

暴雨径流污染负荷的时空分布与输移特性研究

黄俊, 张旭, 彭炯, 李广贺

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要:通过对滇池流域典型区域多年暴雨径流、化学物质构成等实测资料的统计及相关分析,阐明了暴雨径流与 N、P 及固态污染物输移的时空分布特征。通过粒径分析等实验,探讨了 N、P、SS 与降雨特性之间的关系。

关键词: 暴雨径流; 污染物输移; 非点源污染; 时空分布; 粒径分析

中图分类号: X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 – 2043(2004)02 – 0255 – 04

Temporal and Spatial Distribution and Transportation of Nitrogen and Phosphorus in Stormwater Runoff

HUANG Jun, ZHANG Xu, PENG Jiong, LI Guang-he

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Nitrogen, phosphorus and suspended solid in stormwater runoff are suggested as important parts of non – point source pollution and lake eutrophication. Multi – yearly (2000—2002) stormwater runoff and their chemical composition data were collected from Dianchi watershed and analyzed to examine temporal and spatial distribution and transportation of nitrogen, phosphorus and suspended solid. The relationships between the characteristic of rainfall and nitrogen, phosphorus, suspended solid are also studied through granularmetric analysis.

Keywords: stormwater runoff; pollutants transportation; non – point pollution; temporal and spatial distribution; granularmetric analysis

近年来,随着管理力度的加大,污染治理水平的提高,点源污染已得到明显的控制,非点源污染问题日益突出。已有的研究表明,暴雨径流的非点源污染,已成为湖泊水体富营养化的重要营养物质来源^[1~3]。由于暴雨产生的径流对地表有强烈的冲刷作用,加之农药化肥的使用量和土地耕作强度的逐年加大,大量污染物在暴雨径流的冲刷下从地表向湖区迁移。因此,暴雨期间,不但河流的流量变化十分迅速,而且径流中的污染物浓度也远远超过了非暴雨期^[4,5]。

非点源污染是指地面的各种污染物质如城市垃圾、农田中的化肥、农药、重金属及其他有毒、有害物质以及大气悬浮物随地面径流或经土壤、地下水系统淋滤、循环进入地表水体造成的污染。特点是通过不

确定的途径在不确定的时间排放不确定的量^[6,7]。暴雨径流是非点源污染发生的主要动力,流域内降水的时间分布决定非点源污染发生的时间特征。

暴雨径流污染物的输移与时空分布特征研究,对于准确评价湖泊富营养化发生的原因、选择有效的污染控制措施是至关重要的。

本文以滇池流域典型地域为暴雨径流的具体研究对象,在对多年暴雨径流监测资料的统计与分析的基础上,结合实验室和现场的实验,研究了暴雨径流中主要污染物组分与降雨特性之间的关系,并分析得出几种主要污染物的时空分布与输移规律。

1 降水与水文特征

滇池面源污染控制示范区(以下简称示范区)位于滇池东岸,地势平坦,水利发达。但示范区东南边界有一山丘,该山主峰海拔 2 062 m,多台地荒坡,蕴藏磷矿。区内主要河流是捞渔河,属常年性河流,其支流胜利大渠和新村渠这两大汇水区的径流产水量占整个示范区径流量的 70% ~ 83%。

收稿日期: 2003 – 03 – 23

基金项目: 滇池流域面源污染控制技术研究,国家重大科技攻关项目 (2000 – 03)

作者简介: 黄俊(1980—),男,清华大学环境科学与工程系硕士研究生。E – mail: greef97@ mails. tsinghua. edu. cn

1.1 降水特征

示范区为亚热带季风半湿润气候,冬无严寒、夏无酷暑,多年平均降雨量 798.8 mm,年蒸发量 2 045.9 mm,相对湿度 74%,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。

为了考察降雨强度、频率与暴雨径流之间的关系,对示范区内的降雨过程进行了监测。监测点位于示范区内中南部开阔地区。图 1 反映了示范区的降雨过程。

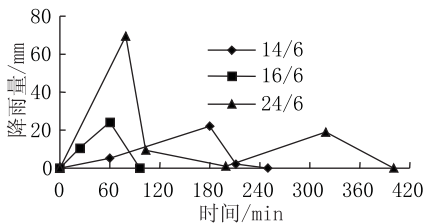


图 1 2002 年前 3 场暴雨降雨过程线
Figure 1 Precipitation process of the first three storms in 2002

从图 1 可看出,示范区降雨峰值出现得很快,过程曲线斜率大,降雨历时短,降雨强度大。

1.2 水文学特征

2000—2002 年的 13 场典型暴雨径流的降雨过程及现场检测的流量数据表明,暴雨径流是一个发生、发展、高潮,然后逐渐消退的过程。一般,在暴雨开始后 2 h 左右,暴雨径流的流量到达峰值,之后流量渐渐变小,一次暴雨形成的暴雨径流持续时间在 10~24 h 之间。

一次降雨过程,经植物截流、填洼、下渗和蒸发等项损失后,进入河网形成径流的水量比降雨总量小,而且经坡地漫流与河网汇流,在时程上起了二次再分配的作用,使过程变缓,历时增长,时间滞后。这样造成了降雨过程和径流过程在时空上的差异。这种差异在径流流量线相对于降雨过程线的滞后上得到体现^[8]。

2 污染物的时空分布

由于氮磷是造成水体富营养化的重要因素,悬浮固体是造成湖泊老化的重要因素,所以本实验主要测定 TN、TP、SS 三项指标。

实验中采用紫外分光光度法测定总氮,采用钼锑抗分光光度法测定总磷,采用重量法测定水样中的总固体悬浮物。采用上海安捷伦有限公司提供的 721 分光光度仪测定吸光度。粒径分析采用 Malvern Instrument 公司 Malvern II K 粒径分析仪测定^[9,10]。

2.1 污染物时间分布

为了研究污染物在整个雨季的浓度变化情况,对示范区内 2002 年雨季的所有暴雨进行了跟踪检测。表 1 显示较大强度暴雨产生的径流中污染物的平均浓度。

表 1 2002 年雨季暴雨雨量及径流中污染物浓度
Table 1 Quantity of stormwater and pollutants concentration of runoff during the rainy season in 2002

暴雨日期	雨量 /mm	SS 平均浓度 /mg · L ⁻¹	TP 平均浓度 /mg · L ⁻¹	TN 平均浓度 /mg · L ⁻¹
6. 14	29. 1	4 682	4. 17	12. 36
6. 16	41. 0	11 764	3. 73	8. 73
6. 24	120. 8	2 756	4. 10	14. 69
6. 28	14. 9	1 068	2. 07	5. 75
7. 4	35. 1	863	1. 83	5. 30
7. 7	18. 3	508	1. 55	6. 47
7. 13	18. 1	253	1. 15	3. 71
7. 18	45. 8	324	1. 74	5. 24
7. 24	12. 5	2 408	1. 31	4. 18
7. 31	12. 2	824	1. 76	3. 18
8. 3	26. 9	386	1. 22	4. 29
8. 10	22. 3	240	1. 93	6. 15
8. 13	10. 4	197	1. 38	4. 73
8. 16	16. 5	367	1. 44	5. 04
8. 22	13. 7	205	1. 13	3. 29
9. 4	10. 2	114	0. 92	4. 51
9. 13	7. 8	157	1. 17	3. 84

分析表 1 中的数据得出如下结论:(1) 雨季前 3 场暴雨的雨量占到了雨季总降水量的 35.4%, 污染物浓度也很高,SS 的浓度是中后期暴雨径流的 10 倍以上,TP、TN 浓度是中后期暴雨径流的 3 倍以上;(2) 7 月是多雨季节,平均每隔四五天就会有一场降雨,雨量一般在 20mm 左右,污染物浓度不高;(3) 从 8 月下旬开始,降雨频率和雨量都大幅度减小,污染物浓度也呈下降趋势。

2.2 总磷的构成与变化特征

总磷随时间变化的趋势和径流量的变化趋势大体相同:暴雨发生初期 TP 浓度急剧增大,在 2~3 h 内达到峰值,然后呈指数衰减。这主要是因为高强度的暴雨径流冲刷能力比较强,将大量的固态磷和含磷土壤颗粒带入径流。由于降水过程与径流过程的时空差异,TP 浓度峰值通常超前于径流的流量峰值达到。图 2 是几场暴雨的 TP 随时间变化特征。

示范区内暴雨径流中的总磷的峰值浓度一般在 2 mg · L⁻¹ 左右。暴雨径流中高浓度的总磷来源有二:一是暴雨冲刷导致的农田磷肥流失;二是位于山顶的露天磷矿粉末被雨水冲刷到山脚的沟渠中。

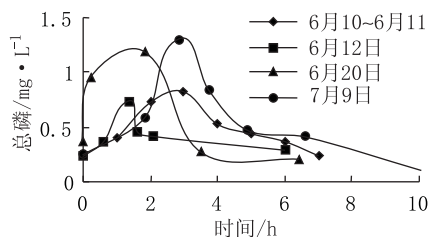


图 2 2000 年前 4 场暴雨新村渠下游断面总磷随时变化

Figure 2 Temporal changes of total phosphorus concentration in the first four storms in 2000

暴雨径流中总磷的主体成分是固态磷, 占到总磷的 70% 以上。这是由于磷在自然界的存在形态主要是磷酸氢钙等不溶于水的化合物, 在暴雨径流的冲刷作用下, 吸附固态磷的细小颗粒进入暴雨径流, 构成了暴雨径流中总磷的主要成分。

2.3 总氮的构成与变化特征

总氮随时间的变化趋势和径流量不同, 在暴雨径流量最大时达到浓度的最小值, 如图 3 所示。因为总氮的主要成分是可溶性氮, 其迁移到暴雨中的方式主要是靠雨水的浸泡溶解, 在暴雨径流强度比较大时, 由于雨水的总流量大, 停留时间短, 因此对应着的是总氮的最低值。

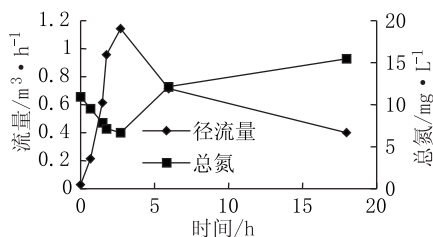


图 3 暴雨径流量及总氮随时变化

Figure 3 Quantity of runoff and temporal changes of total nitrogen concentration in 2001

暴雨径流中总氮的最大浓度在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 固态氮大约可占总氮的 40%。图 4 是分析典型暴雨径流水样中总氮构成得到的结果。

2.4 总悬浮物的变化特征与粒径分布

总悬浮物 (Suspended Solid, 简称 SS) 的主体成分

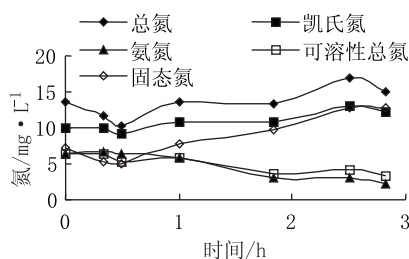


图 4 暴雨径流中总氮的构成

Figure 4 Composition of total nitrogen in stormwater runoff in 2000

是有机和无机颗粒, 监测数据表明固体颗粒物中包含了大量的固态氮和固态磷, 这些污染物进入滇池后造成水体的氮磷负荷增长, 构成氮磷内源的主体。

暴雨径流中 SS 的变化趋势与径流量的变化趋势也基本吻合。与总磷的情况类似, 由于径流过程相对于降雨过程的滞后, SS 浓度的峰值先于径流量的峰值达到。

示范区暴雨径流总悬浮物粒径分析结果表明, 90% 以上的悬浮物集中在 $5 \sim 30 \mu\text{m}$ 的粒径范围内。图 5 是典型水样的粒径分布。

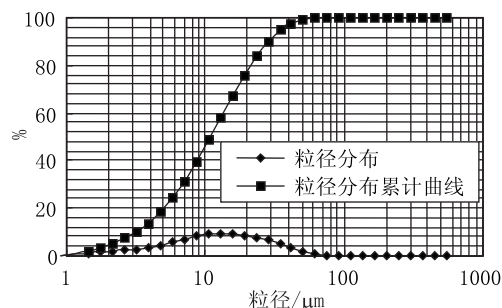


图 5 暴雨径流中固体悬浮物的粒径分布

Figure 5 Particle diameter distribution of suspended solid in stormwater runoff

可见, 此次暴雨径流中的悬浮物的粒径分布近似呈对数正态分布, 略向小粒径方向偏移。其中, d_{10} 为 $3.62 \mu\text{m}$ (d_{10} 表示总悬浮物中低于该粒径的固体颗粒占总量的比例为 10%, 下同), d_{50} 为 $11.78 \mu\text{m}$, d_{90} 为 $30.57 \mu\text{m}$ 。根据总悬浮物的粒径分布范围可以推断其主要成分为粘土和粉砂。

3 氮磷污染物浓度与固体悬浮物粒径之间的关系

暴雨径流中悬浮固体所携带的固态氮磷占总氮总磷相当大的比例, 是入湖氮磷污染物一个重要的来源。为了解不同粒径的悬浮固体携带氮磷污染物的能力, 以选择针对性的治理手段, 对典型暴雨径流水样进行了分离粒径实验。本实验通过不同的重力沉降时间将水样分离成粒径分布不同的 4 组水样 (结果见表 2), 然后分别测定 4 组水样的 TN、TP、SS 等指标 (结果见图 6)。

从图 6 可以看出, 随着粒径的减小, SS 显著下降, TP 浓度下降的趋势与 SS 的相关度很好, 接近线性关系, 而 TN 浓度仅略有降低。这表明悬浮固体携带氮的能力较为有限, 去除 SS 并不能有效地去除 TN; 磷主要由悬浮固体输运, 不同粒径的悬浮固体输运能力

表 2 重力沉淀实验结果

Table 2 Results of the gravity sedimentation experiment

水样编号	沉淀时间	d50	d90
	/min	/μm	/μm
径流水样	0	12.108	63.958
1 号水样	5	25.769	94.113
2 号水样	15	14.065	45.493
3 号水样	35	9.362	27.046
4 号水样	75	6.944	20.736

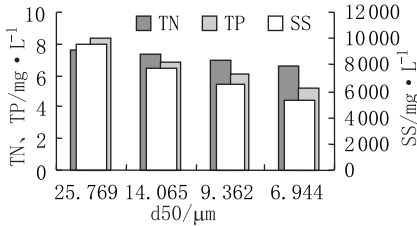


图 6 暴雨径流 TN、TP、SS 与粒径的关系

Figure 6 Relationship between particle diameter and pollutant concentration in stormwater runoff

差别不大。这与前面 TN 主要由可溶性氮构成、TP 主要由固态磷构成的结论是吻合的。

4 结论

- (1) 暴雨径流主要是由强降雨形成的。降雨强度越大,对地面的冲刷能力也就越强,携带的污染物浓度也相应增大。径流过程在时间上存在相对于降雨过程的滞后。
- (2) 前 3 场暴雨的雨量大,污染物浓度很高,携带的污染物总量很大,是暴雨径流控制工作的重点。
- (3) 总悬浮物、总磷浓度变化过程与流量变化过程有大体相同的趋势,即径流初期,随着流量的增长污染物浓度迅速增加,并在流量峰值之前出现浓度峰值,浓度达到峰值之后,随时间呈负指数规律衰减。输出量大小主要受降雨量、降雨强度的影响,与径流量

有较好的相关关系。

(4)总氮的浓度变化与流量变化之间无明显的相关关系。但输出量与径流量之间也存在明显的正相关关系。

(5) 总磷主要由悬浮物输运,去除 SS 可显著降低 TP 浓度;总氮情况不同,去除 SS 并不能有效降低其浓度。

参考文献:

[1] C L Douglas, Jr., K A King and J F Zuzel, Nitrogen and phosphorus in Surface Runoff and Sediment from a Wheat – Pea Rotation in Northern Oregon[J]. *J Environ Qual*, 1998, 27: 1170 – 1177.

[2] K F Ng Kee Kwong, A Bholah, L Volcy, K Pynee. Nitrogen and phosphorus transport by surface runoff from a silty clay loam soil under sugarcane in the humid tropical environment of Mauritius[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2002, 91 147 – 157.

[3] 郑西亚,等. 湖(库)水体富营养化综合防治对策[J]. 重庆环境科学, 2001, 23(4):31.

[4] 杨具瑞,方 铎. 湖泊暴雨径流水质模拟研究[J]. 环境科学学报, 1999.

[5] Comin F A, Romero J A, storga V A, et al. Nitrogen Removal and Cycling in Restored Wetlands Used as Filters of Nutrients for Agricultural Runoff [J]. *Wat Sci Tech*, 1997.

[6] 彭近新,陈慧君. 水质富营养化与防治[M]. 北京:中国环境科学出版社,1988.

[7] 朱 萱,鲁纪行,边金钟,等. 农田径流非点源污染特征及负荷定量方法探讨[J]. 环境科学,1985.

[8] 梁季阳. 秭归暴雨与水文特征分析[J]. 地理研究, 1995.

[9] 许保玖. 当代废水处理原理[M]. 北京:高等教育出版社,1990.

[10] 魏复盛. 水和废水监测分析方法指南[M]. 北京:中国环境科学出版社,1994.

[11] Lee, Dowon l Dillaha, Theo A. l Sherrard, Joseph H. Modeling phosphorus transport in grass buffer strips[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1989, 115(2).

[12] 阎伍攻. 巢湖流域不同土地利用类型地表径流污染特征研究 [J]. 长江流域资源与环境,1998.

[13] 车 伍,欧 岚,汪慧贞,等. 北京城区雨水径流水质及其主要影响因素[J]. 环境污染治理技术与设备,2002.