DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.041 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.041
刘欣艺, 赵洋毅, 王振超, 等. 等高反坡阶和植物篱措施对滇西北坡耕地土壤抗侵蚀能力的影响[J]. 水土保持研究,2026,33(6):254-265.
Liu Xinyi, Zhao Yangyi, Wang Zhenchao, et al. Effects of contour reverse-slope terraces and hedgerows on soil erosion resistance of sloping farmland in northwestern Yunnan[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):254-265.

等高反坡阶和植物篱措施对滇西北坡耕地土壤抗侵蚀能力的影响

刘欣艺, 赵洋毅, 王振超, 朱婉菁, 王克勤
(西南林业大学 水土保持学院, 昆明 650224)

摘 要:[**目的**]揭示等高反坡阶和植物篱措施对土壤抗侵蚀能力的影响,以期为防治坡耕地水土流失提供一定参考。[**方法**]在野外调查和室内分析的基础上,以等高反坡阶、植物篱及原状坡耕地土壤为研究对象,利用相关性分析方法分析影响土壤抗侵蚀的主要理化指标,同时结合灰色关联度构建了抗侵蚀指标和土壤理化性质指标的耦合模型,对西南高山峡谷区2种治理措施的抗侵蚀性进行综合判定。[**结果**](1)等高反坡阶和植物篱措施样地抗冲系数均值分别是坡耕地的2.33倍和1.79倍,二者抗蚀指数较坡耕地提高50%和30%。(2)土壤理化性质与土壤抗侵蚀特征关系密切。土壤有机质、>0.25 mm水稳性团聚体、>0.5 mm水稳性团聚体、平均重量直径、几何平均直径与抗冲系数和抗蚀指数普遍呈极显著正相关关系($p<0.01$),土壤容重和团聚体破坏率与抗冲系数和抗蚀指数均呈极显著负相关关系($p<0.01$)。(3)土壤抗侵蚀性与理化性质系统的整体耦合水平属于中度协调,耦合协调度为等高反坡阶(良好协调)>植物篱(中度协调)>坡耕地(弱协调)。[**结论**]布设等高反坡阶和植物篱措施能显著改善土壤结构,提高土壤抗侵蚀能力,在防治坡耕地水土流失方面效果明显。

关键词:等高反坡阶; 植物篱; 抗侵蚀能力; 相关性分析; 耦合关联
中图分类号:S157.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0254-12

Effects of contour reverse-slope terraces and hedgerows on soil erosion resistance of sloping farmland in northwestern Yunnan

Liu Xinyi, Zhao Yangyi, Wang Zhenchao, Zhu Wanjing, Wang Keqin
(*College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming* 650224, *China*)

Abstract: [**Objective**] This study aims to reveal the effects of contour reverse-slope terraces and hedgerows on soil erosion resistance, thereby providing a reference for soil erosion control in sloping farmland. [**Methods**] Based on field investigation and laboratory analysis, the main physicochemical indicators affecting soil erosion resistance were analyzed by correlation analysis, taking contour reverse-slope terraces, hedgerows, and undisturbed sloping farmland soil as research objects. Meanwhile, combined with the grey relational degree, a coupling model of erosion resistance indicators and soil physicochemical property indicators was constructed to comprehensively evaluate the erosion resistance of the two control measures in the southwestern alpine-gorge region. [**Results**] (1) The mean anti-scour coefficients of the contour reverse-slope terraces and hedgerow plots were 2.33 and 1.79 times those of the sloping farmland, respectively, and their erosion resistance indices increased by 50% and 30% compared with the sloping farmland. (2) Soil physicochemical properties were closely related to soil erosion resistance characteristics. Soil organic matter, >0.25 mm water-stable aggregates, >0.5 mm water-stable aggregates, mean weight diameter, and geometric mean diameter were significantly positively correlated with the anti-scour coefficient and

收稿日期:2025-09-30 **修回日期:**2026-01-28 **接受日期:**2026-01-29
资助项目:国家重点研发计划课题项目(2022YFF130290402);云南省青年人才专项(YNWR-QNBJ-2019-215)。
第一作者:刘欣艺(1996—),女,山东烟台人,博士研究生,主要从事坡耕地水土保持研究。E-mail:1726866949@qq.com
通信作者:王克勤(1964—),男,甘肃庄浪人,博士,教授,主要从事水土保持和小流域环境综合治理研究。E-mail:wangkeqin7389@sina.com

erosion resistance index ($p<0.01$), while soil bulk density and aggregate destruction rate were significantly negatively correlated with anti-scour coefficient and erosion resistance index ($p<0.01$). (3) The overall coupling level of the soil erosion resistance and physicochemical properties systems was moderately coordinated, and the coupling coordination degree followed the order: contour reverse-slope terraces (good coordination)>hedgerows (moderate coordination)>sloping farmland (weak coordination). [**Conclusion**] The establishment of contour reverse-slope terraces and hedgerows can significantly improve soil structure and enhance soil erosion resistance, showing remarkable effectiveness in controlling soil erosion on sloping farmland.

Keywords: contour reverse-slope terrace; hedgerow; erosion resistance; correlation analysis; coupling correlation

我国是土壤侵蚀最严重的国家之一,土壤侵蚀造成土体结构变差,土壤肥力下降,土地利用效率降低,致使生态环境恶化[1]。西南高山峡谷地区红壤坡耕地处于亚热带季风气候区山区丘陵地带,降水集中且强度大,土体冲刷严重[2],红壤分散性强,不易絮凝,所以土壤水稳定性结构较差,气候、地形加之不合理的土地利用,加重了土壤侵蚀。因此,应采取有效措施减少地表径流,改良土壤结构,是防治坡耕地水土流失和促进山区农业可持续发展的关键。

土壤的抗冲性和抗蚀性是表征土壤抗侵蚀能力的主要指标。近年来对土壤抗侵蚀性变化规律及其影响因素的研究主要集中在抗侵蚀性评价指标与模型的合理选取、抗蚀性的地区与空间差异和土壤改良与生态恢复等方面[3-4]。土壤抗侵蚀性评价指标主要有水稳性团聚体的含量、团聚状况、结构破坏率、平均重量直径、几何平均直径等,有机质、容重、总孔隙度、含水率等是其主要的影响因素[5-6]。易侵蚀地区主要在西北黄土高原地区、南方紫色土地区和红壤区,有机质含量、孔隙度、土壤容重和黏粒含量等是土壤抗冲性的主要影响因素,不同的植被恢复方式下,黏粒含量越高,容重越大,土壤越紧实,土壤的抗冲能力得到显著改善[7]。有研究表明,植物篱作为农林复合的水土保持综合技术,有利于提高坡耕地土壤的抗冲、抗蚀性能,在增强土壤入渗能力,提高土壤结构稳定性,控制坡面产沙、产流量方面效果显著,在坡耕地水土流失控制方面具有重要意义[8-9]。等高反坡阶作为人工微地形水土保持整地措施,可有效蓄水保土、减少地表径流和提升作物产量,在西南红壤区广泛适用,且坡耕地实施等高反坡阶整地措施后在改善土壤水分运动及水量平衡、土壤结构、减流减沙、减少土壤侵蚀和提升作物水分利用效率等方面均得到研究证实[10-12]。

西南高山峡谷区作为我国水土流失最严重的区域之一,其独特的地形地貌和气候条件使得水土保持措施的选择和效果评估面临特殊挑战。虽然等高反坡阶和植物篱作为两种重要的坡耕地治理措施已在多个区域得到应用,但在西南高山峡谷区红壤坡耕地上的系统性对比研究仍然缺乏[13]。特别是两种措施在改善土壤抗侵蚀能力方面的作用机制差异、效果优劣以及适用性评价尚未明确,这限制了该区域水土保持措施的科学选择和优化配置。此外,现有研究多关注单一措施的减水减沙效应,而对土壤内在抗冲性和抗蚀性与土壤理化性质之间的耦合关系缺乏深入探讨,难以从土壤结构改良的角度揭示措施的长效作用机制。为此,本文以滇西北云龙县红壤坡耕地为研究对象,选取等高反坡阶和植物篱两种典型治理措施及原状坡耕地作为对照,通过野外调查与室内分析相结合的方法,系统测定土壤理化性质、团聚体特征及抗侵蚀指标,采用相关性分析和灰色关联度等多元统计方法,构建土壤抗侵蚀性与理化性质的耦合评价模型。研究旨在:(1)定量评估两种措施对土壤结构和抗侵蚀能力的改善效果及其差异,以揭示土壤理化性质对抗冲性和抗蚀性的主导影响因子;(2)阐明不同措施下土壤性质与抗侵蚀性的耦合协调机制。研究结果可为西南高山峡谷区坡耕地水土保持措施的科学选择、优化配置及可持续治理提供理论依据和技术支撑,对推动区域生态环境保护和农业可持续发展具有重要的实践意义。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于云南省西北部大理州云龙县的南塘箐小流域包罗水库附近(99°29′54.30″E,26°05′38.82″N),研究区海拔 2 320～2 550 m,属亚热带山地高原气候,年平均气温 16.1 ℃,年降水量 781.4 mm,全年降雨集中在雨季,约占全年的 80%。该流域是典型的农业小流域,主要为坡耕地,坡度 15°～25°,夏季主要种植玉米和大豆,还种植有少量的核桃经济林,通过传统的耕作方式进行农业生产,土壤类型主要为红壤(质地为粉质黏土)。样地基本概况见表 1。

1.2　试验设计

在试验区内布设有 20 m×5 m 植物篱措施、等高反坡阶措施和原状坡耕地固定样地,选取 10°和 15°各

2块(本样地反坡阶措施布设于2021年,反坡阶于每年耕种作物前重新整修,图1A),南北坡向,等高反坡阶剖面见示意图(阶宽1.2 m,两条阶之间距离7.5 m,图1B)。试验设计在小区栽植黄花菜(*Hemerocallis citrina*)植物篱,于2022年栽植,植株高约0.3 m,栽植模式均为每小区栽植两条植物篱带,带宽0.5 m,每带植物篱2行,行距20 cm,株距为20 cm,每条植物篱带前均留1 m与农作物的隔离带。坡耕地种植作物均为玉米,作物一年一熟,采用等株距种植模式,按照当地农户经验确定行株距与株数,行距约90 cm,株距约30 cm,顺坡常规种植,试验过程中无任何灌溉措施,降雨为唯一水分补给,黄花菜植物篱在保护水土的同时也也可作为牲畜饲料。

表1 样地基本概况

Table 1 Basic information of sample plots

样地	海拔/m	坡度/(°)	坡向	地理坐标	土壤类型	群落组成
植物篱	2355	15～25	北偏西	26°05′30″N, 99°31′07″E	红壤	玉米+黄花菜植物篱
等高反坡阶	2350	15～25	北偏西	26°05′31″N, 99°31′07″E	红壤	玉米
坡耕地	2353	15～25	北偏西	26°05′32″N, 99°31′08″E	红壤	玉米

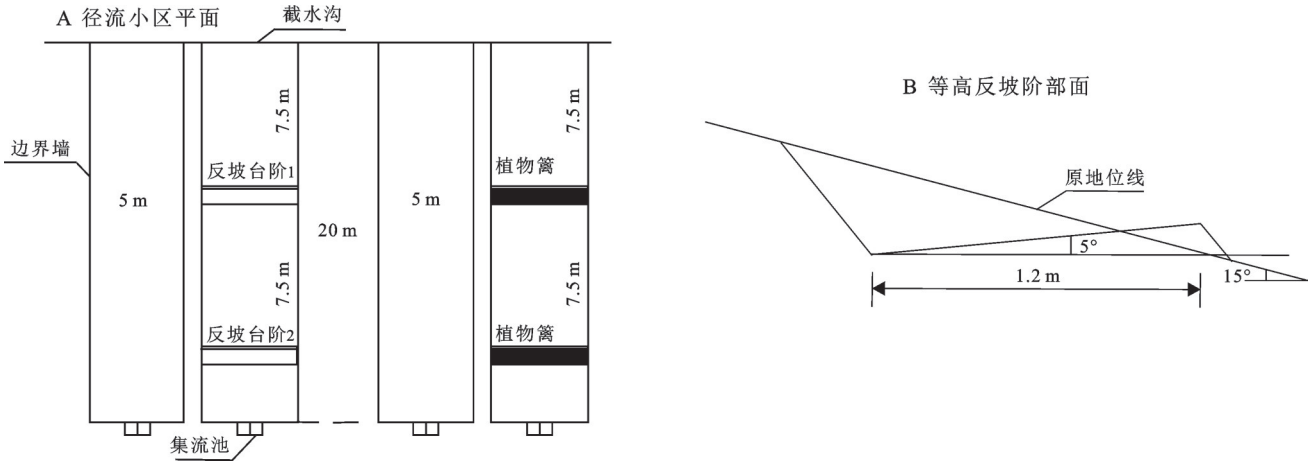


图1 径流小区及等高反坡阶示意图

Fig. 1 Schematic diagram of runoff plots and contour reverse-slope terraces

于2024年6月中旬在样地上选择植被盖度相近的样方,采用5点取样法S型,在试验区内挖取土壤剖面,自上而下采集0—10 ,10—20 ,20—30 ,30—40 cm原状土样,去除表层枯枝落叶,每块样地土壤每层分别混合,采集土壤量大约1 kg,每个样地有3个重复。采集过程中尽量减少对土样的扰动,减少对团聚体的破坏。样品采集后立即用自封袋进行封装,带回实验室风干后按照不同试验要求过筛测定。用100 cm^3环刀分层采集原状土样带回实验室进行土壤孔隙度、容重测定。用特制10 cm×10 cm×20 cm取样器采集原状土样带回实验室进行土壤抗冲性测定。

1.3 测定方法与数据处理

1.3.1 *指标测定方法* 土壤有机质、容重、团聚体、含水率、孔隙度、颗粒组成采用《土壤理化分析》中的常规方法[14],采用杨培岭等改进的分形模型来计算土壤颗粒组成和团聚体的分形维数[15]。采用静水崩解法对土壤抗蚀指数进行测定,每一个样点25颗5～7 mm的土粒,10 min内每隔1 min进行一次土粒崩塌个数记录[16],5次重复取平均值。

$$S=\frac{M-\delta}{\delta}\times 100\% \tag{1}$$

式中:S为土壤抗蚀指数(%);M为总土粒数(个);δ为崩塌土粒数(个)。每个样品设置三组重复。

土壤抗冲系数采用原状土冲刷试验,将取样器浸水24 h,使其达到毛管水饱和。取样器尺寸参考李勇等[17]的设计,为10 cm×10 cm×20 cm,通过恒压水箱提供供水流量,流量按照当地年平均降雨量设置2.8 L/min,试验坡度15°,在水流稳定后将原状土样装入水槽的土样室,使土样表面与槽面平齐,然后放水冲刷,在冲刷开始后每2 min量取一次水流量并取土样,5次后每隔3 min量取一次水量并取土样,充分搅动后取样、烘干、称重。采用抗冲系数(S_c)计算每次冲刷1 g烘干土所需水量[18]。

$$S_c=\frac{d\times t}{W} \tag{2}$$

式中:S_c为抗冲系数;d为冲刷流量(L/min);t为冲刷历时(min);W为烘干泥沙质量(g)。

1.3.2 *数据分析*

(1)团聚体直径分析[19-20]。

$$\mathrm{MWD}=\sum_{i=1}^{n+1}\frac{r_{i+1}+r_i}{2}\times l_i \tag{3}$$

式中:MWD为平均重量直径;l_i为各级团聚体的质量

百分含量;r_i为第i个筛的孔径大小(mm);$r_0=r_i$,$r_n=r_{n+1}$,n为筛子的数量。

$$GMD=\exp\left(\frac{\sum x_i \ln r_i}{\sum x_i}\right) \tag{4}$$

式中:GMD为几何平均直径;x_i为i粒级团聚体的重量百分比(%);r_i为i粒级团聚体的平均直径(mm)。

(2)团聚体破坏率[21]。

$$PAD=\frac{T-W}{T}\times 100\% \tag{5}$$

式中:PAD为团聚体破坏率;W为>0.25 mm水稳性团聚体的重量;T为>0.25 mm团聚体(干筛)的重量。

(3)土壤抗蚀性评价指标的选择。本研究选取毛管孔隙度(X_1)、非毛管孔隙度(X_2)、总孔隙度(X_3)、容重(X_4)、含水率(X_5)、有机质(X_6)、>0.25 mm大团聚体含量(X_7)、>0.5 mm水稳性团聚体含量(X_8)、团聚体分形维数(X_{12})、砂粒(X_{13})、粉粒(X_{14})、黏粒(X_{15})、颗粒组成分形维数(X_{16})作为土壤理化性质指标,团聚体破坏率(X_9)和几何平均直径(X_{10})、平均重量直径(X_{11})、抗冲系数(X_{17})、抗蚀指数(X_{18})作为评价土壤抗蚀性指标,采用相关性分析方法比较得出影响土壤抗侵蚀性的主要因子。

(4)耦合分析。土壤抗蚀性不能直接测定,需要选取指标进行综合评定。利用灰色关联度模型[22]计算关联系数,揭示土壤抗蚀性特征与土壤理化性质耦合关系和协调程度。关联系数公式为:

$$\xi(j)(s)=\frac{\min_i \min_j\left|Y_i^L(s)-Y_j^L(s)\right|+\rho\max_i\max_j\left|Y_i^L(s)-Y_j^L(s)\right|}{\left|Y_i^L(s)-Y_j^L(s)\right|+\rho\max_i\max_j\left|Y_i^L(s)-Y_j^L(s)\right|} \tag{6}$$

式中:$\xi(j)(s)$为不同措施的第s个样本点的土壤理化性质i和土壤抗侵蚀性指数指标j的关联系数;$Y_i^L(s)$和$Y_j^L(s)$分别为土壤理化性质i和土壤抗蚀性指数指标j的标准化值;ρ为分辨系数,一般取值0.5。

土壤理化性质i和土壤抗侵蚀性指数指标j的关联系数求平均值,得到$m\times n$的关联度矩阵η。当$0<\eta\leqslant 1$时,说明存在关联性,η_{ij}值越接近1,表明两者的关联度越大,耦合作用越强[23]。当$0<\eta_{ij}\leqslant 0.35$时,关联度为弱;当$0.35<\eta_{ij}\leqslant 0.65$时,关联度为中;当$0.65<\eta_{ij}\leqslant 0.85$时,关联度为较强;当$0.85<\eta_{ij}\leqslant 1.0$时,关联度为极强。为定量比较不同措施下土壤抗蚀性强弱与土壤理化性质的耦合协调发展程度,进一步构建抗蚀性指数——土壤理化性质指标的耦合模型,耦合度(C)的计算公式为:

$$C=\frac{1}{mn}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\xi_i(j)(s) \tag{7}$$

当$0\leqslant C<0.4$时,系统严重不协调;当$0.4\leqslant C<0.5$时,系统中度不协调;当$0.5\leqslant C<0.6$时,系统轻度不协调;当$0.6\leqslant C<0.7$时,系统弱协调;当$0.7\leqslant C<0.8$时,系统中度协调;当$0.8\leqslant C<0.9$时,系统良好协调;当$0.9\leqslant C<1.0$时,系统优质协调。

试验数据采用Excel 2022,SPSS 21.08和Origin 2022进行数据处理和统计分析,多重比较采用Duncan法检验,显著性水平($p<0.05$);用DPS软件计算灰色关联度。

2　结果与分析

2.1　等高反坡阶和植物篱措施下土壤理化性质及结构特征

2.1.1　土壤理化性质特征　表2中等高反坡阶、植物篱和坡耕地3个样地0—40 cm的土壤容重、孔隙状况、含水率总体上差异显著($p<0.05$),土壤容重随着土层深度增加呈增加趋势,其中坡耕地30—40 cm最高1.45 g/cm^3,等高反坡阶0—10 cm最低为1.10 g/cm^3。土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度均表现为等高反坡阶>植物篱>坡耕地,随着土层加深均呈下降趋势,土壤含水率排序为等高反坡阶>植物篱>坡耕地,随着土层加深呈下降趋势。由表2可知,0—40 cm土层,等高反坡阶与植物篱、坡耕地土壤有机质含量差异显著($p<0.05$),等高反坡阶样地有机质含量最高为24.13~39.20 g/kg,植物篱次之为16.26~18.63 g/kg,坡耕地最小为6.78~12.27 g/kg。0—10 cm土层土壤有机质含量均高于其他土层($p<0.05$),等高反坡阶和植物篱样地分别比坡耕地增加32.43,11.85 g/kg,10—20 cm分别高28.01,6.32 g/kg,20—30 cm分别高21.92,7.60 g/kg,30—40 cm分别高17.35,9.48 g/kg。通过等高反坡阶和植物篱措施的理化性质说明,2种措施都可以改善土壤结构,提高土壤养分。

2.1.2　土壤团聚体特征　对等高反坡阶和植物篱坡耕地的土壤水稳性团聚体含量进行比较可知(图2A),0—40 cm土层>0.25 mm水稳性团聚体含量分布在47.72%~81.62%,差异显著($p<0.05$),其中等高反坡阶和植物篱分别比原状坡耕地增加22.06%和19.07%。>0.5 mm水稳性团聚体含量分布在35.73%~62.24%,其中等高反坡阶和植物篱分别比原状坡耕地增加19.05%和15.29%,两种治理措施的土壤水稳性大团聚体存在显著差异($p<0.05$)。随着土层加深,坡耕地土壤团聚体破坏率呈上升趋势(图2B),相同土层深度下,等高反坡阶土壤团聚体破坏率显著低于原状坡耕地($p<0.05$),0—10 cm土层等高反坡阶和植物篱的土壤团聚体破坏率分别为10.51%和20.90%,而原状坡耕地土壤团聚体破坏率为26.41%。10—20

cm和20—30 cm土层，等高反坡阶和植物篱分别比原状坡耕地降低13.86%～22.20%和5.74%～20.99%。30—40 cm土层原状坡耕地比等高反坡阶和植物篱分别增加19.48%和11.70%。总体来看，各土壤剖面原状坡耕地显著高于等高反坡阶和植物篱样地，其中与等高反坡阶样地差异更显著($p<0.05$)。

3个样地0—40 cm土层团聚体平均重量直径和几何平均直径差异显著($p<0.05$)，表现为等高反坡阶最大，平均重量直径和几何平均直径分别达2.56～2.93 mm，1.15～1.77 mm（图2C），植物篱次之为1.80～2.01 mm，0.59～0.68 mm，原状坡耕地最小，为1.38～1.71 mm，0.37～0.58 mm，表明与原状坡耕地相比，等高反坡阶和植物篱样地团聚体更稳定，能够增加水稳性大团聚体的含量。0—40 cm土壤团聚体分形维数差异不显著($p>0.05$)（图2D），随着土层深度增加呈先减小后增加的趋势，原状坡耕地最大为2.49～2.62，植物篱次之为2.47～2.54，等高反坡阶最小为2.41～2.55。

表2 土壤理化性质

Table 2 Soil physicochemical properties

样地	土层深度/cm	毛管孔隙/%	非毛管孔隙/%	总孔隙度/%	容重/(g·cm^{-3})	土壤含水率/%	有机质/(g·kg^{-1})
等高反坡阶	0—10	55.55±4.09Aa	7.40±1.19Bb	62.95±4.04Aa	1.10±0.12Db	48.90±9.75Aa	39.20±1.93Aa
	10—20	45.80±2.48Cc	6.64±2.82Cc	52.44±2.92Bbc	1.17±0.16Dab	35.40±10.60Bb	39.16±1.04Aa
	20—30	47.37±4.22Bb	7.30±1.86Bb	54.67±5.07Bab	1.30±0.13Bab	15.50±4.21Dbc	31.95±1.48Ab
	30—40	44.52±5.38Cc	8.16±2.26Ba	52.68±5.53Bc	1.33±0.16Ba	11.20±1.52Dc	24.13±3.86Bc
植物篱	0—10	50.51±8.33Aa	3.60±2.78Db	54.11±5.87Ba	1.24±0.12Cc	39.90±8.13Ba	18.63±5.25Cab
	10—20	49.89±14.12Ba	2.85±1.79Dc	52.74±15.34Bb	1.34±0.24Bb	28.00±10.73Cb	17.47±3.68Ca
	20—30	45.04±11.58Cb	5.11±2.63Ca	50.15±9.97Cc	1.41±0.16Aa	11.30±3.87Dc	17.63±3.88Cab
	30—40	45.12±8.80Cb	1.82±3.12Dd	46.94±9.61Dd	1.44±0.17Aa	7.30±1.68Dc	16.26±3.71Cb
坡耕地（对照）	0—10	43.99±7.43Ca	10.49±3.12Aa	54.48±6.20Ba	1.19±0.11Dc	27.80±3.59Ca	12.27±1.17Ca
	10—20	40.47±5.31Db	8.54±4.48Bb	49.01±4.23Cb	1.34±0.13Bbc	9.60±5.28Db	11.15±1.64Cab
	20—30	39.89±8.35Dc	7.47±5.27Bc	47.36±5.60Dc	1.35±0.13Bb	6.10±1.33Dc	10.03±2.28Cc
	30—40	40.17±2.40Db	6.84±1.56Cd	47.01±3.52Dc	1.45±0.09Aa	3.50±0.91Dd	6.78±5.20Dd

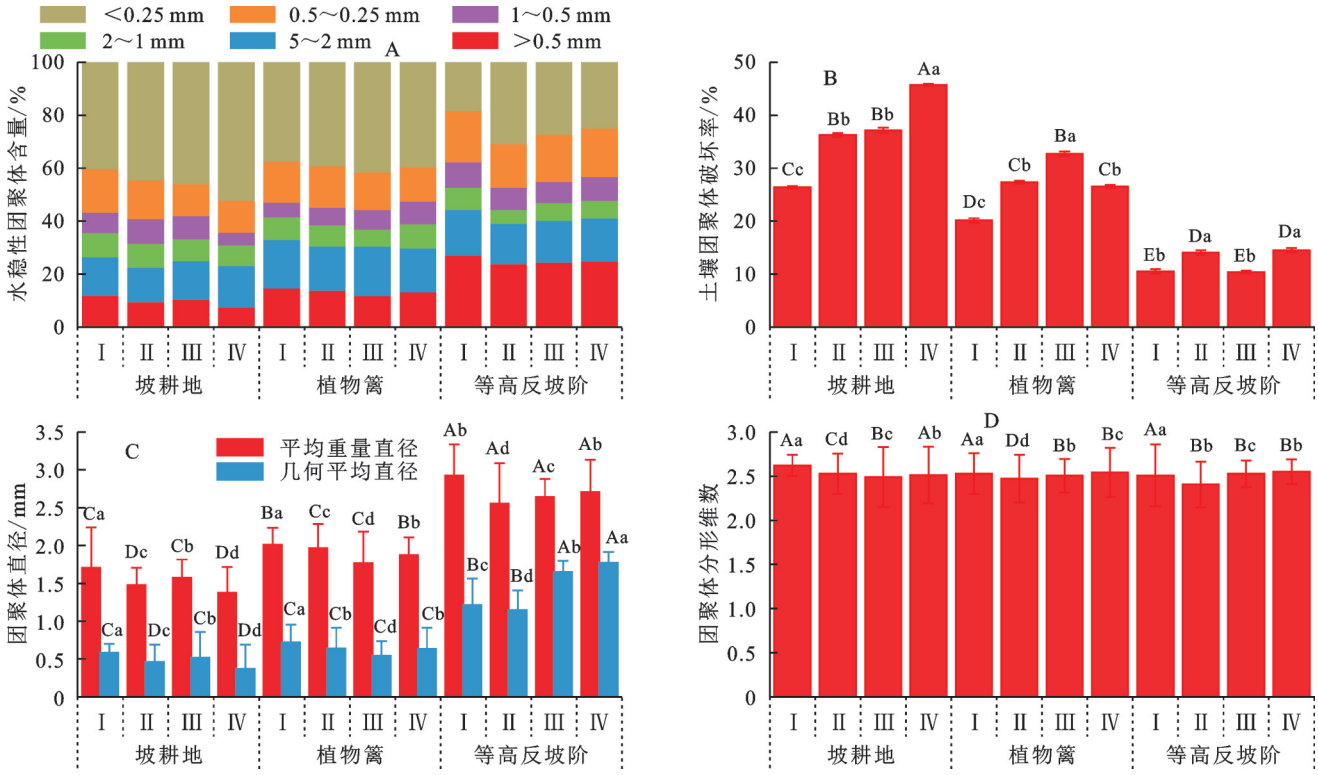
注：不同大写字母表示不同措施差异显著，不同小写字母表示各土层间差异显著($p<0.05$)。

2.1.3 土壤颗粒组成特征 由表3可知，等高反坡阶、植物篱和坡耕地3个样地的土壤颗粒组成整体差异显著($p<0.05$)，土壤以粉粒为主，土质主要为粉质黏土，具有强度低、结构松散、力学性能不稳定等特点。3种地类黏粒含量依次为等高反坡阶>植物篱>坡耕地；粉粒含量依次为植物篱>坡耕地>等高反坡阶；砂粒含量依次为坡耕地最大，而植物篱与等高反坡阶差异不显著($p>0.05$)。不同样地间的土壤粉粒含量、黏粒含量差异显著($p<0.05$)，砂粒含量等高反坡阶和植物篱两者差异不显著，但与原状坡耕地差异显著($p<0.05$)。粉粒含量中，植物篱样地显著大于其他2种样地，为56.11%～67.15%，坡耕地次之，为55.15%～68.80%。等高反坡阶样地黏粒含量显著大于其他2类样地，为28.46%～34.30%，植物篱样地次之，为20.35%～28.87%。土壤颗粒组成分形维数大小依次为坡耕地>植物篱>等高反坡阶。综上所述，研究区降雨集中且雨量大，坡耕地水土流失严重，细小颗粒被冲刷流失，粗颗粒含量增多，实施水土保持措施后，能够有效改善土壤结构，减少细小颗粒流失。

2.2 等高反坡阶和植物篱措施下土壤抗侵蚀特征

2.2.1 土壤抗冲性特征 土壤抗冲性由土体之间的抗分散能力决定，它是影响土壤抗侵蚀性能的重要因素[24]。如图3A所示，在冲刷的前2 min，各地类土壤的抗冲系数都较小，这主要是由于表层土壤疏松，造成了大量的泥沙流失，从而具有很低的抗冲能力；前10 min内，各类型土壤的抗冲系数随时间呈升高趋势；冲刷10 min后，坡耕地呈波动式缓慢增长，等高反坡阶和植物篱样地在第10分钟后依然保持着较高的增长速度，其抗冲刷能力逐渐显现出来。整体来看3种地类土壤抗冲性随时间增加呈先快速增加后趋于平缓趋势，坡耕地虽然随时间增加流失量变少，但等高反坡阶样地和植物篱样地整体流失量更少，抗冲性能更强。这表明等高反坡阶措施通过削减径流泥沙输出从而减少土壤有机质流失，植物篱措施能够增加植被覆盖，两种措施均能够使土壤有机质积累，土壤团聚体间的胶结力增强，故增加土壤抗冲性能。在等高反坡阶样地土壤中，微地形的改变增加了水稳性大团聚体含量，积累了土壤有机

质,从而增强了土壤的抗冲性能。植物篱样地植物根系对土壤结构具有一定的改善作用,但不如等高反坡阶样地。坡耕地植被种植单一,根系浅,对土体的固结作用较弱,且土壤孔隙度低,有机质含量少,水稳性大团聚体含量低,土壤容重高,土体紧实,通透性和透水性较差,所以土壤抗冲性较小。



注:不同大写字母表示不同措施差异显著,不同小写字母表示各土层间差异显著($p<0.05$)。Ⅰ为0—10 cm土层;Ⅱ为10—20 cm土层;Ⅲ为20—30 cm土层;Ⅳ为30—40 cm土层。

图2　土壤团聚体特征

Fig. 2　Characteristics of soil aggregates

表3　土壤颗粒组成特征

Table 3　Soil particle composition characteristics

样地	土层	砂粒	粉粒	黏粒	分形维数 D
		0.05～2 mm	0.002～0.05 mm	<0.002 mm	
等高反坡阶	0—10	14.20±9.79Da	53.28±4.91Aa	32.52±0.71Cc	2.733
	10—20	12.31±6.41Cb	54.84±16.39Db	32.85±7.76Bb	2.729
	20—30	12.22±6.71Ba	53.48±11.23Db	34.30±5.02Bb	2.682
	30—40	14.14±6.20Dc	57.40±9.93Cab	28.46±8.62Aa	2.705
植物篱	0—10	13.61±6.06Ca	65.15±9.03Ba	21.24±9.46Ba	2.783
	10—20	12.57±5.60Ca	67.15±7.94Ba	20.35±9.14Ba	2.728
	20—30	12.51±6.27Bb	58.62±12.38Bb	28.87±2.75Db	2.685
	30—40	15.82±3.12Bb	56.11±9.63Ba	28.07±2.37Cb	2.725
坡耕地(对照)	0—10	16.72±7.02Ab	57.13±17.54Cc	26.15±1.60Db	2.812
	10—20	14.72±4.66Ba	60.24±4.30Aa	25.04±1.33Cab	2.748
	20—30	15.71±5.34Bb	55.15±10.22Aa	29.14±1.99Dab	2.720
	30—40	14.00±7.27Bb	68.80±9.91Bb	17.20±7.24Ca	2.722

注:不同大写字母表示不同措施差异显著,不同小写字母表示相同措施内各土层间差异显著($p<0.05$)。

2.2.2　土壤抗蚀性特征　土壤颗粒在水中崩解的比例可以直观地反映土壤的抗侵蚀能力[25]。由图3B可知,土壤抗蚀指数随着土层加深呈逐渐下降趋势,0—10 cm土层抗蚀指数显著高于30—40 cm土层,同一土层,抗蚀指数从大到小依次为等高反坡阶措施>植物篱措施>原状坡耕地。坡耕地土壤抗蚀指数在

整个崩解过程中变化幅度最大，下降16%～48%，植物篱样地下降8%～20%，等高反坡阶样地变化幅度最小，下降4%～12%。在浸水的前1～4 min内，等高反坡阶和植物篱的抗蚀指数下降明显，坡耕地降低程度较大；在浸水4～10 min内，3个样地崩解缓慢，在第7分钟后趋于稳定，等高反坡阶、植物篱和坡耕地抗蚀指数分别降至4%，8%，12%。不同治理措施对土壤侵蚀的影响也存在着一定的差异，其中等高反坡阶的土壤抗侵蚀能力最强，其次是植物篱，而坡耕地则最差。等高反坡阶有效地增加了有机质含量，改善土壤结构，抗蚀效果明显，而坡耕地进行开垦，土壤结构较差，故抗蚀效果最差。

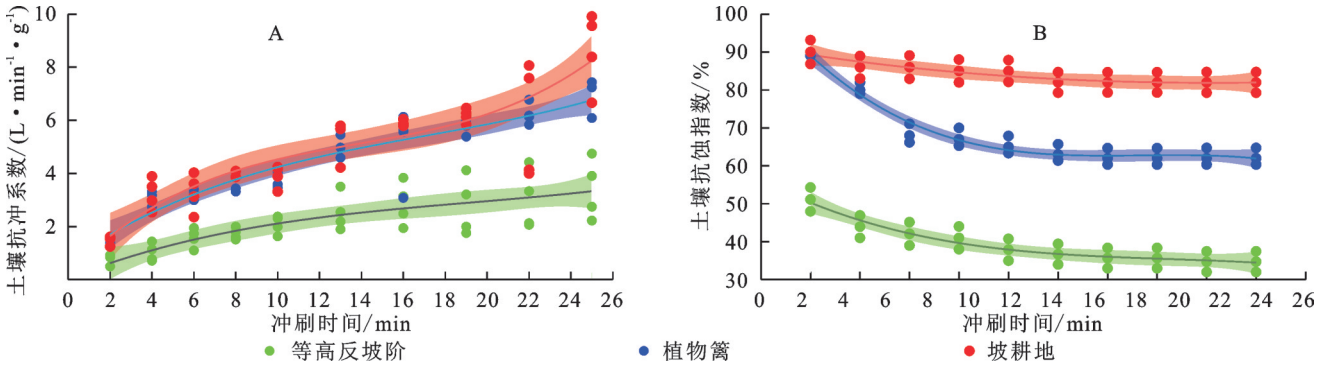


图3 土壤抗冲系数及抗蚀指数变化特征

Fig. 3 Variation characteristics of soil anti-scour coefficient and soil erosion resistance index

2.3 土壤抗侵蚀性综合评价

2.3.1 相关性分析 从图4可以看出，土壤容重与土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、含水率都呈极显著的负相关关系($p<0.01$)，并与抗冲性、抗蚀性在一定程度上呈负相关关系，与土壤有机质、>0.25 mm团聚体、>0.5 mm团聚体含量、平均重量直径呈显著负相关关系($p<0.05$)。土壤团聚体破坏率与土壤有机质、>0.25 mm团聚体、>0.5 mm团聚体含量、平均重量直径、几何平均直径、黏粒、抗冲性和抗蚀性呈极显著负相关关系($p<0.01$)，与容重呈显著正相关关系($p<0.05$)。土壤抗冲性与土壤含水率、有机质、>0.25 mm团聚体、>0.5 mm团聚体含量、平均重量直径、几何平均直径、粉粒含量、黏粒含量、抗蚀性呈极显著正相关关系，与总孔隙度、砂粒含量呈显著正相关关系($p<0.05$)。土壤抗蚀性与土壤含水率、有机质、>0.25 mm团聚体、>0.5 mm团聚体含量、平均重量直径、几何平均直径、粉粒含量、毛管孔隙度、总孔隙度、抗冲性呈极显著正相关关系($p<0.01$)，与黏粒含量呈显著正相关关系($p<0.05$)。

2.3.2 土壤抗蚀性指数指标和理化指标关联度分析 根据灰色关联度计算公式，得到抗侵蚀指标和理化性质间的关联矩阵(表4)，各指标关联度值介于0.46～0.97，均值为0.80，属于较强关联，表明等高反坡阶和植物篱措施下土壤抗侵蚀性指标和理化性质指标间有较强的耦合作用，二者联系和反馈紧密。由表4可知，团聚体破坏率和抗蚀指数对土壤理化性质指标反馈作用最明显，平均关联系数分别为0.87，0.83，都属于较强关联。>0.25 mm团聚体含量和团聚体破坏率与>0.25 mm团聚体含量与平均重量直径关联系数最大，均达到0.94，说明水稳性大团聚体是影响土壤抗侵蚀性的主要理化性质指标。土壤理化性质与抗侵蚀性指标的平均关联系数依次为>0.25 mm团聚体含量(0.89)>黏粒含量(0.88)=颗粒组成分形维数>有机质(0.84)≥0.5 mm团聚体含量(0.84)>砂粒含量(0.83)>粉粒含量(0.82)，属于较强关联。

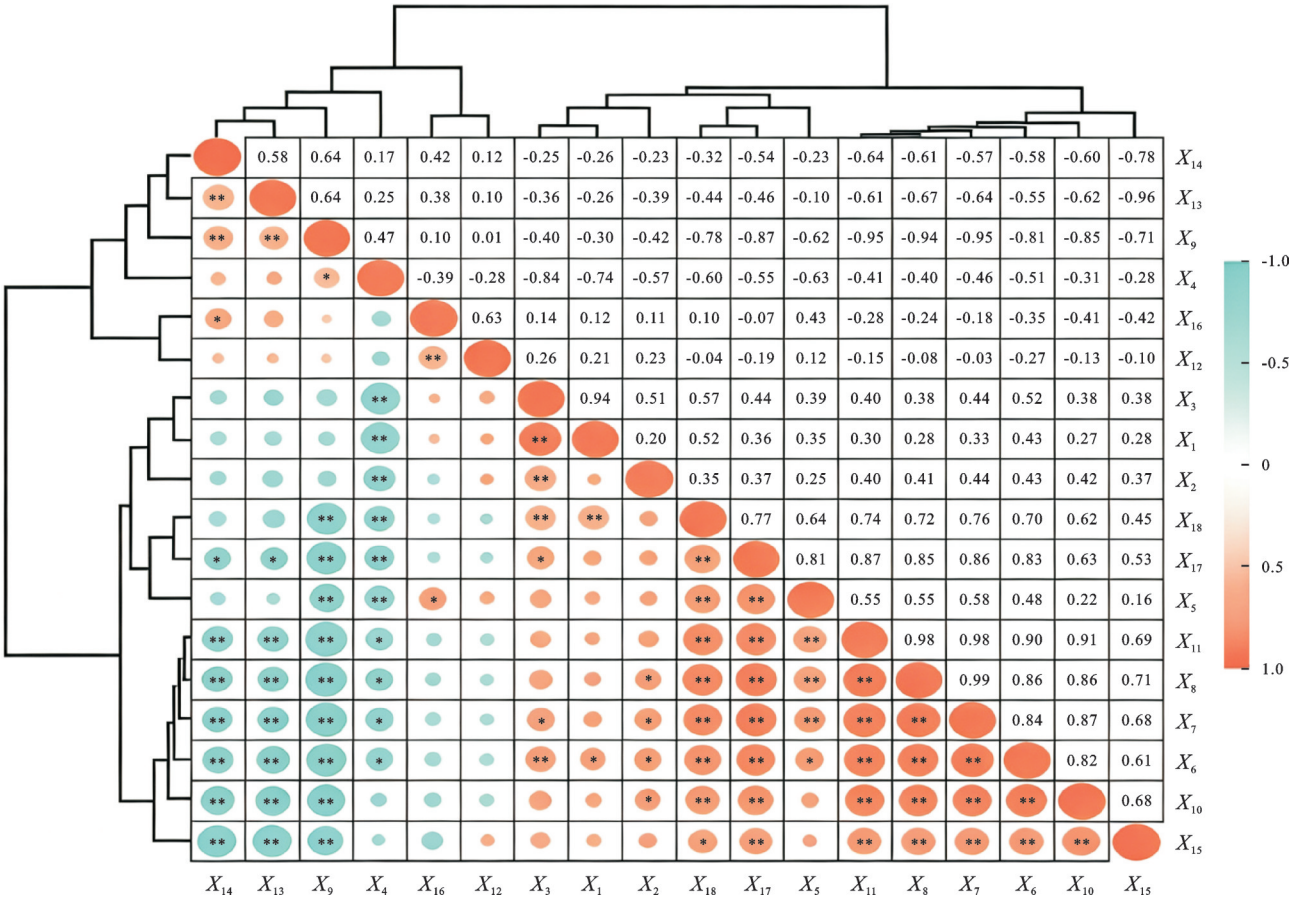
2.3.3 土壤抗侵蚀性指数指标和理化指标耦合度分析 根据耦合度模型，计算得到不同治理措施土壤理化性质指标和抗侵蚀性指标间的耦合协调程度(表5)。不同治理措施的抗侵蚀性耦合度介于0.65～0.85之间，平均耦合度为0.75，系统整体水平属于中度协调，说明土壤理化性质和抗侵蚀性基本达到协同状态。具体来看，不同治理措施的系统耦合协调程度排序为等高反坡阶>植物篱>坡耕地。等高反坡阶属于良好协调，其水稳性大团聚体、有机质、黏粒含量和容重都显著高于或低于对照坡耕地，表现为土壤抗侵蚀性指数(平均重量直径、抗冲系数、抗蚀指数)显著大于对照坡耕地，说明水土保持治理措施能有效减少土壤侵蚀，有利于大团聚体的形成和有机质的积累，改善土壤结构，使土壤性质和抗侵蚀性协调发展。

3 讨 论

3.1 不同治理措施土壤性质和结构特征

土壤水稳性团聚体含量反映了土壤结构的稳定性、持水性、通透性和抗侵蚀的能力，土壤团聚体破坏率可以表明土壤团聚体在水蚀作用下的分散程度，土壤团聚体平均重量直径和几何平均直径反映了土壤团聚体大小分布状况，3个指标均是土壤团聚

体稳定性的重要表征参数[26],本文中所研究的两种治理措施样地水稳性团聚体的质量百分比在60%以上,比原状坡耕地显著提升,且显著降低土壤团聚体破坏率,其中等高反坡阶措施下土壤团聚体相较于植物篱和对照坡耕地最稳定。已有研究表明,土壤有机质与水稳性大团聚体、平均重量直径呈显著正相关关系,与分形维数呈显著负相关关系,水稳性大团聚体含量越高,团聚体破坏率越低,则土壤抗侵蚀性越强[27]。团聚体分维值大小能够表征土壤结构稳定性的强弱,分维值越小,表明土壤结构稳定性越强[28]。可见,本研究表明通过等高反坡阶和植物篱措施治理后坡耕地的土壤抗侵蚀能力增强。



注:X_1为毛管孔隙度;X_2为非毛管孔隙度;X_3为总孔隙度;X_4为容重;X_5为土壤含水率;X_6为土壤有机质;X_7为>0.25 mm水稳性团聚体含量;X_8为>0.5 mm水稳性团聚体含量;X_9为团聚体破坏率;X_{10}为几何平均直径;X_{11}为平均重量直径;X_{12}为团聚体分形维数;X_{13}为砂粒含量;X_{14}为粉粒含量;X_{15}为黏粒含量;X_{16}为颗粒组成分形维数;X_{17}为抗冲系数;X_{18}为抗蚀指数。

图 4　土壤理化性质与抗侵蚀指标相关性

Fig. 4　Correlation between soil physicochemical properties and erosion resistance indicators

表 4　抗侵蚀性综合指标和理化指标的耦合矩阵

Table 4　Coupling matrix of comprehensive erosion resistance indicators and physicochemical indicators

关联度	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	平均值
X_9	0.93	0.82	0.78	0.8	0.88	0.82	0.94	0.92	0.83	0.85	0.81	0.89	0.92	0.87
X_{10}	0.72	0.57	0.64	0.63	0.90	0.66	0.82	0.64	0.73	0.84	0.85	0.79	0.91	0.76
X_{11}	0.52	0.46	0.59	0.76	0.67	0.93	0.90	0.94	0.80	0.83	0.89	0.89	0.91	0.78
X_{17}	0.77	0.54	0.62	0.70	0.61	0.89	0.92	0.93	0.82	0.81	0.70	0.92	0.83	0.78
X_{18}	0.79	0.55	0.84	0.80	0.78	0.91	0.88	0.74	0.80	0.85	0.82	0.91	0.85	0.82
平均值	0.75	0.59	0.69	0.74	0.77	0.84	0.89	0.84	0.80	0.83	0.82	0.88	0.88	0.80

等高反坡阶和植物篱措施实施后,土壤团聚体稳定性较坡耕地显著提升,这主要归因于3个方面的协同作用:(1)有机质积累机制。等高反坡阶通过改变微地形,减缓地表径流速度,促进枯落物和作物残体的就地沉积与分解,使0—10 cm土层有机质含量较坡耕地提高219%;植物篱则通过黄花菜多年生根系的持续输入和凋落物归还,使有机质含量提高96%。有机质作为团聚体形成的重要胶结物质,其含量的显著提升是水稳性大团聚体增加的根本原因。(2)物理结构改良机制。等高反坡阶将顺坡改为横

坡阶面，形成的微型蓄水区增加了水分入渗时间，减少了细颗粒的径流搬运，使土壤容重降低7.6%，总孔隙度提高15.6%；而坡耕地长期顺坡种植导致雨水冲刷严重，细颗粒流失，砂粒含量增加14.2%，土壤结构松散。(3) 生物固结机制。植物篱黄花菜根系在0—30 cm土层密集分布，可能是根系分泌物和菌根真菌产生的球囊霉素促进了微团聚体向大团聚体的转化，使>0.25 mm团聚体含量较坡耕地提高了19.07%。

表5 抗侵蚀性综合指标和理化指标的系统耦合协调度

Table 5 System coupling coordination degree of comprehensive erosion resistance indicators and physicochemical indicators

治理措施	耦合度	协调类型
等高反坡阶	0.85	良好协调
植物篱	0.74	中度协调
坡耕地	0.65	弱协调

虽然两种措施均显著改善了土壤结构，但等高反坡阶的效果优于植物篱，其深层机制在于：(1) 改良深度差异。等高反坡阶通过翻耕作用直接改变20—30 cm土层的物理结构，使该层有机质含量达31.95 g/kg，而植物篱主要依赖根系作用，改良效果集中在0—20 cm，20—30 cm土层有机质仅17.63 g/kg。(2) 水分调控差异。等高反坡阶形成的反坡梯面可增加降雨入渗30%～40%，减少地表径流60%以上，水分的充分入渗促进了土壤的冻融和干湿交替过程，加速了团聚体的形成；而植物篱虽能截留泥沙，但对水流的阻滞作用有限，减流效果约为等高反坡阶的70%。(3) 养分循环差异。等高反坡阶措施下，阶面积水区形成的厌氧—好氧交替环境有利于氮素的矿化和固定，加之玉米秸秆的翻压还田，养分循环更为完整；植物篱虽然黄花菜可多年生长，但其地上部分需定期收割作为饲料，养分输出较多，限制了土壤肥力的快速提升。因此，对于侵蚀严重、土壤结构极度退化的坡耕地，等高反坡阶措施能够在短期内显著改善深层土壤结构，提高抗侵蚀能力；而植物篱措施则可能需要较长的建植时间才能充分发挥根系固土和有机质积累的作用，更适合侵蚀程度较轻、需要兼顾经济效益的坡耕地。

3.2 不同治理措施土壤抗冲和抗蚀性特征

相同冲刷条件下不同地类的抗冲系数依次为等高反坡阶样地〔1.49～10.15 L/(min·g)〕>植物篱样地〔1.39～6.71 L/(min·g)〕>坡耕地〔0.69～3.41 L/(min·g)〕。资如毅等[29]的研究结果显示，喀斯特地区桂花人工林和撂荒地的抗冲系数分别为1.25～5.48，〔1.21～10.01 L/(min·g)〕，比本研究中的等高反坡阶样地和植物篱样地略高，农地与本研究中的差异不大。本研究中，等高反坡阶样地的抗冲性是坡耕地的2.98倍，植物篱样地是坡耕地的2.01倍，而喀斯特地区的撂荒地抗冲性是农地的7.88倍，人工林仅高于农地，与本研究不同，是因为喀斯特地区的桂花人工林受人为扰动较大，生物多样性差，其抗冲能力减弱，本研究中等高反坡阶样地和植物篱样地人为干扰少，植被类型更丰富，从而增强土壤抗冲能力。与原状坡耕地相比，等高反坡阶和植物篱措施对土壤抗蚀性的改善效果同样明显。本研究中的团聚体崩解规律与姜兴雪等[30]的研究结果有一定差异，姜兴雪的研究中，在浸水的前1～3 min内，裸地团聚体崩解缓慢，抗蚀指数波动不明显，在浸水3～10 min内，团聚体崩解较快，到第6分钟后趋于稳定。而在本研究中，坡耕地的土壤抗蚀指数在前3分钟下降明显，5 min前达到平稳。这可能是因为姜兴雪等研究使用2～5 mm土壤团聚体进行崩解试验，而本试验中，团聚体粒径在5～7 mm之间，较大的团聚体更易产生“气爆”，团聚体崩解速率加快，导致崩解率出现差异，抗蚀指数也出现差异。

从两种治理措施下土壤抗冲性和抗蚀性差异的作用机制来看：(1) 团聚体结构层面。等高反坡阶措施使>0.5 mm水稳性团聚体含量达62.24%，较坡耕地提高74%，而植物篱提高43%。大团聚体含量的差异直接影响土壤的抗冲刷能力，因为大团聚体具有更强的抗水流剪切能力和更低的可分散性，证实了团聚体结构是控制抗冲性的关键。(2) 孔隙结构层面。等高反坡阶改变了土壤孔隙的数量和分布，非毛管孔隙度较坡耕地降低30%，毛管孔隙度提高26%，这种孔隙结构的优化使得土壤既具有良好的持水能力，又能快速排除过剩水分，减少了饱和土体的崩解风险。而坡耕地非毛管孔隙度高达10.49%，在暴雨条件下易形成快速径流通道，加剧土壤侵蚀。(3) 胶结物质层面。土壤有机质不仅是团聚体形成的胶结剂，其分解产物(如多糖、腐殖酸等)还能提高土粒间的黏结力[21]。等高反坡阶0—40 cm平均有机质含量达33.61 g/kg，是坡耕地(10.06 g/kg)的3.3倍，这种有机质的大量积累使得土粒间形成了更强的有机—矿质复合体，显著增强了土壤抵抗水流冲刷的能力。

3.3 土壤基本性质、结构及抗侵蚀能力关系耦合机制分析

本研究通过灰色关联度和耦合度模型发现，等高反坡阶(0.85)、植物篱(0.74)和坡耕地(0.65)的耦合协调度呈显著梯度差异，反映了不同治理措施下土壤性质—抗侵蚀性系统的协同发展水平。这种差异的形成机制首先是正反馈循环的建立。等高反坡阶措施通过改善土壤水分条件，促进植被生长，增加

凋落物输入,以提高有机质含量和促进团聚体形成,增强了土壤结构稳定性,进一步改善水分条件,形成了土壤改良的正反馈循环,使得土壤理化性质与抗侵蚀性相互促进,达到良好的协调状态。而坡耕地由于缺乏有效措施,陷入了水土流失、土壤结构破坏、抗侵蚀能力下降和水土流失加剧的恶性循环,系统耦合度低,仅为弱协调。其次是关键因子的协同作用。关联度分析表明,有机质、水稳性大团聚体和团聚体破坏率是影响抗侵蚀性的关键因子,其对抗冲系数和抗蚀指数的累积解释量超过 85%。等高反坡阶措施能够同步改善这 3 个关键因子:有机质提高 219%,>0.25 mm 团聚体提高 22.06%,破坏率降低 17.9%,形成了协同增效作用;而坡耕地这 3 个因子均处于劣化状态,导致抗侵蚀性低下。最后是时空尺度的匹配性,等高反坡阶通过空间上改变微地形结构、时间上每年重复整修,使得土壤改良效果能够在不同土层和不同生长季节得到维持和强化,体现了措施效果的时空持续性;而植物篱虽然在表层(0—10 cm)改良效果显著,但深层(20—40 cm)改良有限,且需要长期才能充分发挥作用,时空尺度匹配性较差,导致耦合协调度介于两者之间。

4　结　论

本研究通过对比分析等高反坡阶、植物篱和坡耕地的土壤特性,系统揭示了两种治理措施对西南高山峡谷区红壤坡耕地抗侵蚀能力的改善效果及作用机制,主要结论如下:

(1) 两种治理措施显著改善土壤结构,且效果存在差异。等高反坡阶使>0.25 mm 和>0.5 mm 水稳性团聚体含量较坡耕地分别提高 22.06% 和 19.05%,团聚体破坏率降低 13.86%~22.20%,平均重量直径和几何平均直径分别提高 67% 和 133%;植物篱措施使上述指标的改良幅度分别为 19.07%,15.29%,5.74%~20.99%,18% 和 55%。两种措施均能显著降低土壤容重、增加孔隙度和有机质含量,优化土壤颗粒组成(提高黏粒、降低砂粒),但等高反坡阶的改良效果更显著,其对深层土壤(20—40 cm)的改良优势尤为明显。

(2) 两种治理措施均可大幅提升土壤抗侵蚀能力。等高反坡阶和植物篱的抗冲系数均值分别是坡耕地的 2.33 倍和 1.79 倍,抗蚀指数较坡耕地提高 50% 和 30%。土壤有机质、水稳性大团聚体(>0.25 mm 和>0.5 mm)、平均重量直径、几何平均直径与抗冲系数和抗蚀指数呈极显著正相关($p<0.01$),土壤容重和团聚体破坏率呈极显著负相关($p<0.01$)。有机质、>0.25 mm 团聚体、团聚体破坏率和平均重量直径是影响土壤抗侵蚀性的关键因子。

(3) 土壤性质与抗侵蚀性系统耦合协调,治理措施有效促进协同发展。灰色关联度分析显示,土壤理化性质与抗侵蚀性指标间关联度均值为 0.80,属较强关联。耦合协调度排序为等高反坡阶(0.85,良好协调)>植物篱(0.74,中度协调)>坡耕地(0.65,弱协调)。等高反坡阶通过同步改善有机质、水稳性大团聚体和团聚体破坏率等关键因子,建立了土壤改良的正反馈循环,实现了土壤性质与抗侵蚀性的协同优化。

(4) 本研究为西南高山峡谷区坡耕地水土保持措施选择提供了科学依据。对于侵蚀严重的坡耕地,等高反坡阶措施能快速有效地改善土壤结构、提升抗侵蚀能力;对于需要兼顾经济效益的区域,植物篱措施是较优选择。两种措施均能通过改善土壤团聚体结构、增加有机质积累,从根本上提高土壤抗侵蚀能力,对促进区域水土保持和农业可持续发展具有重要意义。

参考文献(References):

[1] 易兴松,戴全厚,严友进,等.西南喀斯特地区耕地撂荒生态环境效应研究进展[J].生态学报,2023,43(3):925-936.
Yi X S, Dai Q H, Yan Y J, et al. Research progress on the ecological environment effect of farmland abandonment in karst areas of Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(3):925-936.

[2] 陈峰,李红波.基于GIS和RUSLE的滇南山区土壤侵蚀时空演变:以云南省元阳县为例[J].应用生态学报,2021,32(2):629-637.
Chen F, Li H B. Spatial-temporal variations of soil erosion in Southern Yunnan Mountainous Area using GIS and RUSLE: a case study in Yuanyang County, Yunnan Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021,32(2):629-637.

[3] Argaman E, Fei W, Yan X, et al. Adapting empirical soil erosion models to agrivoltaic systems: Limitations of RUSLE and factor-specific adaptations[J]. Soil and Tillage Research, 2026,257:106969.

[4] 张卫,刘亚,夏小林,等.皖西大别山区土壤抗蚀与抗冲特征及其影响因素[J].水土保持通报,2025,45(3):10-15.
Zhang W, Liu Y, Xia X L, et al. Characteristics of soil resistance to erosion and scouring, and their influencing factors in Dabie Mountains of western Anhui Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3):10-15.

[5] 王珊珊,毕华兴,崔艳红,等.晋西黄土区不同密度刺槐林土壤抗蚀性关键指标及特征研究[J].北京林业大学学报,2022,44(5):94-104.
Wang S S, Bi H X, Cui Y H, et al. Key indexes and

characteristics of soil anti-erodibility of *Robinia pseudoacacia* with different densities in loess region of western Shanxi Province, northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022,44(5):94-104.

[6] Kantavichai R, Turnblom E C. Identifying non-thrive trees and predicting wood density from resistograph using temporal convolution network[J]. Forest Science and Technology, 2022,18(4):144-149.

[7] Ye L P, Ji L L, Chen H F, et al. Spatial contribution of environmental factors to soil aggregate stability in a small catchment of the Loess Plateau, China[J]. Agronomy, 2022,12(10):2557.

[8] 郭萍,夏振尧,高峰,等.香根草植物篱对三峡库区坡地紫色土侵蚀的影响[J].农业工程学报,2021,37(19):105-112.
Guo P, Xia Z Y, Gao F, et al. Effects of *Vetiveria zizanioides* hedgerow on the erosion of purple soil of slope land in the Three Gorges Reservoir Area of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(19):105-112.

[9] 苏鹏,贾燕锋,曹馨月,等.东北黑土区不同坡段等间距植物篱减流减沙特征[J].水土保持学报,2019,33(3):22-26,35.
Su P, Jia Y F, Cao X Y, et al. Characteristics of runoff and sediment reduction by equidistant hedgerows at different slope sections in northeast black soil area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(3):22-26,35.

[10] 张洋,王克勤,段旭,等.等高反坡阶措施下玉米水分利用效率对坡耕地土壤水分变化的响应[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2022,50(1):112-125.
Zhang Y, Wang K Q, Duan X, et al. Response of crop water use efficiency to soil water changes on contour-reverse slope[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2022,50(1):112-125.

[11] 王帅兵,宋娅丽,王克勤,等.不同雨型下反坡台阶减少红壤坡耕地氮磷流失的效果[J].农业工程学报,2018,34(13):160-169.
Wang S B, Song Y L, Wang K Q, et al. Effects of reverse-slope terrace on nitrogen and phosphorus loss in sloping farmland of red loam under different rainfall patterns[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018,34(13):160-169.

[12] 刘晓微,赵洋毅,王克勤,等.坡耕地等高反坡阶整地年限对土壤改良和玉米产量的影响[J].水土保持学报,2022,36(1):307-315.
Liu X W, Zhao Y Y, Wang K Q, et al. Effects of site preparation years of contour reverse-slope terrace on soil improvement and corn yield in sloping farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(1):307-315.

[13] 朱婉菁,王克勤,马建刚,等.西南高山峡谷区坡面水土保持型生态农业及典型模式应用[J].生态学报,2025,45(14):6707-6718.
Zhu W J, Wang K Q, Ma J G, et al. Application of soil and water conservation-oriented ecological agriculture and typical models on slope in Southwest Alpine-Canyon Area of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(14):6707-6718.

[14] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.
Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Physical and Chemical Analysis of Soil[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1978.

[15] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.
Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Fractal characteristics of soil characterized by weight distribution of particle size[J]. Chinese Science Bulletin, 1993,38(20):1896-1899.

[16] 赵洋毅,周运超,段旭.黔中石灰岩喀斯特表层土壤结构性与土壤抗蚀抗冲性[J].水土保持研究,2008,15(2):18-21.
Zhao Y Y, Zhou Y C, Duan X. Surface soil structure and its relationship with soil anti-erosion and soil anti-scour under the limestone region of karat area in the middle of Guizhou[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008,15(2):18-21.

[17] 李勇,徐晓琴,朱显谟,等.植物根系与土壤抗冲性[J].水土保持学报,1993,7(3):11-18.
Li Y, Xu X Q, Zhu X M, et al. Plant roots and soil anti-scourability[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1993,7(3):11-18.

[18] 史小鹏,苟贺然,何淑勤,等.成都市温江区两种绿地土壤抗蚀抗冲性及其影响因素[J].水土保持通报,2024,44(4):117-125.
Shi X P, Gou H R, He S Q, et al. Soil anti-erosion and anti-scouring effects of two types of urban green spaces and factors influencing them in Wenjiang district, Chengdu City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(4):117-125.

[19] 张钦,于恩江,林海波,等.连续种植不同绿肥作物的土壤团聚体稳定性及可蚀性特征[J].水土保持研究,2019,26(2):9-16.
Zhang Q, Yu E J, Lin H B, et al. Stability and erodibility of aggregate affected by different continuous green manure cultivations[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(2):9-16.

[20] 朱兆棋,刘守江,刘鲁光,等.安宁河干旱河谷区不同类型农用地土壤抗冲性及与土壤性质关系[J].水土保持研究,2024,31(1):27-34,43.
Zhu Z Q, Liu S J, Liu L G, et al. Soil anti-scourability

of different types of agricultural lands in the arid valley area of the Anning River and its relationship with soil properties[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(1):27-34,43.

[21] 张勇,王海娣,高玉红,等.多元胡麻轮作模式对土壤团聚体特征及氮素含量的影响[J].草业学报,2023,32(1):75-88.
Zhang Y, Wang H D, Gao Y H, et al. Effect of multivariate flax rotation mode on soil aggregation characteristics and nitrogen content[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023,32(1):75-88.

[22] 郑海金.赣北红壤坡面水土保持措施保水减沙作用研究[D].北京:北京林业大学,2012.
Zheng H J. Effects of soil and water conservation measures on runoff and sediment reduction in red soil slopes of North Jiangxi [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.

[23] 薛鸥,魏天兴,刘飞,等.公路边坡植物群落多样性与土壤因子耦合关系[J].北京林业大学学报,2016,38(1):91-100.
Xue O, Wei T X, Liu F, et al. Modeling the degree of coupling and interaction between plant community diversity and soil properties on highway slope[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016,38(1):91-100.

[24] Zhang S, Xiong D H, Wu H, et al. Effects of the root morphological characteristics of different herbaceous species on soil shear strength and soil anti-scourability in the dry-hot valley region of South-western China[J]. Soil Research, 2020,58(2):189-197.

[25] 聂晓刚,梁博,杨东升,等.色季拉山土壤抗蚀性空间差异性分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2018,46(5):69-76.
Nie X G, Liang B, Yang D S, et al. Spatial differentiation of soil anti-erodibility in the Sejila Mountain[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2018,46(5):69-76.

[26] Dong L, Zhang W T, Xiong Y W, et al. Impact of short-term organic amendments incorporation on soil structure and hydrology in semiarid agricultural lands[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2022,10(3):457-469.

[27] 周桐,潘鹤,张扬,等.不同配置的多功能水土保持植被对黑土抗侵蚀特征的影响[J].东北林业大学学报,2022,50(5):100-104,111.
Zhou T, Pan H, Zhang Y, et al. Effects of multifunctional soil and water conservation vegetation with different configurations on erosion resistance characteristics of black soil[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022,50(5):100-104,111.

[28] Kooch Y, Ghorbanzadeh N, Haghverdi K, et al. Soil quality cannot be improved after thirty years of land use change from forest to rangeland[J]. Science of the Total Environment, 2023,856(Pt 2):159132.

[29] 资如毅,赵龙山,钱晓鹤,等.喀斯特高原山地土壤抗冲性与土壤物理性质的关系[J].水土保持学报,2022,36(3):23-29.
Zi R Y, Zhao L S, Qian X H, et al. Relationship between soil anti-scourability and soil physical properties in karst mountain areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(3):23-29.

[30] 姜兴雪,查瑞波,毛兰花,等.花岗岩红壤侵蚀退化地不同治理模式土壤抗蚀性评价[J].水土保持学报,2021,35(6):31-37.
Jiang X X, Zha R B, Mao L H, et al. Evaluation of soil erosion resistance under different treatment modes in erosion degraded land of granite red soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(6):31-37.

(上接第 253 页)

[27] 方海燕,蔡强国,李秋艳.东北典型黑土区乌裕尔河中游泥沙输移月年时间尺度特征[J].泥沙研究,2009,34(2):16-21.
Fang H Y, Cai Q G, Li Q Y. Sediment transport characteristics at the monthly and yearly scales in midstream of Wuyuer River in the typical black soil region of Northeastern China[J]. Journal of Sediment Research, 2009, 34(2):16-21.

[28] 丁贵惠,任忠政,胡伟,等.侵蚀性降雨对黑土坡耕地土壤侵蚀特征的影响[J].水土保持学报,2024,38(2):47-56.
Ding G H, Ren Z Z, Hu W, et al. Effects of erosive rainfall on soil erosion characteristics of black sloping farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(2):47-56.

[29] Chen Z X, Guo M M, Chen Y, et al. Utilizing an 11-year runoff plot dataset to evaluate the regulation of six land management practices on runoff and sediment on Mollisols slopes and the applicability of the WEPP model [J]. Soil and Tillage Research, 2025,252:106601.