

溢流污染特征解析及磁分离技术优化需求探究

肖波^{1,2}, 吉青青², 苗盛², 佟斯翰², 王慧^{1*}

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 中建环能科技股份有限公司, 四川 成都 610065)

摘要:以云南杞麓湖、湖北泗河和四川犀浦为研究对象,通过对不同降雨事件下水体环境质量的监测与分析,解析了溢流污染的水力动态、水质特征、污染物赋存规律和颗粒物粒径分布。研究表明:溢流污染在降雨5~22 min后发生,污染物以悬浮物SS、化学需氧量COD和总磷TP为主;SS、COD和TP的平均浓度分别超城镇污水一级A标准28.61、3.87和4.82倍,COD和TP中固态颗粒物占比分别达75.58%和57.65%,与SS呈强同步迁移特征;雨季溢流中颗粒物以中细颗粒为主,平均粒径达26.95 μm 。基于雨季溢流污染的特征分析,本研究明确了磁分离技术应对溢流复杂工况的关键参数边界,可为面向溢流污染治理的技术研发提供理论依据与设计指导。

关键词:雨季溢流污染;磁分离;污染特征

中图分类号:X52

文献标志码:A

文章编号:2095-4271(2026)05-0506-10

Analyses of overflow pollution characteristics and exploration of optimization requirements for magnetic separation technology

Xiao Bo^{1,2}, Ji Qingqing², Miao Sheng², Tong Sihan², Wang Hui^{1*}

(1.School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2.CSCEC SCIMEE Sci. & Tech. Co., Ltd., Chengdu 610065, China)

Abstract: This study took Qilu Lake in Yunnan, Sihe River in Hubei, and Xipu in Sichuan as research objects. By monitoring and analyzing the water environment quality under different rainfall events, it analyzed the hydraulic dynamics, water quality characteristics, pollutant occurrence patterns, and particle size distribution of overflow pollution. The research showed that overflow pollution occurred 5~22 minutes after rainfall, with pollutants mainly being Suspended Solids (SS), Chemical Oxygen Demand (COD), and Total Phosphorus (TP); the average concentrations of SS, COD, and TP exceeded the Class A standard for urban sewage by 28.61, 3.87, and 4.82 times, respectively. The proportions of solid particles in COD and TP reached 75.58% and 57.65%, respectively, showing strong synchronous migration characteristics with SS; the particles in rainy season overflow were mainly medium and fine particles, with an average particle size of 26.95 μm . Based on the analysis of the characteristics of rainy season overflow pollution, this study clarified the key parameter boundaries for magnetic separation technology to deal with complex overflow conditions, providing theoretical basis and design guidance for technology research and development aimed at overflow pollution control.

Keywords: overflow pollution in rainy season; magnetic separation technology; pollution characteristic

收稿日期:2026-05-27

*通信作者, E-mail: wanghui@tsinghua.edu.cn

引用格式:肖波,吉青青,苗盛,等.溢流污染特征解析及磁分离技术优化需求探究[J].西南民族大学学报(自然科学版),2026,52(5):506-515.

Xiao Bo, Ji Qingqing, Miao Sheng, et al. Analyses of overflow pollution characteristics and exploration of optimization requirements for magnetic separation technology [J]. Journal of Southwest Minzu University (Natural Science Edition), 2026, 52(5): 506-515.

在城市化进程加快背景下,雨季溢流污染已成为制约城市水环境质量持续提升的核心瓶颈之一^[1-4]。中央生态环境保护督察的案例通报表明:2023年上海市超3 500万吨溢流污水直排长江,溢流污染治理日趋紧迫^[5]。

针对溢流污染治理,国家层面已形成明确政策导向,《深入打好城市黑臭水体治理攻坚战实施方案》提出,应增设快速净化设施削减雨天污染负荷^[6]。武汉、昆明等城市已先行出台溢流污染控制相关地方标准与技术指南,但适配溢流污染场景的高效、快速、稳定、经济的就地处理技术仍存在显著短板。传统治理路径如:调蓄池扩建、管网改造等,普遍存在投资高、建设周期长,以及难以适配间歇运行等问题,难以满足建成区快速治理需求^[7-8]。磁分离水体净化技术(磁分离技术)因水力停留时间短、占地小、启动快,在河湖净化领域已较成熟,但传统磁分离系统主要针对稳

态低波动水质设计,在溢流污染“高负荷、强波动、瞬时冲击”工况下仍存在适配性不足^[9-11]。

本研究以我国典型溢流场景为研究对象,通过对云南杞麓湖流域、湖北十堰泗河流域和四川成都犀浦靠近府河区域的典型溢流排口水样的现场监测与采样分析,解析了溢流污染的水量动态规律、污染负荷特征、核心污染物相关性、赋存形态分布及颗粒物粒径特征,并提出适用于溢流场景的磁分离技术优化需求,为后续工艺研发提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究选取云南杞麓湖、湖北十堰泗河及四川成都犀浦3类典型溢流区域作为监测对象,分别代表湖滨农业-城镇混合区、山地水源地汇水区和高密度建成区,各研究区域采样情况如图1所示。

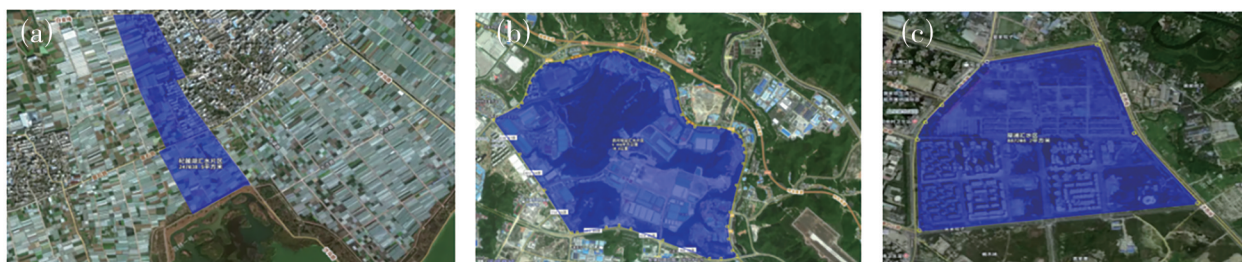


图1 监测点区域位置:(a)杞麓湖,(b)泗河,(c)犀浦

Fig. 1 Monitoring site locations : (a) Qilu Lake, (b) Sihe River, (c) Xipu

杞麓湖采样点:位于云南省通海县杞麓湖流域二街村,该区域汇水面积24.78万 m^2 ,汇水来源包括:居民区生活污水、农业废水,及降雨径流。排水系统以截流式合流制为主,雨污混接错接普遍,溢流污水最终汇入杞麓湖。

泗河采样点:位于湖北省十堰市泗河流域,该区域地处南北气候过渡带,山地地形为主,以合流制排水系统为主,降雨期间管网输送能力不足,易引发合流制溢流,溢流污水汇入泗河。

犀浦采样点:位于四川省成都市郫都区犀浦且紧邻府河区域,该区域汇水面积88.73万 m^2 ,无规模化工农业生产,污染以城市生活污水与地表径流为主。排水系统合流制与分流制并存,受建成区空间限制,雨污错接混接现象普遍,旱季污水漏排、雨季溢流频发。

1.2 样品采集

监测时间为2023年7月—9月,共监测9场降雨事件,覆盖小雨、中雨、大雨及暴雨,具体降雨事件参数见表1。

采用“前密后疏”采样方式:溢流发生后30 min内每5 min采样1次,之后每10 min采样1次。同步监测降雨强度与溢流量。水样采用聚乙烯瓶密封避光保存,同步使用自动雨量计和超声波流量计实时监测降雨强度与溢流量。

1.3 分析方法

水样收集后立即进行室内分析,未进行分析的样品放入冰箱中4℃暗处冷藏,并在24 h内分析完毕。其中,常规水质指标如悬浮物(SS)按照GB/T11901-1989、化学需氧量(COD)按照HJ 828—2017、总氮(TN)按照HJ 636-2012、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)按照HJ 535-

表 1 监测降雨场次信息
Table 1 Rainfall event monitoring information

序号	溢流地点	降雨等级	降雨量(mm)	降雨历时(min)	平均雨强(mm/h)	降雨到出现溢流时间(min)
1	杞麓湖	小雨	4.5	90	3.00	20
2	杞麓湖	大雨	27	115	14.09	7
3	杞麓湖	中雨	12.6	105	7.20	12
4	泗河	暴雨	37.2	48	46.50	3
5	泗河	中雨	12.6	125	6.05	8
6	泗河	小雨	4.6	112	2.46	16
7	犀浦	暴雨	81	87	55.86	5
8	犀浦	中雨	15.4	118	7.83	9
9	犀浦	大雨	30.3	96	18.94	6

2009 和总磷(TP)按照 GB/T 11893-1989. 污染物赋存形态采用滤膜分离法,水样通过 0.45 μm 醋酸纤维滤膜真空过滤,测定溶解态浓度,计算各污染物固态与溶解态占比. 颗粒物粒径分布采用激光粒度分析仪(Malvern Mastersizer 3000,测定范围 0.01~3 000 μm)测定,获取平均粒径、 $D_x(10)$ (累积粒径分布 10%对应的特征粒径)、 $D_x(50)$ (累积粒径分布 50%对应的特征粒径)和 $D_x(90)$ (累积粒径分布 90%对应的特征粒径)等参数.

2 结果与讨论

2.1 溢流量随降雨变化特征及对磁分离技术性能影响分析

溢流量对降雨的响应特征是处理技术设计的核心依据,其启动时间、峰值流量和波动规律直接决定处理设备的响应速度、处理规模与运行稳定性要求. 表 1 监测结果显示,溢流对降雨具有显著快速响应特征,3 个研究区域在不同降雨等级下溢流启动时间集中于降雨后 5~22 min,且随降雨强度增大而缩短. 这归因于合流制管网对初期径流的快速汇流特性:降雨初期地表径流快速汇集,管网水位迅速抬升,超出截流能力后溢流启动. 该结果与已有研究一致^[12],表明溢流就地处理设备需具备 ≤ 5 min 启动能力的核心时间约束.

图 2 展示了不同溢流口在不同降雨强度事件下,降雨强度与溢流量随溢流时间的动态变化趋势,同时呈现了各场次溢流量随降雨强度的响应

规律. 如图 2 所示,溢流量峰值与降雨强度呈显著正相关,3 个区域峰值范围为 0.01~0.44 m^3/s (折合日流量 1 503~38 137 m^3/d),最大值与最小值相差 25 倍以上. 溢流量峰值较降雨强度峰值存在 15~60 min 滞后,其中暴雨工况下滞后 15~30 min,中小雨工况下延长至 30~60 min,主要源于管网的调蓄作用. 不同降雨等级下溢流量波动特征差异显著. 其中,暴雨事件中溢流量呈典型“单峰型”,溢流发生后短时间内快速攀升至峰值而随后迅速回落,如泗河暴雨事件溢流量 30 min 内变化幅度超 400 倍,变异系数达 0.97,水力冲击特征显著. 大雨事件呈“单峰为主、小幅震荡”特征,波动幅度较大,峰值流量低于暴雨事件,如杞麓湖大雨事件中溢流量峰值为 0.128 5 m^3/s ,出现在溢流后 30 min,随后出现小幅波动,50 min 降至 0.051 2 m^3/s ,80 min 又升至 0.107 1 m^3/s ,变异系数达 0.70. 中雨事件呈“多峰型”与降雨强度的多峰变化趋势一致,存在明显滞后,如犀浦中雨事件中降雨强度在 30 min 达到最大峰值,溢流量峰值滞后至 70 min 出现,整个过程中出现多次小幅波动. 小雨事件呈“低流量、多峰振荡”特征,峰值流量小、波动平缓,如杞麓湖小雨事件中,溢流量峰值为 0.01 m^3/s ,出现在降雨后 40 min,随后在 0.01~0.015 m^3/s 范围内波动,变异系数为 0.73.9 场降雨事件溢流量变异系数范围为 0.63~0.97,该波动特征受降雨强度时空变异性、管网水力特性和下垫面产流规律共同驱动^[8],要求处理设备具备更强的水力负荷适应性与运行稳定性.

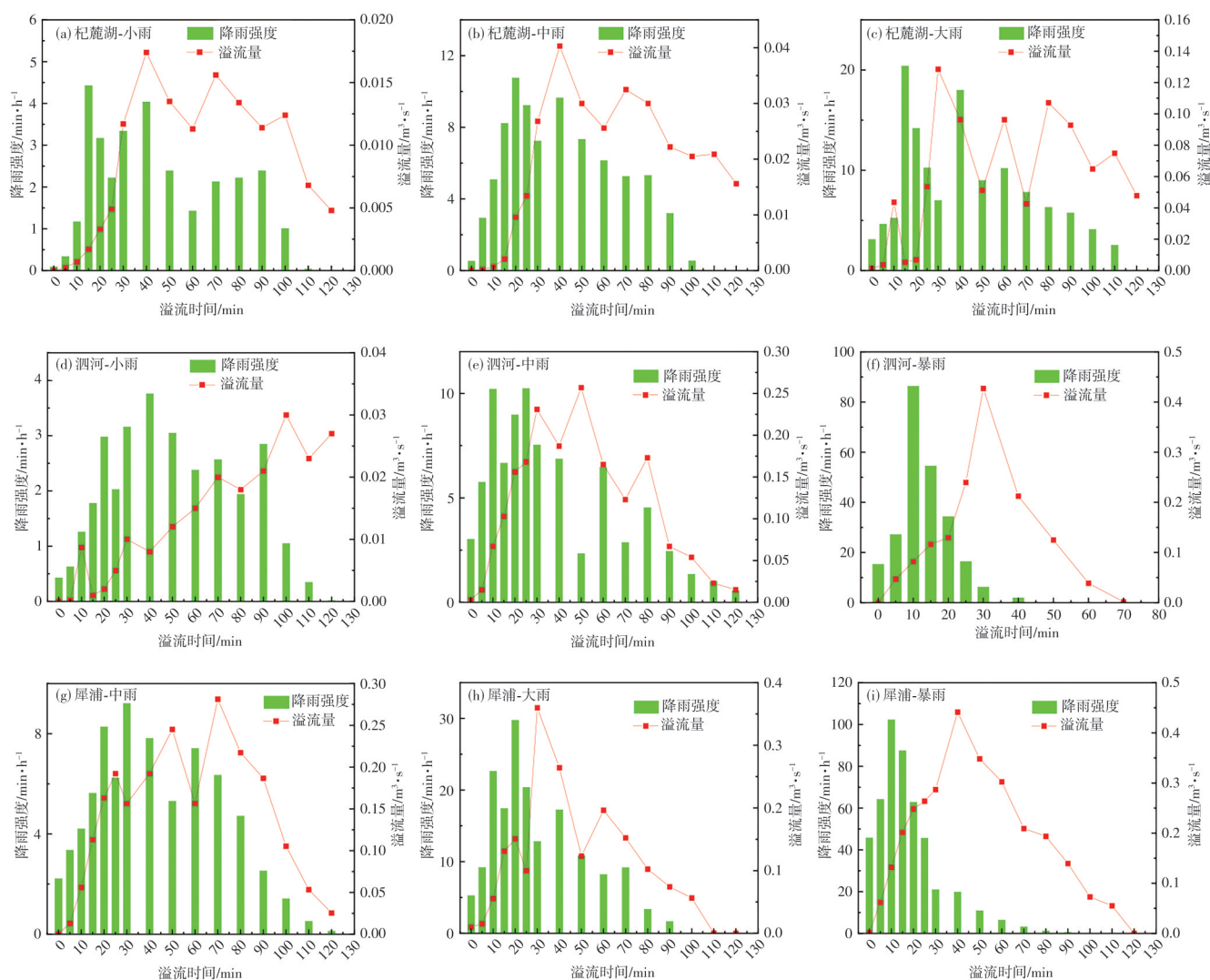


图2 不同降雨类型下不同溢流口的溢流量响应变化

Fig. 2 Response variation of overflow volume at different outlets under various rainfall types

溢流量“快、大、变”特征直接决定磁分离技术适配方向. 响应速度方面, 降雨至溢流启动5~20 min, 传统磁分离4~6 min启动周期可满足要求, 但需提升运行中流量响应速率; 处理规模方面, 峰值跨度超25倍, 传统设备600~25 000 m³/d的规模难以覆盖暴雨工况, 需提升至35 000 m³/d并预留10%~15%冗余; 运行稳定性方面, 溢流量在50%~115%设计流量范围内剧烈波动, 易导致固液分离效果衰减. 因此, 磁分离技术需强化设备宽范围水力负荷适应性与抗冲击能力, 可以从两方面进行优化: 一是构建自动化智能控制系统, 依托雨强与流量信号实现5 min内从待机到满负荷运行切换; 二是优化设备结构与工艺参数,

确保流量剧烈波动下维持稳定的磁混凝效能与固液分离效率.

2.2 溢流水质随降雨变化特征及对磁分离技术性能影响分析

溢流水质是处理技术选型与工艺参数设计的核心依据, 本研究针对9场降雨事件系统分析了溢流水质的变化特征. 如表2和表3所示, 溢流污染中各污染物平均浓度均远超《城镇污水厂污染物排放标准》(GB18918-2002)一级A限值, 其中SS、COD、TP的超标倍数分别达28.61倍、3.87倍、4.82倍, 显著高于NH₃-N(2.75倍)和TN(1.40倍). 如表3所示为不同溢流事件的水质平均变异系数, 从浓度波动来看, SS和COD的变异系数平均值均为0.45, 远高于TP(0.23)、

$\text{NH}_3\text{-N}$ (0.18)和 TN (0.20),表明其浓度变化更为剧烈. 上述研究表明溢流污染治理应重点关注 SS 、 COD 和

TP ,这三类污染物不仅超标严重,且浓度波动大,对处理技术的抗冲击能力和去除效率提出了更高要求.

表 2 不同溢流事件的水质平均浓度

Table 2 Average water quality concentrations during different overflow events

各污染指标	不同溢流事件中的水质平均值/ mgL^{-1}	城镇污水处理厂污染物排放标准(GB18918-2002) 一级 A 标准限值/ mgL^{-1}	相对标准超标倍数
SS	286.10	10.00	28.61
COD	193.39	50.00	3.87
TP	2.41	0.50	4.82
$\text{NH}_3\text{-N}$	13.75	5.00	2.75
TN	21.06	15.00	1.40

表 3 不同溢流事件的水质平均变异系数

Table 3 Coefficients of variation of water quality for different overflow events

各污染指标	杞麓湖小 雨水质变 异系数	杞麓湖大 雨水质变 异系数	杞麓湖中 雨水质变 异系数	泗河暴雨 水质变异 系数	泗河中雨 水质变异 系数	泗河小雨 水质变异 系数	犀浦暴雨 水质变异 系数	犀浦中雨 水质变异 系数	犀浦大雨 水质变异 系数	水质变异 系数 平均值
SS	0.17	0.50	0.33	1.00	0.32	0.13	0.72	0.26	0.64	0.45
COD	0.29	0.42	0.44	0.82	0.45	0.23	0.62	0.26	0.48	0.45
TP	0.36	0.11	0.19	0.20	0.41	0.28	0.17	0.20	0.16	0.23
$\text{NH}_3\text{-N}$	0.20	0.18	0.13	0.16	0.16	0.22	0.15	0.21	0.25	0.18
TN	0.19	0.20	0.17	0.30	0.15	0.15	0.20	0.15	0.30	0.20

本研究 9 场雨事件的溢流水质中各污染物随溢流变化趋势如图 3 所示. 其中, SS 作为溢流污染中最主要的污染物之一, 其浓度变化直接反映了地表冲刷和管道沉积物再悬浮的强度, 是影响磁分离技术处理负荷的关键参数. 研究表明, SS 整体呈“降雨强度越大、浓度越高、波动越剧烈”的规律, 主要源于降雨初期强烈的地表冲刷和管道沉积物再悬浮作用. SS 浓度范围 54.44~1 103.35 mg/L , 变异系数 0.13~1.00. 暴雨事件 SS 浓度最高, 如泗河暴雨 SS 最大值达 1 103.35 mg/L , 溢流后 15 min 达峰值, 随后快速下降 (30 min 降至 343.22 mg/L , 60 min 降至 54.44 mg/L), 呈典型“单峰型”变化. COD 作为反映有机物污染程度的核心指标, 其浓度变化与 SS 浓度密切相关, 不同降雨等级下的 COD 浓度特征呈现显著的区域差异和雨强依赖性^[13]. 研究表明 COD 浓度范围 39.21~642.12 mg/L , 变异系数 0.23~0.82, 变化趋势与 SS 高度一致, 峰值出现时间略滞后于 SS ^[14], 这主要是由于 COD 的主要载体是 SS . TP 是水体富营养化的核心污染物, 研

究表明研究区 TP 浓度为 0.86~5.95 mg/L , 变异系数 0.11~0.41, TP 变化规律与 SS 、 COD 不同, 并未随雨强增大持续上升, 整体表现为小雨、中雨浓度偏高, 暴雨浓度偏低. 这主要由于小雨、中雨时地表累积磷污染物逐步汇入水体, 雨水稀释作用弱, 浓度偏高; 暴雨虽会加剧地表与管道沉积物中磷的释放, 但强降雨带来的稀释效应占据主导, 最终浓度下降^[15]. TN 是水体氮污染关键指标, 数据显示 TN 浓度 11.25~35.47 mg/L , 变异系数 0.15~0.30. TN 变化趋势与 TP 相近, 小雨、中雨浓度更高、暴雨偏低, 整体波动更小, 雨强较小时稀释作用弱, 氮污染物持续汇入使浓度偏高; 暴雨稀释效应占主导, 浓度回落. $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 TN 主要组分, 受雨强、污水性质及氮转化作用影响, 浓度 6.76~23.45 mg/L , 变异系数 0.13~0.25, 同样表现为小雨、中雨浓度高于暴雨, 且波动幅度最小, 这主要因为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 多为溶解态, 受泥沙冲刷影响小, 雨水稀释是浓度随雨强变化的主因.

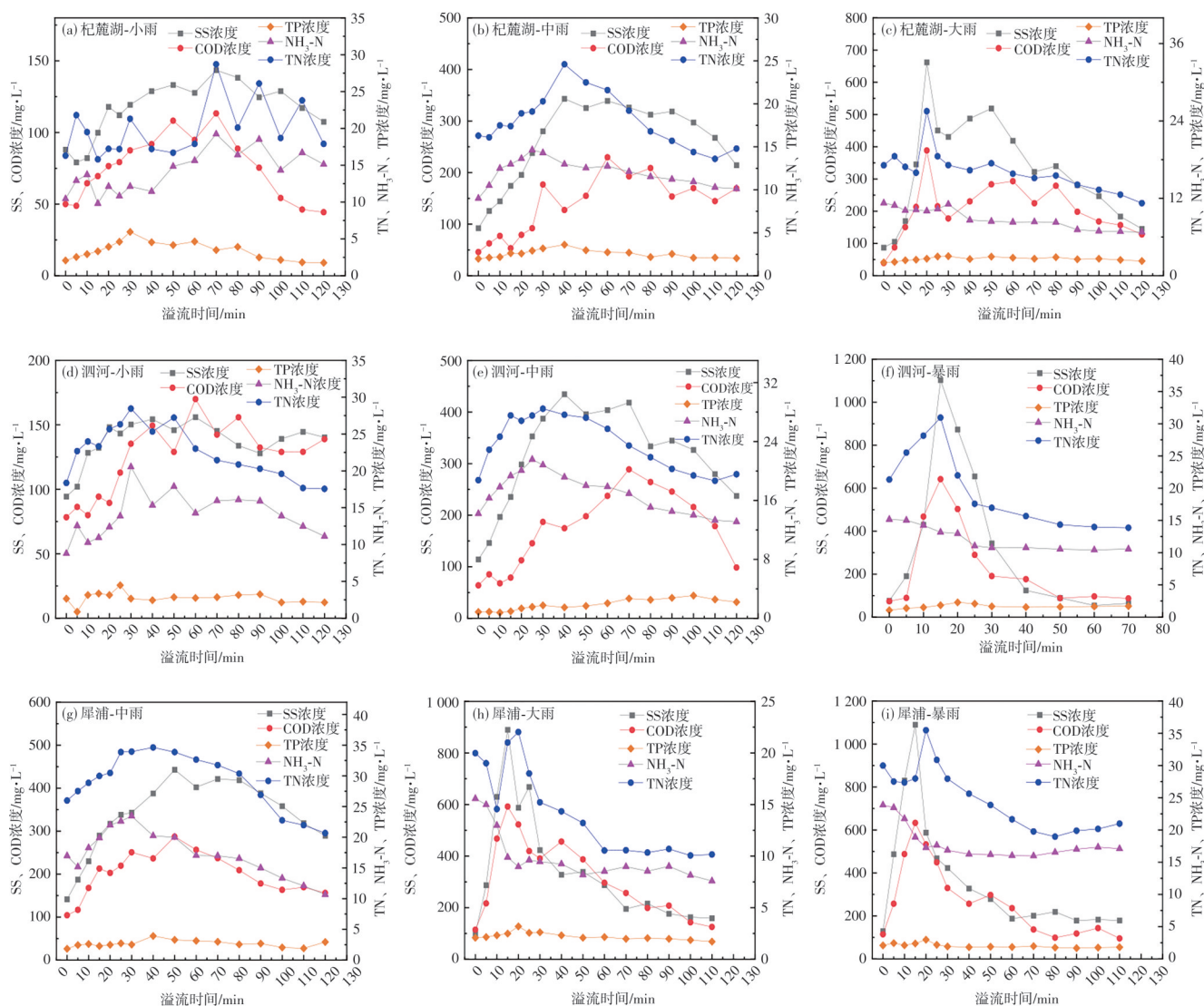


图3 不同降雨类型下不同溢流口的溢流水质变化

Fig. 3 Variation of overflow water quality at different outlets under various rainfall types

综上所述,溢流污染水质具有浓度高、波动大、变化快的特点,该类污水各污染物浓度跨度大,SS短时急剧飙升,对处理系统抗冲击能力要求极高。传统磁分离技术在常规稳态场景(如市政污水提标、河湖水质净化)中,虽对SS、TP、COD具有一定去除效果,但其设计通常基于SS浓度相对较低且水质平缓的工况,面对溢流污染极端工况,磁混凝、磁盘吸附容量及运行稳定性均存在短板,为适配溢流污染特性,磁分离技术需从以下三方面进行系统性强化。首先,需提升磁混凝单元的抗冲击与快速絮凝能力,如优化混凝剂与磁介质配方,强化混合与絮凝反应动力学,确保在高浓度、快变化的进水条件下,仍能快速形成密实、

高磁性、抗剪切的磁絮团,为后续高效分离奠定基础。其次,需增强磁分离单元的高负荷处理稳定性,如通过提升磁盘磁场强度、优化流道设计来提高吸附容量,以应对短时间内涌入的大量磁性絮体,防止高负荷下出现“跑泥”或处理效率下降,保障SS及附着污染物的高效去除。最后,需构建水质自适应的智能精准调控系统,如集成在线水质监测(如浊度/SS、TP)、智能加药模型与快速执行机构,实现药剂投加、搅拌强度、磁盘转速等关键参数的实时动态优化与分钟级响应,以匹配水质的瞬时剧烈波动,确保处理效果稳定达标。通过以上针对性提升,磁分离技术才能突破传统性能边界,真正具备应对溢流污染极端水质冲击

的“强抗负荷、快响应、稳输出”的综合能力,实现以SS高效去除为核心,协同削减COD、TP的多污染物控制目标.

2.3 污染物相关性与赋存形态特征及对磁分离技术的影响

SS作为溢流污染中最主要的颗粒物载体,其与其他污染物的相关性直接反映了污染物的迁移特性^[16].如表4,相关性分析结果表明,SS与COD相关系数平均值为0.826 1,在所有降雨等级和区域中均呈强正相关,

表明COD主要吸附于SS表面随SS迁移,相关系数随降雨强度增大而升高(泗河暴雨达0.927 3). SS与TP相关系数平均值为0.566 5,呈中等正相关,随降雨强度升高,表明TP部分吸附于SS表面,其中小雨0.344 5、中雨0.543 6、大雨及暴雨0.692 3.SS与TN相关系数平均值为0.476 4,中等正相关,表明有少量TN吸附于SS表面.由于NH₃-N主要以溶解态存在,SS与NH₃-N相关系数平均值仅0.276 7,相关关系最弱,且随降雨强度增大而显著降低,与李思远的研究结论一致^[17].

表4 不用溢流事件主要污染物相关性
Table 4 Correlation of main pollutants in different overflow events

溢流事件	地点	降雨等级	SS/COD	SS/TP	SS/TN	SS/NH ₃ -N
1	杞麓湖	小雨	0.693 7	0.377 5	0.285 7	0.545 4
2	杞麓湖	大雨	0.890 4	0.749 2	0.588 8	0.085 5
3	杞麓湖	中雨	0.837 1	0.535 6	0.424 1	0.303 1
4	泗河	暴雨	0.927 3	0.694 8	0.636 6	0.206 6
5	泗河	中雨	0.796 2	0.536 3	0.449 8	0.369 8
6	泗河	小雨	0.664 7	0.311 6	0.320 0	0.539 5
7	犀浦	暴雨	0.910 5	0.610 0	0.548 9	0.287 5
8	犀浦	中雨	0.816 1	0.559 0	0.425 7	0.138 6
9	犀浦	大雨	0.898 6	0.715 2	0.608 0	0.014 7
相关性平均值			0.826 1	0.565 5	0.476 4	0.276 7

为进一步研究SS与各污染物相关性,明确各类污染物在溢流污水中的固液分配特征,本文以泗河3个溢流场次开展污染物赋存形态分析.如图4,污染物赋存形态分析表明,COD赋存以固态为主,固态占比范围64%~91%,平均75.58%,固态占比随降雨强度增大而升高.TP赋存形态部分为固态,固态占比范围38%~79%,平均57.65%,也随降雨强度升高.TN以溶解态为主,溶解态占比平均为72.16%,固态占比仅27.84%.

综上,固态COD、TP占比高且与SS相关性较强,表明“强化SS去除”是协同削减COD与TP的关键途径^[18].磁分离技术优化需以高效去除SS为核心,同步削减COD和部分TP,并优化磁混凝投加策略,强化溶解性TP去除;TN、NH₃-N以溶解态为主,单一磁分离去除效果有限,需耦合其他处理单元.

2.4 颗粒物粒径分布特征及对磁分离技术的影响

颗粒物粒径分布是影响磁分离技术处理效

能的关键物理参数,直接决定了磁混凝工艺的絮凝效率和磁盘分离单元的吸附效果^[19].如图5和表5,溢流污水颗粒物粒径分布范围广(0.06~3 000 μm),9场溢流事件综合平均粒径26.95 μm,整体偏细.Dx(10)平均值14.30 μm,Dx(50)平均值53.05 μm,Dx(90)平均值192.94 μm,仅少量颗粒粒径超过200 μm.颗粒物粒径分布集中区间为10~76 μm,该区间颗粒物占总量51%~77%,是污染物吸附和携带的主要载体,而陈黄隽等研究表明溢流污水中颗粒物粒径分布集中于10~125 μm^[3].除此,颗粒物粒径呈显著降雨强度依赖性,小雨条件下平均粒径3.46~12.00 μm;中雨条件下19.90~29.60 μm;大雨及暴雨条件下34.30~41.80 μm.这一规律的主要原因是降雨强度越大,地表冲刷和管道沉积物再悬浮作用越强,能够携带更大粒径的颗粒物进入溢流污水,导致整体粒径增大.

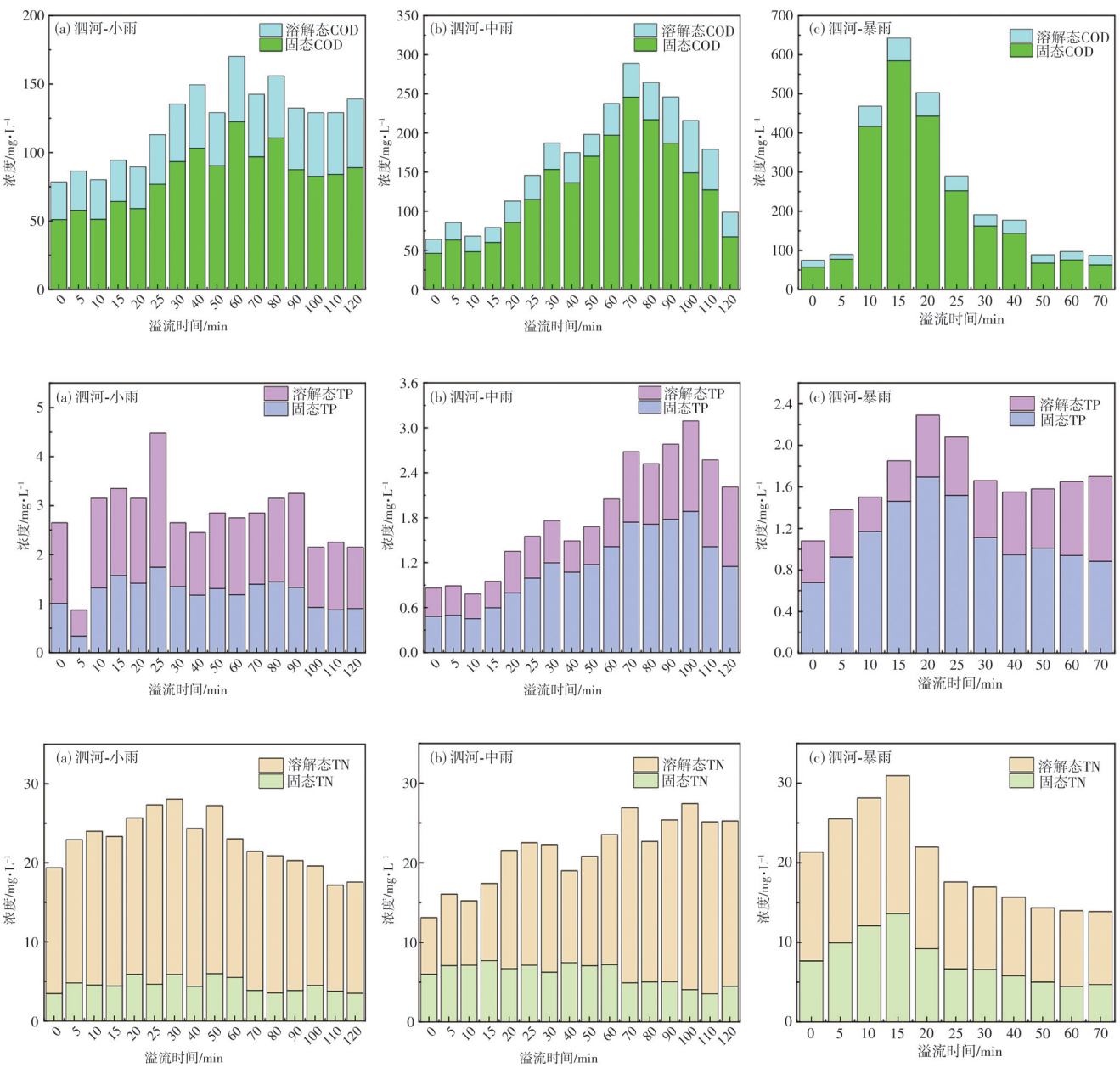


图4 泗河3场溢流事件COD、TP和TN赋存形态

Fig. 4 Occurrence forms of COD, TP, and TN during three overflow events in Sihe River

表5 9场溢流事件溢流污染颗粒特征粒径和平均值

Table 5 Characteristic particle sizes and average values of overflow pollutants in nine overflow events

不同特征粒径	杞麓湖-小雨各特征粒径值/ μm	杞麓湖-大雨各特征粒径值/ μm	杞麓湖-中雨各特征粒径值/ μm	十堰-暴雨各特征粒径值/ μm	十堰-中雨各特征粒径值/ μm	十堰-小雨各特征粒径值/ μm	犀浦-暴雨各特征粒径值/ μm	犀浦-中雨各特征粒径值/ μm	犀浦-大雨各特征粒径值/ μm	各特征粒径值/ μm 平均值
Dx(10)	3.60	18.40	7.58	25.10	16.60	5.45	19.00	15.10	17.90	14.30
Dx(50)	22.83	58.90	36.30	79.40	54.60	33.70	64.70	57.80	69.20	53.05
Dx(90)	69.32	138.00	81.10	179.00	143.00	145.00	296.00	513.00	172.00	192.94
平均粒径	3.46	34.30	19.90	41.80	29.60	12.00	36.90	29.00	35.60	26.95

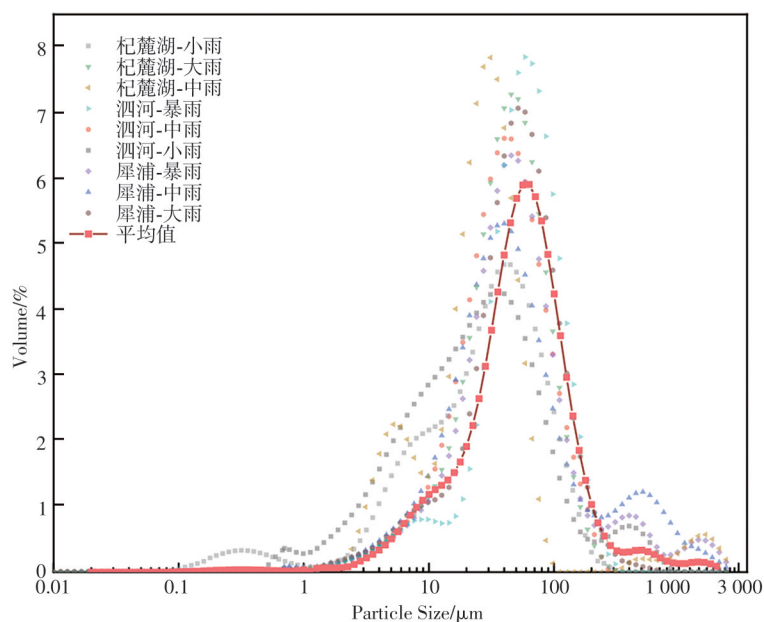


图5 9场溢流事件中溢流污染颗粒物粒径分布

Fig. 5 Particle size distribution of overflow pollutants in nine overflow events

综上研究,溢流污水中颗粒物的粒径特征对磁分离技术的处理效能有一定影响.一方面,需强化磁分离技术的磁混凝环节对中细颗粒($10\sim 76\ \mu\text{m}$)的絮凝能力,同时确保在更宽粒径谱和更高颗粒浓度下,仍能形成适于磁力捕获的稳定絮体,这是提升整体处理效能与运行稳定性的关键所在.另一方面,较多粗颗粒尾端,可能对设备内部流道与刮渣系统带来一定磨损风险,需要材料强化或结构优化来缓解.

3 结论

通过对杞麓湖、泗河与犀浦三个区域9场典型降雨溢流事件的全方位监测与分析,系统揭示了我国典型区域溢流污染的水力、水质及颗粒物特征,并明确了磁分离技术的关键优化需求.

(1)溢流量呈“快、大、变”特征,要求磁分离设备具备快速响应、大通量与强抗冲击能力.溢流在降雨后 $5\sim 20\ \text{min}$ 内启动,瞬时峰值流量可达 $0.44\ \text{m}^3/\text{s}$ (约 $38\ 137\ \text{m}^3/\text{d}$),溢流量剧烈快速波动,这要求设备实现 $\leq 5\ \text{min}$ 快速启动,将单机或组合处理规模提升至 $35\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$,并具备在 $50\%\sim 115\%$ 设计流量范围内稳定运行的能力.

(2)水质呈“高、波、快”特征,核心在于强化SS去

除以协同削减COD与TP.溢流SS峰值超 $1\ 100\ \text{mg/L}$,上升速率超 $68\ \text{mg/L/min}$;COD、TP固态占比分别达 75.58% 和 57.65% ,与SS高度正相关.技术优化必须以高效去除SS为核心,通过提升SS去除率实现COD与TP协同削减,同时强化溶解性TP的去除.

(3)溢流污水颗粒物整体范围为 $0.06\sim 3\ 000\ \mu\text{m}$,平均粒径 $26.95\ \mu\text{m}$, $51\%\sim 77\%$ 颗粒集中于 $10\sim 76\ \mu\text{m}$ 区间,磁分离技术提升重点在于强化磁混凝单元,确保对中细颗粒的高效絮凝和磁力捕获,同时增强设备的耐磨设计.

综上,基于溢流污染特征,磁分离技术在溢流污染场景下优化需聚焦三大方向:实现快速启动与大通量处理以匹配水力冲击;以高效SS去除为核心构建多污染物协同去除能力;通过强化磁混凝工艺提升中细颗粒捕获效能与系统稳定性.

参考文献

- [1]Aghdam E, Mohandes S R, Zayed T. Evaluating the sensory and health impacts of exposure to sewer overflows on urban population[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 413: 137498.
- [2]Muleta T N, Knolmar M. Ecological impacts of combined sewer overflows on receiving waters[J]. Discover Water, 2025, 5(1): 24.
- [3]陈黄隽,李一平,周玉璇,等.分流制系统雨水管网混接雨天溢流污染特征研究[J].中国给水排水,2023,39(19): 116-124.

- [4]安子倩, 乔肖翠, 刘琰, 等. 雨污合流制地区溢流污染影响因素及管控建议[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(3): 986-994.
- [5]唐磊, 程小文, 刘广奇. 对我国城市雨季溢流控制目标的思考[J]. 给水排水, 2025, 51(12): 34-41.
- [6]住房和城乡建设部, 生态环境部, 国家发展改革委, 等. 深入打好城市黑臭水体治理攻坚战实施方案(建城[2022]29号)[EB/OL]. (2022-03-28)[2026-02-25]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2022/art_17339_765675.html.
- [7]盛铭军. 雨天溢流污水就地处理工艺开发及处理装置CFD模拟研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [8]刘宇轩, 高雅弘, 王振北, 等. 城镇合流制排水系统溢流污染控制综述[J]. 环境工程, 2023, 41(12): 32-47.
- [9]张维, 孙永利, 李家驹, 等. 合流制溢流污染快速净化处理技术进步与思考[J]. 给水排水, 2022, 58(9): 157-164.
- [10]Xie C Y, Li X Y, Tang Z Z, et al. Enhanced combined sewer overflow treatment by rapid magnetic flocculation-magnetic sedimentation: Efficiency and mechanism[J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 2024, 10(7): 1586-1594.
- [11]孙铸宇, 崔冰洁, 蔡雨瑶, 等. 基于磁混凝的溢流污染削减工艺优化研究[J]. 环境工程, 2025, 43(1): 144-154.
- [12]刘宇轩, 安欣琪, 林炳权, 等. 长江流域平原河网地区合流制排水系统溢流污染特征研究[J]. 给水排水, 2024, 50(4): 62-69.
- [13]范波, 黄鹏, 孙永利, 等. 城市水体雨后污染特征及降雨污染快速净化对策[J]. 中国给水排水, 2024, 40(13): 115-121.
- [14]Lei C C, Gao L, Huang S Z, et al. Combined impacts of heavy rainfall, high tides, and sea level rise on multi-source pollution in coastal urban watersheds: A whole-of-system assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 516: 145787.
- [15]陶霞. 城市道路初期雨水快速处理技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [16]马智广. 合流制溢流污染特性及就地处理措施研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2023.
- [17]李思远. 合流制管网污水溢流污染特征及其控制技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [18]高玉红, 孙巍, 阮鹏程, 等. 高效沉淀池在合流制溢流污染控制中的工程应用[J]. 中国给水排水, 2024, 40(12): 68-72.
- [19]王吉白, 王利军, 杨平, 等. 基于数值模拟方法的磁混凝反应过程分析[J]. 自动化应用, 2024, 65(18): 179-182.
- (责任编辑: 肖丽, 殷锋, 付强, 张阳, 和力新; 英文编辑: 郑玉才, 周序林)