

滇池流域典型城郊降雨径流污染特征与排放过程

张德刚^{1,2}, 陈永川^{1,3}, 汤利¹

(1.云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2.红河学院生命科学与技术学院, 云南 蒙自 661100; 3.云南省热带作物科学研究所, 云南 景洪 666100)

摘要:选择滇池流域典型城郊代表性的两个功能区——居民生活区和居民生活-集市混合区进行降雨径流监测, 分析降雨径流污染特征及排放过程。结果表明, 降雨地表径流中总氮浓度在 $2.18\sim 29.40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 总磷浓度在 $0.18\sim 3.90\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 氨态氮浓度在 $0.87\sim 18.48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 硝态氮浓度在 $0.02\sim 3.64\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD_G 浓度在 $22.51\sim 362.92\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TSS 浓度在 $7.00\sim 882.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间。降雨地表径流污染物浓度高于地表水 V 类水环境质量标准。降雨径流中氮的主要污染物是氨态氮、颗粒态氮和溶解有机态氮, 磷的主要污染物以颗粒态磷和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 为主。降雨径流污染物浓度随降雨时间发生变化, 开始产生径流时污染物浓度较高, 之后随着雨强的平衡而趋于下降。降雨径流各污染物浓度是居民生活-集市混合区大于居民生活区, 居民生活区径流大于屋面径流; 次降雨径流污染物平均浓度(EMC)为居民生活-集市混合区普遍高于居民生活区。居民生活-集市混合区降雨径流 EMC 变化表现出更大的随机性。

关键词:降雨径流; 污染特征; 排放过程; 滇池流域; 城郊

中图分类号: X522 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2010)04-0733-07

Pollution Characteristics and Discharging Process in the Direct Runoff from Suburb Areas in Dianchi Lake Catchments

ZHANG De-gang^{1,2}, CHEN Yong-chuan^{1,3}, TANG Li¹

(1.College of Resources and Environmental Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2.College of Life Sciences and Technology, University of Honghe, Mengzi 661100, China; 3. Yunnan Institute of Tropical Crop Science, Jinghong 666100, China)

Abstract: Direct runoff is recognized as one of the major causes of water quality deterioration in the receiving water bodies. Two typical suburb representative resident areas, a Residential area and a Residential-Commercial mixing area, around the Dianchi Lake were chosen to study the concentrations and discharging process of pollutants in the direct runoff. The results showed the total concentrations of major pollutants in the direct runoff in the two studied areas of Dianchi Lake catchment were: $2.18\sim 29.40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ for total N; $0.18\sim 3.90\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ for total-P; $0.87\sim 18.48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ for $\text{NH}_3\text{-N}$; $0.02\sim 3.64\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ for $\text{NO}_3\text{-N}$; and the chemical oxygen demand (COD_G) and total suspended solids(TSS) were $22.51\sim 362.92\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $7.00\sim 882.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The concentration of each pollutant in the direct runoff was well above the value of Class V in the surface water quality standard. The major nitrogen pollutants were $\text{NH}_3\text{-N}$, particle-N and dissolved organic-N. The major phosphorus pollutants were particle-P and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$. The pollutant concentration in the direct runoff of Residential-Commercial Area was higher than that of Residential Area, which was higher than that in roof runoff. The pollutant concentration in the direct runoff varied with time. Concentrations of pollutants at the beginning of the runoff were very high, and then decreased sharply with the time to the stable stage. The Event Mean Concentration(EMC) of the Residential-Commercial Area was higher than that of Residential Area, with greater randomness.

Keywords: direct runoff; pollution characteristics; discharge process; Dianchi lake catchments; suburb

降雨冲刷地表沉积物产生携有大量污染物的径流进入水体, 对城市水环境造成了严重的危害^[1]。20

世纪 60 年代以来, 国外首先注意到了城市降雨径流污染导致地表水质退化的问题^[2], 并在城市降雨径流的水质特性、对地表水环境的影响评价、模型模拟以及污染控制措施等方面进行了大量的工作^[3-5]。近年来, 我国也开展了大量的降雨径流污染实测研究^[6-12], 在城市降雨径流水质特性、模型预测以及管理方面取得了很多成果^[9,13-14]。在滇池流域, 张荣社等^[15]对农业区的

收稿日期: 2009-08-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2005AA601010-02-5-03)

作者简介: 张德刚(1977—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为植物营养与环境。E-mail: zhangdg2000@163.com

通讯作者: 汤利 E-mail: ltang@ynau.edu.cn

暴雨径流特征进行了研究,刘忠翰等^[16]研究了滇池不同流域类型降雨径流对河流氮磷入湖总量的影响,但有关滇池流域城郊结合部降雨径流污染特征及排放过程的研究尚未见报道。

研究表明,滇池流域城郊村镇排放污水污染严重^[17-18],城镇生活、生产产生的固液废弃物在降雨径流的淋洗和冲刷作用下进入附近水体,对滇池水环境造成了严重的危害。因此,本文以滇池流域典型城郊结合部地区为研究对象,分析了居民生活区、居民生活-集市混合区降雨径流污染特征与排放过程,以期对滇池流域城郊结合地区降雨径流污染的控制提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

在滇池流域大清河下游选取典型城郊为研究对象,根据研究区域的特点把研究区域分为居民生活区和居民生活-集市混合区。居民生活区为北起张家庙村大清河桥头沿大清河向南 160 m,西至盘龙江畔区域,区域面积约为 43 200 m²,住房南北约 14 栋(其中有 7 户厂房和仓库),东西约 22 栋,共约 308 栋,除厂房和仓库为 1~2 层外,住房多为 3~5 层楼。其中沿道路四周第一层为铺面,第二至四层为出租房或旅店,顶楼为自家居住。出租房和旅店多为外地务工和短期劳工及其家属生活居住。常住人口约为 3 080 人。

居民生活-集市混合区为张家庙村北起第二污水处理厂,沿大清河向南 170 m 至张家庙村大清河桥头,东沿第二污水处理厂向西 270 m,至盘龙江畔区域,区域面积约为 45 900 m²,其中张家庙村大清河桥头有一条主集市贯穿东西,该集市上具有满足居民日常生活的各种经营,其中小餐馆、旅店、菜市场是主要的产污来源。住房南北约 22 栋,东西约 22 栋,共约 484 栋,住房多为 3~5 层楼。其中沿集市大路四周第一层为铺面,第二至四层为出租房或旅店,顶楼为自家居住。出租房和旅店多为外地务工和短期劳工及其家属生活居住。人口约为 4 840 人。

滇池流域为亚热带季风半湿润气候,冬无严寒、夏无酷暑,四季如春,一年内干湿分明,5—9 月为降雨季节,年降水的 80%以上集中在雨季。

1.2 监测降雨特征

由于降雨的随机性很大,全面监测全年降雨情况或者全程监测多次降雨的全过程受很多因素的限制,本研究主要集中监测了滇池流域典型的降雨季节——7 月和 8 月的降雨情况和这 2 个月内的几次

强降雨事件过程。各场次降雨特征见表 1。

表 1 2007 年 7、8 月滇池流域监测降雨的基本特征
Table 1 The characteristics of rainfall events sampled from July to August on 2007

降雨事件	降雨时间/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/d
1	07-18	97.2	46	2.11	—	5
2	07-22	10.2	3	3.4	—	2
3	07-23	6.5	24	0.27	—	0
4	07-24	3.5	4.5	0.78	7.2	0.5
5	07-25	46.3	3.75	12.34	—	0.83
6	07-28	6.0	2.5	2.4	—	2
7	07-29	12.5	9.5	1.32	—	0
8	08-01	1.5	—	—	—	3
9	08-11	39.4	6.75	5.83	42	10
10	08-12	0.9	1.5	0.6	1	0.71

注:表中 7 月 18 日降雨量为 7 月 18、19、20 日 3 日连续降雨量之和,“—”表示没有数据。

1.3 采样与分析

选取不同功能区作为降雨地表径流的采样区域,降雨时采用自制的采样工具用聚乙烯瓶(1 000 mL)在集水口处收集径流样品。采样时同步用容积法监测径流流量,用雨量计记录雨量。一般暴雨事件在降雨产流时即开始采样,在初期径流开始时,间隔 5~30 min 不等采样,随后根据降雨事件的情况间隔 1~2 h 不等,一般连续采样到雨停为止,所采样品为瞬时样品。水样 24 h 内送云南农业大学资源与环境学院实验室进行分析。

分析方法均采用国标法^[19]。其中 TN 和 TP 采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法,NO₃-N 和 NH₃-N 分别用紫外分光光度法和纳氏试剂比色法,COD_{Cr} 用重铬酸钾法,TSS 用重量法。

2 结果与讨论

2.1 降雨径流污染物特征

2.1.1 降雨径流污染水质特征分析

监测 10 次降雨地表径流、屋面径流分析结果见表 2。由表 2 可以看出,降雨地表径流中总氮浓度在 2.18~29.40 mg·L⁻¹,总磷浓度在 0.18~3.90 mg·L⁻¹,氨态氮浓度在 0.87~18.48 mg·L⁻¹,硝态氮浓度在 0.02~3.64 mg·L⁻¹,COD_{Cr} 浓度在 22.51~362.92 mg·L⁻¹,TSS 浓度在 7.00~882.00 mg·L⁻¹ 之间。降雨地表径流污染物浓度是地表水 V 类水环境质量的 1.36~7.68 倍。

将各形态氮磷含量与其所占百分比进行分析见

表 2 滇池流域城郊降雨径流污染物浓度特征(mg·L⁻¹)
Table 2 Characteristic pollution of stormwater runoff from Dianchi Lake Basin(mg·L⁻¹)

区域污染物特征		居民生活区(样品数 45)	居民生活-集市混合区(样品数 38)	屋面径流(样品数 7)
总氮	平均值	6.37±4.14 b	15.36±7.73 a	2.094±0.055 b
	浓度范围	2.18~20.19	6.85~29.40	2.040~2.150
硝态氮	平均值	0.65±0.71 a	0.39±0.34 a	0.048±0.01 a
	浓度范围	0.06~3.64	0.02~1.03	0.041~0.059
氨态氮	平均值	2.71±2.63 b	9.05±4.47 a	0.494±0.161 b
	浓度范围	0.87~11.51	4.10~18.48	0.391~0.680
总磷	平均值	0.62±0.55 b	1.54±0.98 a	0.056±0.024 b
	浓度范围	0.18~2.66	0.23~3.90	0.035~0.082
COD _{Cr}	平均值	111.62±77.94 a	169.69±79.42 a	43.44±6.22 a
	浓度范围	32.49~362.92	22.51~354.48	39.526~50.620
TSS	平均值	83.34±89.49 b	273.22±240.04 a	50.670±15.01 b
	浓度范围	11.50~319.50	50.50~882.00	36.000~66.000

表 3。从表 3 可以看出,对于氮元素,氨态氮所占比例最高,在 42.59%~58.95%之间;次之为颗粒态氮,在 24.90%~29.80%之间;溶解有机态氮在 13.61%~17.44%之间;硝态氮所占比例最低,在 2.54%~10.16%之间。可见,氮的主要污染物是氨态氮、颗粒态氮和溶解有机态氮 3 种形态。对于磷元素,颗粒态磷所占比例最高,在 52.02%~71.59%之间;其次为 PO₄³⁻-P,在 25.43%~25.47%之间;溶解有机磷最低,在 2.98%~22.51%之间。磷的主要污染物以颗粒态磷、PO₄³⁻-P 为主,溶解有机态磷在居民生活区中也占很大的比例。

将结果与其他地方研究结果^[7-11]进行比较,本研究区域降雨径流污染浓度处于中间水平,具有一般降雨径流污染浓度特征。污染物浓度最小和最大值的变异很大,随机性很强。不同功能区降雨径流水质存在较大的空间变异性。其中,居民生活-集市混合区降雨径流各污染物浓度较大,进行统计分析结果显示居民生活-集市混合区降雨径流各污染物浓度与居民生活区降雨径流各污染物浓度除硝态氮、COD_{Cr}外,其他污染物浓度之间差异显著。居民生活-集市混合区较居民生活区人为活动更频繁,产生的污染物更多,污染物浓度高。这一结果与其他研究者研究北京、上

海等地的降雨径流污染空间变化特征一致^[7,12]。

2.1.2 次降雨径流污染物平均浓度(EMC)特征分析

在任意一场降雨引起的地表径流过程中,径流中污染物的浓度随时间变化很大,因此通常采用次降雨径流污染物平均浓度(Event Mean Concentration)来表示在一场降雨径流全过程排放中某污染物的平均浓度^[1]。EMC 实质上是一场降雨径流全过程样品污染浓度的流量加权平均值^[20],可以用下式来计算出 EMC 的值^[14]。

$$EMC=\frac{\sum_{j=1}^n C_j \cdot V_j}{\sum_{j=1}^n V_j}$$

式中: C_j 为第 j 时段所测的污染物浓度,mg·L⁻¹; V_j 为第 j 时间段的径流量,m³; n 为时间分段数。

根据一年中集中监测 10 场降雨过程,利用该计算公式计算出每场降雨的 EMC 见表 4。由表 4 可以看出,居民生活区场次降雨总氮 EMC 在 2.34~11.58 mg·L⁻¹ 之间,平均为 6.71 mg·L⁻¹; 硝态氮 EMC 在 0.26~0.48 mg·L⁻¹ 之间,平均为 0.37 mg·L⁻¹; 氨态氮 EMC 在 1.12~6.05 mg·L⁻¹ 之间,平均为 2.53 mg·L⁻¹; 总

表 3 滇池流域城郊降雨径流各形态氮磷百分比(%)
Table 3 Percentage of composition of nitrogen and phosphorus in stormwater runoff(%)

区域	项目	氮形态					磷形态			
		TN	NH ₃ -N	NO ₃ ⁻ -N	DON	PN	TP	PO ₄ ³⁻ -P	DOP	PP
生活-集市混合区	平均值/mg·L ⁻¹	15.36	9.05	0.39	2.09	3.82	1.54	0.39	0.05	1.10
	百分比/%	100.00	58.95	2.54	13.61	24.90	100.00	25.43	2.98	71.59
居民生活区	平均值/mg·L ⁻¹	6.37	2.71	0.65	1.11	1.90	0.62	0.16	0.14	0.32
	百分比/%	100.00	42.59	10.16	17.44	29.80	100.00	25.47	22.51	52.02

表 4 滇池流域城郊场次降雨径流 EMC
Table 4 Event Mean Concentration of stormwater runoff from Dianchi Lake Basin

降雨日期/ 月-日	降雨量/ mm	居民生活区/mg·L ⁻¹						居民生活-集市区/mg·L ⁻¹					
		TN	NO ₃ -N	NH ₃ -N	TP	COD _{Cr}	TSS	TN	NO ₃ -N	NH ₃ -N	TP	COD _{Cr}	TSS
07-18	97.2	11.1	0.47	3.32	1.32	205	140.14	19.97	0.77	12.26	1.51	219.08	315.58
07-22	10.2	8.06	0.32	2.6	1.11	121.15	51	13.76	0.33	8.69	0.88	179.99	142
07-23	6.5	7.44	0.37	3	1.16	124.3	104	9.61	0.35	6.99	0.66	176.96	239.5
07-24	3.5	6.47	0.26	2.14	0.92	129.22	116	8.09	0.3	2.67	1.15	211.53	195
07-25	46.3	5.05	0.35	1.86	0.78	92.97	83.52	7.58	0.38	2.8	1.17	139.45	125.28
07-28	6.0	5.55	0.38	1.97	0.52	74.07	39	—	—	—	—	—	—
07-29	12.5	4.69	0.27	2.15	0.38	115.84	59.5	9.28	0.21	5.03	1.09	220.51	285
08-01	1.5	4.79	0.48	1.08	0.37	100.05	36.5	—	—	—	—	—	—
08-11	39.4	11.58	0.39	6.05	1.23	150.24	118.76	16.7	0.74	9.61	1.58	189.06	324.7
08-12	0.9	2.34	0.45	1.12	0.55	—	—	—	—	—	—	—	—
平均 EMC/mg·L ⁻¹		6.71	0.37	2.53	0.83	123.65	83.16	12.14	0.44	6.86	1.15	190.94	232.44

注:“—”表示没有数据。

磷 EMC 在 0.37~1.32 mg·L⁻¹ 之间,平均为0.83 mg·L⁻¹; COD_{Cr} EMC 在 74.07~150.24 mg·L⁻¹ 之间,平均为 123.65 mg·L⁻¹; TSS EMC 在 36.50~140.14 mg·L⁻¹ 之间,平均为 83.16 mg·L⁻¹。居民生活-集市区场次降雨总氮 EMC 在 7.58~19.97 mg·L⁻¹ 之间,平均为 12.14 mg·L⁻¹;硝态氮 EMC 在 0.21~0.77 mg·L⁻¹ 之间,平均为 0.44 mg·L⁻¹; 氨态氮 EMC 在 2.67~12.26 mg·L⁻¹ 之间,平均为 6.86 mg·L⁻¹;总磷 EMC 在 0.66~1.58 mg·L⁻¹ 之间,平均为 1.15 mg·L⁻¹;COD_{Cr} EMC 在 139.45~220.51 mg·L⁻¹ 之间,平均为 190.94 mg·L⁻¹; TSS EMC 在 125.28~324.7 mg·L⁻¹ 之间,平均为 232.44 mg·L⁻¹。

将研究区域场次降雨径流污染物 EMC 结果与其他地方研究结果^[9]进行比较可以看出,研究区域场次降雨径流污染物 EMC 处于中间水平,具有一般场次降雨径流污染物 EMC 水平。降雨径流污染具有很大的随机性,不同时间污染物浓度值相差很大,最小值和最大值之间的变幅极大。场次降雨径流污染物 EMC 具有很大的空间变异性,居民生活-集市混合区场次降雨径流污染物 EMC 普遍高于居民生活区,居民生活-集市混合区场次降雨径流污染物 EMC 变化表现出更大的随机性,规律性更差,特别是总磷、化学需氧量和总固体悬浮物的 EMC 变化随机性更大。这可能与居民生活-集市混合区中集市活动频繁、带入大量污染物有关。许多集市活动都会产生大量污染物,例如小饭店、露天菜市场等。

2.2 降雨径流污染排放过程

2.2.1 降雨径流污染物浓度随降雨历时变化

2007 年 8 月 11 日的降雨是降雨季节的一次强

降雨过程,整个降雨事件中有小雨、中雨、暴雨过程,选取该场降雨分析降雨径流污染物浓度随降雨历时变化关系,结果见图 1、图 2。可以看出,各污染物浓度总体上表现为降雨初期污染物浓度较高,特别是初期降雨强度和地表径流增大时,污染物浓度达到最高水平,持续一段时间后,污染物浓度迅速下降,并且一直下降至较低水平。

总氮、总磷和氨态氮之间有一致的变化趋势,污染物浓度变化较稳定。COD_{Cr} 和总固体悬浮物浓度之间有相似的变化趋势,污染物浓度波动性较大,但是也表现出一定的规律性,前半小时表现出上升的趋势,直到当降雨强度和流量增大到最高点以后才出现下降趋势,并且一直下降到一个比较低的水平。在这个过程中总固体悬浮物还出现两次小高峰,COD_{Cr} 出现一次小高峰。

沈桂芬等^[11]研究武汉城市降雨径流结果认为,降雨径流污染除了受空气质量影响外,还受到降雨强度、降雨量、降雨间隔时间和汇水面等因素的影响。由于城郊村镇不透水面的增加,很多地方基本上完全是水泥、沥青等不透水面,其产流和产污与城市道路相似,降雨初期,因初始冲刷带走大量的污染物,所以初期污染物浓度较高,到降雨后期,污染物浓度下降到比较低的水平。

2.2.2 次降雨径流污染物平均浓度(EMC)随降雨事件发生的变化

各场次降雨径流污染物 EMC 随降雨事件变化见图 3、图 4。可以看出,7 月 18 日到 20 日的次降雨各污染物浓度很高,之后随着降雨事件的频繁发生、降

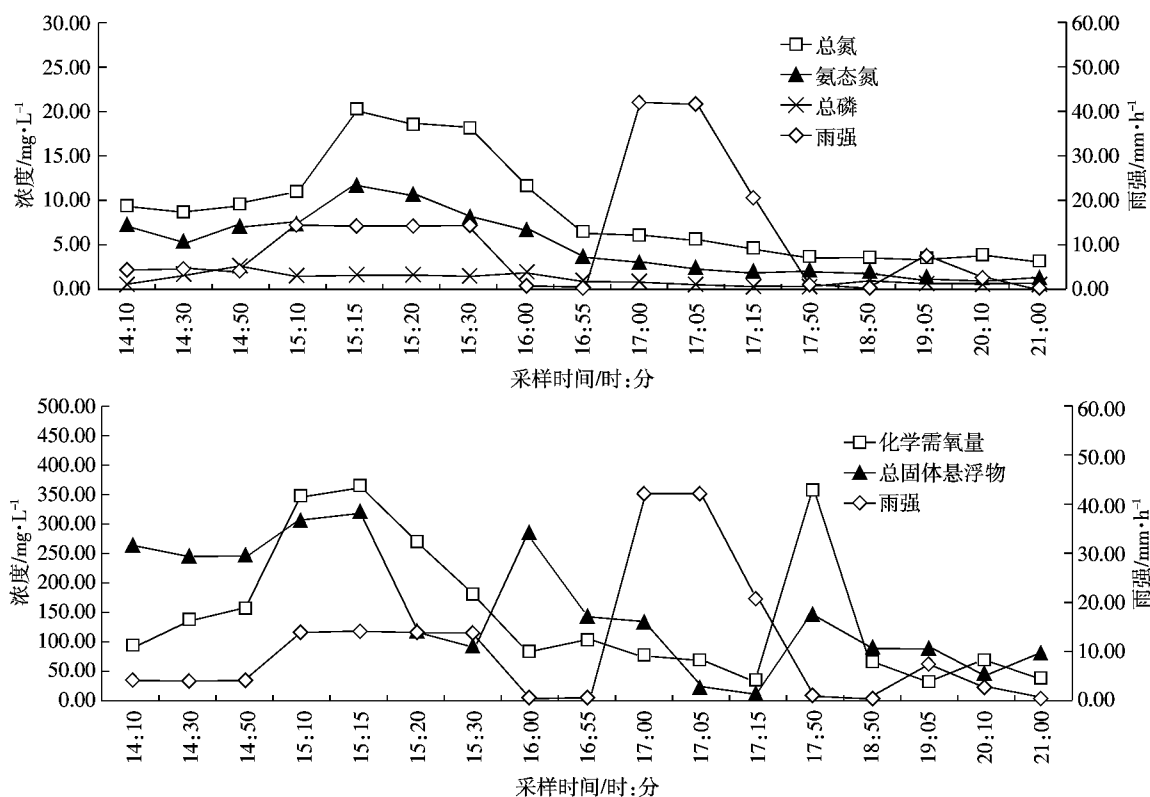


图1 居民生活区降雨径流污染物浓度随降雨历时变化

Figure 1 Pollutographs for August 11, 2007 rainfall events in inhabitant living zone

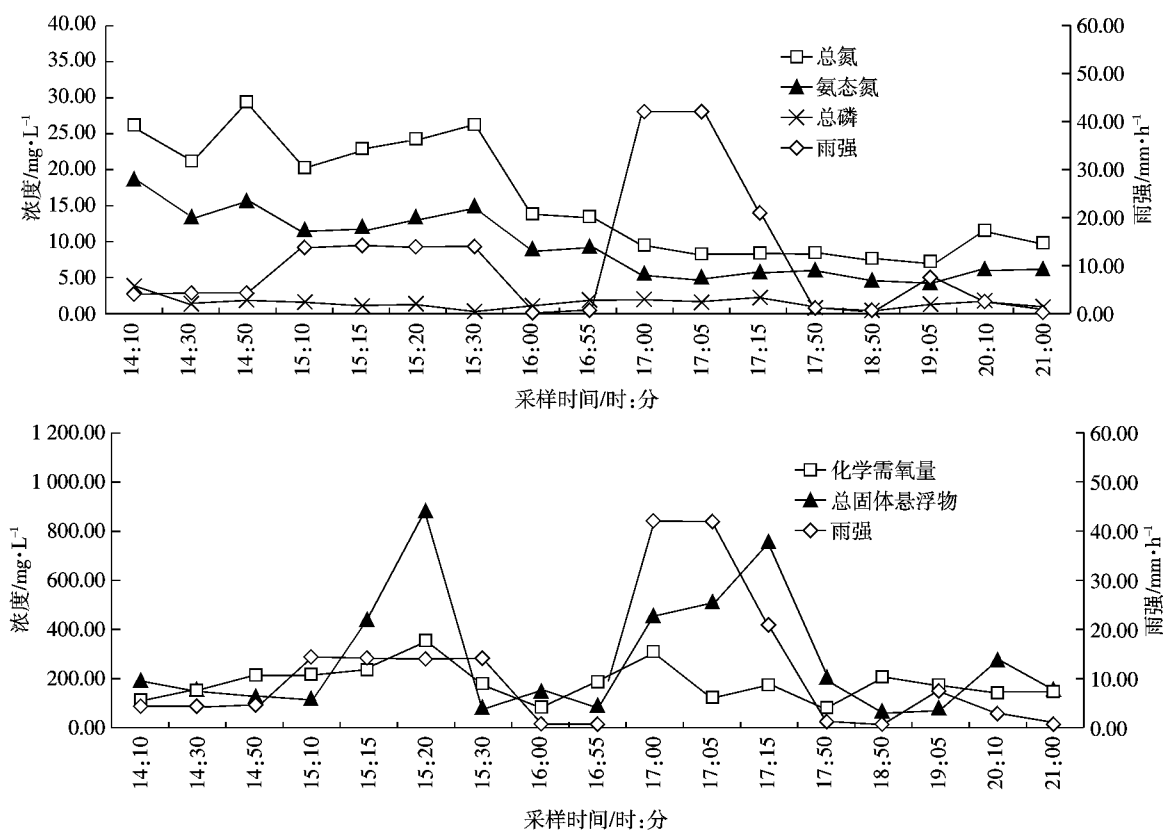


图2 居民生活-集市区降雨径流污染物浓度随降雨历时变化

Figure 2 Pollutographs for August 11, 2007 rainfall events in inhabitant living-business zone

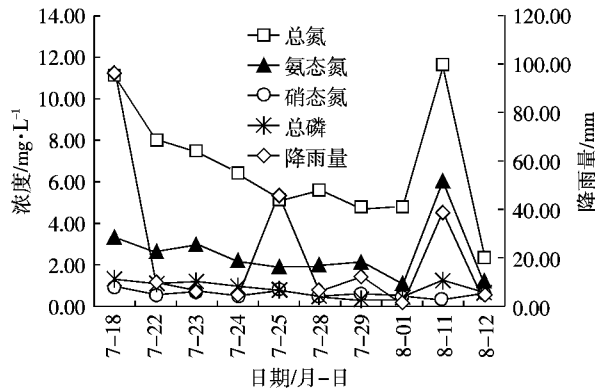


图3 居民生活区场次降雨径流 EMC 随降雨日期变化

Figure 3 Date change with EMC in inhabitant living zone

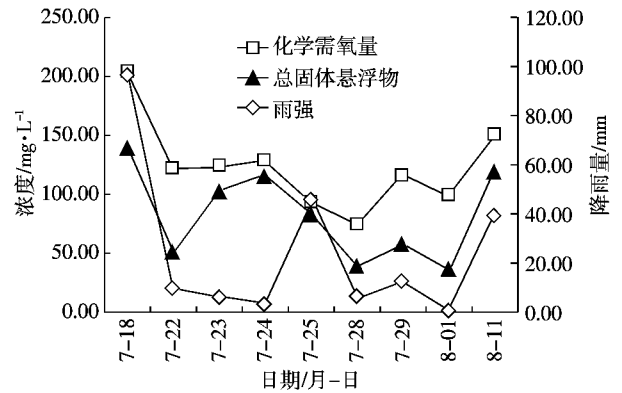


图4 居民生活-集市区场次降雨径流 EMC 随降雨日期变化

Figure 4 Date change with EMC in inhabitant living-business zone

雨对地表的冲刷和两次降雨事件间隔时间的缩短而出现浓度逐步下降的趋势,直到8月1日,各场次降雨径流污染物 EMC 下降到最低水平。但是由于城郊村镇卫生状况较差,一次降雨事件之后,距下一次降雨时间间隔较长时又产生大量污染物,强降雨事件再度发生时,又出现场次降雨径流污染物 EMC 升高的特征。8月11日强降雨事件中,各污染物 EMC 返回至较高的水平,仅稍小于7月18日降雨事件污染物 EMC。

在一年中初期降雨事件发生时,场次降雨径流污染物 EMC 很高,特别是一年中的前几次暴雨事件,带走大量的地表径流污染物。研究表明,前3场暴雨基本上带走30%以上的污染物。对于一次降雨事件来说,次降雨径流污染物 EMC 和降雨强度、降雨历时、次降雨时间间隔和地表清洁状况密切相关。

3 结论

(1)滇池流域城郊降雨径流污染物浓度超过地表水 V 类水标准,是滇池水质污染恶化的外源之一。降

雨径流中氮的主要污染物是氨态氮、颗粒态氮和溶解有机态氮这3种形态。磷的主要污染物以颗粒态磷、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 为主。

(2)城郊降雨径流水质存在较大的空间变异性。降雨径流各污染物浓度居民生活-集市混合区大于居民生活区,居民生活区径流大于屋面径流。

(3)城郊降雨径流污染物浓度和降雨强度、雨前天气状况有一定的相关性。降雨径流污染物浓度随降雨时间发生变化,开始产生径流时,污染物浓度较高,随着降雨时间的持续,污染物浓度下降,总氮、氨态氮和总磷之间表现出一致的变化趋势。

(4)城郊场次降雨径流污染物 EMC 初期降雨事件发生时较高,之后随着降雨事件的频繁发生和两次降雨事件间隔时间的缩短而浓度逐步下降,到出现较长的场前晴天后随着强降雨事件的发生,场次降雨径流污染物 EMC 又返回到比较高的水平。场次降雨径流污染物 EMC 居民生活-集市混合区普遍高于居民生活区。居民生活-集市混合区降雨径流 EMC 值变化表现出更大的随机性。

参考文献:

- [1] Brezonik Patrick L, Stadelmann Teresa H. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollution concentration from watersheds in the Twins Cities metropolitan area, Minnesota, USA[J]. *Water Research*, 2002, 36: 1742–1757.
- [2] Field R, Pitt R E. Urban storm induced discharge impacts: US Environmental Protection Agency research program review[J]. *Water Sci Technol*, 1990, 22: 1–7.
- [3] Braune M J, Wood A. Best management practices applied to urban runoff quantity and quality control[J]. *Water Sci Technol*, 1999, 39(12): 117–121.
- [4] Gromaire–Mertz M C, Garraud S, Gonzalez A, et al. Characterization of urban runoff pollution in Paris[J]. *Water Sci Technol*, 1999, 39(2): 1–8.
- [5] Lee J H, Bang K W. Characterization of urban stormwater runoff[J]. *Water Res*, 2000, 34(6): 1773–1780.
- [6] 黄金良, 杜鹏飞, 欧志丹, 等. 澳门城市路面地表径流特征分析[J]. 中国环境科学, 2006, 26(4): 469–473.
HUANG Jin-liang, DU Peng-fei, AO Chi-tan, et al. Characterization of urban roadway runoff in Macau[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(4): 469–473.
- [7] 任玉芬, 王效科, 韩冰, 等. 城市不同下垫面的降雨径流污染[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3225–3230.
REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, HAN Bing, et al. Chemical analysis on storm water–runoff pollution of different underlying urban surfaces[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3225–3230.
- [8] 赵建伟, 单保庆, 尹澄清. 城市旅游区降雨径流污染特征——以武汉动物园为例[J]. 环境科学学报, 2006, 26(7): 1062–1067.
ZHAO Jian-wei, SHAN Bao-qing, YIN Cheng-qing. Characterization of storm–water pollution in urban tourist attractions——A case study in Wuhan Zoo[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(7): 1062–1067.
- [9] 黄金良, 杜鹏飞, 欧志丹, 等. 澳门城市小流域地表径流污染特征分析[J]. 环境科学, 2006, 27(9): 1753–1759.
HUANG Jin-liang, DU Peng-fei, AO Chi-tan, et al. Characterization of urban surface runoff in two urban catchments in Macau[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(9): 1753–1759.
- [10] 卓慕宁, 王继增, 吴志峰, 等. 珠海城区暴雨径流污染负荷估算及其评价[J]. 水土保持通报, 2003, 23(5): 35–39.
ZHUO Mu-ning, WANG Ji-zeng, WU Zhi-feng, et al. Calculation of pollutant load of urban storm runoff and its estimation in Zhuhai City[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2003, 23(5): 35–39.
- [11] 沈桂芬, 张敬东, 严小轩, 等. 武汉降雨径流水质特性及主要影响因素分析[J]. 水资源保护, 2005, 21(2): 57–59.
SHEN Gui-fen, ZHANG Jing-dong, YAN Xiao-xuan, et al. Characteristics of runoff water quality in Wuhan and its main influencing factors[J]. *Water Resources Protection*, 2005, 21(2): 57–59.
- [12] 张善发, 李田, 高廷耀, 等. 上海市地表径流污染负荷研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(11): 57–61.
ZHANG Shan-fa, LI Tian, GAO Ting-yao, et al. Study on pollution load of urban surface runoff in Shanghai [J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(11): 57–61.
- [13] 边博, 朱伟, 黄蜂, 等. 镇江城市降雨径流营养盐污染特征研究[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 19–25.
BIAN Bo, ZHU Wei, HUANG Feng, et al. Characterizing nutrients of urban stormwater runoff in Zhenjiang[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(1): 19–25.
- [14] 李立青, 尹澄清, 何庆慈, 等. 武汉汉阳地区城市集水区尺度降雨径流污染过程与排放特征[J]. 环境科学学报, 2006, 26(7): 1057–1061.
LI Li-qing, YIN Cheng-qing, HE Qing-ci, et al. Catchment—scale pollution process and first flush of urban storm runoff in Hanyang, Wuhan City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(7): 1057–1061.
- [15] 张荣社, 周琪, 史云鹏, 等. 滇池流域农业区的暴雨径流特征研究[J]. 中国给水排水, 2003, 19: 13–16.
ZHANG Rong-she, ZHOU Qi, SHI Yun-peng, et al. Study on storm runoff characteristics in agricultural area in the Dianchi Valleys[J]. *China Water & Wastewater*, 2003, 19: 13–16.
- [16] 刘忠翰, 贺彬, 王宜明, 等. 滇池不同流域类型降雨径流对河流氮磷入湖总量的影响[J]. 地理研究, 2004, 23(5): 153–164.
LIU Zhong-han, HE Bin, WANG Yi-ming, et al. Effects of rain fall runoff on total nitrogen and phosphorus flux in different catchments of Dianchi Lake, Yunnan, China[J]. *Geographical Research*, 2004, 23(5): 153–164.
- [17] 张德刚, 汤利, 陈永川, 等. 滇池流域典型城郊村镇排放污水氮磷特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6): 2245–2250.
ZHANG De-gang, TANG Li, CHEN Yong-chuan, et al. Study on discharge rule and character of nitrogen and phosphorus for household wastewater from suburb typical region in Dianchi lake catchment[J]. *Journal of Agro–Environment Science*, 2007, 26(6): 2245–2250.
- [18] 张德刚, 汤利, 陈永川, 等. 滇池流域典型城郊村镇排放污水COD_{Cr}、TSS特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1446–1450.
ZHANG De-gang, TANG Li, CHEN Yong-chuan, et al. Study on discharge rule and character of COD_{Cr} and TSS for household wastewater from suburb typical region in Dianchi lake catchment[J]. *Journal of Agro–Environment Science*, 2008, 27(4): 1446–1450.
- [19] 国家环境保护总局, 《水和废水监测分析方法》编委会编. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 107–108, 243–248.
State Environmental Protection Administration of China. Inspection and analytical approach for water and wastewater[M]. The 4th Edition. Beijing: China Environment Science Press, 2002: 107–108, 243–248.
- [20] Butcher J B. Buildup, wash off and event mean concentration[J]. *Journal of the American Water Association*, 2003, 39(6): 1521–1528.