

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.03.027

潭江泗合水流域降雨径流非点源污染特征分析

冯麒宇, 胡海英, 黄国如

(华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640)

摘要:以广东省江门市潭江泗合水流域为研究对象,对 2014 年 5 月两场降雨事件的水质、水量进行同步监测,研究降雨径流条件下非点源污染物的输出机理和时空变化规律。结果表明:BOD₅、TN 和 TP 表现出明显的初期冲刷效应;输出污染物中可溶性磷占 TP 比例较大,NH₃-N 在径流前半段表现出初期冲刷效应,后半段其质量浓度与径流量呈负相关关系;COD_{Mn} 质量浓度呈波浪锯齿状变化,后期质量浓度变化受到壤中流主导退水过程的影响;各污染物通量变化趋势和径流量变化趋势大体相同,两者相关性显著;各污染物的输出质量浓度与 TSS 输出质量浓度无明显的相关性,表明悬浮物对其他污染物输出质量浓度的贡献相对较小。最后,根据实验结果以及实践经验提出流域管理建议。

关键词:降雨径流监测;非点源污染;特征分析;初期冲刷效应;泗合水流域

中图分类号:TV122 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2016)03-0143-06

Analysis of characteristics of non-point source pollution in rainfall-runoff process in Siheshui Watershed of Tanjiang Valley

FENG Qiyu, HU Haiying, HUANG Guoru

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The Siheshui Watershed of the Tanjiang Valley, located in Jiangmen City, Guangdong Province, was used as the research region. Simultaneous monitoring of water quality and quantity during two rainfall events that occurred in May 2014 was conducted in order to study the characteristics and temporal and spatial variation of non-point pollutant emission in the rainfall-runoff process. The results show that the concentrations of pollutants such as BOD₅, TP, and TN were high at the preliminary stage of the rainfall-runoff process, indicating a significant first flush effect. Soluble phosphorus accounted for a large proportion of the total phosphorus. The concentration of ammonia exhibited a first flush effect during the first half of the runoff process, and was negatively correlated with the volume of runoff during the second half of the process. The concentration of COD_{Mn} showed a wavy and jagged change trend, and in the later period the concentration was influenced by the water withdrawal process dominated by the interflow. The pollutant flux and the volume of runoff had an approximately identical change trend, and a remarkable correlation between them was detected through statistical analysis. There was no significant correlation between the output concentration of TSS and the concentrations of other pollutants, indicating that the suspended solids made a small contribution to the output concentrations of other pollutants. Based on experimental results and practical experience, recommendations are given for the basin's management.

Key words: rainfall-runoff monitoring; non-point source pollution; characteristic analysis; first flush effect; Siheshui Watershed

基金项目:国家自然科学基金(51209096);中央高校基本科研业务费专项(2015ZM110)
作者简介:冯麒宇(1991—),男,硕士研究生,研究方向为水文学及水资源。E-mail: 394963409@qq.com
通信作者:胡海英,讲师,博士。E-mail: ethyhu@scut.edu.cn

农业非点源污染因为其随机性、滞后性、不确定性和隐蔽性等特点越来越成为影响水体质量的重要因素。氮、磷作为农田周边水体富营养化的驱动因子,国内外学者很早就针对其在流域内的排放过程和迁移规律做了大量的监测及模型研究,并强调控制农村非点源污染的重要性^[1-2]。李长嘉等^[3]在晋江西溪流域对茶园和裸地的径流产沙及氮、磷流失过程进行对比实验,得到2年茶园,4年茶园、裸地在污染物流失量上的差异;蒋锐等^[4-5]在四川盆地紫色土丘陵地区探讨了氮、磷的浓度、形态随降雨径流变化,发现氮素迁移前期以PN为主,后期以NN为主,而磷素主要以地表径流迁移的PP为主,且土壤侵蚀对磷素流失起主导作用;盛海峰等^[6]采用野外采样和室内实验结合的方法,在宜兴梅林小流域发现悬浮态磷与可溶性磷占TP百分比与下垫面和植被等因素有关,磷素淋溶主要是可溶性磷,且峰值滞后于降雨;其他学者还在沂蒙山区孟良崮小流域^[7]、山西省岔口小流域^[8]、太湖流域^[9]等地区探讨了不同雨强、不同前期影响雨量对氮、磷输出负荷的影响以及季节因素对氮、磷输出的影响。但是针对南方地区,特别是广东沿海一带的典型小流域,大多数研究是基于模型的模拟以及负荷核算^[10-11],有关野外监测的非点源流失规律研究并不多^[12],尤其是针对泥沙、BOD₅、COD_{Mn}、TP、TN和NH₃-N等6种污染物的全面分析更加少见。

笔者以广东省江门市潭江泗合水流域为研究对象,对该流域2014年5月的两场降雨事件进行水质、水量同步监测。结合前人在类似流域的研究,分析降雨径流中主要污染物的浓度及通量与径流量、降雨等环境因素的关系,总结降雨径流条件下非点源污染物的输出机理和时空变化规律,为流域非点源污染的治理提供科学依据。

1 研究流域概况

泗合水流域地处广东省江门市潭江最大支流镇海水的上游,呈西北往东南方向倾斜,流域面积131 km²,山峦重叠,森林覆盖率81.5%,主河长约26 km,河床比降0.281%。流域属亚热带季风气候,雨量充足,多年平均气温23℃,多年平均降雨量1661.1 mm,主要集中在4—9月,多年平均径流量1.1453亿 m³,多年平均蒸发量877.7 mm。流域内土地利用类型大致分为林地、耕地、草地、建设用地等。

双桥水文站是泗合水小流域的出口控制站,建于1958年7月,地理坐标东经112°34′34″,北纬22°35′20″,位于鹤山市双合镇双桥圩。自建站以来该站一直系统地收集水位、流量、降雨量、蒸发等水文

资料和水质资料。

2 研究方法

2.1 水样采集

在泗合水流域出口双桥水文站处设立监测断面,于2014年5月对流域两次降雨过程进行包括水位、流量、降雨量、各污染物输出浓度的同步监测。

采样装样方法:降雨事件中,样品的采集频率视降雨量大小而定,在流域开始产流时即开始采样,采样时间间隔一般为1 h,若遇到高强度的降雨,则加密至30 min一次,若降雨强度降低则适当延长至2 h一次。受流域汇流时间影响,采样需持续至洪峰回落后的若干小时。

水样中各污染物的测定方法:BOD₅用差压法,COD_{Mn}用高锰酸盐指数法,TSS用重量法,TP用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法,TN用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法,NH₃-N用纳氏试剂比色法。通过监测,共获取两场(洪号分别为20140504,20140520)较为完整的暴雨径流分析数据,降雨事件各要素特征见表1。

表1 降雨事件各要素特征

降雨事件	径流发生时段	累积降雨量/mm	径流深/mm	历时/h
20140504	2014年5月4日23:40至 2014年5月6日2:10	61.1	13.4	26.5
20140520	2014年5月20日14:10至 2014年5月21日13:00	33.3	9.8	22.8

2.2 数据分析方法

2.2.1 平均浓度法

用径流中某种污染物的质量除以总的径流量可得到平均浓度,计算公式^[7]为

$$\bar{\rho} = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^T \rho_t Q_t dt}{\int_0^T Q_t dt} = \frac{\sum_0^T \rho_t Q_t \Delta t}{\sum_0^T Q_t \Delta t} \tag{1}$$

式中: $\bar{\rho}$ 为整个径流过程中流量加权平均浓度; M 为径流全过程某种污染物的总质量; V 为某场降雨的总径流量体积; T 为总的径流时间; t 为径流过程某一时刻; Q_t 为随时间 t 变化的径流量; ρ_t 为随时间 t 变化的某种污染物浓度; Δt 为时间间隔。

2.2.2 通量分析

假定各时段的水质和水量不变,用各时段的污染物浓度乘以径流量可得到时段内的污染物输出量 W 。

$$W = \sum Q_i C_i \tag{2}$$

式中: Q_i 为第 i 小时内的径流量; C_i 为第 i 小时内的污染物浓度。

3 结果与分析

3.1 降雨径流中污染物质量浓度水平

两场降雨事件过程中污染物输出质量浓度值见表 2。降雨事件中地表径流主要污染物 BOD₅、COD_{Mn}、TSS、TP、TN 和 NH₃-N 的平均质量浓度分别为 12.4 mg/L、5.8 mg/L、145 mg/L、0.55 mg/L、3.13 mg/L 和 1.44 mg/L,当地表水 TP 质量浓度达 0.9 ~ 1.8 mg/L、TN 质量浓度达 0.9 ~ 3.5 mg/L 时,可造成水生生物生长旺盛^[13],所以泗合水流域径流污染物质量浓度已影响到该流域水环境质量。

由表 2 可见,20140520 次降雨事件中大部分污染物(BOD₅、COD_{Mn}、TN 和 NH₃-N)的平均输出质量浓度($\bar{\rho}$)比 20140504 次降雨事件要小。可能的原因是:20140520 次降雨事件中前期影响雨量更大,先前累积的地表污染物经前期降雨径流冲刷已部分流失,而且此次降雨的平均雨强较前一场小,地表冲刷力减弱,所以污染物平均输出浓度就更小。此外,TSS 的 $\bar{\rho}$ 表现出相反结果,参考 2011 年姚锡良等^[10]于此流域所测 5 场降雨数据,TSS 质量浓度值在暴雨径流中都表现出比较大的波动性,因为非溶解性小颗粒在河道中呈悬浮式迁移,其过程受径流量、降雨冲刷力和水环境等因素的多重影响,不能仅凭平均雨强来判断泥沙输出的多少。

3.2 污染物质量浓度与径流量变化特征

选取 20140520 降雨事件来分析降雨径流过程的污染物输出特征。流域出口流量与降雨量变化过程之间的关系见图 1。由图 1 可知,20140520 次降雨事件的降雨从 5 月 20 日 13:00 开始,14:00 降雨量达到最大值,相应的径流量在 17:00 左右达到峰值,比最大降雨量滞后 3 h 出现。分别作出径流量同各种污染物质量浓度变化关系曲线(图 2)。

20140520 次降雨事件降雨前河道流量约为 3.75 m³/s,污染物 BOD₅、COD_{Mn}、TSS、TP、TN 和 NH₃-N 的平均质量浓度分别为 7.8 mg/L、4.3 mg/L、33 mg/L、0.13 mg/L、2.76 mg/L、1.18 mg/L。由图 2 可见,20140520 次降雨事件中的 BOD₅、TP 和 TN 质

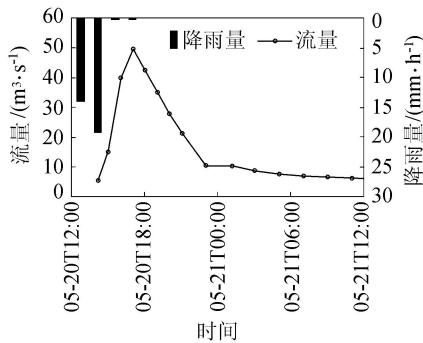


图 1 20140520 场降雨事件出口流量与降雨量变化过程

量浓度随时间变化的趋势大体相同,具有明显的初期冲刷效应,其质量浓度最大值均出现在降雨发生后 1 ~ 2 h,且比最大流量值出现时间提前 1 h 左右。原因是前期地表污染物累积量大,径流对污染物的侵蚀和冲刷使其质量浓度升高并迅速达到峰值,随着径流量的增大其稀释作用又占据了主导地位,污染物质量浓度逐渐降低。

其中,BOD₅ 初期冲刷现象比较明显,与姚锡良等^[10]在此流域做过的类似研究的结果不一致,分析知姚锡良等^[10]所测 20110516 次降雨事件中前期影响雨量较大且降雨强度不高,所以前期累积 BOD₅ 不多、冲刷效果不够明显,质量浓度变化过程呈波浪状,没有表现出明显的初期冲刷效应。图 2 中 TP 质量浓度在 5 月 20 日 18:00 左右出现一个急剧下滑点,此点也正是流量的峰值点,参考李开明等^[11]利用 AnnAGNPS 模型在此流域模拟的 TP 负荷空间分布,流域中下游因为人口密度大,集中了绝大部分的 TP 负荷,而此区域土地经常翻耕、施肥,表层磷质量浓度高,又因为地形相对较缓,产流带走泥沙较少,所以可溶性磷比例较大,这与盛海峰等^[6]在宜兴梅林小流域得出的结论类似。加之大部分可溶性磷在降雨前期就已随地表径流进入河道,当流量迅速达到峰值时,其流失、扩散速度陡增,质量浓度值就会出现凹点。

对于 NH₃-N 的质量浓度变化,不仅发现其前半段具有明显的初期冲刷效应,还发现其后半段与流量呈明显的负相关关系,这与姚锡良等^[10]在此流域所得结论不完全一致。可解释为前期河道中的

表 2 降雨事件径流污染物输出质量浓度

降雨事件	平均雨强/ (mm · h ⁻¹)	前一天降雨 深度/mm	质量浓度 统计	$\rho(\text{BOD}_5)/$ (mg · L ⁻¹)	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})/$ (mg · L ⁻¹)	$\rho(\text{TSS})/$ (mg · L ⁻¹)	$\rho(\text{TP})/$ (mg · L ⁻¹)	$\rho(\text{TN})/$ (mg · L ⁻¹)	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/$ (mg · L ⁻¹)
20140504	12.2	0.6	$\bar{\rho}$	14.7	6.31	112	0.51	3.44	1.57
			最小值	9.6	4.1	10	0.31	2.89	1.17
			最大值	17.6	7.9	327	0.84	4.95	3.59
20140520	8.3	8	$\bar{\rho}$	10.1	5.29	179	0.58	2.82	1.30
			最小值	4.1	4.10	14	0.16	1.96	0.84
			最大值	21.4	7.10	376	1.66	3.92	2.13
降雨事件径流污染物平均输出质量浓度				12.4	5.80	145	0.55	3.13	1.44

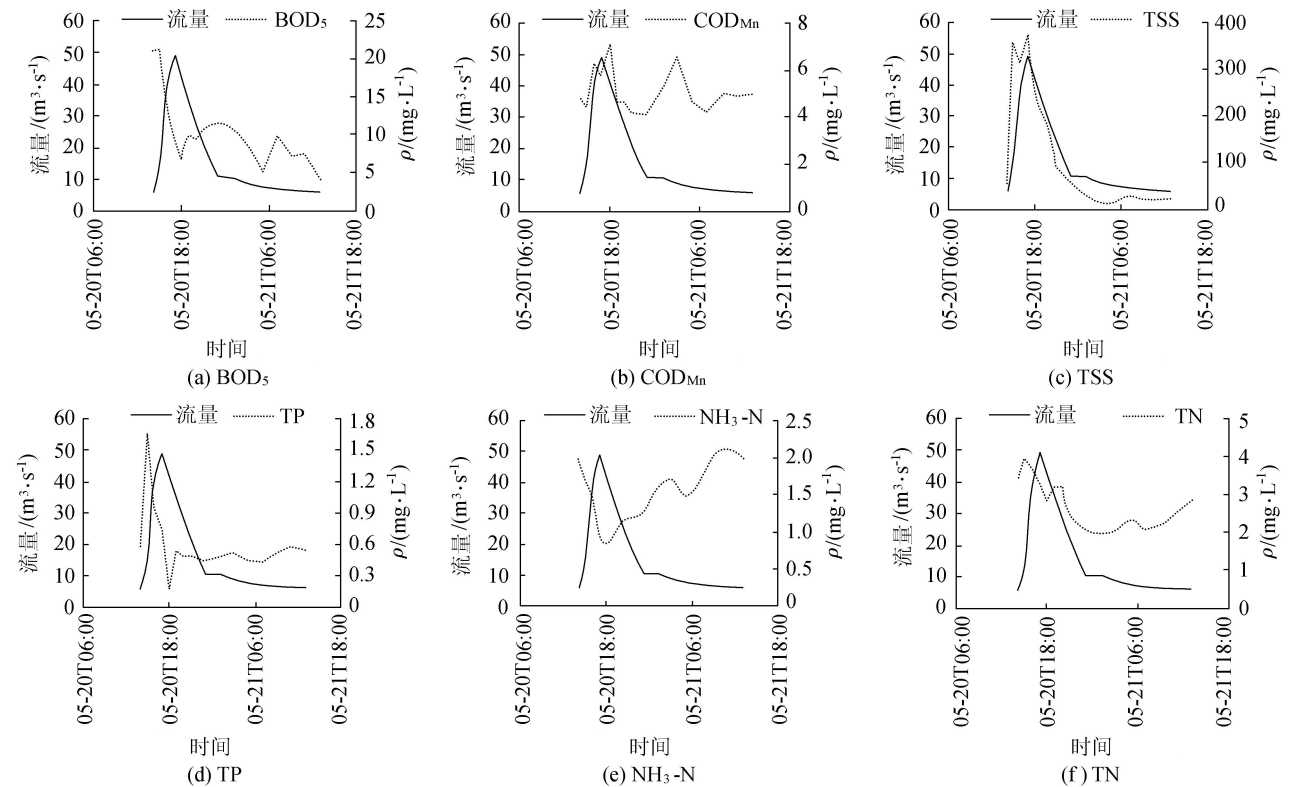


图2 20140520 次降雨事件流量与各类污染物质量浓度变化过程

$\text{NH}_3\text{-N}$ 大部分来自于浅层地表且较早进入河道,因为“冲洗”及“稀释”作用表现出初期冲刷效应;但是到了后期,雨水对泥沙的持续侵蚀使得土壤中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 也流失于河道中,加之径流量减小,所以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度在后期明显上升,这同闫瑞等^[8]在岔口小流域所得到 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的变化规律类似。 TN 质量浓度在后期上升也是受到 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度上升的影响。

TSS 质量浓度变化的总体趋势与径流量基本保持一致, TSS 输出质量浓度值和流量同时达到峰值,然后随径流减少而降低,说明径流量对泥沙的输出具有主导作用。 COD_{Mn} 的质量浓度呈波浪锯齿状变化,这与李定强等^[12]在广东省东江流域做过的类似研究不一致,但是通常情况下 COD_{Mn} 在各场降雨中峰值出现的时间和随径流变化的规律受到土地利用类型、人类活动等因素的复杂影响,很难表现出统一性^[14];而本次降雨后期 COD_{Mn} 质量浓度再次出现高值,这应该与壤中流主导退水过程有关,较高的森林覆盖率使得该流域土壤中有机物质量浓度较高,土壤水中较高的有机物质量浓度对 COD_{Mn} 质量浓度后期的变化产生了影响。

3.3 污染物通量负荷与径流变化特征

通过对各污染物通量进行计算,进一步分析污染物通量负荷与径流的关系特征。由图3可见, BOD_5 、 COD_{Mn} 、 TP 、 TN 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染物通量随时间

的变化趋势和径流量变化趋势大体相同,其同步性优于污染物质量浓度与径流过程;而且各污染物通量峰值几乎与径流量峰值同时达到,说明污染物通量过程主要由流量过程所控制。20140520 次降雨事件中 TP 的通量变化曲线存在一个较大的锯齿状波动,分析知 TP 通量受到流量和质量浓度过程的共同影响, TP 质量浓度在 18:00 左右出现一个急剧下滑点,这造成了 TP 通量的显著波动。

3.4 污染物质量浓度及通量与径流量相关分析

利用 Pearson 相关分析法对两场降雨事件的污染物质量浓度和通量与流量进行相关分析,结果如表3所示。由表3可见,两场降雨事件中,污染物 TSS 的质量浓度与流量的相关性较好,其次是 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TN ,污染物 BOD_5 、 COD_{Mn} 和 TP 的质量浓度与径流量的相关关系不明显。此外,各污染物通量与径流量的相关系数大部分大于 0.9,且均为正数,表明两者的相关性非常显著,即径流量对污染物通量的变化起重要作用。

3.5 各污染物质量浓度与 TSS 质量浓度相关性分析

利用 Pearson 相关分析法分析两场降雨事件地表径流中 BOD_5 、 COD_{Mn} 、 TP 、 TN 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 TSS 输出质量浓度的相关性,结果如表4所示。由表4可见,20140520 次降雨事件中, TN 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 与 TSS 输出质量浓度具有一定的相关性,但相关系数不高, BOD_5 、 COD_{Mn} 与 TSS 输出质量浓度的关系不明显。20140504 次降雨事件中,各污染物的输出质量浓度

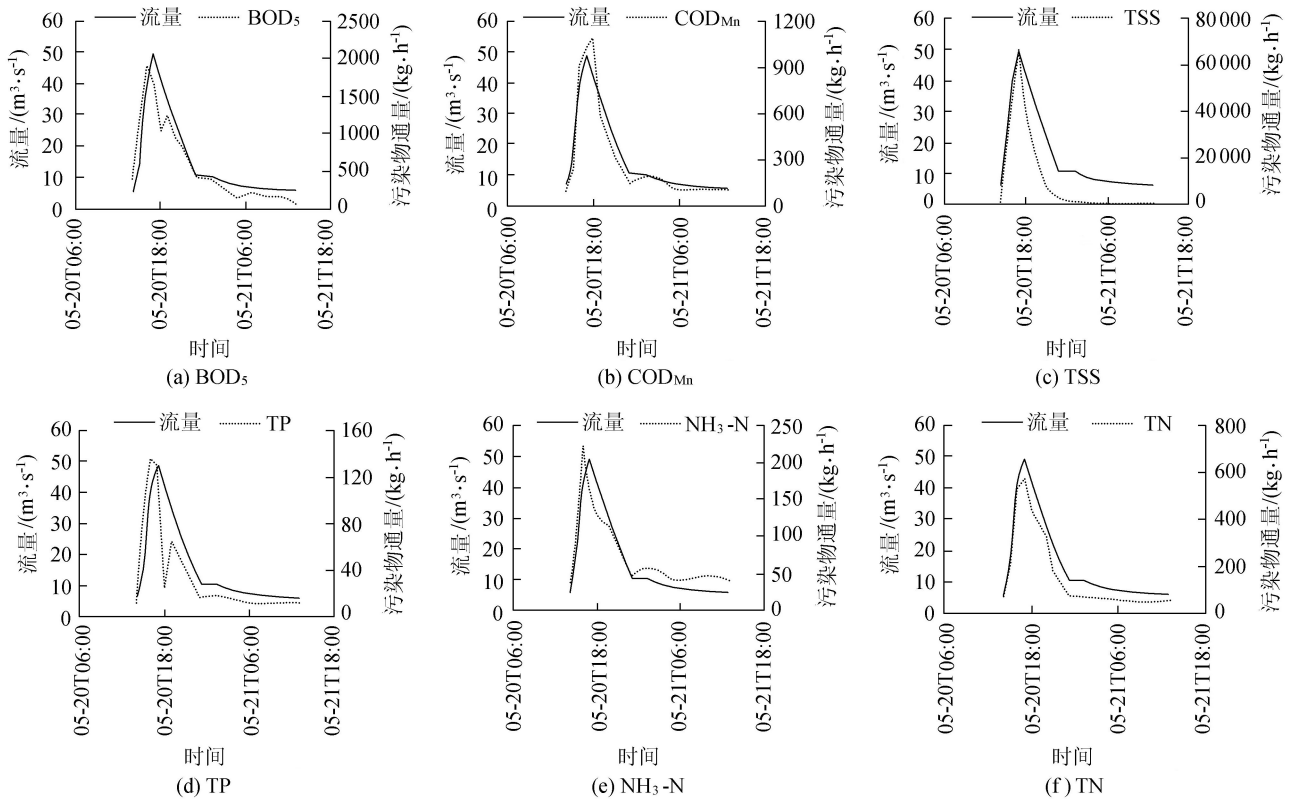


图3 20140520 场降雨事件流量与各类污染物通量变化过程

表3 污染物质量浓度及通量与流量相关分析

降雨事件	指标	BOD ₅	COD _{Mn}	TSS	TP	TN	NH ₃ -N
20140504	流量与质量浓度	-0.253	0.153	0.575 **	0.400	-0.599 **	-0.652 **
	流量与通量	0.986 **	0.972 **	0.690 **	0.924 **	0.993 **	0.971 **
20140520	流量与质量浓度	-0.028	0.479	0.835 **	0.046	0.504 *	-0.801 **
	流量与通量	0.902 **	0.974 **	0.947 **	0.768 **	0.985 **	0.909 **

注：* 表示显著性水平 $p<0.05$ ，** 表示显著性水平 $p<0.01$ 。

表4 降雨事件中污染物质量浓度与TSS 质量浓度的相关系数

降雨事件	BOD ₅	COD _{Mn}	TP	TN	NH ₃ -N
20140504	-0.138	0.408	0.363	-0.444	-0.406
20140520	0.362	0.310	0.557 *	0.778 **	-0.577 *

注：* 表示显著性水平 $p<0.05$ ；** 表示显著性水平 $p<0.01$ 。

与TSS输出质量浓度无明显的相关性,表明悬浮物对BOD₅、COD_{Mn}、TN、NH₃-N、TP输出质量浓度的贡献相对较小。由于降雨期间流域污染物的分布与构成具有空间异性,加之流域中不同地点同一时刻形成的径流汇集到监测断面所需的汇流时间也不同,以及一些人为和非人为因素的影响,各污染物输出质量浓度之间的关系就更加复杂。

4 结 论

- a. 降雨事件中前期影响雨量越小、平均雨强越大,产生的径流污染物平均输出质量浓度越大,初期冲刷效应更加明显。
- b. BOD₅、TP和TN表现出明显的初期冲刷效应,TP质量浓度值在流量峰值处出现凹点,主要是

可溶性磷占TP比例较大,且大部分已于前期进入河道,当流量迅速增大时,磷素流失、扩散也会加剧;TSS输出过程主要受径流量的主导。

c. NH₃-N的质量浓度变化,其前半段具有明显的初期冲刷效应,后半段与径流量呈明显的负相关关系,主要原因是后期雨水对泥沙的持续侵蚀使得土壤中的NH₃-N也进入河道,加之径流量减小;COD_{Mn}质量浓度呈波浪锯齿状变化,其规律在各次降雨中很难表现出一致性,后期质量浓度变化受到壤中流主导退水过程的影响。

d. 各污染物通量变化趋势和径流量变化趋势大体相同,两者相关性显著;各污染物的输出质量浓度与TSS输出质量浓度无明显的相关性,表明悬浮物对其他污染物输出质量浓度的贡献相对较小。

5 流域管理建议

- a. 合理规划、利用土地资源,保持森林覆盖率,减少水土流失;减少农作物翻耕、施肥的次数,增加化肥利用效率,避免雨前施肥。

b. 截获一定比例的初期径流能够有效减少 BOD₅、TP 和 TN 的输出,截获一定比例的后期径流对 NH₃-N、TN 的减控也具有重要意义,可针对性地在流域中布置明槽、沟渠等截流设施。

c. 在人口密度较大的流域中下游做好宣传教育工作,禁止靠近河湖耕作,在雨季做好牲畜及其粪便的管理,禁止生活垃圾直接排入河道。

参考文献:

[1] ZHU Bo, WANG Zhenhua, ZHANG Xinbao. Phosphorus fractions and release potential of ditch sediments from different land uses in a small catchment of the upper Yangtze River [J]. Journal of Soils and Sediments, 2012, 12 (2): 278-290.

[2] ONELEY E D, ZHANG Xiaolan, YU Tao. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China [J]. Environmental Pollution, 2010, 158: 1159-1168.

[3] 李长嘉, 潘成忠, 滕彦国. 晋江西溪流域茶园降雨径流产污特征 [J]. 环境工程学报, 2013, 7 (8): 2909-2914. (LI Changjia, PAN Chengzhong, TENG Yanguo. Rainfall runoff and pollution characteristics of tea garden in Xixi watershed within Jinjiang River Basin [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7 (8): 2909-2914. (in Chinese))

[4] 蒋锐, 朱波, 唐家良, 等. 紫色丘陵区典型小流域暴雨径流氮磷迁移过程与通量 [J]. 水利学报, 2009, 40 (6): 659-666. (JIANG Rui, ZHU Bo, TANG Jialiang, et al. Transportation processes and loss fluxes of nitrogen and phosphorous through storm runoff in a typical small watershed in the hilly area of purple soil [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40 (6): 659-666. (in Chinese))

[5] 王超, 赵培, 高美荣. 紫色土丘陵区典型生态-水文单元径流与氮磷输移特征 [J]. 水利学报, 2013, 44 (6): 748-755. (WANG Chao, ZHAO Pei, GAO Meirong. Characteristics of nitrogen and phosphorus transportation through runoff in a typical ecological-hydrological unit of hilly area of purple soil [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44 (6): 748-755. (in Chinese))

[6] 盛海峰, 闫明宇, 王兴平. 宜兴梅林小流域磷素的迁移规律 [J]. 水资源保护, 2010, 26 (2): 32-35. (SHENG Haifeng, YAN Mingyu, WANG Xingping. Law of phosphorus transportation in Meilin watershed in Yixing [J]. Water Resources Protection, 2010, 26 (2): 32-35. (in Chinese))

[7] 李振炜, 于兴修, 刘前进, 等. 沂蒙山区典型小流域特殊降雨的磷素输出特征 [J]. 环境科学, 2012, 33 (4): 1152-1158. (LI Zhenwei, YU Xingxiu, LIU Qianjin, et al. Output characteristics of non-point phosphorus from a

typical small watershed in Yimeng Mountainous Area under the special rainfall [J]. Environmental Science, 2012, 33 (4): 1152-1158. (in Chinese))

[8] 闫瑞, 闫胜军, 赵富才, 等. 黄土丘陵区岔口小流域暴雨条件下氮素随地表径流迁移特征 [J]. 水土保持学报, 2014, 28 (5): 82-86. (YAN Rui, YAN Shengjun, ZHAO Fucui, et al. Effects of rainstorm on export of nitrogen with surface runoff in loess hilly region of Chakou Watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28 (5): 82-86. (in Chinese))

[9] 曾远, 张永春, 范学平. 太湖流域典型平原河网区降雨径流氮磷流失特征分析 [J]. 水资源保护, 2007, 23 (1): 25-27. (ZENG Yuan, ZHANG Yongchun, FAN Xueping. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss of rainfall runoff in typical plain river-net area of Taihu Lake Basin [J]. Water Resources Protection, 2007, 23 (1): 25-27. (in Chinese))

[10] 姚锡良, 黄国如. 农村非点源污染负荷核算研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012.

[11] 李开明, 任秀文, 黄国如. 基于 AnnAGNPS 模型泗合水流域非点源污染模拟研究 [J]. 中国环境科学, 2013, 33 (增刊 1): 54-59. (LI Kaiming, REN Xiuwen, HUANG Guoru, et al. Simulation of non-point source pollution in Sihe watershed with AnnAGNPS [J]. China Environmental Science, 2013, 33 (sup1): 54-59. (in Chinese))

[12] 李定强, 王继增, 万洪富, 等. 广东省东江流域典型小流域非点源污染物流失规律研究 [J]. 水土保持学报, 1998, 4 (3): 12-18. (LI Dingqiang, WANG Jizeng, WAN Hongfu, et al. Law of non-point source pollutants losses in a typical small watershed of Dongjiang Drainage Basin of Guangdong Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1998, 4 (3): 12-18. (in Chinese))

[13] 汪庆兵, 李泽波, 张建锋, 等. 浙北毛竹林地表径流氮磷流失特征 [J]. 生态学杂志, 2014, 33 (9): 2471-2477. (WANG Qingbing, LI Zebo, ZHANG Jianfeng, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss by surface runoff in Moso bamboo stands in northern Zhejiang Province [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33 (9): 2471-2477. (in Chinese))

[14] 王书敏, 何强. 山地城市面源污染时空分布特征研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.

(收稿日期: 2015-00-00 编辑: 徐 娟)

