

# 皖西大别山典型土地利用类型坡面 产流产沙与氮磷流失特征

张艺<sup>1</sup>, 田昌园<sup>1</sup>, 汪文<sup>2</sup>, 李嘉宁<sup>1</sup>, 汪军红<sup>2</sup>, 张晓霞<sup>3</sup>, 查同刚<sup>1</sup>

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.安徽省 霍山县水务局,  
安徽 六安 237200; 3.中国建筑一局集团 第三建筑有限公司, 北京 100161)

**摘要:** [目的] 探究不同坡度和不同土地利用类型条件下, 径流冲刷对坡面产流产沙和氮磷流失的影响, 以为皖西大别山的水土流失治理提供理论支撑。[方法] 选取皖西大别山区的安徽省霍山县江子河小流域典型土地利用类型(裸地、草地、茶园、林地和竹林)的 15° 和 20° 坡面进行野外原位放水冲刷试验, 基于该区域多暴雨的特点, 设置冲刷流量为 9 L/min, 以探究坡面产流产沙和养分流失对土地利用类型和坡度的响应。[结果] ①在放水冲刷过程中, 15° 坡面产流稳定时, 平均产流率表现为: 裸地 > 茶园 > 草地 > 林地 > 竹林, 20° 坡面产沙率表现为: 裸地 > 草地 > 茶园 > 林地 > 竹林; 相较于 15°, 在 20° 坡面除裸地产流率有明显增加以外, 其余土地利用类型坡面变化不明显; 当坡面产沙稳定时, 20° 坡面产沙率略高于 15° 坡面, 且均表现为: 裸地 > 茶园 > 草地 > 竹林 > 林地; ②20° 坡面的 TN, TP 流失量相较于 15° 坡面流失量略有增加, 在同一坡度条件下, TN, TP 流失规律为: 茶园 > 裸地 > 竹林 > 草地 > 林地。③整个冲刷过程中, 径流对全氮贡献率较高, 泥沙对全磷的贡献率相对较高。[结论] 在皖西大别山区扩大竹林面积能有效提升水源涵养和水土保持功能, 在面源污染防治中, 应对茶园进行重点管理, 以减少氮磷等养分的流失。

**关键词:** 皖西大别山; 冲刷试验; 坡面产流产沙; 养分流失

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0062-09

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 张艺, 田昌园, 汪文, 等. 皖西大别山典型土地利用类型坡面产流产沙与氮磷流失特征[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 62-70. Zhang Yi, Tian Changyuan, Wang Wen, et al. Characteristics of runoff and sediment yield, and nitrogen and phosphorus loss on slopes undergoing typical land-use in Dabie Mountain of western Anhui Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 62-70. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.015; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.015.

## Characteristics of runoff and sediment yield, and nitrogen and phosphorus loss on slopes undergoing typical land-use in Dabie Mountain of western Anhui Province

Zhang Yi<sup>1</sup>, Tian Changyuan<sup>1</sup>, Wang Wen<sup>2</sup>, Li Jianing<sup>1</sup>, Wang Junhong<sup>2</sup>, Zhang Xiaoxia<sup>3</sup>, Zha Tonggang<sup>1</sup>

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing

100083, China; 2.Huoshan County Water Affairs Bureau, Lu'an, Anhui 237200, China;

3.The Third Construction Co., Ltd. of China Construction First Group, Beijing 100161, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of runoff scouring under different slope gradients and land use types on slope runoff, sediment yield, and nitrogen (N) and phosphorus (P) losses were analyzed, in order to provide theoretical support for soil and water conservation in Dabie Mountain region of western Anhui Province, China. [Methods] Field in situ scouring experiments were conducted on 15° and 20° slopes undergoing typical land-use types (bare land, grassland, tea garden, forest land and bamboo forest) in the Jiangzihe small watershed, Huoshan County, Anhui Province. Considering the frequent heavy rainfall in the region, a scouring flow rate of 9 L/min was applied to analyze the responses of runoff, sediment yield and nutrient losses to land-use types and slope gradients. [Results] ① During the scouring process, the stabilized average runoff rate on the 15° slopes was in the following

收稿日期: 2025-01-05

修回日期: 2025-03-31

采用日期: 2025-03-31

资助项目: 国家重点研发计划项目“基于物质流分析的小流域多要素空间格局优化技术”(2022YFF130300204)

第一作者: 张艺(2000—), 女(汉族), 山东省泰安市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤退化与生态修复。Email: Ariyyz@163.com。

通信作者: 查同刚(1972—), 男(汉族), 安徽省六安市人, 博士, 教授, 主要从事土壤退化与生态修复方向研究。Email: zhtg73@bjfu.edu.cn。

order: bare land > tea garden > grassland > forest land > bamboo forest, whereas the sediment yield rate on the 20° slopes were ranked as follows: bare land > grassland > tea garden > forest land > bamboo forest. Compared to the 15° slopes, the runoff rate on the 20° slopes increased significantly only for bare land, with negligible changes in other land-use types. At a stabilized sediment yield, the sediment yield rate of the 20° slopes was slightly higher than that of the 15° slopes, with both exhibiting the following order: bare land > tea garden > grassland > bamboo forest > forest land. ② Total N (TN) and total P (TP) losses on the 20° slopes were marginally higher than those on the 15° slopes. Under the same slope gradient, TN and TP losses showed the following pattern: tea garden > bare land > bamboo forest > grassland > forest land. ③ Throughout the scouring process, runoff predominantly contributed to TN loss, whereas sediment played a more significant role in TP loss. [Conclusion] Expanding area of bamboo forest cover in the Dabie Mountains of western Anhui Province can effectively enhance water conservation and soil retention. Additionally, tea gardens should be prioritized for non-point source pollution management to mitigate the losses of nutrients, such as N and P.

**Keywords: Dabie Mountain; western Anhui Province; scouring test; slope runoff; sediment yield; nutrient loss**

水土流失是指土壤及其地表物质在降雨、冻融、风力等外营力作用下,发生位移与再分配的过程<sup>[1]</sup>。水土流失过程不仅造成水土资源损失,内含于其中的营养物质也随之发生流动,从而成为面源污染的主要来源<sup>[2-3]</sup>,严重威胁着流域生态安全和水源质量。坡面是水土流失发生的基本单元<sup>[4]</sup>,探究坡面水土流失过程及其机制对于水土保持和面源污染防控工作具有重要意义。

坡面径流与泥沙在相互作用中加剧了土壤侵蚀的强度<sup>[5-6]</sup>,厘清其作用特征与机制是防治坡面水土流失的重要依据。基于此,许多学者针对坡面水沙以及养分输移过程特征及其影响因素进行了广泛研究。在研究方法上面,主要使用野外人工降雨<sup>[7]</sup>、室内人工降雨<sup>[8]</sup>以及野外冲刷试验等<sup>[9]</sup>方法。在影响因素研究中,集中于地形特征<sup>[10]</sup>、地表覆盖以及土地利用特征等<sup>[11]</sup>方面。在地形特征方面,影响坡面水沙输移过程的主要因素为坡度、坡长和地面起伏情况等;也有研究表明,地表枯落物、植被配置和分布格局<sup>[11]</sup>会通过截流、增加入渗等方式影响输移过程;此外,有学者的研究表明,不同土地利用类型的水土流失与养分流失存在显著差异<sup>[12-13]</sup>,土地利用方式的改变会通过影响土壤性质以及地表覆盖对坡面水分的入渗和截流特征进而影响着坡面物质流过程<sup>[14]</sup>。张华渝等<sup>[15]</sup>研究表明,林地的土壤抗蚀性能要优于耕地和裸地。因此,探究不同土地利用方式的土壤侵蚀与养分流失特征对于理解坡面土壤侵蚀和防治有着重要意义。

皖西大别山是长江流域和淮河流域的重要分水岭,该区域由于地形起伏大、土层薄、降雨集中且多暴雨等特点,水土流失严重,不仅导致水土资源的流失,也造成了较为严重的面源污染。目前,针对大别山的水土保持研究多集中于土壤侵蚀的空间评估及其驱动因素<sup>[16]</sup>、坡面产流产沙规律<sup>[17-18]</sup>和水保措施效

益评价等<sup>[19]</sup>方面,且研究对象主要针对于林地和农地,较少关注该区域多种土地利用类型。此外,关于坡面养分流失的研究也较少。基于此,本研究通过野外冲刷试验,探究大别山区多个典型土地利用类型坡面在径流冲刷过程中的水沙输移过程以及养分流失特征,旨在揭示土地利用异质性对坡面物质输移的调控机制,从而为该区域坡面水土流失治理和生态环境改善提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

野外冲刷试验地点位于皖西大别山区安徽省霍山县江子河小流域,地理坐标为31°08′31″N, 115°59′32″E。该区域属于淮河流域淠河水系,面积9.25 km<sup>2</sup>,相对高差810 m,平均海拔775 m,沟谷密度663 m/km<sup>2</sup>,属于亚热带与温带的过渡区,年均气温15℃,平均无霜期240 d。年均降水量1 423.3 mm,降水充沛且多暴雨,水土流失情况严重。该区域土壤以黄棕壤为主,主要土地利用类型为林地、耕地、草地、竹林和园地,其中乔木种类主要有松林、杉木,园地多种植茶树、桑树等经济作物,是皖西大别山区用地特征典型代表地区。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 径流小区布设

依据研究区典型土地利用坡面实际情况与前期调查,选取草地、竹林、林地、茶园为试验样地,裸地为对照样地,选择15°和20° 2个坡度进行试验,并设置径流小区规格为6 m×1 m,共设置10个试验小区。小区周围使用彩钢瓦围挡,上方设置储水桶、可调节流量阀门、稳流板,下部设置锥形集流出水口,出水口下部放置集流桶(图1)。试验开始前,对不同土地利用类型进行坡面低干扰整理,尽量保持坡面平整

且对照组一致,并对坡面土壤进行均匀洒水,直至坡面即将产流为止,待稳定 24 h 后开始试验,各小区基本特征如表 1 所示。

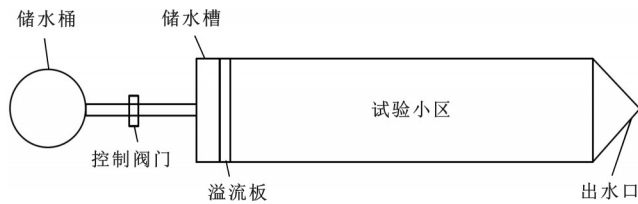


图 1 冲刷试验小区布设示意图

Fig.1 Scouring test plot layout diagram

### 1.2.2 冲刷过程与采样

试验于 2023 年 8 月在霍山县江子河小流域进行。结合研究区多暴雨的降雨特点,设置冲刷流量为 9 L/min。试验开始前,首先调节水泵对放水流量

进行控制,待出水量均匀并达到设置冲刷流量后开始试验。自稳流板开始稳定出水后,使用秒表记录出水口的初始产流时间,试验过程中控制流量误差在 ±5% 以内。产流开始后重新开始计时,产流最初 6 min,每间隔 1.5 min 使用取样器收集 30 s 径流泥沙样品,产流 6 min 以后,每隔 2.5 min 收集 30 s 样品,30 min 后停止放水并记录径流结束时间。每次试验进行 3 次重复。径流泥沙样品采集后立即置于低温冷藏箱中保存,并及时送至实验室测试。

### 1.3 样品测试

径流量与泥沙量的测定采用天平称量与烘干法;泥沙样品全氮、全磷采用  $H_2SO_4-H_2O_2$  消解进行前处理后,使用 Smartchem 450 全自动化学分析仪测定<sup>[20]</sup>;水样中总氮含量采用碱性过硫酸钾消解/紫外分光光度法测定<sup>[21]</sup>,总磷采用钼酸铵分光光度法测定<sup>[22]</sup>。

表 1 供试小区本底特征

Table 1 Background characteristics of test plots

土地利用类型	坡度	土壤性质				主要植物
		容重/( $g \cdot cm^{-3}$ )	前期含水量/%	全氮/( $g \cdot kg^{-1}$ )	全磷/( $g \cdot kg^{-1}$ )	
裸地	15°	1.52	8.83	3.90	1.78	
	20°	1.55	9.98	3.84	1.81	
草地	15°	1.27	27.64	2.98	0.56	小飞蓬白、茅草
	20°	1.28	27.45	2.46	0.58	
竹林	15°	1.34	12.45	0.94	0.42	竹子
	20°	1.32	13.01	1.03	0.36	
林地	15°	1.32	13.06	1.35	0.18	马尾松、杉木
	20°	1.35	13.43	1.29	0.19	
茶园	15°	1.23	12.82	4.01	2.76	茶树
	20°	1.29	11.34	4.22	2.25	

## 1.4 数据计算

### 1.4.1 产流产沙率计算

产流率计算公式为

$$Q_i = \frac{(M_i - m_i)}{1000\rho AT} \quad (1)$$

式中: $Q_i$ 为第  $i$  次取样时坡面单位时间单位面积上的产流量,即产流率 [ $L/(\min \cdot m^2)$ ];  $M_i$  为第  $i$  次取样中径流泥沙混合物的总质量( $g$ );  $m_i$  为第  $i$  次取样中烘干泥沙质量( $g$ );  $\rho$  为水的密度,取  $1 g/cm^3$ ;  $A$  为冲刷小区面积( $m^2$ );  $T$  为样品收集时间( $min$ )。

产沙率计算公式为

$$S_i = \frac{m_i}{AT} \quad (2)$$

式中: $S_i$ 为第  $i$  次取样时坡面单位时间单位面积上的产沙量,即产沙率 [ $g/(\min \cdot m^2)$ ];  $m_i$  为第  $i$  次取样中烘干泥沙质量( $g$ );  $A$  为冲刷小区面积( $m^2$ );  $T$  为样

品收集时间( $min$ )。

### 1.4.2 氮、磷流失率计算

氮、磷流失率计算公式为

$$L_i = \frac{Cq_i + Cs_i}{AT} \quad (3)$$

式中: $L_i$ 为第  $i$  次取样时坡面单位时间单位面积上的氮、磷流失量,即氮、磷流失率 [ $mg/(\min \cdot m^2)$ ];  $Cq_i$  为第  $i$  次取样时径流样品中氮、磷质量( $mg$ );  $Cs_i$  为第  $i$  次取样时泥沙样品中氮、磷质量( $mg$ );  $A$  为冲刷小区面积( $m^2$ );  $T$  为样品收集时间( $min$ )。

## 1.5 数据处理与统计分析

使用 SPSS 27 软件进行数据处理与计算分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)对不同土地利用类型产流产沙和氮、磷流失的差异进行分析,显著性区间定义为 95%。使用 Origin 2022 进行图件绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 冲刷过程坡面产流产沙特征

#### 2.1.1 坡面产流特征

当坡面坡度均为15°,不同土地利用类型的产流率趋势均为先迅速增加,再趋于平稳,且同一坡度不同土地利用类型的坡面产流率均有差异(图2)。在产流历时13.5 min之前,竹林产流率较低,其余各土地利用类型差异较小,在13.5 min之后,均趋于稳定,且

平稳后的平均产流率表现为:裸地>茶园>草地>林地>竹林,裸地产流率最高可达0.83 L/(min·m<sup>2</sup>)。当坡面坡度均为20°,不同土地利用类型的坡面产流率皆呈缓慢上升趋势,坡面稳定产流率表现为:裸地>草地>茶园>林地>竹林。坡度为20°时,坡面产流率总体较坡度为15°时产流率大。从表2可以看出,草地、竹林、林地和茶园产流稳定时均与裸地有显著差异( $p<0.01$ ),茶园和草地之间没有显著差异,但与林地和竹林差异显著( $p<0.01$ )。

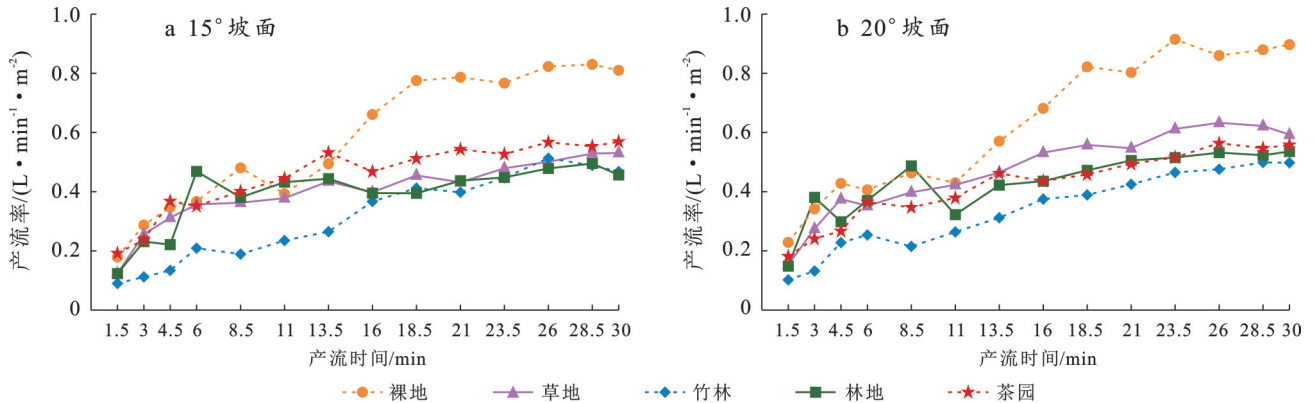


图2 不同坡度坡面冲刷过程中产流率的变化

Fig.2 Change of runoff rate during scouring process on different slopes

表2 不同土地利用类型坡面产流产沙差异

Table 2 Differences in runoff and sediment yield of slopes with different land use types

土地利用类型	15°产流率/ (L·min <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> )	20°产流率/ (L·min <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> )	15°产沙率/ (g·min <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> )	20°产沙率/ (g·min <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> )
裸地	0.80±0.03 <sup>a</sup>	0.86±0.04 <sup>a</sup>	6.24±0.10 <sup>a</sup>	7.15±0.35 <sup>a</sup>
草地	0.49±0.04 <sup>b</sup>	0.59±0.04 <sup>b</sup>	0.63±0.05 <sup>b</sup>	0.75±0.18 <sup>b</sup>
竹林	0.45±0.04 <sup>c</sup>	0.46±0.04 <sup>c</sup>	0.05±0.01 <sup>c</sup>	0.05±0.01 <sup>c</sup>
林地	0.45±0.04 <sup>c</sup>	0.51±0.02 <sup>c</sup>	0.05±0.01 <sup>c</sup>	0.05±0.01 <sup>c</sup>
茶园	0.55±0.02 <sup>b</sup>	0.52±0.04 <sup>b</sup>	0.65±0.11 <sup>b</sup>	0.89±0.08 <sup>b</sup>

注:表中数据为平均值±标准差;数据后同列不同小写字母表示差异显著( $p<0.05$ )。

#### 2.1.2 坡面产沙特征

在不同坡度不同土地利用类型下坡面产沙率随时间的变化规律如图3所示。可以看出,在15°坡面,不同土地利用类型中,裸地坡面的产沙率最大,远高于草地、茶园、竹林和林地,且呈波动上升趋势,产沙率2.16~6.19 g/(min·m<sup>2</sup>),在18.5 min后产沙率趋于稳定;草地与茶园产沙率,皆呈稳定上升状态,在23.5 min后达到相对稳定;竹林与林地产沙率较小,在0.5 g/(min·m<sup>2</sup>)以下,且变化趋势不明显。坡面稳定产沙率在不同土地利用类型下表现为:裸地>茶园>草地>竹林>林地。在20°坡面中,裸地产沙率较15°坡面略有升高,且远高于其他土地利用类型;草地和茶园产沙率小范围增加;不同坡度下竹林与林地的产沙率没有明显差异。坡面稳定产沙率在不

同土地利用类型下表现为:裸地>茶园>草地>竹林>林地。从表2可知,草地、竹林、林地和茶园沙稳定时均与裸地有显著差异( $p<0.05$ ),林地和竹林产沙率显著低于茶园和草地( $p<0.05$ )。可以看出,竹林和林地的水土保持效果较好。

### 2.2 坡面氮、磷流失特征

同一坡度下,不同土地利用类型的氮、磷流失情况如图4所示。15°坡面中,茶园的全氮流失情况最为严重,裸地、草地、林地和竹林的全氮流失率呈现稳定下降趋势,表现为:茶园>裸地>竹林>草地>林地。茶园全磷流失率最高,呈波动下降趋势,其次为裸地全磷流失率,整体呈下降趋势,在6 min后较为稳定;竹林、草地和林地的全磷流失率变化趋势较小,由此可见,草地、林地和竹林土壤养分保持情况较好。

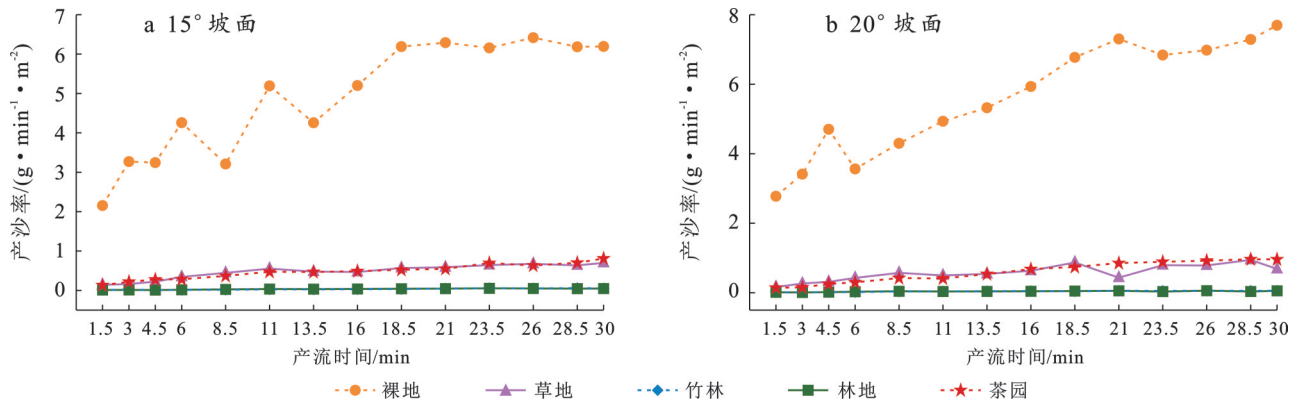


图3 不同土地利用类型坡面冲刷过程中产沙率变化

Fig.3 Changes of sediment yield rate during scouring process of slopes with different land use types

在20°坡面中,茶园的全氮流失率最大,流失率下降趋势明显,其次是裸地和竹林,全氮流失率处于稳定下降状态,林地和草地全氮流失率趋势较为平稳,平均流失率表现为:茶园>裸地>竹林>草地>林地。相对于15°坡面,20°坡面整体的全氮流失率较大,变化趋势更明显。在20°坡面的全磷流失率中,茶园的流失率最大,流失最为严重,呈波动下降趋势,

其次是裸地全磷流失率,呈现出稳定下降后再上升的趋势,草地、竹林和林地的全磷流失率较小,而且变化趋势不明显。

对比15°坡面,20°坡面的全磷流失率整体更高。由表3可知,草地、林地和竹林之间的全氮流失率差异不显著( $p>0.05$ ),而茶园的全氮和全磷流失率均显著高于其他土地利用类型( $p<0.05$ )。

表3 不同土地利用类型坡面氮、磷流失差异

Table 3 Difference of nitrogen and phosphorus loss of slopes with different land use types

土地利用类型	15°全氮流失率/ ( $\text{mg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )	20°全氮流失率/ ( $\text{mg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )	15°全磷流失率/ ( $\text{mg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )	20°全磷流失率/ ( $\text{mg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )
裸地	0.244 7±0.032 0 <sup>a</sup>	0.249 9±0.041 9 <sup>a</sup>	0.004 8±0.003 5 <sup>a</sup>	0.007 3±0.002 6 <sup>a</sup>
草地	0.105 0±0.023 5 <sup>b</sup>	0.100 6±0.024 2 <sup>b</sup>	0.000 7±0.000 5 <sup>a</sup>	0.001 0±0.000 4 <sup>a</sup>
竹林	0.155 2±0.053 7 <sup>b</sup>	0.189 4±0.062 2 <sup>b</sup>	0.000 8±0.000 5 <sup>a</sup>	0.000 8±0.000 3 <sup>a</sup>
林地	0.114 4±0.037 3 <sup>b</sup>	0.080 3±0.016 2 <sup>b</sup>	0.000 8±0.001 0 <sup>a</sup>	0.000 7±0.000 6 <sup>a</sup>
茶园	0.653 2±0.076 8 <sup>c</sup>	0.496 7±0.118 5 <sup>c</sup>	0.031 5±0.010 9 <sup>b</sup>	0.034 2±0.016 5 <sup>b</sup>

注:表中数据为平均值±标准差;数据后同列不同小写字母表示差异显著( $p<0.05$ )。

图5表示整个冲刷过程中不同土地利用类型的全氮和全磷流失量以及径流和泥沙对全氮全磷的贡献。可以看出,在15°和20°坡面中,全氮的总流失量均表现为:茶园>裸地>竹地>林地>草地,其中径流对全氮的贡献率高于泥沙的贡献;15°坡面中,全磷的总流失量表现为茶园>裸地>林地>竹林>草地,20°坡面中,全磷的总流失量表现为:茶园>裸地>草地>林地>竹林,泥沙对全磷的贡献率较高。

### 3 讨论

#### 3.1 坡面产流产沙对坡度的响应

在本研究中,20°坡面的各个土地利用类型的产流率均大于15°坡面,这与陈诚等<sup>[23]</sup>的研究结果相似,可能是由于随着坡度的增加,径流重力在水流方向

上的分力增大,从而使得地表物质对径流的拦截阻力下降,导致径流速度加快,水分下渗减少。有研究表明,在一定坡度内坡面产沙率会随着坡度增加而增大<sup>[24]</sup>,这可能与土壤的抗冲性有关。许航等<sup>[25]</sup>研究表明,坡度对土壤抗冲性有较大影响,地形坡度增大,径流流速增快,径流对土壤的机械破坏和搬运能力增强,从而在重力作用下,土体颗粒沿坡面向下运动的趋势随坡度增加而增强。但在本研究中,当坡度由15°提升至20°时,除裸地外,其余土地利用类型坡面产沙率变化不明显,这可能是由于在本研究区内,草地、林地、竹林和草地地表覆盖程度较高,地表物质对土壤的固持能力较强所致。

#### 3.2 坡面产流产沙对不同土地利用类型的响应

本研究表明,同坡度的不同土地利用类型坡面产流和产沙率有明显差异,产流和产沙稳定时均表

现为裸地>茶园>草地>林地>竹林,这与朱方方等<sup>[26]</sup>、张晓艳等<sup>[1]</sup>研究结果相似。可能是由于不同土

地利用类型对地表土壤和物质影响存在差异造成的。

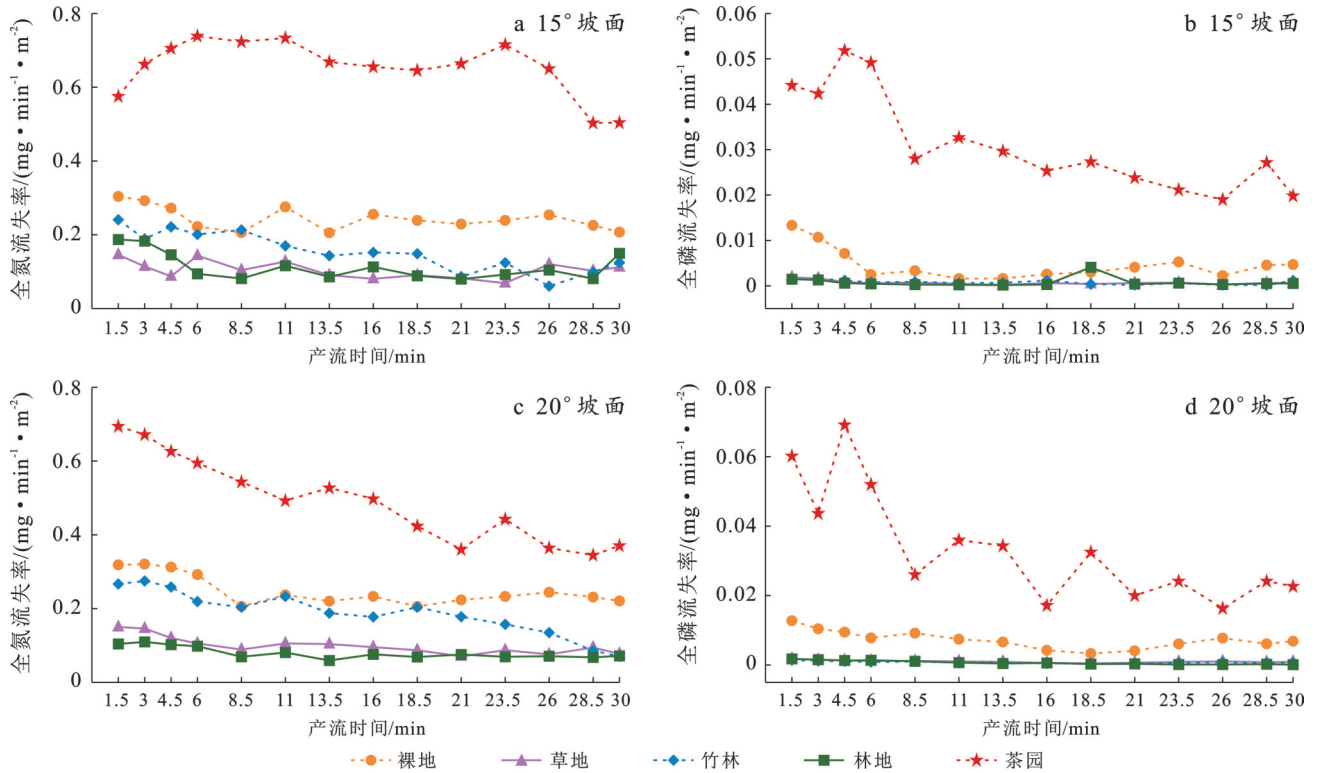


图4 不同土地利用类型坡面冲刷过程中全氮、全磷流失率变化

Fig.4 Changes of total nitrogen and total phosphorus loss rate during scouring process of slopes with different land use types

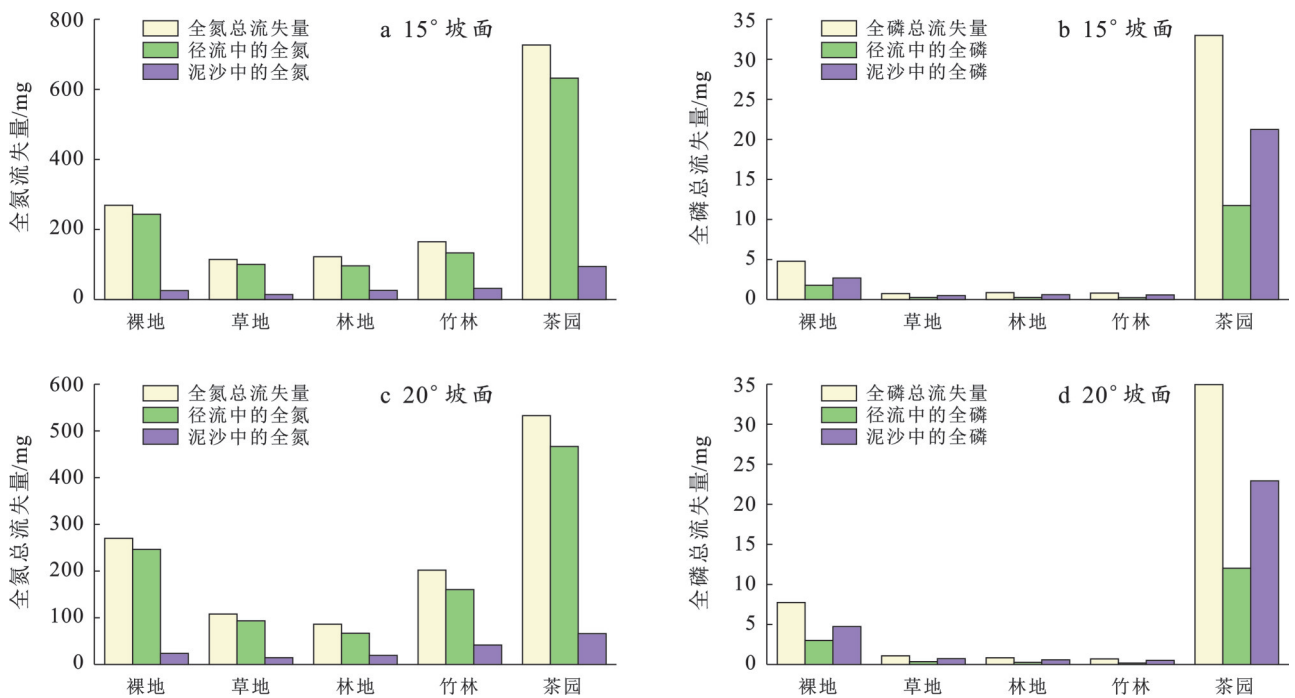


图5 不同土地利用类型坡面冲刷过程泥沙径流全氮和全磷贡献

Fig.5 Contribution of total nitrogen and total phosphorus in sediment runoff during scouring process of slopes with different land use types

有研究表明,土地利用类型的不同导致了土壤特性、植被根系和地表覆盖产生差异,这些因素综合

影响了土壤的抗冲性。张素等<sup>[27]</sup>研究表明,不同的地表覆盖物(如枯枝落叶)通过抵挡径流冲刷,使得

土壤抗冲性在同一土地利用类型出现相差几倍、几十倍的情况。植物根系通过对土壤的穿插、缠绕、固结、错固等物理性作用以及通过分泌化学物质来改善土壤的团粒结构,增强土壤抗剪强度以及黏聚力,从而提升土壤的抗冲性<sup>[6-7]</sup>。对比之下,裸地坡面由于植被稀少,其地表覆盖物和植被根系量均弱于其他坡面,水流冲刷下渗相对较小,产生径流的速度快。林地和竹林坡面枯枝落叶覆盖度较高,且根系发达,使得其地表有较强的蓄水和阻挡泥沙运移作用。在本研究的冲刷试验中,竹林坡面的产流率和产沙率最小,主要是因为竹林根系较为发达,且细根多,使得土壤下渗能力更强导致的。因此,在皖西大别山区,增加竹林面积可有效提升该区域水源涵养和土壤保持能力。此外,有研究表明,前期含水量也会显著影响坡地水分入渗过程<sup>[28]</sup>,前期含水量的增大会促进坡地的产流和产沙。在本研究中,不同土地利用类型间的前期含水量有明显差异(表1),但产流产沙规律却未体现出前期含水量的影响,这说明土地利用类型的差异对产流产沙的影响作用更强。

### 3.3 坡面氮、磷流失对坡度和土地利用类型的响应

地表径流和侵蚀泥沙是坡面养分流失的主要载体,坡面养分流失过程是表层土壤养分与径流、泥沙相互作用的过程,土壤养分流失量主要受两个方面的影响,一是径流量,二是径流中养分浓度<sup>[29]</sup>。在本研究中,坡度对土壤N、P流失的影响主要体现在地表径流量和流速上。20°坡面的各个土地利用类型的氮、磷流失率较15°坡面流失率分别平均增加了12%和33%,这与甘贤民等的研究结果类似<sup>[30]</sup>。坡度的增大导致了坡面径流量和流速增大,从而增大了TN和TP的流失量。本研究得出,同坡度不同土地利用类型的氮、磷流失情况不同,表现为茶园径流的氮、磷流失率较高,但草地、林地和竹林坡面流失率较小且差异较为微弱,这与前人的研究结果类似<sup>[30-31]</sup>。这可能是由于茶园的施肥和喷洒农药等管理方式所致。草地、林地和竹林覆盖度较高,在一定程度上减轻了土壤侵蚀,导致径流量与侵蚀泥沙量减少,使径流和泥沙携带的氮、磷流失率减少,所以水土流失程度较低,养分保持效果好。因此,在此区域应注重对茶园径流和泥沙的调控管理,以减少区域面源污染。

## 4 结论

(1)冲刷过程中,15°坡面产流稳定时平均产流率表现为:裸地>茶园>草地>林地>竹林,20°坡面

产沙率表现为:裸地>草地>茶园>林地>竹林;相较于15°,20°坡面除裸地产流率有明显增加以外,其余土地利用类型坡面变化不明显;当坡面产沙稳定时,20°坡面产沙率略高于15°坡面,且均表现为:裸地>茶园>草地>竹林>林地。

(2)20°坡面的TN和TP流失量相较于15°坡面略有增加,在同一坡度不同土地利用类型的TN和TP流失规律为:茶园>裸地>竹林>草地>林地。

(3)整个冲刷过程中,全氮的总流失量表现出:茶园>裸地>竹地>林地>草地的特征,径流对全氮的贡献率高于泥沙的贡献;15°坡面中,全磷的总流失量表现出:茶园>裸地>林地>竹林>草地,20°坡面中,全磷的总流失量表现出:茶园>裸地>草地>林地>竹林的特征,泥沙对全磷的贡献率相对较高。因此,建议在皖西大别山区扩大竹林面积,以提升水源涵养和水土保持功能,在面源污染防治中,应对茶园进行重点管理,以减少氮磷等养分的流失。

### 参考文献(References)

- [1] 张晓艳,李琴书.不同土地利用方式对土壤侵蚀及养分流失的影响[J].水土保持研究,2018,25(5):12-17.  
Zhang Xiaoyan, Li Qinshu. Effects of land use types on soil erosion and soil nutrient losses in purple soil [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(5): 12-17.
- [2] 陈正发,龚爱民,宁东卫,等.基于RUSLE模型的云南省土壤侵蚀和养分流失特征分析[J].水土保持学报,2021,35(6):7-14.  
Chen Zhengfa, Gong Aimin, Ning Dongwei, et al. Characteristics of soil erosion and nutrient loss in Yunnan Province based on RUSLE model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 7-14.
- [3] 邓越,唐代生,李裕元,等.亚热带典型农林混合流域河岸带景观格局对河流磷输出的影响[J].水土保持学报,2022,36(3):64-70.  
Deng Yue, Tang Daisheng, Li Yuyuan, et al. Influences of riparian landscape pattern on river phosphorus output in typical subtropical agroforestry mixed watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 64-70.
- [4] 张洋.东柳沟流域风力-水力侵蚀动力过程试验研究[D].陕西西安:西安理工大学,2018.  
Zhang Yang. Experimental study on dynamic process of wind-water erosion in Dongliu valley [D]. Xi'an, Shaanxi: Xi'an University of Technology, 2018.
- [5] Knapen A, Poesen J, Govers G, et al. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review [J]. Earth-Science Reviews, 2007, 80(1/2): 75-109.

- [6] 罗榕婷,张光辉,曹颖.坡面含沙水流水动力学特性研究进展[J].地理科学进展,2009,28(4):567-574.  
Luo Rongting, Zhang Guanghui, Cao Ying. Progress in the research of hydrodynamic characteristics of sediment-laden overland flow [J]. Progress in Geography, 2009, 28(4):567-574.
- [7] 何玉广,信忠保,余新晓,等.模拟降雨条件下侧柏林地枯落物对坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):27-32.  
He Yuguang, Xin Zhongbao, Yu Xinxiao, et al. Influence of litter layer of platycladus orientalis forests on runoff and sediment yield of the slope under simulated rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3):27-32.
- [8] 孙若修,申明爽,胡亚伟,等.模拟降雨下坡面草带分布对产流产沙过程的影响[J].水土保持学报,2022,36(4):22-29.  
Sun Ruoxiu, Shen Mingshuang, Hu Yawei, et al. Effect of grass belt distribution on runoff and sediment yield under simulated rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4):22-29.
- [9] 张馨予,张晓霞,王冬,等.土壤结皮对乌拉山矿山废弃地客土坡面侵蚀特征的影响[J].水土保持学报,2023,37(5):24-30.  
Zhang Xinyu, Zhang Xiaoxia, Wang Dong, et al. Effects of soil crusts on erosion characteristics of alien soil slope in mining wasteland of Wula Mountain [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5):24-30.
- [10] 王丽,王力,王全九.不同坡度坡耕地土壤氮磷的流失与迁移过程[J].水土保持学报,2015,29(2):69-75.  
Wang Li, Wang Li, Wang Quanjiu. The processes of nitrogen and phosphorus loss and migration in slope cropland under different slopes [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(2):69-75.
- [11] 杨春霞,姚文艺,肖培青,等.植被覆盖结构对坡面产流产沙的影响及调控机制分析[J].水利学报,2019,50(9):1078-1085.  
Yang Chunxia, Yao Wenyi, Xiao Peiqing, et al. Effects of vegetation cover structure on runoff and sediment yield and its regulation mechanism [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(9):1078-1085.
- [12] Li Zhiguo, Gu Chiming, Zhang Runhua, et al. The benefic effect induced by biochar on soil erosion and nutrient loss of slopping land under natural rainfall conditions in central China [J]. Agricultural Water Management, 2017, 185:145-150.
- [13] 张彩云,蒋勇军,马丽娜,等.岩溶槽谷区不同土地利用方式下的坡地产流产沙规律[J].水土保持通报,2021,41(1):49-55.  
Zhang Caiyun, Jiang Yongjun, Ma Lina, et al. Characteristics of runoff and sediment on slope land with different land use in karst trough valley area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1):49-55.
- [14] 衣强,李越梅,闫俊飞,等.不同土地利用类型对豫西黄土丘陵区坡面产流产沙的影响[J].水土保持研究,2024,31(4):67-74.  
Yi Qiang, Li Yuemei, Yan Junfei, et al. Effects of different land uses on runoff and sediment on sloping land in loess hilly area of western Henan [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4):67-74.
- [15] 张华渝,王克勤,宋娅丽.滇中尖山河流域不同土地利用类型土壤抗蚀性[J].水土保持学报,2019,33(5):50-57.  
Zhang Huayu, Wang Keqin, Song Yali. Soil erosion resistance under different land use types in Jianshan River watershed in middle Yunnan Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5):50-57.
- [16] 黄昱楠,齐斐,袁利,等.大别山北麓林地与园地土壤侵蚀空间分异及驱动分析[J].中国水土保持科学(中英文),2025,23(1):51-61.  
Huang Yunan, Qi Fei, Yuan Li, et al. Spatial differentiation and driving factors of soil erosion in woodland and garden in the northern Dabie Mountain [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025, 23(1):51-61.
- [17] 张乃夫,桂博文,汪军红,等.霍山县江子河小流域产流产沙规律及水土保持效益分析[J].治淮,2023(12):80-82.  
Zhang Naifu, Gui Bowen, Wang Junhong, et al. Analysis on the law of miscarriage and soil and water conservation benefits of Jiangzihe small basin in Huoshan County [J]. Harnessing the Huaihe River, 2023(12):80-82.
- [18] 张嘉懿,汪军红,程先富,等.降雨对江子河小流域不同农作物措施坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2021,35(2):8-14.  
Zhang Jiayi, Wang Junhong, Cheng Xianfu, et al. Effects of rainfall on slope runoff and sediment yield under different crop measures in the Jiangzi River minor watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2):8-14.
- [19] 周杰,田培,吴宜进,等.大别山区不同水土保持措施配置模式的效益评价[J].水土保持学报,2024,38(6):61-69.  
Zhou Jie, Tian Pei, Wu Yijin, et al. Benefit evaluation of different allocation modes of soil and water conservation measures in Tapiieh Mountains area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6):61-69.
- [20] 陈剑磊,谢文霞,崔育倩,等.SmartChem140全自动化学分析仪测定土壤全氮全磷的研究[J].分析科学学报,2016,32(1):84-88.  
Chen Jianlei, Xie Wenxia, Cui Yuqian, et al. Research

- on the determination of total nitrogen and total phosphorus in soil using SmartChem140 automatic chemical analyzer [J]. *Journal of Analytical Science*, 2016, 32(1):84-88.
- [21] 贾岳清,周昊,殷惠民,等.水中总氮测定方法的研究进展[J].*工业水处理*,2020,40(2):1-5.  
Jia Yueqing, Zhou Hao, Yin Huimin, et al. Progress in determination of total nitrogen in water [J]. *Industrial Water Treatment*, 2020,40(2):1-5.
- [22] 邱诚,傅倩,景江,等.水中总磷测定方法的研究进展[J].*印染助剂*,2020,37(8):10-14.  
Qiu Cheng, Fu Qian, Jing Jiang, et al. Research progress of determination of total phosphorus in water [J]. *Textile Auxiliaries*, 2020,37(8):10-14.
- [23] 陈诚,郝治邦.模拟降雨下不同坡度土壤坡面产流产沙特征及磷和钾素流失研究[J].*水土保持研究*,2017,24(2):70-76.  
Chen Cheng, Hao Zhibang. Research on slope runoff, sediment and P and K loss characteristics on slopes with different gradients under artificial simulation of rainfall [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(2):70-76.
- [24] 丛鑫,边振,薛春珂,等.不同坡度条件下的水土流失特征研究[J].*中国农村水利水电*,2017(5):124-128.  
Cong Xin, Bian Zhen, Xue Chunke, et al. The characteristics of soil and water loss under different slope conditions [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(5):124-128.
- [25] 许航,秦岭,何淑勤,等.大渡河干旱河谷区不同土地利用方式下土壤抗冲性特征[J].*干旱区资源与环境*, 2023,37(10):102-108.  
Xu Hang, Qin Ling, He Shuqin, et al. Soil anti-scourability under different land use types in arid valley area of Dadu River [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023,37(10):102-108.
- [26] 朱方方,秦建森,朱美菲,等.模拟降雨下林下覆被结构对产流产沙过程的影响[J].*水土保持学报*,2023,37(3):10-18.  
Zhu Fangfang, Qin Jianmiao, Zhu Meifei, et al. Effect of mulch structure on runoff and sediment yield under simulation rainfall [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023,37(3):10-18.
- [27] 张素,熊东红,苏正安,等.土壤抗冲性及其影响因素研究进展[J].*世界科技研究与发展*,2014,36(6):721-725.  
Zhang Su, Xiong Donghong, Su Zheng'an, et al. Research progress of influence factors in soil anti-scourability [J]. *World Sci-tech R & D*, 2014, 36(6):721-725.
- [28] 淡彩虹,许欢欢,王兵,等.模拟降雨下前期含水量对黄绵土坡面产流产沙过程的影响[J].*水土保持学报*, 2023,37(1):31-36.  
Dan Caihong, Xu Huanhuan, Wang Bing, et al. Effect of antecedent soil moisture on runoff and sediment yield on loess slope under simulated rainfall [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023,37(1):31-36.
- [29] 马良,黄志霖,华琳.三峡库区小流域土地利用结构对土壤养分流失及水质影响[J].*水生态学杂志*,2022,43(1):1-7.  
Ma Liang, Huang Zhilin, Hua Lin. Effects of land use on soil nutrient loss and water quality in the Three Gorges reservoir area of China [J]. *Journal of Hydroecology*, 2022,43(1):1-7.
- [30] 甘贤民,严友进,戴全厚,等.降雨强度和坡度对喀斯特坡耕地产流和氮磷流失的影响[J].*环境科学学报*, 2024,44(4):116-123.  
Gan Xianmin, Yan Youjin, Dai Quanhou, et al. Impact of rainfall intensity and slope gradient on runoff and nitrogen and phosphorus loss fluxes of sloping farmland in a karst area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024,44(4):116-123.
- [31] 叶宏萌,华伟平,吴星怡,等.土地利用对红壤丘陵区小流域土壤侵蚀和养分流失的影响[J].*环境化学*,2022,41(12):4154-4164.  
Ye Hongmeng, Hua Weiping, Wu Xingyi, et al. Effect of land use on soil erosion and nutrient loss in small watershed of red hilly soil [J]. *Environmental Chemistry*, 2022,41(12):4154-4164.