



文章栏目：流域水环境综合整治与修复

DOI 10.12030/j.cjee.202012057

中图分类号 X522

文献标识码 A

房志达, 王淑萍, 苏静君, 等. 红壤丘陵区典型小流域不同下垫面非点源磷输出特征[J]. 环境工程学报, 2021, 15(5): 1724-1734.

FANG Zhida, WANG Shuping, SU Jingjun, et al. Output characteristics of non-point source phosphorus on different underlying surfaces in a typical small watershed in red soil hilly region of Southern China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(5): 1724-1734.

## 红壤丘陵区典型小流域不同下垫面非点源磷输出特征

房志达<sup>1,2</sup>, 王淑萍<sup>3</sup>, 苏静君<sup>1,2</sup>, 胡炼<sup>4</sup>, 赵洪涛<sup>1,2,\*</sup>, 李叙勇<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083

4. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500

第一作者: 房志达(1996—), 男, 硕士。研究方向: 流域非点源污染。E-mail: zdfang\_st@rcees.ac.cn

\*通信作者: 赵洪涛(1978—), 男, 博士, 副研究员。研究方向: 流域非点源污染及综合治理。E-mail: htzhao@rcees.ac.cn

**摘要** 深入了解不同下垫面非点源污染物的输出特征是小流域综合治理的前提之一。以红壤丘陵地区的典型小流域为例, 实地对比观测了降雨条件下林地、农业种植用地(园地和耕地)和建设用地(村镇道路和屋顶)的主要下垫面非点源磷污染物输出过程后发现, 典型降雨事件中 5 种主要下垫面总磷(TP)的场降雨平均浓度为: 耕地(0.75 mg·L<sup>-1</sup>)>园地(0.59 mg·L<sup>-1</sup>)>村镇道路(0.38 mg·L<sup>-1</sup>)>林地(0.25 mg·L<sup>-1</sup>)>屋顶(0.08 mg·L<sup>-1</sup>); 而 TP 输出强度依次为: 村镇道路(0.07 kg·hm<sup>-2</sup>)>耕地(0.06 kg·hm<sup>-2</sup>)>园地(0.04 kg·hm<sup>-2</sup>)>屋顶(0.021 kg·hm<sup>-2</sup>)>林地(0.019 kg·hm<sup>-2</sup>)。下垫面类型影响着非点源磷的输出形态, 建设用地溶解态磷占比最高(51%~71%), 林地溶解态磷次之(44%), 而种植用地溶解态磷占比最低(25%)。整个小流域土地利用面积占比和磷污染负荷贡献比分别为: 林地(87%; 55%)>种植用地(9%; 42%)>建设用地(1%; 3%)。以上结果再结合当地降雨特征及水土流失现状, 可为我国红壤丘陵地区小流域非点源污染治理提供参考。

**关键词** 非点源污染; 小流域; 下垫面; 磷输出; 径流冲刷

非点源污染日益成为流域水环境质量提升的主要限制因素<sup>[1-3]</sup>。非点源污染导致大量氮磷等营养元素进入水体, 从而加速水体富营养化进程<sup>[4]</sup>。已有的研究表明, 全球至少有 30%~50% 地表水受到非点源污染影响<sup>[5-6]</sup>。我国非点源水污染问题也很严重<sup>[7-8]</sup>, 氮、磷污染物中分别有 46.52% 和 67.21% 来自于农业源<sup>[9]</sup>。

受人类生产和生活活动干扰剧烈的小流域往往同时存在农业非点源和村镇非点源<sup>[10-11]</sup>。当前对两类非点源污染过程的研究主要考虑降雨强度和下垫面类型对氮、磷等污染物输出的影响<sup>[12-16]</sup>,

收稿日期: 2020-12-12; 录用日期: 2021-02-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41771529); 中国科学院生态环境研究中心(义乌)长三角中心委托项目(20200060)

以及非点源污染与颗粒物流失的关系<sup>[17-18]</sup>。然而，小流域非点源综合治理需要全面了解各下垫面上污染物的空间分布、污染过程、组分形态及负荷等特征，以便在非点源污染面广量大的特征下对重点下垫面或土地利用类型采取针对性管控措施。两类非点源污染在空间分布、污染过程、污染类型及负荷大小上存在明显差异，但目前大多数研究只关注单一下垫面或下垫面的某类性质，鲜见在同一个小流域内同步对村镇非点源和农业非点源展开研究，致使小流域非点源污染管控措施的针对性不强。

我国南方红壤丘陵地区小流域人多地少，人口与环境间的矛盾比较尖锐。流域内毁林垦荒和过度施肥现象严重，农业非点源对小流域水体污染贡献突出<sup>[19-20]</sup>。此外，该地区人口密集、村镇分布集中，小流域内的村镇非点源污染同样不可忽视<sup>[21-22]</sup>。因此，在我国南方红壤丘陵地区小流域开展农业非点源和村镇非点源研究将对水环境改善具有重要意义。目前，在该地区的非点源污染有关研究多集中在水土流失和土壤侵蚀等方面<sup>[23-24]</sup>，对比观测小流域内村镇非点源和农业非点源过程从而揭示两者污染特征差异的研究还较少。

本研究以浙江省中部红壤丘陵区域的岩下小流域为例，在2020年4—9月，对流域内林地、农业种植用地和村镇道路等主要下垫面的径流出口进行监测，揭示不同下垫面非点源磷污染物的输出过程与规律，多角度比较不同下垫面非点源磷污染物的输出特征，并讨论磷输出过程与降雨过程、流量和颗粒物流失之间的关系，以期为区域非点源污染的源头控制和水环境综合治理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

岩下小流域位于钱塘江流域义乌江支流航慈溪上游岩口水库流域内，地形以低山丘陵为主，岗地平地均有分布，三面环山，集水面积约为4.52 km<sup>2</sup>，属于典型的南方丘陵山地流域。当地日照充足，雨量丰沛，多年平均降雨1400 mm，且降水量时空分布不均，主要集中在4月中旬至8月中旬。台风暴雨和梅雨是形成洪水的主要因素。研究区内的土壤主要是红壤和改良的水稻土。红壤肥力差，易发生水土流失。研究区内农业用地分布集中，主要包括园地和耕地，分别占总面积的6.8%和1.9%。其中，园地以桃树种植为主，耕地以蔬菜种植为主；林地面积约占总面积的87.4%；建设用地约占总面积的0.7%，包括村镇道路和村民居住点等。当地已对生活污水进行了截污纳管，流域污染以非点源污染为主。研究区地理位置见图1。

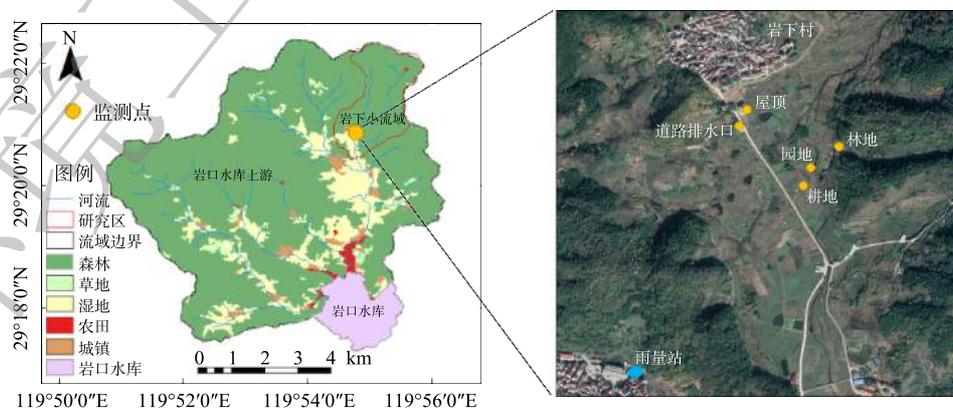


图1 岩下小流域位置

Fig. 1 Location of Yanxia small watershed

## 1.2 样品采集及现场观测

为减少监测过程中的干扰,选择具有独立径流出口的林地、园地、耕地、村镇道路和屋顶进行监测(见图1)。在监测过程中,挡水墙和围堰等措施被用来保证监测小区不与周边地块发生径流交换,即实测地块集水面积。其中,林地面积约500 m<sup>2</sup>,为针阔混交林,采样时树木生长多年,地表杂草覆盖均匀。园地面积为152 m<sup>2</sup>,采样时为桃树果实生长期和成熟期。耕地面积为100 m<sup>2</sup>,主要作物为豆角和芋头,采样时为作物生长期。村镇道路排水口收集村镇地表排水,道路材质为水泥路面,集水面积约为1 000 m<sup>2</sup>。居民住宅屋顶长度为5 m,侧宽度为2.5 m,具有独立排水管。雨量计站点位于岩下村1.5 km处的黄山四村村民楼顶,型号为RG3-M型翻斗式雨量计(Onset Computer Corporation,美国HOBO)。

监测时间从2020年4月初开始,到9月末结束。共监测到15次降雨,其中4次采集到完整径流过程,共采集样品122个,降雨信息见表1。在各地块排水口用带有刻度的集流桶收集径流,记录集流桶内径流体积和收集时间以计算采样时流量。采样频率参考以往的研究<sup>[25-26]</sup>,初期每5 min采集1次,累计采集3次,中后期每10~30 min采集1次。用径流润洗后的聚乙烯采样瓶保存样品,样品采集后即送回实验室于5℃冰柜中冷藏,并于48 h内完成检测。

## 1.3 样品处理与质量控制

岩口水库曾发生过水华现象<sup>[27]</sup>,监测结果表明部分区域水体总磷超标。根据以往研究发现,磷污染物输出可能与水土流失过程存在一定的关系,故本研究测定样品中的总磷(TP)、总溶解态磷(TDP)、总悬浮颗粒物(TSS)。原样品摇匀后采用0.45 μm滤膜过滤得到样品的TDP。样品采用过硫酸钾消解后,用钼酸盐分光光度法(GB 11893-1989)测定TP和TDP。总颗粒态磷(TPP)即为TP与TDP之间的浓度差值。采用烘干法(见《水和废水监测分析方法(第4版)》)测定TSS。

质量控制方法:采用标准样品和实际样品同步测量的方法,检验从制样到样品分析测定的整个分析过程的污染程度;采用标准药品和规范操作,并对实际样品进行平行样品测定。结果表明,标准物质的回收率为95%~105%,分析过程污染较小不影响试验结果;各平行样品的平行性均在10%以内;标准曲线的线性相关系数在0.992以上。

## 1.4 数据分析

采用Excel进行数据统计计算,利用SPSS 24进行相关性分析,利用Origin2017进行图表绘制。分析过程中用到次降雨事件污染物平均浓度(event mean concentration, EMC)代表次降雨下垫面污染物的平均输出水平<sup>[28-29]</sup>,其计算方法见式(1)。

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^t C_i Q_i dt}{\int_0^t Q_i dt} \approx \frac{\sum C_i Q_i \Delta t}{\sum Q_i \Delta t} \quad (1)$$

表1 采样信息记录表

Table 1 Record of sampling information

采样日期	降雨量/mm	降雨类型	降雨历时/h	降雨强度/(mm·h <sup>-1</sup> )	产流与否
6月5日	5.4	小雨	3.0	1.8	否
6月6日	7.2	小雨	3.9	1.8	否
6月19日*	67.4	大雨	24	2.8	是
6月25日	10.4	中雨	8.7	1.2	否
6月30日	31.2	大雨	13.5	4.2	是
7月4日	8.4	小雨	7.4	1.1	否
7月7日	74.4	大雨	24.8	3.0	是
7月20日	4.4	小雨	1.1	4.0	否
7月28日	4.4	小雨	0.7	6.3	否
7月29日	4.8	小雨	0.4	12	否
8月4日*	59.8	大雨	9.2	6.5	是
8月7日*	17.2	中雨	3.8	4.5	是
8月25日	6.6	小雨	2	3.3	否
8月27日*	5.8	小雨	3.2	1.8	是

注:标记\*为用于结果分析的降雨事件;采样年份为2020年。

式中： $EMC$  为次径流污染物的平均浓度， $mg \cdot L^{-1}$ ； $M$  为整个径流过程中污染物的质量， $mg$ ； $V$  为径流总体积， $L$ ； $C_t$  为  $t$  时刻污染物的浓度， $mg \cdot L^{-1}$ ； $Q_t$  为  $t$  时刻径流流量， $L \cdot min^{-1}$ ； $\Delta t$  为采样间隔时间， $min$ ； $t$  为降雨径流持续时间， $min$ 。

利用次降雨过程中污染物总质量，计算下垫面单位面积污染物输出强度<sup>[30]</sup>，计算方法如式(2)所示。

$$P = \frac{M}{S} \approx \frac{\sum C_t Q_t \Delta t}{S} \quad (2)$$

式中： $P$  为次径流污染的输出强度， $kg \cdot hm^{-2}$ ； $M$  为整个径流过程中污染物的质量， $kg$ ； $S$  为下垫面面积， $hm^{-2}$ ； $C_t$  为  $t$  时刻污染物的浓度， $kg \cdot L^{-1}$ ； $Q_t$  为  $t$  时刻径流流量， $L \cdot min^{-1}$ ； $\Delta t$  为采样间隔时间， $min$ ； $t$  为降雨径流持续时间， $min$ 。

以 1 min 内降雨量代表瞬时降雨强度，其数值通过雨量计监测得到。此外，用下垫面单位面积输出负荷乘以相应的下垫面面积得到次降雨的污染负荷。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同下垫面磷污染物的输出过程及规律

下垫面的差异对污染物输出过程有着重要影响。图 2 为了一场典型降雨事件(8 月 4 日，降雨量 59.8 mm，图 2(a)~(e) 中流域主要下垫面污染物输出情况。由图 2 可知，5 种主要下垫面的产流先后顺序最早为村镇道路和屋顶，其次是园地和耕地，最晚为林地(见图 2(f)~(j))。在产流开始前 30 min，园地、耕地和村镇道路输出的 TSS 浓度较高。产流初期三者输出的 TSS 浓度随着雨峰出现的时间

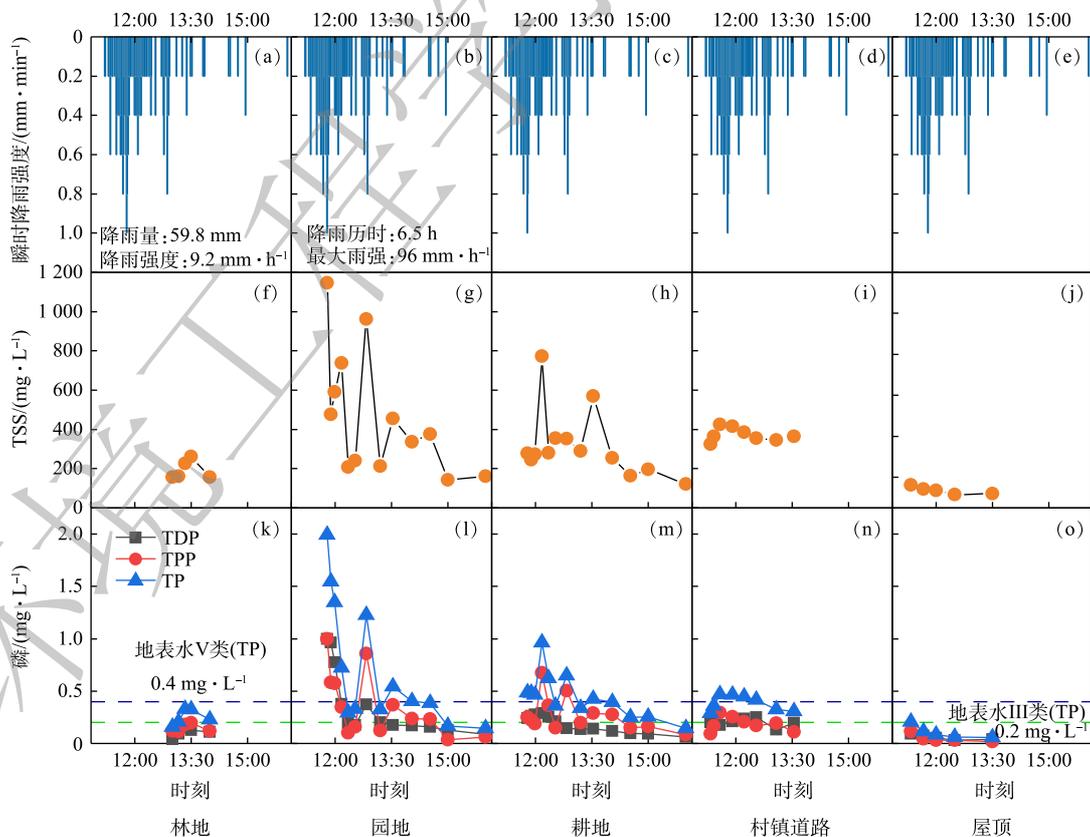


图 2 主要下垫面上磷污染物随时间的输出过程

Fig. 2 Output process of phosphorus pollutants on the main underlying surfaces over time

产生波动性的变化,之后随着降雨量增加逐渐减小,这与以往研究结果较为一致<sup>[31-32]</sup>(图2(g)~(i))。林地的产流时间晚于30 min,且在整场降雨过程中TSS的浓度变化趋于平缓,浓度值为156~261 mg·L<sup>-1</sup>(见图2(f))。这是因为,监测点的林地植被覆盖面广,地表裸露土地少,降雨初期可以拦截携带污染物的侵蚀颗粒被径流冲刷和传输。屋顶产流时间较快,但其TSS浓度为115~161 mg·L<sup>-1</sup>,变幅最小,整体较稳定(见图2(j))。

从磷素的输出过程来看,各下垫面的磷污染物浓度在产流过程中整体呈现出先增加后减少的趋势(图2(k)~(o))。对照《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)比较下垫面径流水质发现,园地、耕地在降雨前期和中期TP浓度均超出《地表水环境质量标准》中V类水标准,但在降雨后期污染物输出浓度介于Ⅲ类至V类之间(见图2(l)~(m))。以上结果说明,过度施肥导致了这两类下垫面土壤本底磷素较高,应开展测土配方施肥以减少磷素积累。村镇道路在降雨前30 min内TP超出Ⅲ类水标准,最大值超过V类水标准,但中后期浓度介于Ⅲ类和V类之间(见图2(m))。相比于上述各下垫面,林地的TP输出较低,整体处于Ⅲ类水到V类水范围(见图2(k))。而同属于建设用地的屋顶,TP输出最少,总体处于Ⅱ类水平(见图2(o))。由此可见,施肥及其他生产活动导致园地、耕地和村镇道路的TP总体超过V类水标准,林地的TP总体在Ⅲ类水上下波动,而屋顶的TP总体则在Ⅲ类水以下。此外,下垫面的TP与TSS存在正相关关系。

## 2.2 不同下垫面磷污染物的次降雨平均浓度特征

下垫面特征除了影响污染物输出过程外,还会影响次降雨污染物的平均输出水平(EMC)。为减少单次降雨污染物浓度的不确定性<sup>[33]</sup>,采用多次降雨事件(6月19日、8月4日、8月7日和8月27日)EMC的平均值表征监测期间各下垫面的径流水质。下垫面的差异对TSS及磷污染物EMC特征同样有着重要影响(见图3(a)~(d))。5种主要下垫面输出TSS的EMC从大到小顺序为:园地(488 mg·L<sup>-1</sup>)>耕地(482 mg·L<sup>-1</sup>)>村镇道路(372 mg·L<sup>-1</sup>)>林地(184 mg·L<sup>-1</sup>)>屋顶(126 mg·L<sup>-1</sup>)(见图3(a))。这说明,随着降雨冲刷过程的发生,耕地和园地的土壤侵蚀较为严重。此外,5种主要下垫面上TP的EMC从大到小顺序为:耕地(0.75 mg·L<sup>-1</sup>)>园地(0.59 mg·L<sup>-1</sup>)>地表V类水标准(0.40 mg·L<sup>-1</sup>)>村镇道路(0.38 mg·L<sup>-1</sup>)>林地(0.25 mg·L<sup>-1</sup>)>地表V类水标准(0.20 mg·L<sup>-1</sup>)>屋顶(0.08 mg·L<sup>-1</sup>)(见图3(b))。考虑到园地和耕地输出TP的EMC同样最大,其污染河湖水质的风险较高,为控制小流域的磷输出,应优先治理农业种植用地。

进一步分析不同形态磷对TP的贡献,可发现建设用地的TP输出形态以溶解态TDP为主,村镇道路和屋顶的TDP对TP分别贡献了51.33%和70.71%;而其他3种下垫面的TP则以颗粒态TPP为主,林地的TPP对TP的贡献率为56.20%,园地和耕地则分别达到了73.63%和76.60%。由于建设用地的不透水面的比例比其他3种下垫面大得多,说明下垫面的类型会导致磷输出组成的差异。这主要是因为建设用地受居民生活习惯影响,更易累积散排的生活污水、生活垃圾等含TDP

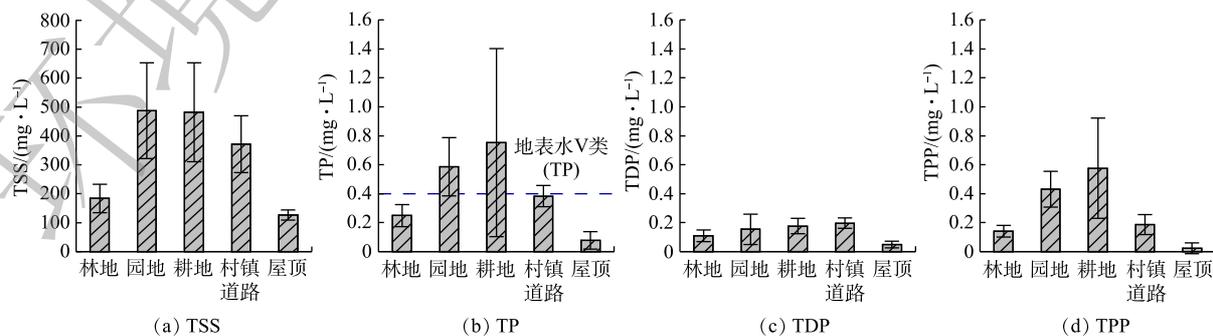


图3 主要下垫面的EMC特征

Fig. 3 EMC characteristics on the main underlying surfaces

较多的污染物。为控制污染输出, 应对居民倾倒污水和垃圾的习惯进行规范, 减少直排散排。

### 2.3 不同下垫面单位面积输出磷污染物负荷的特征

利用次降雨(8月4日)污染物的浓度、流量及监测点面积等数据, 对下垫面的单位面积输出负荷进行了分析。总的来说, 不同下垫面单位面积污染物输出负荷的大小顺序与污染物EMC的大小顺序明显不同(图4(a)~(d))。TSS的单位面积输出负荷高低顺序为: 村镇道路( $72.14 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )>耕地( $41.88 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )>屋顶( $33.52 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )>园地( $33.07 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )>林地( $14.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )(见图4(a))。而5种主要下垫面上TP污染物的单位面积污染负荷从大到小依次为: 村镇道路( $0.07 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )>耕地( $0.06 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )>园地( $0.04 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )>屋顶( $0.021 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )>林地( $0.019 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )(见图4(b))。这说明, 相比于污染物EMC大小的排序, 村镇道路和屋顶单位面积输出负荷的排序明显提高, 这仍是因为下垫面透水/不透水特征的差异。村镇道路和屋顶的不透水面的比例较大, 二者的单位面积径流量远大于园地和耕地等强透水下垫面, 导致其单位面积输出强度有了较大提升。

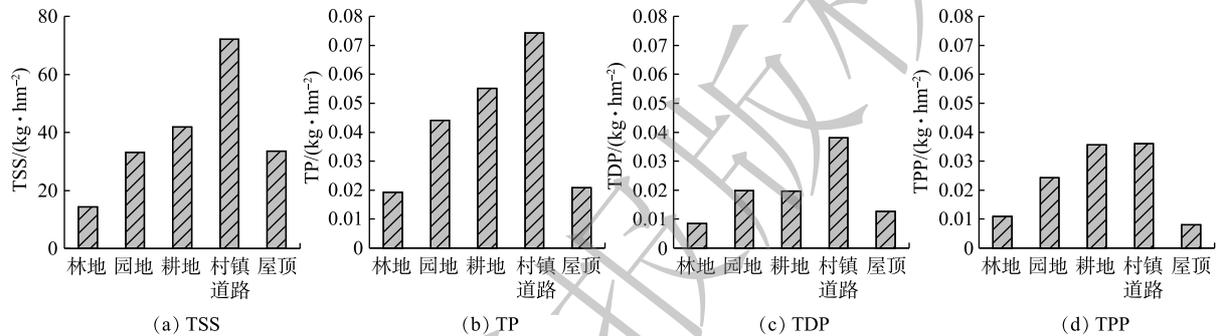


图4 主要下垫面单位面积输出的污染物负荷

Fig. 4 Pollutants load output per unit area of the main underlying surfaces

因此, 根据单位面积输出的TP强度, 应重点关注村镇道路和农业种植用地对整个岩口水库流域总磷负荷的影响。首先, 须对以园地和耕地为主的农业种植用地进行水土流失治理和源头控制; 同时应加强流域内村镇道路初期雨水的截留, 尤其注意在小到中雨情况下, 村镇道路是流域主要产生径流污染的下垫面, 其污染物具有直接入河的风险。此外, 还应保护好林地, 发挥其在水土保持、净化水质等方面的积极作用。

### 2.4 次降雨事件不同下垫面的磷污染负荷估算

分析各主要下垫面对次降雨污染物的负荷及贡献比例, 可以进一步为小流域综合治理提供决策依据。通过下垫面单位面积磷输出强度和小流域内各下垫面面积及作物种植比例, 可计算出典型的次降雨尺度上(8月4日降雨, 降雨量59.8 mm)岩下小流域内( $4.52 \text{ km}^2$ )的非点源污染负荷, 结果如图5所示。其中, 建设用地的污染负荷包括了村镇道路和屋顶2种下垫面的负荷。在次降雨

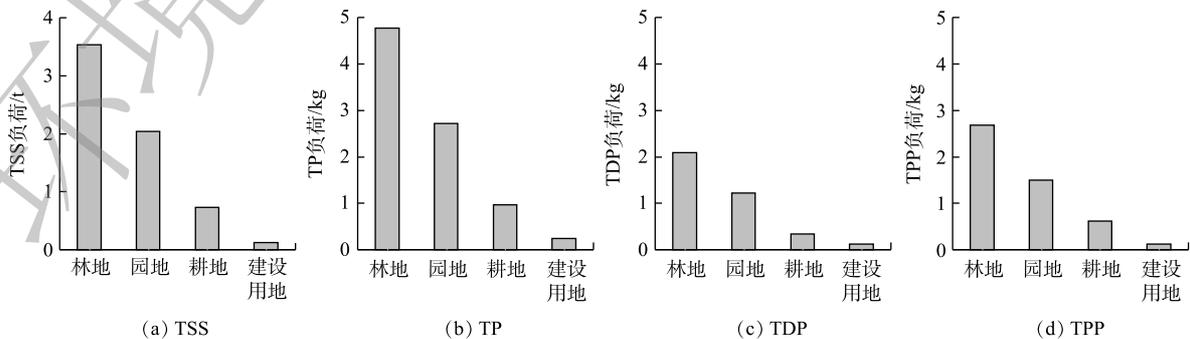


图5 次降雨尺度岩下小流域的污染负荷

Fig. 5 Pollutants load in Yanxia small watershed under a typical rainfall event

条件下, 岩下小流域共计输出泥沙 6.42 t, TP 8.7 kg。对输出 TSS 贡献最多的为林地, 园地次之, 两者的贡献比分别是 54.97% 和 31.77%; 对 TP、TDP、TPP 3 种负荷的前两位贡献顺序同样是林地和园地, 其中, 林地对 TP、TDP 和 TPP 负荷的贡献率达到 54.87%、55.28% 和 54.56%, 园地则为 31.25%、32.35% 和 30.4% (见图 6)。上述结果表明, 尽管林地单位面积污染强度小, 但其面积较大, 仍然是污染负荷的主要贡献者。因此, 应在重点治理园地和耕地水土流失的基础上, 进一步加大对林地的保护, 尤其是对林地中的裸露地表, 应增加植被覆盖, 并对水土保持措施进行维护。

### 3 讨论

#### 3.1 降雨特征对磷污染物输出过程的影响

当降雨流量小于 10 mm 或者平均降雨强度小于 1.8 mm 时, 园地和耕地等农业种植地块产流的概率较小 (见表 1), 故降雨特征是磷污染物输出过程的潜在影响因子。为探究降雨事件的降雨强度、流量等对地块磷输出的影响, 以耕地为例, 分析了 4 场降雨条件下 (6 月 19 日、8 月 4 日、8 月 7 日和 8 月 27 日) 其瞬时雨量、磷输出浓度、流量及 TSS 流失随时间的变化规律, 结果如图 7

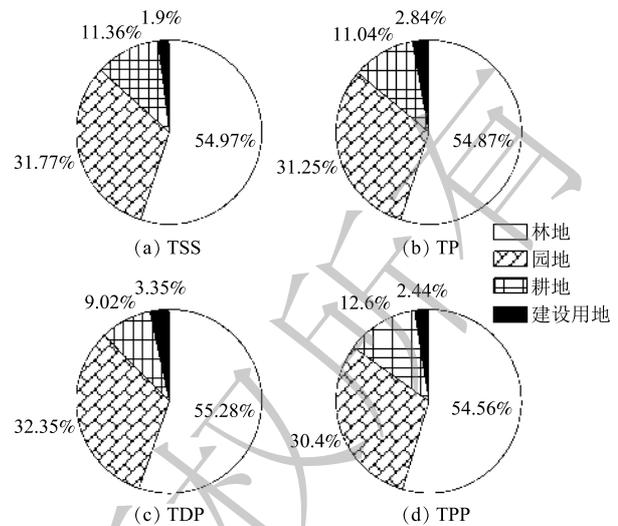


图 6 次降雨尺度小流域内的污染负荷比例组成  
Fig. 6 Pollutants load composition in Yanxia small watershed under a typical rainfall event

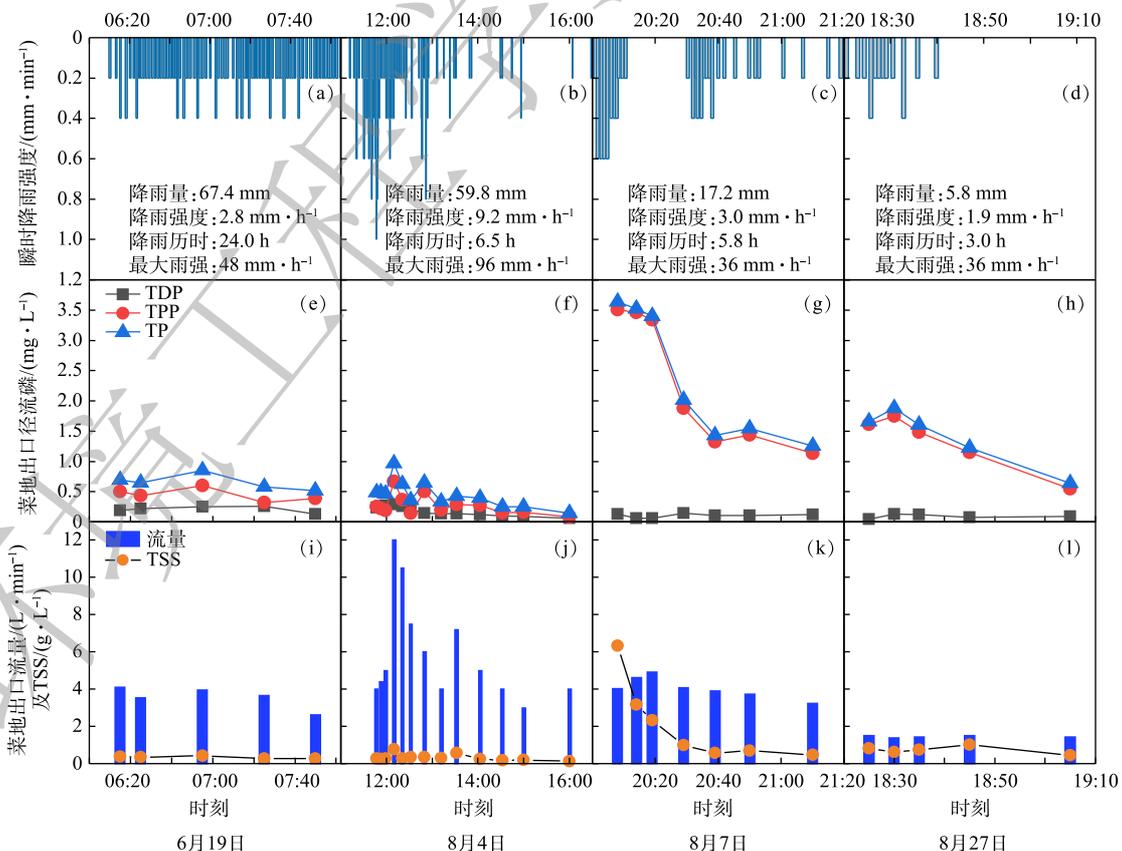


图 7 耕地输出流量、TSS 浓度及磷浓度随时间的变化规律

Fig. 7 Output flow, TSS concentration and phosphorus concentration of arable land over time

所示。由图7可知，降雨强度(见图7(a)~(d))对地块磷污染物输出有明显影响(见图7(e)~(h))。当瞬时降雨强度相对稳定时，磷浓度表现的相对稳定(见图7(a)和见(e))；当瞬时降雨强度增加或减小时，磷浓度也会随之增加或减小(见图7(b)和(f))。

从TP、流量和TSS三者关系来看，2次大雨条件下(6月19日和8月4日)，三者的变化趋势较一致(见图7(e)、(i)、(f)和(j))。然而，在中雨和小雨条件下情况则出现了变化。8月7日(中雨)降雨过程中，TP与TSS变化过程较为一致，而与流量变化明显不同(见图7(g)和(k))；8月27日(小雨)降雨过程中，流量和TSS几乎不变，而TP则出现了先上升后下降的趋势(见图7(h)和(l))。这说明降雨类型影响了下垫面TP、流量和TSS之间的关系<sup>[34]</sup>，可能是径流的冲刷侵蚀强度随降雨条件出现了差异，影响了TP的输出，进而导致TP、流量和TSS之间的关系发生变化。同时，这也说明TP输出特征可能受到流量和TSS流失过程的影响。以上结果可能对不同降雨条件下非点源污染控制措施的效率研究提供参考。

### 3.2 磷输出特征与TSS流失和流量的关系

以8月4日降雨为例，对不同下垫面径流中磷输出浓度与TSS做相关性检验，得到如表2所示结果。该结果表明，监测过程中5种主要下垫面输出的TP、TPP与TSS均显著相关，TP、TPP与TSS的相关系数最高分别达到0.993和0.990，说明TP和TPP的输出过程与TSS的流失过程关系密切。这可能是由于降雨冲刷造成了土壤侵蚀，而土壤侵蚀发生后导致颗粒物和磷的流失<sup>[35-36]</sup>，其中TPP流失与颗粒物释放的同步性更强。该结果表明，为控制小流域的磷输出，应减少各下垫面的TSS流失。比如，园地和耕地的径流出口增加水土保持措施，在村镇道路排水渠周围设置一定的低影响开发措施(如植草沟等)<sup>[37-39]</sup>。

为进一步探究磷输出浓度与流量的关系，接着对不同降雨条件下(6月19日、8月4日和8月7日)园地和耕地2种下垫面的磷输出浓度与流量进行皮尔逊相关性检验。结果表明，在8月4日和8月7日的2次降雨过程中，耕地的TP与流量显著相关，如表3所示。而园地的TP与流量则一直未显著相关(表3中未列出)。以上结果表明，地块的磷输出可能与流量有关系，但这种关系因地块类型而存在差异。其中，以菜地为代表的耕地土质松软，径流冲刷导致磷污染物输出效果明显，从而磷输出与流量关系密切；而以桃园为代表的园地情况则相反，其下垫面相对坚硬，径流变化与磷输出存在一定的时间间隔，致使磷输出与流量相关性较差<sup>[40]</sup>。上述结果进一步表明，不同下垫面的磷输出具有不同特征。因此，建议在实施治理措施控制非点源污染时，注意对不同土地类型进行精准配置以提升控制效率。此外，

表2 各下垫面径流中磷浓度与TSS的相关性检验

Table 2 Correlation test between phosphorus concentration and TSS concentration in runoff of each underlying surface

下垫面类型	TDP	TPP	TP	样品个数
林地	0.708	0.990**	0.912*	5
园地	0.672*	0.941**	0.847**	13
耕地	0.460	0.781**	0.775**	13
村镇道路	0.077	0.876**	0.857**	8
屋顶	0.875	0.952*	0.993**	5

注：相关性采用皮尔逊相关系数表示；\*为相关性在0.05水平上显著(双侧)，\*\*为相关性在0.01水平上显著(双侧)。

表3 耕地输出磷浓度与流量的相关性检验

Table 3 Correlation analysis of output phosphorus concentration and flow in arable land

降雨日期	耕地磷素	耕地流量	样品个数
6月19日(大雨)	TDP	0.695	5
	TPP	0.521	5
	TP	0.735	5
8月4日(大雨)	TDP	0.569*	13
	TPP	0.743**	13
	TP	0.787**	13
8月7日(中雨)	TDP	-0.707	7
	TPP	0.793*	7
	TP	0.784*	7

注：相关性采用皮尔逊相关系数表示；\*为相关性在0.05水平上显著(双侧)，\*\*为相关性在0.01水平上显著(双侧)。

未来可结合人工模拟等方法验证磷输出与流量的关系,以及不同水土保持措施下非点源污染物的输出特征。

#### 4 结论

1) 受污染物累积过程和径流冲刷过程的影响,林地、园地、耕地、村镇道路和屋顶5种主要下垫面的污染物输出过程、EMC特征、磷输出组成和单位面积输出负荷,存在明显差异。

2) 从污染物输出过程来看,各下垫面产流过程中受瞬时强降雨影响,均存在产流初期TP较高的现象,其中园地、耕地及村镇道路的TP总体超过V类水标准。

3) 从污染物输出结果来看,次降雨情况下农业种植用地输出的TP降雨平均值最高,村镇道路输出的单位面积TP负荷最高,而林地输出的TP对小流域污染总量贡献最多。在小流域治理中,应综合考虑上述结果,因地制宜制定污染控制措施。

4) 除了下垫面外,降雨强度、降雨量、流量和水土流失过程等均会影响磷污染物输出特征。而通过皮尔逊相关性检验还发现,次降雨条件下TP和TPP的输出与TSS的流失呈正相关关系,可通过减少各下垫面TSS的流失控制小流域的磷输出。

#### 参考文献

- [1] XUE L, HOU P, ZHANG Z, et al. Application of systematic strategy for agricultural non-point source pollution control in Yangtze River basin, China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 304: 107148.
- [2] LEON L F, BOOTY W G, BOWEN G S, et al. Validation of an agricultural non-point source model in a watershed in southern Ontario[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 65: 59-75.
- [3] POTTER K M, CUBBAGE F W, BLANK G B, et al. A watershed-scale model for predicting nonpoint pollution risk in North Carolina[J]. *Environmental Management*, 2004, 34: 62-74.
- [4] 姜和震, 吴习锦, 郝芳华, 等. 近三十年中国非点源污染研究现状与未来发展方向探讨[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(5): 1535-1549.
- [5] 夏军, 翟晓燕, 张永勇. 水环境非点源污染模型研究进展[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(7): 941-952.
- [6] BEYNON J D E. Encyclopedia of physical science and technology Vol. 1[J]. *Electronics & Power*, 1987, 33(11/12): 747.
- [7] 程红光, 岳勇, 杨胜天, 等. 黄河流域非点源污染负荷估算与分析[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(3): 384-391.
- [8] SHEN Z, QIU J, HONG Q, et al. Simulation of spatial and temporal distributions of non-point source pollution load in the Three Gorges Reservoir Region[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 493: 138-146.
- [9] 生态环境部. 第二次全国污染源普查公报[J]. *环境保护*, 2020, 48(18): 8-10.
- [10] 王克勤, 宋泽芬, 李太兴, 等. 抚仙湖一级支流尖山河小流域的面源污染物贡献特征[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(6): 1321-1328.
- [11] 朱波, 汪涛, 王建超, 等. 三峡库区典型小流域非点源氮磷污染的来源与负荷[J]. *中国水土保持*, 2010(10): 34-36.
- [12] 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.
- [13] 沈茜, 唐家良, 朱波. 紫色丘陵区典型小流域非点源磷迁移特征[J]. *山地学报*, 2015, 33(5): 528-537.
- [14] ZHANG S, HOU X, WU C, et al. Impacts of climate and planting structure changes on watershed runoff and nitrogen and phosphorus loss[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 706: 134489.
- [15] 吴希媛, 张丽萍, 倪含斌, 等. 青山湖流域不同地表覆盖降雨径流中氮磷流失过程研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(1): 56-59.

- [16] 李燕, 李恒鹏. 太湖上游流域下垫面因素对面源污染物输出强度的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(5): 1319-1324.
- [17] 袁溪, 潘忠成, 李敏, 等. 雨强和坡度对裸地径流颗粒物及磷素流失的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(10): 3099-3106.
- [18] 胡宏祥, 马友华. 水土流失及其对农业非点源污染的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(6): 408-412.
- [19] 汪亚及, 高磊, 彭新华. 红壤农田小流域径流组分对氮素流失动态的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(12): 1960-1973.
- [20] 刘俏, 张丽萍, 聂国辉, 等. 浙江红壤区经济林坡地氮素径流流失特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(7): 1388-1393.
- [21] 王永生, 刘彦随. 中国乡村生态环境污染现状及重构策略[J]. 地理科学进展, 2018, 37(5): 710-717.
- [22] 曹杰君, 高扬, 黄海波, 等. 长三角典型村域次降雨条件下氮素非点源输出特征[J]. 环境科学, 2010, 31(11): 2587-2593.
- [23] ZHANG Z Y, SHENG L T, YANG J, et al. Effects of land use and slope gradient on soil erosion in a red soil hilly watershed of Southern China[J]. *Sustainability*, 2015, 7(10): 14309-14325.
- [24] 于兴修, 李振炜, 刘前进, 等. 沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征[J]. 环境科学, 2012, 33(8): 2644-2651.
- [25] 严坤, 王玉宽, 刘勤, 等. 三峡库区规模化顺坡沟壑果园氮、磷输出过程及流失负荷[J]. 环境科学, 2020, 41(8): 3646-3656.
- [26] 高超, 李阳, 于海明, 等. 典型自然降雨条件下太湖地区水稻田氮磷输出特点[J]. 生态环境学报, 2015, 24(5): 845-852.
- [27] 原居林, 李明, 杨元杰, 等. 浙江省义乌市岩口水库鱼类群落多样性分析及鲢、鳙生长特性研究[J]. 上海海洋大学学报, 2015, 24(5): 754-764.
- [28] 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.
- [29] OSTROM T K, DAVIS A P. Evaluation of an enhanced treatment media and permeable pavement base to remove stormwater nitrogen, phosphorus, and metals under simulated rainfall[J]. *Water Research*, 2019, 166: 115071.
- [30] 孙孝龙, 蒋文举, 王克勤, 等. 抚仙湖尖山河小流域山地典型地类非点源污染特征与分析[J]. 环境科学学报, 2009, 29(7): 1534-1541.
- [31] 陈育超, 李阳, 于海明, 等. 太湖地区何家浜流域初期雨水对水稻田污染物的冲刷效应[J]. 环境工程学报, 2016, 10(2): 573-580.
- [32] LANG M, LI P, YAN X Y. Runoff concentration and load of nitrogen and phosphorus from a residential area in an intensive agricultural watershed[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 458(1): 238-245.
- [33] 李春林, 刘森, 胡远满, 等. 沈阳市降雨径流污染物排放特征[J]. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1327-1336.
- [34] 马英, 马邕文, 万金泉, 等. 东莞不同下垫面降雨径流污染输移规律研究[J]. 中国环境科学, 2011, 31(12): 1983-1990.
- [35] 廖敏, 叶照金, 黄宇, 等. 长兴县合溪水库集雨区苗木地不同施肥管理模式对径流磷素流失的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7342-7350.
- [36] 王静, 郭熙盛, 王允青. 自然降雨条件下秸秆还田对巢湖流域旱地氮磷流失的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 492-495.
- [37] 王超, 贾海燕, 雷俊山, 等. 南水北调中线水源地小流域面源污染生态阻控[J]. 环境工程学报, 2020, 14(10): 2615-2623.
- [38] 吴金水, 李勇, 李裕元, 等. 亚热带区域农业面源污染流域源头防控机理与技术示范[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(6): 1009-1019.
- [39] 施卫明, 薛利红, 王建国, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践: 生态拦截技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(9): 1697-1704.
- [40] 储双双, 张兵, 莫罗坚, 等. 林分改造对马占相思林水土和养分保持效能的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 72-77.
- (责任编辑: 靳炜)

## Output characteristics of non-point source phosphorus on different underlying surfaces in a typical small watershed in red soil hilly region of Southern China

FANG Zhida<sup>1,2</sup>, WANG Shuping<sup>3</sup>, SU Jingjun<sup>1,2</sup>, HU Lian<sup>4</sup>, ZHAO Hongtao<sup>1,2,\*</sup>, LI Xuyong<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

4. International Institute of River and Ecological Security, Yunnan University, Kunming 650500, China

\*Corresponding author, E-mail: htzhao@rcees.ac.cn

**Abstract** Understanding the output process characteristics of non-point source pollutants on different underlying surfaces is one of the prerequisites for comprehensive management of small watersheds. Taking a typical small watershed in red soil hilly region of Southern China as an example, this study observed and compared the output process of non-point source phosphorus pollution of the main underlying surfaces of forest land, agricultural planting land (orchards and arable land) and construction land (rural roads and roofs) under rainfall conditions. Results showed that all underlying surfaces had high concentrations of pollutants in the early stage of runoff. The average concentration of total phosphorus (TP) on the five main underlying surfaces in typical rainfall events was in a decreasing order of arable land ( $0.75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), orchard land ( $0.59 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), rural roads ( $0.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), forest land ( $0.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), and roofs ( $0.08 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ). The TP output intensity was in a decreasing order of rural roads ( $0.07 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), arable land ( $0.06 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), orchard land ( $0.04 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), roofs ( $0.021 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), and forest land ( $0.019 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ). The type of underlying surfaces affected the output composition of non-point source phosphorus. Dissolved phosphorus accounted for the highest proportion of the whole non-point source phosphorus from construction land (51%~71%), followed by forest land (44%), and planting land (25%). The proportion of land use area and phosphorus pollution load contribution ratio of the entire small watershed were in a decreasing order of forest land (87%; 55%), planting land (9%; 42%), and construction land (1%; 3%). Results of this study, together with local rainfall characteristics and soil erosion conditions, can provide scientific guidance for non-point source pollution control in hilly red soil areas in Southern China.

**Keywords** non-point source pollution; small watershed; underlying surfaces; phosphorus output; rainfall erosion