

2 次降雨间隔时间对城市地表径流污染负荷的影响

李立青¹, 尹澄清^{1*}, 孔玲莉², 何庆慈²

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 武汉市环境保护科学研究院, 武汉 430015)

摘要:2003~2005 年通过对武汉市十里铺集水区 12 次降雨径流的水量和水质过程监测, 研究了城市降雨径流污染负荷同 2 次降雨间隔时间的关系, 探讨了城市地表状况、排水系统管理以及降雨特征在城市降雨径流污染负荷形成中的作用. 结果表明, 城市降雨径流污染负荷受 2 次降雨间隔时间和降雨径流量的共同影响. 2 次降雨间隔时间与初期降雨径流污染负荷存在显著的正相关关系 ($p < 0.01$). 汉阳地区城市地表卫生管理差和雨、污合流制的排水系统是城市径流污染负荷形成的主要原因. 可以利用 2 次降雨间隔时间和降雨径流量预测城市降雨径流污染负荷. 加强城市地表卫生管理和排水系统的管理, 降低污染物在晴天累积的程度, 从源头上减少污染物的数量, 是有效控制城市降雨径流污染的首选途径.

关键词:城市地表径流; 污染负荷; 2 次降雨间隔时间; 径流深; 地表卫生管理; 汉阳地区

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)10-2287-07

Effect of Antecedent Dry Weather Period on Urban Storm Runoff Pollution Load

LI Li-qing¹, YIN Cheng-qing¹, KONG Ling-li², HE Qing-ci²

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Wuhan Academy of Environmental Science, Wuhan 430015, China)

Abstract: Twelve storm events were surveyed at Shilipu catchment in Wuhan City through three-year monitoring regime. The flow discharges, total suspended solids (TSS), chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) in runoff were measured to study the mechanism of urban stormwater runoff pollution. The relationship between the event pollution load and the antecedent dry weather period was identified to discuss the influence of the urban surface sanitation management, operation of sewer pipe maintenance and rainfall characteristics on the urban stormwater runoff pollution. It was found that the antecedent dry weather period and runoff amount were the important determining factors in the generation of urban stormwater runoff pollution. The event pollution load was positively correlated to the antecedent dry weather period between two rainfall events ($R^2 = 0.95$, $p < 0.01$). It was the most important hydrological factor influencing the events pollution loads. The best regression equation to estimate pollution load for storm events was developed based on the antecedent dry weather period and runoff depth. Source control including improving urban street sweeping activities and operation of sewer pipe maintenance should be made to reduce the amount of available pollutant over the dry days. It is important alternative to control urban stormwater runoff pollution for Hanyang District.

Key words: urban storm runoff; pollution loads; antecedent dry weather period; runoff depth; street sweeping activity; Hanyang District

近年来我国城市污水处理厂建设加快, 污水处理率不断提高. 在点源污染治理不断完善的过程中, 城市降雨径流污染逐渐成为城市水环境污染的主要来源之一. 城市降雨径流污染是指累积于城市地表的污染物在降雨径流的冲刷搬运下, 进入受纳水体而形成的环境问题. 自 20 世纪 80 年代以来, 美国、欧洲一些国家开展城市径流污染特征及成因的大规模调查和研究, 并且开发了一些用于管理和研究的模型. 在这些研究的基础上, 提出了控制城市径流污染的“最佳管理措施 (best management practices, BMPs)”方案, 并且得到广泛运用^[1].

我国的城市降雨径流污染研究开始于 20 世纪 80 年代, 这些研究主要是对城市降雨径流水质的调查和基于国外模型的污染负荷研究^[2~6]. 城市降雨径流污染是一个涉及多介质、多时空尺度和多污染物的复杂过程^[7]. 区域气候、降雨特征、土地利用类

型、强度、不透水面积的比例、排水体制, 以及城市规划管理等因素都对城市降雨径流污染的形成具有重要的影响^[8]. 因此, 控制城市降雨径流污染是一项艰巨而系统的工作. 不同的城市由于所处的区域不同, 社会经济状况不同, 因而城市降雨径流污染的程度以及主导径流污染的因素不同, 在控制上需要因地制宜, 从解决城市径流污染产生的主要矛盾入手. 目前国际上对城市降雨径流污染的控制研究主要集中在进一步开发和完善最佳管理措施, 更加重视污染源的控制, 强调城市管理在城市径流污染控制中的重要性, 在模型研究上也侧重于开发面向管理和应用的模型^[9~11].

收稿日期: 2006-10-18; 修订日期: 2007-01-17

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2002AA601022)

作者简介: 李立青 (1977~), 男, 博士, 主要研究方向为城市地表径流污染控制, E-mail: li-liqing@163.com

* 通讯联系人, E-mail: cqyin@263.net

本研究通过分析城市降雨径流污染负荷同 2 次降雨间隔时间的关系,探讨了武汉市汉阳地区城市地表卫生管理、排水系统的管理以及降雨特征在城市降雨径流污染负荷形成过程中的作用,识别城市径流污染形成的主要环节,进而为城市降雨径流污染的控制提供科学依据.

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

汉阳地区地处亚热带大陆季风性(湿润)气候,雨量丰沛,年降雨量1 150~1 450 mm.每年 4~9 月是本区的主要雨期,降水量占全年降水量的 70%左右.

本次城市降雨径流污染研究选择在武汉市汉阳地区的十里铺城市集水区进行监测.十里铺集水区是墨水湖北岸汉阳主城区的一部分,具有一定代表性且适宜进行径流监测.十里铺集水区的面积是 1.3 km²,人口密度13 200人•km⁻²,不透水面积的比

例为 85%.十里铺集水区的土地利用以居民区为主.集水区每天清扫地面的面积占总面积的 30%左右,主要是区内的交通用地与 20 世纪 90 年代发展起来的有物业管理的居民区,而其它旧式居民区基本没有清扫地面的管理措施,降雨径流是去除地表累积污染物的主要方式.十里铺集水区的排水体制是雨、污合流制.在晴天时排水系统中排放的是市政污水,主要是居民生活污水和一部分商业用水.在雨天时,排水系统不仅承担着排放市政污水的功能,而且承担着排放集水区降雨径流的功能.

1.2 监测降雨特征

降雨径流污染监测时间集中在汉阳地区的主要降雨期,2003-06~2005-08 共对十里铺集水区进行了 12 次降雨径流污染的全过程监测.表 1 是对降雨特征(降雨量、降雨历时、平均降雨强和最大降雨强度)与 2 次降雨间隔时间(antecedent dry weather period, t_{ADW})的统计结果.

表 1 2003~2005 年监测降雨的基本特征

Table 1 Characteristics of rainfall events sampled from 2003 to 2005

降雨事件	降雨日期 /年-月-日	降雨量 /mm	降雨历时 /h	降雨强度 /mm•h ⁻¹	最大降雨强度 /mm•h ⁻¹	2 次降雨间隔时间 ¹⁾ /d
1	2003-06-23	96.6	4.8	20	78.0	20
2	2003-07-06	16	7	2.3	9.0	1
3	2004-06-14	12.9	2	6.5	33.6	10
4	2004-06-23	57.3	3.7	15.6	69.6	4
5	2005-04-08	18.8	1.8	10.4	40.8	52
6	2005-05-01	10.5	2.3	4.6	31.2	15
7	2005-05-17	32.0	2.5	12.8	32.4	3
8	2005-06-10	35.0	3.1	11.3	40.8	23
9	2005-06-26	78.0	7.9	9.9	46.8	15
10	2005-07-10	30.1	4.0	7.5	54.0	13
11	2005-07-22	27.0	1.2	22.5	82.8	12
12	2005-08-03	41.3	4.8	8.6	45.6	8

1) 2 次降雨间隔是指与上次降雨量超过 10 mm 降雨事件的间隔时间(d)

1.3 样品采集与分析

降雨径流监测断面设在十里铺集水区的出水口,距受纳水体墨水湖 200 m.降雨径流的监测是通过在集水区出口处建筑矩形堰(高 1 m,宽 2 m)实现的.在发生降雨径流期间采集径流水样,降雨产流时即开始采样,在初期径流 1 h 内采样间隔是 5 min,其后采样间隔根据径流情况增加为 10 min 或 20 min.在采集径流样的同时,测定流速和记录水位,计算流量.

所有采集的水样运回中国科学院生态环境中心汉阳工作站进行分析.径流水样的监测指标为总悬浮物(TSS)、化学需氧量(COD)、总氮(TN)和总磷

(TP).所有水质指标均按照标准方法进行测定^[12].

1.4 城市降雨径流污染负荷

城市降雨径流污染负荷是指由 1 场降雨或 1 a 中的多场降雨所引起地表径流排放的污染物总量.由 1 场降雨所引起地表径流排放的污染物总量称为次降雨径流污染负荷.次降雨径流的污染负荷可用下式计算:

$$L = \int_0^{t_r} c_i q_i dt$$

(1)

式中, L 是指 1 场降雨径流的污染负荷(g); c_i 是指 1 场降雨径流中某污染物在 t 时的瞬时浓度(mg•L⁻¹); q_i 是指 1 场降雨径流在 t 时的径流流量

($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); t_r 是指 1 场降雨形成径流的总历时(s).

由于在降雨径流监测过程中很难做到连续监测,为了便于计算,式(1)可表示为:

$$L = \sum_{j=1}^n \frac{c_j + c_{j+1}}{2} \times \frac{q_j + q_{j+1}}{2} \times \Delta t \quad (2)$$

式中, c_j 和 c_{j+1} 是指 1 场降雨径流中第 j 次和第 $j+1$ 次监测的污染物浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); q_j 和 q_{j+1} 是指 1 场降雨径流中第 j 次和第 $j+1$ 监测的径流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); Δt 是指相邻 2 次采样、测流间隔时间(s); n 是指 1 场降雨径流过程中的采样和测流次数.

2 结果与分析

2.1 次降雨径流污染负荷

城市降雨径流污染是通过降雨及其径流冲刷地表累积的污染物而形成的.降雨前地表污染物的累积状况与降雨特征是影响城市径流污染程度的主要

因素.表 2 是对汉阳十里铺集水区 3 a 中 12 次降雨径流污染负荷的监测结果,反映了十里铺集水区不同降雨条件下径流污染负荷的特征.由于不同次降雨降雨量、降雨强度、降雨历时等降雨因子和雨前污染物的累积程度不同,次降雨径流污染负荷存在明显的差异.4 种污染物 TSS、COD、TN 和 TP 次降雨污染负荷的最大值是最小值的 10 ~ 30 倍.另外,即使降雨量近似相同的降雨事件,径流污染负荷也存在明显的差异.2005-05-17 和 2005-06-10 的 2 次降雨事件尽管降雨量、降雨强度、降雨历时基本相同,但是后者的污染负荷约是前者的 2 倍.这与 2 次降雨事件的雨前干燥期不同有关.因为雨前干燥期不同,地表污染物的累积程度不同,进而影响到可被降雨径流冲刷、携带污染物的数量.因此,城市降雨径流污染负荷产生与降雨量、降雨强度、降雨历时等降雨因子和晴天累积天数密切相关.

表 2 十里铺集水区次降雨径流污染负荷的监测结果
Table 2 Summaries of the pollution loads for the monitored rainfall events

降雨事件	降雨日期 /年-月-日	降雨量 /mm	污染负荷/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$			
			TSS	COD	TN	TP
1	2003-06-23	96.6	220.8	86.9	4.43	0.42
2	2003-07-06	16.0	16.3	9.4	0.85	0.06
3	2004-06-14	12.9	30.4	10.7	1.13	0.17
4	2004-06-23	57.3	93.3	79.0	2.52	0.43
5	2005-04-08	18.8	146.1	75.5	3.22	0.29
6	2005-05-01	10.5	42.8	45.2	2.08	0.34
7	2005-05-17	32.0	73.7	67.8	4.15	0.48
8	2005-06-10	35.0	163.6	134.2	8.12	1.92
9	2005-06-26	78.0	168.0	143.3	9.86	1.28
10	2005-07-10	30.1	80.9	77.4	4.99	0.60
11	2005-07-22	27.0	124.9	79.6	3.55	0.54
12	2005-08-03	41.3	71.0	61.2	4.49	0.59
最小值		10.5	16.3	9.4	0.85	0.06
最大值		96.6	220.8	143.3	9.86	1.92
平均值		35.4	102.7	72.5	4.12	0.59

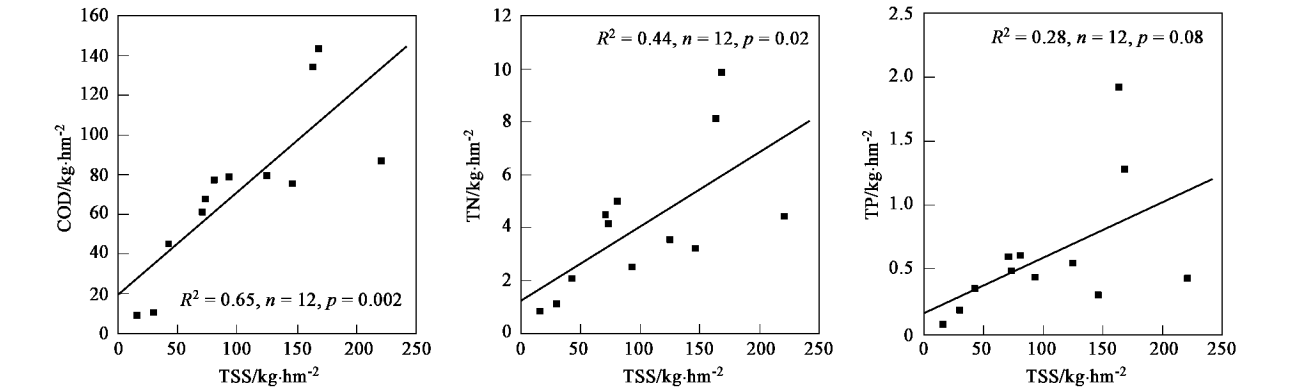


图 1 城市次降雨径流中 COD、TN 和 TP 与 TSS 的相关关系
Fig.1 Relationship between TSS and COD, TN, and TP

由于城市降雨径流中污染物之间存在着不同程度的相关性,其中尤以 COD 与 TSS 的相关性最为显著($R^2 = 0.65, p < 0.01$),见图 1. TSS 不仅是城市降雨径流污染过程中的主要污染物,而且是其它污染物的载体,所以在分析降雨特征和 2 次降雨间隔时间对径流污染负荷的影响时,仅以 TSS 为代表进行分析.

2.2 降雨径流特征对污染负荷的影响

次降雨事件的降雨量、降雨强度(平均降雨强度和最大降雨强度)、降雨历时分别代表了降雨径流对地表污染物的冲刷溶解能力、冲刷强度和冲刷时间,

是城市降雨径流污染形成的重要水文条件,因而对次降雨径流污染负荷具有重要的影响.城市次降雨径流污染负荷与降雨量、降雨强度、最大降雨强度和降雨历时的单因子相关分析结果见图 2. 城市次降雨径流污染负荷与降雨量、降雨强度和最大降雨强度均呈显著正相关($p < 0.05$),说明降雨量、降雨强度和最大降雨强度是影响城市径流污染负荷的重要水文参数.城市次降雨径流污染负荷与降雨历时没有明显的相关性,说明降雨历时对城市径流污染负荷无明显的影响.

由于降雨在产生径流的过程中有一部分降雨要

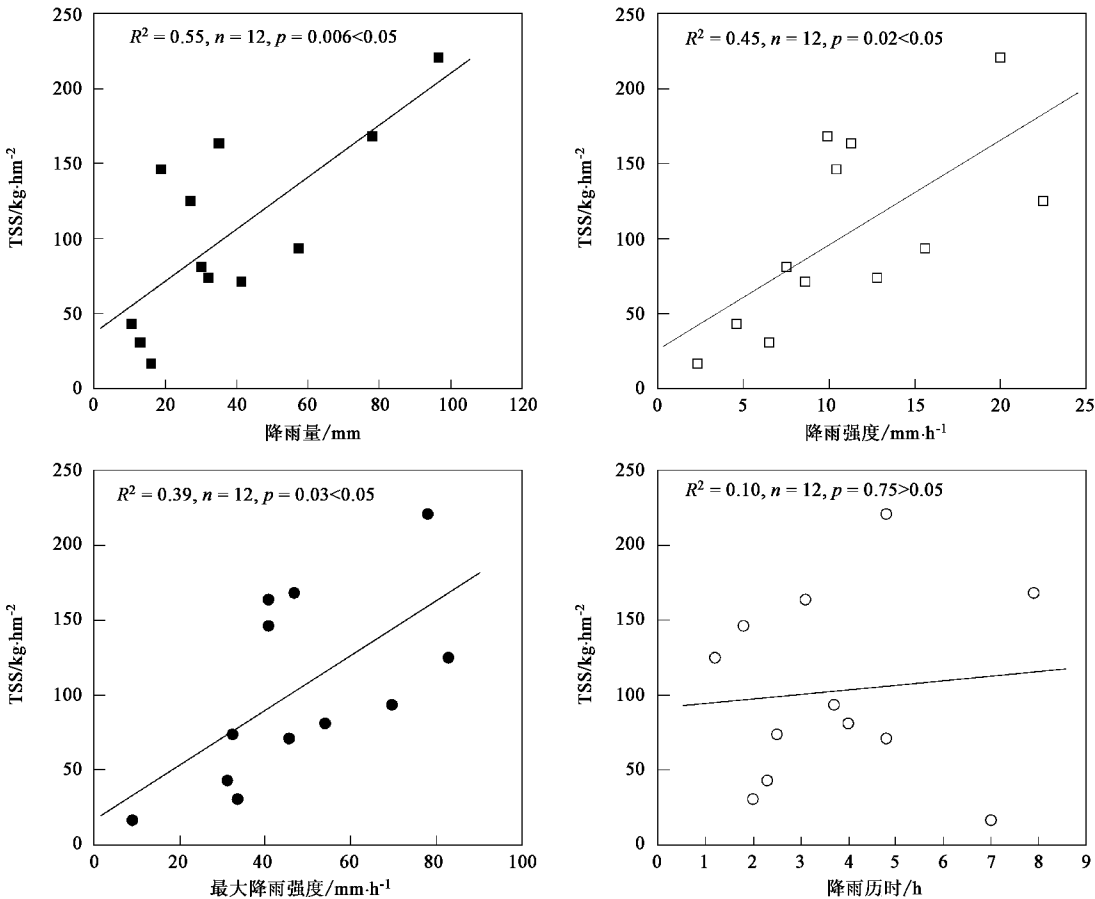


图 2 城市次降雨径流污染负荷(TSS)与主要降雨特征之间的相关关系
Fig.2 Correlation between the load of TSS load and rainfall characteristics

满足初损、入渗等损失,所以相比于降雨量,径流量更能代表地表径流的实际冲刷能力,次降雨径流污染负荷与径流深呈极显著正相关($p < 0.01$),见图 3.径流污染负荷同径流量的相关性($R^2 = 0.60$)要略高于同降雨量的相关性($R^2 = 0.55$),因而利用径流量可以更好地预测一次降雨径流事件所产生的污染负荷.

2.3 晴天累积天数对径流污染负荷的影响
晴天累积天数,即 2 次降雨间隔时间(t_{ADW}),可以用来表征城市地表污染物的累积程度,进而同城市降雨径流污染可能存在一定程度的相关性.汉阳地区十里铺集水区次降雨径流污染负荷与晴天累积天数的相关关系见图 4.对于十里铺集水区,城市次降雨径流污染负荷与晴天累积天数存在弱的正相

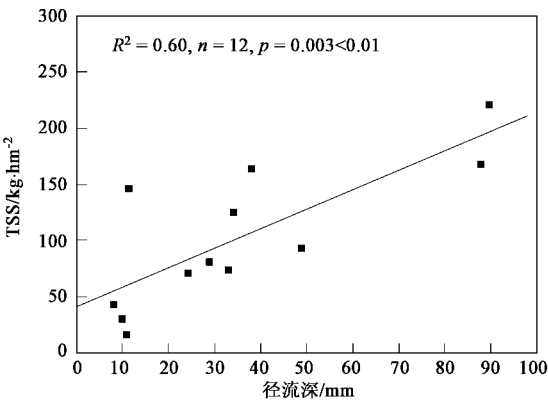


图3 城市次降雨径流污染负荷与径流深的相关关系
Fig.3 Correlation between the load of TSS load and runoff depth

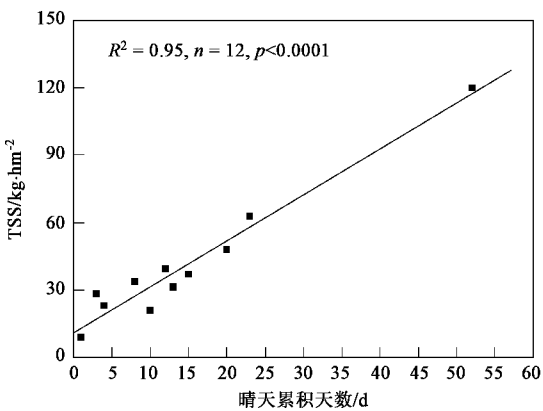


图5 初期 5 mm 径流中 TSS 负荷与晴天累积天数的相关关系
Fig.5 Correlation between TSS load in the first 5 mm of runoff and the antecedent dry weather days

关,随着晴天累积天数的增加,降雨径流污染负荷存在增加的趋势,但是两者之间的关系没有达到显著水平($p > 0.05$).

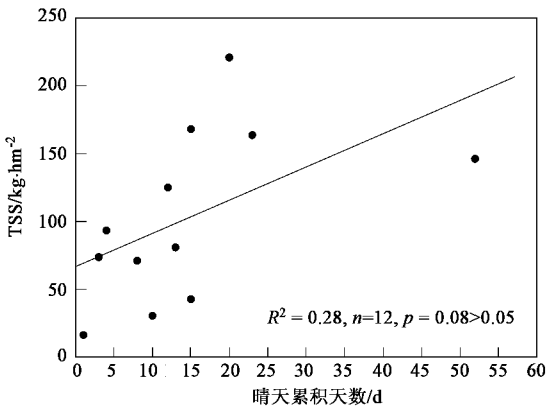


图4 城市次降雨径流污染负荷(TSS)与晴天累积天数的相关关系
Fig.4 Correlation between the load of TSS load and the antecedent dry weather days

为了进一步考察十里铺集水区降雨径流污染与晴天累积天数的关系,分别计算了每一场降雨初期 5 mm 径流中 TSS 的负荷,并分析其与晴天累积天数的相关关系,见图 5.初期 5 mm 径流中 TSS 的负荷与晴天累积天数呈极显著正相关($p < 0.0001$),随着晴天累积天数的增加,次降雨初期 5 mm 径流中的污染负荷线性增加.由此可以说明,汉阳十里铺集水区晴天累积天数,即 2 次降雨间隔时间,可以反映地表污染污染物的累积程度,且主要影响初期 5 mm 径流中的污染负荷,是影响城市降雨径流污染负荷的重要水文参数之一.

2.4 晴天累积天数与径流深对污染负荷的共同作用

从以上的分析结果看,径流深和晴天累积天数是影响城市径流污染负荷的主要水文参数.其中,晴天累积天数主要影响初期 5 mm 径流中的污染负荷,初期 5 mm 径流中 TSS 的负荷与晴天累积天数呈极显著正相关($R^2 = 0.95, p < 0.0001$),利用晴天累积天数可以很好地预测 1 场降雨径流过程初期 5 mm 径流中的污染负荷.对于初期 5 mm 之后径流中的污染负荷与相应的径流深也呈极显著的正相关($R^2 = 0.89, p < 0.0001$),见图 6.由此说明,城市 1 次降雨径流污染过程,初期 5 mm 径流之后的污染负荷主要由相应的径流深决定.

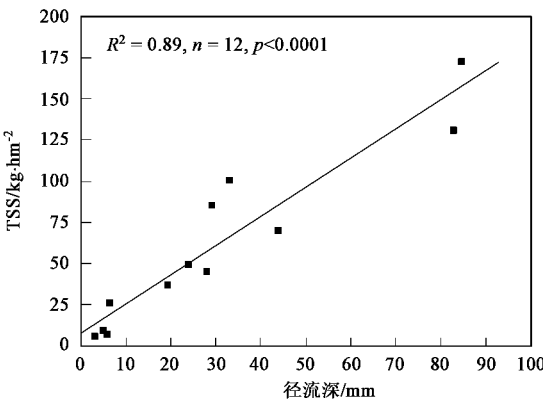


图6 初期 5 mm 径流之后径流中 TSS 负荷与相应径流深的相关关系
Fig.6 Correlation between the Total Suspended Solids load after the first 5 mm of runoff and the corresponding runoff depth

因此,对于城市 1 次降雨径流污染负荷的排放过程,可以分为 2 个阶段,初期 5 mm 径流中的污染负荷由 2 次降雨间隔时间决定,初期 5 mm 之后径流中的污染负荷由相应的径流深决定.为此,可以利用

2 次降雨间隔时间与径流深对城市次降雨径流污染负荷进行分段拟合,得到城市次降雨径流污染负荷与晴天累积天数和径流深的最优回归模型:

$$L_{TSS} = 2.0 \times t_{ADW} + 1.8(H - 5.0) + 18.7$$
$$R^2 = 0.90 \tag{3}$$

式中, L_{TSS} 为城市次降雨径流 TSS 负荷 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); t_{ADW} 为 2 次降雨间隔时间 (d); H 为降雨径流深 (mm). F 值为 41.64, 远大于 $\alpha = 0.01$ 显著水平下, 查表所得临界值 8.02, 达到了极显著水平.

因此, 汉阳地区城市次降雨径流污染负荷是在晴天累积天数和径流深的共同影响下形成的, 两者是影响城市降雨径流污染负荷的主要水文变量, 可以利用晴天累积天数和径流深预测城市次降雨径流的固体悬浮物污染负荷 (图 7).

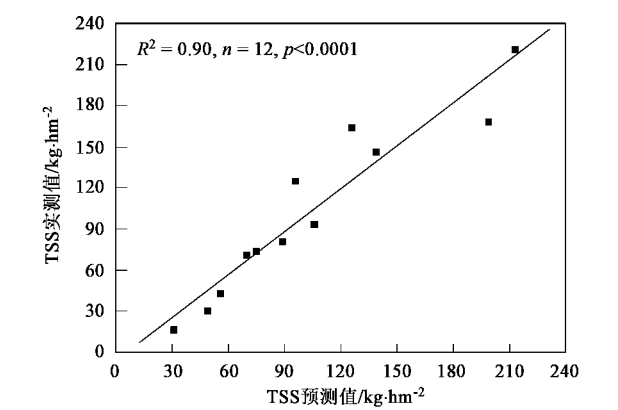


图 7 城市次降雨径流污染负荷实测值与预测值的相关关系
Fig. 7 Relationship between measured and estimated loads of total suspended solids

3 讨论

在研究城市地表径流污染过程中, 2 次降雨间隔时间常用来反映地表污染物的累积程度, 同降雨径流污染存在一定的关系^[13~15]. 城市径流污染具有晴天累积、雨天排放的特征. 随着晴天累积天数的增加, 累积于城市地表的污染物数量可能会增加, 因而晴天累积天数的增加意味着城市地表可被降雨径流冲刷的污染物数量在增加, 即增加了降雨径流的污染潜力. 但是, 不同地区大气污染状况、风速以及人类活动的方式和强度的不同, 地表污染物的累积速率不同^[16]. 另外, 城市地表卫生管理水平, 地表清扫频率、效率同样对地表污染物的累积具有重要的影响, 使得 2 次降雨间隔时间同地表污染物累积程度的关系不明确, 加之降雨特征对地表径流污染的影响, 因而使 2 次降雨间隔时间同地表径流污染之间

的关系更趋复杂. 以美国 EPA 开发的 SWMM (storm water management model) 为代表的一些模型将 2 次降雨间隔时间作为其模型最主要的参数, 而英国的 MOSQUITO 模型则认为 2 次降雨间隔时间对径流污染没有明显的影响, 认为降雨量是影响地表径流污染的主要因素^[17,18]. 根据笔者的研究, 2 次降雨间隔时间在武汉市汉阳地区城市径流污染形成中具有显著的影响. 可见, 在不同的气候区晴天累积与降雨特征对径流污染的耦合作用不同.

通过研究 2 次降雨间隔时间同地表径流污染的关系可以间接地反映人类活动在地表径流污染形成过程中的作用, 以及对地表径流污染程度的影响. 对于本研究的汉阳城区, 由于城区的不透水面比例高达 80% 以上, 从这一点看城市化水平很高. 但是, 汉阳城区是一个老城, 大量的城中村或类似于农村居住形式的居住小区存在, 建筑密度大, 绿化面积少, 或根本没有绿化用地, 居住区地表卫生很少清扫, 卫生管理差. 另外还有相当大的一部分居住面积, 是在汉阳发展工业时期兴建的居民小区, 绿化面积比例在 15% 左右, 虽然有清扫地表垃圾的管理, 但是根据调查清扫效率不高. 在这样的地表卫生管理状况下, 随着 2 次降雨间隔时间的增长, 地表累积的污染物数量必然增加, 因而在降雨时可被降雨径流冲刷的污染物增加. 此外, 我国城市道路在路面保洁管理方面, 也存在往雨水口中清扫地表垃圾的问题, 随着晴天时间的增加, 同样往雨水口清扫的污染物也会增加, 当降雨时雨水口积存的街土、垃圾便成为径流污染的来源之一.

汉阳地区城市降雨径流污染同 2 次降雨间隔时间存在显著相关性, 除了反映地表卫生管理状况以外, 同排水体制也存在密切的关系. 十里铺集水区是雨、污合流制排水系统. 合流制排水系统, 晴天时市政污水沉积在排水管道中的污染物也是降雨径流过程中的污染来源^[19,20]. 因此, 随着 2 次降雨间隔时间的增加, 排水系统累积的污染物增多, 相应地增加了降雨径流污染负荷.

汉阳地区城市降雨径流污染负荷与 2 次降雨间隔时间存在显著的相关性, 在一定程度上同汉阳地区的区域降雨特征有关. 汉阳地区地处亚热带大陆季风气候区, 降雨主要集中在每年的 4~8 月, 而且次降雨强度大 (表 1), 每次降雨可对城市集水区中累积的污染物形成 1 次有效的冲刷, 因而下次降雨冲刷的污染物基本是在上次降雨径流冲刷后地表重新累积的. 因此, 2 次降雨间隔时间才有可能反映 1

次雨前地表污染物的累积程度,进而才有可能影响次降雨径流污染负荷。

上述原因使得在汉阳城区 2 次降雨间隔时间必然同径流污染存在明显的相关关系,是影响城市降雨径流污染的一个重要的水文变量。而汉阳地区城市降雨径流污染与晴天累积天数的强相关性,正是对上述影响城市降雨径流污染因素的综合反映。因此,对于汉阳地区加强地表卫生管理和排水系统的管理,降低污染物的晴天累积效应,从源头上控制城市降雨径流污染会起到事半功倍的效果。

在汉阳地区,2 次降雨间隔时间决定可被降雨径流冲刷的污染物数量,主要影响初期径流(5 mm)的污染负荷,说明了城市降雨径流污染的初期冲刷特征,初期径流携带了大部分污染负荷^[21]。而初期 5 mm 径流过后的污染负荷主要由相应的径流深决定,随着降雨径流量的增加,尽管径流中污染负荷有很大程度地减少,但是还是具有持续输出污染物的特征,这时污染物的输出主要受径流量的影响。同时说明即使是在强降雨过程的后期,十里铺集水区中还有污染物可被降雨径流冲刷。因此,在汉阳地区降雨量和 2 次降雨间隔时间都是影响城市降雨径流污染负荷的重要水文变量,城市降雨径流污染负荷是在两者的耦合作用下形成的,利用 2 次降雨间隔时间和降雨径流量可以预测城市降雨径流污染负荷。

4 结论

(1) 汉阳地区 2 次降雨间隔时间与城市降雨径流污染负荷存在显著的正相关,是影响城市降雨径流污染负荷的重要水文变量。汉阳地区城市地表卫生和排水系统的管理状况在城市径流污染负荷形成过程中的作用是显著的。

(2) 城市降雨径流污染负荷是在 2 次降雨间隔时间和降雨径流量的耦合作用下形成的,利用 2 次降雨间隔时间和降雨径流量可以预测城市降雨径流污染负荷。

(3) 加强城市地表卫生的管理和排水系统的管理,降低污染物的晴天累积效应,从源头上减少污染物的数量,是控制城市降雨径流污染的首选途径。

参考文献:

[1] D'Arcy B, Frost A. The role of best management practices in alleviating water quality problems associated with diffuse pollution [J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **265**(1-3): 359 ~ 367.

[2] 夏青. 城市径流污染系统分析[J]. *环境科学学报*, 1982, **2**(4): 271 ~ 278.

[3] 施为光. 城市降雨径流长期污染负荷模型的探讨[J]. *城市环境与城市生态*, 1993, **6**(2): 6 ~ 10.

[4] 车武, 刘燕, 李俊琦. 北京城区面源污染特征及其控制对策[J]. *北京建筑工程学院学报*, 2001, **18**(4): 5 ~ 9.

[5] 温灼如, 苏逸深, 刘小靖, 等. 苏州水网城市暴雨径流污染的研究[J]. *环境科学*, 1986, **7**(6): 2 ~ 6.

[6] 胡雪涛, 陈吉宁, 张天柱. 非点源污染模型研究[J]. *环境科学*, 2002, **23**(3): 124 ~ 128.

[7] Ahyerre M, Chebbo G, Tassin B, *et al.* Storm water quality modeling an ambitious objective? [J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(1): 205 ~ 213.

[8] Brezonik P L, Sadelmann T H. Analysis and predicative models of stormwater runoff volume, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA [J]. *Water Research*, 2002, **36**: 1743 ~ 1757.

[9] Lee J G, Heaney J P, Lai F H. Optimization of integrated urban wet weather control strategies [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2005, **131**(4): 307 ~ 315.

[10] Chen J, Adams B J. Urban water control evaluation with analytical probabilistic models [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2005, **131**(5): 307 ~ 315.

[11] Calabro P S, Viviani G. Simulation of the operation of detention tanks [J]. *Water Research*, 2006, **40**: 83 ~ 90.

[12] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[13] Vaze J, Chiew Francis H S. Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface [J]. *Urban Water*, 2002, **4**(4): 379 ~ 389.

[14] Kim L H, Kayhanian M, Zoh K D, *et al.* Modeling of highway stormwater runoff [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **293**: 163 ~ 175.

[15] Gnecco I, Berretta C, Lanza L G, *et al.* Storm water pollution in the urban environment of Genoa, Italy [J]. *Atmospheric Research*, 2005, **77**: 60 ~ 73.

[16] Ball J E, Jenks R, Aubourg D. An assessment of the availability of pollutant constituents on road surfaces [J]. *Science of the Total Environment*, 1998, **209**(2-3): 243 ~ 254.

[17] Tshrintzis V A, Hamid R. Modeling and management of urban stormwater runoff quality: a review [J]. *Water Resources Management*, 1997, **11**(2): 136 ~ 164.

[18] Deletic A B, Maksimovic C T. Evaluation of Water Quality Factors in Storm Runoff from Paved Areas [J]. *Journal of Environment Engineering, ASCE*, 1998, **124**(9): 869 ~ 879.

[19] Chebbo G, Ashley R, Gromaire M C. The nature and pollutant role of solids at the water-sediment interface in combined sewer networks [J]. *Water Sciences and Technology*, 2003, **47**(4): 1 ~ 10.

[20] Chebbo G, Gromaire M C, Ahyerre M, *et al.* Production and transport of urban wet weather pollution in combined sewer systems: the "Marais" experimental urban catchment in Paris [J]. *Urban Water*, 2001, **3**: 3 ~ 15.

[21] 李立青, 尹澄清, 何庆慈, 等. 汉阳城市集水区尺度径流污染过程与初期冲刷特征[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(7): 1057 ~ 1061.