

南方典型红壤区竹节沟生态系统 服务功能评价及经济价值

黄杰诗^{1,5}, 汤崇军^{1,2,3,4}, 伍冰晨^{1,2,3,4}, 谢方杰⁵

(1.江西省水利科学院, 江西 南昌 330029; 2.江西省鄱阳湖流域生态水利技术创新中心, 江西 南昌 330029; 3.流域水土保持江西省重点实验室, 江西 南昌 330029; 4.水旱灾害防御江西省重点实验室, 江西 南昌 330029; 5.河海大学 农业科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: [目的] 探究南方红壤丘陵区竹节沟的生态服务功能及价值, 为同类水土保持措施的价值核算提供借鉴, 并为竹节沟的推广应用提供支撑。[方法] 以江西省赣州市兴国县为研究区, 通过地形勘测、野外调查采样及土壤理化性质检测, 运用替代成本法、市场价值法等方法, 综合分析竹节沟的土壤保持、水源涵养、固碳增汇、减轻面源污染等生态服务功能及其价值。[结果] 不同坡位竹节沟的土壤保持功能及价值上坡位最高, 为 74.86 元/(m²·a); 水源涵养功能及价值中坡位最高, 为 5.16 元/(m²·a); 固碳增汇功能及价值下坡位最高, 为 0.25 元/(m²·a); 减轻面源污染功能及价值上坡位最高, 为 0.34 元/(m²·a)。不同坡位竹节沟生态服务功能总价值有所不同, 其中上坡位 78.63 元/(m²·a), 中坡位 57.11 元/(m²·a), 下坡位 60.51 元/(m²·a)。[结论] 竹节沟措施在南方典型红壤区具有重要的生态服务功能价值, 不同坡位展现出显著的生态服务功能价值差异。

关键词: 南方红壤区; 竹节沟; 生态系统服务; 经济价值

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0171-10

中图分类号: S157.2

文献参数: 黄杰诗, 汤崇军, 伍冰晨, 等. 南方典型红壤区竹节沟生态系统服务功能评价及经济价值[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 171-180. Huang Jieshi, Tang Chongjun, Wu Bingchen, et al. Assessment of ecosystem services and economic valuation of bamboo-shaped ditches in typical red soil region of Southern China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 171-180. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.018; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.02.018.

Assessment of ecosystem services and economic valuation of bamboo-shaped ditches in typical red soil region of Southern China

Huang Jieshi^{1,5}, Tang Chongjun^{1,2,3,4}, Wu Bingchen^{1,2,3,4}, Xie Fangjie⁵

(1. Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang, Jiangxi 330029, China;

2. Jiangxi Provincial Technology Innovation Center for Ecological Water Engineering in Poyang Lake

Basin, Nanchang, Jiangxi 330029, China; 3. Jiangxi Key Laboratory of Watershed Soil and Water Conservation,

Nanchang, Jiangxi 330029, China; 4. Jiangxi Key Laboratory of Flood and Drought Disaster Defense, Nanchang, Jiangxi 330029, China; 5. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: [Objective] The ecosystem services and economic value of bamboo-shaped ditches in the typical red soil region Southern China were explored, in order to provide references for the value accounting of similar soil and water conservation measures, and to offer a basis for the promotion and application of bamboo-shaped ditches. [Methods] Taking Xingguo County, Ganzhou City, Jiangxi Province as the study area, the ecosystem services such as soil conservation, water conservation, carbon sequestration and sink enhancement, and mitigation of non-point source pollution and their values in a bamboo-shaped ditch were

收稿日期: 2024-10-21

修回日期: 2024-12-19

采用日期: 2024-12-19

资助项目: 江西省技术创新引导类计划项目“赣南水土保持生态治理技术模式优化集成与生态系统服务响应”(2022KSG01010)

第一作者: 黄杰诗(2001—), 男(汉族), 四川省成都市人, 硕士研究生, 研究方向为水土资源规划。Email: huangjieshi2023@163.com。

通信作者: 汤崇军(1976—), 男(汉族), 江西省赣州市人, 博士, 正高级工程师, 主要从事水土保持方面的研究。Email: tangchongjun@126.com。

comprehensively analyzed through using a topographic survey, as well as through field investigations, sampling, and testing of physicochemical properties of the soil, and applying the alternative cost and market value methods. [Results] The soil conservation function and value at different slopes was highest at the top of the slope [74.86 Yuan/(m² · a)] in the bamboo-shaped ditch; the water conservation function and value was highest in the middle of the slope [5.16 Yuan/(m² · a)]; the carbon sequestration and sink enhancement function and value was highest at the bottom of the slope [0.25 Yuan/(m² · a)]; and the mitigation of surface pollution function and value was highest at the top of the slope [0.34 Yuan/(m² · a)]. The total value of the ecological service function of the bamboo-shaped ditch varied at different slope gradients, specifically 78.63 Yuan/(m² · a) at the top of the slope, 57.11 Yuan/(m² · a) at the middle of the slope, and 60.51 Yuan/(m² · a) at the bottom of the slope. [Conclusion] Bamboo-shaped ditch measures have important ecological service function values in the typical red soil region in Southern China, and different slopes show significant differences in the value of ecological service functions.

Keywords: southern red soil zone; bamboo-shaped ditch; ecosystem services; economic value accounting

南方红壤丘陵山区地形起伏大、雨量丰富而降雨集中、强度大、风化作用强烈^[1],一旦植被破坏易导致严重的水土流失。在此背景下,学者们结合当地水土流失治理实践提出了一系列水土保持措施,涵盖生物配置、工程技术及耕作方式优化等多个方面^[2-3],其中,竹节沟措施是沿坡面等高线布置的竹节样长方形蓄水坑,能够有效拦蓄雨水及坡面径流^[4],在水土流失治理实践中发挥着重要作用。

目前关于竹节沟的研究主要包括形态设计与使用方法^[5],蓄水保土与拦截氮磷的性能^[6-8],改善土壤理化性质^[9-11],提高树种经济效益^[12-13],改善植物群落结构等^[14-15]方面。方少文等^[6]的研究表明,水保林+水平竹节沟式的综合水保措施平均减流减沙效果达 73%,对氮磷的拦截率达 75%。王嘉等^[7]的研究结果表明竹节沟全年都能起到蓄积水分、增加土壤水库库容的作用,对防汛抗旱具有重要意义,是南方红壤侵蚀区土壤水调控的重要措施之一。李燕燕等^[8]的研究表明,在马尾松林地实施带状种草+竹节沟措施能有效提高土壤含水量,达 22.34%。宋月君等^[9]研究发现,水保林+水平竹节沟内的全氮含量是 27 和 19 a 前的 27 和 13.7 倍,有机质含量是 27 和 19 a 前的 52.6 和 21.6 倍,速效磷和碱解氮含量也有一定的提升,经过多年的治理能,有效改善土壤理化性质。由此可见,竹节沟能提升多种生态服务功能。然而,关于其生态服务功能及价值,尚缺乏系统的研究,难以综合比较该措施相对于其他生态治理措施的优劣。

关于生态系统服务,现阶段已有明确的定义^[16-17],可概化为人类从生态系统获得的惠益,分为供给服务、调节服务、文化服务和支持服务等方

面^[18]。关于生态服务功能及价值的研究涉及不同土地利用类型、不同生态系统、不同功能之间的权衡/协同等诸多方面,2024 年 3 月 15 日国家市场监督管理总局、国家标准化委员会发布的《生态系统评估方法》中明确了评估内容和流程、评估指标体系和评估方法。与此同时,2024 年 9 月 13 日水利部联合国家发改委、中国人民银行发布的《水土保持生态产品价值核算方法(试行)》(水保〔2024〕249 号)提供了一套水土保持生态产品类型及其价值核算方法,但对于竹节沟这一独特的南方水土保持措施却未见相应规定。

本文以江西省赣州市兴国县为研究区,通过地形勘测、野外调查采样以及土壤理化性质检测,运用替代成本法、市场价值法等方法来综合分析南方红壤区竹节沟的生态服务功能及其价值,对土壤保持、水源涵养、固碳增汇和减轻面源污染等调节服务的功能和价值进行核算,以综合反映竹节沟对于南方红壤区生态服务功能提升的意义,并为同类型的水土保持措施生态服务功能及价值核算提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

兴国县隶属于江西省赣州市,位于江西省中南部、赣州市北部,其地貌以低山、丘陵为主,局部有中山、低山,属于江西的山区县。兴国县地形见图 1。研究区位于江西省赣州市兴国县龙口镇,坐标为东经 115°17'35",北纬 26°13'43",系亚热带季风湿润气候,气候温和,雨量充沛,光照充足,四季分明,无霜期长。年平均气温为 18.8 °C,年平均降雨量为 1 515.6 mm,年平均无霜期 284 d。

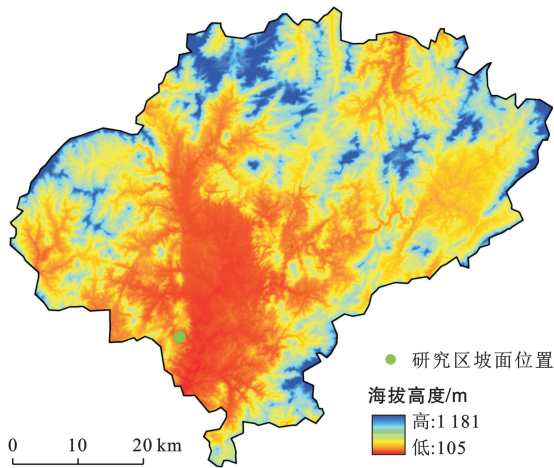


图 1 江西省兴国县地形图

Fig.1 Topographic map of Xingguo County, Jiangxi Province

1.2 研究方法

1.2.1 地形勘测 本研究于 2024 年 3 月至 4 月采用无人机航拍与现场实测相结合的方法,获取采样区高精

度航拍图像(图 2),同时借助 CAD 2022 软件绘制出竹节沟剖面图(图 3)。采样区面积约 634 m²,周长 156 m,坡长约 43 m,坡度约为 20°,竹节沟底宽约为 0.5 m。

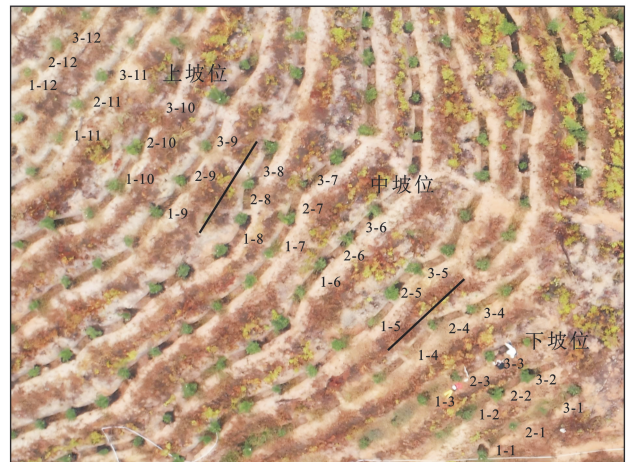


图 2 研究区竹节沟坡面实地航拍图

Fig.2 Field aerial photography map of bamboo-shaped ditches slope in study area

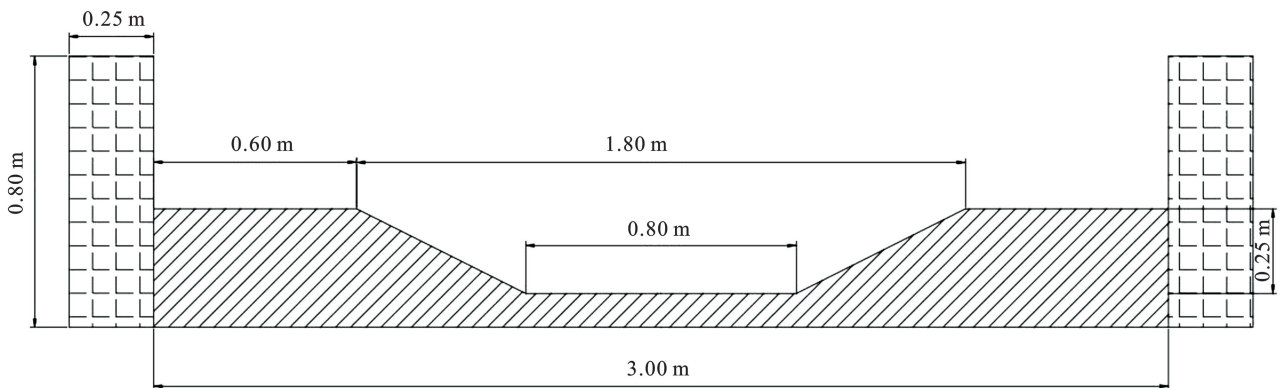


图 3 研究区坡面竹节沟剖面图

Fig.3 Section map of bamboo-shaped ditches on slope in study area

1.2.2 野外调查与采样 在坡面上布设 3 条样线,每条样线从坡底至坡顶各有 12 个竹节沟,对各竹节沟的沟内和沟外分别取表层土样,做好标记,带回实验室自然风干,用于土壤物理特性和化学指标测试。同时,在每个竹节沟的沟内和沟外分别用环刀取样,用于检测土壤容重与土壤孔隙度。

1.2.3 土壤理化性质检测

(1) 土壤质量含水量。参照《森林土壤水分测定法》(LY/T 1213—1999),采用烘干法检测。

(2) 容重。参照《土壤检测第 4 部分:土壤容重的测定》(NY/T 1121.4—2006),采用环刀法取样,电热恒温鼓风干燥箱检测。

(3) 孔隙度。参照《森林土壤水分—物理性质的测定》(LY/T 1215—1999),采用环刀法检测。

(4) 土壤机械组成。参照《土壤检测第 3 部分:

土壤机械组成的测定》(NY/T 1121.3—2006),使用土壤密度计检测。

(5) 有机质。参照《土壤检测第 6 部分:土壤有机质的测定》(NY/T 1121.6—2006),使用数显油浴锅检测。

(6) 碱解氮。参照《森林土壤氮的测定》(LY/T 1228—2015)。

(7) 有效磷。参照《土壤检测第 7 部分:土壤有效磷的测定》(NY/T 1121.7—2014),使用紫外可见分光光度计检测。

(8) 速效钾。参照《土壤速效钾和缓效钾含量的测定》(NY/T 889—2004),使用钾钠火焰光度计检测。

1.2.4 数据处理 在本研究中,将采样区坡面划分为上坡位、中坡位、下坡位 3 段,分别采集各段沟内外的 12 组数据,计算并取其均值。采用 Excel 2019 进行

数据整理与处理,利用 SPSS 27 进行方差分析及显著性检验($p < 0.05$)。绘图及相关性分析通过 Origin 2024 完成。

1.3 生态服务功能及价值核算

1.3.1 土壤保持功能及价值核算 竹节沟有效拦截坡面径流,减缓水流速度,显著降低坡面径流冲刷力,减轻土壤侵蚀。其结构设计类似微型“泥沙沉淀池”,沿坡面等高线分布,拦截径流中的土壤颗粒。随时间积累,淤积层形成,保留土壤于原地,有效实现土壤保持。竹节沟在土壤保持功能方面可以进一步细分为减少土壤侵蚀、减少泥沙淤积和保持土壤肥力。

减少土壤侵蚀指采取竹节沟措施后,坡面减少的土壤损失量,其功能量计算公式为:

$$\Delta Q_{SE} = R \times K \times L \times S \times B \times (1 - E) \times T \quad (1)$$

式中: ΔQ_{SE} 为竹节沟相比无措施条件下减少的土壤侵蚀量[t/(km²·a)]; R 为降雨侵蚀力因子[MJ·mm/(km²·h·a)]; K 为土壤可侵蚀性因子[t·h/(MJ·mm)]; L 为坡长因子; S 为坡度因子; B 为生物措施因子; E 为工程措施因子; T 为耕作措施因子。

减少土壤侵蚀的价值量用替代成本法表示,计算公式为:

$$V_{SE} = \Delta Q_{SE} \times A_s \div \rho \times P_s \quad (2)$$

式中: V_{SE} 为竹节沟单位面积减少的土壤侵蚀的价值量[元/(m²·a)]; A_s 为减少的土壤侵蚀的面积(km²); ρ 为土壤容重(kg/m³); P_s 为减少侵蚀的土壤价格(元/m³)。

减少泥沙淤积指采取竹节沟措施后,下游减少的泥沙淤积量,其功能量计算公式为:

$$\Delta Q_{SA} = \Delta Q_{SE} \times R_{sl} \times R_{gu} \quad (3)$$

式中: ΔQ_{SA} 为减少泥沙淤积量[t/(km²·a)]; R_{sl} 为坡面泥沙输移比; R_{gu} 为沟道泥沙输移比。

减少泥沙淤积的价值量用替代成本法表示,计算公式为:

$$V_{SA} = \text{per} \times \Delta Q_{SA} \times C_{RD} \div \rho \quad (4)$$

式中: V_{SA} 为竹节沟单位面积减少泥沙淤积的价值[元/(m²·a)]; per 为土壤侵蚀流失泥沙淤积需清淤作业的比例; C_{RD} 为水库工程清淤平均费用(元/m³)。

保持土壤肥力指采取竹节沟措施后,留存、聚集的土壤颗粒涵盖碱解氮、有效磷、速效钾等速效养分以及土壤有机质,这些养分可直接被作物吸收。通过对比竹节沟内外耕作层土壤中有机质、碱解氮、有效磷和速效钾的含量差异,来衡量其肥力保持价值。由于这些养分缺乏市场价格,故采用市场价值法,依据等量养分肥料的市场价格进行折算^[19],从而确定竹

节沟土壤中相应养分的等效价值。保持土壤肥力功能量及价值量的相关计算公式为:

$$V_f = \sum_{i=1}^4 (Q_i \times P_i) \quad (5)$$

$$Q_i = \Delta C_i \times \Delta Q_{SE} \quad (6)$$

$$\Delta C_i = C_{i内} - C_{i外} \quad (7)$$

式中: V_f 为竹节沟单位面积的土壤肥力保持功能价值[元/(m²·a)]; i 为有机质(OM)、碱解氮(N)、有效磷(P)、速效钾(K); Q_i 为各养分持留量(kg); P_i 为有机质、碱解氮、有效磷和速效钾折算替代后的价格(元/kg); ΔC_i 为竹节沟内外土壤中各养分的含量差值(g/kg); $C_{i内}$ 为竹节沟内土壤中各养分含量(g/kg); $C_{i外}$ 为竹节沟外土壤中各养分含量(g/kg)。

1.3.2 水源涵养功能及价值核算 竹节沟有效拦截雨水及坡面径流,利用其结构设计,实现雨水的收集与储存,降低直接流失风险。竹节沟水源涵养功能的价值可以通过计算其储水量,即有效库容来确定。土壤水分价值难以直接计算,故本研究采用土壤水库^[20]的概念,采用替代工程法,以水库建设的工程及维护成本价格代替土壤水分存储价值,进而核算竹节沟水源涵养功能价值量。

水源涵养功能量为采取竹节沟措施后增加的土壤储水量,计算公式为:

$$\Delta V = V_1 - V_2 \quad (8)$$

$$V_1 = S_0 \times (h_0 + h_1) \times n_1 \quad (9)$$

$$V_2 = S_0 \times h \times n_2 \quad (10)$$

式中: V 为采取竹节沟措施后增加的土壤库容(m³); V_1 为竹节沟区域土壤库容(m³); V_2 为无措施CK对照组土壤库容(m³); S_0 为竹节沟区域面积(m²); h_0 为土壤厚度(m); h_1 为淤积厚度(m); n_1 为竹节沟区域土壤体积含水率(m³/m³); n_2 为无措施CK对照组土壤体积含水率(m³/m³)。

竹节沟水源涵养功能价值量的计算公式为:

$$V_w = \Delta V \times C \quad (11)$$

式中: V_w 为竹节沟单位面积的水源涵养功能价值[元/(m²·a)]; C 为水库工程造价及维护成本(元/m³)。

1.3.3 固碳增汇功能及价值核算 竹节沟通过促进植物生长,积累土壤有机碳和改善微生物活动,在固碳增汇方面发挥着积极作用。采取竹节沟措施后,生态系统通过植物和动物通过生物吸收大气中二氧化碳合成有机物,将碳固定在植物或土壤中。

本研究中竹节沟措施固碳增汇功能价值主要考虑竹节沟保持的土壤及其碳密度,计算公式^[21]为:

$$C_{SOC} = C_{SOM} \times 0.58 \quad (12)$$

$$Q_{CO_2} = M_{CO_2} / M_C \times \Delta Q_{SE} \times C_{SOC} \quad (13)$$

式中: Q_{CO_2} 为固碳功能量, 以二氧化碳计 (t/a); M_{CO_2}/M_C 为 C 转化为 CO_2 的系数, 取值为 44/12。

固碳增汇的价值量用市场价值法计算, 公式为:

$$V_{cf} = Q_{CO_2} \times C_f \quad (14)$$

式中: V_{cf} 为竹节沟单位面积固碳增汇功能价值 [元/($m^2 \cdot a$)]; C_f 为水土保持碳汇交易交易价格 (元/t)。

1.3.4 减轻面源污染功能及价值核算 竹节沟沿坡面等高线布置, 能够有效拦截径流和沉淀污染物, 进而促进植物生长和吸附污染物。减轻面源污染是指采取竹节沟措施后, 区域内生态系统在减少水土流失量的同时, 拦截的土壤中氮、磷等物质形成面源污染的量。

功能量: 减少污染物总量计算公式为:

$$Q_{dpt} = \sum_{k=1}^n \Delta Q_{SE} \times c_k \quad (15)$$

式中: Q_{dpt} 为减少面源污染量 (t/a); n 为土壤中污染物种类总量; k 为土壤中氮、磷等物质种类数量, $i=1, 2 \dots n$; c_k 为土壤中第 k 种物质的纯含量 (%)。

减轻面源污染的价值量用替代成本法进行计算:

$$V_{dpt} = \sum_{k=1}^n Q_{dptk} \times q_k \quad (16)$$

式中: V_{dpt} 为竹节沟单位面积减轻面源污染功能价值 (元/a); q_k 为第 k 类面源污染物单位处理成本 (元/t)。

2 结果与分析

2.1 土壤保持功能价值核算

竹节沟措施的土壤保持功能分为减少土壤侵蚀、减少泥沙淤积和土壤肥力保持, 本研究通过实测数据构建价值核算模型, 对其功能量进行核算 (表 1), 采用替代成本法、市场价值法和机会成本法对竹节沟措施土壤保持功能进行价值核算时, 参考兴国县当地建设用土市场价格 (30.75 元/ m^3)、清淤工作劳务分包价格 (10.3 元/ m^3) 以及 2024 年当地农耕季节市场肥料价格 [有机复合肥 (OM 含量为 45%) 为 2.6 元/kg, 尿素 (N 含量为 46.4%) 为 2.2 元/kg, 磷酸二铵 (P_2O_5 含量为 42.0%) 为 3.4 元/kg, 氯化钾 (K_2O 含量为 62.0%) 为 2.9 元/kg, 以此确定其价值 (表 2)。

表 1 兴国县红壤区竹节沟土壤保持功能量

Table 1 Soil conservation function of bamboo-shaped ditch at red soil region of Xingguo County

坡位	淤积厚度/ m	容重/ ($kg \cdot m^{-3}$)	减少土壤侵蚀量/ ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	减少泥沙淤积量/ ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	土壤肥力保持 功能量/kg
上坡位	0.71	1 220.00	572.47	340.62	25.26
中坡位	0.62	1 195.00	448.11	266.63	18.39
下坡位	0.78	1 255.00	493.93	293.89	20.31

表 2 兴国县红壤区竹节沟土壤保持功能价值

Table 2 Soil conservation function value of bamboo-shaped ditch at red soil area of Xingguo County

坡位	减少土壤侵蚀价值量/ (元 $\cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)	减少泥沙淤积价值量/ (元 $\cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)	土壤肥力保持价值量/ (元 $\cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)	土壤保持功能价值量/ (元 $\cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)
上坡位	9.16	1.09	64.61	74.86
中坡位	7.17	0.85	43.58	51.60
下坡位	7.90	0.94	49.38	58.22

量化分析竹节沟措施的土壤保持功能量与价值量可知, 其土壤保持功能主要体现为土壤肥力保持, 尤其是上坡位价值量高达 64.61 元/($m^2 \cdot a$), 中坡位相对较低, 为 43.58 元/($m^2 \cdot a$)。而减少土壤侵蚀价值相对较低, 上坡位价值最高为 9.16 元/($m^2 \cdot a$); 减少泥沙淤积价值最低, 上坡位价值最高为 1.09 元/($m^2 \cdot a$)。在土壤保持功能价值上, 上坡位价值量最高, 为 74.86 元/($m^2 \cdot a$); 下坡位次之, 为 58.22 元/($m^2 \cdot a$); 中坡位最低, 为 51.60 元/($m^2 \cdot a$)。各坡位土壤保持功能价值对比详见图 4。

2.2 水源涵养功能价值核算

本研究运用替代工程法对竹节沟水源涵养功能进行价值核算, 通过比较建造与土壤持水等效的水库单位库容的工程造价及维护成本, 估算土壤水分的储存

价值。以江西省多座水库建设的工程及维护成本, 取其平均值为 29.5 元/($m^3 \cdot a$)。相关数据汇总于表 3。

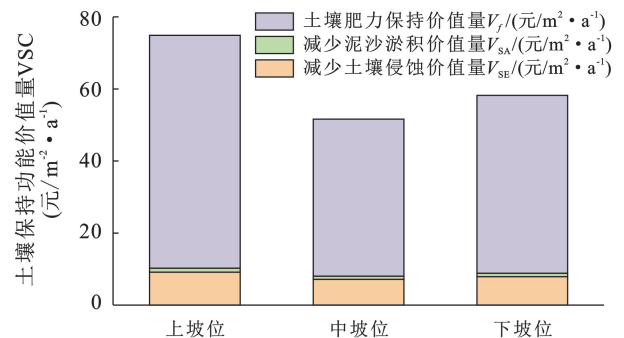


图 4 研究区坡面土壤保持功能价值对比图
Fig.4 Comparative map of value of slope soil conservation function in study area

表 3 兴国县红壤区竹节沟水源涵养功能价值

Table 3 Value of water conservation function of bamboo-shaped ditches at red soil area of Xingguo County

坡位	竹节沟区域土壤 体积含水率 $n_1/\%$	无措施对照组土壤 体积含水率 $n_2/\%$	竹节沟区域 土壤库容 V_1/m^3	无措施对照组 土壤库容 V_2/m^3	增加的有效 库容/ m^3	水源涵养功能价值/ (元· m^{-2} · a^{-1})
上坡位	34.16	32.35	0.37	0.22	0.15	3.21
中坡位	35.24	33.69	0.47	0.23	0.24	5.16
下坡位	37.46	36.25	0.33	0.25	0.08	1.75

通过对竹节沟措施水源涵养功能价值的核算,可以发现中坡位价值最高,达 5.16 元/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$);下坡位最低,为 1.75 元/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$);上坡位则为 3.21 元/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$)。数据显示,中坡位水源涵养功能价值显著优于下坡位,呈现明显的水分保持能力梯度差异。各坡位水源涵养功能及其价值差异详见图 5。

2.3 固碳增汇功能价值核算

本研究主要考虑竹节沟保持的土壤及其碳密度,采用替代成本法对竹节沟措施的固碳增汇价值量进行核算,参考 2024 年全国不同地区水土保持碳汇交易市场价格,取其平均值 33.5 元/t。相关数据详见表 4。

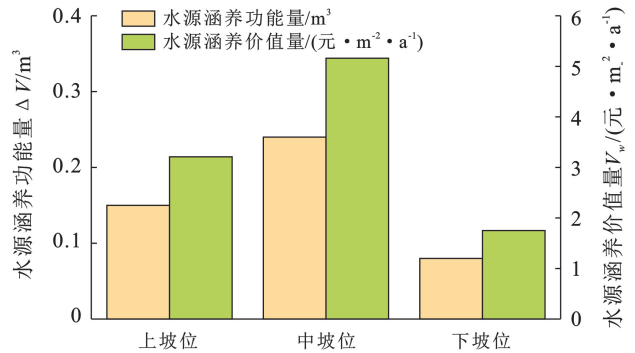


图 5 研究区坡面水源涵养功能对比图

Fig.5 Comparative map of slope water conservation function in study area

表 4 兴国县红壤区竹节沟固碳增汇功能价值

Table 4 Value of carbon sequestration and sink function of bamboo-shaped ditch at red soil area of Xingguo County

坡位	土壤有机质含量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)		土壤有机碳含量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)		固碳增汇功能量/ ($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$)	固碳增汇价值量/ (元· m^{-2} · a^{-1})
	沟内	沟外	沟内	沟外		
上坡位	10.43 ^a	3.23 ^b	6.05	1.87	6.67	0.22
中坡位	12.36 ^a	3.97 ^b	7.17	2.30	6.18	0.21
下坡位	12.81 ^a	5.89 ^b	7.43	3.42	7.60	0.25

注:不同小写字母表示相同坡位竹节沟内外土壤养分含量存在显著差异($p < 0.05$)。

通过对竹节沟措施固碳增汇价值的核算,可以发现其不同坡位其功能量以及价值量各异。下坡位价值最高,为 0.25 元/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$);上坡位次之,为 0.22 元/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$);中坡位最低,为 0.21 元/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$)。各坡位固碳增汇功能及其价值差异详见图 6。

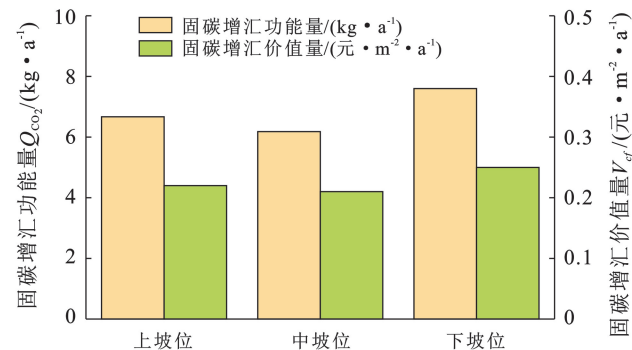


图 6 不同坡位坡面固碳增汇功能对比图

Fig.6 Comparative map of slope carbon sequestration function at different location

2.4 减轻面源污染功能价值核算

本研究在对竹节沟措施减轻面源污染功能价值进行分析核算时,主要考虑了面源污染物种类中的营养物质类,包括氮素和磷素,运用替代成本法对其价值进行核算。参考膜分离技术 MBR 工艺处理氮、磷污染物质,其处理成本约为 6.25 元/t。相关数据汇总于表 5。

通过对竹节沟措施减轻面源污染功能价值的核算,可以发现上坡位价值最高为 0.34 元/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$),而中坡位价值最低,仅为 0.14 元/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$)。各坡位减轻面源污染功能及价值对比详见图 7。

2.5 南方红壤区竹节沟生态服务功能总价值

在本研究中,兴国县红壤区竹节沟生态服务功能总价值是土壤保持功能、水源涵养功能、固碳增汇及减轻面源污染功能价值的总合。兴国县红壤区竹节沟不同坡位每年为人类提供一定的生态服务价值(表 6)。①上坡位总价值最高为 78.63 元/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$),

土壤保持功能价值突出,为 74.86 元/(m²·a),对整体生态服务功能贡献显著,减轻面源污染功能价值虽相对其他坡位较高,但其价值仅为 0.34 元/(m²·a)。
 ②中坡位总价值为 57.11 元/(m²·a),水源涵养功能价值与其他坡位相比相对较高,为 5.16 元/(m²·a),在中坡位生态服务功能中较为重要。
 ③下坡位总价值为 60.51 元/(m²·a),而其中固碳增汇功能的价值在所有坡位中最高,为 0.25 元/(m²·a)。

各功能价值分别占生态服务功能总价值的比例在不同坡位有所不同,具体情况详见图 8。无论上坡位、中坡位还是下坡位均是土壤保持功能价值所占比例最大(上坡 95.21%,中坡 90.35%,下坡 96.21%),其次是水源涵养功能价值,固碳增汇功能价值和减轻面源污染功能价值所占比例相对较小,说明该区域内

土壤保持和水源涵养是竹节沟措施坡面生态服务中的关键功能。

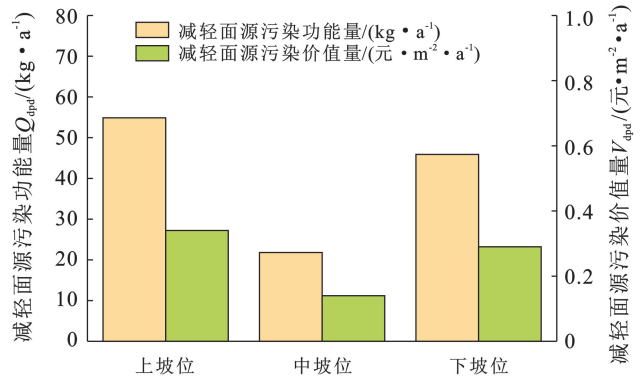


图 7 不同坡位坡面减轻面源污染功能对比图
 Fig.7 Comparative map of functions to reduce non-point source pollution on slopes at different location

表 5 兴国县红壤区竹节沟减轻面源污染功能价值

Table 5 Value of function of bamboo-shaped ditches in reducing non-point source pollution in red soil area of Xingguo County

坡位	氮含量/(g·kg ⁻¹)		磷含量/(g·kg ⁻¹)		减轻面源污染功能量/(kg·a ⁻¹)	减轻面源污染价值量/(元·m ⁻² ·a ⁻¹)
	沟内	CK 对照	沟内	CK 对照		
上坡位	0.75 ^A	0.62	0.44 ^A	0.13 ^B	54.87	0.34
中坡位	0.52 ^A	0.51	0.36 ^A	0.15 ^B	21.80	0.14
下坡位	0.54 ^A	0.52	0.48 ^A	0.19 ^B	45.90	0.29

注:不同大写字母表示相同坡位竹节沟内与无措施 CK 对照组存在显著差异(p<0.05)。

表 6 兴国县红壤区竹节沟生态服务功能总价值

Table 6 Total value of ecological service function of bamboo-shaped ditches in red soil area of Xingguo County

坡位	土壤保持功能价值/(元·m ⁻² ·a ⁻¹)	水源涵养功能价值/(元·m ⁻² ·a ⁻¹)	固碳增汇功能价值/(元·m ⁻² ·a ⁻¹)	减轻面源污染功能价值/(元·m ⁻² ·a ⁻¹)	生态服务功能总价值/(元·m ⁻² ·a ⁻¹)
上坡位	74.86	3.21	0.22	0.34	78.63
中坡位	51.60	5.16	0.21	0.14	57.11
下坡位	58.22	1.75	0.25	0.29	60.51

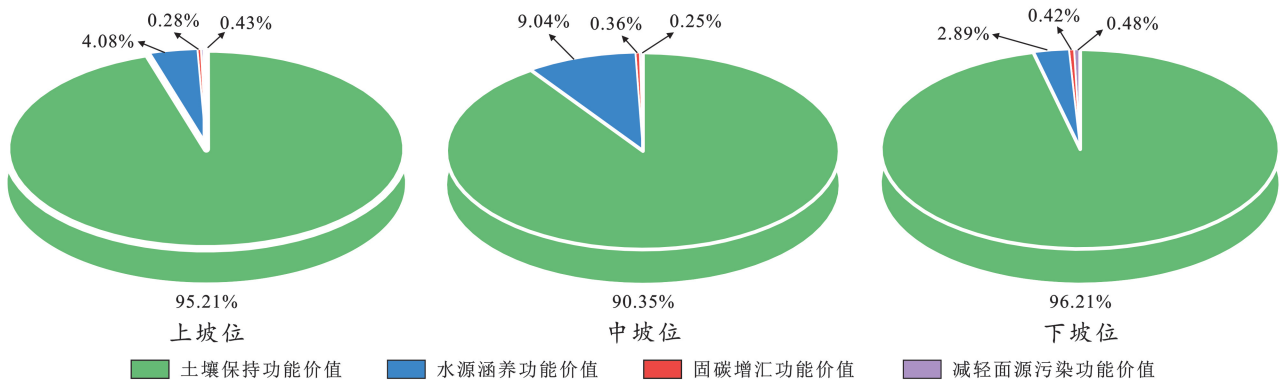


图 8 研究区坡面各生态服务功能价值所占比例

Fig.8 Proportion of each ecological service function value on slopes at different location in study area

3 讨论

南方红壤区竹节沟措施是根据气候、土壤、地形

条件,凭借多年水土流失治理实践因地制宜提出的措施,本研究的结果进一步证实了其在生态服务功能与价值方面的独特优势。具体而言,该措施通过有效的

雨水和径流拦截能力,显著降低坡面冲刷强度,促进土壤肥力提升,相较于无措施区域,其土壤侵蚀量减少约 16.02%,与周大渊等^[22] 研究结果具有一致性。在复杂地形适应性方面,竹节沟比水平梯田^[23] 和鱼鳞坑^[24] 更具优势,其局部径流与泥沙拦截效率分别高出 30% 和 40%。研究表明,竹节沟的独特结构设计还有助于在干旱季节提高土壤含水量,相较于无竹节沟区域平均高出 25%,与植被恢复措施^[25] 相比,竹节沟能在 1 a 内显现出水源涵养效能,而植被恢复措施则需 3~5 a;与小型蓄水池^[26] 相比,其水分利用效率更高,蒸发损失减少约 62.5%;在固碳增汇方面,竹节沟通过促进植物生长和改善土壤环境,显著提升土壤有机碳含量和植物固碳能力,1 a 后土壤有机碳含量平均增加 4.35 g/kg,比单纯植树造林区域高 50%,而秸秆覆盖措施^[27] 因秸秆腐烂致有机碳含量稳定性差。在减轻面源污染方面,竹节沟沿等高线布局,高效拦截径流和沉淀污染物,对磷素的拦截率可达 70%,其建设成本仅为湿地生态系统^[28] 的 36%,且能精准控制污染。因此,合理采用竹节沟措施,可充分发挥其在生态、经济和社会多方面的积极效益。

本研究的结果表明,竹节沟不同坡位的生态服务功能价值存在显著差异。上坡位总价值最高,达 78.63 元/(m²·a),水土保持功能价值尤为突出,占比 95.21%,得益于高效的径流泥沙拦截,而水源涵养、固碳增汇和减轻面源污染功能价值仅占不到 5%;中坡位总价值为 57.11 元/(m²·a),其中水源涵养功能价值占比达 9.04%,显著高于上坡位;下坡位总价值为 60.51 元/(m²·a),其中固碳增汇功能价值得到一定的提升。不同坡位的生态服务功能差异为竹节沟的推广应用提供了针对性指导,如上坡位可强化植被管理,提升植被质量和覆盖度,中坡位应优化竹节沟结构,下坡位可通过增加竹节沟密度提升储水能力和水土保持能力。

竹节沟作为南方红壤区重要的水土保持措施,通过核算其水土保持、水源涵养、固碳增汇以及减轻面源污染等生态服务功能及价值,能明确竹节沟在该地区生态保护中的重要作用和价值体现。除了竹节沟本身的生态服务价值以外,其往往与植被措施协同使用,由于能有效地提高土壤水分含量,能够解除水分胁迫对植物生长的限制^[29],同时还能通过养分积累促进植物生长,适用于油茶等经济树种,清晰认识竹节沟的价值,有助于竹节沟的推广应用,为南方红壤区侵蚀劣地的修复和生态环境改善提供科技支撑。

4 结论

(1) 南方典型红壤区的竹节沟措施具有重要的

生态服务功能价值。不同坡位的竹节沟措施每年为人类提供一定的生态服务价值,其总价值由水土保持、水源涵养、固碳增汇和减轻面源污染等功能的综合体现。竹节沟措施在上坡位的总价值为 78.63 元/(m²·a),中坡位为 57.11 元/(m²·a),下坡位为 60.51 元/(m²·a)。

(2) 竹节沟措施在南方典型红壤区的不同坡位展现出显著的生态服务功能价值差异。在水土保持方面,上坡位表现尤为突出,价值达到 74.86 元/(m²·a),显著高于中坡位的 51.60 元/(m²·a)。在水源涵养功能上,中坡位显示出最高的价值,为 5.16 元/(m²·a),而下坡位相对较低,为 1.75 元/(m²·a)。在固碳增汇功能方面,下坡位的价值最高,达到 0.25 元/(m²·a),中坡位则较低,为 0.21 元/(m²·a)。在减轻面源污染功能上,上坡位价值最高,为 0.34 元/(m²·a),而中坡位价值最低,仅为 0.14 元/(m²·a)。

(3) 本研究聚焦于南方典型红壤区独特的水土保持措施竹节沟开展生态服务功能及其价值研究,为同类水土保持措施的生态服务功能价值核算奠定了科学基础,并提供了参考手段。

参考文献 (References)

- [1] 张卫,张展羽,杨洁.SCS 模型在红壤土地降雨径流量估算中的应用[J].水土保持通报,2014,34(5):124-127.
Zhang Wei, Zhang Zhanyu, Yang Jie. Application of SCS model to estimate volume of runoff in slope field of red soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(5): 124-127.
- [2] 袁希平,雷廷武.水土保持措施及其减水减沙效益分析[J].农业工程学报,2004,20(2):296-300.
Yuan Xiping, Lei Tingwu. Soil and water conservation measures and their benefits in runoff and sediment reductions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(2): 296-300.
- [3] 罗诚康,杜思敏,郑博福,等.赣南地区水土保持功能的时空变化特征[J].水土保持通报,2022,42(3):57-65.
Luo Chengkang, Du Simin, Zheng Bofu, et al. Temporal and spatial change characteristics of soil conservation function in Southern Jiangxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 57-65.
- [4] 刘文飞,樊后保,黄荣珍,等.红壤侵蚀区不同生态修复措施对凋落物量及其养分归还的影响[J].水土保持学报,2012,26(1):58-61.
Liu Wenfei, Fan Houbao, Huang Rongzhen, et al. Impacts of different ecological restoration measures on litter production and its nutrient fluxes in red soil erosion region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(1): 58-61.

- [5] 胡建民,胡欣,谢颂华.南方红壤坡地几种典型治理措施的径流调控效应[J].水土保持通报,2013,33(6):32-36.
Hu Jianmin, Hu Xin, Xie Songhua. Effects of several typical measures on regulating runoff in slope land of red soil in Southern China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013,33(6):32-36.
- [6] 方少文,赵小敏,莫明浩.赣南红壤坡面不同措施径流泥沙及氮磷污染输出试验研究[J].中国水利,2012(18):10-13.
Fang Shaowen, Zhao Xiaomin, Mo Minghao. Experimental study on runoff sediment nitrogen and phosphorus pollution output under different measures in red soil slope of the south of Jiangxi [J]. China Water Resources, 2012(18):10-13.
- [7] 王嘉,莫明浩,宋月君,等.竹节水平沟对红壤坡面土壤水分的影响[J].西南林业大学学报(自然科学),2020,40(6):73-79.
Wang Jia, Mo Minghao, Song Yuejun, et al. The effect of soil moisture in red soil slope by bamboo-type contour trench [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2020,40(6):73-79.
- [8] 李燕燕,黄荣珍,樊后保,等.退化红壤区不同生态修复措施对土壤理化特性的影响[J].浙江林业科技,2014,34(6):78-82.
Li Yanyan, Huang Rongzhen, Fan Houbao, et al. Effect of different restoration measures on soil physico-chemical properties in degraded red soil [J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2014,34(6):78-82.
- [9] 宋月君,杨洁,汪邦稳.赣南水土保持生态建设土壤改良成效分析[J].水资源与水工程学报,2013,24(1):104-108.
Song Yuejun, Yang Jie, Wang Bangwen. Analysis on benefit of soil improvement in soil and water conservation and ecological construction in south of Jiangxi Province [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013,24(1):104-108.
- [10] 黄荣珍,樊后保,李凤,等.人工修复措施对严重退化红壤固碳效益的影响[J].水土保持通报,2010,30(2):60-64.
Huang Rongzhen, Fan Houbao, Li Feng, et al. Effects of human induced vegetation rehabilitation on carbon fixation benefit in seriously degraded red soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010,30(2):60-64.
- [11] 宋月君,杨洁,汪邦稳,等.塘背河小流域水土保持生态建设成效分析[J].中国水土保持,2012(4):63-64.
Song Yuejun, Yang Jie, Wang Bangwen, et al. Effect analysis of ecological construction of soil and water conservation in Tangbeihe small watershed [J]. Soil and Water Conservation in China, 2012(4):63-64.
- [12] 汤巧英,吴虹,李明,等.柑橘林不同水土保持措施效果研究[J].浙江林业科技,2018,38(3):47-52.
Tang Qiaoying, Wu Hong, Li Ming, et al. Effect of different measures for soil and water conservation under citrus *reticulata* stands [J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2018,38(3):47-52.
- [13] 吴际友,程勇,陈明皋,等.竹节沟与坡位对湿地松脂产量的影响[J].湖南林业科技,2018,45(4):22-25.
Wu Jiyou, Cheng Yong, Chen Minggao, et al. Effect of digging intercepting ditch and slope position on terebinthina yield of *Pinus elliottii* [J]. Hunan Forestry Science & Technology, 2018,45(4):22-25.
- [14] 彭浪,段剑,刘士余,等.红壤侵蚀区不同恢复年限植物群落演替规律[J].水土保持通报,2022,42(1):10-16.
Peng Lang, Duan Jian, Liu Shiyu, et al. Succession law of plant communities with different restoration periods in red soil eroded areas [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(1):10-16.
- [15] 欧阳慧,黄荣珍,李凤,等.严重侵蚀红壤区生态修复后植物群落组成变化[J].水土保持通报,2014,34(4):53-58.
Ouyang Hui, Huang Rongzhen, Li Feng, et al. Community species composition changes in ecological restored area of serious eroded red soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014,34(4):53-58.
- [16] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Ecological Economics, 1998,25(1):3-15.
- [17] Daily G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems [M]. Washington, DC, USA: Island Press, 1997.
- [18] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: Synthesis [M]. Washington, DC, USA: Island Press, 2005.
- [19] Wang Fu, He Qian, Han Fen, et al. Ecological function service value and quantity of fruit-tree economic forests in the semi-arid loess hilly and gully region of central Gansu: A case study of the Hulu River basin [J]. Journal of Resources and Ecology, 2023,14(5):903-913.
- [20] 翟婷婷,谌芸,李铁,等.植物篱前淤积带与篱下土坎土壤水库和抗剪性能对比研究[J].生态学报,2020,40(2):599-607.
Zhai Tingting, Chen Yun, Li Tie, et al. Comparative study on soil water reservoirs and shear strength between the sedimentation zone in front of and ridge behind hedgerows [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(2):599-607.
- [21] 王清奎,汪思龙,冯宗炜,等.土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J].生态学报,2005,25(3):513-519.

- Wang Qingkui, Wang Silong, Feng Zongwei, et al. Active soil organic matter and its relationship with soil quality [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3):513-519.
- [22] 周大渊, 罗扬, 葛华, 等. 山区管道工程坡面径流防控设计及截排水体系 [J]. *中国水土保持科学 (中英文)*, 2023, 21(6):71-79.
- Zhou Dapeng, Luo Yang, Ge Hua, et al. Fortification design of slope runoff as well as interception and drainage system for pipeline engineering in mountain area [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023, 21(6):71-79.
- [23] 伍冰晨, 陈晓安, 汤崇军, 等. 红壤坡地果园产流产沙及氮磷流失对坡面水土保持措施响应 [J]. *水利学报*, 2024, 55(7):802-814.
- Wu Bingchen, Chen Xiaolan, Tang Chongjun, et al. Response of runoff and sediment yield and nitrogen and phosphorus loss to soil and water conservation measures in orchards of red soil slope [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2024, 55(7):802-814.
- [24] 李虹辰, 赵西宁, 高晓东, 等. 鱼鳞坑与覆盖组合措施对陕北旱作枣园土壤水分的影响 [J]. *应用生态学报*, 2014, 25(8):2297-2303.
- Li Hongchen, Zhao Xining, Gao Xiaodong, et al. Effects of scale-like pit and mulching measures on soil moisture of dryland jujube orchard in North Shaanxi Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(8):2297-2303.
- [25] Dou Yanxing, Yang Yang, An Shaoshan, et al. Effects of different vegetation restoration measures on soil aggregate stability and erodibility on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2020, 185:104294.
- [26] 杨娟, 王昌全, 李冰, 等. 攀西红壤农耕区小型地下蓄水池的建造条件与效益分析 [J]. *水资源保护*, 2007, 23(2):91-94.
- Yang Juan, Wang Changquan, Li Bing, et al. Building condition and benefit analysis of mini-type underground conservation pool in red soil farming area of Panxi [J]. *Water Resources Protection*, 2007, 23(2):91-94.
- [27] 李萌, 李彦, 杨那, 等. 旱地长期覆盖下土壤团聚体有机碳及无机碳的变化规律 [J]. *水土保持通报*, 2023, 43(3):357-365.
- Li Meng, Li Yan, Yang Na, et al. Effects of different mulching measures on distribution of organic carbon and inorganic carbon in soil aggregates under spring maize cultivation [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(3):357-365.
- [28] 李一, 解璐萌, 莫雪, 等. 江西省湿地生态系统生产总值 (GEP) 核算及时空动态分析 [J]. *生态与农村环境学报*, 2024, 40(6):738-748.
- Li Yi, Xie Lumeng, Mo Xue, et al. Accounting and spatio-temporal dynamic analysis of the gross ecosystem product (GEP) of wetlands in Jiangxi Province [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024, 40(6):738-748.
- [29] Alliaume F, Rossing W A H, Titttonell P, et al. Modelling soil tillage and mulching effects on soil water dynamics in raised-bed vegetable rotations [J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 82:268-281.
- ~~~~~
- (上接第 150 页)
- [31] 刘建伟, 史东梅, 马晓刚, 等. 弃渣场边坡稳定性特征分析 [J]. *水土保持学报*, 2007, 21(5):192-195.
- Liu Jianwei, Shi Dongmei, Ma Xiaogang, et al. Stability characteristics analysis on sideslopes of excavation waste dump [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(5):192-195.
- [32] Zhuge Xia, Motagh M, Li Tao, et al. The June 2020 Aniangzhai landslide in Sichuan Province, Southwest China: Slope instability analysis from radar and optical satellite remote sensing data [J]. *Landslides*, 2022, 19(2):313-329.
- [33] Guo Qing, Tong Lianzi, Wang Hua. A monitoring method based on vegetation abnormal information applied to the case of Jizong shed-tunnel landslide [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(22):5640.
- [34] 张永强, 毛彦龙, 白子龙. 降雨对低速滑坡形成机制的研究 [J]. *甘肃科学学报*, 2019, 31(3):85-91.
- Zhang Yongqiang, Mao Yanlong, Bai Zilong. Research on formation mechanism of low-speed landslide caused by rainfall [J]. *Journal of Gansu Sciences*, 2019, 31(3):85-91.
- [35] 廖军, 邓涛, 周越良, 等. 降雨作用下第四系堆积体路堤稳定性 [J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(23):10090-10097.
- Liao Jun, Deng Tao, Zhou Yueliang, et al. Stability of quaternary accumulation embankment under rainfall [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(23):10090-10097.