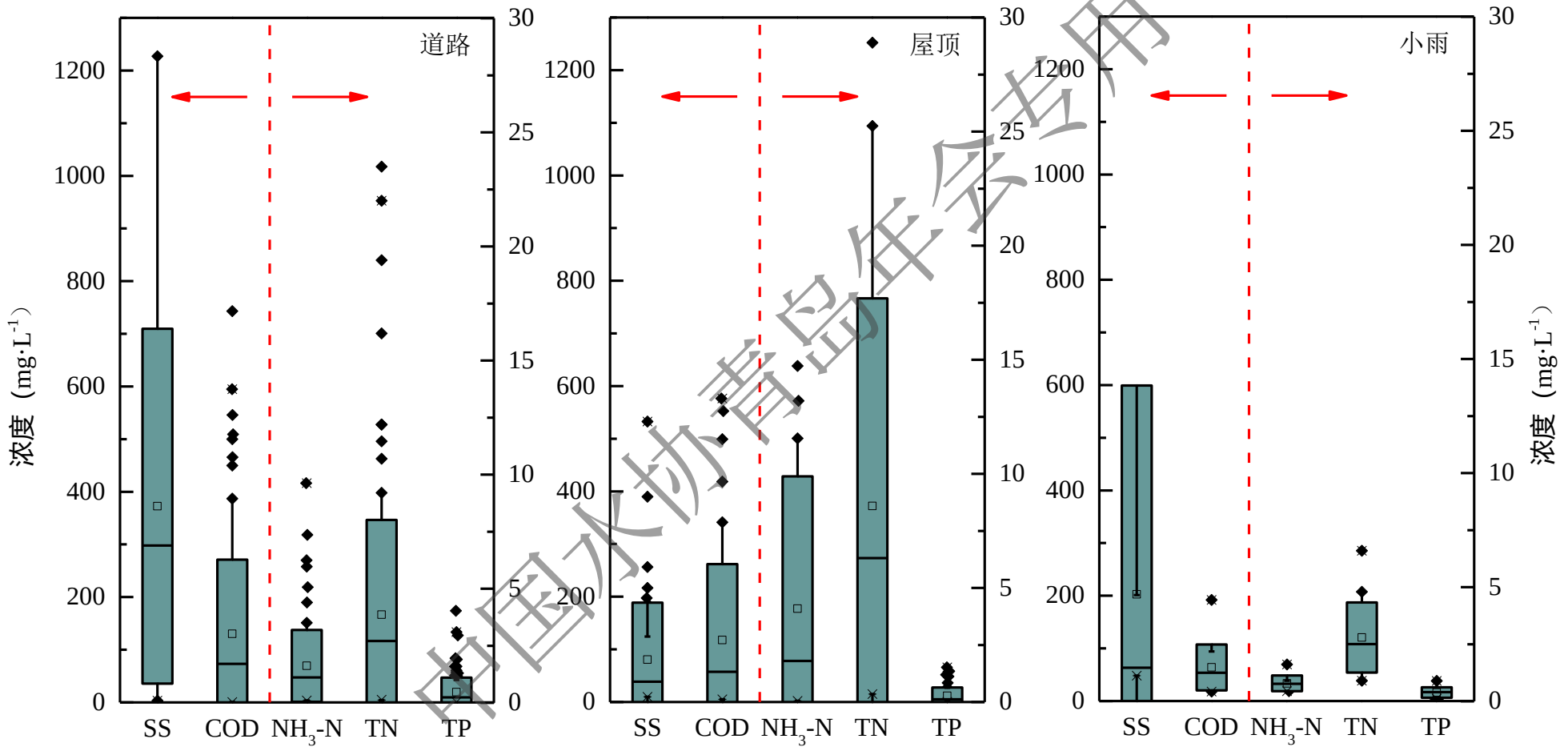
城镇径流污染特征



交通区和商业区的污染最为严重

中国水协青岛年会专用

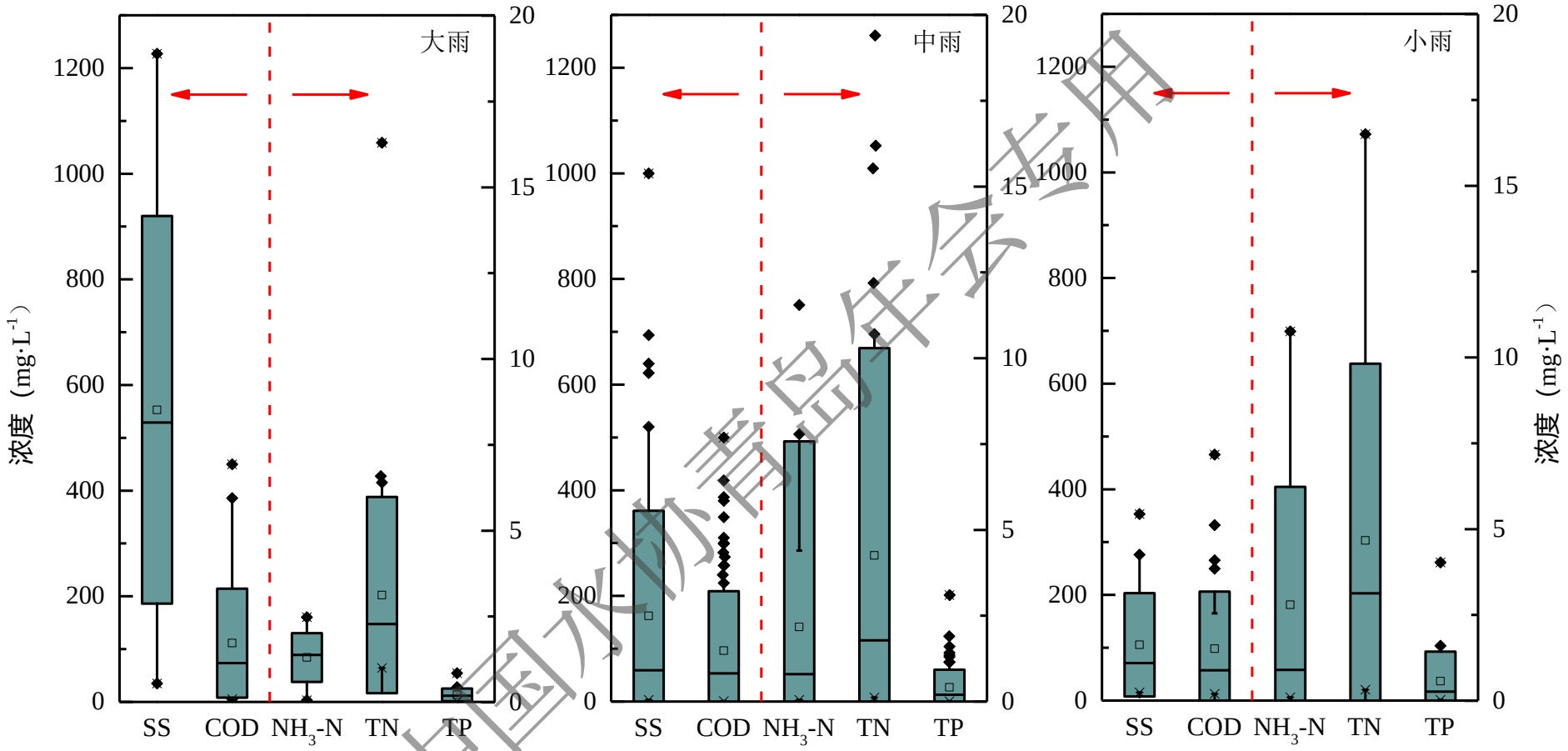
城镇径流污染特征



中国水协青总年会专用

道路的污染程度最为严重

城镇径流污染特征

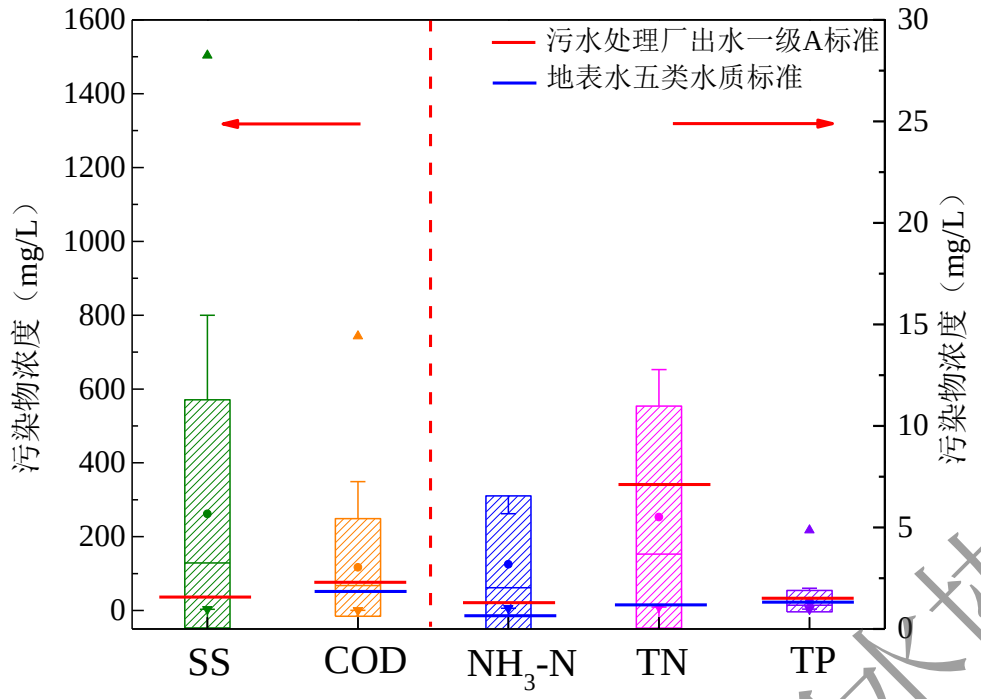


降雨类型对地表径流污染负荷的影响

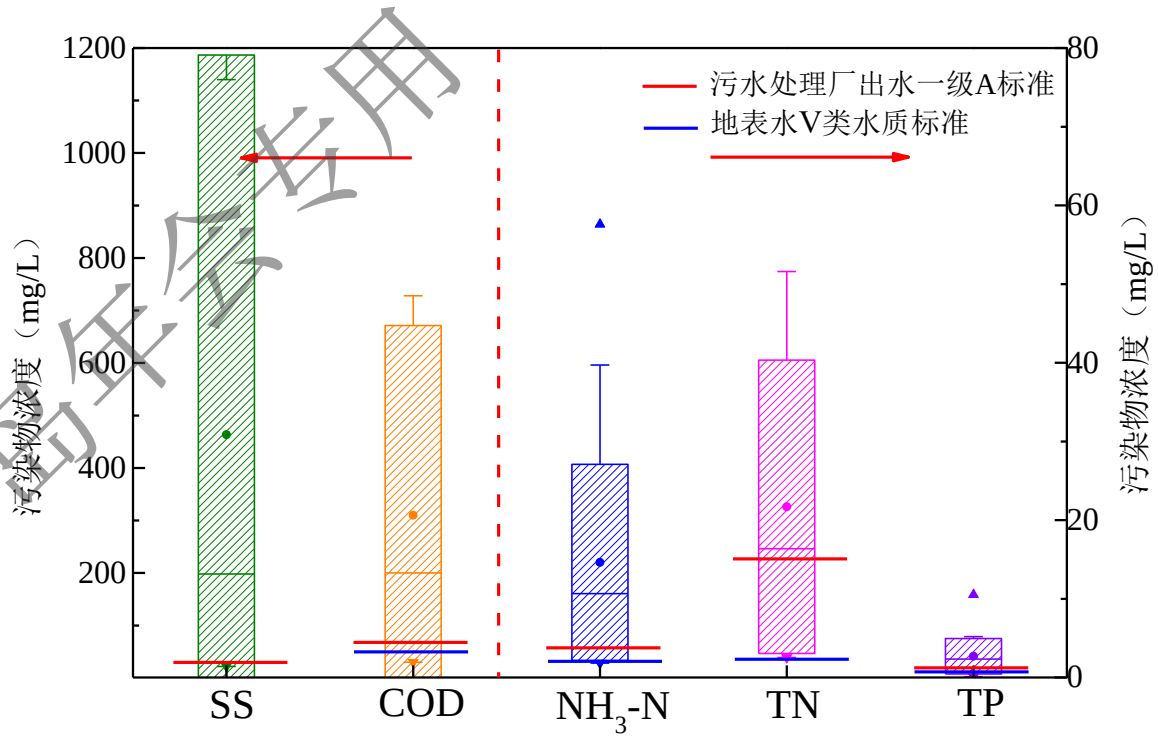
中国水协青岛年会专用

- SS、COD的平均浓度大小顺序为大雨 > 中雨 > 小雨
- NH_3-N 、TN和TP的平均浓度大小顺序为小雨 > 中雨 > 大雨

城镇径流污染特征



地表径流污染特征



合流制溢流污染特征

- SS是我国污水厂一级A标准浓度限值的26.18倍
- COD、 NH_3-N 、TN和TP是我国地表水Ⅴ类水质标准的2.91、1.15、2.35和1.05倍

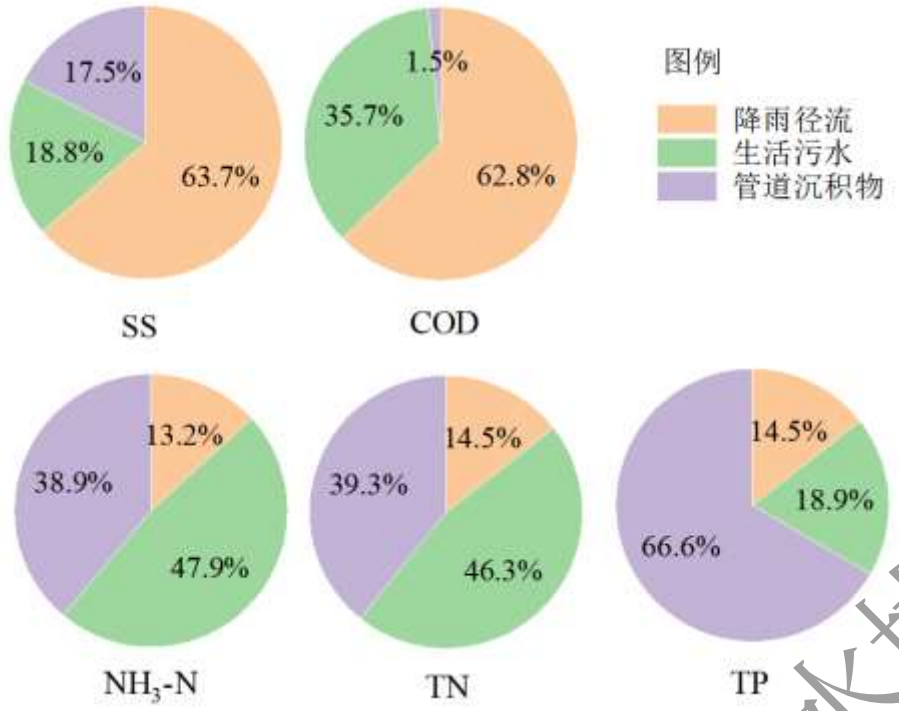
- SS是我国污水厂一级A标准浓度限值的46.36倍
- COD、 NH_3-N 、TN和TP是我国地表水Ⅴ类水质标准的7.75、7.83、10.33和6.90倍

中国水协青岛年会专用

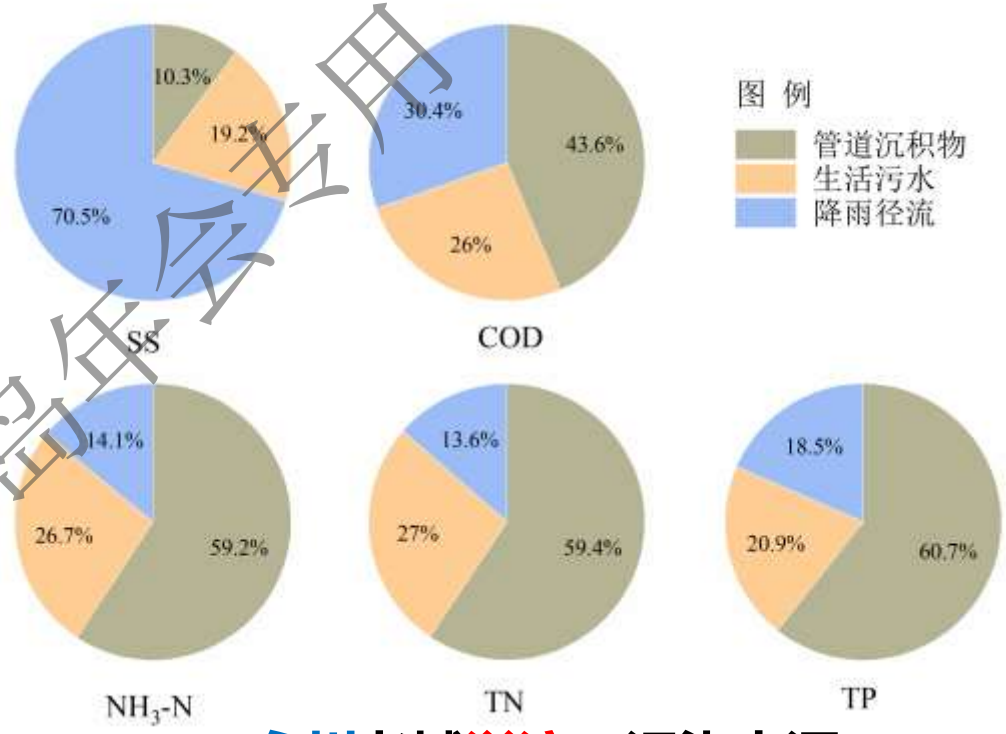
03 对水环境质量的影响

中国水协青岛年会专用

合流溢流口污染来源



金坛老城溢流口污染来源

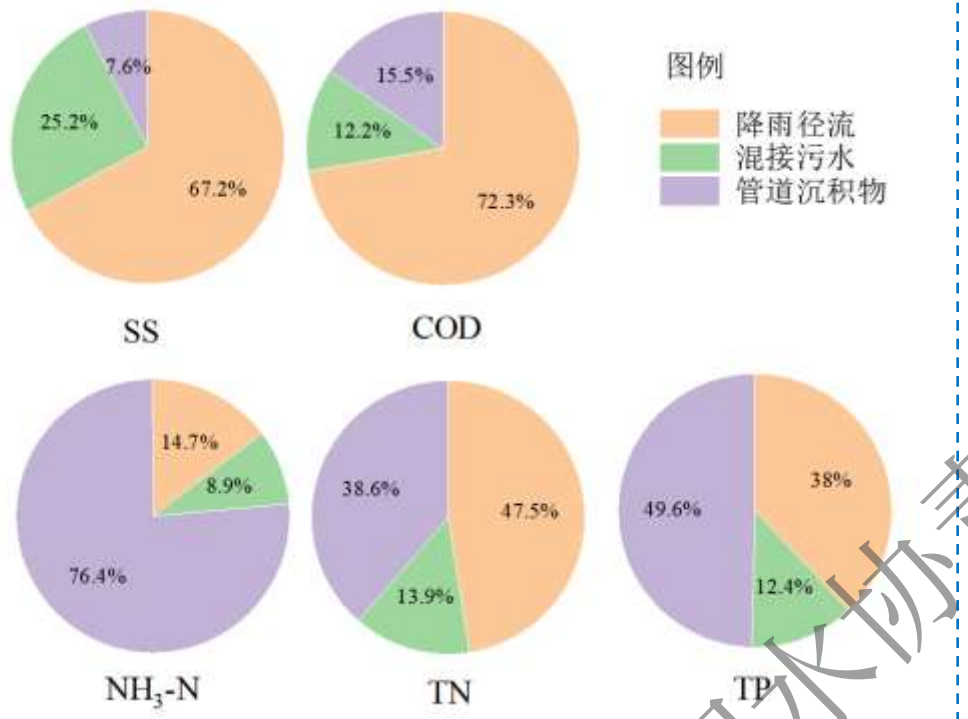


永川老城溢流口污染来源

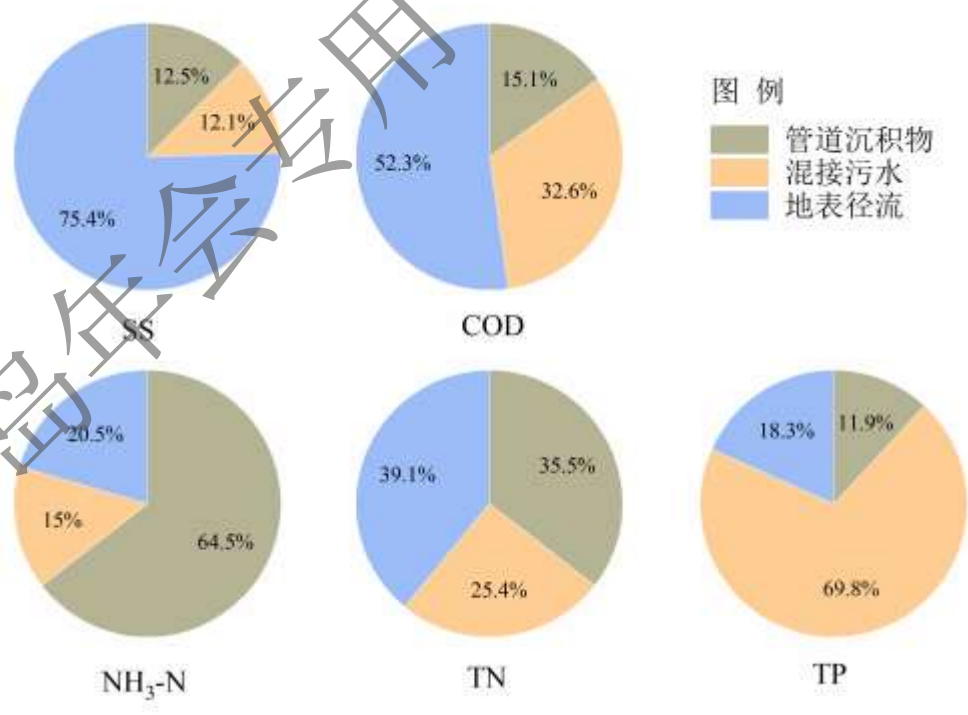
- 合流制溢流口污染主要来源于降雨径流、生活污水以及管道沉积物
- 降雨径流对老城区溢流口中SS贡献较大，可达56.1% - 70.5%
- 管道沉积物和生活污水对溢流口中氨氮、TN和TP贡献较大，两者加和贡献率可达81.5%-86.8%
- 丘陵地区管道坡降大，雨污水对管道沉积物冲刷能力强，丘陵地区管道沉积物贡献的负荷会大于平原地区

中国水协青岛年会专用

分流制雨水口污染来源



金坛新城研究区雨水口污染来源

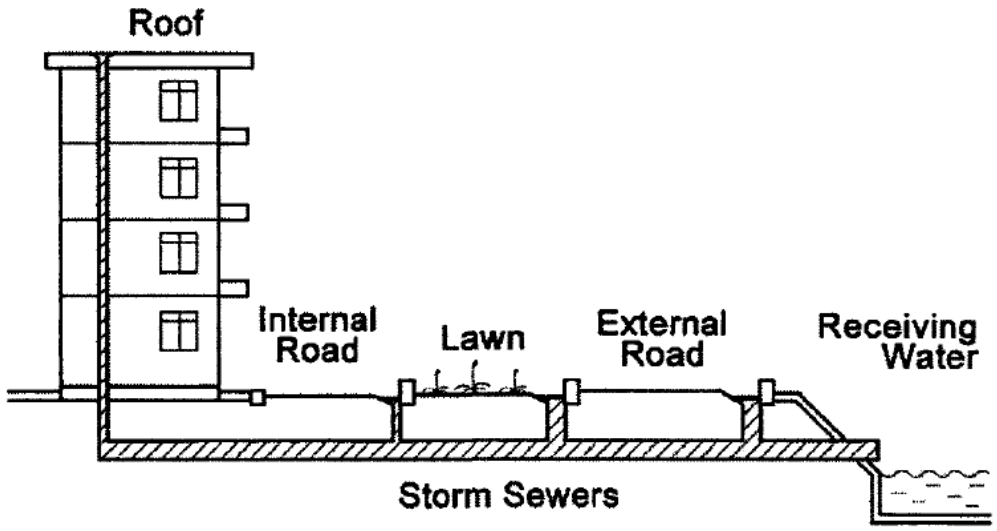


永川新城研究区雨水口污染来源贡献

- 降雨径流对新城区雨水口中SS贡献较大，可达 52.3%-75.4%；
- 管道沉积物也为新城区雨水排口污染负荷的重要来源，会贡献较多的氨氮与总氮；
- 新城区中，存在管网混接现象，其会贡献一部分的排口污染负荷。

中国水协青岛年会专用

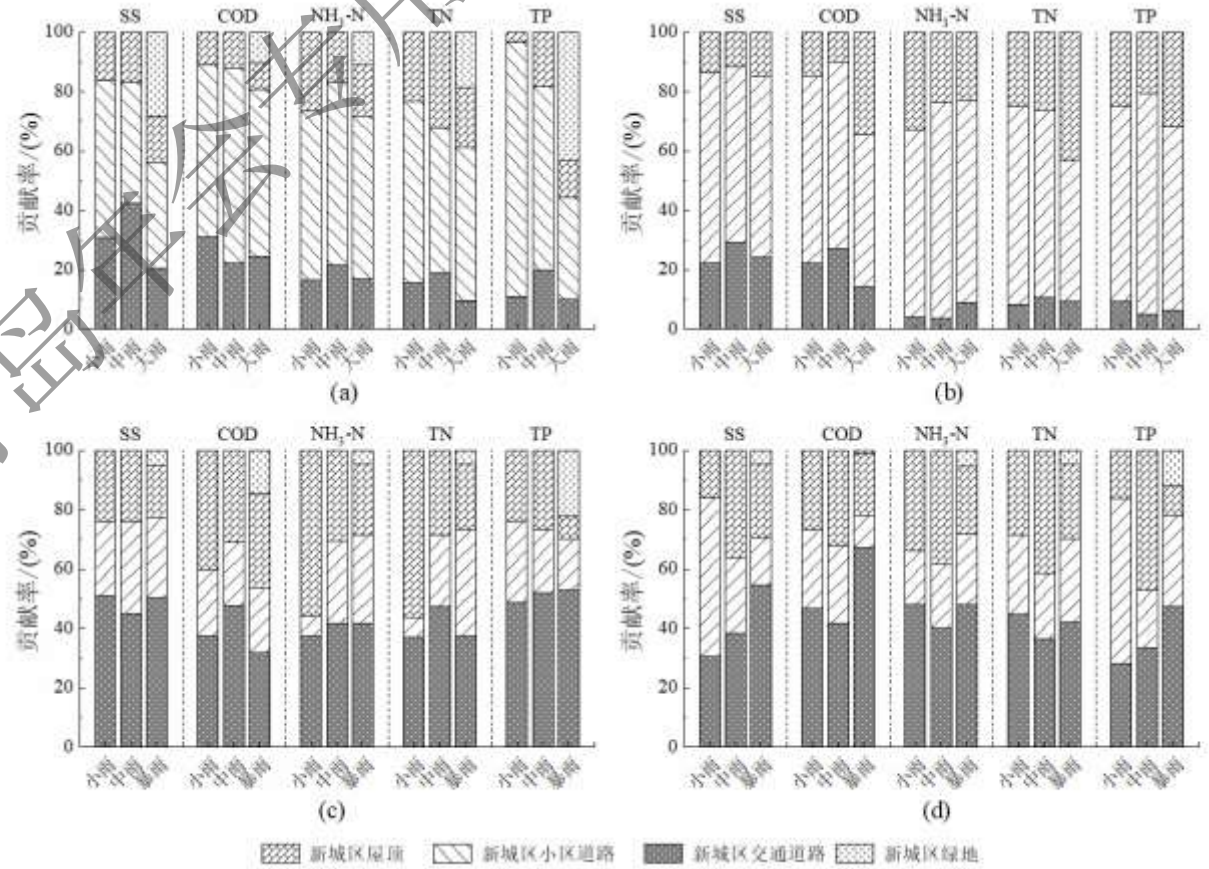
下垫面污染来源及对水环境污染贡献



- 受**地形坡度**和**人口密度**等因素影响，永川和金坛的主要产污下垫面不同；永川为小区道路，金坛为交通道路和屋顶；
- **屋顶**设计坡度相对固定，受人类影响程度较低，因此其污染贡献程度较低；
- **绿地**在大雨/暴雨时开始产流，其TP负荷污染贡献突出。

永川新城区

永川老城区



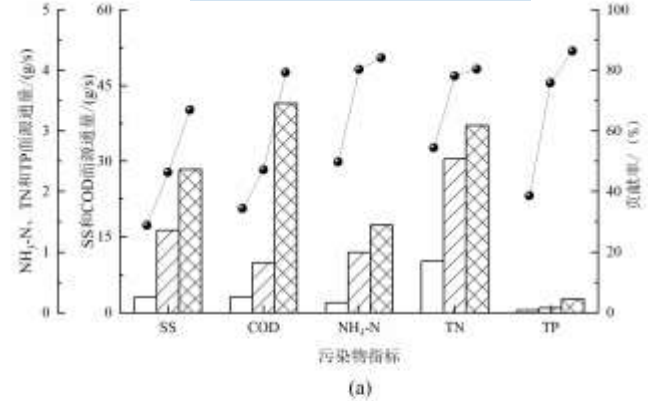
金坛新城区

金坛老城区

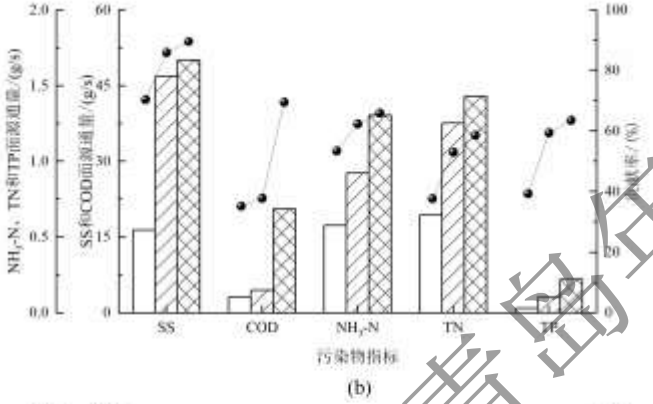
中国水协青岛年会专用

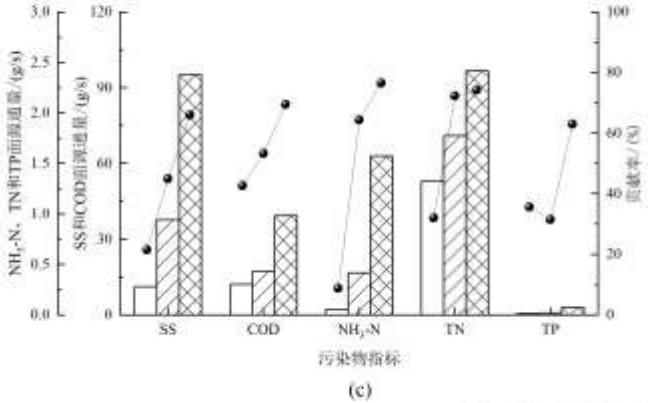
城镇面源污染通量及其对水环境污染贡献

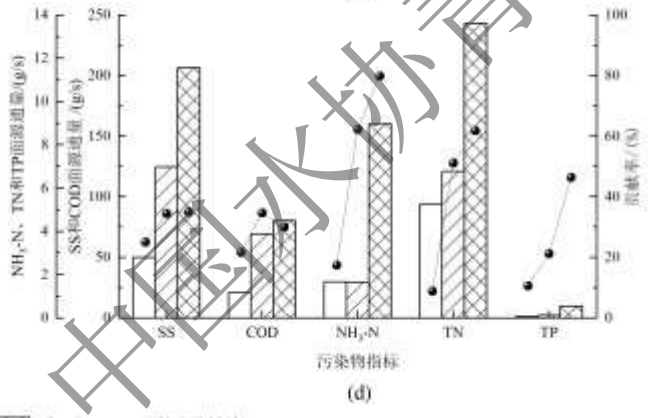
重庆永川红旗河



重庆永川胜利河









江苏常州金坛钱胜河

江苏常州金坛丹金溧漕河河

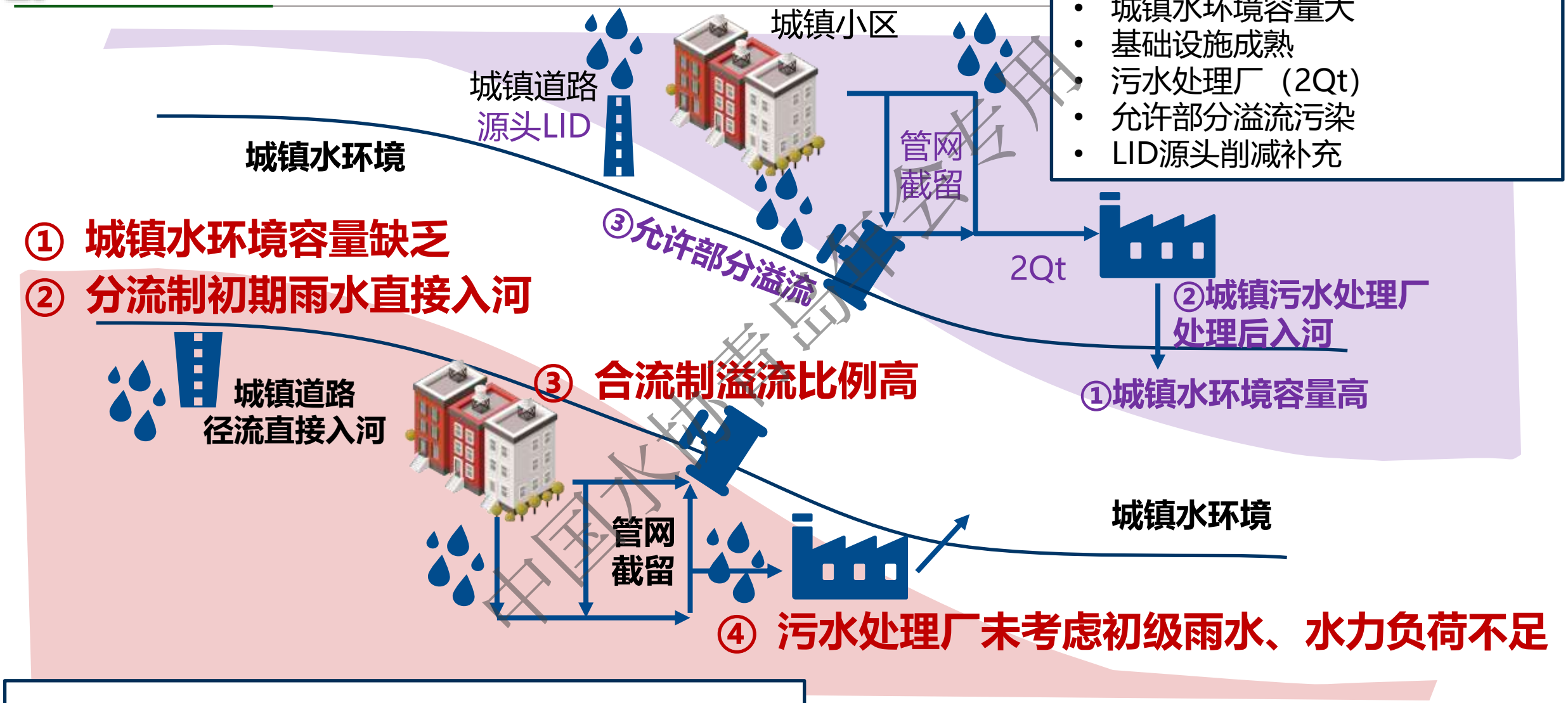
- 老城区河流的面源通量大于新城区，原因是新城区雨水排口水质优于老城区合流制溢流口
- 永川研究区，胜利河受面源污染程度更大，且SS和氨氮为其主要污染因子
- 金坛研究区，钱胜河受面源污染程度更严重
- 受地形影响，丘陵地区城镇面源负荷较大，故丘陵地区城镇面源的贡献率大于平原地区

中国水协青岛年会专用

04 污染净化关键技术

中国水协青岛年会专用

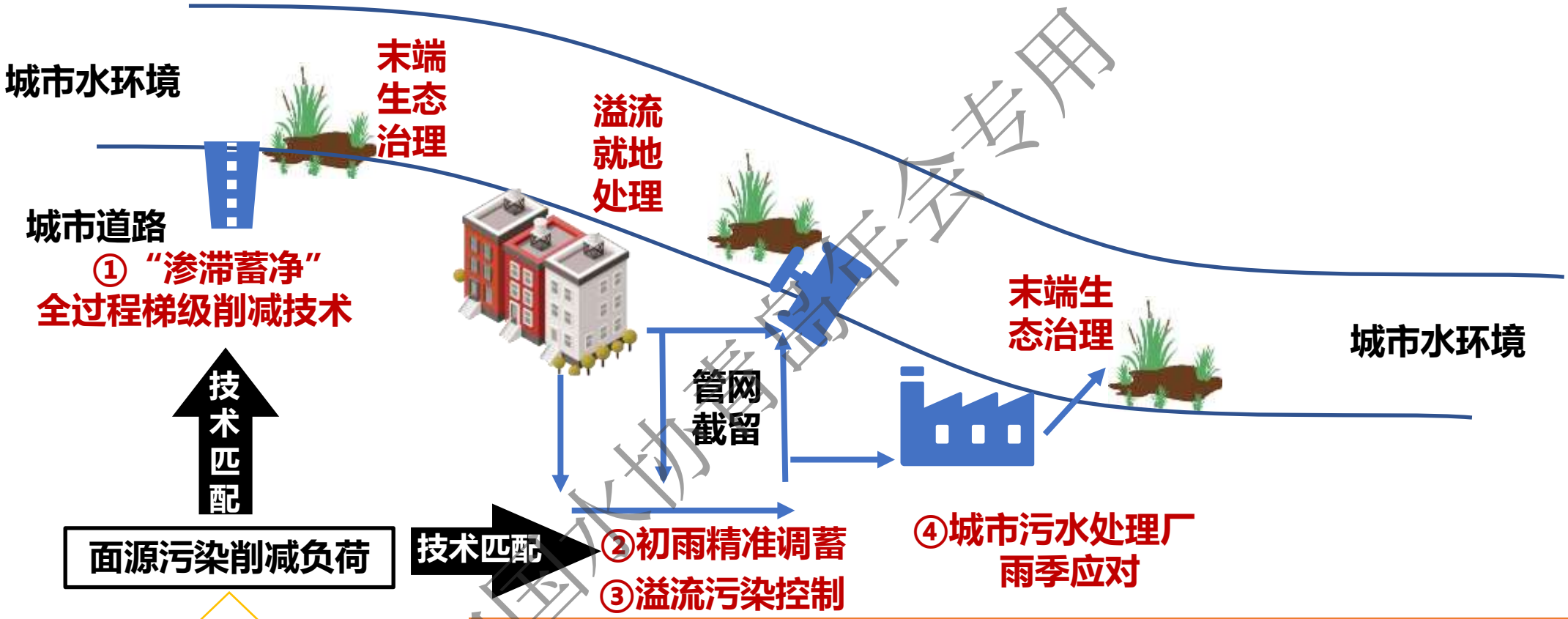
瓶颈问题



我国城镇面源污染治理技术瓶颈

中国水利水电出版社 版权所有

解决方案



基于水环境容量和污水厂的现状，

强化绿色、过程、末端削减全链条治理，

构建城镇面源污染治理最佳技术模式

中国水协资源平台专用

降雨径流污染控制技术体系

诊断评估

① 径流污染源精准解析技术
② 源头削减-过程控制-末端治理集成技术的规划设计技术
③ 径流与污染控制效果的监测技术

调蓄池在线监测平台



源头削减

① 径流污染源头削减低影响开发关键技术与设施
② 关键技术与设施的运行与维护技术
③ 建设技术/设施系统化、集成化的应用与评估

雨水花园



过程控制

① 径流污染过程控制的关键技术与设施及其集成技术
② 初期雨水调蓄-处理设施关键设计技术、指导性文件与示范
③ 合流制溢流调蓄设施关键设计技术、指导性文件与示范

雨水口



末端治理

① 径流污染末端控制的物化技术与装备，生态技术与装备
② 强化雨水处理的污水一级处理关键技术与工程运行策略
③ 末端处理关键技术集成、工程示范与运行

人工生态塘



中国给水排水杂志专用

地表径流绿地污染减控关键技术

- 研究了不同形式绿地的径流过程、下渗特性、产流特性和污染特性；
- 提出了各类型绿地的产流过程和污染物运移过程的定量计算模型；
- 规范化下凹式绿地工程设计参数，提出了动态径流系数和污染物消减系数的计算方法；
- 研发了集雨水收集、储存、净化、回用为一体的“一体化雨水生态净储器”设备；
- 建设2个雨水收集、处理及资源化利用工程，汇水面积约20万m^2，示范区年外排雨水量减少70%以上。





下凹式绿地实验图





中国水协青岛分会

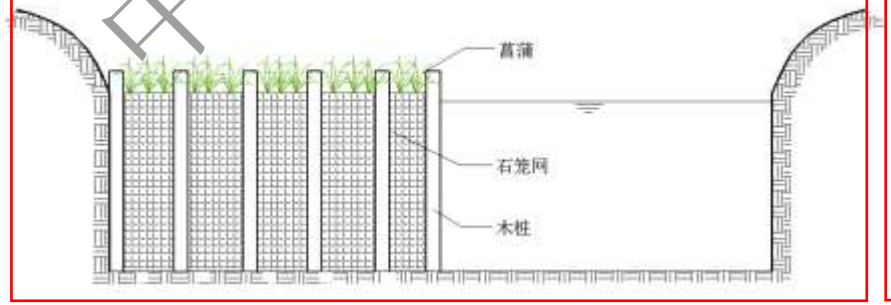
多尺度径流污染阻滞与生态修复关键技术

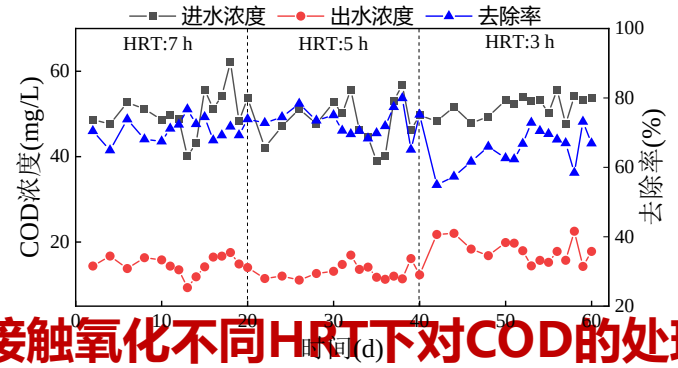
- 开发了砾间接触氧化、生态透水丁坝、生态过滤带等多尺度污染阻滞技术，构建集成技术与入河污染负荷、断面水质的响应关系；
- 面向分流制雨水排口，构建了多尺度污染阻滞技术和生态修复技术，构建了分流制雨水生态净化技术模式。



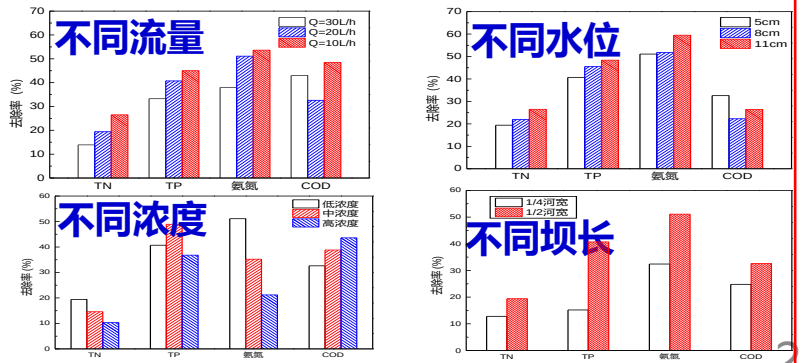
多级生态过滤带







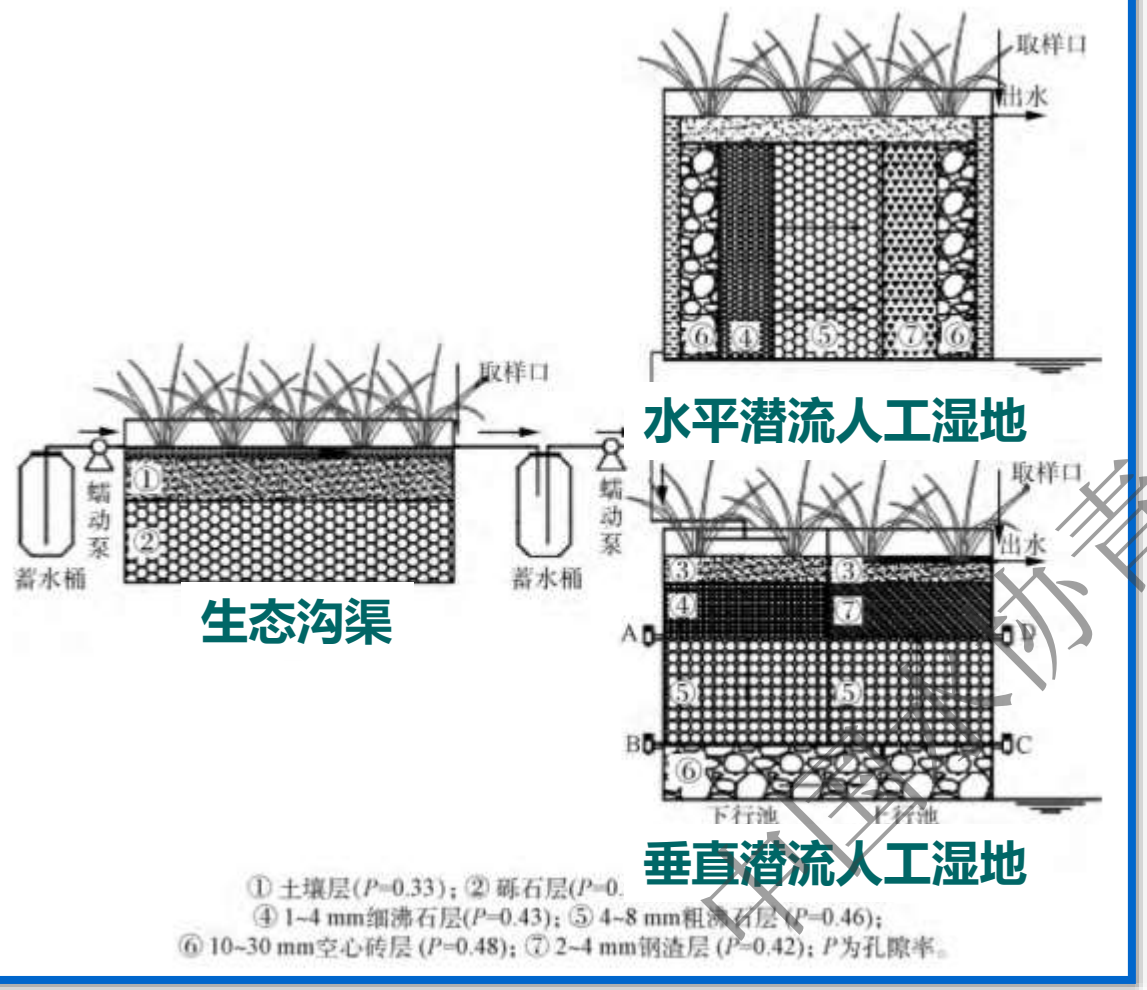
砾间接触氧化不同HRT下对COD的处理效果

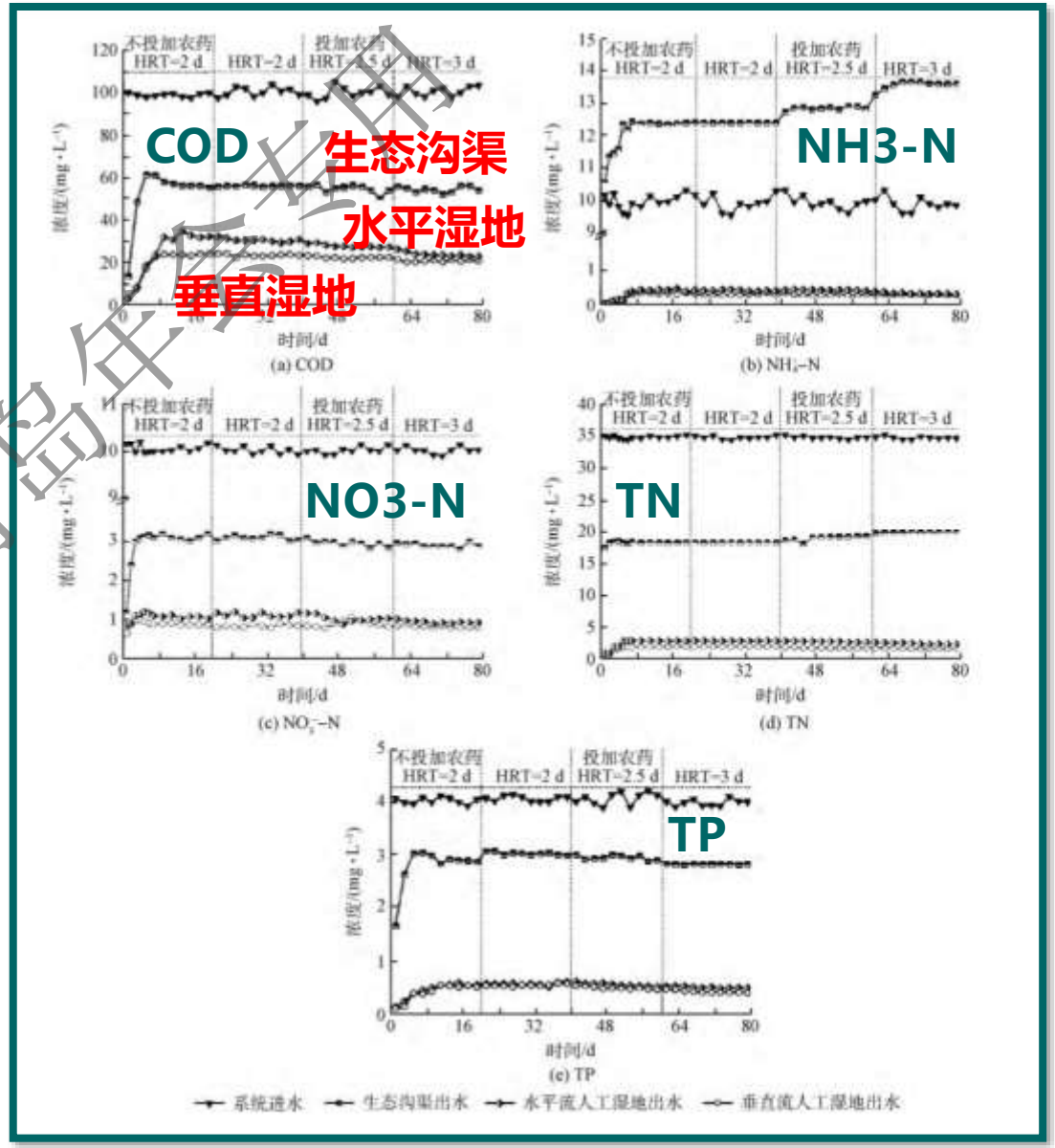


生态透水丁坝不同条件下的处理效果

中国水利青年学者用

生态沟渠-调蓄-复合人工湿地组合关键技术





生态沟渠与垂直潜流湿地组合模式更优，对常规污染物和农药，均具有优越净化性能。

中国科学院青岛生态所

生物质炭土雨水净化关键技术

研发4种生物质炭土可用于净化径流雨水氮、磷和农药



生物炭



FeS@生物炭



Fe_3C@生物炭

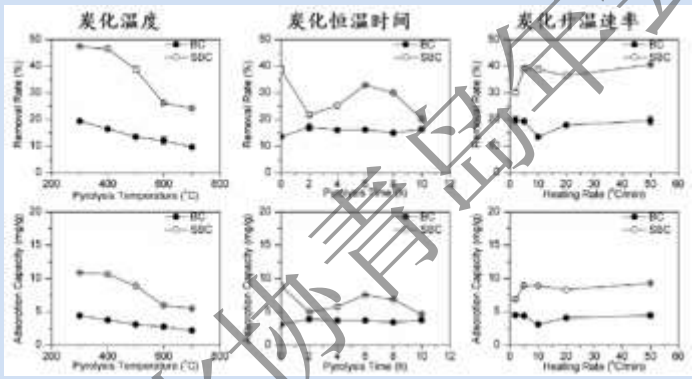


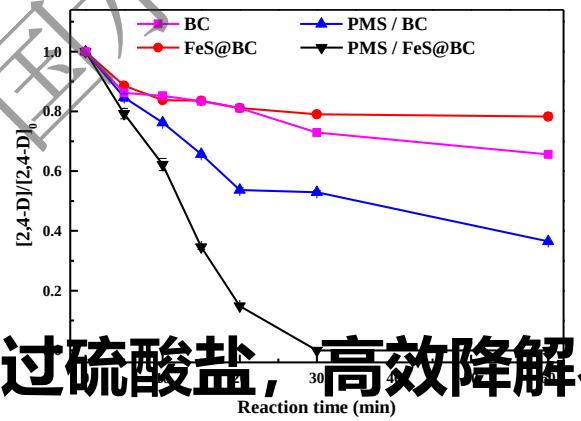
Fe^0@生物炭

脱氮、除磷原理

$$Fe^0/Fe^{2+} + NO_2^-/NO_3^- \rightarrow Fe^{3+} + N_2$$

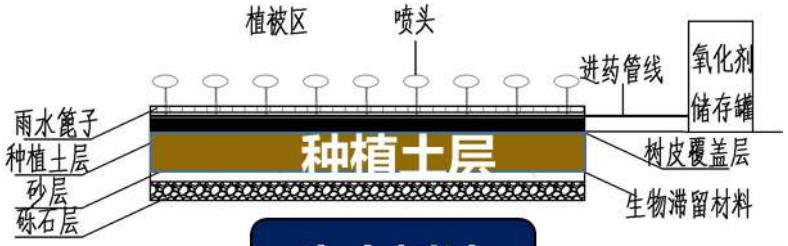
$$Fe^{3+} + PO_4^{3-} \rightarrow FePO_4 \downarrow$$



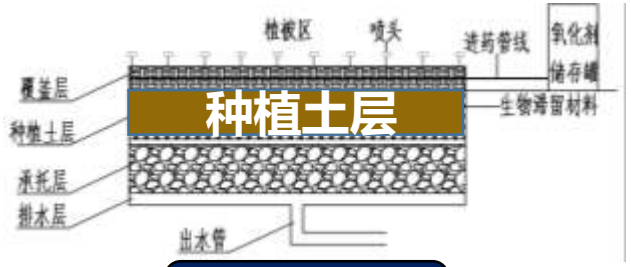


耦合过硫酸盐，高效降解农药

LID绿色设施应用

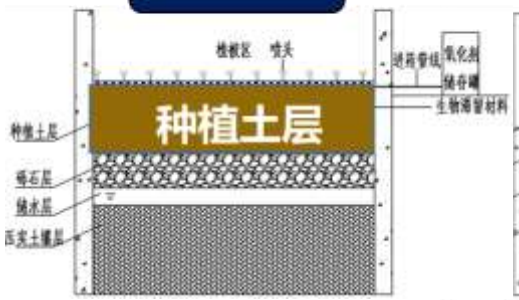


生态树池

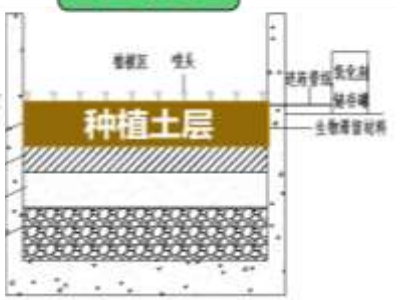


雨水花园

高位花坛

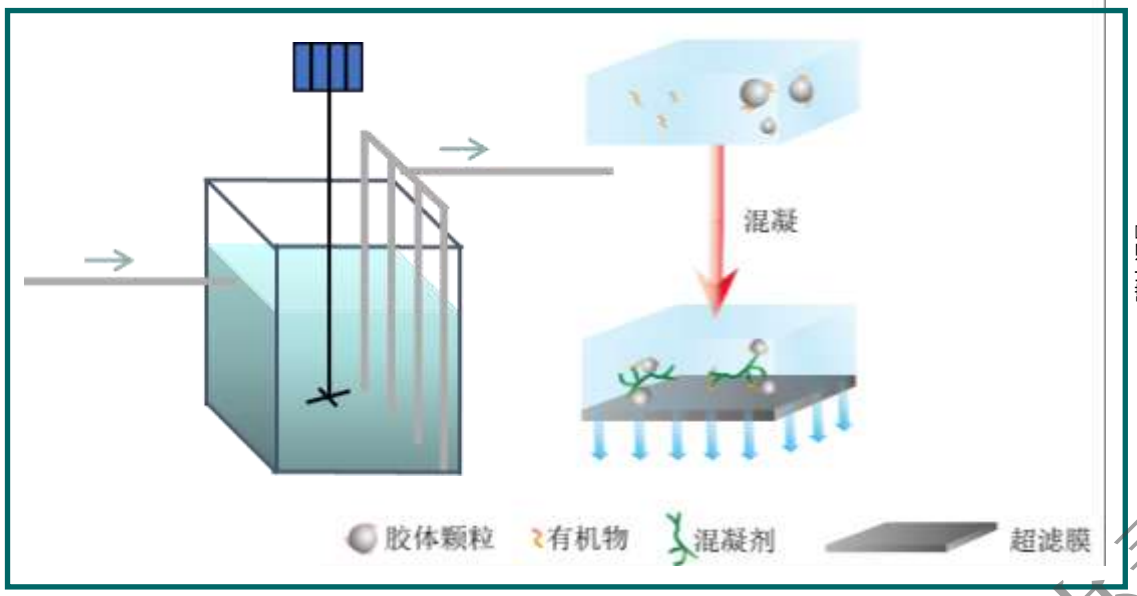


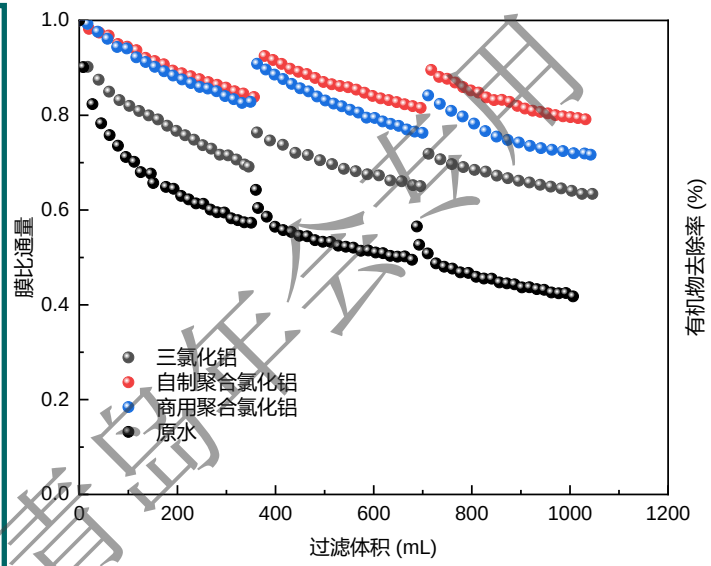
植草沟

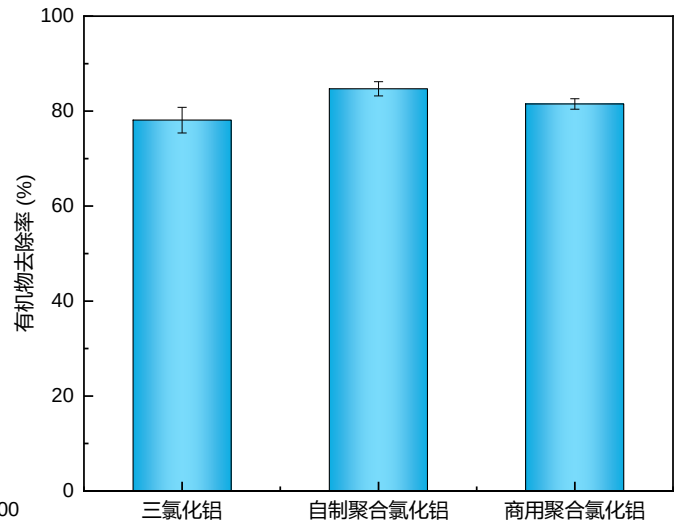


中国水协青岛年会用

混凝-超滤短流程初雨/溢流污染物净化关键技术





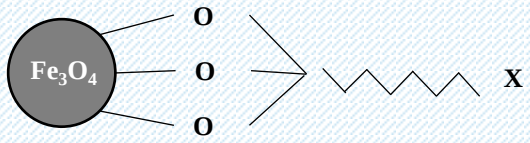


中国水协青岛年会用

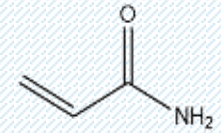
- 应用场景：雨季强化一级处理
- 混凝-超滤短流程工艺显著延长超滤工艺运行周期1一倍以上
- SS去除率高达99.5%以上，COD去除率达80%
- 工艺流程短且占地面积小，不改变污水处理厂原有处理构筑物及布置

新型磁絮凝强化一级处理关键技术

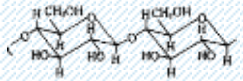
■ 功能化磁助凝剂的合成及其与混凝剂的复配性能评价



X代表：① C=C　② $-NH_2$
③ COOH　④ -OH



PAM



纤维素

功能化磁助凝剂的合成

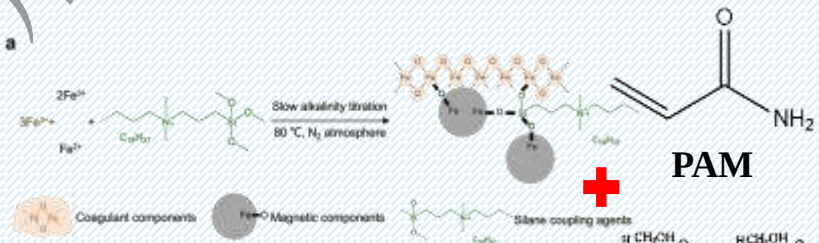
无机絮凝剂



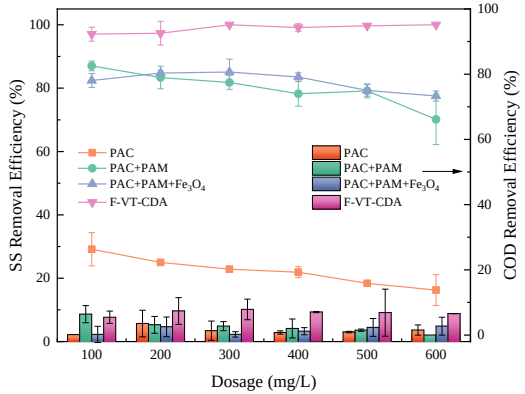
反应器设计优化

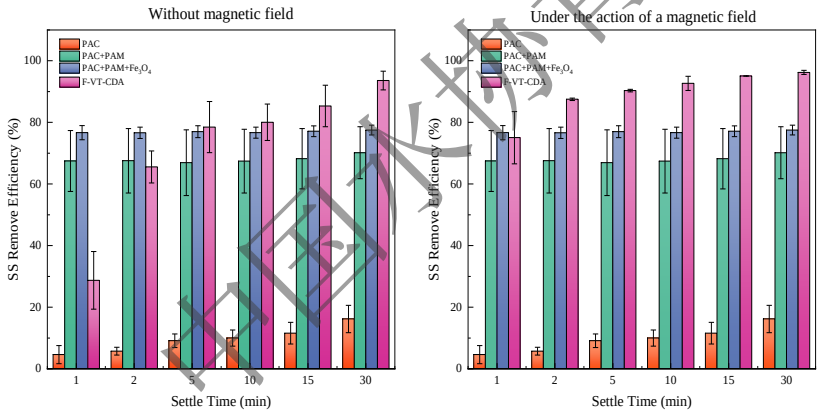
- ◆ 合成表征分析及参数优化
- ◆ 控制技术评估与机理探索
- ◆ 反应器设计优化

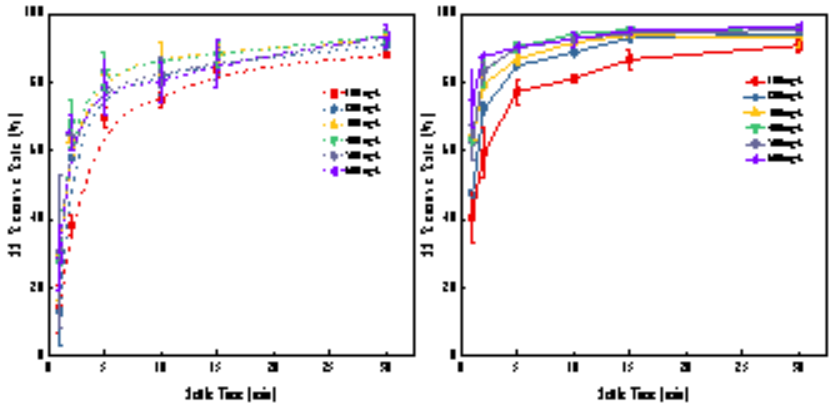
■ 共价键磁复合絮凝剂的合成与性能评价



共价键磁复合絮凝剂的合成



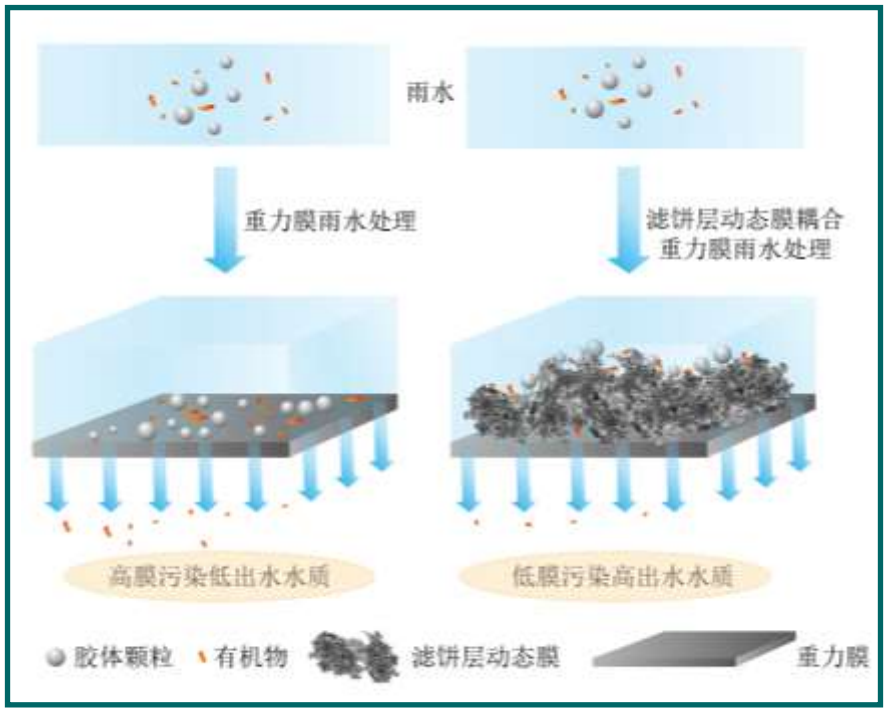


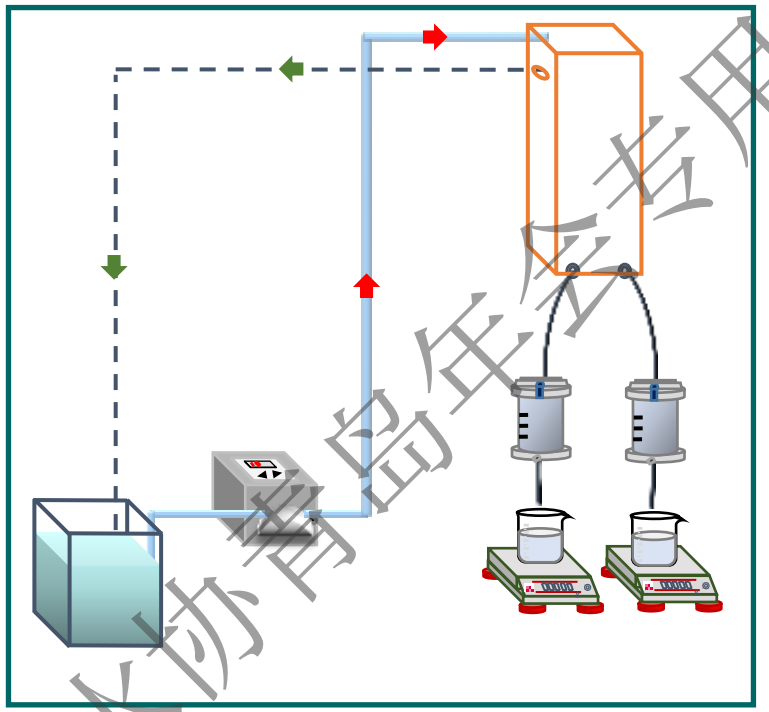


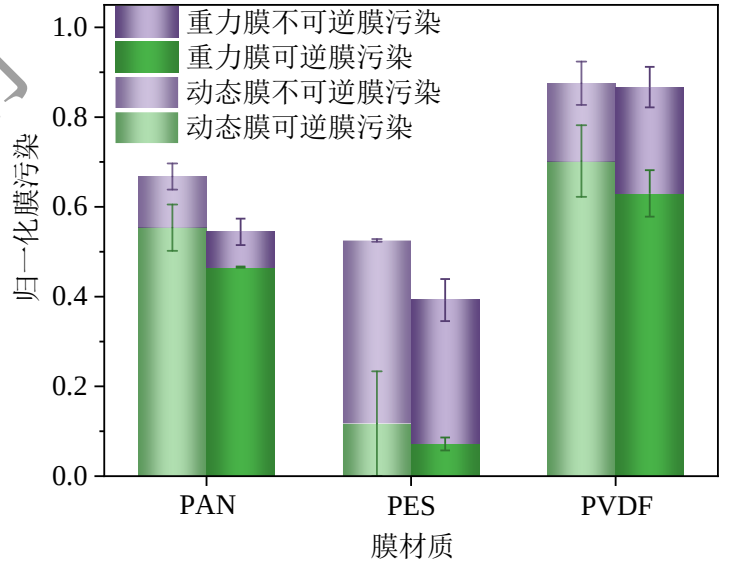
- ■ 外加磁场提升了絮体网捕卷扫能力，颗粒有效碰撞，SS及COD去除效率优于传统CSO处理工艺
- ■ 沉降1 min即可实现SS 78 %的去除，pH适应范围宽，电性中和占据主导地位

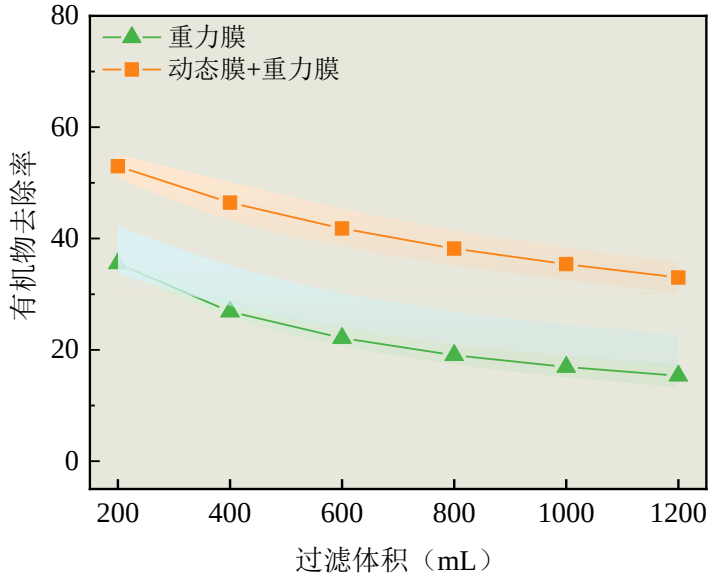
中国水协青年会专用

基于重力膜分离的初雨/溢流污染物净化关键技术





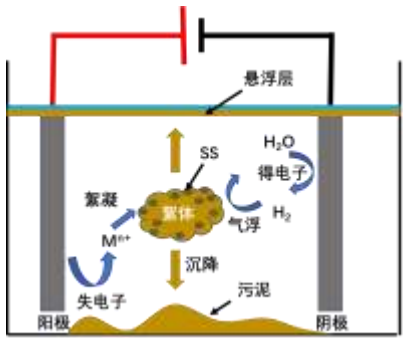


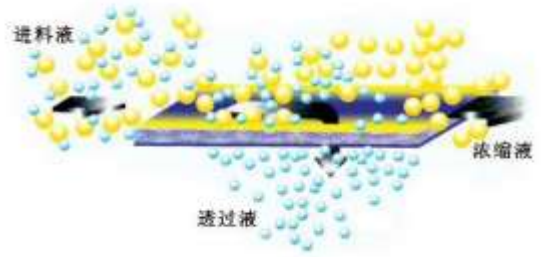


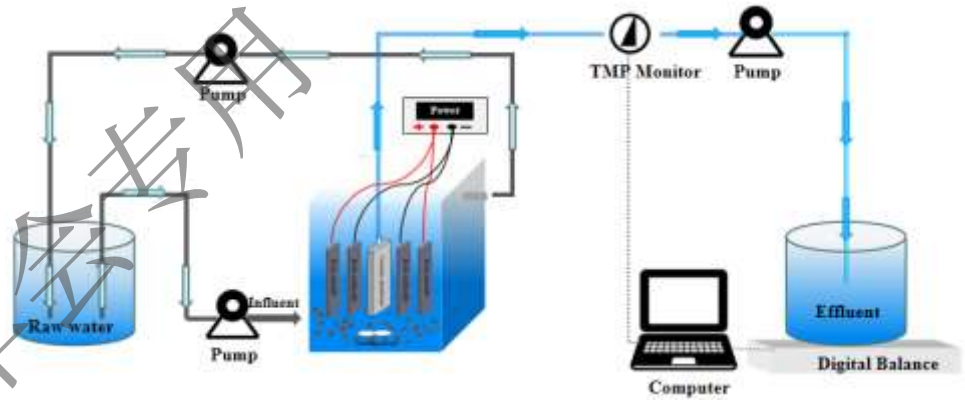
- 悬浮物去除率高达99%，**有机物去除率提升20%**
- 动态膜+重力膜过滤缓解膜污染，**提升产水通量14%**
- 较传统重力膜净水技术**仅增加0.003元处理成本**
- 占地面积小且运行维护方便，便于分散式应用

河口水协青岛生产专用

电絮凝-陶瓷膜过滤径流污染净化关键技术







■ 电絮凝优势

① 装置简单，操作简便

② 释放絮凝剂，实现膜污染和除磷协同

③ 去除水中的悬浮物、有机物、重金属

■ 陶瓷膜优势

① 具有耐化学腐蚀、抗微生物能力强

② 渗透量大、孔径分布窄、分离性能好

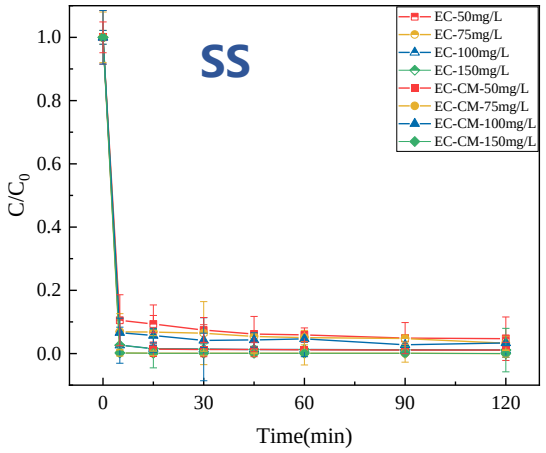
③ 可清洗性强、和使用寿命长

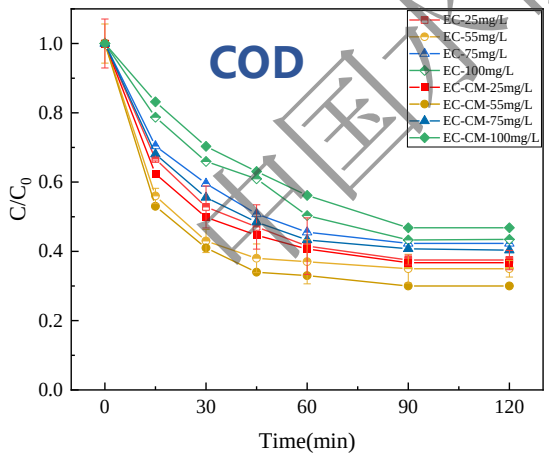
■ 电絮凝-陶瓷膜优势

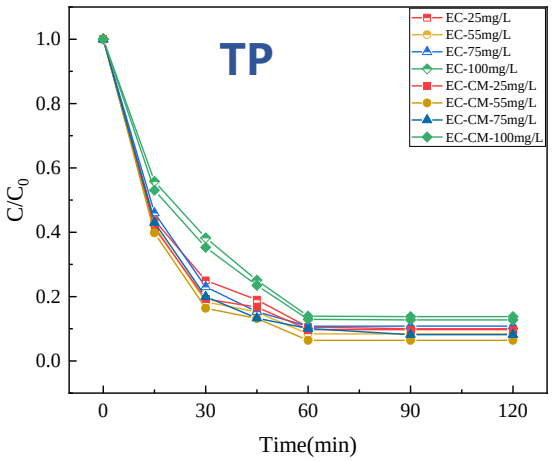
① 形成较大粒径絮体，防止膜孔堵塞，提高水通量

② 静电排斥、气体冲刷协同缓解膜污染

③ 提升多污染物协同净化效率







- **显著提升悬浮物净化速度，有效缩短停留时间**
- **显著提升COD净化效果，最佳去除率为70.1%**
- **实现富营养化重要影子TP高效净化，净化效率高达97%**

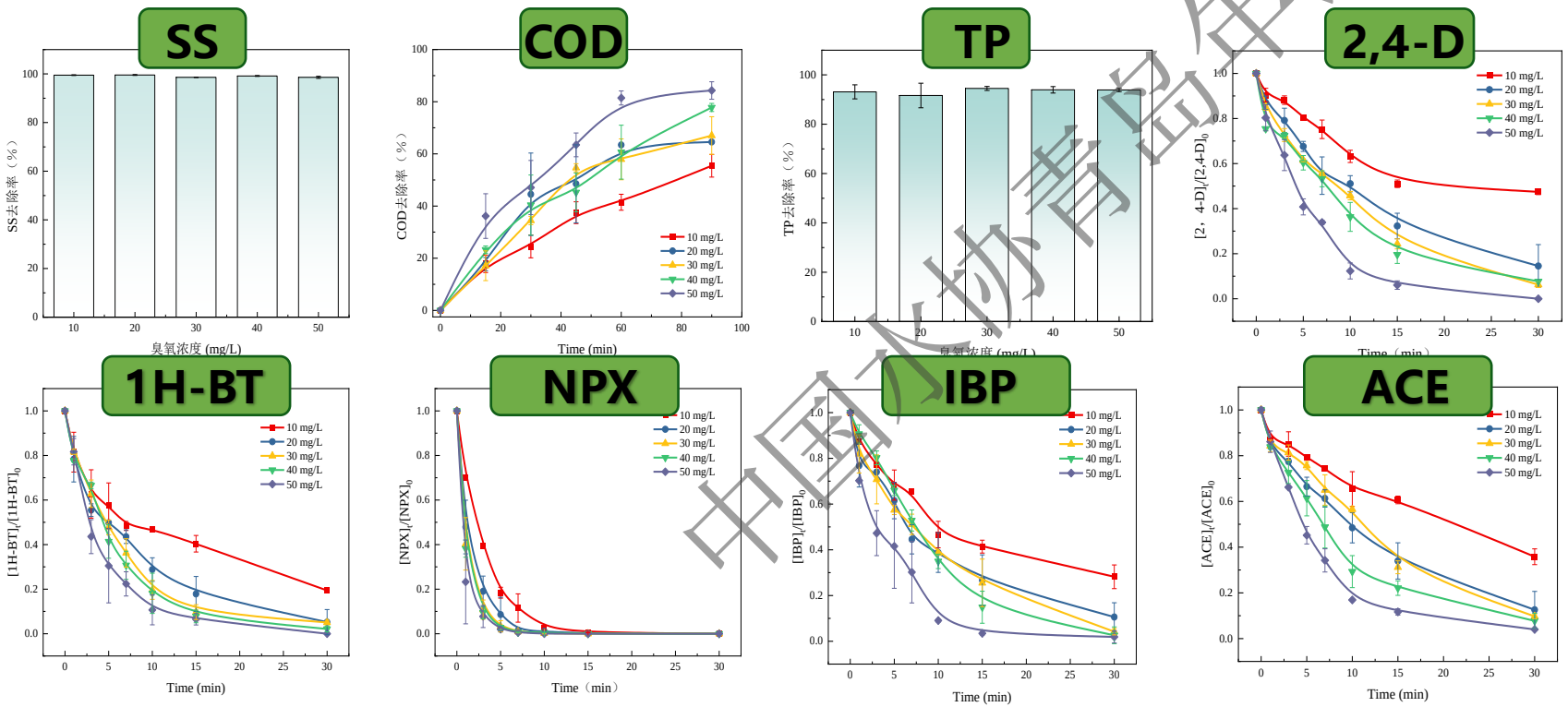
中国水协青岛年会专用

电絮凝原位催化臭氧溢流污染净化关键技术

电絮凝工艺 → 阳极金属离子作为絮凝剂→与悬浮颗粒形成絮体→吸附、网捕

臭氧氧化工艺 → 在催化剂作用下分解产生·OH→强氧化性→对污染物高效降解

耦合 → 原位多反应协同



- 臭氧浓度为50 mg/L时，对SS、COD、TP的去除率分别可达到98%、84%、94%
- 臭氧浓度为50 mg/L时，对新污染物几乎可以达到完全降解
- 电絮凝协同催化臭氧氧化对溢流污染污染物协同处理效率162.5%以上，十分显著

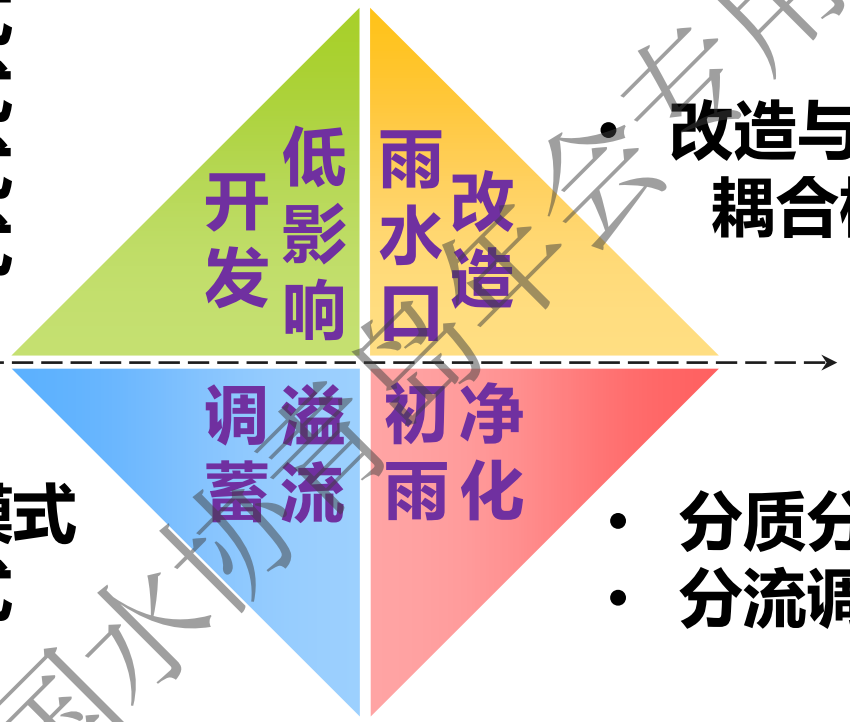
中国水协青岛年会专用

05 应用模式

中国水协青岛年会专用

应用模式

- 建筑小区模式
- 城市道路模式
- 城市绿地模式
- 雨水利用模式



- 改造与管理耦合模式

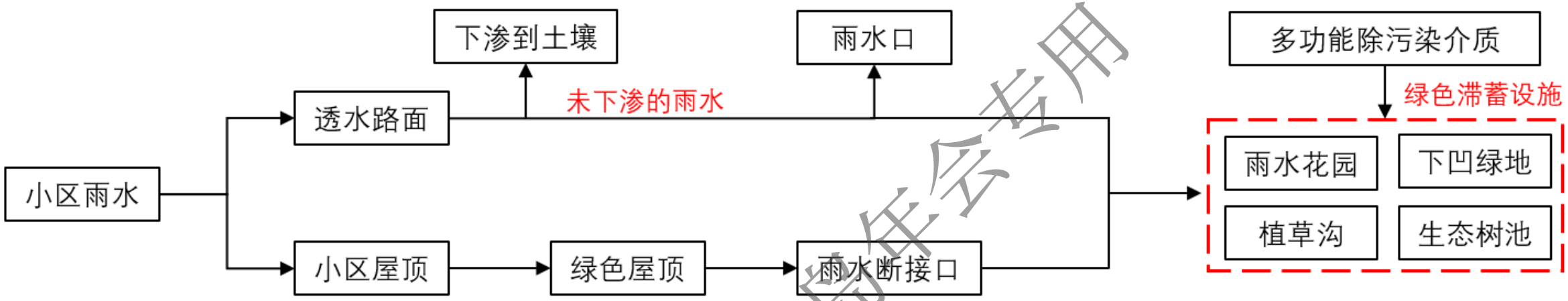
- 调蓄池技术模式
- 池厂联动模式

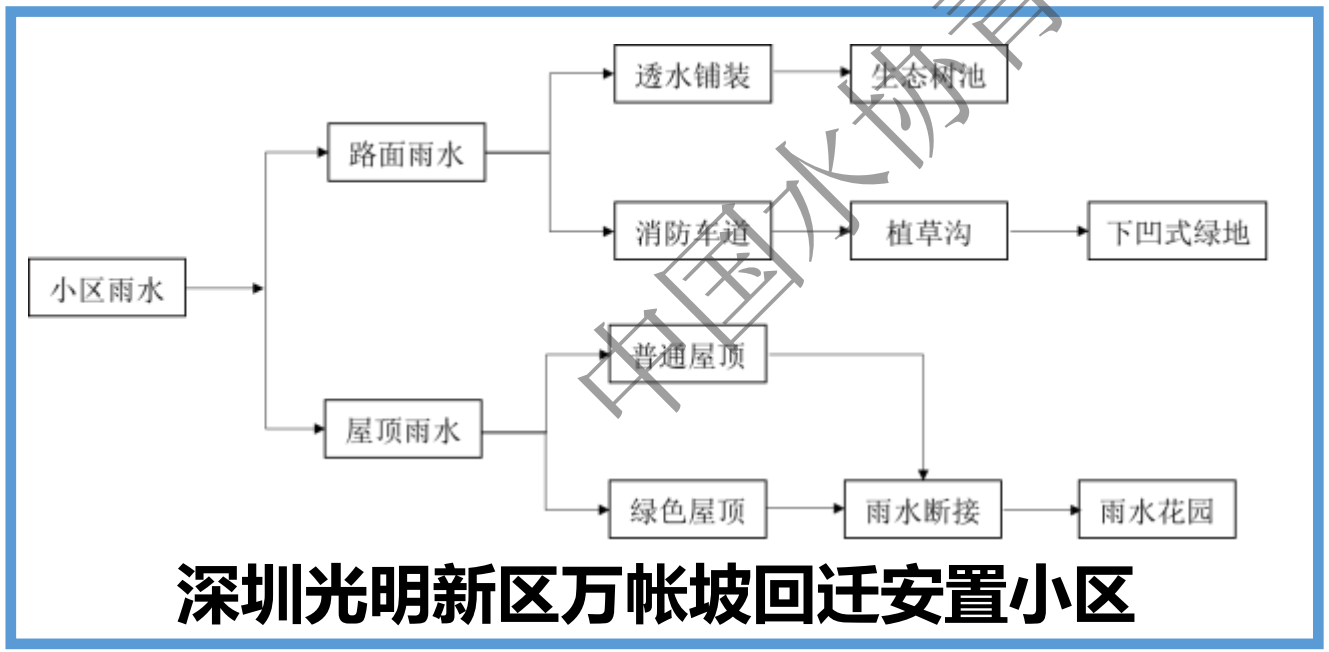
- 分质分流模式
- 分流调蓄模式

城镇应用技术模式

中国水协培训平台专用

建筑小区技术模式





深圳光明新区万帐坡回迁安置小区



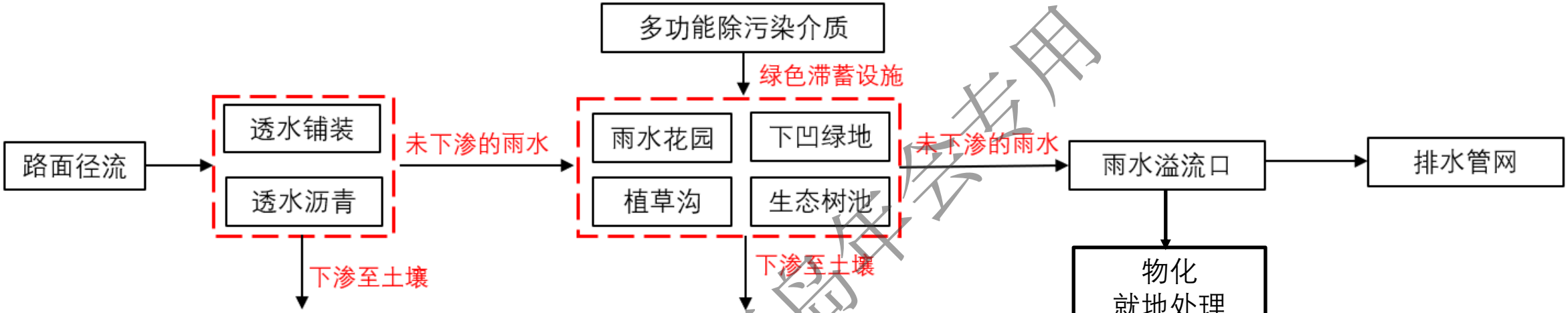






中国水协青岛年会专用

城市道路技术模式

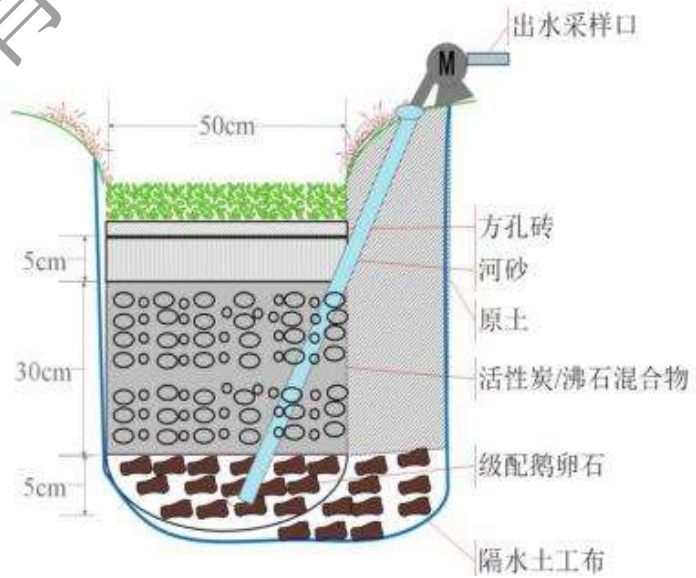




生物滞留带与雨水溢流口



道路植草沟



路边净化带



高效截污过滤雨水口

中国水协青岛年会专用

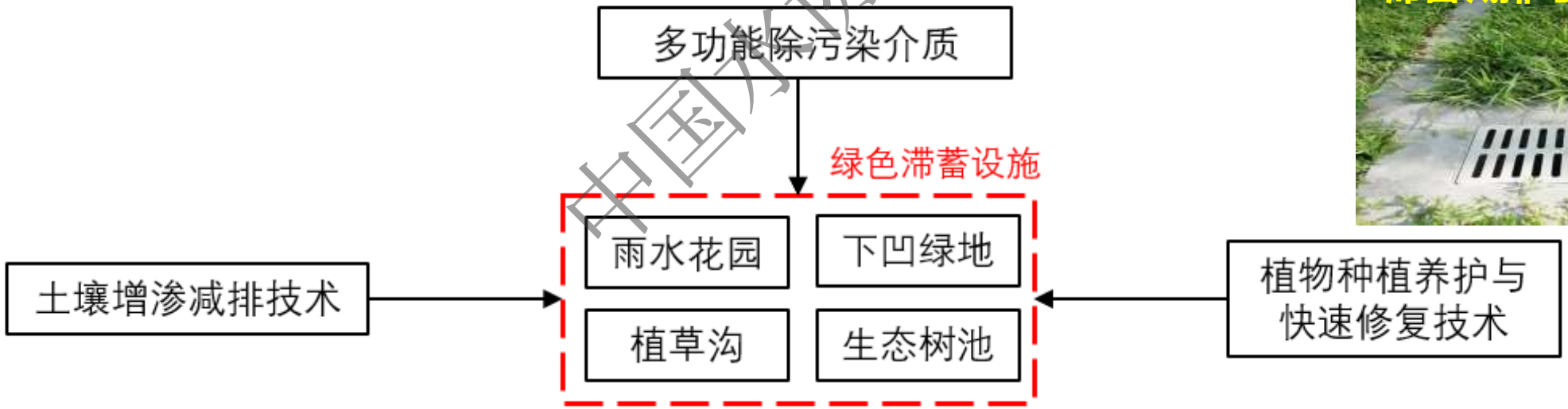
城市绿地技术模式





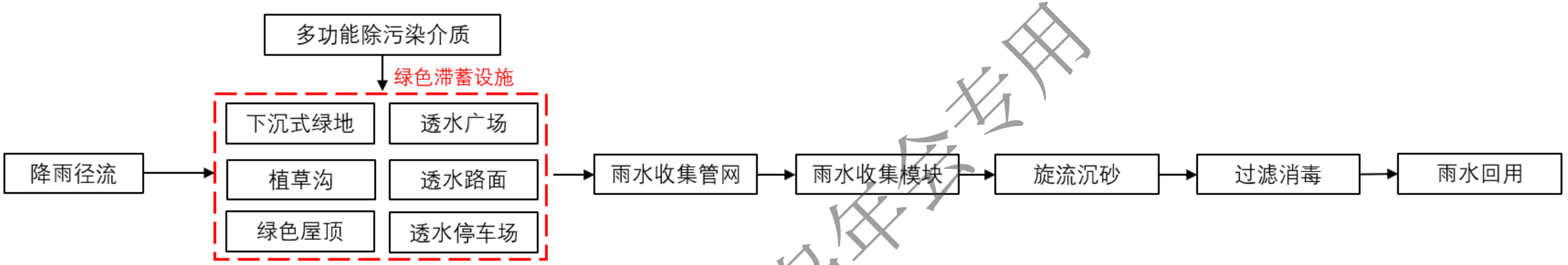




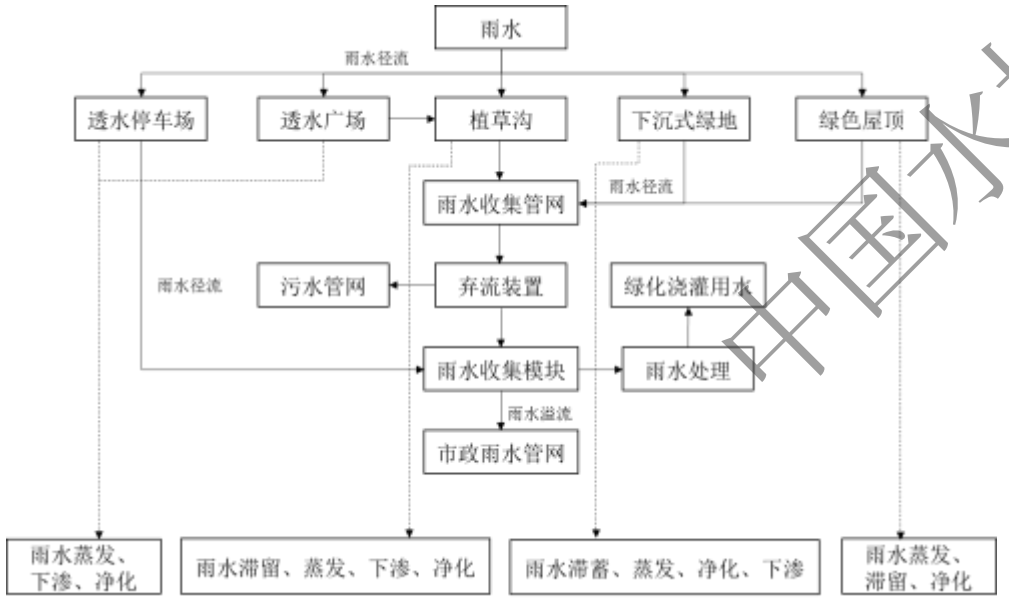


中国风协青岛工作站

雨水综合利用处理技术模式



深圳市光明新区群众体育中心雨水综合利用技术模式











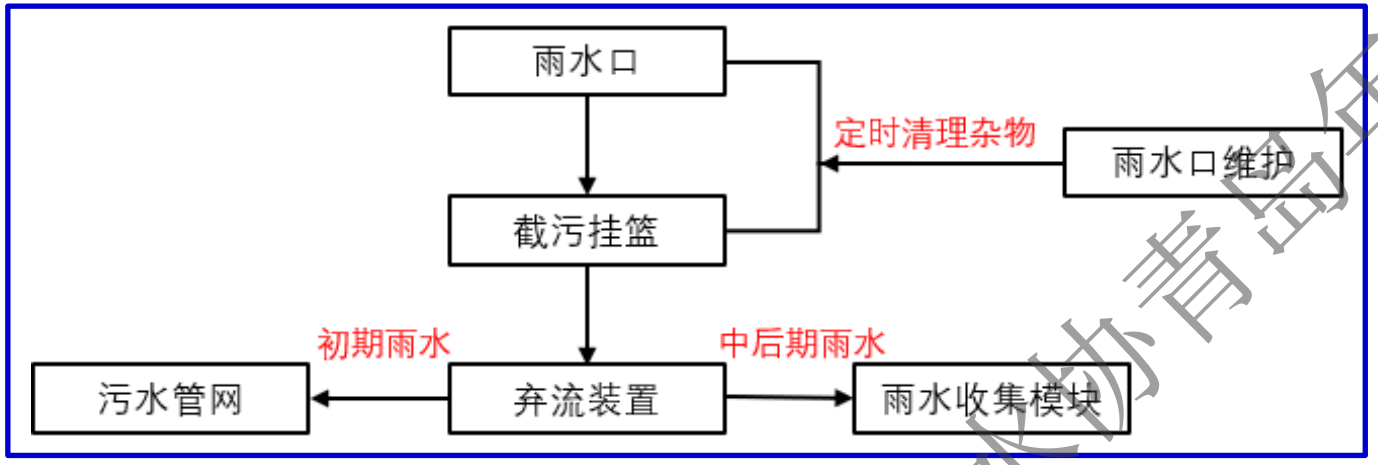


中国水协青岛年会专用

雨水口改造与管理技术模式

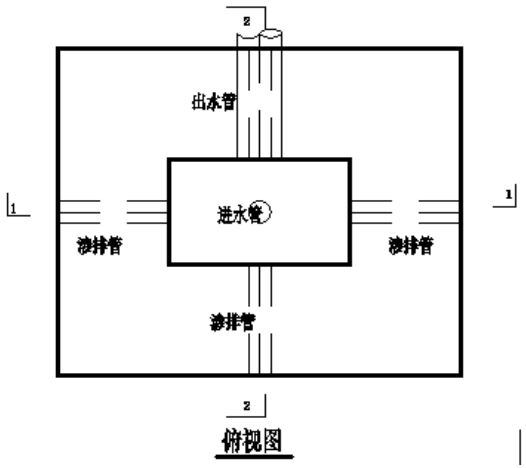
√ 针对传统雨水口易堵塞难清淤等问题；

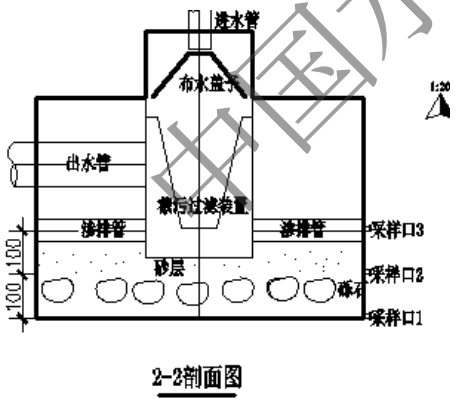
√ 减少了初期雨水中污染物在雨水井中的沉积，降低了雨水井的管理难度。

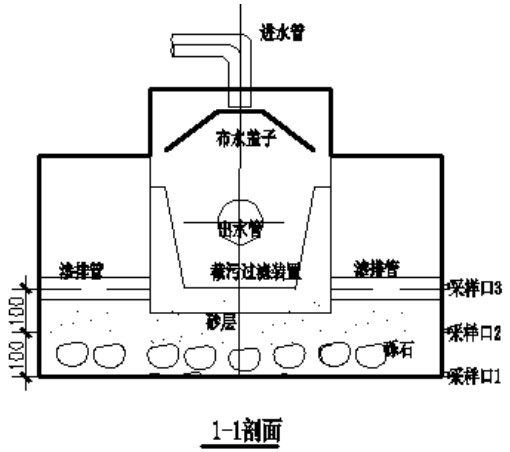










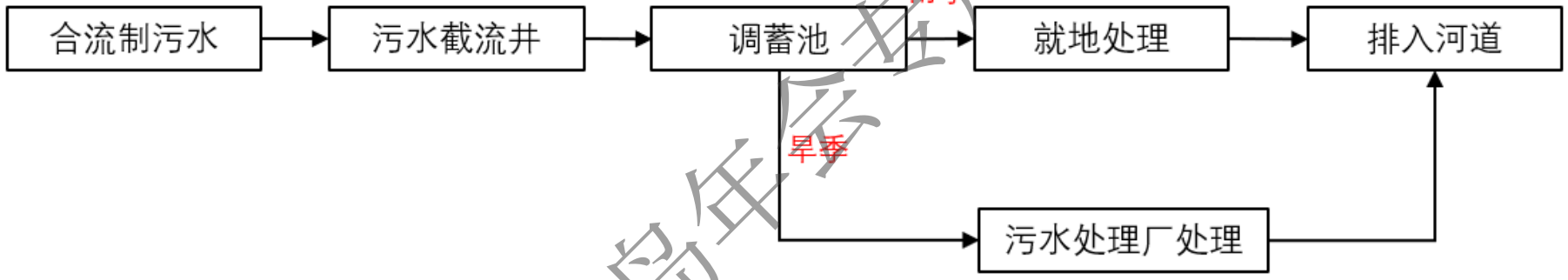




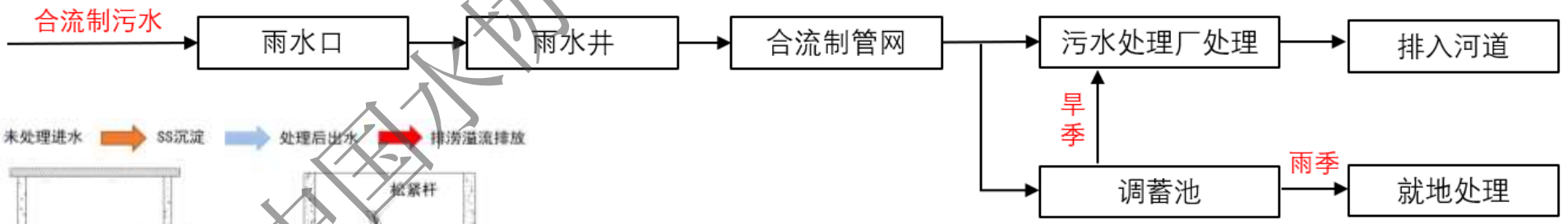
中国水协青岛年会专用

合流制排水体制溢流调蓄技术模式

① 截留-调蓄-就地处理技术模式

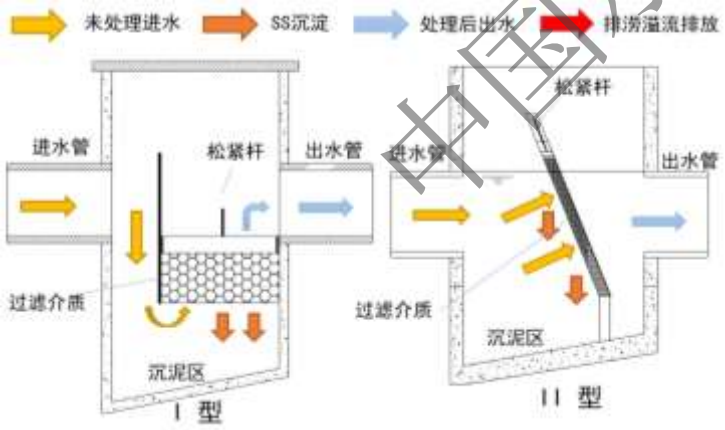


② 调蓄池-污水处理厂联动技术模式



末端漂浮介质过滤技术



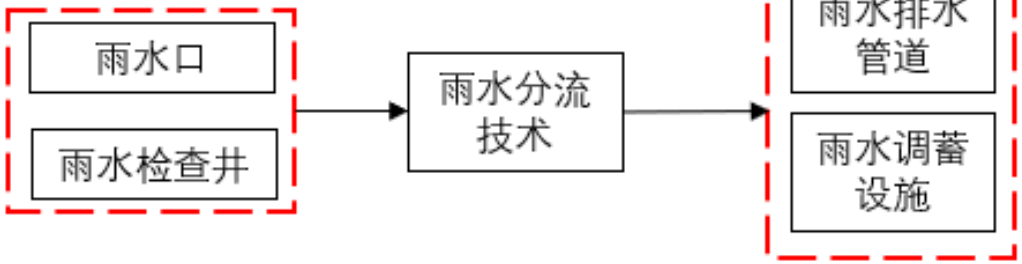


充分利用排水管网、调蓄系统及污水处理厂的存储与处理能力，实现雨季污染负荷减排能力最大化，排水系统入流的高时空精度预测，构建满足控制需求的系统动态模拟模型，解决了管网与污水厂控制变量时域不匹配的问题。

中国水协青岛年会专用

分流制初期雨水净化技术模式

① 分质分流技术模式



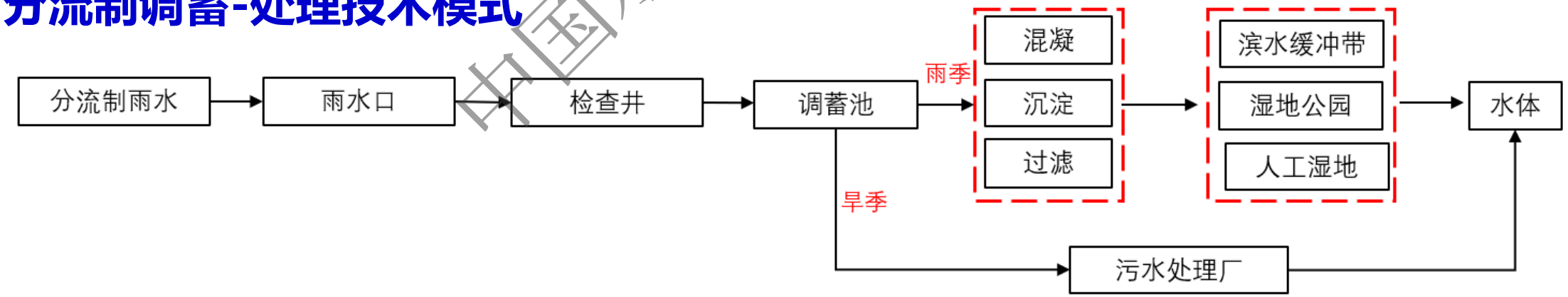




② 专管调蓄技术模式

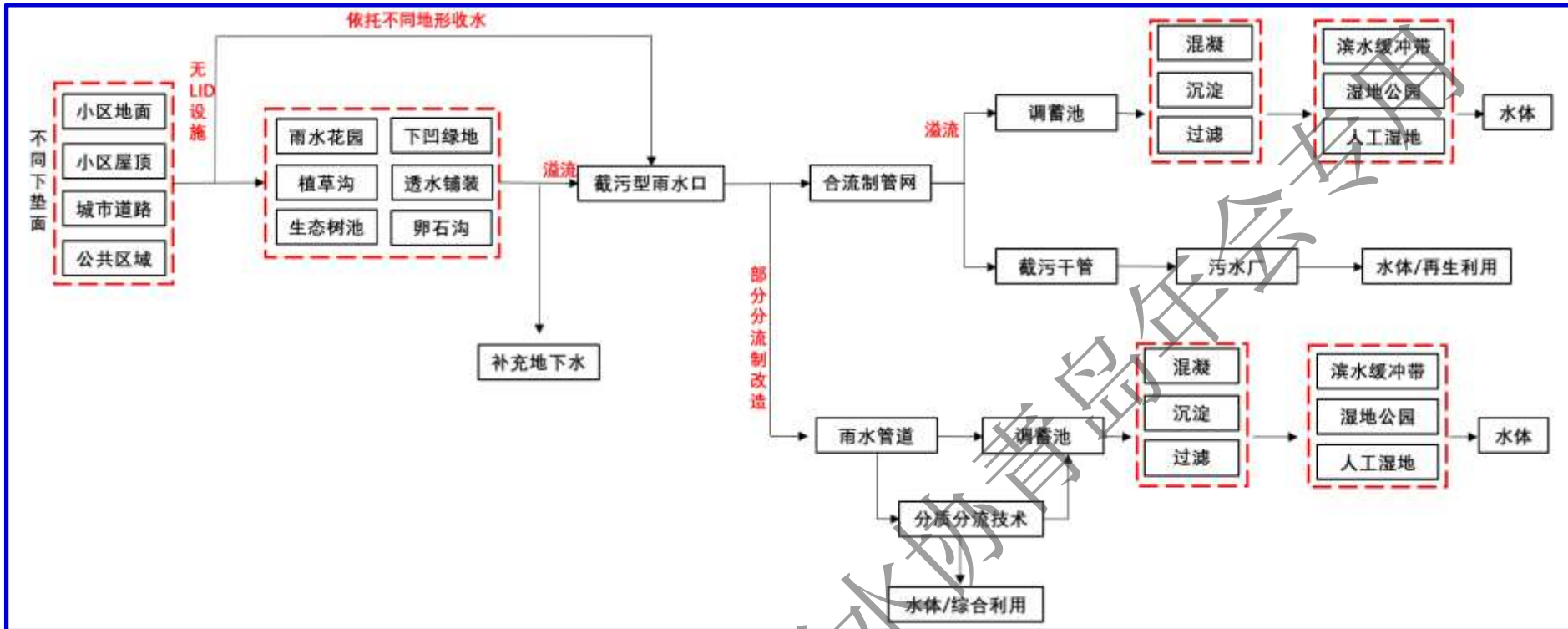


③ 分流制调蓄-处理技术模式



中国水协青岛工作站

合流制（老城区）径流污染控制技术模式

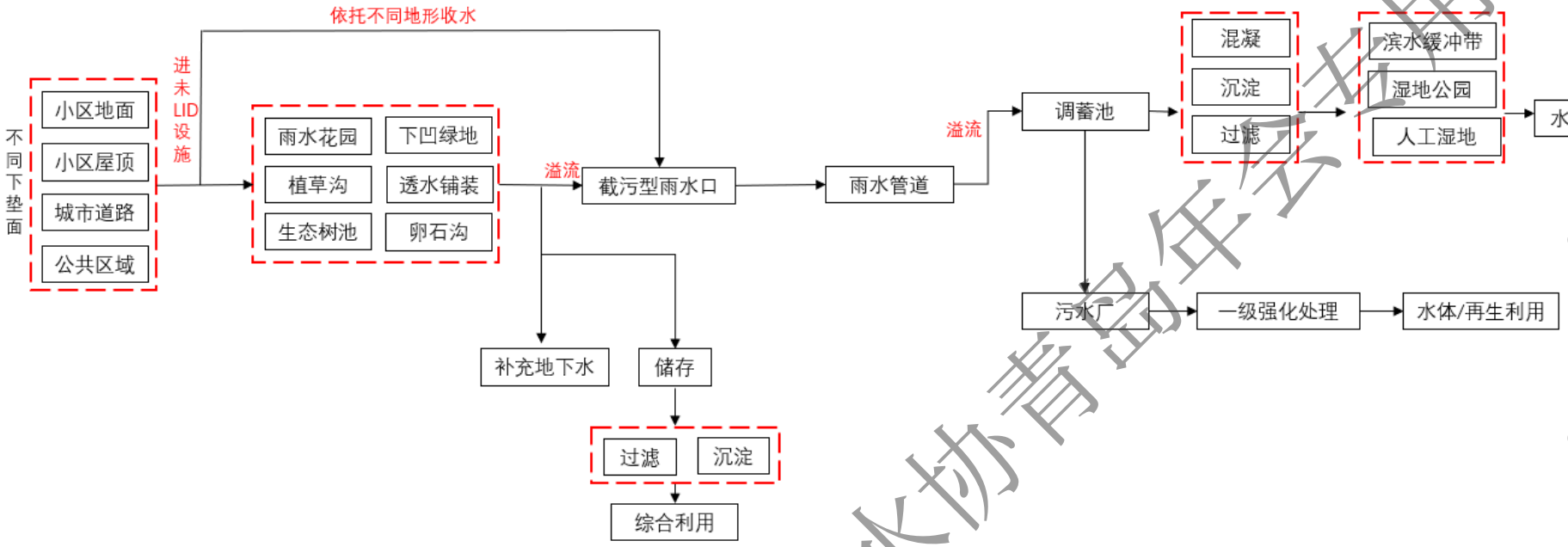


① 以排水管网分流制改造和溢流污染控制为主；
② 逐步开展低影响开发工程设施建设，经过截污和物理化学生态处理排入水体；
③ 分流改造，直接由地面进入截污型雨水口，再经过一系列物理化学生态处理后排入水体；
④ 强化溢流调蓄与处理。

区域	控制指标	污水厂一级A标（mg/L）	地表水IV类（mg/L）	径流污染物（mg/L）	源头削减去除率（%）	过程控制去除率（%）	后端治理去除率（%）	技术路线应用后效果（mg/L）
老城区	SS	10	-	518.01	65~90	41~85	50~90	0.78~53.48
	COD	50	30	569.92	42~60	31~53	65~90	10.71~79.83
	NH_3-N	5	1.5	3.96	17~25	23~48	55~83	0.26~1.14
	TN	15	1.5	8.83	20~30	37~50	40~80	0.62~2.67
	TP	0.5	0.3	2.57	16~35	20~40	30~90	0.1~1.21

中国水协青岛年会专用

分流制（新城区）径流污染控制技术模式



① 以雨水径流增渗、减排、滞流和调蓄为目标，构建以LID为核心的径流污染控制技术路线；

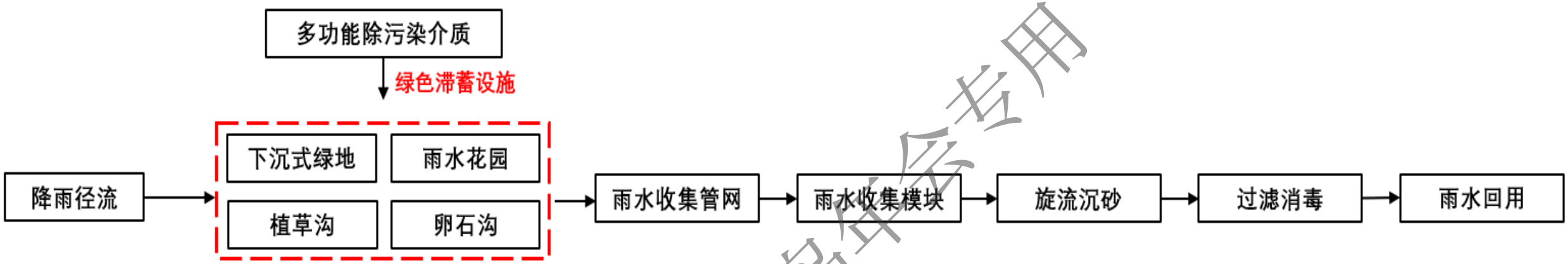
② 进入LID，经过截污和物化、生态处理和一级强化处理再生利用，排入水体；

③ 进入LID，直接补充地下水或综合利用。

区域	控制指标	污水厂一级A标（mg/L）	地表水IV类（mg/L）	径流污染物（mg/L）	源头削减去除率（%）	过程控制去除率（%）	后端治理去除率（%）	技术路线应用后效果（mg/L）
新城区	SS	10	-	402	41~93	41~85	50~90	0.42~69.97
	COD	50	30	301.65	50~100	20~40	30~70	0~84.46
	NH_3-N	5	1.5	1.40	20~70	15~40	30~60	0.1~0.67
	TN	15	1.5	3.59	22~51	30~50	20~50	0.44~1.57
	TP	0.5	0.3	0.49	10~40	20~40	20~90	0.018~0.28

中国水协青岛年会专用

分流制（新城区）径流污染控制技术模式



①以截留初期雨水中的污染物为主构建降雨径流污染控制技术路线；

②通过加入多功能除污介质的绿色低影响开发设施净化；

③经过物化处理后综合利用。

区域	控制指标	污水厂一级A标（mg/L）	地表水IV类（mg/L）	径流污染物（mg/L）	源头削减去除率（%）	过程控制去除率（%）	后端治理去除率（%）	技术路线应用后效果（mg/L）
工业区	SS	10	-	396	41~93	41~85	50~90	0.42~68.92
	COD	50	30	152.31	60~100	31~53	65~90	0~14.71
	NH_3-N	5	1.5	1.91	25~70	23~48	55~83	0.05~0.50
	TN	15	1.5	6.27	32~51	37~50	40~80	0.30~1.61
	TP	0.5	0.3	0.53	17~60	20~40	30~90	0.01~0.12

中国水协培训平台专用

06 结论与建议

中国水协青岛年会专用

结论与建议

针对于我国目前面临的城镇面源污染治理技术瓶颈

- **污染源识别与监测：** 确定了降雨径流污染的主要来源，解析了径流驱动面源污染对城镇水环境治理的影响。
- **工程控制与应用：** 通过源头削减、过程控制、末端治理的全链条治理模式有效地降低了城市降雨径流污染的负荷，改善了水体质量

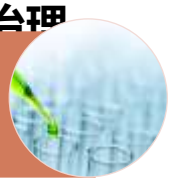
生态修复与治理

- 核算水环境容量，加强源头控制
- 提升对雨水径流的生态修复能力
- 推广生态工程措施



技术创新与研究

- 推动新型污染控制技术研究
- 构建应对污染的治理方案
- 推动多工艺联合治理



社会参与与宣传教育

- 提升居民、企业对雨水管理的重视
- 加强对径流污染的认知与参与度



政策导向与国际合作

- 强化相应的政策法规的建设
- 加强与国际合作，推动城市雨水治理与国际接轨



加强城镇面源污染控制，科技支撑美丽中国建设！！

中国水协青岛年会专用



仅供内部评审专用