

紫色土坡耕地农桑系统对土壤磷素流失的影响

杨红宾, 王胜, 殷溶, 雷平, 陈方鑫, 倪九派, 谢德体

引用本文:

杨红宾, 王胜, 殷溶, 雷平, 陈方鑫, 倪九派, 谢德体. 紫色土坡耕地农桑系统对土壤磷素流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(6): 1316–1326.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1090>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同施肥方式下洱海流域水稻-大蒜轮作体系氮磷径流损失研究

姚金玲, 张克强, 郭海刚, 王凤, 张贵龙, 任天志

农业环境科学学报. 2017, 36(11): 2287–2296 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0537>

洱海流域不同施肥模式对稻田氮磷径流流失的影响

姜海斌, 沈仕洲, 谷艳茹, 于双, 邹洪涛, ArifHusain, 张磊, 张克强

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1305–1313 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1292>

化肥减量替代对华北平原小麦-玉米轮作产量及氮流失影响

秦雪超, 潘君廷, 郭树芳, 翟丽梅, 王洪媛, 武淑霞, 刘宏斌

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1558–1567 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1364>

喀斯特地区坡面不同土地利用方式水土流失及磷素输出对次降雨特征的响应

彭宏佳, 吴起鑫, 任斐鹏, 安艳玲, 付宇文, 刘瑞禄, 吕婕梅

农业环境科学学报. 2018, 37(4): 756–765 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1486>

三峡库区不同稻田分布格局下农业小流域径流磷排放特征

罗柏林, 尚二凤, 林晓, 史书, 刘园园, 倪九派, 谢德体, 木志坚

农业环境科学学报. 2017, 36(2): 338–344 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1077>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨红宾, 王胜, 殷溶, 等. 紫色土坡耕地农桑系统对土壤磷素流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(6): 1316–1326.

YANG H B, WANG S, YIN R, et al. Effects of crop-mulberry system on phosphorus loss in sloping cropland with purple soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(6): 1316–1326.



开放科学 OSID

紫色土坡耕地农桑系统对土壤磷素流失的影响

杨红宾^{1,2}, 王胜^{1,2*}, 殷溶^{1,2}, 雷平^{1,2}, 陈方鑫^{1,2}, 倪九派^{1,2}, 谢德体^{1,2*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 三峡库区水环境监测与模拟国际科技合作基地, 重庆 400716)

摘要:为明确桑树篱配置对三峡库区紫色土坡耕地-桑树复合系统(农桑系统)地上、地下径流与磷素流失的影响,优化农桑系统配置、减少磷素流失,本研究建立野外15°径流小区(长9 m×宽3 m),设置等高种植的一带桑(T₁)、两带桑(T₂)、三带桑(T₃)与无桑树篱(CK)4种处理,连续监测2020年9月至2021年8月经流小区地表径流(地上)、壤中流(地下)及磷素流失形态与数量。结果表明:三带桑、两带桑和一带桑处理下,地上与地下总径流量相比无桑树篱处理(286.6 mm)分别显著减少62%、33%和21%;壤中流总量相比无桑树篱处理(226.3 mm)分别显著降低69%、37%与26%,4种处理壤中流占径流总量比例为63%~79%。三带桑和两带桑地表径流相比无桑树篱处理分别显著减少33%与18%,一带桑与无桑树篱处理无显著差异。三带桑通过地上与地下径流损失的磷素总量相比无桑树篱处理(0.9 kg·hm⁻²)显著减少61%,一带桑和两带桑与无桑树篱处理无显著差异;三带桑和两带桑通过壤中流损失的磷素相比无桑树篱处理(0.5 kg·hm⁻²)分别显著减少78%和34%,4种处理经壤中流造成的磷素损失量占磷素损失总量的44%~69%;相比无桑树篱处理(0.4 kg·hm⁻²),三带桑随地表径流损失的磷素显著减少40%,但一带桑和两带桑处理磷素损失量却分别增加21%和25%。从不同磷素流失形态来看,可溶性磷占比40%~53%,颗粒态磷占比47%~60%,不同处理可溶性磷与颗粒态磷量差异不显著。各桑树篱处理对榨菜经济产量均无显著影响;除一带桑处理外,两带桑与三带桑处理春玉米经济产量分别显著降低10%和13%。研究表明,壤中流是紫色土坡耕地径流的主要损失途径,坡耕地土壤磷素主要通过地表径流以颗粒态磷的形式流失。三带桑防治磷素流失效果非常突出且不影响榨菜经济产量,但小幅度降低了玉米经济产量。

关键词: 三峡库区; 紫色土; 农业面源污染; 桑树; 径流; 磷

中图分类号: S157 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2022)06-1316-11 **doi:**10.11654/jaes.2021-1090

Effects of crop-mulberry system on phosphorus loss in sloping cropland with purple soil

YANG Hongbin^{1,2}, WANG Sheng^{1,2*}, YIN Rong^{1,2}, LEI Ping^{1,2}, CHEN Fangxin^{1,2}, NI Jiupai^{1,2}, XIE Deti^{1,2*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. National Base of International S&T Collaboration on Water Environmental Monitoring and Simulation in TGR Region, Chongqing 400716, China)

Abstract: To clarify the impact of mulberry hedgerow configurations on aboveground and underground runoff and phosphorus losses from the sloping farmland-mulberry compound system (crop-mulberry system) with purple soil in the Three Gorges Reservoir area, optimize the crop-mulberry system configuration, and reduce phosphorus losses, a set of 15°-runoff plots (9 m×3 m) were established in the opening field. Four treatments were set up: one-belt mulberry (T₁), two-belt mulberry (T₂), three-belt mulberry (T₃), and non-mulberry hedges (CK). The yield of surface runoff, interflow, and phosphorus loss forms and magnitudes in the runoff plot and field meteorological conditions were continuously monitored. The results demonstrated that: the total yield of surface runoff and interflow in the T₃, T₂, and T₁ treatments were significantly reduced by 62%, 33%, and 21%, respectively, compared with CK (286.6 mm). Accordingly, the yield of

收稿日期: 2021-09-23 录用日期: 2022-01-29

作者简介: 杨红宾(1996—), 女, 重庆铜梁人, 硕士研究生, 主要从事农业面源污染研究。E-mail: yanghobin@163.com

*通信作者: 王胜 E-mail: shengwang@swu.edu.cn; 谢德体 E-mail: xdt@swu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(42107321); 中央高校基本科研业务费专项(SWU119038)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(42107321); Fundamental Research Funds for the Central Universities(SWU119038)

interflow was significantly reduced by 69%, 37%, and 26%, respectively, compared with CK (226.3 mm). The interflow yield proportions of the four treatments to the total runoff yield ranged from 63%~79%. The surface runoff yields of T₃ and T₂ were significantly reduced by 33% and 18%, respectively, but there was no significant difference between T₁ and CK. The total amount of phosphorus loss through the interflow and surface runoff in T₃ was significantly reduced by 61% compared with CK (0.9 kg·hm⁻²), but there was no significant difference among T₁, T₂, and CK. The amount of phosphorus loss through the interflow in T₃ and T₂ was significantly reduced by 78% and 34%, respectively, compared with CK (0.5 kg·hm⁻²). The amount of phosphorus loss through the interflow of the four treatments accounted for 44%~69% of the total amount of phosphorus loss, and the amount of phosphorus loss through surface runoff in T₃ was significantly reduced by 40% compared with CK (0.4 kg·hm⁻²), but the amount of phosphorus loss in T₁ and T₂ increased by 21% and 25%, respectively. Soluble phosphorus accounted for 40%~53% of the total amount of phosphorus loss, and particulate phosphorus only accounted for 47%~60%. The difference between soluble phosphorus and particulate phosphorus among the four treatments was not significant at $P<0.05$. The mulberry hedge treatments had no significant effect on the economic yield of mustard tuber, but T₂ and T₃ had a significant reduction in the economic yield of spring maize by 10% and 13%, respectively. The interflow was the main flow pattern on the slope farmland in purple soil, but the soil phosphorus was primarily lost by particulate phosphorus form through surface runoff. Three-belt mulberry had an attractive effect in preventing phosphorus loss and did not significantly affect the economic yield of mustard tuber, but it slightly reduced the economic yield of maize.

Keywords: Three Gorges Reservoir area; purple soil; agricultural non-point source pollution; mulberry; runoff; phosphorus

磷是植物生长发育所必需的三大营养元素之一,但土壤中的磷绝大部分以难溶的无机态和有机态形式存在,仅有1%左右的磷可被植物直接吸收利用^[1]。土壤磷的低有效性使其成为影响作物产量的主要限制因子^[2]。因此,为保证作物产量,农户需定期向农田土壤中施入大量磷肥。近30年来,我国磷肥消费量增长了3倍^[3-4],但磷肥利用率普遍低于25%^[5]。过多的磷肥投入导致农田土壤磷不断累积,极大地增加了磷素流失至水体的风险。在降雨-径流驱动下,土壤磷素以水溶态和颗粒态形式随径流和泥沙迁移,最终汇入水体^[6]。磷素是水体富营养化的关键因子,其中水溶态磷以正磷酸盐为主,是水体中藻类生长所需磷的直接来源,而颗粒态磷是藻类持续生长的潜在磷源^[7]。如何有效控制农田土壤磷素流失对防控农业面源污染和水体富营养化等具有重要意义。

四川盆地低山丘陵区紫色土分布广泛,其耕性强且生产力高,是当地重要的农业土壤类型,但作为初育土,其抗蚀性弱、蓄水保土能力低^[8]。同时,紫色土坡耕地地区地形起伏大、雨热同季,导致其成为长江流域和三峡库区土壤侵蚀与农业面源污染的主要来源地^[9-12]。植物篱技术是控制土壤侵蚀与养分流失的一种重要措施^[13]。西南紫色土区居民素有栽桑养蚕的传统,桑蚕业历史悠久,坡耕地-桑树农林复合系统是当地一种常见的土地利用方式^[14-15]。紫色土坡耕地配置桑树篱可以有效减少地表径流与土壤侵蚀^[16],起到固土保肥的效果^[17]。已有研究表明,相比于传统种植模式,西南紫色土区桑树篱间作可使径流系数降

低10.3%~20.0%,径流含沙量降低48.6%~59.8%,侵蚀量降低55.3%~67.8%^[18]。相比于常规横坡农作,等高桑交叉耕作^[19]和等高桑横坡耕作^[20]均能有效降低坡耕地地表氮磷流失量;农桑间作小区内土壤碱解氮、速效磷、速效钾和有机质含量均显著提高^[21]。紫色土坡耕地不仅地表土壤侵蚀和养分流失十分严重,而且其土层薄、砾石多的初育土壤特征导致坡耕地地下径流与养分渗漏现象同样显著。近几年,壤中流携带养分流失的现象有所报道,尤其对四川盆地紫色土区的研究较多^[22-23]。研究表明,一些地表粗化严重的山地壤中流占总径流量的70%~80%,壤中流携带养分流失量占养分总流失量的比例可达70%^[24]。然而,关于植物篱措施,尤其是等高植物篱配置方式对紫色土坡耕地壤中流中磷素流失的影响研究较少。

合适的植物篱配置方式很大程度上影响着植物篱-农作系统的土地利用效率、土壤侵蚀量及农业面源污染控制效果。但前人的研究多针对不同植物篱品种和布设方式,关于植物篱数量对控制坡耕地土壤侵蚀和养分流失,尤其是壤中流中磷素流失影响的研究较少。因此,本研究以三峡库区紫色土坡耕地为研究对象,针对等坡长径流小区设置不同数量等高桑篱带处理,定量研究紫色土坡耕地农桑系统桑篱带数量对磷素地表、地下流失的控制效果,揭示磷素地表、地下流失的耦合关系,研究对优化和推广控制农业面源污染的紫色土坡耕地-桑树配置模式、消减入库污染负荷、维持生态环境的可持续发展具有重要的理论意义和实践价值。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验小区位于重庆市北碚区国家紫色土肥力与肥料效益监测站(30°26'N, 106°26'E), 该区域属亚热带季风性湿润气候, 年均气温 18.3℃, 年均降雨量 1 105.4 mm, 年均日照时长 1 117.8 h^[25]。试验共建立 12 个径流小区, 每个小区均长 9 m、宽 3 m、坡度 15°。径流小区土体由人工填装而成, 总厚度 60 cm, 模拟西南地区典型紫色土剖面实际构型, 下层 40~60 cm 填装紫色砂岩块母质, 上层 0~40 cm 耕作层与心土层填装紫色土。在坡面底部上方设置明沟用于收集地表径流, 在坡底土表以下 60 cm 深度设置暗沟收集总壤中流。试验土壤为侏罗纪沙溪庙组发育的紫色土, 土壤质地为砂黏土。试验小区耕作层和心土层土壤基本理化性状见表 1。

试验共设 4 个处理: 一带桑(T₁)、两带桑(T₂)、三带桑(T₃)与无桑树篱(对照 CK)。每个处理设置 3 个径流小区重复, 研究等坡长径流小区不同数量桑带处理对农桑系统磷素流失的影响。桑带所种桑树品种为中桑 5801。小区桑带间的耕地实行玉米-榨菜轮作, 玉米每年 3 月中旬移栽, 7 月下旬收获, 榨菜每年 10 月底移栽, 次年 2 月中旬收获。玉米种植季与榨菜种植季之间遵循当地耕种习惯, 自然空茬休耕, 不种植作物。小区桑篱的桑树至本试验开始前已栽种 2 a, 坡耕地-桑树系统已基本成型。试验期内各小区施肥与耕作管理保持一致, 按照农民习惯采用常规施肥: 玉米施肥两次, 分别为玉米苗肥和追肥, 榨菜施肥一次, 均采用 5 cm 左右深度的穴施法。具体施肥量及施肥日期见表 2。

1.2 样品采集

研究观测时期为 2020 年 9 月至 2021 年 8 月, 构成涵盖休耕期-榨菜种植季-玉米种植季的完整年观测序列。观测期间, 试验区共发生降雨 120 次, 累计降雨量为 1 218.2 mm, 根据《降水量等级》(GB/T 28592—2012), 24 h 降雨量在 10 mm 以下为小雨, 10.0~24.9 mm 为中雨, 25.0~49.9 mm 为大雨, 50.0~

99.9 mm 为暴雨, 100.0~249.9 mm 为大暴雨。研究区 2020 年 9 月到 2021 年 8 月共发生小雨 91 次、中雨 16 次、大雨 5 次、暴雨 7 次、大暴雨 1 次, 产流降雨 29 次。每次降雨产流后, 测量各小区地表径流和壤中流产生量, 并取水样及时测定各形态磷含量。

将收集的水样均匀混合后取部分经 0.45 μm 滤膜过滤, 测定可溶性磷(DP)和正磷酸盐磷(PO₄³⁻-P)含量; 另取部分水样原样测定全磷(TP)含量。水样 TP 和 DP 浓度采用过硫酸钾消解-钼酸铵分光光度法测定, PO₄³⁻-P 浓度直接采用钼酸铵分光光度法测定; 颗粒态磷(PP)采用差减法求得, 即全磷与可溶性磷之差。

1.3 数据处理与分析

观测期内第 i 次降雨事件地表径流和壤中流流失量以及各形态磷素迁移流失量的计算公式为:

$$V_{ni} = v_{ni} \times \frac{1}{a} \quad (1)$$

$$Q = \frac{\lambda \times \sum_{i=1}^n C_i \times V_i}{A} \quad (2)$$

式中: V_{ni} 为第 i 场降雨下各试验小区第 n 层土壤的径流流失量, mm; v_{ni} 为第 i 场降雨下收集到的从第 n 层土壤流出的径流体积, L; a 为各土层径流收集装置的收集面积, m²; Q 为观测期内各形态磷素的总迁移量, kg·hm⁻²; λ 为负荷转换系数, 10⁻²; A 为小区面积, m²; V_i 为第 i 次各小区产流降雨中地表径流或壤中流产流体积, L; C_i 为第 i 次地表径流和壤中流产流事件中各形态磷素浓度, mg·L⁻¹。

采用 SPSS 20 进行试验数据统计分析, 用 LSD 法进行多重比较, 用不同小写字母表示差异显著性 ($P <$

表 2 各处理施肥量(kg·hm⁻²)

Table 2 The amount of fertilizers applied in each treatment

(kg·hm ⁻²)					
作物 Crop	施肥日期 Date of fertilization	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
榨菜 Tuber mustard	2020-11-17	383.0	191.0	214.0	
玉米 Maize	2021-04-08	109.5	40.5	49.5	
	2021-05-11	220.5	79.5	100.5	

表 1 试验土壤基本理化性状

Table 1 Basic physical and chemical characteristics of experimental soil

土层 Soil layer/cm	pH	全氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	有效氮 Available N/ (mg·kg ⁻¹)	全磷 Total P/ (g·kg ⁻¹)	有效磷 Available P/ (mg·kg ⁻¹)	全钾 Total K/ (g·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/ (mg·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	土壤容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)
0~20	6.29	1.14	103.66	0.72	57.71	21.65	88.43	14.96	1.45
20~40	7.34	1.11	93.08	0.74	45.94	21.86	87.71	14.91	1.48

0.05),采用Origin 2018进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 农桑系统紫色土坡耕地产流特征

观测期内,共发生产流降雨29次,累计产流降雨量941.8 mm。降雨事件主要集中在5—8月,以中雨和暴雨(17次)为主,各处理地表径流量和壤中流量以及总产流量随降雨量变化的趋势基本一致(图1),但不同处理径流量之间存在差异(图2)。各处理地表径流量大小顺序为CK[(60.31±1.33) mm]>T₁[(59.52±3.49) mm]>T₂[(49.44±0.80) mm]>T₃

[(40.48±4.27) mm],T₂处理和T₃处理对地表径流的拦截效果显著,地表径流量分别较CK处理显著降低了18.0%和32.9%。各处理壤中流量大小顺序为CK[(226.25±34.95) mm]>T₁[(166.66±6.79) mm]>T₂[(142.28±1.93) mm]>T₃[(68.91±1.63) mm],桑树篱处理显著降低了降雨事件中壤中流的产生,随着桑树篱带的增加,各桑树篱处理壤中流量较CK处理分别显著降低了26.3%、37.1%和50.8%。

各处理总产流量大小顺序为CK[(286.56±33.62) mm]>T₁[(226.19±3.30) mm]>T₂[(191.71±1.14) mm]>T₃[(109.38±2.64) mm],其中壤中流量占比表现为CK

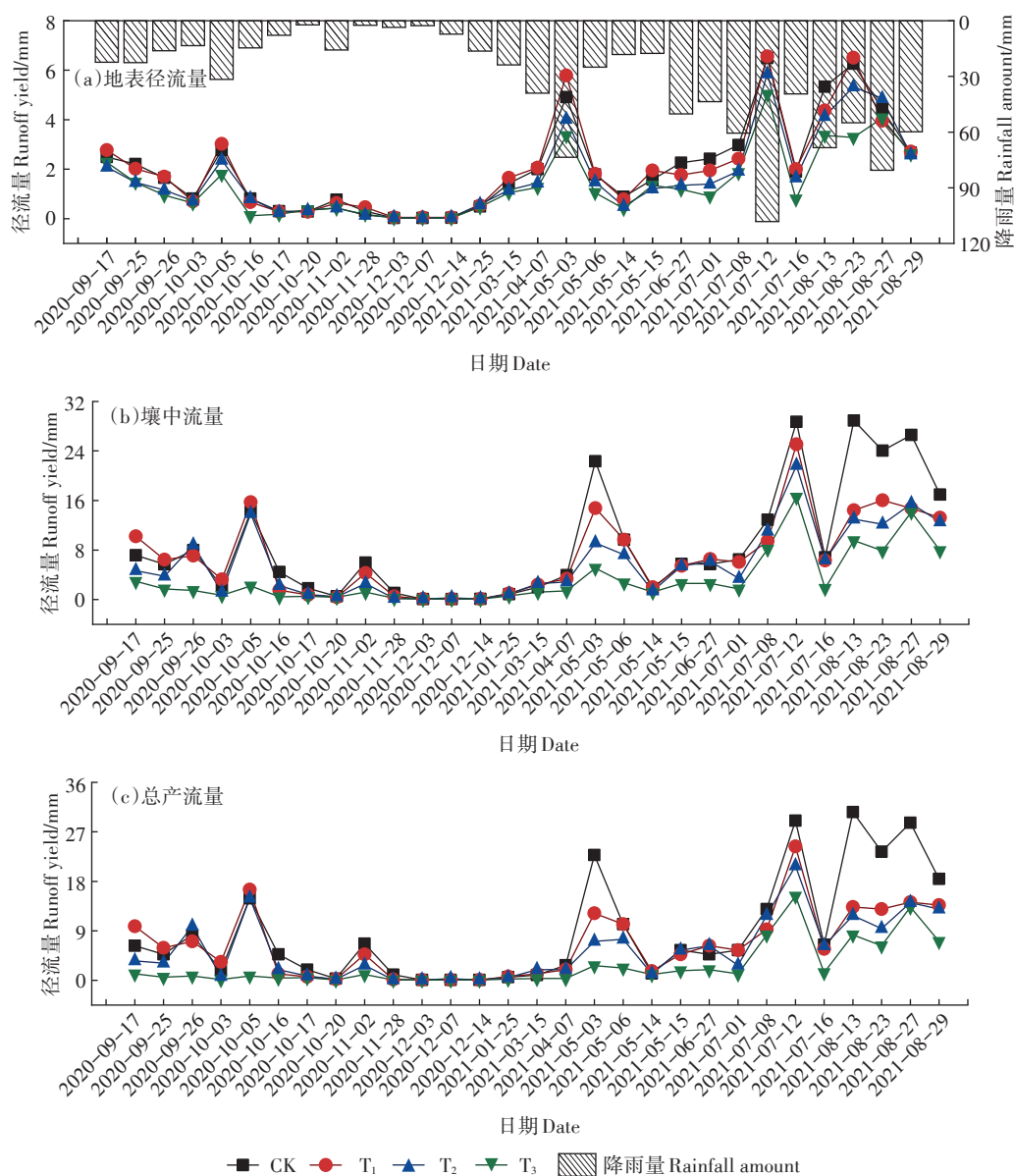
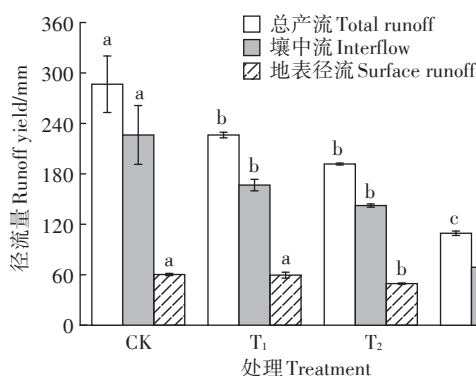


图1 不同降雨量下紫色土坡耕地径流流失动态

Figure 1 Runoff yields of slope farmland of the purple soil under different rainfall events

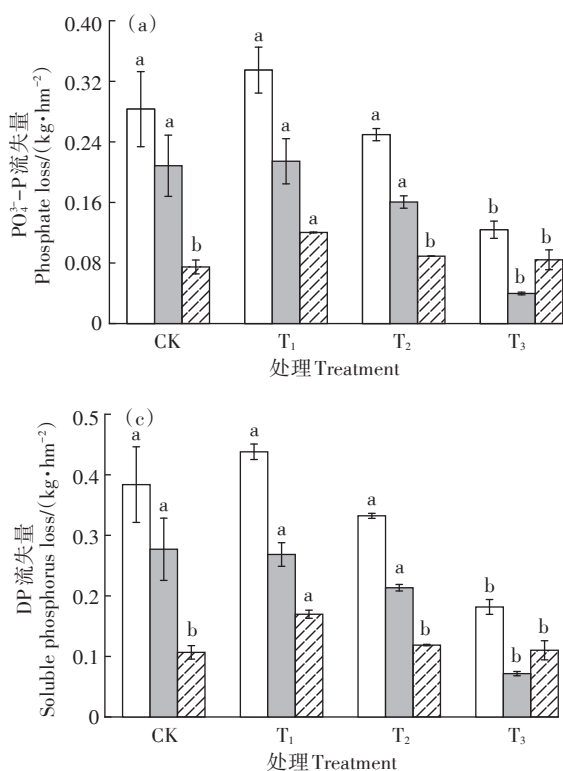
(79.0%)>T₂(74.2%)>T₁(73.7%)>T₃(63.0%),壤中流是各处理的主要产流方式。各处理通过地表入渗进入土壤的累计总水量大小顺序为T₃(901.32 mm)>T₂(892.36 mm)>T₁(882.28 mm)>CK(881.49 mm),总拦截量大小顺序为T₃(791.94 mm)>T₂(700.65 mm)>T₁



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments($P<0.05$). The same below

图2 试验期内各处理径流量

Figure 2 Runoff yields of different treatments during the experimental period



□ 总流失量 Total loss ■ 壤中流 Interflow ▨ 地表径流 Surface runoff

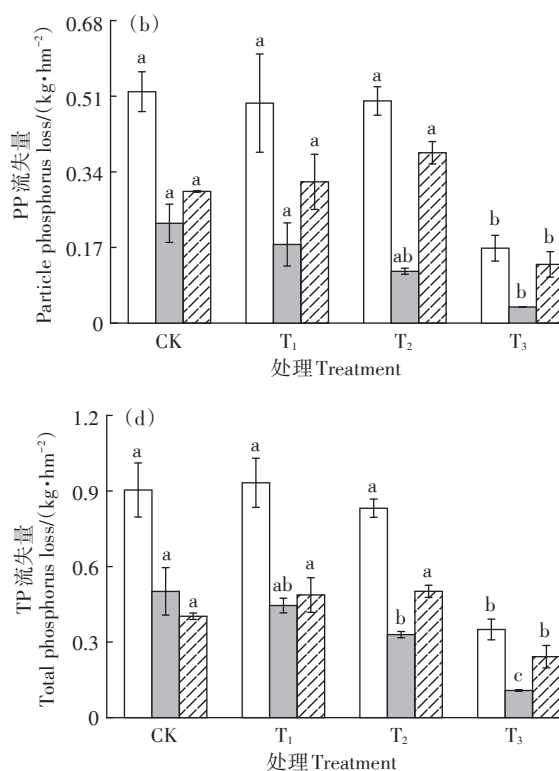
图3 各处理不同形态磷素流失量

Figure 3 The amount of phosphorus loss of different forms in different treatments

(656.09 mm)>CK(594.93 mm),各处理对降雨入渗水分的截留效果随桑树篱的增加而增加。

2.2 农桑系统紫色土坡耕地磷流失特征

各处理对农桑系统下紫色土坡耕地各形态磷素流失的影响有所不同(图3)。地表径流中,T₃处理全磷流失量和颗粒态磷流失量较CK处理显著降低了39.8%和55.4%(图3d和图3b),其余桑树篱处理对地表径流中磷素流失没有显著的拦截效果,且相比于CK处理,T₁处理可溶性磷和正磷酸盐流失量分别显著增加了59.0%和61.0%(图3c和图3a)。壤中流中,除T₁处理正磷酸盐流失量大于CK处理外,其余各处理不同磷素流失量均随桑树篱带的增多而减少,其中T₃处理的拦截效果最显著(图3)。壤中流中,相比于CK处理,T₃处理的颗粒态磷、正磷酸盐磷、可溶性磷和全磷流失量分别显著降低了83.8%、80.9%、74.2%和78.5%;T₂处理仅全磷流失量显著降低了34.2%。就地上、地下各形态磷素总流失量而言,仅T₃处理显著降低了各形态磷素总流失量,其余桑树篱处理各形态磷素总流失量与CK处理间的差异均不显著。相比于CK处理,T₃处理颗粒态磷、正磷酸盐磷、可溶性磷和全



磷总流失量分别显著降低了67.6%、56.3%、52.6%和61.3%。由图3可知,颗粒态磷流失途径以地表径流为主,可溶性磷和正磷酸盐磷流失途径基本以壤中流为主(T_3 处理除外);且随桑树篱种植密度增加,壤中流全磷流失量占全磷总流失量的比例逐渐减少,表现为CK(55.5%)> T_1 (47.7%)> T_2 (39.7%)> T_3 (30.8%)。

2.3 农桑系统下紫色土坡耕地各形态磷流失比例

如表3所示,在观测期内,农桑系统下紫色土坡耕地地表径流磷素流失以颗粒态磷为主,占地表径流全磷流失量的53.8%~76.2%;而壤中流中磷素流失以可溶性磷为主,占壤中流全磷流失量的55.3%~66.3%;在地上、地下磷素总流失量中,除 T_3 处理外(47.4%),其余各处理磷素流失仍以颗粒态磷为主,占地上、地下全磷总流失量的51.6%~59.9%;各处理地上、地下正磷酸盐磷流失量占比规律基本一致。与CK处理相比,各桑树篱处理对壤中流中磷素流失形式影响较小,但明显改变了地表径流中磷素的流失形式, T_1 处理和 T_3 处理显著降低了地表径流中颗粒态磷流失比例,显著增加了可溶性磷和正磷酸盐磷流失比例; T_2 处理对地表径流中各形态磷素流失比例没有显著影响。

2.4 降雨量和产流量与磷素流失的相关分析

对不同处理径流量和产流降雨量进行线性回归分析(图4),发现各处理径流量与降雨量均呈极显著正相关($R^2=0.68\sim0.83$),且地表径流量与降雨量回归方程决定系数($R^2=0.75\sim0.83$)大于壤中流与降雨量回归方程决定系数($R^2=0.68\sim0.76$),表明降雨量对径流的影响可能受到土层深度的影响。同时对农桑系统下紫色土坡耕地磷素流失量与降雨量和径流量进行相关性分析(表4)发现,各形态磷素流失量与降雨量和径流量均极显著正相关,但相关程度存在差异。比较相关系数发现,壤中流中全磷流失量和颗粒态磷流失量与降雨量的相关系数($R=0.694$, $R=0.588$)均大

于地表径流($R=0.553$, $R=0.468$),相反,壤中流中可溶性磷和正磷酸盐磷流失量与降雨量的相关系数($R=0.683$, $R=0.641$)均小于地表径流($R=0.751$, $R=0.765$);同时,壤中流中颗粒态磷流失量与全磷流失量的相关系数($R=0.897$)小于地表径流($R=0.989$),而壤中流中可溶性磷和正磷酸盐磷流失量与全磷流失量的相关系数($R=0.950$, $R=0.921$)均大于地表径流($R=0.826$, $R=0.651$)。上述结果再次表明,观测期内紫色土坡耕地壤中流磷素流失以可溶性磷为主,而地表径流磷素流失以颗粒态磷为主。

2.5 产量分析

作物产量是评价农桑系统效益的重要指标。根据单因素方差分析(表5),发现试验期内榨菜经济产量、副产物生物量及总生物量均随着桑树篱种植密度的增加而降低。与CK处理相比, T_3 处理的总生物量和副产物生物量均显著降低,但各处理榨菜经济(块茎)产量之间均无显著差异。相较于榨菜,桑树篱措施对玉米经济(籽粒)产量的影响更为显著,除 T_1 处理玉米经济产量与CK处理无显著差异外,其余各处理玉米经济产量、副产物生物量及总生物量均随桑树篱种植密度增加而显著降低,其中 T_2 和 T_3 处理玉米经济产量分别显著降低9.6%和13.3%。桑树篱措施显著影响了春季玉米的生长及玉米经济产量。

3 讨论

降雨是引起旱坡地土壤侵蚀和养分流失的直接驱动力,是决定其流失程度的重要因素,但在同等强度降雨条件下,桑基植物篱的应用能显著影响紫色土坡耕地径流分配及磷素流失,从而使不同农桑配置模式对地表径流和磷素流失的阻抗效果产生显著差异。研究表明,两带桑和三带桑处理显著降低了产流降雨过程中地表径流,一带桑处理对地表径流没有显著拦截效果(图2)。这主要是因为两带桑和三带桑处理

表3 各处理不同形态磷流失比例(%)

Table 3 Different forms of phosphorus loss ratio in different treatments(%)

处理 Treatment	总流失量 Total loss			壤中流 Interflow			地表径流 Surface runoff		
	DP/TP	PO ₄ ³⁻ -P/TP	PP/TP	DP/TP	PO ₄ ³⁻ -P/TP	PP/TP	DP/TP	PO ₄ ³⁻ -P/TP	PP/TP
CK	42.0±3.4	30.9±1.9	58.0±2.0	55.3±0.3	41.5±0.3	44.7±0.1	26.4±3.3c	18.5±1.7c	73.6±1.9a
T_1	48.4±11.3	37.4±7.3	51.6±6.5	61.4±14.6	49.5±10.0	38.6±8.4	35.9±6.6b	25.8±3.9b	64.1±3.8b
T_2	40.1±2.2	30.1±0.3	59.9±1.2	64.7±1.4	48.6±0.6	35.3±0.8	23.8±2.4c	17.9±0.9c	76.2±1.4a
T_3	52.6±4.7	35.6±1.0	47.4±2.7	66.3±2.4	36.8±0.6	33.7±1.4	46.2±3.6a	35.2±1.1a	53.8±2.1c

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

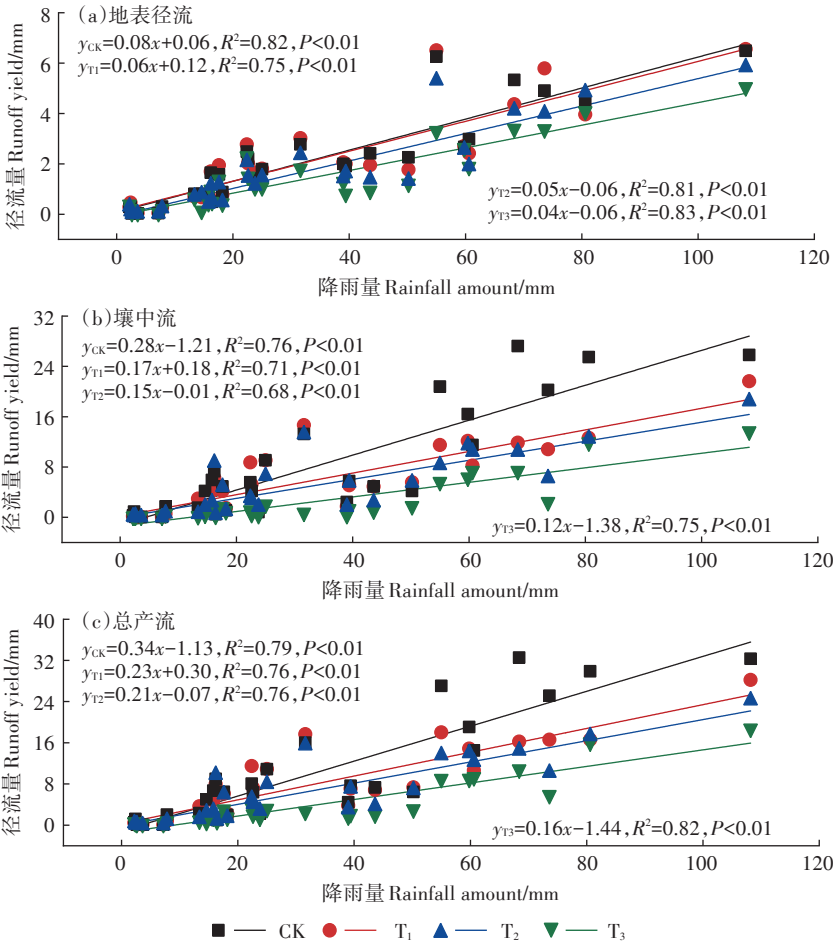


图4 各处理径流量与降雨量的相关关系

Figure 4 Correlation between rainfall amount and runoff yield in different treatments

表4 磷素流失量与降雨量和径流量相关关系

Table 4 Correlation of phosphorus loss with rainfall and runoff

指标 Index	降雨量 Rainfall	径流量 Runoff	TP	DP	PO ₄ ³⁻	PP
地表径流 Surface runoff	降雨量	1	0.553**	0.751**	0.765**	0.468**
	径流量	1	0.678**	0.793**	0.725**	0.608**
	TP		1	0.826**	0.651**	0.989**
	DP			1	0.926**	0.731**
	PO ₄ ³⁻ -P				1	0.540**
	PP					1
壤中流 Interflow	降雨量	1	0.694**	0.683**	0.641**	0.588**
	径流量	1	0.804**	0.775**	0.739**	0.704**
	TP		1	0.950**	0.921**	0.897**
	DP			1	0.957**	0.714**
	PO ₄ ³⁻ -P				1	0.708**
	PP					1

注:**表示相关性达到极显著水平($P<0.01$)。
Note:** represents extremely significant correlation($P<0.01$).

对坡面径流的连续拦截和分散作用,增加了坡面径流的运移时间和入渗量,从而减少了坡面径流的产

生^[26],而一带桑位于径流小区最下方,对坡面径流拦截不及时且拦截作用小,导致拦截效果不显著。相关

表5 试验期内不同处理农作物生物产量(干质量, kg·hm⁻²)Table 5 Crop biomass(dry weight) of different treatments during the test period(kg·hm⁻²)

处理 Treatment	榨菜 Mustard tuber			玉米 Maize		
	总生物量 Total biomass	经济产量 Economic yield	副产物生物量 By-products biomass	总生物量 Total biomass	经济产量 Economic yield	副产物生物量 By-products biomass
CK	3 917±225a	1 943±23	1 974±202a	15 799±352a	6 963±87a	8 837±439a
T ₁	3 775±5ab	1 903±25	1 871±20ab	14 714±476b	6 654±274ab	8 060±202b
T ₂	3 724±116ab	1 867±71	1 857±46ab	13 517±516c	6 295±419bc	7 222±98c
T ₃	3 596±102b	1 857±43	1 740±59b	12 322±409d	6 037±152c	6 284±258d

分析表明,地表径流中磷素流失量与地表径流量和降雨量均呈极显著正相关(表4),但同时也发现地表径流量并不是影响地表径流磷素流失的唯一因素。试验期内,各处理地表径流总量随着桑树篱带的增加而降低,但一带桑和两带桑处理地表径流中各形态磷素流失量却均高于无桑树篱处理,仅三带桑处理显著降低了地表径流中颗粒态磷和全磷流失量。这是因为除降雨和地表径流外,土壤抗蚀性和植被覆盖度也是影响坡耕地土壤侵蚀和养分流失的重要因素。研究表明,植物篱措施能有效增加地表植物覆盖度、延长降雨入渗时间,减轻降雨和坡面径流对土壤的侵蚀冲刷;同时错综复杂的植物篱地下根系能有效改善土层结构,进而提高土壤抗蚀性^[26-27]。但植物篱的种植也会抑制篱下杂草生长^[18],导致休耕期内各处理植被覆盖度存在差异。观测发现,从玉米成熟(即收获)的7月上旬开始,各径流小区内桑树篱带数量越多、越密,篱下坡面杂草生长越少,反而无桑树篱处理杂草生长旺盛、地面粗糙度高,因此其地表径流中各形态磷素流失量低于一带桑和两带桑处理。三带桑处理虽然地面杂草生长最少、地面粗糙度低,但由于桑树篱种植数量多,桑树枝叶茂盛,极大地减轻了降雨对坡面的冲刷和对土壤的侵蚀,从而降低了磷素通过地表的迁移流失量。

本研究供试土壤为沙溪庙组发育的紫色土,其具有土层薄、砾石多、水分入渗快、保水能力低等特点,但土层厚度也是影响降水入参与再分配的重要因素,因此该紫色土坡耕地壤中流极为普遍^[28-29]。本研究结果显示,紫色土坡耕地农桑系统产流方式以壤中流为主,占总径流量 63.0%~79.0%,且壤中流占比随着桑树篱带数量的增大而减小。汪三树等^[30]研究发现,相比于自然生草埂,桑埂的土壤孔隙度增加 53.06%,土壤入渗率明显大于其他几种生物埂,同时其发达的孔隙结构导致土壤水库总库容和滞洪库容等均显著高于自然生草埂,因此能有效调节地表径流并缓解季

节性干旱。本研究结果表明,桑树篱措施均能显著减少产流降雨过程中壤中流的产生,增加土壤对降雨入渗水分的拦截量(图2),但不同配置模式对降雨入渗水分的拦截效果不同,一带桑和两带桑处理壤中流量差异不显著,但均显著高于三带桑。桑树生长速度极快,蒸腾耗水强烈,坡耕地桑树会消耗坡耕地土壤水库,影响坡耕地水分循环与产流过程^[31-32]。随着桑带数量的增加,桑树蒸腾耗水对坡耕地农桑系统土壤水库的消耗增多,降水入渗优先补充土壤水库,地表径流和壤中流产生量相对减少。因此桑带蒸腾耗水是三带桑处理壤中流量显著低于一带、两带桑处理的主要原因之一。虽然各处理壤中流中不同形态磷素流失量随桑树篱数量的增多而减小,但仅三带桑处理显著降低了各形态磷素流失量,两带桑处理仅显著降低了壤中流中全磷流失量。

由于磷肥主要施在土壤表层,且易被土壤吸附固定,在土壤中很难移动,多数研究认为土壤中的磷素沿剖面垂直向下淋溶的可能性较小,地表径流和土壤侵蚀是其流失的主要途径^[33-35],随径流泥沙流失的颗粒态磷是最主要的流失形式^[36-37]。本研究结果表明,各处理地表径流平均总磷浓度是壤中流总磷浓度的 3.1~4.4 倍。即使试验期内壤中流是紫色土坡耕地主要产流方式,但除无桑树篱处理(44.5%)外,其他处理总磷流失仍以地表径流为主要途径(52.3%~69.2%)。对比分析不同形态磷素流失比例(表3)以及地表径流和壤中流中颗粒态磷、正磷酸盐磷和可溶性磷流失量与全磷流失量的相关系数(表4),发现地表径流中磷素流失以颗粒态磷为主,而壤中流中磷素流失以可溶性磷为主,但就地上、地下磷素流失总量而言,除三带桑处理(47.4%)外,其余各处理磷素流失仍以颗粒态磷为主(51.6%~59.9%)。经统计分析发现,与三带桑相比,一带桑和两带桑不仅总径流量高,而且流失总磷平均浓度也高,一带、两带桑处理径流平均总磷浓度约是三带桑的 1.32 倍。流失总磷平

均浓度与总径流量在地表径流和壤中流的分配比例、两者中磷素浓度差异和浓度值等密切相关,但与总径流量的大小没有直接关系。结果显示,无论是地表径流还是壤中流,一带、两带桑处理总磷浓度均高于三带桑。综合影响下,一带、两带桑处理径流总磷平均浓度高于三带桑处理。总体来说,不同配置桑带通过改变径流总量、地上地下径流分配与径流磷素浓度,最终影响紫色土坡耕地农桑系统磷素流失量。

合适的植物篱配置方式不仅需要有效防治坡耕地水土流失、减轻农业面源污染,而且不能引起作物显著减产。本试验基于西南地区种桑养蚕的传统,选择紫色土区常见水土保持树种——桑树作为植物篱,等高布设了3种农桑配置模式。结果表明,两带桑处理可以显著降低壤中流中磷素流失,但对地表径流中磷素流失无显著拦截效果;种植篱数最多的三带桑处理能显著降低紫色土坡耕地地上、地下磷素流失,达到减轻农业面源污染的目的。但综合考虑桑树篱对作物产量的影响(表5),由于春季桑树篱生长旺盛,对养分和光照的竞争激烈,导致各桑树篱处理中玉米经济产量、副产物生物量和总生物量均随桑树篱种植密度的增加而降低。本研究结果表明,试验期内部分桑树篱处理虽能有效减少坡耕地土壤磷素流失,但也造成作物(玉米)产量显著降低。综合考虑本研究田间试验过程,休耕期内桑树篱对杂草的抑制明显影响了其控制坡耕地土壤侵蚀和养分流失的效果,同时生长旺盛的桑树篱与作物,尤其是玉米形成激烈竞争,严重影响了作物产量。因此,在本研究的基础上,后续将考虑在各桑树篱处理径流小区最底端的一排桑树篱下种植草本植物篱,采用两种植物篱相结合的方式增强桑树篱措施对土壤侵蚀和养分流失的拦截效果。同时在桑树篱生长高度超过玉米时及时修剪桑树枝条,削弱桑树篱和玉米的竞争。在本研究基础上,应继续监测农桑系统下紫色土坡耕地土壤侵蚀和养分流失情况,以期优化桑树篱措施后,在保证和提高各桑树篱处理有效拦截紫色土坡耕地养分和水土流失的前提下,降低桑树篱措施对作物(玉米)产量的影响,确定最佳农桑配置模式。

4 结论

(1)壤中流是紫色土坡耕地农桑系统主要产流方式,占总产流量的63%~79%。地表径流量和壤中流量均随桑篱带数量的增大而减小,其中两带桑和三带桑处理地表径流量和壤中流量均显著降低,而一带桑

处理仅对壤中流具有显著的拦截效果。

(2)紫色土坡耕地农桑系统土壤磷素主要通过地表径流流失,占总磷流失量的44.5%~69.2%。磷素主要流失形态为颗粒态磷,占全磷流失量的47.4%~59.9%。

(3)两带桑壤中流磷素流失量显著降低34.2%,三带桑对磷素流失阻抗效果最好,地上、地下磷素总流失量显著降低61.3%。但密集的桑树篱与作物玉米形成竞争关系,造成玉米小幅减产。建议进一步研究桑篱修枝疏伐等优化措施,限制其对作物经济产量的影响。

参考文献:

- [1] 李廷轩,叶代桦,张锡洲,等. 植物对不同形态磷响应特征研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1536-1546. LI T X, YE D H, ZHANG X Z, et al. Research advances on response characteristics of plants to different forms of phosphorus[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(6): 1536-1546.
- [2] 王永壮,陈欣,史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 260-268. WANG Y Z, CHEN X, SHI Y. Phosphorus availability in cropland soils of China and related affecting factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1): 260-268.
- [3] 张俊伶,张江周,申建波,等. 土壤健康与农业绿色发展:机遇与对策[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 783-796. ZHANG J L, ZHANG J Z, SHEN J B, et al. Soil health and agriculture green development: Opportunities and challenges[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(4): 783-796.
- [4] 刘路,沈浦,张继光,等. 农田土壤潜在有效磷的转化与利用研究进展[J]. 贵州农业科学, 2019, 47(4): 51-55. LIU L, SHEN P, ZHANG J G, et al. Research progress in transformation and utilization of soil potential available phosphorus in farmland[J]. *Guizhou Agricultural Science*, 2019, 47(4): 51-55.
- [5] 冯媛媛. 主要粮食作物磷肥利用率与土壤有效磷含量的定量关系分析[D]. 荆州:长江大学, 2019. FENG Y Y. An analysis of the relationship between phosphorus use efficiency and soil Olsen-P in the wheat, rice, corn land[D]. Jingzhou: Changjiang University, 2019.
- [6] 张瑜,张黎明,周碧青,等. 基于GIS技术的耕地有效磷富集与生态风险评价——以福建省泰宁县为例[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2): 326-336. ZHANG Y, ZHANG L M, ZHOU B Q, et al. Enrichment and ecological risk assessment of available phosphorus in farmland soils by GIS technology: A case study of Taining County in Fujian[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2): 326-336.
- [7] 汪玉,赵旭,王磊,等. 太湖流域稻麦轮作农田磷素累积现状及其环境风险与控制对策[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 829-835. WANG Y, ZHAO X, WANG L, et al. Accumulation, environmental risks and control of phosphorus in rice/wheat rotation farmland in Taihu Lake watershed[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5): 829-835.
- [8] 丁文斌. 紫色土坡耕地耕层土壤质量诊断及调控途径研究[D]. 重庆:西南大学, 2017. DING W B. Study on soil quality diagnosis and

- regulation approach of cultivated land in purple slope farmland[D]. Chongqing:Southwest University, 2017.
- [9] 张健乐, 史东梅, 刘义, 等. 土壤容重和含水率对紫色土坡耕地耕层抗剪强度的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 162-167, 174. ZHANG J L, SHI D M, LIU Y, et al. Effects of soil bulk density and water content on shear strength of cultivated-layer in purple soil sloping farmland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(3): 162-167, 174.
- [10] 娄义宝. 侵蚀条件下紫色土坡耕地耕层质量变化特征及适宜性研究[D]. 重庆:西南大学, 2019. LOU Y B. Study on quality characteristics and suitability of plough layer of purple slope farmland under erosion condition[D]. Chongqing:Southwest University, 2019.
- [11] 蒋平. 紫色丘陵区坡耕地耕层适宜性诊断研究[D]. 重庆:西南大学, 2016. JIANG P. Diagnosis on suitability of cultivated-layer on slope farmland in purple hilly area[D]. Chongqing:Southwest University, 2016.
- [12] 黄利玲, 王子芳, 高明, 等. 三峡库区紫色土旱坡地不同坡度土壤磷素流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 30-33. HUANG L L, WANG Z F, GAO M, et al. Study on phosphorus loss characteristics from different slopes in purple soil sloping upland of Three Gorges Reservoir region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(1): 30-33.
- [13] 许峰, 蔡强国, 吴淑安. 等高植物篱在南方湿润山区坡地的应用——以三峡库区紫色土坡地为例[J]. 山地学报, 1999, 17(3): 193-199. XU F, CAI Q G, WU S A. The application of the contour hedgerows in the humid mountainous areas of south China: Taking the purple soil slope land in the Three Gorges Reservoir area as an example[J]. *Journal of Mountain Science*, 1999, 17(3): 193-199.
- [14] 谢雪东, 倪九派, 周川. 三峡库区坡耕地农桑系统对径流拦截和氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 66-69, 94. XIE X D, NI J P, ZHOU C. Effects of configuration mode of crop-mulberry system in slope cropland on runoff interception and loss of nitrogen and phosphorus in the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(5): 66-69, 94.
- [15] SUN H, TANG Y, XIE J S. Contour hedgerow intercropping in the mountains of China: A review[J]. *Agroforestry Systems*, 2008, 73(1): 65-76.
- [16] 王幸. 三峡库区几种植物篱效益研究[D]. 北京:北京林业大学, 2011. WANG X. Study on benefits of hedgerows in Three Gorges Reservoir area[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.
- [17] 李军健. 不同种植模式下紫色土坡耕地水分及养分流失特征研究[D]. 重庆:西南大学, 2006. LI J J. Water status and nutrient leaching in purple soils on slope under different cropping modes[D]. Chongqing:Southwest University, 2006.
- [18] 史东梅, 卢喜平, 刘立志. 三峡库区紫色土坡地桑基植物篱水土保持作用研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 75-79. SHI D M, LU X P, LIU L Z. Study on functions of soil and water conservation by mulberry hedgerow intercropping of purple soil sloping farmland in Three Gorges Reservoir region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(3): 75-79.
- [19] 张洋, 樊芳玲, 周川, 等. 三峡库区农桑配置对地表氮磷流失的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 189-201. ZHANG Y, FAN F L, ZHOU C, et al. Effects of crop/mulberry intercropping on surface nitrogen and phosphorus losses in Three Gorges Reservoir area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(1): 189-201.
- [20] 蒲玉琳. 植物篱-农作模式控制坡耕地氮磷流失效应及综合生态效益评价[D]. 重庆:西南大学, 2013. PU Y L. Effects of hedgerow-crop patterns on controlling nitrogen and phosphorus runoff and evaluation of comprehensive ecological benefits in slope farmland[D]. Chongqing:Southwest University, 2013.
- [21] 刘月娇, 倪九派, 张洋, 等. 三峡库区紫色土旱坡地农桑配置模式对土壤养分的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(12): 38-45. LIU Y J, NI J P, ZHANG Y, et al. Effects of different crop-mulberry intercropping systems on nutrients in arid purple soils in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(12): 38-45.
- [22] TIAN L L, AKIYAMA H, ZHU B, et al. Indirect N₂O emissions with seasonal variations from an agricultural drainage ditch mainly receiving interflow water[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 242: 480-491.
- [23] 高朝伙, 徐学选, 赵娇娜, 等. 土壤大孔隙流研究现状与发展趋势[J]. 生态学报, 2014, 34(11): 2801-2811. GAO C X, XU X X, ZHAO J N, et al. Review on macropore flow in soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(11): 2801-2811.
- [24] 花可可, 朱波, 王小国. 紫色土坡耕地可溶性有机碳径流迁移特征[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 81-88. HUA K K, ZHU B, WANG X G. Characteristics of dissolved organic carbon transport via overland flow and interflow on sloping cropland of purple soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(5): 81-88.
- [25] 张爽, 李光兵, 汪志辉, 等. 北碚区近50年日照时数变化特征分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2013, 38(11): 127-131. ZHANG S, LI G B, WANG Z H, et al. Analysis of variation characteristics of sunshine duration in Beibei District in recent 50 years[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2013, 38(11): 127-131.
- [26] 黎建强, 张洪江, 陈奇伯, 等. 长江上游不同植物篱系统土壤抗冲、抗蚀特征[J]. 生态环境学报, 2012, 21(7): 1223-1228. LI J Q, ZHANG H J, CHEN Q B, et al. Anti-scourability and anti-erodibility of soil under different hedgerow systems in upper reaches of Yangtze River[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2012, 21(7): 1223-1228.
- [27] 徐佩, 王玉宽, 傅斌, 等. 紫色土坡耕地壤中产流特征及分析[J]. 水土保持通报, 2006, 26(6): 14-18. XU P, WANG Y K, FU B, et al. Interflow occurrence characters and their analysis on slope cropland with purple soil[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006, 26(6): 14-18.
- [28] 宋想斌, 方向京, 李贵祥, 等. 壤中流对紫色土坡面养分流失影响研究进展[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2015, 30(2): 311-316. SONG X B, FANG X J, LI G X, et al. The research progress of impact of interflow on the nutrient loss of purple soil slope[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2015, 30(2): 311-316.
- [29] 黎建强, 张洪江, 陈奇伯, 等. 三峡库区不同植物篱生态效益评价[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(3): 373-379. LI J Q, ZHANG H J, CHEN Q B, et al. Eco-benefits assessment of hedgerow systems with different categories and species in the Three Gorges Reservoir area

- [J]. *Resources and Environment of the Yangtze River Basin*, 2014, 23(3):373-379.
- [30] 汪三树, 刘德忠, 史东梅, 等. 紫色丘陵区坡耕地生物埂的蓄水保土效应[J]. 中国农业科学, 2013, 46(19):4091-4100. WANG S S, LIU D Z, SHI D M, et al. Analysis on the soil and water conservation benefits of four bunds at edges of sloping land in purple hilly area[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(19):4091-4100.
- [31] 李卫国, 杨吉华, 冀宪领, 等. 不同桑树品种水分生理特性的研究[J]. 蚕业科学, 2003, 29(1):24-27. LI W G, YANG J H, JI X L, et al. Study on the characteristics of water physiology of different varieties of mulberry[J]. *Science of Sericulture*, 2003, 29(1):24-27.
- [32] 邢丹, 肖玖军, 韩世玉, 等. 基于稳定同位素的石漠化地区桑树根系水来源研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15):77-84. XING D, XIAO J J, HAN S Y, et al. Water absorption source analysis of mulberry roots based on stable isotopes in rocky desertification area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(15):77-84.
- [33] 韩晓飞. 三峡库区农田土壤无机磷动态变化及其迁移特征[D]. 重庆: 西南大学, 2016. HAN X F. Study on dynamic changes of soil inorganic phosphorus and their migration characteristics of the farmland in the Three Gorges Reservoir area, China[D]. Chongqing: Southwest University, 2016.
- [34] MCDOWELL R W, NORRIS M, COX N. Using the provenance of sediment and bioavailable phosphorus to help mitigate water quality impact in an agricultural catchment[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2016, 45(4):76-85.
- [35] PISANI O, LIEBERT D, BOSCH D D, et al. Element losses from fields in conventional and conservation tillage in the Atlantic Coastal Plain, Georgia, United States[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 75(3):376-386.
- [36] LIU Y, TAO Y, WAN K Y, et al. Runoff and nutrient losses in citrus orchards on sloping land subjected to different surface mulching practices in the Danjiangkou Reservoir area of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 110:34-40.
- [37] 朱浩宇, 贾安都, 王子芳, 等. 化肥减量对紫色土坡耕地磷素流失的影响[J]. 中国环境科学, 2021, 41(1):342-352. ZHU H Y, JIA A D, WANG Z F, et al. Effects of chemical fertilizer reduction on phosphorus loss in slope purple soil farmland[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(1):342-352.

(责任编辑:宋潇)