

红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征

房志达^{1,2}, 苏静君^{1,2}, 赵洪涛^{1,2*}, 胡炼¹, 李叙勇^{1,2}

(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)

摘要: 科学识别不同土地利用方式下的径流污染输出特征是治理流域面源污染的前提。以南方红壤丘陵区小流域为例, 野外实地观测对比了不同降雨特征下林地、种植用地和建设用地的水文过程和面源污染物输出过程。结果表明, 土地利用方式影响着地表径流的水文水质过程, 典型降雨下3类用地类型产流时间及产流累积雨量的特征为: 建设用地(9 min, 2.0 mm)、种植用地(35 min, 11.4 mm)和林地(108 min, 24.0 mm); 而3种用地类型的总悬浮物(TSS)、总氮(TN)和总磷(TP)的污染物浓度、形态、氮磷比变化及输出强度等污染输出过程特征也呈现明显差异。典型降雨下不同用地类型具有相似的污染输出阶段, 径流初期的TSS、TN和TP质量浓度均偏高, 之后逐步趋于稳定; 产流过程的前30 min贡献TSS、TN及TP负荷的范围均在23%~43%之间。年尺度下, 各用地类型对TN和TP负荷的贡献率及单位面积负荷比存在明显差异, 表现为种植用地污染负荷贡献最高(57%和45%), 而建设用地单位面积负荷比最高(9.50~12.50)。结果亦表明小流域面源污染关键源区的分布具有时空动态变化特征, 由汇水单元内的用地类型组成和年降雨特征等综合决定; 随着次降雨量的增加, 主要贡献源由建设用地向种植用地动态转变, 治理时需要根据关键源区的分布特征及下垫面产流过程规律进行针对性生态拦截。

关键词: 小流域; 面源污染; 土地利用; 径流过程; 氮磷输出

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)11-5394-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202103163

Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in A Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region

FANG Zhi-da^{1,2}, SU Jing-jun^{1,2}, ZHAO Hong-tao^{1,2*}, HU Lian¹, LI Xu-yong^{1,2}

(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)

Abstract: Scientific identification of runoff output characteristics of different land use patterns is the premise of controlling non-point source pollution in watersheds. The hydrology and output process of non-point source pollutants of forest, planting, and construction land with different rainfall characteristics were observed using a micro-watershed in a low mountain and hilly region of Southern China. The results showed that land use affected the hydrological characteristics and water quality processes of runoff. The characteristics of runoff generation time and cumulative rainfall under typical rainfall conditions were as follows: construction land(9 min, 2.0 mm), planting land(35 min, 11.4 mm), and forest land(108 min, 24 mm). There were significant differences in the three land use types in the pollution output process characteristics, such as pollutant concentration of total suspended matter(TSS), total nitrogen(TN) and phosphorus(TP), their components, N/P ratio change, and output intensity. Under typical rainfall, different land use types had similar pollution output stages, the mass concentrations of TSS, TN, and TP in the initial runoff were high, and then gradually stabilized. In addition, the first 30 min of the flow generation process contributed to the TSS, TN, and TP loads within the 23%-43% range. At the annual scale, there were significant differences between the contribution rate of each land use type to TN and TP load and ratio per unit area; the highest contribution to total pollution load was planting land(57% and 45%), while the highest in pollution load per unit area was construction land(9.50-12.50). The results also showed that the distribution of key non-point source areas had different spatial and temporal dynamics, which was comprehensively determined by the land use types in catchment units, the characteristics of annual rainfall, among other factors. With the increase in rainfall, the main contribution non-point source pollution in the micro-watershed changed from construction land to planting land. Targeted ecological interception strategies should be implemented based on the distribution characteristics of key source areas and characteristics of underlying surface runoff production process.

Key words: micro-watershed; non-point source pollution; land use; runoff process; nitrogen and phosphorus output

氮磷等营养元素向水体过量输入会加速区域水体富营养化, 严重威胁饮用水源安全和水环境健康^[1,2]。流域水体中氮磷等元素主要来自于点源和面源。随着污水处理终端的建设和诸多水环境治理工程的实施, 点源污染逐渐得到控制, 但面源污染治理却仍面临巨大挑战, 成为流域水环境治理的难点^[3,4]。流域面源污染主要包括城镇面源污染和农业面源污染, 两种污染越来越多在小流域内共存^[5], 这增加了流域面源污染的复杂性和治理的困难。因此, 同步研究小流域内这两种面源污染具有重要意义。

国内外关于流域面源污染的研究始于种植业的面源污染, 后来逐渐扩展到村镇及城市的建设用地等多种类型的面源污染。由于城乡分化的差异, 以往针对村镇和农业面源污染的研究和治理通常独立进行^[6], 但研究内容均主要涵盖以下4个方面: ①污染物溯源^[7]; ②氮磷等污染物输出及迁移特征比

收稿日期: 2021-03-18; 修订日期: 2021-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(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)

作者简介: 房志达(1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为流域面源污染, E-mail: zdfang_st@cees.ac.cn

* 通信作者 E-mail: htzhao@cees.ac.cn

较^[8,9]; ③面源污染输出过程特征影响因素分析^[10-12]; ④面源污染控制技术研究等^[13,14]. 然而, 目前在小流域内同时关注村镇和农业这两种面源污染的研究仍然较少, 农业流域的面源污染研究中侧重点是种植业, 城镇面源污染的研究多关注在建设用地上^[15,16], 但单一类型的面源污染研究已经无法支撑当下流域治理需求. 因此, 两种面源污染类型在小流域的空间分布和污染物输出特征, 以及不同降雨特征下污染贡献的关键源区动态变化还有待深入研究.

鉴于此, 本研究在南方红壤丘陵小流域中同时考虑这两种主要类型的面源污染, 野外实地观测 3 种土地利用上的 5 种下垫面的径流过程, 以下垫面透水性特征作为研究的切入点, 分析透水性特征对代表两种面源污染的典型下垫面产流过程与氮磷污染物输出过程的影响, 尝试依据不同土地利用组成和下垫面的污染物输出特征确定流域面源污染的高风险区及不同降雨条件下主要贡献源, 并提出针对性生态调控措施.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

岩口水库流域位于钱塘江流域义乌江支流航慈溪上游, 集水面积约 50 km², 属于典型的低山丘陵小流域(图 1). 当地日照充足, 雨量丰沛, 多年平均降雨 1 400 mm, 但降水量分布不均, 多集中在 4 月中旬至 8 月中旬. 研究区内农田和村镇均有分布, 农业

生产和商业活动繁荣. 土壤主要为红壤和改良的水稻土. 林地约占流域总面积的 74%; 其次是农田, 主要包括园地和耕地两种类型, 分别占总面积的 12% 和 7%; 最小为建设用地, 约占总面积的 2%; 其余为水体及湿地. 林地以次生常绿针阔叶混合林为主, 园地以种植桃树等果树为主, 耕地以种植蔬菜为主, 建设用地包括村镇道路和村民居住点. 流域下游为岩口水库, 曾多次暴发水华. 村镇已对生活污水截污纳管, 流域水体的水质受到面源污染的影响较大.

1.2 样品采集及现场观测

为方便监测, 选择有多类下垫面集中分布的岩下村作为采样点. 同时为减少干扰, 选择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. 监测过程中, 用挡水墙和围堰等措施围成径流小区, 使监测区不与周边地块发生径流交换, 并实测地块集水面积. 各下垫面信息见表 1. 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)^[17]. 监测时间从 4 月初开始, 到 10 月初结束, 共监测到 15 次降雨, 共采集样品 122 个, 其中采集到整场径流过程样品 4 次, 采集到局部径流过程中样品 2 次, 其余未发生有效产流. 采样时用带有刻度的集流桶收集各地块排水口径流, 用径流润洗后的聚乙烯采样瓶保存样品, 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, 初期每 5 min 采集一次, 累计采集 3 次, 中后期每 10 ~ 30 min 采集一次^[10,18].

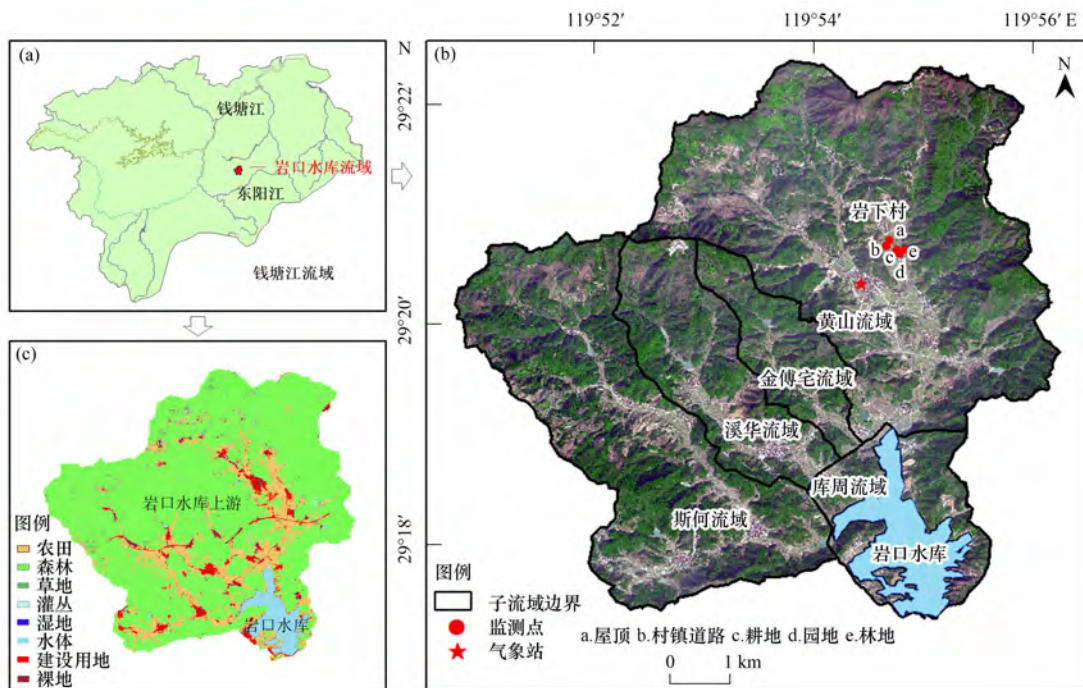


图 1 岩口水库流域位置示意

Fig. 1 Location of Yankou Reservoir watershed

表 1 采样点信息

Table 1 Sampling point information

下垫面类型	监测面积/m ²	作物	土壤类型/材质	地表覆盖情况	透水性
林地	500	针阔叶混交林	砂质红壤	覆盖均匀	极好
园地	152	桃树	红壤	裸露较多	良好
耕地	100	豆角和芋头	红壤	半覆盖	良好
村镇道路	1 000	无	水泥	无	很差
屋顶	25	无	水泥	无	很差

样品采集后即送回实验室于 5℃ 冰柜冷藏,并于 48 h 内完成检测。

1.3 样品处理与数据分析

本研究测定样品中总悬浮颗粒物(TSS)、总磷(TP)、总溶解态磷(TDP)、总氮(TN)和总溶解态氮(TDN)的质量浓度。采用烘干法测定 TSS^[19]。原样品摇匀后采用 0.45 μm 滤膜过滤得到 TDP 和 TDN 的样品。过硫酸钾消解后用钼酸盐分光光度法(GB 11893-89)测定 TP 和 TDP,总颗粒态磷(TPP)即为 TP 与 TDP 之间的质量浓度差值。碱性过硫酸钾消解后用紫外分光光度法(HJ 636-2012)测定 TN 和 TDN,总颗粒态氮(TPN)即为 TN 与 TDN 之间的质量浓度差值。氮磷比为 TN 与 TP 质量浓度的比值。

分析过程中用到次降雨事件污染物平均质量浓度(event mean concentration, EMC)表示次降雨下垫面污染物的平均输出水平^[20-21],其计算方法如公式(1):

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

式中,EMC 为次径流污染物的平均质量浓度,mg·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; ρ_t 为 t 时刻污染物的质量浓度,mg·L⁻¹; Q_t 为 t 时刻径流流量, L·min⁻¹; Δt 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, mm·min⁻¹,其数值通过雨量计监测得到。单位面积输出强度为整个降雨事件中单位面积地块输出的污染物负荷, kg·km⁻²。单位面积负荷比为污染物贡献率与面积贡献率的比值,无单位。

流域面源污染年负荷首先根据数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据和自然流域状况等资料,划分出子流域/汇水区[图 1(c)];其次获取子流域/汇水区内各土地利用类型的面积,并利用 SCS-CN 模型得到次降雨径流深^[22];最后结合实测氮磷污染物 EMC,参考年径流污染负荷计算方法得到各子流域/汇水区的氮磷污染负荷^[23]。数据精度及来源信息见表 2。

全文采用 Excel 进行数据统计计算,利用 Origin 2020 进行图片绘制。

表 2 污染负荷数据及相关参数来源

Table 2 Source of pollution load data and related parameters

数据	精度	用途	来源
DEM	30 m × 30 m	划分子流域	地理空间数据云
土地利用类型	10 m	核算土地利用面积	清华大学 ^[24]
污染物资料	/	计算污染负荷	实测数据
2020 年降雨资料	逐日	计算次平均径流量	实测及校对数据

2 结果与分析

2.1 不同下垫面的产流过程规律

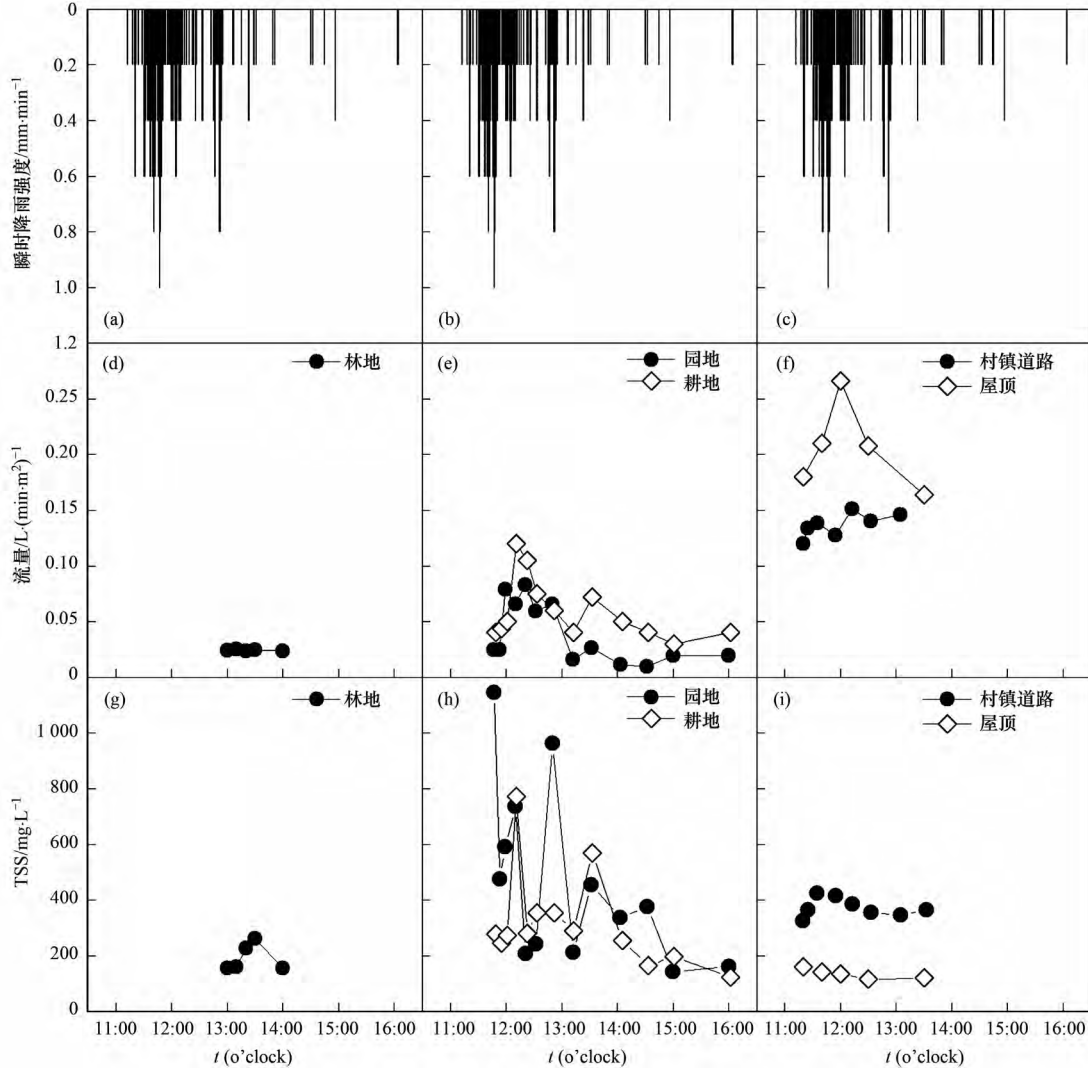
下垫面透水性特征对产流过程有着重要影响。图 2 为一场典型的暴雨事件[2020-08-04,降雨量 59.8 mm,图 2(a)~2(c)]中流域主要下垫面流量及 TSS 输出情况。可以发现,3 种土地类型中产流时间最快的为建设用地(9 min,累积雨量 2.0 mm),其次是种植用地(35 min,累积雨量 11.4 mm),最晚为林地(108 min,累积雨量 24.0 mm)。单位面积产流量的大小顺序与产流先后顺序一致,建设用地单

位面积产流量均超过 0.10 L·(min·m²)⁻¹,而林地则均小于 0.05 L·(min·m²)⁻¹,种植用地产流量介于两者之间[图 2(d)~2(f)]。这主要是因为建设用地不透水面的比例较大,雨水下渗少,因此降雨后产流迅速、单位面积产流量多。而林地和种植用地均为透水下垫面,土壤水饱和后才出现产流,同时产流过程中也会有下渗过程,因此单位面积产流量相对少。

3 种土地类型输出的 TSS 水平也不同。整体来看,种植用地的 TSS 质量浓度范围最广,在 122 ~ 1 146 mg·L⁻¹之间;建设用地次之,TSS 质量浓度范

围为 156 ~ 425 mg·L⁻¹; 而林地 TSS 质量浓度范围最小, 为 156 ~ 261 mg·L⁻¹. 产流初期各下垫面输出的 TSS 质量浓度均出现了峰值, 此后则随着降雨量增加逐渐减小 [图 2 (g) ~ 2 (i)]. 各下垫面产流前 30 min 贡献了整场降雨 TSS 负荷的范围均在 29% ~ 33% 之间. 较高的 TSS 水平说明产流初期种植用地

水土流失相对严重, 这主要是监测期种植地块土质松软且裸露表面较多, 容易受到降雨侵蚀^[25]. 因此, 为减少种植用地的水土流失, 可以考虑在种植用地的排水出口设置截流堰或增加原有田埂高度. 此外, 还可以对种植用地采取密植或者秸秆覆盖等措施减少地表裸露.



降雨信息: 降雨量为 59.8 mm, 降雨历时 6.5 h, 平均降雨强度是 9.2 mm·h⁻¹, 最大雨强为 96 mm·h⁻¹

图 2 主要下垫面降雨产流过程规律(2020-08-04)

Fig. 2 Rainfall runoff process of main underlying surfaces(2020-08-04)

2.2 不同下垫面的氮磷污染物输出过程特征

与 TSS 输出过程类似, 各下垫面的氮磷污染物质量浓度峰值均出现在产流初期(前 30 min), 但总体均呈现下降的趋势 [图 3 (a) ~ 3 (f)]. 质量浓度梯度表现为种植用地整体最高, 林地整体最小, 建设用地介于二者之间. 产流初期园地径流中 TN、TP 的质量浓度分别为地表水环境质量标准 (GB 3838-2002) 中地表 V 类水标准 (湖库) 的 2.37 倍与 4.98 倍, 耕地则为 1.29 倍与 1.22 倍. 村镇道路径流中 TN 质量浓度范围为地表 V 类水标准 (湖库) 的 1.31 ~ 1.58 倍, TP 质量浓度在 V 类水标准上下波动. 林

地和屋顶两种下垫面的径流污染物质量浓度均在 V 类水以下, 其中屋顶径流污染物质量浓度最低, 基本在 III 类水以下. 在初期径流的负荷贡献率方面, 各下垫面相差不大, 产流 30 min 贡献整场降雨 TN 负荷的范围在 23% ~ 35% 之间, 贡献 TP 负荷的范围则在 29% ~ 43% 之间.

氮磷比是水体中营养盐结构的重要指标, 可解析各下垫面径流入河的富营养化风险^[26]. 一般水体中氮磷比在 7 ~ 20 之间时适宜藻类生长. 降雨过程中, 3 种土地类型径流中的氮磷比变化呈现明显的区别 [图 3 (g) ~ 3 (i)]. 林地的径流中氮磷比变化相

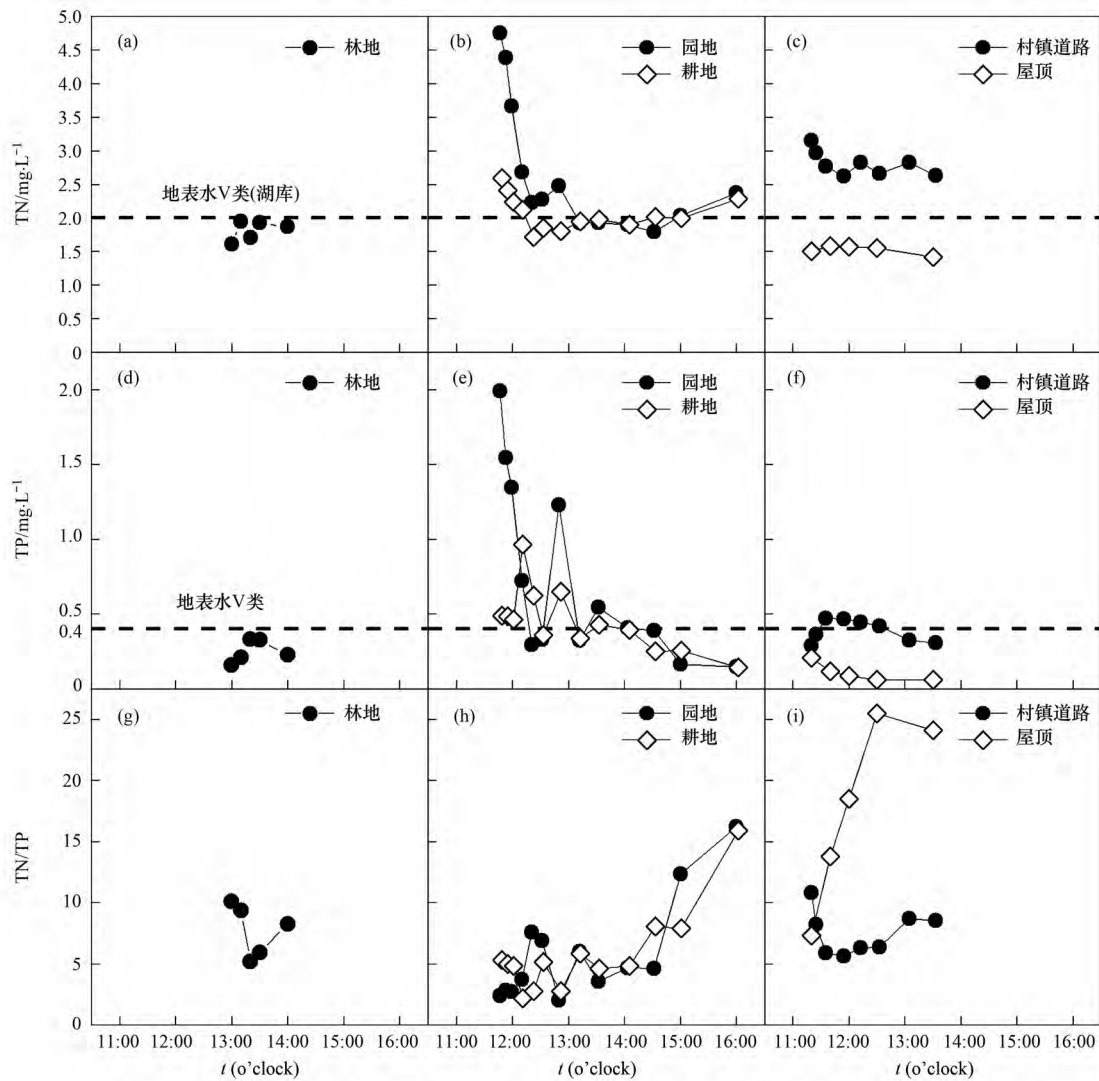


图3 不同下垫面氮磷质量浓度及氮磷比随时间的变化规律(2020-08-04)

Fig. 3 Changes in nitrogen concentration and N/P ratio with time on different underlying surfaces(2020-08-04)

对稳定,整体在 5.20 ~ 10.12 之间波动. 两种种植用地氮磷比变化较为一致,在 2.38 ~ 16.20 之间变化,呈现稳步上升的趋势,尤其在降雨后期,氮磷比最高达到了 16.20. 而两种建设用地径流中的氮磷比变化差别较大,其中村镇道路径流的氮磷比在 5.62 ~ 10.84 之间变化,而屋顶径流则从 7.32 开始先上升到最大值 25.46,之后出现下降. 除了林地和村镇道路外,种植用地和屋顶的氮磷比均出现了随时间增高的趋势,且皆是由总磷减少导致. 对于种植用地,其总磷减少是因为“过程”限制,即降雨冲刷的减弱导致的;而屋顶总磷减少则是由于“源”限制,即降雨前期下垫面累积污染物总量较少^[27].

径流中氮磷比和氮磷元素的质量浓度共同决定了径流的污染风险. 综合图 3 的结果发现,各下垫面径流中氮磷比水平较高的阶段出现在降雨的各个时段,与下垫面类型关系密切. 总体上种植用地径流的氮磷比及氮素水平均较高,其径流具有增加水体富

营养化的风险. 同样,村镇道路径流具有较高的氮素输出水平和适宜藻类生长的氮磷比,应对其径流增加相应的管控措施,如配置植草沟等. 而在以往的研究中,往往忽略屋顶径流,但其较高的氮磷比可能会对水体的营养盐平衡造成不利影响,因此其径流应经过缓冲带等措施过滤后再排入河流涵养水源,避免直接排入.

2.3 不同下垫面的氮磷污染物平均输出浓度及组成

下垫面特征和污染物来源等综合影响次降雨污染物的平均输出质量浓度(EMC)和组成. 采用 4 次降雨事件(2020-06-19、2020-08-04、2020-08-07 和 2020-08-27)中氮磷污染物经过降雨量加权的 EMC 表征各下垫面的径流水质,见图 4. 从中可知,5 种主要下垫面上 TN 的 EMC 最高为耕地(2.72 mg·L⁻¹),其次为园地(2.08 mg·L⁻¹)、村镇道路(1.15 mg·L⁻¹)和林地(1.16 mg·L⁻¹)居中,屋顶径流总氮浓度最低(0.81 mg·L⁻¹). 从标准偏差来看,

浓度最不稳定的为耕地, 最稳定的为园地和林地. 而 TP 的 EMC 最高同样为耕地径流 ($0.75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) , 园地径流 ($0.42 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 、村镇道路径流 ($0.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 以及林地径流 ($0.36 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 居中, 最小为屋顶径流 ($0.21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) . 种植用地和村镇道路污染物浓度较高, 主要是下垫面上的人为活动的影响, 如施肥和交通造成的. 进一步分析不同形态组分对 TN、TP 的贡献, 发现各下垫面的 TN 输出形态均以溶解态 TDN 为主, 溶解态组分对 TN 的贡献均在 51%~74% 之间. 而 TP 的输出形态则在各下垫面间不同, 其中透水性较差的建设用地的 TP 以溶解态

TDP 为主, 村镇道路和屋顶的 TDP 对 TP 质量浓度分别贡献了 50% 和 57%; 其他 3 种透水下垫面的 TP 则以颗粒态 TPP 为主, 溶解态组分对 TP 的质量浓度仅贡献 23%~39%. 这种结果一方面是因为下垫面污染物来源的差异. 各下垫面氮素多来自于化肥、有机肥等溶解态组分, 除去损失其仍占据主要比例; 而建设用地可接受来自村镇生活排放的溶解态磷素, 其他下垫面则较少. 另一方面是因为可溶性氮磷污染物迁移性质的不同. 迁移过程中溶解态磷素易被泥沙等颗粒吸附, 而溶解态氮素则较少受此影响, 因此下垫面间的氮磷组分差异进一步明显.

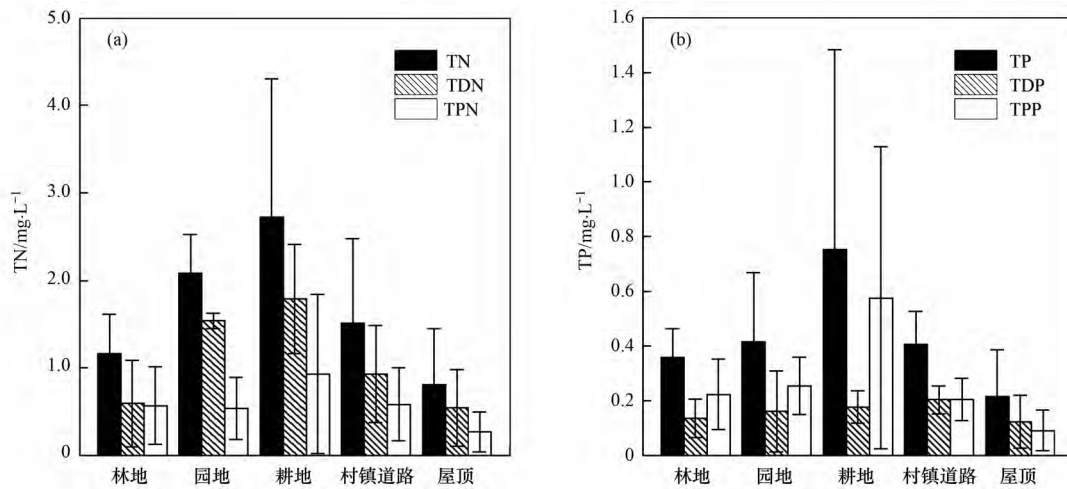


图 4 各下垫面径流中氮磷及组分的 EMC

Fig. 4 EMC of nitrogen, phosphorus, and their components in runoff of each underlying surface

2.4 不同下垫面的氮磷污染物输出强度特征

下垫面的氮磷污染物输出强度为单位面积地块的污染负荷通量, 可用来代表不同用地类型的面源污染物输出能力^[28]. 多次降雨条件下 (2020-06-19、2020-08-04、2020-08-07 和 2020-08-27) 的降雨量加权求得的氮磷污染物输出强度如图 5 所示. 从中可

知, 3 种土地利用中, 建设用地的单位面积 TN 输出负荷最大, TN 输出强度分别为: 村镇道路 ($49.37 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$)、屋顶 ($37.15 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$); 其次为农业种植用地、耕地和园地的 TN 输出强度范围在 $10.71 \sim 16.36 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$ 之间, 最小为林地 ($2.61 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$). 类似于 TN 输出强度的顺序, 各下垫面的 TP 输出强

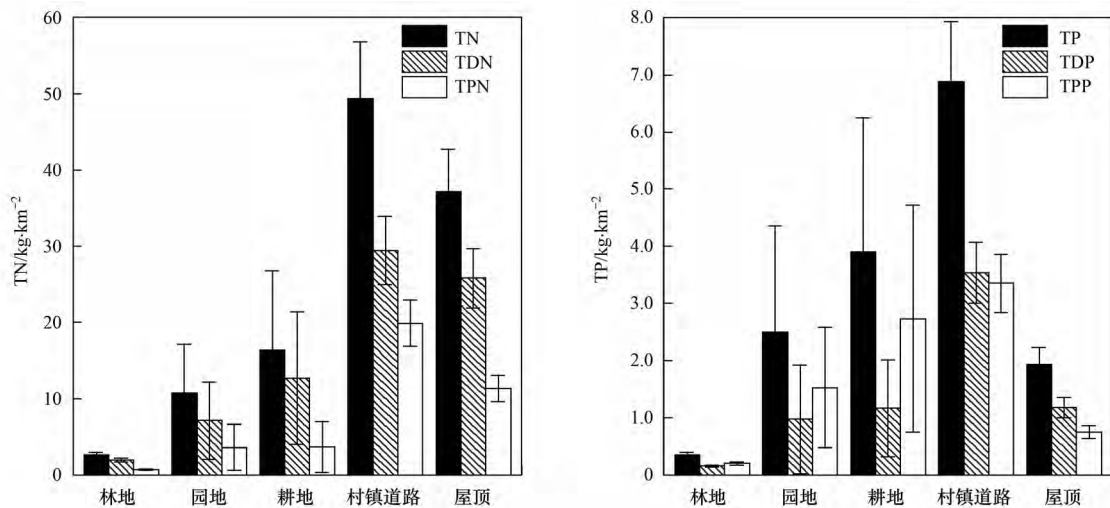


图 5 各下垫面平均输出氮磷强度

Fig. 5 Average output intensity of nitrogen and phosphorus pollutants on each underlying surface

度最高的仍为村镇道路 ($6.89 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$),最低的为林地 ($0.35 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$),其余三者的输出强度介于 $1.93 \sim 3.90 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$ 之间.可以发现下垫面的 TN 和 TP 输出强度顺序与 EMC 的顺序不同,其中屋顶的输出强度顺序明显提升,这是因为屋顶基本属于不透水下垫面,单位面积径流量较大,提高了氮磷的输出强度.此外,各组分的输出强度顺序与 TN 和 TP 的输出强度顺序存在一定差异,这与各组分的浓度及径流量大小有关.上述结果表明,下垫面透水性特征间接影响了污染物的输出强度.

3 讨论

3.1 基于流域土地利用和降雨特征的面源污染关键源区识别

面源污染最明显的特征之一是污染物分布范围广和空间异质性强^[29-30],是当前流域水环境治理的瓶颈.受到人类活动干扰剧烈的小流域,往往同时存在多种土地利用方式和多种下垫面类型,为流域面源污染治理增加了困难.因此,科学地识别和评估面源污染的关键源区(高污染风险地区和高污染输出时段)是高效治理的前提^[31].本研究基于不同土地利用类型的面积和下垫面组成比例,结合面源污染输出过程特征,通过年尺度径流污染负荷计算方法来量化流域面源污染负荷(结果见表3),并以负荷分析为主进一步从空间、时间和污染物组分这3个方面梳理氮磷污染输出的关键源区特征,进而简单有效确定小流域面源污染发生的关键源区.

由表3可知,空间分布方面,氮磷污染物总负荷贡献最多为黄山流域,而单位面积污染负荷最高为库周流域,这是由于黄山流域总面积最大,而库周流

域种植面积及建设用地比例较高;进一步考虑污染物传输距离,库周流域距离库区更近,黄山流域次之.此外,流域中各用地类型对 TN 和 TP 年负荷的贡献率为:种植用地最高(57%和45%),林地次之(24%和30%),建设用地最低(19%和25%);而对 TN 和 TP 的单位面积负荷比最高则为建设用地($9.50 \sim 12.50$),其次为种植用地($2.37 \sim 3.00$),最小为林地($0.32 \sim 0.41$).时间分布方面,6月是氮磷污染物输出最高的月份(图6).污染物组分方面,全流域 TN 负荷中 TDN 和 TPN 分别占比69%和31%,TP 负荷中 TDP 和 TPP 分别占比36%和64%,TDN 和 TPP 分别为氮磷污染的主要控制成分.因此,针对岩口水库流域的面源污染治理,需要重点关注面积较大的黄山流域以及单位面积负荷较高且靠近水库的库周流域,并对流域中污染输出风险较高的种植用地和建设用地予以整治,在雨季加大对流域水体水质、水量的监测和调度管理,优先控制溶解态氮和颗粒态磷可有效削减氮磷污染物输出.

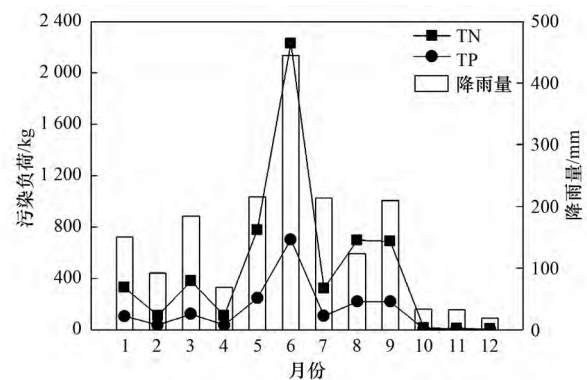


图6 岩口水库流域2020年逐月尺度降雨与氮磷负荷
Fig. 6 Monthly rainfall and nitrogen and phosphorus load in the Yankou Reservoir watershed in 2020

表3 各流域氮磷负荷及面积信息

Table 3 Nitrogen and phosphorus load and area information for each basin

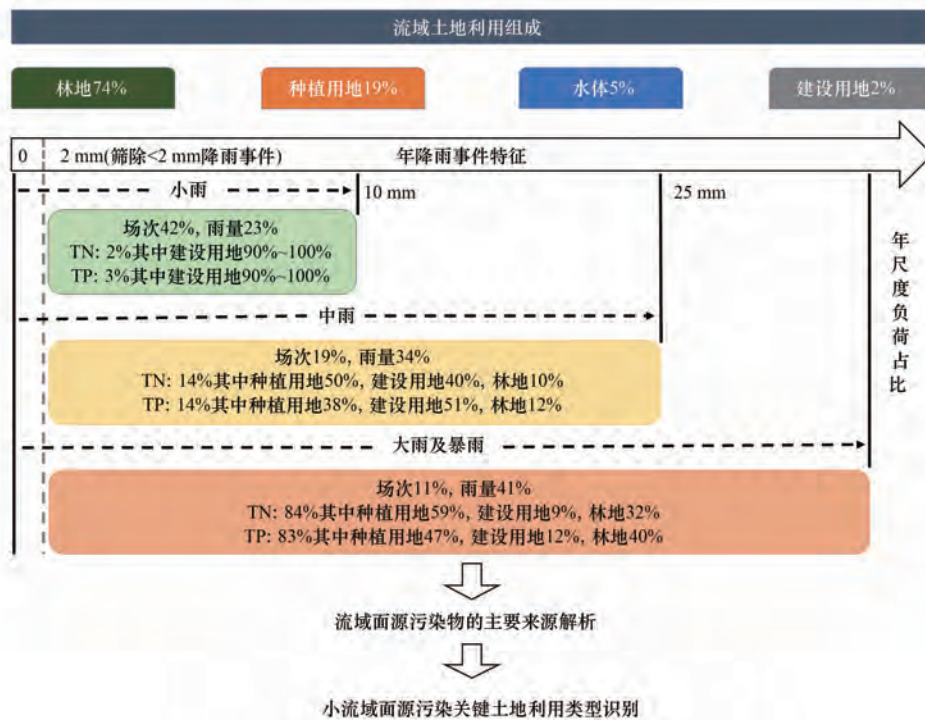
项目	黄山流域	金傅宅流域	溪流流域	斯何流域	库周流域	合计	
流域面积/ km^2	23.52	3.42	6.11	14.93	3.48	51.46	
TN 负荷 $/\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$	林地	609.38	103.33	149.80	398.37	78.42	1339.30
	种植用地	1536.28	90.19	462.39	879.79	279.71	3248.37
	建设用地	460.60	43.78	133.99	226.74	224.67	1089.78
TP 负荷 $/\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$	林地	243.71	41.33	59.91	159.32	31.36	535.64
	种植用地	384.31	22.07	120.83	222.58	68.53	818.32
	建设用地	194.89	18.52	56.65	95.94	93.11	459.12
单位面积负荷 $/\text{kg}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{a})^{-1}$	TN	110.81	69.39	122.12	100.80	167.47	110.33
	TP	34.99	23.95	38.85	32.01	55.46	35.23

在当前的流域治理中大多是根据土地利用类型及其面源污染过程来识别年尺度面源污染的关键源区.还缺乏基于不同降雨事件的面源污染贡献源动态性的考虑,以及由此进行经济效益分析并设置针对性管控措施.然而,在我国海绵城市建设中提出

了基于年降雨事件分布频率的工程设计思路,如根据不同气候地区提出不同设计降雨量和径流总量控制率等.在人类活动剧烈干扰的小流域还鲜有类似的思想方法.本研究根据岩口水库流域2020年的流域面源污染负荷识别了不同降雨类型下面源污染的

主要贡献源 结果如图 7 所示. 从中可知,不同的降雨条件下各下垫面所贡献的面源污染负荷比例大相径庭. 根据识别结果,需要在小降雨事件下对弱透水下垫面如村镇道路径流进行管理,而在强降雨事件下则需要重点对以种植用地和林地为主的透水下垫

面进行径流管控. 上述发现也进一步表明,在流域尺度上随着降雨量增加,面源污染来源范围会从建设用地向种植用地、林地扩大,并且后两者的占比也会随着降雨量增加而增加. 因此,流域面源污染治理中需要加强对大雨/暴雨事件的面源污染管控.



2020 全年降雨 1 788 mm,总降雨 188 次,有效产流 135 次;降雨事件按照:小雨(2~10 mm)、中雨(10~25 mm)、大雨及暴雨(25 mm 及以上)进行划分^[32]

图 7 小流域面源污染主要贡献源识别

Fig. 7 Identification of main contributory sources of non-point source pollution in the micro-watershed

3.2 基于流域面源污染源动态变化的生态拦截

地表径流的生态拦截和调蓄是治理面源污染的重要举措之一. 由图 7 可知,不同的产流条件下,流域面源污染的来源和贡献范围均不同,生态拦截和调蓄需要有针对性地开展. 地表径流生态拦截技术主要包括集水坑塘、生态田埂、生态拦截带和生态拦截沟这 4 种类型^[33, 34],技术要点及适用性分析见表 4. 对于小降雨事件,流域面源污染主要贡献源为村镇建设用地径流,这部分径流往往污染物浓度高且分布较为集中,直接排放容易对区域水环境造成污染,可利用村镇中的坑塘进行收集并进一步处理,其对径流的收集率可达到 54%~66%^[35],能有效减少面源污染排放. 南方丘陵地区小流域往往存在大量天然或人工坑塘,这些坑塘具有水系连通、调节旱涝、净化水质和保护生物系统等多种生态功能^[36~38]. 坑塘的生态功能的丧失,是流域水环境恶化的重要原因之一^[39, 40]. 因此对坑塘系统进行修复和改造,可以提升其对面源污染的生态拦截和调蓄功能. 但要注意对坑塘系统的管理,如及时利用或者

排空坑塘水体.

在中到大雨情况下,流域面源污染的主要贡献源从建设用地转变为种植用地,需要根据种植用地的产流及污染排放特征设置针对性措施. 当前研究区内的种植用地存在农田地块田埂高度偏低(5 cm 左右)及破损的问题,在中到大雨情况下往往会输出径流. 如将田埂高度再增加 5~10 cm,田埂对径流的拦截率达到 50%~100%^[41],则可以有效减少中到大雨情况下污染物的输出. 但也要注意某些果树如桃树等及某些蔬菜不耐淹特性,需及时排水. 生态拦截带和生态拦截沟能在中到大雨条件下有效拦截地块的面源污染输出. 典型降雨事件下,这两种措施对氮磷等污染物的削减率分别为 14%~42%和 25%~37%^[33, 42]. 以上措施还可以搭配林下绿肥种植等措施,进一步减少化肥的使用,提升地块水土保持能力.

整体而言,通过生态拦截技术可有效针对小雨及中到大雨情况下拦截面源污染物的输出. 但要注意在大到暴雨事件下对径流过程进行调控. 目前岩

表 4 面源污染主要过程拦截技术

Table 4 Main process interception technologies of non-point source pollution

技术类型	适用降雨类型	技术位置	技术要点	氮磷污染物拦截效果 ^[33, 35, #1, #2] /%	成本	适用性
集水坑塘	小雨~大雨	村镇内部和田块周边	利用坑塘收集建设用地和种植用地径流	54~66	低	建设用地和种植用地
生态田埂	中雨~大雨	农田内部	提高田埂高度减少径流输出	50~100	低	种植用地
生态拦截带	中雨~大雨	地块周边	利用地块周边种植植物吸收径流中氮磷	14~42	中	种植用地和建设用地
生态拦截沟	中雨~大雨	地块之间和原排水沟	利用沟渠中的植物拦截和净化污染物	25~70	中等偏高	种植用地和建设用地

口水库流域有面积在几十 m^2 到几百 m^2 的各类坑塘 100 余个, 总面积 0.13 km^2 。如将坑塘生态化改造并与沟渠连通、在坑塘周边设置拦截带, 用于收集、调蓄和净化暴雨径流, 可有效削减径流峰值, 控制面源污染输出。在此基础上, 增加坑塘的景观功能^[43], 还可以达到乡村综合治理的效果。

4 结论

(1) 土地利用方式影响着地表径流的水文水质过程, 典型降雨事件中 3 类用地类型的产流时间及产流累积雨量的特征为: 建设用地 (9 min, 2.0 mm)、种植用地 (35 min, 11.4 mm) 和林地 (108 min, 24 mm); 与此同时, 3 种用地类型径流污染物的质量浓度及氮磷比变化等污染输出过程特征均呈现出明显的差异。

(2) 不同用地类型具有相似的污染物输出阶段, 即在产流初期阶段各下垫面径流的 TSS、TN 和 TP 质量浓度均偏高, 之后逐步趋于稳定, 产流过程的前 30 min 贡献整场 TSS、TN 及 TP 负荷的范围均在 23%~43% 之间。

(3) 氮磷污染物的平均输出质量浓度以及污染物输出强度受到下垫面特征和污染物来源等综合影响, 整体表现为种植用地污染输出浓度最高, 而建设用地污染输出强度最高。各用地类型对 TN 和 TP 年负荷的贡献率为: 种植用地最高 (57% 和 45%)、林地次之 (24% 和 30%), 建设用地最小 (19% 和 25%); 而单位面积氮磷负荷比最高则为建设用地 (9.50~12.50), 其次为种植用地 (2.37~3.00), 最小为林地 (0.32~0.41)。

(4) 小流域面源污染关键源区的分布具有时空动态变化特征, 由汇水单元内的用地类型组成和年降雨特征等综合决定; 随着次降雨量的增加流域面源污染主要贡献源由建设用地向种植用地动态转变。治理时需要重点关注污染负荷贡献高的汇水区和用地类型, 优先控制污染物的主要成分, 并基于下垫面产流过程规律对面源主要输出源头进行针对性生态拦截。

参考文献:

[1] Lintern A, McPhillips L, Winfrey B, *et al.* Best management

practices for diffuse nutrient pollution: wicked problems across urban and agricultural watersheds [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(15): 9159-9174.

[2] 任智慧, 赵春发, 王青青, 等. 复杂流域氮磷污染物输出特征及模拟——以南京市云台山河流域为例 [J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(1): 174-184.

Ren Z H, Zhao C F, Wang Q Q, *et al.* Characteristics and simulation of nitrogen and phosphorus in complex watersheds: a case study in the Yuntaishan River Basin in Nanjing City, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(1): 174-184.

[3] Guo C B, Chen Y S, Xia W T, *et al.* Eutrophication and heavy metal pollution patterns in the water supplying lakes of China's south-to-north water diversion project [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **711**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134543.

[4] Tekile A, Kim I, Kim J. Mini-review on river eutrophication and bottom improvement techniques, with special emphasis on the Nakdong River [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **30**: 113-121.

[5] 陈亚军, 何席伟, 周嘉伟, 等. 太湖流域典型厂村融合区复合面源污染特征分析——以礼嘉镇、洛阳镇、雪堰镇为例 [J]. *环境监测与预警*, 2019, **11**(2): 1-9.

Chen Y J, He X W, Zhou J W, *et al.* Characteristics analysis of composite non-point source pollution in typical Industrial-agricultural-integrating area in Taihu Lake Basin——a case study of Lijia Town, Luoyang Town and Xueyan Town [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2019, **11**(2): 1-9.

[6] 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.

Lou H Z, Wu X J, Hao F H, *et al.* Research progress of non-point source pollution in China over the past 30 years and discussion of the future direction development [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(5): 1535-1549.

[7] 宋芳, 秦华鹏, 陈斯典, 等. 深圳河湾流域水污染源解析研究 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019, **55**(2): 317-328.

Song F, Qin H P, Chen S D, *et al.* Water source apportionment of pollutions in Shenzhen Bay Basin [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, **55**(2): 317-328.

[8] 严坤, 王玉宽, 刘勤, 等. 三峡库区规模化顺坡沟垄果园氮、磷输出过程及流失负荷 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3646-3656.

Yan K, Wang Y K, Liu Q, *et al.* Dynamic process of nitrogen and phosphorus export and loss load in an intensive orchard with ridge and furrow plantation in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3646-3656.

[9] 邓华, 高明, 龙翼, 等. 石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 251-262.

- Deng H, Gao M, Long Y, *et al.* Characteristics of soil nitrogen and phosphorus losses under different land-use schemes in the Shipanqiu watershed [J]. *Environmental Science*, 2021, **42** (1): 251–262.
- [10] 林明, 丁晓雯, 卢博鑫. 降雨、地形对非点源污染产输影响机理综述[J]. *环境工程*, 2015, **33**(6): 19–23.
Lin M, Ding X W, Lu B X. Review of researches on influence mechanism of rainfall, topography on the production and transportation of non-point source pollution [J]. *Environmental Engineering*, 2015, **33**(6): 19–23.
- [11] Wu L, Long T Y, Liu X, *et al.* Impacts of climate and land-use changes on the migration of non-point source nitrogen and phosphorus during rainfall-runoff in the Jialing River watershed, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **475**: 26–41.
- [12] Zhang S H, Hou X N, Wu C S, *et al.* Impacts of climate and planting structure changes on watershed runoff and nitrogen and phosphorus loss [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **706**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134489.
- [13] Liu R M, Zhang P P, Wang X J, *et al.* Assessment of effects of best management practices on agricultural non-point source pollution in Xiangxi River watershed [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, **117**: 9–18.
- [14] Jiang C B, Li J K, Li H E, *et al.* Remediation and accumulation characteristics of dissolved pollutants for stormwater in improved bioretention basins [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **685**: 763–771.
- [15] Chuan L, Zheng H G, Wang A L, *et al.* The situation and research progress of agricultural non-point source pollution in China [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, **526**, doi: 10.1088/1755-1315/526/1/012015.
- [16] 冯爱萍, 吴传庆, 王雪蕾, 等. 海河流域氮磷面源污染空间特征遥感解析 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(7): 2999–3008.
Tang A P, Wu C Q, Wang X L, *et al.* Spatial character analysis on nitrogen and phosphorus diffuse pollution in Haihe River Basin by remote sensing [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 2999–3008.
- [17] 官曼莉, 左俊杰, 任欣欣, 等. 透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4096–4104.
Gong M L, Zuo J J, Ren X X, *et al.* Evaluation of effect of urban non-point source pollution control on porous asphalt-bio-retention combined roads [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4096–4104.
- [18] 赵晓佳, 王少坡, 于贺, 等. 天津中心城区典型下垫面降雨径流污染冲刷特征分析 [J]. *环境工程*, 2019, **37**(7): 34–38, 87.
Zhao X J, Wang S P, Yu H, *et al.* Analysis on characteristics of rainfall runoff pollutants flush of typical underlying surfaces in Tianjin Central City [J]. *Environmental Engineering*, 2019, **37**(7): 34–38, 87.
- [19] 国家环境保护总局. 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. 105–108.
- [20] Perera T, McGree J, Egodawatta P, *et al.* Catchment based estimation of pollutant event mean concentration (EMC) and implications for first flush assessment [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **279**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111737.
- [21] 于江华, 徐礼强, 高永霞, 等. 面源污染管理中不同类型工程设施的性能比较 [J]. *环境工程学报*, 2015, **9**(8): 3692–3700.
Yu J H, Xu L Q, Gao Y X, *et al.* Effectiveness evaluation of best management practices for treatment of non-point source pollution [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(8): 3692–3700.
- [22] 庞琰瑾, 袁增伟. 平原河网区降雨径流污染负荷测算——以太湖流域望虞河西岸为例 [J]. *湖泊科学*, 2021, **33**(2): 439–448.
Pang Y J, Yuan Z W. Quantification of pollutants in rainfall-runoff in plain areas with dense river networks: a case study in the Western Bank of Wangyu River, Taihu Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(2): 439–448.
- [23] 胡明, 刘心远, 严玉林, 等. 不同入河排水口降雨径流污染特征识别 [J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(1): 164–173.
Hu M, Liu X Y, Yan Y L, *et al.* Recognition of rainfall runoff pollution characteristics of different river drainage outlets [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(1): 164–173.
- [24] Gong P, Li X C, Zhang W. 40-Year (1978–2017) human settlement changes in China reflected by impervious surfaces from satellite remote sensing [J]. *Science Bulletin*, 2019, **64**(11): 756–763.
- [25] 王飞, 陈安磊, 彭英湘, 等. 不同土地利用方式对红壤坡地水土流失的影响 [J]. *水土保持学报*, 2013, **27**(1): 22–26.
Wang F, Chen A L, Peng Y X, *et al.* Effects of red soil slope field under different land-use patterns on surface runoff and soil erosion [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, **27**(1): 22–26.
- [26] 聂泽宇, 梁新强, 邢波, 等. 基于氮磷比解析太湖湖溪水体营养现状及应对策略 [J]. *生态学报*, 2012, **32**(1): 48–55.
Nie Z Y, Liang X Q, Xing B, *et al.* The current water trophic status in Tiaoxi River of Taihu Lake watershed and corresponding coping strategy based on N/P ratio analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(1): 48–55.
- [27] 王康, 冉宁, 张仁铎, 等. 流域面源污染负荷差异性及其不确定性的尺度特性分析 [J]. *农业工程学报*, 2017, **33**(11): 211–218.
Wang K, Ran N, Zhang R D, *et al.* Analysis on characterization of heterogeneities and uncertainty for non-point source pollution loads at different basin scales [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, **33**(11): 211–218.
- [28] 李家科, 彭凯, 郝改瑞, 等. 黄河流域非点源污染负荷定量化与控制研究进展 [J]. *水资源保护*, 2021, **37**(1): 90–102.
Li J K, Peng K, Hao G R, *et al.* Research progress on quantification and control of non-point source pollution load in the Yellow River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2021, **37**(1): 90–102.
- [29] Liao Y J, Zhao H T, Jiang Z H, *et al.* Identifying the risk of urban nonpoint source pollution using an index model based on impervious-pervious spatial pattern [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **288**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125619.
- [30] 刘永, 蒋青松, 梁中耀, 等. 湖泊富营养化响应与流域优化调控决策的模型研究进展 [J]. *湖泊科学*, 2021, **33**(1): 49–63.
Liu Y, Jiang Q S, Liang Z Y, *et al.* Lake eutrophication responses modeling and watershed management optimization algorithm: a review [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(1): 49–63.
- [31] 吴汉卿, 万炜, 单艳军, 等. 基于磷指数模型的海河流域农田磷流失环境风险评价 [J]. *农业工程学报*, 2020, **36**(14): 17–27.
Wu H Q, Wan W, Shan Y J, *et al.* Environmental risk assessment of phosphorus loss from farmland based on phosphorus

- index model in the Haihe River Basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, **36**(14): 17-27.
- [32] 李晓虹, 雷秋良, 周脚根, 等. 降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5375-5383. Li X H, Lei Q L, Zhou J G, *et al.* Effect of rainfall intensity on the content of nitrogen and phosphorus components in plateau areas: a case study of the Fengyu River watershed [J]. Environmental Science, 2019, **40**(12): 5375-5383.
- [33] 俞映惊, 杨林章, 李红娜, 等. 种植业面源污染防治技术发展历程分析及趋势预测[J]. 环境科学, 2020, **41**(8): 3870-3878. Yu Y L, Yang L Z, Li H N, *et al.* Situation analysis and trend prediction of the prevention and control technologies for planting non-point source pollution [J]. Environmental Science, 2020, **41**(8): 3870-3878.
- [34] 李华斌, 梁海兵, 李健, 等. 农业面源污染全过程防治策略初探[J]. 中国农村水利水电, 2014, (1): 81-85. Li H B, Liang H B, Li J, *et al.* Research on all-process control strategy for agricultural non-point pollution [J]. China Rural Water and Hydropower, 2014, (1): 81-85.
- [35] 彭世彰, 熊玉江, 罗玉峰, 等. 稻田与沟塘湿地协同原位削减排水中氮磷的效果[J]. 水利学报, 2013, **44**(6): 657-663. Peng S Z, Xiong Y J, Luo Y F, *et al.* The effect of paddy eco-ditch and wetland system on nitrogen and phosphorus pollutants reduction in drainage [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, **44**(6): 657-663.
- [36] 俞孔坚, 姜芊孜, 王志芳, 等. 陂塘景观研究进展与评述[J]. 地域研究与开发, 2015, **34**(3): 130-136. Yu K J, Jiang Q Z, Wang Z F, *et al.* The research progress and prospect of Bei Tang landscape [J]. Areal Research and Development, 2015, **34**(3): 130-136.
- [37] 闫人华, 高俊峰, 黄琪, 等. 太湖流域圩区水生态系统服务功能价值[J]. 生态学报, 2015, **35**(15): 5197-5206. Yan R H, Gao J F, Huang Q, *et al.* The assessment of aquatic ecosystem services for polder in Taihu Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(15): 5197-5206.
- [38] 卢虹宇, 袁兴中, 王晓锋, 等. 塘生态系统结构与功能的研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, **38**(6): 1890-1899. Lu H Y, Yuan X Z, Wang X F, *et al.* Research progress of pond ecosystem structure and function [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, **38**(6): 1890-1899.
- [39] Chen W J, He B, Nover D, *et al.* Farm ponds in southern China: challenges and solutions for conserving a neglected wetland ecosystem [J]. Science of the Total Environment, 2019, **659**: 1322-1334.
- [40] Oertli B, Parris K M. Review: toward management of urban ponds for freshwater biodiversity [J]. Ecosphere, 2019, **10**(7), doi: 10.1002/ecs2.2810.
- [41] 王毅力, 王淑君, 李俊仪. 一种削减农田径流冲击和面源污染的改良生态田埂的构建方法 [P]. 中国专利: CN201911407071.2, 2020-05-05.
- [42] 刘福兴, 陈桂发, 付子斌, 等. 不同构造生态沟渠的农田面源污染物处理能力及其实际应用效果[J]. 生态与农村环境学报, 2019, **35**(6): 787-794. Liu F X, Chen G F, Fu Z S, *et al.* Comparison on effects of practical application of ecological ditches with different construction in treating agricultural non-point pollutants [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, **35**(6): 787-794.
- [43] 李莹莹, 尤罗利, 陈永生, 等. 环巢湖地区多水塘景观时空格局演变特征及其驱动因素[J]. 生态学报, 2018, **38**(17): 6280-6291. Li Y Y, You L L, Chen Y S, *et al.* Spatial-temporal characteristics of multi-pond landscape change and their driving factors in the Chaohu Basin, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(17): 6280-6291.