

陆海明, 张 丽, 王 妞, 等. 降雨径流对江淮丘陵区农业流域磷素输出影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(9): 2165–2173.

LU Hai-ming, ZHANG Li, WANG Niu, et al. Impact of rainfall-runoff on phosphorus export from an agriculture watershed in the hilly region of Yangtze-Huaihe zone, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(9): 2165–2173.

降雨径流对江淮丘陵区农业流域磷素输出影响研究

陆海明¹, 张 丽², 王 妞¹, 邹 鹰¹

(1. 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利科学国家重点实验室, 南京 210029; 2. 宜水环境科技(上海)有限公司, 上海 200233)

摘 要: 选择位于安徽省滁州市城西水库上游的花山流域作为代表性流域, 研究江淮丘陵区降雨径流对流域磷素输出的影响。2013—2015 三个水文年高频次水量水质同步观测结果表明, 流域出口断面径流总磷浓度和输出负荷与降雨、径流变化基本同步。研究期间 49% 和 24% 的水样总磷浓度超过地表水环境质量标准(GB 3838—2002) III 和 V 类标准, 水样超标主要发生在汛期雨洪过程。花山流域单位面积年总磷输出负荷分别为 0.72、0.91 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 3.86 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。汛期和夏季总磷输出负荷占全年的比例分别为 94% 和 80%。梅雨期间或台风雨期间单日磷素输出负荷最大值可达全年负荷的 12%~18%。2013 年和 2015 年梅雨时期总磷输出负荷占全年输出负荷约 60%; 2014 年梅雨期总磷输出负荷比例仅占全年负荷的 11%, 受台风“麦德姆”影响, 一次台风雨过程磷素输出负荷占全年负荷的 22%。花山流域全年 10% 的时间内发生的 5~10 次雨洪过程中, 约 30% 的直接径流输出的总磷负荷约占全年总负荷的 50%。流域出口断面 TP 输出负荷主要受流量影响, 建立了基于日平均流量的 TP 输出负荷预测模型。梅雨和台风雨形成的暴雨径流是江淮丘陵区花山流域磷素负荷输出的主要驱动因子。

关键词: 花山流域; 面源污染; 磷素; 梅雨; 台风雨

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)09-2165-09 doi:10.11654/jaes.2019-0097

Impact of rainfall-runoff on phosphorus export from an agriculture watershed in the hilly region of Yangtze-Huaihe zone, China

LU Hai-ming¹, ZHANG Li², WANG Niu¹, ZOU Ying¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China; 2. Ewaters Environmental Science & Technology (Shanghai) Ltd, Shanghai 200233, China)

Abstract: Huashan watershed at the upstream of Chengxi Reservoir in Chuzhou City of Anhui Province was selected as the representative agricultural watershed to study the impact of rainfall-runoff processes on watershed phosphorus export patterns in the hilly region of Yangtze-Huaihe transition zone with high water sampling frequency in three hydrological years. Results showed that total phosphorus (TP) concentration and load were almost synchronous with the occurrence of rainfall and runoff. 49% and 24% of the surface water samples exceeded the third and fifth class of National Environmental Standards (GB 3838—2002), which mainly occurred in the rainfall-runoff processes during the rainy seasons. The annual loads of TP per unit area in three hydrological years were 0.72 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 0.91 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and 3.86 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. TP load during the wet season and summer occupied 94% and 80% of the annual load respectively. TP load in the plum rain season of 2013 and 2015 occupied 60% of annual load. TP load in the plum rain season of 2014 was only 11% of the annual load, while, 22% of the annual load was exported during the rainfall-runoff caused by the typhoon "Madham" during July 23–25. 50% of annual TP load was exported through direct runoff, which occupied 30% of the annual runoff in 5 to 10 storm runoff events. TP load estimation model could be established based on daily flow. Storm runoff caused by the plum rain and typhoon rain was the main driving force of phosphorus export from Huashan watershed in the hilly region of Yangtze-Huaihe zone.

Keywords: Huashan watershed; diffuse source pollution; phosphorus; plum rain; typhoon rain

收稿日期: 2019-01-23 录用日期: 2019-05-17

作者简介: 陆海明(1978—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为面源污染与水生态修复。E-mail: cnlhm@126.com

基金项目: 国家重大研发计划(2016YFC0401501); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201201026)

Project supported: The National Major Research and Development Plan(2016YFC0401501); Special Scientific Research Fund of Water Resources Research of China(201201026)

随着我国对入河排污口等点源污染监管力度的显著增强,以点源污染形式输出的磷素将得到有力的控制,以面源污染形式流失的磷素占受纳水体负荷比例将会逐渐提高,成为影响水功能区达标和造成水体富营养化的主要因子。准确掌握流域磷素输出规律是开展磷素面源污染控制的前提和基础,原位观测试验是开展磷素输出规律研究重要的途径和方法^[1-4]。

研究表明,地表径流是流域磷素输出主要驱动力,发生雨洪径流频率较高的春季与夏季和产生融雪径流的春季是磷素输出主要时期^[5-7]。密西西比河上游农业流域磷素输出集中在1月中旬至6月^[8]。澳大利亚位于亚热带的Richmond河流域,1995—1996年全年98%的磷素输出集中在全年6%的时间内,年际总磷输出负荷相差2.9倍,年内不同月份总磷输出负荷相差达1061倍^[5]。美国Missisquo湾,2014年春季径流输出全年83%的溶解态磷素和74%的颗粒态磷素^[7]。湖南亚热带小流域春季和夏季总磷输出负荷占全年的56.3%~82.0%^[6]。江西红壤小流域野外观测结果表明在3月底至7月初雨量相对集中的湿润季节和7月中旬至9月底或者10月初雨量较少的高温干旱季节总磷浓度较高^[9],磷素输出负荷随着降雨径流显著增加^[10]。雨强影响地表径流磷素输出形态^[11],日本沿海农业流域观测到总磷浓度随着雨强增加而升高^[12]。

江淮丘陵区地处我国长江和淮河过渡区域,是我国重要的粮食和农副产品主产区,也是人口密度较高的区域,农业流域面源污染是引起水库塘坝水体富营养化的重要原因。江淮丘陵区降水年内分配不均,全年降水主要集中在梅雨和台风雨形成时期,然而该地区年内分配不均的降水对农业流域磷素负荷输出特征的影响却鲜有报道。本研究以花山流域为代表流域,开展为期3个水文年高频次的水量水质同步监测,期望揭示江淮丘陵区农业流域磷素负荷输出受降雨年内分配不均的影响机制,为该区域磷素污染防治提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

花山流域位于安徽省滁州市南谯区,属于滁州市城市饮用水源地城西水库上游小沙河河流域,气候类型为北亚热带向暖温带过渡区域,四季分明,雨热同季。多年平均气温15.2℃,多年平均降水量为1043 mm,多年平均蒸发量为922 mm。梅雨期主要出现在6月

和7月,梅雨量约占全年降水量的30%左右,受台风影响的台风雨主要出现在7月中下旬至9月,偶尔出现在10月。

花山流域出口控制断面胡庄(三)以上面积为80.13 km²,主河长13.7 km,河沟的坡度为0.47%,坡度变化范围为0~32°,平均坡度为6°。花山流域具有典型的江淮丘陵区地貌特征,流域内土壤类型主要是石灰岩土和黏壤土。土地利用类型主要是林地、耕地、水域以及农村居民用地、道路交通用地等,分别占整个流域面积的67.7%、22.3%、3.8%和6.2%。花山流域为水源地上游区域,流域内没有大型工业企业活动,耕地以种植双季稻、稻麦/稻油菜轮作与单季稻等为主,施肥品种以复合肥和氮肥为主。畜禽养殖以家庭散养生猪和鸡为主,还有较小规模集中养殖的羊、肉鸡和肉鸭养殖专业户。花山流域常住人口约1万人,农村居民生活污水经过简单的化粪池处理后直排。花山流域所在位置及流域概况如图1所示。

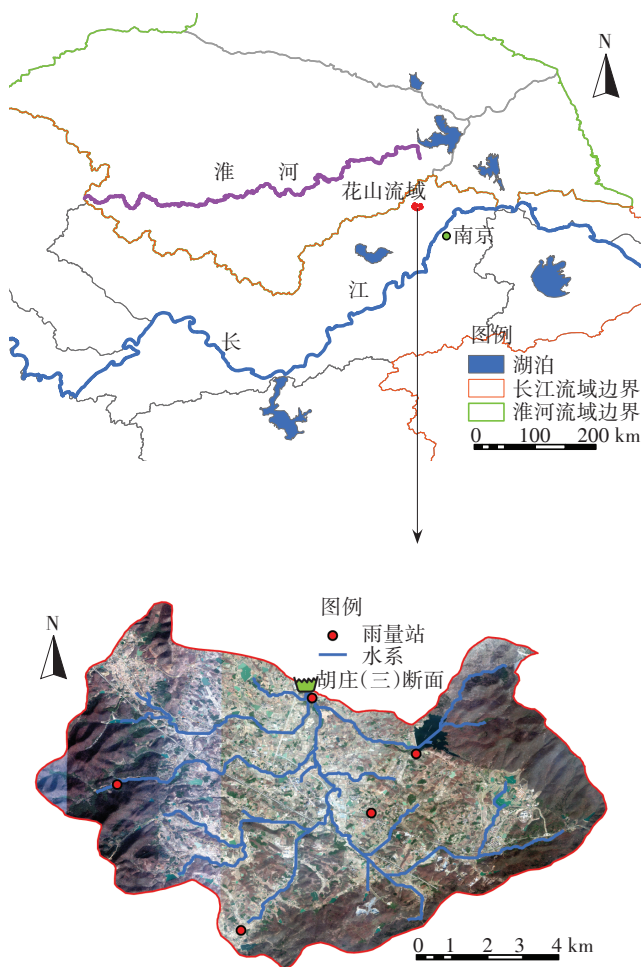


图1 花山流域示意图

Figure 1 Sketch map of Huashan watershed

1.2 数据资料采集

降水数据通过滁州市水文局在流域内布置的5个雨量站获取(图1)。胡庄(三)断面建立了水量和水质同步监测设施,出口断面为梯形量水堰,采用HOB0压力式自记水位计实时记录出口断面水位,利用水位流量关系计算断面流量。利用便携式可编程ISCO6712型自动水样采集器采集水样。降雨径流期间,水样采集频率为每小时采集1个样品;非降雨时段,采样频率为2~3 d 1个样品。研究期间共采集约500个降雨径流过程样品,其他时期共采集600余个水样。水样采集后,每个水样及时加0.05 mL稀硫酸后冷冻储存。总磷(TP)含量采用过硫酸钾消化(120 ℃,200 kPa,消化30 min),钼锑抗还原比色法测定^[13]。

1.3 数据资料处理方法

1.3.1 时间尺度划分方法

水文年统计时间段为10月1日至次年的9月30日,从2012年10月1日至2015年9月30日分为2013、2014和2015三个水文年;每年汛期为5月1日至9月30日,非汛期为10月1日至次年的4月30日,从2012年10月1日至2015年9月30日共有三个非汛期和三个汛期;每年的3、4、5月为春季,6、7、8月为夏季,9、10、11月为秋季、12、1、2月为冬季,从2012年9月1日至2015年11月30日共统计4个秋季、3个冬季、3个春季和3个夏季。

1.3.2 负荷计算方法

流域污染负荷是指在特定时间内通过流域出口断面的污染物质量,用 L 表示,常用单位有t、kg等。监测得到流域出口断面的流量、污染物浓度及其相应的监测时间,采用公式(1)计算某个时段通过监测断面污染物负荷。

$$L = \sum_{j=1}^n \frac{(C_j + C_{j+1})}{2} \times \frac{(Q_j + Q_{j+1})}{2} \times \Delta t \quad (1)$$

式中: C_j 和 C_{j+1} 分别是指径流过程中第 j 时刻和第 $j+1$ 时刻监测得到的污染物浓度; Q_j 和 Q_{j+1} 是指径流过程中第 j 时刻和第 $j+1$ 时刻的监测流量; Δt 是指相邻两次采样的间隔时间; n 是指径流过程中的采样次数。

1.3.3 径流分割方法

由降雨径流过程基本原理可知,降雨引起的径流过程大体可以分为两部分:一是本次降雨引起的直接径流,包括表层径流和浅层壤中流;二是基流,包括深层壤中流和地下径流。本文利用Eckhardt K于2005年提出的递归数字滤波法将径流分割为直接径流和

基流^[14]。该计算方法如下:

$$q_{b(t)} = \frac{(1 - BFI_{\max}) \alpha q_{b(t-1)} + (1 - \alpha) BFI_{\max} q_t}{1 - \alpha BFI_{\max}} \quad (2)$$

式中: $q_{b(t)}$ 为 t 时刻的基流; $q_{b(t-1)}$ 为 $t-1$ 时刻的基流; q_t 为 t 时刻实测河川径流量; t 为时间; α 为退水常数; $BFI_{\max}$ 为最大基流指数。

上述公式中需要确定两个参数,退水常数和最大基流指数。Eckhardt, K提出对于多年流量不间断、具有透水孔隙层的河流,以d为单位时,退水常数取值为0.97,最大基流指数为0.8。花山流域出口控制断面基本不断流,流域地质为透水孔隙层,因此确定花山流域退水常数取值为0.97,最大基流指数取值为0.8。

2 结果与分析

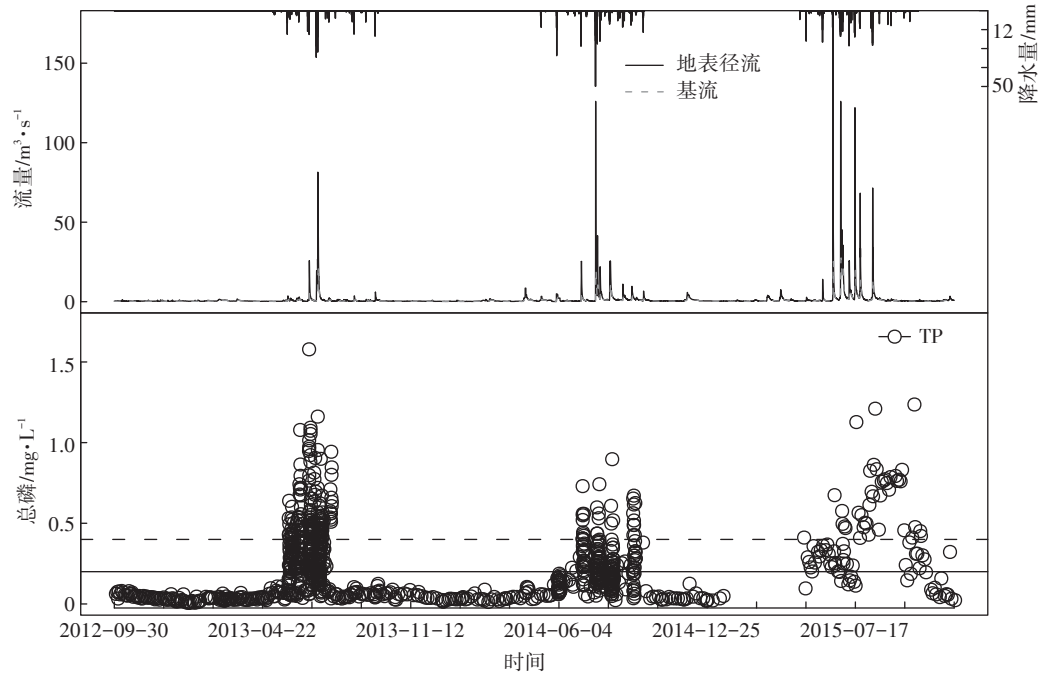
2.1 径流磷素浓度时程分布

2013—2015三个水文年降水量分别为1 000.5、1 105.3 mm和1 349.5 mm,分别比花山流域多年平均降水量(1044 mm)低44.5 mm、高61.3 mm和高305.5 mm。监测期间,花山流域出口径流总磷浓度与降雨、径流变化过程基本同步,汛期降水量增加、流量变大的同时径流总磷浓度升高,汛期径流总磷浓度显著高于非汛期(图2)。流域出口流量变幅从 $0.13 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 到 $126 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,最高值是最低值的984倍,变异系数为2.11;总磷浓度最高为 $2.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最低为 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,两者相差230倍,变异系数为1.00。2013年至2015年监测到有49%和24%的水样超过地表水环境质量标准(GB 3838—2002)总磷Ⅲ和Ⅴ类标准浓度值,我国江淮丘陵区类似农业流域径流磷素污染较为严重,流域磷素控制对于减缓受纳水体富营养化程度具有重要意义。

2.2 流域总磷输出负荷时程分布

研究期间不同时间尺度降水量、径流深和总磷负荷统计如表1所示。3年期间,汛期降水量和径流深占全年的比例均高于70%,总磷输出负荷占全年的比例则超过90%。降水量最为集中的夏季是全年径流磷素输出负荷比例最高的季节,2013—2015年3年期间相应的比例为66%、88%和87%,冬季径流总磷输出负荷仅占全年比例为1%~2%。

2012年9月至2015年11月共39个月内花山流域月降水量、径流深和总磷负荷如图3所示。总体趋势是月总磷输出负荷随着月降水量和月径流深增加而变大,6—8月是磷素负荷输出最集中的月份。



上图实线为径流量,虚线为基流;下图中虚线和实线分别为GB 3838—2002总磷V类和Ⅲ类水体质量标准
Solid line indicates runoff, dash line indicates base flow in the above figure; solid line indicates Class Ⅲ standard of TP concentration, dash line indicates Class V standard of TP concentration in the bottom figure(GB 3838—2002)

图2 研究期间花山流域平均降水量以及出口断面流量、径流总磷浓度变化

Figure 2 Mean precipitation within Huashan watershed and the variation of flow and TP concentration at the outlet during the study period

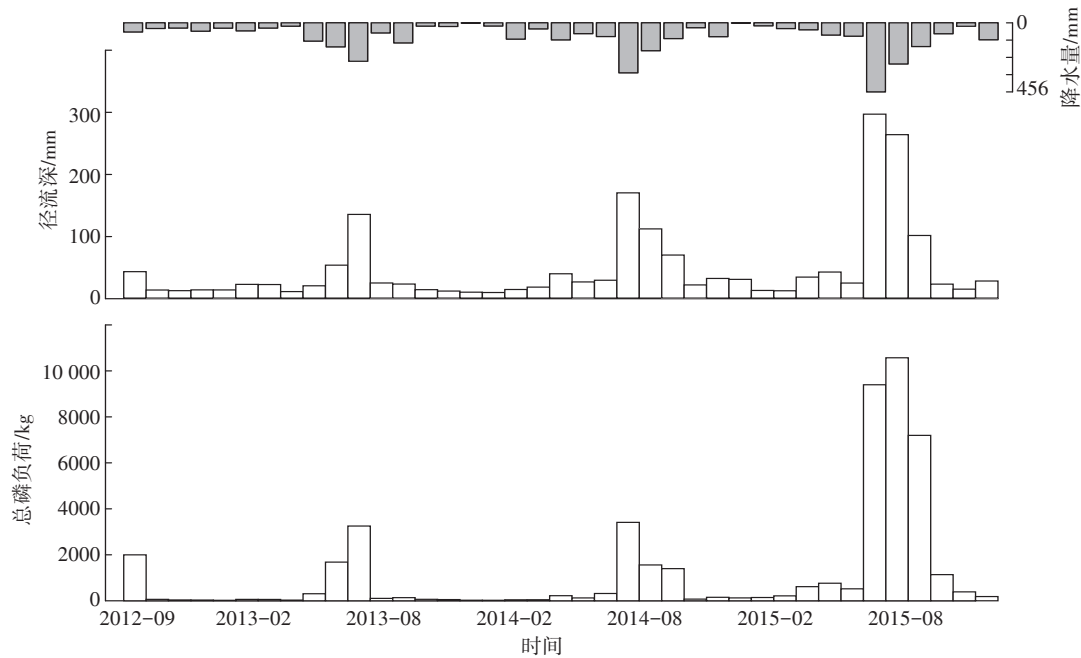


图3 2012年9月至2015年11月花山流域每月降水量、径流深和总磷输出负荷变化

Figure 3 Variation of monthly precipitation, runoff depth and TP load during the period between September, 2012 to November, 2015

2015年6月降水量和径流深最大,月降水量和径流深分别为455.2 mm和296.1 mm。2015年7月花山流域总磷月输出负荷最高,该月总磷输出负荷为10 569.7 kg;其次是6月,该月总磷输出负荷为9 395.7 kg。

2013年12月降水量仅观测到1.3 mm,2014年1月径流深和输出负荷最小,分别为9.0 mm和22.2 kg。研究期间,月降水量、径流深和总磷输出负荷最大值分别是最小值的392、33倍和505倍。

表1 不同时间尺度降水量、径流深、直接径流深和总磷负荷统计

Table 1 Precipitation, runoff depth, direct runoff depth and total phosphorus load during various temporal scales

		降水量/mm	占比/%	径流深/mm	占比/%	直接径流深/mm	占比/%	总磷负荷/kg	占比/%
水文年	2013	1 000.5		359.9		149.9		5 776.3	
	2014	1 105.3		518.6		222.3		7 278.5	
	2015	1 349.5		889.2		399.3		30 899.1	
汛期与非汛期	非汛期	269.6	27	105.53	29	23.5	16	298.7	5
	汛期	730.8	73	254.34	71	126.4	84	5 477.6	95
	非汛期	326.2	30	113.87	22	33.6	15	470.2	6
	汛期	779.1	70	404.76	78	188.6	85	6 808.2	94
	非汛期	307.2	22	182.67	20	48.6	12	2 082.4	7
	汛期	1 065.1	78	720.93	80	352.4	88	29 204.3	93
	秋季	131.2	14	67.5	18	17.25	11	2 094.9	27
	冬季	142.2	15	48.4	13	13.14	9	114.0	1
季节	春季	176.4	19	52.0	14	13.20	9	393.1	5
	夏季	478.3	52	212.0	56	110.54	72	5 036.0	66
	秋季	177.5	16	47.4	10	11.20	5	251.5	4
	冬季	129.2	11	32.3	7	8.80	4	89.1	1
	春季	223.0	20	82.8	18	29.76	14	389.3	6
	夏季	604.0	53	309.5	66	157.37	76	5 286.1	88
	秋季	227.1	16	122.1	13	38.38	9	1 621.2	5
	冬季	58.1	4	54.2	6	7.88	2	481.6	2
	春季	213.7	15	99.9	11	30.99	7	1 897.1	6
	夏季	882.9	64	659.9	70	341.73	82	27 159.9	87

注:表中非汛期与汛期以及季节序列按照时间顺序排列。
Note: Values in the rainy season and non-rainy season as four seasons are sequenced by time.

花山流域2012年9月1日至2015年11月30日期间日降水量、径流深和总磷负荷如图4所示。2013水文年花山流域全年日降水量最大值出现在梅雨期的7月7日,日降水量为89.2 mm,日总磷输出负荷最大值为1 051.74 kg,占全年总磷输出负荷的18%。2014水文年受台风“麦德姆”影响,7月24日降水量达128.9 mm,全年日总磷输出负荷最大值出现在7月25日,负荷值为1 331.58 kg,占全年总磷输出负荷的18%。2015水文年,花山流域梅雨期间降雨偏多,全年日降水量、日径流深和日总磷输出负荷最大值出现在6月16日、6月17日和7月17日,分别为155.9、74.3 mm和3 599.68 kg,占全年比例为12%、8%和12%。

2.3 梅雨和台风雨期间磷素负荷输出特征

研究期间花山流域梅雨和台风雨期间降水量、径流深和总磷输出负荷及其占相应水文年比例如表2。2013年梅雨期为6月19日—7月8日,梅雨期间降水量290.8 mm,占全年平均降水量29%,与多年梅雨期平均降水量持平,梅雨期间输出的总磷占全年总磷输出负荷的59%。2014年,花山流域6月25日入梅,7

月6日出梅,梅雨期较常年偏少11 d,梅雨期间降水量114.2 mm,梅雨量仅为多年平均的37%,梅雨期间总磷输出负荷占全年负荷的11%;受台风“麦德姆”影响,花山流域7月23—25日出现一次强降雨过程,降水量达130 mm,占全年降水量的12%,该次降雨过程磷素输出负荷占全年的22%,输出负荷是该年梅雨期间的2倍。

2015年,花山流域梅雨期间降雨偏多,6月16日入梅,7月25日出梅,梅雨期持续40 d,梅雨期间降水量达673.9 mm,占全年降水量的50%,共有5次明显降雨过程(6月15—16日、6月25—30日、7月5—8日、7月16—18日及7月23—24日)。梅雨期径流深占全年径流深的54%,总磷输出负荷占全年输出负荷的62%。

2.4 雨洪径流磷素负荷输出特征

2013年和2014年花山流域分别监测到5次和10次明显的雨洪过程。图5和图6分别是花山流域2013年和2014年雨洪过程时长、直接径流量和通过直接径流输出的总磷负荷分别占全年的比例。2013年,仅占全年时间9%的雨洪过程发生时间内,花山

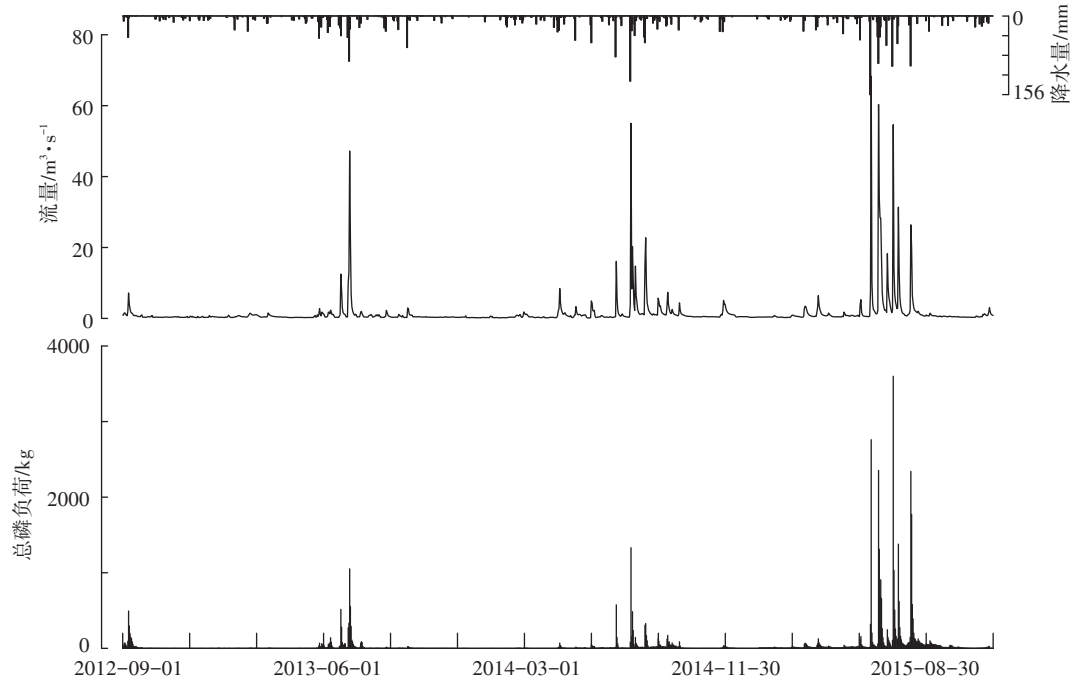


图4 2012年9月至2015年11月花山流域每日降水量、径流深和总磷输出负荷变化

Figure 4 Variation of daily precipitation, runoff depth and TP load during the period between September, 2012 and November, 2015

表2 梅雨和台风影响期间降水量、径流深和总磷负荷

Table 2 Precipitation, runoff depth and total phosphorus load during the plum rain season and typhoon period

水文年	时间	雨型	降水量/mm	占比/%	径流深/mm	占比/%	总磷负荷/kg	占比/%
2013	6.19~7.8	梅雨	290.8	29	125.7	35	3 392.21	59
2014	6.25~7.6	梅雨	114.2	10	28.1	5	804.81	11
	7.23~7.25	台风雨	130.0	12	67.8	13	1 574.77	22
2015	6.16~7.25	梅雨	673.9	50	479.7	54	19 156.36	62

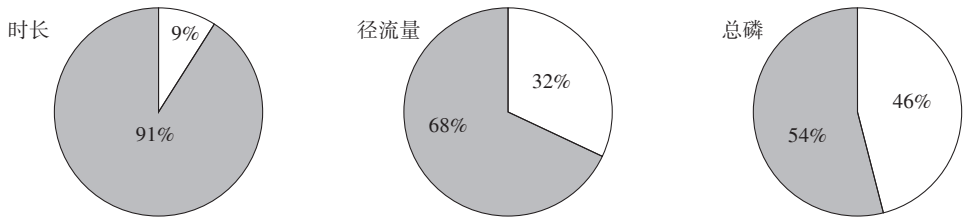


图5 2013年雨洪过程时长、直接径流量、直接径流输出总磷负荷占全年的百分比(白色表示雨洪事件,灰色表示非雨洪事件)
Figure 5 Percentage of duration, direct runoff and TP load exported through direct runoff within those storm runoff events to annual ones in the year of 2013(white part indicates storm runoff events, grey part indicates those not being storm runoff events)

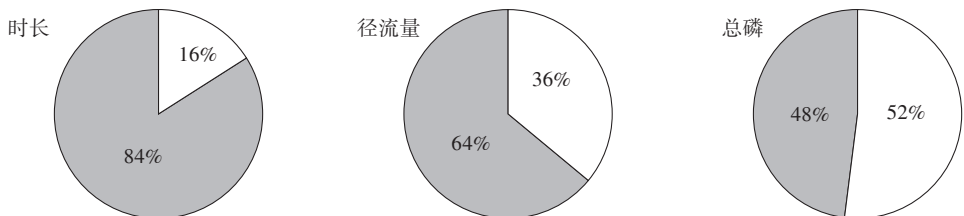


图6 2014年雨洪过程时长、直接径流量、直接径流输出总磷负荷占全年的百分比(白色表示雨洪事件,灰色表示非雨洪事件)
Figure 6 Percentage of duration, direct runoff and TP load exported through direct runoff within those storm runoff events to annual ones in the year of 2014(white part indicates storm runoff events, grey part indicates those not being storm runoff events)

流域雨洪过程径流量占全年径流量的32%,通过直接径流总磷输出负荷比例占全年总负荷的46%。2014年,花山流域雨洪过程发生时间占全年时间的16%,雨洪过程事件中输出的直接径流量占全年径流量的36%,通过直接径流输出总磷负荷比例分别占全年总负荷的52%。总体来说,花山流域每年在10%的时间内发生的5~10次雨洪过程(降雨引起流域出口断面流量超过 $1\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 的降雨径流过程)中,通过约30%的直接径流量输出的总磷负荷约占全年总负荷的50%,直接径流是流域磷素输出的主要途径。

3 讨论

2013—2015年3个水文年花山流域单位面积总磷输出负荷分别为 0.72 、 $0.91\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $3.86\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,相比于其他小流域,本研究结果年单位面积总磷输出负荷偏高(表3)。2015水文年总磷输出负荷明显高于2013水文年和2014水文年,主要原因包括两个方面:一是降水量增加导致直接径流明显偏高,携带污染物的地表径流量显著增加;二是梅雨期强降水过程形成的径流将累积在流域末梢河道内污染物冲刷携带至流域出口,该部分污染物在较小降水时通常难以被冲刷至流域出口。2015年6月径流量高于7月,但7月总磷负荷高于6月,6月梅雨期间连续降水导致施肥等农事活动推迟到7月可能是重要原因。

国内外许多研究表明,强降雨形成的径流过程是地表磷素负荷输出的主要驱动力^[15-16]。2011年9月热带风暴李(Tropical Storm Lee)在美国东北地区形成的洪水过程通过萨斯奎哈纳河(Susquehanna river)向下游切萨皮克湾输送了670万t泥沙,相当于年均输沙量的6倍^[16];该次热带风暴仅用过去10年(2002—

2011)1.8%的水量,向切萨皮克湾输出了5%的氮素、22%的磷素和39%的泥沙^[17]。美国东北部切萨皮克湾上游面积为 7.4 km^2 的WE-38流域溶解态总磷浓度较高集中在5月至12月,而颗粒态总磷浓度较高时期为暴雨径流集中的1月至6月^[18]。在本研究中,2013年和2015年花山流域全年60%的总磷负荷输出发生在梅雨期,2014年梅雨期间降水量偏少,磷素输出比例较低,受台风“麦德姆”影响,一次强降雨过程总磷输出负荷占全年的22%。梅雨和台风带来的强降雨是江淮丘陵区农业流域磷素负荷输出的主要驱动力。

花山流域日TP输出负荷与日平均流量相关系数超过0.8(1095个数据, P 值等于 $2.2\text{e}-16$,图7),因此可以建立基于日平均流量的TP负荷预测模型(式1),估算花山流域日TP输出负荷。

$$L_{\text{总磷}}=40.462\times Q-17.31$$

(3)

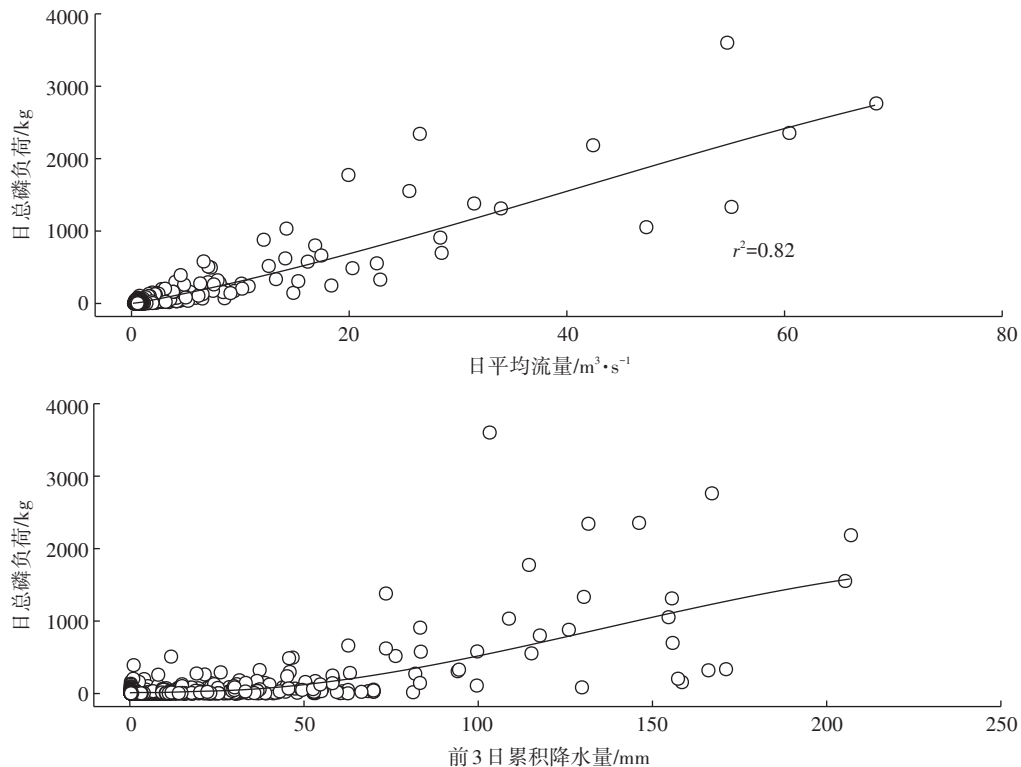
式中: $L_{\text{总磷}}$ 为日总磷负荷, kg ; Q 为日流量, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。

流域径流产生量不仅与当日降水量密切相关,而且也受流域前期降水量影响。花山流域日总磷负荷与前3日降水量表现为两个阶段(图7)。当前3日累积降水量低于50 mm时,日总磷负荷仅有较小幅度的增加,前3日累积降水量超过50 mm时,TP输出负荷随着降水量增加有较大幅度增加,但是TP输出负荷值变幅较宽。

花山流域全年磷素负荷输出集中在梅雨和台风雨期间几次暴雨径流过程,输出负荷主要受雨洪过程中直接径流影响,因此在制定流域磷素污染源负荷削减方案时,不仅需要从“肥料”的角度控制磷素污染源,也需要从“水量”的角度,降低径流特别是直接径流产生量。太湖流域丘陵山区研究结果同样表明削减流域磷素输出负荷时,控制水比控制肥更有效果^[25]。水土保持措施不仅可以减少土壤侵蚀,也可以

表3 花山流域单位面积年总磷输出负荷和其他流域比较
Table 3 Comparison of annual TP load per unit area between Huashan watershed and other watersheds

研究区域	面积/ hm^2	主要土地利用类型	TP流失负荷/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$	文献
江西鹰潭孙家流域	46.2	坡耕地和水稻田	1	[20]
湖南洞庭湖周边小流域	9~5212	9个农业流域和1个森林流域	0.36~2.22	[6]
中国三峡库区兰陵溪小流域	144.4	林地和农田	0.29	[19]
美国佐治亚洲Etowah河上游流域	2.4~44	9个养鸡场-牧场流域	0.025~3.17	[21]
美国佐治亚洲Etowah河上游流域	2.4~44	3个森林流域	0.01~0.1	[21]
美国麻省东南Atwood Bog	2.12	蔓越莓种植场	1.47~3.34	[22]
美国东部玉米种植带	1.0~18.6	农场田块	0.72±0.56(亚表层流),0.51±0.85(地表径流)	[23]
西班牙东北部Corbeira流域	1600	林地、草地和耕地	0.115	[24]
安徽省花山流域	8013	林地和耕地	0.72~3.86	本研究结果



上图采用线性拟合, 下图采用局部加权非参数回归(LOESS)拟合
Linear fitting method is used in the upper figure, with LOESS in the below one

图7 花山流域日平均流量、前3日累积降水量和日总磷输出负荷相关关系

Figure 7 Relationship between daily average flow, accumulated antecedent precipitation with three days and daily total phosphorus export

增加土壤入渗,减少雨洪径流产生量。我国南方丘陵地区广泛分布的水塘同样可以减少雨洪径流磷素负荷输出^[26]。相对而言,河流沟渠等迁移廊道由于其储存容量较小,径流流速较快停留时间较短,削减雨洪径流过程磷素负荷效果有限。

4 结论

(1)花山流域出口径流总磷浓度与降雨、径流变化过程基本同步,研究期间监测到有49%和24%的水样超过地表水环境质量标准(GB 3838—2002)总磷Ⅲ和Ⅴ类标准浓度值,主要集中在汛期。2013—2015三个水文年花山流域单位面积径流总磷输出负荷分别为 0.72 、 $0.91 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $3.86 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

(2)汛期(5—9月)总磷输出负荷占全年的比例超过90%。2013—2015三个水文年夏季径流磷素输出负荷占全年负荷比例分别为66%、88%和87%。梅雨期是花山流域总磷负荷输出主要时期,受台风影响形成的降雨径流过程也是流域磷素输出重要时期。2013年和2015年梅雨时期总磷输出负荷占全年负荷约60%,2014年受台风“麦德姆”影响,一次暴雨过程

磷素输出负荷占全年负荷的22%。

(3)花山流域每年在10%的时间内发生的5~10次雨洪过程中,通过约30%的直接径流量输出的总磷负荷约占全年负荷的50%。流域磷素输出负荷控制不仅需要控制磷素投入,而且需要从完善水土保持措施、增加土壤入渗,保持和强化水塘调蓄等调控“水量”、减少雨洪径流的角度采取综合措施。

参考文献:

- [1] Church C D, Veith T L, Folmar G J, et al. Department of agriculture agricultural research service mahantango creek watershed, Pennsylvania, United States: Long-term water quality database[J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(8): 102-105.
- [2] Heathwaite A, Dils R. Characterizing phosphorus loss in surface and subsurface hydrological pathways[J]. *Science of the Total Environment*, 2000, 251: 523-538.
- [3] 李恒鹏, 杨桂山, 黄文钰, 等. 不同尺度流域地表径流氮、磷浓度比较[J]. *湖泊科学*, 2006, 18(4): 377-386.
LI Heng-peng, YANG Gui-shan, HUANG Wen-yu, et al. Comparison of nitrogen and phosphorus concentration of runoff from different spatial scale watersheds[J]. *Journal of Lake Science*, 2006, 18(4): 377-386.

- [4] 许其功, 刘鸿亮, 沈珍瑶, 等. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征[J]. 环境科学学报, 2007, 27(2):326-331.
XU Qi-gong, LIU Hong-liang, SHEN Zhen-yao, et al. Characteristics on nitrogen and phosphorus losses in the typical small watershed of the Three Gorges Reservoir area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(2):326-331.
- [5] McKee L, Eyre B, Hossain S. Intra- and interannual export of nitrogen and phosphorus in the subtropical Richmond River catchment, Australia[J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14(10):1787-1809.
- [6] Meng C, Li Y Y, Wang Y, et al. TMDL for phosphorus and contributing factors in subtropical watersheds of southern China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(8):965-1022.
- [7] Rosenberg B D, Schroth A W. Coupling of reactive riverine phosphorus and iron species during hot transport moments: Impacts of land cover and seasonality[J]. *Biogeochemistry*, 2017, 132(1/2):103-122.
- [8] Royer T V, David M B, Gentry L E. Timing of riverine export of nitrate and phosphorus from agricultural watersheds in Illinois: Implications for reducing nutrient loading to the Mississippi River[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(13):4126-4131.
- [9] Wei L, Cheng X, Cai Y. Nutrient export via overland flow from a cultivated field of an Ultisol in southern China[J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(3):421-432.
- [10] Gao Y, Zhu B, Yu G R, et al. Coupled effects of biogeochemical and hydrological processes on C, N, and P export during extreme rainfall events in a purple soil watershed in southwestern China[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 511:692-702.
- [11] 李瑞玲, 张永春, 刘 庄, 等. 太湖缓坡丘陵地区雨强对农业非点源污染物随地表径流迁移的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(5):1220-1226.
LI Rui-ling, ZHANG Yong-chun, LIU Zhuang, et al. Rainfall intensity effects on nutrients transport in surface runoff from farmlands in gentle slope hilly area of Taihu Lake Basin[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(5):1220-1226.
- [12] Blanc A C, Nadaoka K, Yamanoto T, et al. Dynamic evolution of nutrient discharge under stormflow and baseflow conditions in a coastal agricultural watershed in Ishigaki Island, Okinawa, Japan[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(18):2601-2616.
- [13] Ebina J, Tsutsui T, Shirai T. Simultaneous determination of total nitrogen and total phosphorus in water using peroxodisulfate oxidate[J]. *Water Research*, 1983, 17:1721-1726.
- [14] Eckhardt K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation[J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(2):507-515.
- [15] 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, 39(6):659-666.
JIANG Rui, ZHU Bo, TANG Jia-liang, et al. Transportation processes and loss fluxes of nitrogen and phosphorus through storm runoff in a typical small watershed in hilly area of purple soil[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 39(6):659-666.
- [16] Arthur J H, Elrick, K A, Smith, J J, et al. The effects of Hurricane Irene and Tropical Storm Lee on the bed sediment geochemistry of US Atlantic coastal rivers[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(3):1250-1259.
- [17] Hirsch R M. Flux of nitrogen, phosphorus, and suspended sediment from the Susquehanna River Basin to the Chesapeake Bay during Tropical Storm Lee, September 2011, as an indicator of the effects of reservoir sedimentation on water quality[R]. USA: U.S. Department of the Interior, 2012.
- [18] Zhu Q, Schmidt J P, Bryant R B. Hot moments and hot spots of nutrient losses from a mixed land use watershed[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 414:393-404.
- [19] Godsey S E, Kirchner J W, Clow D W. Concentration-discharge relationships reflect chemostatic characteristics of US catchments[J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(13):1844-1864.
- [20] Musolf A, Fleckenstein J H, Rao P S C, et al. Emergent archetype patterns of coupled hydrologic and biogeochemical responses in catchments[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(9):4143-4151.
- [21] Thompson S E, Basu N B, Lascrain J R J, et al. Relative dominance of hydrologic versus biogeochemical factors on solute export across impact gradients[J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(10):1029-1034.
- [22] Wan Y S, Wan L, Li Y C, et al. Decadal and seasonal trends of nutrient concentration and export from highly managed coastal catchments[J]. *Water Research*, 2017, 115:180-194.
- [23] Herndon E M, Dere A L, Sullivan P L, et al. Landscape heterogeneity drives contrasting concentration-discharge relationships in shale headwater catchments[J]. *Hydrology and Earth System Science*, 2015, 119(8):3333-3347.
- [24] Strohmeier S, Knorr K H, Reichert M, et al. Concentrations and fluxes of dissolved organic carbon in runoff from a forested catchment: Insights from high frequency measurements[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(2):905-916.
- [25] Sun X X, Liang X Q, Zhang F, et al. A GIS-based upscaling estimation of nutrient runoff losses from rice paddy fields to a regional level[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2016, 45(6):1865-1873.
- [26] Yub C Q, Shan B Q. Multipond systems: A sustainable way to control diffuse phosphorus pollution[J]. *Ambio*, 2001, 30(6):369-375.