



长江流域丘陵与平原 2 类典型城镇面源污染来源解析

林炳权^{1,2}, 安欣琪^{1,2}, 赵晨^{1,2}, 高雅弘^{1,2}, 刘宇轩^{1,2}, 钟寅^{1,2}, 齐飞^{1,2}, 邱斌^{1,2}, 王振北^{1,2}, 胡潜^{1,2}, 孙德智^{1,2,✉}

1. 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; 2. 北京林业大学污染水体源控与生态修复技术北京市高等学校工程研究中心, 北京 100083

摘 要 在长江流域丘陵城镇重庆永川区和平原城镇常州金坛区分别选取各含合流制和分流制 2 种排水体制的 4 个区域作为研究对象, 监测雨天 4 个区域的河流、沿河排口和下垫面径流相关数据, 分别采用河流质量守恒法、PMF 模型和地表径流质量守恒法解析 2 类城镇 4 个区域面源对河流污染贡献、沿河排口污染来源贡献和各下垫面污染贡献。结果表明, 城镇面源对 4 个研究区域内河流的 5 项水质指标 (SS、COD、NH₃-N、TN 和 TP) 均有一定程度的贡献, 其贡献率与降雨等级、地区特征和排水体制有关; 降雨期间, 在 2 类城镇 2 种排水体制的沿河排口污染负荷来源中, 地表径流是 SS 和 COD 负荷的主要来源, 生活污水和管道沉积物是 NH₃-N、TN 和 TP 负荷的主要来源; 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。为提高上述研究区域面源污染的精细化管理, 提出了针对性的控制措施。

关键词 丘陵城镇; 平原城镇; 城镇面源污染; 质量守恒法; PMF 模型

随着我国长江流域城镇生活源和工业源治理成效显著, 城镇面源对城镇受纳水体污染的占比逐渐增加^[1-3], 整体贡献率达 8.29%~25.45%^[4], 对降雨量丰富的地区 COD 贡献率甚至高达 39.55%^[5], 已经成为限制城镇水体水质提升的重要污染源。城镇面源随着降雨径流的发生而产生, 来源复杂多样, 对城镇面源的来源开展精准解析, 将有助于识别重点产污单元, 对流域污染精细化控制具有重要意义。

目前, 城镇面源对受纳水体污染贡献多用排放清单法进行计算, 即利用场次降雨平均污染物浓度结合径流系数法计算出城镇面源污染负荷量, 再将其与受纳水体污染总负荷相比而获得城镇面源污染占比。赵云强^[6]在北运河流域建立了排放清单, 计算了城镇径流污染负荷并确定了对其流域污染的贡献占比; WILSON 和 WENG^[7]在建立了芝加哥地区的 Calumet 湖的污染排放清单, 利用模型估算了城镇各种用地的面源污染物负荷, 并最终确定了对 Calumet 河污染的贡献。该种方式适合大尺度流域核算, 计算方式相对粗糙, 且计算方式忽略了城镇排水系统产生的面源污染负荷。

排水管网排口为城镇面源输入受纳水体的重要节点, 其主要污染来源为地表径流、生活污水和管道沉积物。国内外已有学者对排口污染开展溯源, 如 GROMAIRE 等^[8]对巴黎的“Marais”流域的合流制管网雨天混合污水进行溯源, 确定了管道沉积物为重要污染源, 其对 SS、BOD₅ 和 COD 负荷的贡献超过 50%; SOONTHORNNONDA 和 CHRISTENSEN^[9]利用 PMF 模型对大密尔沃基地区合流制溢流口污染开展溯源, 成功识别了当地溢流污染的可能来源并确定各自的贡献比例; 马振邦等^[10]也将 PMF 模型成功应用于深圳王家庄集水区排口负荷污染来源的识别上。

此外, 在雨天输入受纳水体的地表径流中, 由于不同下垫面污染特征不同, 产生的负荷量存在差异, 因此对径流污染开展溯源具有必要性。岳桢钰等^[11]对南宁市老城区在大中小雨时地表径流污染来源进行了解

收稿日期: 2023-10-26; 录用日期: 2023-11-22

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2021YFC3201504)

第一作者: 林炳权 (1998—), 男, 硕士研究生, lbq_hit@163.com; ✉通信作者: 孙德智 (1960—), 男, 博士, 教授, sunde zhi@bjfu.edu.cn

析,结果表明道路为径流SS和COD的主要产出源,对重点产污下垫面的识别可为城镇面源污染精准控制提供支撑。

目前对城镇面源污染的来源解析的研究主要集中在上述的3个方面,但尚未有将3者结合起来系统开展溯源的研究。基于此,本研究选长江流域典型丘陵城镇重庆市永川区和典型平原城镇常州市金坛区作为研究对象,对2类城镇中又分为合流制和分流制2种排水体制的4个研究区在不同降雨情景时城镇面源污染来源进行追溯,包括城镇面源对河流水质污染贡献解析、雨天排口污染来源贡献解析以及下垫面径流污染来源解析,以期为长江流域城镇面源污染控制提供数据支持。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区域概况

长江为亚洲和中国的第一大河,全长6300 km,流域面积 $180\times 10^4\text{ km}^2$,流域地形呈多级阶梯性地形,包括高原、盆地、丘陵和平原等。重庆市永川区为长江流域典型丘陵城镇,年平均降雨量1015.0 mm,其地表坡度较大,降雨时径流的产-汇-流速度快,面源污染的入河负荷高;常州市金坛区为长江流域典型平原城镇,年平均降雨量为1149.7 mm,其河网复杂,降雨时大量雨水输入河流,对河流水质水量变化影响程度大。根据排水体制的不同,分别在永川和金坛各选择两块面积约为 1 km^2 的研究区,区域内接纳水体主要为:永川分流制选区——红旗河、永川合流制选区——胜利河、金坛分流制选区——钱胜河、金坛合流制选区——丹金溧漕河,具体范围如图1所示。

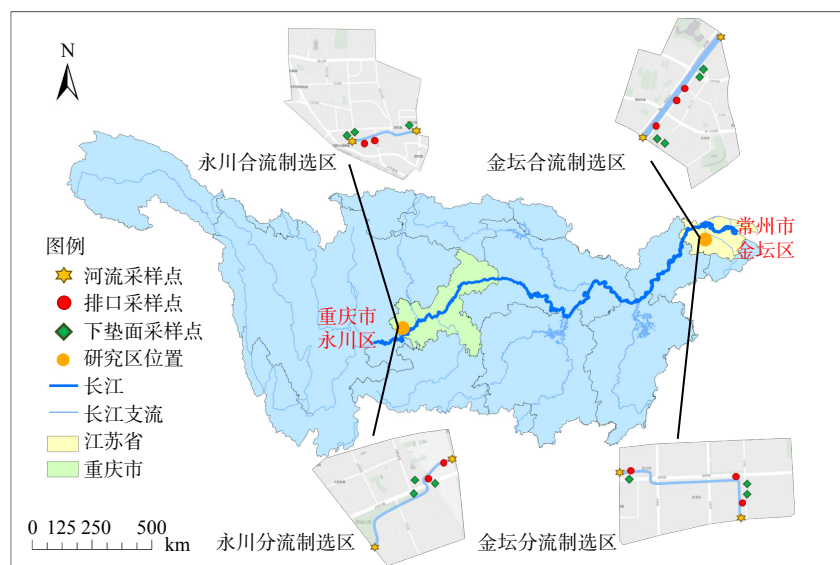


图1 研究区范围

Fig. 1 Extent of the study area

1.2 样品采集与分析

监测点位类别有河流断面、河流沿岸雨水排口以及下垫面地表径流,监测水质指标为:固体悬浮物(SS)、化学需氧量(COD)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、总氮(TN)和总磷(TP),具体采样点位如图1所示。地表下垫面在降雨初期每5 min采集一个样品,后期采样时间间隔为10~15 min,具体根据降雨强度大小而定;雨水排口和河流断面在产生径流后,初期每10 min采集一个样品,后期采样时间间隔为15~30 min,具体根据降雨强度大小而定。样品采集后在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下进行保存,并在规定时间内测定各项水质指标,具体分析方法参照相关国家标准。降雨量与降雨历时使用翻斗式雨量计进行监测,于2023年4—7月分别对永川发生的6场有效降雨以及金坛发生的3场有效降雨进行了监测,对每场降雨按中国气象局24小时降雨量标准划分降雨等级,具体划分标准如表1所示,各场降雨特征如表2所示。

1.3 数据分析方法

1) 城镇面源对河流水质污染贡献解析方法。利用质量守恒法解析城镇面源对河流水质的贡献, 对于一段闭合边界的河流而言, 其水质指标污染源主要来源于上游输入、沿岸排污口、地表漫流以及内源, 质量守恒关系见式 (1)~(2)。

$$W_{\text{下游}} = W_{\text{上游}} + W_{\text{排污口}} + W_{\text{地表漫流}} + W_{\text{内源}} \quad (1)$$

$$W_{\text{上游}} = C_{\text{上游}} \exp(-kx/u) Q \quad (2)$$

式中: W_i 为 i 位置处通量 (i = 下游、上游、排污口、地表漫流和内源), $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$; C 为污染物浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Q 为流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; k 为衰减系数; x 为下游断面距排污口或上游断面的距离, m ; u 为流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

雨天与旱天下游断面水质变化主要来源于上游断面水质变化、排污口的水质变化、地表漫流变化以及内源贡献变化, 如式 3 所示。假设晴天和雨天河流内源贡献不发生变化 (即 $\Delta W_{\text{内源}} = 0$), 雨天排污口通量变化和地表漫流均为面源输入导致 (即 $W_{\text{面源}} = \Delta W_{\text{排污口}} + W_{\text{地表漫流}}$), 式 (3) 可化简为式 (4)。

$$\Delta W_{\text{下游}} = \Delta W_{\text{上游}} + \Delta W_{\text{排污口}} + \Delta W_{\text{地表漫流}} + \Delta W_{\text{内源}} \quad (3)$$

$$\Delta W_{\text{下游}} = \Delta W_{\text{上游}} + W_{\text{面源}} \quad (4)$$

式中: ΔW_j 为 j 位置处雨天与旱天通量的变化量, (j = 下游、上游、排污口、地表漫流和内源)。

城镇面源的通量见式 (5)。

$$W_{\text{面源}} = \Delta W_{\text{下游}} - \Delta W_{\text{上游}} \quad (5)$$

城镇面源对断面水质变化的贡献见式 (6)。

$$P_{\text{面源}} = W_{\text{面源}} / W_{\text{下游}} \quad (6)$$

2) 排口溯源方法。采用正定矩阵因子分析 (positive matrix factorization, PMF) 法解析排口污染来源及贡献率, 其基本方程见式 (7) [12]。

$$X = GF + E \quad (7)$$

式中: 矩阵 X 为实测样品质量浓度数据, 由 n 个样品 m 种污染物的质量浓度组成 ($n \times m$); 矩阵 G 表示各源的贡献率 ($n \times p$); 矩阵 F 表示各源的源成分谱 ($p \times m$); 矩阵 E 为实测值与模拟值之间的残差 ($n \times m$); p 为主要源的数目。

3) 下垫面径流污染来源解析方法。利用质量守恒法核算各下垫面径流污染贡献率, 各下垫面径流污染负荷利用场次降雨平均污染物浓度 (EMC) 结合降雨量进行计算 [11, 13-14], 对于研究区域而言, 地表总径流污染负荷量 M_t (kg) 等于各下垫面负荷量 M_i (kg) (式 (8))。

$$M_t = \sum_{i=1}^n M_i \quad (8)$$

式中: 下垫面 k 对地表总径流污染负荷的贡献率 P_k (%) (式 (9))。

表 1 降雨等级划分标准

Table 1 The classification standard of Rainfall grade

降雨强度等级	24 h降雨量/mm
小雨	<10
中雨	10~25
大雨	25~50
暴雨	50~100
大暴雨	100~200
特大暴雨	>200

表 2 降雨特性一览表

Table 2 Summary of rainfall characteristics

地区	日期	降雨等级	降雨量/mm	降雨历时/min	平均降雨强度/(mm·min ⁻¹)	样品个数
永川	4.11	小雨	4.7	120	0.039	59
	4.18	中雨	12.6	330	0.038	76
	6.15	小雨	2.6	120	0.022	87
	7.19	中雨	17.3	190	0.091	103
	7.21	大雨	30.6	430	0.071	104
	7.24	小雨	5.3	220	0.024	75
金坛	4.3	小雨	2.0	70	0.028	30
	6.17	中雨	12.0	560	0.046	40
	6.19	大雨	43.8	380	0.115	47

$$P_k = M_k / M_t \quad (9)$$

式中: M_k 为下垫面 k 的径流污染负荷, kg。

2 结果与讨论

2.1 城镇面源对河流水质贡献解析

1) 降雨期间河流水质变化情况。现场监测了 4 个研究区在每场降雨前一天河流水质以及雨天水质, 并进行对比, 计算出雨天和旱天河流各项水质指标浓度的比值, 结果如图 2 所示。

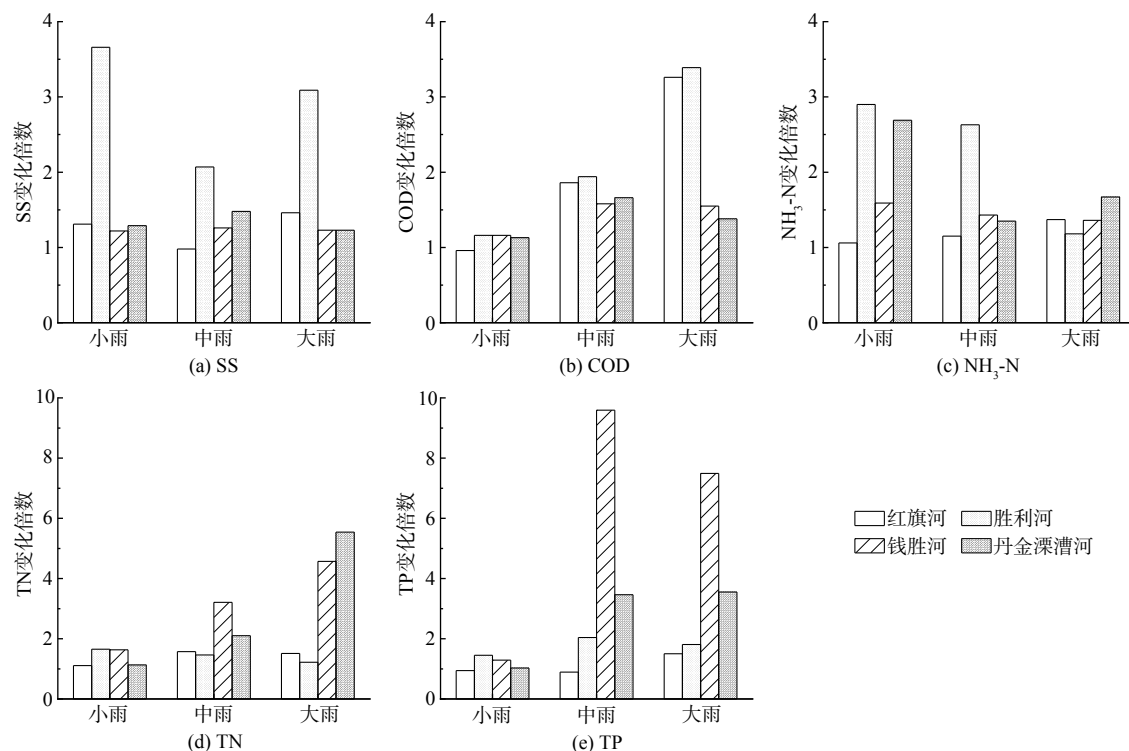


图 2 雨天与旱天河流水质比值

Fig. 2 Ratio of river water quality in rainy days to dry days

由图 2 可知, 4 个研究区的河流各项水质指标在雨天均有不同程度的变化, 其中胜利河 SS 变化十分显著, 在各种降雨等级下, 其变化倍数均在 4 条河流中最大, 雨天时 SS 浓度为旱天的 2.07~3.09 倍, 其余指标的变化倍数在 1.16~3.39 范围内, 整体水质受面源输入影响程度较大; 红旗河也存在一定的水质变化, 各项指标浓度变化倍数在 0.89~3.26 之间, 变化程度相对较小; 钱胜河各项指标浓度变化倍数随着降雨量的增加, 有较为明显的增加趋势, 尤其是 TN 和 TP, 在中雨时的变化倍数分别可达 3.21 和 9.59, 大雨时分别可达 4.57 和 7.49; 丹金漂漕河与钱胜河类似, 在中大雨时各项指标浓度变化明显, 变化倍数为 1.23~5.54。据上述分析可知在雨天时, 随着降雨的驱动, 会有大量面源污染物会输入河流, 对河流水质造成较大冲击。并且面源入河负荷量难以监测、具体来源复杂多样, 因此需要引入模型开展溯源解析, 从而更高效的识别面源的通量、贡献率及重点的污染单元。

2) 城镇面源通量及贡献率。利用质量守恒法解析 2 类城镇 4 个研究区中监测的大中小雨样品数据, 计算出研究区内的 4 条河流在不同降雨情景下城镇面源污染的通量和贡献率, 结果如图 3 所示。

对于永川 2 个研究区, 红旗河 (图 3(a)) 在降雨期间主要污染物为 COD、NH₃-N、TN 和 TP, 小雨时面源通量分别为 3.14、0.17、0.85 和 0.04 g·s⁻¹, 中雨时面源通量分别为 9.89、1.00、3.09 和 0.23 g·s⁻¹, 大雨通量分别为 41.47、1.45、3.08 和 0.23 g·s⁻¹, 面源输入负荷量较大, 且由于红旗河旱天水质较好, 达地表水 III 类标准, 在雨天接受大量面源负荷输入后水质变化明显, 面源对河流 COD、NH₃-N、TN 和 TP 的贡献率

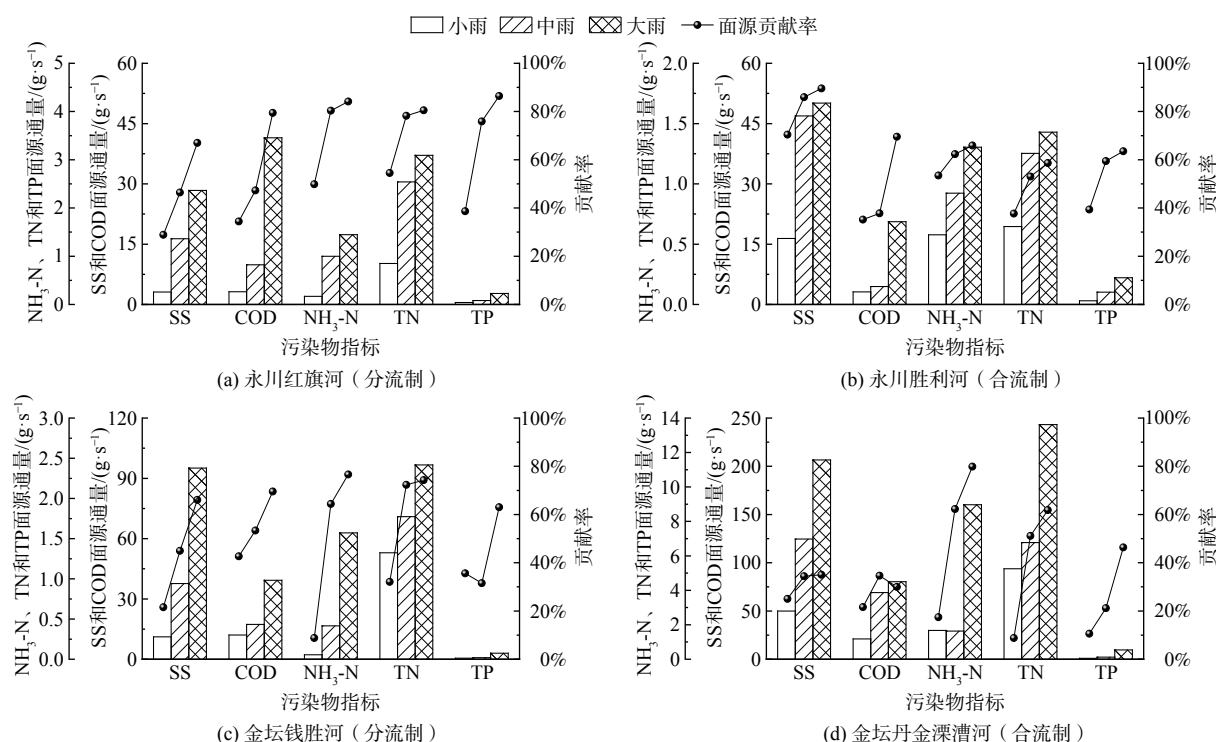


图3 城镇面源污染通量与贡献率

Fig. 3 Pollution fluxes and contributions from urban surface sources

均超过 80%。而对于胜利河 (图 3(b)) 而言, 面源主要输入的污染物为 SS, 小雨时通量为 $16.41 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, 贡献率可达 70%, 中雨和大雨时通量为 46.82 和 $50.11 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, 贡献率高达 86% 和 90%。虽然红旗河流量大于胜利河, 但雨天胜利河 SS 的面源通量却大于红旗河, 反映了永川合流制选区因降雨而产生的 SS 污染更严重, 大量的 SS 输入导致河流浑浊, 在雨天时胜利河水面呈泥黄色。SS 具体可能来着两方面, 一是因为合流制溢流的污水中 SS 浓度较大, 因此溢流输入河流 SS 负荷大; 二是因为胜利河水位较浅, 溢流的污水流量较大, 入河时冲刷河底泛起底泥, 一定程度的增加了雨天时 SS 的浓度。

对于金坛 2 个研究区, 不同的降雨等级时面源输入的主要污染物不同, 钱胜河 (图 3(c)) 在小雨时为 COD、TN 和 TP, 通量为 12.06 、 1.32 和 $0.01 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, 贡献率达 43%、32% 和 36%; 中雨时为 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN, 通量为 17.35 、 0.41 和 $1.77 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, 贡献率达 53%、64% 和 72%; 大雨时各污染物输入程度均较高, 贡献率均超过 60%。整体而言, 各场降雨时 COD 和 TN 的贡献率均处于相对较高水平, 为重点输入的污染物。丹金漂漕河 (图 3(d)) 小雨时, 面源输入的主要污染物为 SS、COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$, 通量分别为 55.35 、 24.50 和 $1.30 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, 贡献率分别达 25%、22% 和 17%; 中雨和大雨时主要污染物为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN, 通量分别为 1.63 和 $6.77 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 8.97 和 $13.62 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$, 贡献率分别达 62% 和 80%、51% 和 62%, 面源对河流水质影响程度较大。丹金漂漕河流域的排水体制为合流制, 由于小雨降雨全过程中地表径流的 SS 和 COD 浓度还处于较高水平, 进入管网之后一定程度增加了混合污水中 SS 和 COD 的负荷, 并且溢流污水的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染突出, 因此小雨时产生的小范围溢流主要增加了河流 SS、COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 负荷; 而在中雨和大雨时, 管网溢流量增加, 相对河流旱天的水质增加了大量 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN 负荷。

整体而言, 随着降雨量的增加, 地表径流产生量增加, 输入河流的各项污染物的面源通量增加, 相对应的面源对河流水质的贡献率增加。永川的城镇面源对河流的各污染物贡献率在各降雨情境下基本都大于金坛, 原因可能存在两个方面: 一是丘陵地形地表坡度较大, 永川研究区内坡度为 1.51% ~ 9.22% , 降雨期间径流对地表污染物冲刷能力较强, 相对应径流污染的浓度较大, 对河流输入的负荷较大; 二是丘陵地区的排水管网坡降较大, 永川研究区内管道坡降为 3.00% ~ 9.02% , 径流进入管网之后, 径流速度较大, 对管网沉积物冲刷能力强, 冲刷带来大量的负荷, 最终输入河流的面源污染负荷大。并且由于丘陵地区地形起伏大, 在

降雨径流的冲刷下,存在一定程度的水土流失现象,导致径流中泥沙含量较高^[15-17],因此丘陵地区的河流的 SS 受面源输入的程度会大于平原地区。

2.2 雨水排口污染源贡献解析

不管对于合流制溢流口还是分流制雨水排口,雨天时输出污染物的主要来自于地表径流、管道沉积物和生活污水(混接污水)^[8, 18-20],本研究采用 PMF 模型解析这 3 种污染源对雨天雨水排口负荷的贡献。

1) 模型运行。将永川和金坛降雨采集到的全部排口样品分别输入 PMF 模型,设定污染因子数为 3,运行次数选择 200 次。在运行过程中,模型拟合效果根据 Q 值和决定系数 R^2 进行判定, Q 值稳定且接近与理论值,且 R^2 约接近于 1 代表模型的拟合优度越好^[9, 12],拟合过程中根据 Q 值和 R^2 剔除掉离群的样品数据,以保证结果更加稳定可靠。4 个选区排口模型拟合参数如表 3 所示,各项污染指标的 R^2 基本都大于 0.8, Q 计算值与 Q 理论值的比值分别为 115.7%、130.0%、133.0% 和 105.3%,表明模型拟合效果较为理想。

表 3 PMF 模型运行参数表
Table 3 Table of PMF model run parameters

点位	R^2					Q	
	SS	COD	NH ₃ -N	TN	TP	理论值	计算值
永川分流制雨水口	0.997	0.601	0.993	0.938	0.996	101	116.9
永川合流制溢流口	0.999	0.831	0.967	0.835	0.999	57	74.1
金坛分流制雨水口	0.802	0.994	0.992	0.968	0.763	47	62.5
金坛合流制溢流口	0.997	0.831	0.966	0.935	0.999	69	72.7

2) 污染源识别。PMF 模型的运行结果可得到污染因子的个数以及相应的贡献率,但各模型解析的污染源(F1、F2、F3)与实际污染源(地表径流、生活污水、管道沉积物)的对应关系尚未清晰,需要进一步通过对实测的污染源源成分谱(Source Profile)与模拟解析源成分谱的对比来识别^[9-10]。污染源中地表径流和生活污水较易监测浓度,而管道沉积物雨天释放的污染物浓度较难实际监测,因此只将地表径流和生活污水两两之间回归方程的拟合效果进行判定,图 4 为二者对数线性回归结果,剩下的污染因子则判定为管道沉积物,表 4 为具体判断结果。

3) 污染源贡献率确定。图 5 为 PMF 模型对 4 个选区排口污染源解析结果,其中对于 2 个分流制选区(图 5(a))而言,管道沉积物为排口 NH₃-N、TN 和 TP 的主要的污染来源,尤其是 NH₃-N,其贡献率可达 64.5% 和 76.4%,并且与全国大部分地区类似^[18, 21],永川和金坛的分流制管网均存在一定程度的错接混接现象,混接污水会贡献一定程度的污染负荷,对各污染物指标的贡献率为 8.9%~69.8%。研究区内混接污水的来源有两方面:一是市政生活污水部分管网错接入市政雨水管网,导致污水直排;二是小区居民部分的生活废水接入小区雨水管网,直接排入水体。因此对于分流制区域的排口污染负荷削减,应注重管道沉积物的清淤以及初期雨水的控制,在旱天时应定期开展雨水管网清淤工作,并且可通过在新建小区、市政道路、广场公园等区域布设低影响开发(low impact development, LID)设施来降低径流污染负荷。此外,还可通过 CCTV 等探测手段确定雨水管网混接节点,对混接管道进行改正,减少混接污水直排入河现象。

对 2 个合流制选区(图 5(b)),生活污水和管道沉积物为溢流污水的重要污染源,两者对 NH₃-N 的贡献率的加和达 85.9% 和 86.8%,对 TN 的贡献率的加和达 86.4% 和 85.5%,对 TP 的贡献率的加和达 81.5% 和 85.5%,为合流制溢流污染的重点控制对象,可在溢流频率较高的溢流口区域建设调蓄池以及增加溢流口的截留倍数,减少雨天溢流水的入河量,定期对管网内部沉积物开展清淤工作,减少雨天时管道沉积物被冲刷出来的入河量。

整体而言,降雨径流污染对排口污染负荷中 SS 贡献率达 63.7%~75.4%,COD 贡献率达 30.1%~72.3%,体现了地表径流 SS 和 COD 污染严重的典型特征。在排口的 SS 负荷来源中,永川径流污染的占比大于金坛,体现了丘陵地区径流相对于平原地区 SS 负荷较大的典型污染特征^[14-16, 22]。

在 2 个分流制区域中,金坛管道沉积物对雨水排口整体贡献略大于永川,因为平原地区的雨水管网坡降小于丘陵地区,管网内部普遍存在旱季藏污纳垢、雨季零存整取现象,旱天从雨水篦子进入的固体废物以及

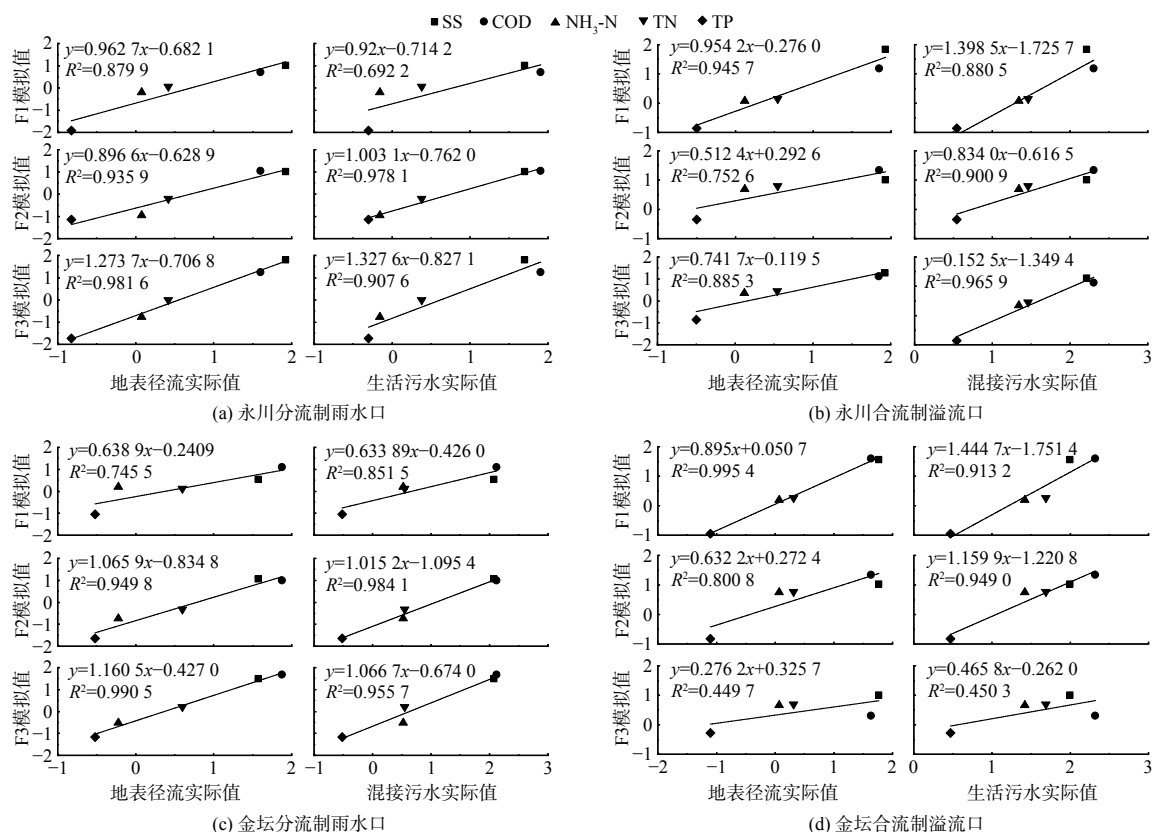


图4 沿河排口污染源判定

Fig. 4 Determination of pollution sources along river outfalls

混接污水沉积物等堆积在管道，雨天大量径流进入雨水管网后冲刷带出这部分污染物；而丘陵地区坡降相对较大，管道沉积物沉积量相对较少，因此丘陵地区分流制管网内沉积物污染相对较小。

对于合流制区而言，由于管网内一直会有生活污水的输入，并且在水低峰时管网污水流速较慢，部分污染物沉积在管底；在雨天时，丘陵地区相对平原地区管网坡降较大，管道内流速快，对管道沉积物冲刷能力强，从而能冲刷出更多的管道沉积物，因此雨天丘陵地区合流制溢流口中管道沉积物贡献的负荷会大于平原地区。

2.3 地表径流污染来源解析

为了针对性的控制城镇下垫面径流污染，还需进一步明晰地表径流污染具体来源及贡献率，识别重点产污的下垫面，因此利用4个研究区的负荷核算数据进一步解析各下垫面对地表总径流污染的贡献，具体结果如图6所示。

对于永川2个研究区，小区道路在各类下垫面中面积占比最高，雨天时产生径流量较大，并且由于丘陵地区地表坡度相对较大，产生径流污染能力强，因此对径流污染中各项指标负荷贡献程度均较高，整体贡献率在34.4%~85.6%，大部分指标贡献率超过50%，为永川下垫面径流污染的重点控制单元。交通道路虽然其面积仅为小区道路的1/5（老城区）和1/3（新城区）左右，但由于其径流污染负荷较高，所以对总径流污染的贡献率并不低，尤其是SS和COD，贡献率分别为20%~42.2%和14.5%~31.3%。屋顶虽然在研究区内的下垫面面积中占比不小（新城区占30%，老城区占33%），但由于其设计坡度相对固定，不受地面高程变化的影响，并且受人类活动影响程度较低，因此屋顶径流的污染程度相对不严重，对地表径流总污染的贡献程度

表4 模型模拟污染源与实际污染源对应关系

Table 4 Correspondence between model simulated pollution sources and actual pollution sources

点位	地表径流	生活污水/混接污水	管道沉积物
永川分流制雨水口	F3	F2	F1
永川合流制溢流口	F1	F3	F2
金坛分流制雨水口	F3	F2	F1
金坛合流制溢流口	F1	F2	F3

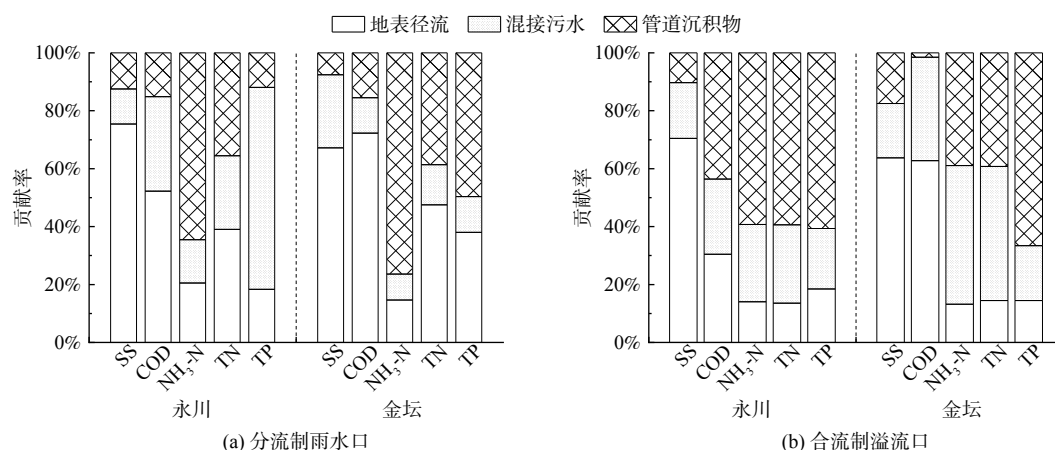


图5 沿河排口各污染源贡献率

Fig. 5 Contribution of each pollution source along the river outfalls

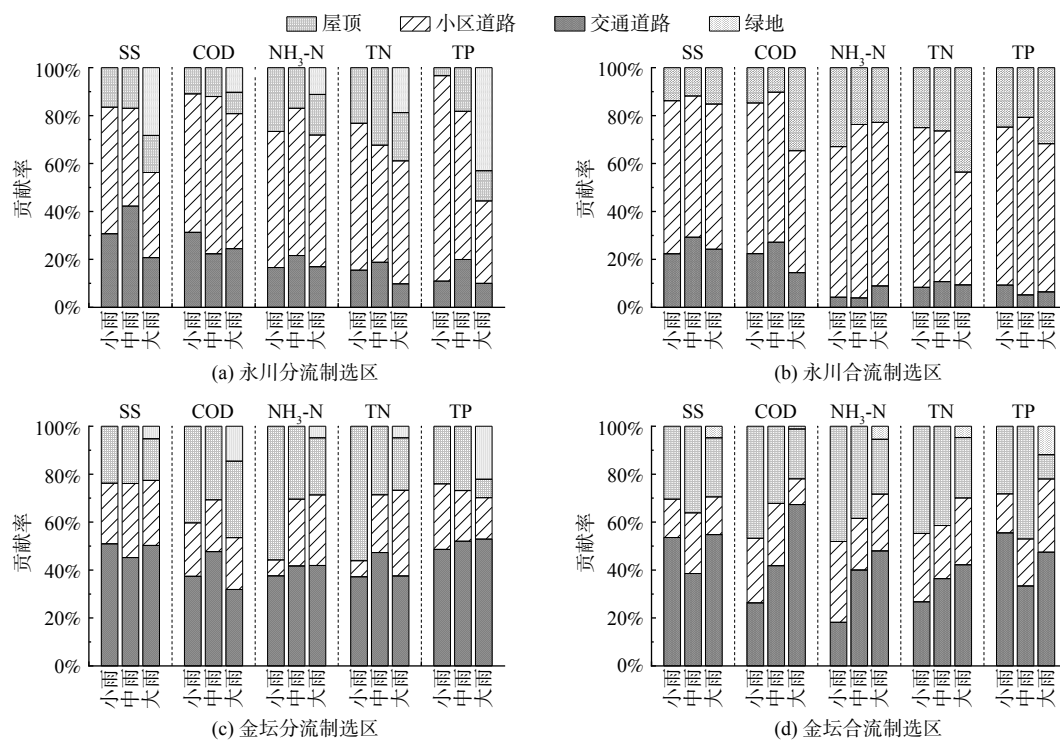


图6 4个研究区各下垫面贡献率

Fig. 6 Contribution of each surface in the four study areas

不大, 整体贡献率在集中在 10%~20%。此外, 在大雨情境下, 永川新城区绿地下垫面开始产生径流, 径流中 TP 的污染突出, 贡献率可达 43%, 需重点关注。

对于金坛 2 个研究区, 交通道路和屋顶为重点产污单元, 交通道路对整体贡献率达 18.2%~67.3%, 大部分水质指标贡献率超过 40%; 屋顶对整体贡献率为 7.68%~55.76%, 大部分指标贡献率超过 20%, 控制潜力较大, 应当采取 LID 设施进行削减负荷。而道路整体贡献率相对永川而言较低, 可能由于金坛小区地表坡度相对较小, 且常住人口仅约为永川的 1/2, 因此小区地表径流的负荷相对较低。此外, 与永川类似, 在大雨时, 金坛绿地下垫面径流中 TP 的污染突出, 贡献率可达 11.9%~22.1%, 但各指标贡献率均小于永川, 进一步证明了地形坡度会对下垫面污染负荷产生影响。

3 结论

1) 降雨时, 城镇面源会贡献大量污染负荷进入城镇受纳水体, 贡献率大小与降雨等级、区域排水体制和地区特征相关, 长江流域丘陵地区城镇河流受面源污染影响相对平原地区严重。

2) 地表径流、生活污水(混接污水)和管道沉积物为城镇排水管网出口雨天污染负荷主要来源, 其中地表径流主要贡献SS和COD负荷, 生活污水(混接污水)和管道沉积物主要贡献 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP负荷, 且雨天丘陵地区合流制溢流口中管道沉积物贡献的负荷会大于平原地区, 而分流制雨水口则相反。

3) 受地形坡度和人口密度等因素影响, 永川和金坛的重点产污下垫面不同, 永川为小区道路, 金坛为交通道路和屋顶, 通过解析地表径流污染具体下垫面来源及贡献率, 可识别重点控制的下垫面, 有助于开展针对性的径流污染控制。

参考文献

- [1] 李立青, 尹澄清, 何庆慈, 等. 武汉市城区降雨径流污染负荷对受纳水体的贡献[J]. 中国环境科学, 2007(3): 312-316.
- [2] 祁继英. 城市非点源污染负荷量化研究[D]. 河海大学, 2005.
- [3] U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, National water quality inventory: Report to Congress: 2002 reporting cycle[R]. Washington, DC, 2004.
- [4] 邱斌, 朱洪涛, 齐飞, 等. 长江流域典型城市水生态环境特征解析及综合整治对策[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(1): 1-9.
- [5] 王峥, 朱洪涛, 孙德智. 长江干流江苏段及环太湖区域典型城市水生态环境问题解析及控制对策[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(4): 1064-1074.
- [6] 赵云强. 北运河流域污染源解析及其清单研究[D]. 北京化工大学, 2022.
- [7] WILSON C, WENG Q. Assessing Surface Water Quality and Its Relation with Urban Land Cover Changes in the Lake Calumet Area, Greater Chicago[J]. Environmental Management, 2010, 45 (5): 1096-1111.
- [8] GROMAIRE M C, GARNAUD S, SAAD M, et al. Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers[J]. Water Research 2001, 35 (2): 521-533.
- [9] SOONTHORNNONDA P, CHRISTENSEN E R. Source apportionment of pollutants and flows of combined sewer wastewater[J]. Water Research 2008, 42 (8-9): 1989-98.
- [10] 马振邦, 倪宏刚, 魏建兵, 等. 城市小集水区降雨径流污染来源解析[J]. 生态环境学报, 2011, 20(3): 468-473.
- [11] 岳桢钰, 李一平, 周玉璇, 等. 南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 2018-2029.
- [12] NORRIS G, DUVALL R, BROWN S, et al. EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 Fundamentals and User Guide[M]. U. S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development Washington, DC, 2014.
- [13] 胡智华. 城市面源污染过程监测与污染负荷估算研究[D]. 重庆交通大学, 2023.
- [14] 蒋荣廷. 重庆市悦来新城典型下垫面雨水径流水质特性的初步研究[D]. 重庆大学, 2018.
- [15] 段丙政. 重庆老城区面源污染及街尘清扫措施研究[D]. 华中农业大学, 2014.
- [16] 王书敏. 山地城市面源污染时空分布特征研究[D]. 重庆大学, 2013.
- [17] 吴攀. 典型下垫面雨水径流颗粒物粒径分布特征研究[D]. 重庆交通大学, 2023.
- [18] 柯杭, 陈嫣, 王盼, 等. 苏州市新建城区地表径流污染分析[J]. 净水技术, 2020, 39(7): 59-64.
- [19] GASPERI J, GROMAIRE M C, KAFI M, et al. Contributions of wastewater, runoff and sewer deposit erosion to wet weather pollutant loads in combined sewer systems[J]. Water Research 2010, 44 (20), 5875-86.
- [20] 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]. 清华大学, 2016.
- [21] 汉京超. 城市雨水径流污染特征及排水系统模拟优化研究[D]. 复旦大学, 2015.
- [22] 张千千, 李向全, 王效科, 等. 城市路面降雨径流污染特征及源解析的研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(2): 352-358.

(责任编辑: 金曙光)

Sources analysis the of urban non-point source pollution in in two typical towns of hill and plain in the Yangtze River Basin

LIN Bingquan^{1,2}, AN Xinqi^{1,2}, ZHAO Chen^{1,2}, GAO Yahong^{1,2}, LIU Yuxuan^{1,2}, ZHONG Yin^{1,2}, QI Fei^{1,2}, QIU Bin^{1,2}, WANG Zhenbei^{1,2}, HU Qian^{1,2}, SUN Dezhi^{1,2,*}

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

2. Research Center for Source Control & Eco-remediation of Water Pollution, College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

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

Abstract In the hilly urban area of Yongchuan District, Chongqing, and the plain urban area of Jintan District, Changzhou, both situated in the Yangtze River Basin, four areas with two drainage systems (namely, combined system and separate system) were selected as study objects. Quality data of rivers, riverine outfalls, and surface runoff in these areas were systematically monitored during rainy days. The study employed the river mass conservation method to assess the contributions of non-point source (NPS) to river pollution; employed the PMF model to trace the pollution sources to riverine outfall; and employed the surface runoff mass conservation method to analysis the pollution sources to surface runoff. The results showed that: Urban NPS contributed to the five water quality indicators (SS, COD, $\text{NH}_3\text{-N}$, TN and TP) in the rivers in the four study areas to a certain extent, and the specific contribution rates were related to the rainfall levels, regional characteristics and drainage regimes; During rainfall events in both types of towns, surface runoff was identified as the primary source of SS and COD loads at the riverine outfalls. On the other hand, $\text{NH}_3\text{-N}$, TN, and TP loads were predominantly contributed by sanitary sewage and sewer sediments at these outfalls in the two different drainage regimes; Influenced by factors such as topographic slope and population density, the main pollutant-producing surfaces of Yongchuan and Jintan were different, with Yongchuan being neighborhood roads and Jintan being traffic roads and roofs. Targeted control measures were proposed to improve the refined management of urban NPS pollution in the above study area.

Keywords hill urban; plain urban; urban non-point source; mass conservation method; PMF model