

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.035

晏世杰, 段剑, 沈发兴, 等. 套种药材对红壤坡地幼龄油茶园产流产沙及氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 70-78.

YAN Shijie, DUAN Jian, SHEN Faxing, et al. Effects of interplanting medicinal herbs on runoff, sediment and nitrogen and phosphorus losses in young oil tea plantation on red soil sloping field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 70-78.

套种药材对红壤坡地幼龄油茶园产流产沙及氮磷流失的影响

晏世杰^{1,2,3}, 段剑^{1,2}, 沈发兴^{1,2}, 谢东杰^{1,2,4}, 郑海金^{1,2}

(1. 流域水土保持江西省重点实验室, 江西省水利科学院, 南昌 330029; 2. 江西省鄱阳湖流域生态水利技术创新中心, 南昌 330029; 3. 江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045; 4. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要: [目的] 为探究不同药材及其套种模式对红壤坡地幼龄油茶园水—土—养分流失的影响及其适用性。[方法] 在中药材种植大省江西开展幼龄油茶园径流小区原位观测试验, 设置套种地上收获药材艾(YA)、套种地下收获药材郁金+植物篱(YY)、传统水土保持措施秸秆覆盖+墒沟(YC)、清耕对照(CK), 进行逐场次降雨下产流产沙、氮磷流失观测及综合效益评估。[结果] (1) 除清耕模式外, 所有有保护性措施的模式均显著减少幼龄油茶园水—土—养分流失。与 CK 相比, YA、YC 和 YY 的减流效应分别为 15.22%, 67.30%, 64.12%, 减沙效应分别为 72.63%, 97.19%, 98.19%, 总氮流失量降低幅度分别为 57.86%, 96.53%, 95.87%, 总磷流失量降低幅度分别为 32.18%, 98.62%, 98.86%; (2) 中雨、大雨和暴雨 3 种雨型下, 套种郁金+植物篱模式均能发挥很好的水土保持和养分拦截效应, 减流、减沙效应分别为 45.11%~83.25% 和 96.08%~99.02%; 减氮、减磷效应分别为 83.02%~99.14% 和 88.38%~99.65%; 而套作艾草模式则只在中雨和大雨中的养分拦截效应较好, 在暴雨中的水土保持效应不明显; (3) 基于 TOPSIS 模型, 对 4 种模式的综合效益进行评估, 排名为 YY(0.48) > YC(0.29) > YA(0.23) > CK(0.02)。[结论] 地下收获药材郁金+植物篱模式是试验中控制红壤坡地幼龄油茶园土壤侵蚀和养分流失最经济高效的管理措施; 选用收获期与水土流失风险期错峰的药材将更好地发挥套作的生态效益, 可避免幼龄油茶园产生额外的养分流失。

关键词: 油茶园; 套种; 中药材; 水土流失; 养分流失; 水土保持

中图分类号: S157.2 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242-(2024)06-0070-09

Effects of Interplanting Medicinal Herbs on Runoff, Sediment and Nitrogen and Phosphorus Losses in Young Oil Tea Plantation on Red Soil Sloping Field

YAN Shijie^{1,2,3}, DUAN Jian^{1,2}, SHEN Faxing^{1,2}, XIE Dongjie^{1,2,4}, ZHENG Haijin^{1,2}

(1. Jiangxi Key Laboratory of Watershed Soil and Water Conservation, Jiangxi Academy of Water Sciences and Engineering, Nanchang 330029, China; 2. Jiangxi Provincial Technology Innovation Center for Ecological Water Engineering in Poyang Lake Basin, Nanchang 330029, China; 3. College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 4. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects and applicability of different intercropping patterns of medicinal herbs on water, soil, and nutrient losses in young oil tea gardens on red soil slopes. [Methods] Runoff plot experiments were carried out in Jiangxi Province, a major province for cultivating traditional Chinese medicinal herbs, with interplanting above-ground harvested medicinal herb of Ai pattern (YA), interplanting below-ground harvested medicinal herb of Yujin + vegetative hedges pattern (YY), traditional conservation measure of straw mulching + moisture furrow pattern (YC), and clean tillage pattern for control (CK). Observation of runoff, sediment, nitrogen and phosphorus losses under natural rainfall events, and comprehensive

收稿日期: 2024-09-16 修回日期: 2024-09-27 录用日期: 2024-10-14 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-12-09

资助项目: 江西省“科技+水利”联合计划项目(2022KSG01001); 国家自然科学基金项目(42367050); 江西省“双千计划”项目(JXSQ2023201069)

第一作者: 晏世杰(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事植物保护与水土保持研究。E-mail: 1637327267@qq.com

通信作者: 郑海金(1978—), 女, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: haijinzheng@163.com

benefit evaluation of each pattern were carried out. [Results] (1) All conservation measures significantly reduced water, soil, and nutrient losses in young oil tea plantations, except for the clean-tillage mode. Compared with CK, the runoff reduction effects of YA, YC and YY amounted to 15.22%, 67.30% and 64.12%, respectively; the sediment reduction effects amounted to 72.63%, 97.19% and 98.19%, respectively; the decrease in total nitrogen (TN) loss was 57.86%, 96.53% and 95.87%, respectively; and the decrease in total phosphorus (TP) loss was 32.18%, 98.62% and 98.86%, respectively. (2) Under moderate rain, heavy rain and rainstorm, YY pattern all showed good soil and water conservation and nutrient interception effects, with runoff reduction effects and sediment reduction effects ranged from 45.11% to 83.25% and 96.08% to 99.02%, respectively. The nitrogen and phosphorus reduction effects ranged from 83.02% to 99.14% and 88.38% to 99.65%, respectively; whereas YA pattern only had a better nutrient interception effect under moderate and heavy rain, the soil and water conservation effect under heavy rain was not obvious. (3) Based on the TOPSIS model, the comprehensive benefits of the four patterns were evaluated and ranked as YY (0.48) > YC (0.29) > YA (0.23) > CK (0.02). [Conclusion] Below-ground harvesting of medicinal herb Yujin + plant hedge mode is the most economical and effective management measure to control soil erosion and nutrient losses of young oil tea plantation on red soil slope in this experiment. Selecting medicinal herbs with staggered harvesting period and erosion risk period will better utilize the ecological benefits of interplanting medicinal herbs, and can avoid additional nutrient losses of young oil tea plantations.

Keywords: oil tea plantation; intercropping; Chinese medicinal herbs; soil erosion; nutrient loss; soil and water conservation

Received: 2024-09-16

Revised: 2024-09-27

Accepted: 2024-10-14

Online(www.cnki.net): 2024-12-09

油茶是世界四大木本油料植物之一,也是我国特有的木本食用油料树种。当前,我国油茶种植面积已达 466 万 hm^2 ,油茶籽产量居世界前列^[1],规划 2025 年全国油茶种植面积达 600 万 hm^2 以上,茶油产能达 200 万 t。在油茶园开发初期,地表大面积裸露,加上多采用传统的清耕制度,易导致严重的土壤侵蚀与氮磷等养分流失,不仅引发土壤退化和水质污染,而且影响果实产量及品质^[2]。套种是控制坡地水土流失和养分流失的重要措施,被广泛应用于水土流失综合治理^[3-4]。已有研究^[5]表明,在山地果园套种黑麦草分别减少 36.4% 的径流量及 55.2% 的总氮、58.5% 的总磷流失量;套种白三叶后使土壤氮和磷流失量分别减少 35.5% 和 40.0%^[6]。目前套种的植物品种以绿肥、农作物等为主,生态效益虽好但通常经济效益低下,兼顾生态和生产功能的水土保持套种技术还有待丰富^[7]。

药用类植物资源是我国高效水土保持植物资源的重要组成部分。我国南方中药材生产省份如江西先后提出要加快林下经济发展和打造中医药强省,发展林下经济和做大做强中药种植业分别是其重要的举措。新时期水土流失治理以生态—生产功能提升为重点,本文以套种不同收获部位和收获期中药材的幼龄油茶园为研究对象,分析各套种模式下红壤坡地

幼龄油茶园产流产沙、氮磷流失及其经济产出,评价各套种模式的减流减沙、拦截养分流失和增加附加经济价值等综合效益,提出针对性套种技术和应对措施,以期丰富红壤坡地水土流失综合治理技术体系,为区域水土保持与生态建设提供新思路新途径。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验布设在江西省九江市德安县江西水土保持生态科技园(115°42'38"—115°43'06"E, 29°16'37"—29°17'40"N)。园区属亚热带湿润季风气候区,年平均气温 16.7 °C,年平均无霜期 249 天,年日照时间 1 650~2 100 h,气候条件有利于油茶等农业生产;多年平均降水量 1 436.8 mm,主要集中在 4—8 月,占全年降水量的 62.9%;地貌多为浅丘低岗,坡度 5°~25°,海拔 30~100 m;地带性植被为亚热带常绿阔叶林,土壤为第四纪红黏土发育的红壤,呈酸性至微酸性。园区位于我国红壤的中心区域,气候、土壤、地形等条件在江西省和南方红壤区具有代表性。试验前试验区土壤基本理化性质:pH 为 6.58,有机质 7.80 g/kg,全氮 0.59 g/kg,全磷 0.32 g/kg,全钾 19.07 g/kg,碱解氮 34.2 mg/kg,速效磷 5.66 mg/kg。

1.2 试验设计

在坡度为 8° 的同一坡面,布设 8 个径流试验小

区,每个小区宽 2 m,长 10 m。在每个小区周边设置砖砌围埂,围埂高出地表 30 cm,埋入地下 60 cm,以防止串流;小区下部修建集水槽,以承接小区径流泥沙,并通过 PVC 管引入径流池。试验共设置 4 种处理(表 1),分别为油茶园套种地上收获药材艾模式(YA)、油茶园套种地下收获药材郁金+药用植物黄花菜植物篱模式(YY)、油茶园传统水保措施秸秆覆盖+墒沟模式(YC)、油茶园清耕模式(CK)。为保证坡度、土壤等本底条件一致,试验场地受到一定限制,故每个处理重复 2 次。每个小区油茶树单株成行种

植在小区中间,间距 2 m,每个小区共 5 株油茶树,品种为长林 4 号,树龄 3 年。油茶树的施肥、除杂等田间管理均按当地农民生产习惯。每个小区施用有机肥(粉状)1 500 kg/hm²+复合肥 150 kg/hm²,用作基肥,在整地前撒施于地表,然后浅翻 25 cm。种植药用植物的小区,参照当地农户习惯进行药材种植和收获管理。其中:艾草于 7 月 10 日首次收割,12 月再次收割;郁金于地上部位枯萎时收割,即 12 月上旬采收,每次采收均称重、记录。油茶和药材种植时间为 2023 年 3 月 27 日,随即启动试验观测。

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

试验编号	配置模式	处理详情	备注
CK	清耕对照	翻耕 25 cm 深;及时人工清除杂草,半个月清理 1 次,确保除油茶外其他植被覆盖率低于 5%	无药用植物、无水土保持措施
YC	秸秆覆盖+墒沟(传统水保措施)	翻耕 25 cm 深,按 0.75 g/m ² 覆盖量覆盖稻草秸秆;同时,在油茶园按照 3 m 间隔开 2 条墒沟,墒沟深 30 cm,宽 20 cm,以进一步拦截坡面径流泥沙	无药用植物、有水土保持措施
YA	套种艾草(地上收获、每年收获 2 次)	在油茶园沿等高线开沟,沟距 25 cm,在沟内单根接龙种植艾草,每亩用根状茎栽植,约 6 000 株/hm ² ,种植深度 3~5 cm	有药用植物、无水土保持措施
YY	套种郁金+植物篱(地下收获、每年收获 1 次)	在油茶园种苗移植郁金,穴植 100 000 株/hm ² 。为防止药材收获造成水土流失,故配套等高植物篱,即在小区下坡位贴近集流槽端沿等高线双排种植黄花菜,每排 6 丛,株行距约 33 cm	有药用植物、有水土保持措施

1.3 样品采集与测定方法

(1)降雨—产流—产沙观测:试验期(2023 年 3 月 27 日至 12 月 31 日)进行逐场次自然降雨条件下的产流、产沙观测,以 6 h 为降雨间隔时间。采用美国 Onset 公司的 RG3-M 自计式雨量筒自动记录大气降雨过程数据,分辨率 0.2 mm。每次降雨结束后,记录径流池壁的水位,由预先率定的径流池内壁长、宽数据计算得到地表产流量;待各径流池中的水静置 4 h 后取 500 mL 上清水样,现场加 1 滴浓硫酸固定后立即带回实验室放入 4 ℃ 冰箱保存,在 72 h 内分析径流样氮磷含量;然后将径流池中水充分搅拌均匀,迅速取 500 mL 径流至铝盒,采用烘干法测定径流含沙量;最后将径流池中水放干,将池底和集流槽中泥沙先收集称重并记录,然后充分混匀收集 500 g 泥沙样装袋、风干备用,进行泥沙样氮磷含量测定。

(2)氮磷含量检测:径流样本经 0.45 μm 滤膜过滤后,测定溶解态总氮、总磷。泥沙样风干后进行分析,测定总氮、总磷。径流样品中的总氮和总磷分别按连续流动—盐酸萘乙二胺分光光度法(H 667—2013)^[8]和连续流动—钼酸铵分光光度法(HJ 670—2013)^[9]测定;泥沙样品中的总氮分析按照凯氏定氮法测定(LYT 1228—2015)^[10],总磷分析按照酸溶法测定(LYT 1232—2015)^[11]。每个小区氮磷的流失量由其氮磷含量乘以径流量/泥沙量得出,径流系数由径流量除以降雨量求得。

(3)药材经济收益:药材单价参考采收上车价为准,

即鲜重单价。收割后称重得每个小区的药材收获鲜重,精度 10 g,乘以药材单价即得每个小区药材的经济收益。

1.4 基于 Entropy-TOPSIS 模型的多目标评价

TOPSIS 法(technique for order preference by similarity to ideal solution)为逼近理想解排序法,国内常简称为优劣解距离法。根据评价对象与理想目标的接近程度进行排序的方法,用来评价现有对象的相对优势和劣势^[12]。TOPSIS 法是一种常用的综合评价方法,能充分利用原始数据的信息,其结果能精确地反映各评价方案之间的差距^[13]。本文将 4 个试验模式(n)设为可选方案,以泥沙流失量、地表径流量、总氮流失量、总磷流失量和药材经济效益 5 个指标(m)为目标变量构建原始矩阵 X ,具体评价过程与计算方法见文献[12-13]。

1.5 数据处理

采用 Excel 2019 软件进行数据处理,采用方差分析(ANOVA)或一般单变量线性模型来检测处理对测量变量的影响。如果发现有明显的处理效应($p < 0.05$),则采用最小显著性差异(LSD)来检验处理平均值之间的比较。统计程序使用 SPSS 13.0 for Windows 软件包和 Matlab 2019 软件进行,使用 Origin 2022 软件和 Python 3.7 软件绘图。

2 结果与分析

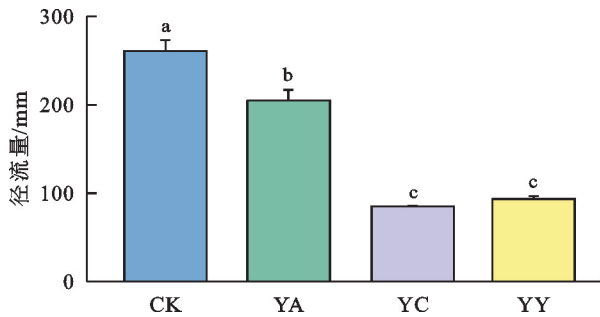
2.1 试验期降雨特征

收集到试验期全部降雨数据,共发生产流产沙的

降雨即侵蚀性降雨 28 场,总降雨量为 780.9 mm。在 28 场侵蚀性降雨中,依据中国气象局 2012 年发布的标准进行降水等级划分,可划分为中雨 12 场、大雨 12 场、暴雨 4 场。4 场暴雨均发生在 7—9 月,占侵蚀降雨量的 24.10%;大雨多发生在 4,9 月,占侵蚀降雨量 40.15%;中雨则多发生在 4—6 月,占总侵蚀降雨量的 35.75%(图 1)。

2.2 不同配置模式产流产沙特征

由图 2 可知,试验期保护性措施组 YA、YC 和 YY 的径流量和泥沙流失量相比于对照组 CK 均显著降低($p < 0.05$),其中 YC 和 YY 的径流量和泥沙流失量均显著低于 CK 和 YA($p < 0.05$),但 YC 和 YY 组间差异不显著($p > 0.05$)。说明所有有保护性措施的配置模式对红壤丘陵区幼龄油茶园的产流产沙产生显著影响。试验期 CK、YA、YC 和 YY 的径流总量分别为 254.77,215.56,85.39,90.21 mm;径流系数分别为 32.57%,27.62%,10.94%,11.56%;泥沙流失总量分别为 4 707.47,1 288.34,132.25,85.09



注:图柱上方不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

图 2 不同配置模式地表径流量和泥沙流失量

Fig.2 Surface runoff and sediment loss in different configuration patterns

4 个处理在 28 场侵蚀性降雨下共产生 645.45 mm 的径流量,其中中雨、大雨、暴雨 3 种雨型的产流量分别为 141.65,255.96,247.84 mm;28 场侵蚀性降雨下共导致 6 213.22 t/km² 的泥沙流失量,其中中雨、大雨、暴雨 3 种雨型的泥沙流失量分别为 1 080.47,1 198.91,3 933.84 t/km²。可见,水土流失尤其是侵蚀泥沙主要发生在雨量大、雨强度高、历时短的暴雨雨型中。不同配置模式产流产沙对降雨特征的响应也存在差异,由图 3 可知,中雨和大雨的径流量和侵蚀量整体占比较为相似,说明各配置对中雨和大雨响应相近;因暴雨条件下 YY 和 YC 减流减沙效益突出,YY 径流量和侵蚀量占比分别降至 8% 和 1%;各雨型下 CK 的产流产沙量占比始终最大。

由表 2 可知,以 CK 为参照,中雨下,YA、YC 和 YY 的减流效益分别为 32.98%,57.80%和 56.69%,减沙效益分别为 85.89%,93.03%和 96.08%;大雨下,三者的减流效益分别为 10.21%,46.34%和 45.11%,减沙效益分别为

t/km²。其中,CK 达到中度侵蚀等级,YA 达到轻度侵蚀等级,YC 和 YY 均为微度侵蚀等级。以 CK 为参照,计算得到各配置模式对 28 场降雨产流产沙总量的拦截效果发现,YC 和 YY 的减流减沙效果较好,减流效益分别达 67.30%和 64.12%,减沙效益分别达 97.19%和 98.19%,YA 的减流减沙效益仅为 15.22%和 72.63%。

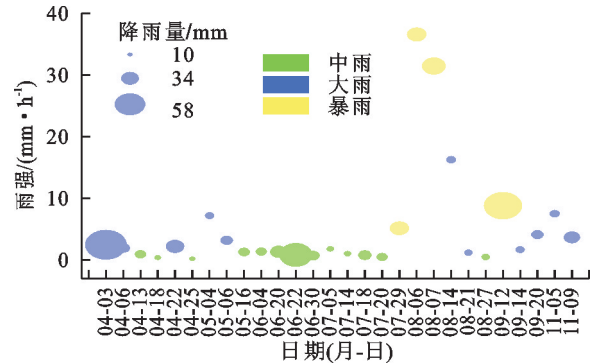
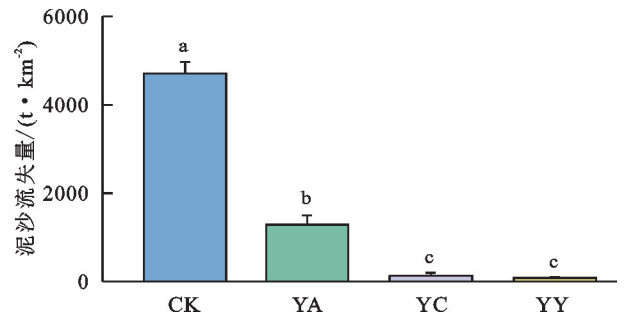


图 1 试验期降雨特征

Fig.1 Rainfall characteristics during the test period



88.23%,98.73%和 96.95%;暴雨下,三者的减流效益分别为 10.19%,86.05%和 83.25%,减沙效益分别为 62.77%,97.91%和 99.02%。总体而言,各模式的减沙效果大于减流效果,尤其是在短历时、高强度的暴雨中,减沙效益均达到 60% 以上。表明所有有保护性措施的配置模式都具有一定的水土流失防治能力。但不同套作配置模式在不同雨型下有所差异,如 YY 减沙效益在各雨型表现均 > 96.08%,最大可达 99.02%,减流效益为 45.11%~83.25%;而 YA 的水土保持效应在各雨型中则不太稳定,减流效益为 10.19%~32.98%,减沙效益为 62.77%~88.23%,且各效益均低于 YY。

2.3 不同配置模式氮磷流失特征

由表 3 可知,试验期 28 场自然降雨条件下,CK 中的 TN 和 TP 均高于其余 3 个处理,YA、YC 和 YY 的氮磷流失量相比于对照 CK 均显著降低 ($p < 0.05$),TN 流失量平均降低幅度分别为 57.80%,96.46%和 95.87%,TP 流失量平均降低幅度分别为 32.18%,

98.62%和 98.86%。但观测中也发现,少数降雨场次 YA 氮磷流失量较高,特别是 YA 的 TP 流失量与

CK 接近,可能与试验中 7 月 YA 处理收割过 1 次艾草、残茬分解有关。

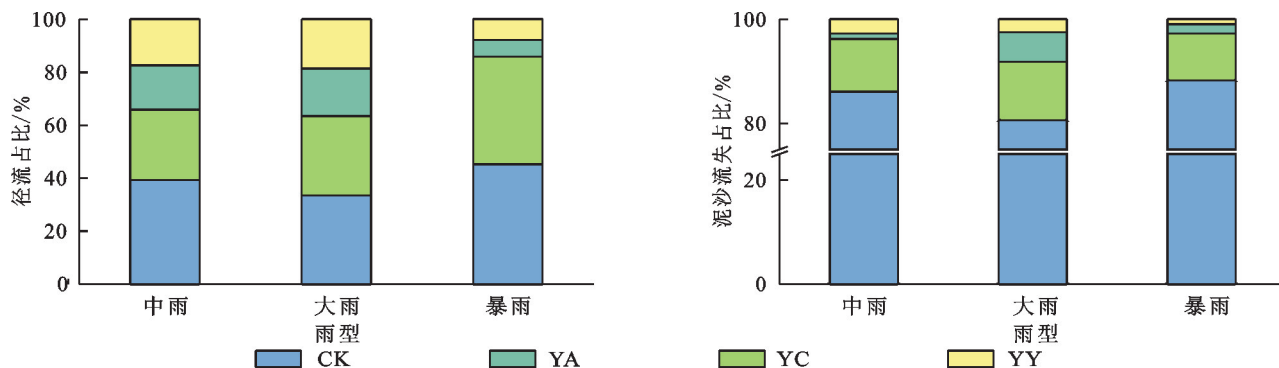


图 3 不同配置模式地表径流和泥沙流失占比

Fig.3 Percentage of surface runoff and sediment loss for different configuration patterns

表 2 不同配置模式各雨型下减流减沙效应

Table 2 Effects of runoff and sediment reduction under different rainfall patterns in different configuration patterns

处理 编号	中雨		大雨		暴雨		中雨		大雨		暴雨	
	产流量/ mm	减流 效应/%	产流量/ mm	减流 效应/%	产流量/ mm	减流 效应/%	产沙量/ (t·km ⁻²)	减沙 效应/%	产沙量/ (t·km ⁻²)	减沙 效应/%	产沙量/ (t·km ⁻²)	减沙 效应/%
CK	56.09	—	85.80	—	112.39	—	870.65	—	1 033.02	—	2 803.80	—
YA	37.59	32.98	77.03	10.21	100.94	10.19	122.83	85.89	121.56	88.23	1 043.95	62.77
YC	23.67	57.80	46.04	46.34	15.68	86.05	60.68	93.03	13.09	98.73	58.54	97.91
YY	24.29	56.69	47.09	45.11	18.82	83.25	26.32	96.08	31.24	96.95	27.54	99.02

注:表中—表示 CK 作为对照相减相除,故无减流减沙效应。下同。

幼龄油茶园氮磷养分流失与降雨也有明显的相关性。试验期共产生 31.65 kg/hm² 的总氮流失,其中,中雨、大雨、暴雨的 TN 流失量分别为 4.62, 4.78, 22.21 kg/hm²; 产生 13.24 kg/hm² 的总磷流失,中雨、大雨、暴雨的 TP 流失量分别为 2.57, 1.64, 22.26 kg/hm²。可见,氮磷流失主要发生在降雨强度较大、降雨历时较短的暴雨中。不同配置模式氮磷流失对降雨特征的响应也存在差异,由图 4 可知,CK、YA、YC 和 YY 的总氮流失平均占比分别为 66.78%, 28.14%, 2.32% 和 2.76%, 总磷流失占比分别为 58.71%, 39.81%,

0.81% 和 0.67%。中雨雨型中,各配置模式均能明显减少氮磷流失,绝大部分的氮磷流失由 CK 产生,平均在 85% 以上;大雨雨型中,各配置模式的氮磷流失整体占比较为相似,说明各套作配置对大雨氮磷流失的响应相近;暴雨雨型中,YY 和 YC 养分流失拦截效应极强,特别是 YY 能将氮磷流失降至 1% 以下。从表 3 还可以看出, YA 的氮磷流失较高,甚至在径流中总磷流失量高于 CK,可能与 YA 处理 7 月药材收获有关,导致少数降雨场次 YA 的养分流失特别是 TP 流失量较高。

表 3 不同配置模式径流和泥沙携带的 TN、TP 流失量及其拦截效应

Table 3 Losses of TN and TP carried by runoff and sediment in different configuration patterns and their interception effects

处理 编号	TN/ (kg·hm ⁻²)	TP/ (kg·hm ⁻²)	TN/(kg·hm ⁻²)		TP/(kg·hm ⁻²)		减氮 效应/%	减磷 效应/%
			泥沙	径流	泥沙	径流		
CK	21.12a	7.77a	19.19	1.93	7.53	0.24	—	—
YA	8.91b	5.27b	7.18	1.73	5.02	0.25	57.80	32.18
YC	0.75c	0.11c	—	0.75	—	0.11	96.46	98.62
YY	0.87c	0.09c	—	0.87	—	0.09	95.87	98.86

注:同列不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

由表 4 可知,以 CK 为参照,中雨雨型下, YA、YC 和 YY 的减氮效益分别为 84.31%, 94.44% 和 92.18%, 减磷效益分别为 93.81%, 98.41% 和 99.01%; 大雨雨型下,三者的减氮效益分别为 57.83%, 83.65% 和 83.02%, 减磷效益分别为 53.75%, 86.81% 和 88.38%; 暴

雨雨型下,三者的减氮效益分别为 51.33%, 99.31% 和 99.14%, 减磷效益分别为 18.57%, 99.59% 和 99.65%。总体而言, YC 和 YY 模式的减氮减磷效果整体相近,但 YA 模式的减氮减磷效果相对较低。结果表明,与 CK 相比, YA、YY 和 YC 在 3 种雨型中都具有

减少氮磷流失的能力。但不同套作配置模式在不同雨型下有所差异,如 YY 减氮效益在各雨型表现均 > 83.02%,最大可达 99.14%,减磷效益为 88.38%~

99.65%;而 YA 的减氮减磷在仅在中雨雨型中效果较为显著,在大雨和暴雨雨型中减氮减磷效果不足 60%,甚至低于 20%。

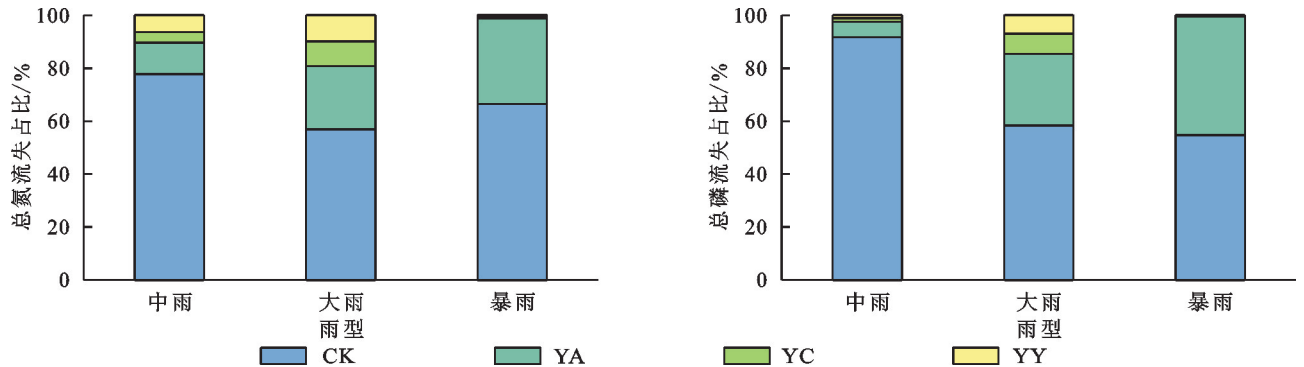


图 4 不同配置模式氮磷流失占比

Fig.4 Percentage of nitrogen and phosphorus losses in different configuration patterns

表 4 不同配置模式各雨型下减氮减磷效应

Table 4 Nitrogen and phosphorus reduction effects under different rainfall patterns in different configuration patterns

处理编号	中雨		大雨		暴雨		中雨		大雨		暴雨	
	TN/ (kg·hm ⁻²)	减氮 效应/%	TN/ (kg·hm ⁻²)	减氮 效应/%	TN/ (kg·hm ⁻²)	减氮 效应/%	TP/ (kg·hm ⁻²)	减磷 效应/%	TP/ (kg·hm ⁻²)	减磷 效应/%	TP/ (kg·hm ⁻²)	减磷 效应/%
	CK	3.61	—	2.72	—	14.78	—	1.18	—	0.48	—	6.11
YA	0.57	84.31	1.15	57.83	7.20	51.33	0.073	93.81	0.22	53.75	4.97	18.57
YC	0.20	94.44	0.45	83.65	0.10	99.31	0.019	98.41	0.063	86.81	0.025	99.59
YY	0.28	92.18	0.46	83.02	0.13	99.14	0.012	99.01	0.056	88.38	0.021	99.65

2.4 不同配置模式综合效益评价

根据试验期不同配置模式的收入-成本分析结果(表 5),在系统测算不同模式的经济效益、水土保持效益和养分拦截效益后,基于 Entropy-TOPSIS 模型,进一步对各模式的综合效益进行评估。由图 5 可

知,YY 套作药材+水土保持模式的综合评价指数最高为 0.477 1,其次是 YC 传统水土保持模式(0.290 6)和 YA 套作药材模式(0.230 8),最后是 CK 清耕对照(0.015 0),YY 在水土保持和养分拦截效益均与 YC 十分相近,且具有良好的经济效益。

表 5 不同配置模式的收入-成本分析

Table 5 Income-cost analysis for different configuration patterns

处理编号	收入		成本			经济效益/ (元·hm ⁻²)
	药材收获量/ (kg·hm ⁻²)	药材经济收益/ (元·hm ⁻²)	苗木支出/ (元·hm ⁻²)	栽收人工/ (元·hm ⁻²)	秸秆支出/ (元·hm ⁻²)	
YA	1 126.39	125 030.4	16 800.0	55 000.0	—	53 828.4
YC	—	—	—	550.0	48.0	—598.0
YY	1 366.65	307 500.0	149 850.0	55 000.0	—	103 248.0

注:药材单价参考以采收上车价为准,艾草 3.7 元/500 g,郁金 7.5 元/500 g;因黄花菜未到成熟期,故暂未统计入其成本与收益;由于本试验中有保护性措施处理小区的施肥和油茶树等管理与清耕小区一致,故经济效益为相对于清耕对照的经济效益。

3 讨论

套作通过增加地表覆盖度,起到遮盖阻挡的作用,不仅可以减弱溅蚀^[14-15],还能减缓坡面径流的流速,从而起到减流减沙的作用^[16-17]。套作系统丰富林木空隙地的土壤根系,对表层土起到固着作用,有利于其保持水土^[18-20],从而减少水土流失^[21]。已有研究还表明,农林复合经营的生态系统总物质丰富度远高于种植单一作物的林地,能为林下立地提供更好的土壤保持^[22-23]和水分固留效应^[24-27]。本研究结果验

证套作的减流减沙效果,发现幼龄油茶园套作药材配置模式的径流量和泥沙流失量相比于清耕对照均显著降低($p < 0.05$),能很好地减少幼龄油茶园的水土流失(图 2)。在不同雨型中,虽然套种药材配套植物篱措施(YY)的减流效应(45.11%~83.25%)比传统水保措施(YC)的减流效应(46.34%~86.05%)略低,但在减沙效应上则表现为 YY(96.08%~99.02%),略高于 YC(93.03%~98.73%)(表 2),而且 YY 具有明显的经济效益(表 5),故综合来看 YY 的效果更好(图 5)。而

YA 的水土保持效应明显低于 YY,可能与郁金比艾草地径较大、叶片宽大和覆盖度高,因而对地表截流和雨滴缓冲效果更好有关。可见,套作药材能显著增加幼龄油茶林的水土保持效应,避免茶油园开发初期因覆盖度低等导致的水土流失加剧。即使是套种地下收获的药材,

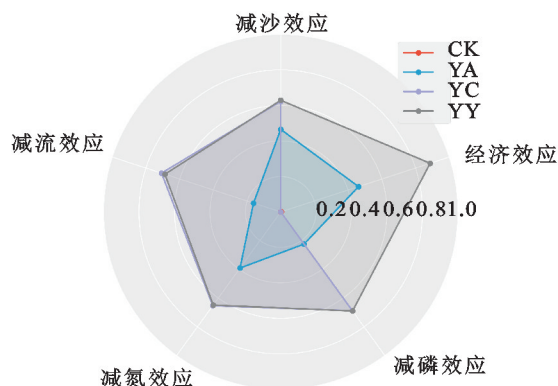


图 5 不同配置模式综合评价雷达图及综合评价指数

Fig.5 Comprehensive evaluation radar chart and comprehensive evaluation index for different configuration patterns

本试验中,3种套种处理(YA、YC和YY)的TN和TP均低于清耕对照处理(CK),YA、YC和YY的TN和TP流失量分别为CK的42.20%和67.82%,3.54%和1.38%,4.13%和1.14%(表3),表明套种处理有利于土壤养分的保持^[28]。主要是因为套作作物能促进表层土壤的养分吸收与固定,减少氮磷养分的流失^[29]。YY配置模式下的氮磷流失量相比于CK对照显著降低($p < 0.05$),总氮流失量降低平均幅度为95.87%,总磷流失量降低平均幅度为98.86%(表3),与前人^[30]研究一致。而YA与CK处理氮磷流失上相近,甚至在少数降雨下YA的TP流失量高于CK,可能是由于YA在7月水土流失高风险期刈割、残茬分解,产生养分流失。在不同雨型中,YY减氮效益均 $> 83.02\%$,最大可达99.14%,减磷效益为88.38%~99.65%(表4);而YA减氮减磷效益较低,并且在水土流失高风险期收获后,产生额外的氮磷流失,使得其氮磷流失量在收获后一段时间内大于CK。说明幼龄油茶园采取套种药材模式产生的减氮减磷效益与药材收获期有显著关系,选在水土流失风险期收割的作物套种,将使油茶园产生额外的养分流失。

尽管已有研究^[26,28]对林下套种作物进行探索,但大多只单一地研究套作模式的生态效益,考虑经济效益还显不足。本研究基于TOPSIS模型,对红壤丘陵区4种幼龄油茶-药材套作配置模式的减流、减沙、减氮、减磷及经济效益进行综合评价发现,油茶套种郁金+植物篱模式比传统清耕模式的减流减沙和养分流失拦截效益有显著提升,也比秸秆覆盖+墒沟的传统水保措施模式的综合效益更高(图5),为该红壤丘陵幼龄油茶园林下套作的发展与种植模式提供科

在配有植物篱的情况下也能产生很好的水土保持效益。本研究还发现,套作艾草模式在水土流失风险期(7月)收割后,导致其水土保持效果削弱,虽然后期得到一定恢复,仍建议水土流失高风险期收割该类药材时,宜配套覆盖、植物篱等水土保持措施。

学支撑。但郁金生长较快,地上植株茂盛,不宜种植过密,以免侵占油茶生境。

4 结论

(1)与清耕对照相比,所有有保护性配置模式都有效地减少径流泥沙量和氮磷养分流失量。其中:套作艾草模式和套种郁金+植物篱模式分别减少地表径流15.22%和64.12%,减少侵蚀泥沙72.63%和98.19%,减少总氮养分流失57.80%和95.87%,减少总磷流失量32.18%和98.86%。

(2)不同雨型下,套种郁金+植物篱模式均能发挥很好的水土保持和养分拦截效应,而套作艾草模式则只在中雨和大雨中的养分拦截效应较好,在暴雨中的水土保持效应不明显。

(3)基于TOPSIS模型综合评价指数的表现为 $YY > YC > YA > CK$ 。

(4)本研究发现,合理套种郁金+植物篱模式是本试验条件下控制红壤坡地幼龄油茶园土壤侵蚀和养分流失最经济有效的管理措施,不仅可缓解幼龄油茶园严重的水土流失问题,还可获得额外的经济效益,弥补开发初期产出低的不足。选用收获期与水土流失风险期错峰的药材,将更好地发挥套种的生态效益,可避免幼龄油茶园产生额外的养分流失。

参考文献:

- [1] 周松秀,刘兰芳,王鹏,等.南方红壤丘陵区油茶种植的气候适应性特征:以湖南省常德市为例[J].生态科学,2015,34(1):61-67.
ZHOU S X, LIU L F, WANG P, et al. The features of the climate adaptability about *Camellia oleifera* planting in hilly red soil region of Southern China: A case study of

- Changning City Hunan Province[J]. *Ecological Science*, 2015, 34(1): 61-67.
- [2] 丁怡飞,曹永庆,姚小华,等.油茶间作不同绿肥对土壤养分流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 179-183.
DING Y F, CAO Y Q, YAO X H, et al. Effects of intercropping with different green manures on soil nutrient loss in camellia oleifera field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(2): 179-183.
- [3] 钟珍梅,李春燕,邢世和,等.果园红壤供氮水平季节性变化及对长期套种绿肥的响应研究[J]. *草地学报*, 2024, 32(8): 2514-2522.
ZHONG Z M, LI C Y, XING S H, et al. Seasonal variation of nitrogen supply level in soil of orchard and its response to interplanting green manure[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(8): 2514-2522.
- [4] YUAN Y P, BINGNER R L, LOCKE M A. A Review of effectiveness of vegetative buffers on sediment trapping in agricultural areas[J]. *Ecohydrology*, 2009, 2(3): 321-336.
- [5] 俞巧钢,叶静,马军伟,等.山地果园套种绿肥对氮磷径流流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 6-10.
YU Q G, YE J, MA J W, et al. Effects of green manure planting on nitrogen and phosphorus runoff losses in mountainous orchard[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2): 6-10.
- [6] LI H Y, ZHU N Y, WANG S C, et al. Dual benefits of long-term ecological agricultural engineering: Mitigation of nutrient losses and improvement of soil quality[J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 721: e137848.
- [7] DUAN J, LIU Y J, YANG J, et al. Role of groundcover management in controlling soil erosion under extreme rainfall in citrus orchards of Southern China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 582: e124290.
- [8] 中华人民共和国生态环境部. HJ 667—2013, 水质总氮的测定连续流动-盐酸萘乙二胺分光光度法[S].北京:中国环境出版社, 2012.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. HJ 667—2013, Determination of total nitrogen in water by continuous flow-naphthylethylenediamine hydrochloride spectrophotometric method[S]. Beijing: China Environment Press, 2012.
- [9] 中华人民共和国生态环境部. HJ 670—2013 水质磷酸盐和总磷的测定连续流动-钼酸铵分光光度法[S].北京:中国环境出版社, 2012.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. HJ 670—2013 Determination of phosphate and total phosphorus in water by continuous flow-ammonium molybdate spectrophotometry[S]. Beijing: China Environment Press, 2012.
- [10] 国家林业局. LY/T 1228—2015 森林土壤氮的测定[S].北京:国家林业局, 2015.
Nation Forestry Administration. LY/T 1228—2015 Determination of forest soil nitrogen[S]. Beijing: Nation Forestry Administration, 2015.
- [11] 国家林业局. LY/T 1232—2015 森林土壤磷的测定[S].北京:国家林业局, 2015.
Nation Forestry Administration. LY/T 1232—2015, Determination of phosphorus in forest soil[S]. Beijing: Nation Forestry Administration, 2015.
- [12] WANG H D, WANG X K, BI L F, et al. Multi-objective optimization of water and fertilizer management for potato production in sandy areas of Northern China based on TOPSIS[J]. *Field Crops Research*, 2019, 240: 55-68.
- [13] 孙鑫,张富仓,杨玲,等.基于熵权法和 TOPSIS 法优化马铃薯钾肥种类和滴灌量组合[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(2): 279-290.
SUN X, ZHANG F C, YANG L, et al. Optimization of potato potash fertilizer type and drip irrigation volume combinations based on entropy weight and TOPSIS methods[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2022, 28(2): 279-290.
- [14] 陶静,周晴晴,吴永红.植物篱系统对三峡库区水土与养分流失的协同控制作用[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2024, 70(1): 120-128.
TAO J, ZHOU Q Q, WU Y H. Synergic control of water, soil and nutrients loss by hedgerow systems in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2024, 70(1): 120-128.
- [15] 芦美,赵吉霞,李永梅,等.玉米间作马铃薯对根际土壤酶活性及团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(6): 123-132.
LU M, ZHAO J X, LI Y M, et al. Effects of intercropping of maize and potato on rhizosphere soil enzyme activity and aggregate stability[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(6): 123-132.
- [16] 张恒,高照良,牛耀彬,等.两种工程堆积体坡面细沟形态与产沙关系对比研究[J]. *土壤学报*, 2021, 58(1): 115-127.
ZHANG H, GAO Z L, NIU Y B, et al. Comparative study on the relationship between the morphology of fine furrows and sand production on the slopes of two kinds of engineered landfills[J]. *Journal of Soil Science*, 2021, 58(1): 115-127.
- [17] 芦杰丰,赵庆,李瑞栋,等.植物根系对鄂尔多斯矿区排土场边坡产流产沙特征的影响[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2024, 22(4): 109-118.
LU J F, ZHAO Q, LI R D, et al. Influence of plant root system on the characteristics of flow and sand production on the slope of Ordos mine discharge site[J]. *China Soil and Water Conservation Science*, 2024, 22(4): 109-118.
- [18] 唐梦云,杨开太,黄春晖,等.低丘林下药材种植对土壤养分及酶活性的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2022, 42(12): 142-152.
TANG M Y, YANG K T, HUANG C H, et al. Preliminary study on the effects of medicinal herbs planting on soil nutrients and enzyme activities in the understory

- of low hills[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2022, 42(12): 142-152.
- [19] GHESTEM M, VEYLON G, BERNARD A, et al. Influence of plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance[J]. *Plant and Soil*, 2014, 377(1): 43-61.
- [20] GHESTEM M, SIDLE R C, STOKES A. The influence of plant root systems on subsurface flow: Implications for slope stability[J]. *BioScience*, 2011, 61(11): 869-879.
- [21] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 等. 草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(3): 401-407.
ZHU B B, LI Z B, LI P, et al. Effect of grass coverage on sediment yield of rain on slope[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(3): 401-407.
- [22] NOVARA A, MINACAPILLI M, SANTORO A, et al. Real cover crops contribution to soil organic carbon sequestration in sloping vineyard[J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 652: 300-306.
- [23] DUCHEMIN M, HOGUE R. Reduction in agricultural non-point source pollution in the first year following establishment of an integrated grass/tree filter strip system in southern Quebec (Canada)[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 131(1/2): 85-97.
- [24] 汪雪, 刘晓静, 王静, 等. 连续间作下的紫花苜蓿/燕麦根系与碳氮代谢特性研究[J]. *草业学报*, 2024, 33(3): 85-96.
WANG X, LIU X J, WANG J, et al. Root and carbon-nitrogen metabolism characteristics of alfalfa-oat mixed stands under continuous intercropping[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(3): 85-96.
- [25] 廖义善, 唐常源, 袁再健, 等. 南方红壤区崩岗侵蚀及其防治研究进展[J]. *土壤学报*, 2018, 55(6): 1297-1312.
LIAO Y S, TANG C Y, YUAN Z J, et al. Research progress on Benggang erosion and its prevention measure in red soil region of southern China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(6): 1297-1312.
- (上接第 69 页)
- [28] JARRAY F, HERMASSI T, MECHEGUI M, et al. Long-term impact of soil and water conservation measures on soil erosion in a Tunisian semi-arid watershed[J]. *Land*, 2023, 12(8): e1537.
- [29] NIU Y H, WANG L, WAN X G, et al. A systematic review of soil erosion in citrus orchards worldwide[J]. *Catena*, 2021, 206: e105558.
- [30] DAYAKAR P, KAVI KUMAR K S. Soil and water conservation measures and rainfed agriculture in Telangana, India: Role of community and neighborhood conservation measures[J]. *Land Use Policy*, 2024, 137: e107011.
- [31] 杨严攀, 田培, 沈晨竹, 等. 基于 RUSLE 模型和地理探测器的鄂西南土壤侵蚀脆弱性评价[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(1): 91-103.
- [26] 袁再健, 马东方, 聂小东, 等. 南方红壤丘陵区林下水土流失防治研究进展[J]. *土壤学报*, 2020, 57(1): 12-21.
YUAN Z J, MA D F, NIE X D, et al. Progress in research on prevention and control of soil erosion under forest in red soil hilly region of South China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(1): 12-21.
- [27] 李前, 李忠武, 聂小东, 等. 水土流失防治措施对马尾松林土壤微生物群落分子生态网络的影响[J]. *土壤学报*, 2022, 59(3): 819-832.
LI Q, LI ZHPNG W, NIE X D, et al. Effects of soil erosion control measures on the molecular ecological network of soil microbial communities in a Masson pine forest[J]. *Journal of Soil Science*, 2022, 59(3): 819-832.
- [28] 卜晓莉, 王利民, 薛建辉. 湖滨林草复合缓冲带对泥沙和氮磷的拦截效果[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(4): 32-36.
BU X L, WANG L M, XUE J H. Study on sediment and nutrient retention efficiency of integrated tree-grass riparian buffer strips[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(4): 32-36.
- [29] 汪雪, 刘晓静, 王静, 等. 紫花苜蓿-燕麦连续间作下根系及土壤养分时空变化特征[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(10): 2683-2692.
WANG X, LIU X J, WANG J, et al. Temporal-spatial variations of root and soil nutrient under continuous intercropping of alfalfa and oat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(10): 2683-2692.
- [30] 宋民欣, 吕希恒, 韩陈, 等. 三峡库区降雨特征和林草植被格局对坡面水沙产出的影响[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(3): 82-90.
SONG M X, LU X H, HAN C, et al. Impacts of rainfall characteristics and vegetation cover patterns on slope runoff and sediment yields in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3): 82-90.
- [32] PING Y D, TIAN P, LUO L, et al. Soil erosion sensitivity and prediction for hilly areas of Hubei Province, China, using combined RUSLE and LSTM models[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2024, 24(2): 829-846.
- [33] LI X X, MAO R C, SONG J X, et al. Response of runoff change to soil and water conservation measures in the Jing River catchment of China[J]. *Land*, 2024, 13(4): e442.