

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.05.016

CSTR:32310.14.stbxb.2026.05.016

白毛毛,郭逸轩,韦盼,等.秸秆碎混还田对紫色土坡耕地土壤侵蚀阻力的影响[J].水土保持学报,2026,40(5):125-133.

Bai Maomao, Guo Yixuan, Wei Pan, et al. Effects of chopped straw incorporation and return on soil erosion resistance in purple soil sloping farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(5): 125-133.

秸秆碎混还田对紫色土坡耕地土壤侵蚀阻力的影响

白毛毛¹, 郭逸轩¹, 韦盼¹, 朱平宗^{1,2}, 吴俊南¹,

陈立搏¹, 王定斌¹, 陈晓燕^{1,2}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 西南大学水土保持生态修复重庆市重点实验室, 重庆 400716)

摘 要: [目的] 秸秆还田通过直接作用及间接作用影响土壤理化性质, 驱动土壤侵蚀阻力产生响应, 进而影响土壤侵蚀过程。因此, 探究秸秆碎混还田对紫色土坡耕地土壤侵蚀阻力的潜在影响及驱动因素, 可为紫色土区秸秆还田调控坡耕地土壤侵蚀的认识提供理论依据。[方法] 在重庆市石柱土家族自治县鱼池镇选取典型紫色土坡耕地, 以无秸秆还田为对照(CK), 设置 4 个秸秆还田量梯度(1.25、2.50、3.75、5.00 t/hm²), 采用水槽冲刷试验测定土壤分离能力(D_c), 并计算细沟可蚀性(K_r)和临界剪切力(τ_c), 明确不同秸秆还田量下土壤侵蚀阻力的差异及作用路径。[结果] 1) 不同秸秆还田量下 D_c 、 K_r 和 τ_c 分别为 0.003 8~0.041 1 kg/(m²·s)、0.000 6~0.004 7 s/m 和 2.677~5.473 Pa。与对照相比, 秸秆还田下 D_c 和 K_r 分别减小 66.57%~90.88% 和 65.96%~87.23%, 而 τ_c 增加 47.51%~100.67%。 D_c 随着秸秆还田量的增加呈先减小后增大的二次函数关系 [$D_c=0.002\ 5(SIA-3.75)^2+0.002\ 4, R^2=0.92$], 还田量为 3.75 t/hm² 时, D_c 达到最小值。2) 相关分析表明, 不同秸秆还田量下土壤侵蚀阻力的差异与秸秆腐解特性及其驱动的土壤理化性质显著相关, 其中 τ_c 与秸秆腐解量、秸秆残余量、饱和水分体积分数、团聚体平均质量直径和土壤有机质含量均呈显著正相关 ($p<0.05$); 而 K_r 与 5 个指标均呈显著负相关 ($p<0.05$), 并与土壤体积质量呈显著正相关 ($p<0.05$)。3) 基于随机森林和路径分析发现, 秸秆还田提升土壤侵蚀阻力主要受控于秸秆腐解增加有机质质量分数, 提升团聚体稳定性的间接作用, 而秸秆残余的直接作用增加土壤的细沟可蚀性, 降低土壤侵蚀阻力。[结论] 秸秆碎混还田能够显著提高紫色土坡耕地土壤侵蚀阻力, 但其效应存在适宜阈值。在本研究条件下, 3.75 t/hm² 还田量下土壤分离能力最低, 细沟可蚀性最小, 临界剪切力最大, 综合表现最优。

关键词: 紫色土; 秸秆碎混还田; 土壤分离能力; 细沟可蚀性; 临界剪切力

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0125-09

Effects of Chopped Straw Incorporation and Return on Soil Erosion Resistance in Purple Soil Sloping Farmland

Bai Maomao¹, Guo Yixuan¹, Wei Pan¹, Zhu Pingzong^{1,2}, Wu Junnan¹,

Chen Libo¹, Wang Dingbin¹, Chen Xiaoyan^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: [Objective] Straw return regulates soil erosion processes through direct and indirect impacts on soil physicochemical properties, thereby altering soil erosion resistance. Therefore, the study explores the potential effects and driving factors of chopped straw incorporation and return on soil erosion resistance in purple soil sloping farmland, providing a theoretical basis for regulating soil erosion in sloping farmland in purple soil regions through straw return practices. [Methods] A typical purple soil sloping farmland was selected in Yuchi Town, Shizhu

收稿日期: 2026-03-03

修回日期: 2026-04-02

录用日期: 2026-04-09

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-05-29

资助项目: 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(CSTB2022TIAD-LUX0005); 重庆市自然科学基金创新发展联合基金重点项目(CSTB2024NSCQ-LZX0075); 大学生创新创业训练项目(202510635028, S202510635329)

第一作者: 白毛毛(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 15835183484@163.com

通信作者: 陈晓燕(1971—), 女, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: c400716@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

County, Chongqing. Using no straw return as the control (CK), four straw return rates (1.25, 2.50, 3.75, and 5.00 t/hm²) were applied. Soil detachment capacity (D_c) was measured using flume scouring tests, and rill erodibility (K_r) and critical shear stress (τ_c) were calculated to clarify the differences of soil erosion resistance and its response pathways under different straw return rates. [Results] 1) Under different straw return rates, D_c , K_r , and τ_c ranged from 0.003 8 kg/(m²·s) to 0.041 1 kg/(m²·s), 0.000 6 s/m to 0.004 7 s/m, and 2.677 Pa to 5.473 Pa, respectively. Compared with the control, straw return decreased D_c and K_r by 66.57%—90.88% and 65.96%—87.23%, respectively, while increasing τ_c by 47.51%—100.67%. D_c showed a quadratic relationship with straw return rate, first decreasing and then increasing ($D_c=0.002\ 5(\text{SIA}-3.75)^2+0.002\ 4$, $R^2=0.92$), reaching its minimum at a rate of 3.75 t/hm². 2) Correlation analysis indicated that the differences in soil erosion resistance under different straw return rates were significantly correlated with straw decomposition characteristics and induced changes in soil physicochemical properties. Specifically, τ_c was significantly positively correlated with straw decomposition amount, straw residual amount, saturated water content, mean weight diameter of aggregate, and soil organic matter content ($p<0.05$). In contrast, K_r was significantly negatively correlated with these five indicators ($p<0.05$) but significantly positively correlated with soil bulk density ($p<0.05$). 3) Random forest and path analysis results indicated that improvements in soil erosion resistance were mainly controlled by the indirect effect of straw decomposition in raising organic matter content and enhancing aggregate stability. However, straw residues directly increased soil rill erodibility and reduced soil erosion resistance. [Conclusion] Chopped straw incorporation and return can significantly enhance soil erosion resistance in purple soil sloping farmland, but this effect has an optimum threshold. Under the conditions of this study, a straw return rate of 3.75 t/hm² achieves the best overall performance, reaching the lowest soil detachment capacity, the lowest rill erodibility, and the highest critical shear stress.

Keywords: purple soil; chopped straw incorporation; soil detachment capacity; rill erodibility; critical shear stress

Received: 2026-03-03

Revised: 2026-04-02

Accepted: 2026-04-09

Online(www.cnki.net): 2026-05-29

土壤侵蚀作为全球性的生态环境问题,不仅导致土地生产力的退化,而且造成水体污染,使土壤和水体生态系统功能双重退化,严重制约社会和经济的可持续发展^[1]。根据土壤侵蚀发生的动力过程,土壤侵蚀可以分为土壤分离、泥沙输移和泥沙沉积3个子过程,土壤分离过程为泥沙输移和泥沙沉积提供物质来源,是其他2个过程发生的前提^[2]。然而土壤分离能力除受坡面径流水动力学特性的影响外,还与土壤本身的侵蚀阻力密切相关。因此,深入剖析不同条件下土壤侵蚀阻力的差异及其主控因素对于水土保持措施的制定具有重要意义。

秸秆碎混还田作为一项重要的水土保持措施,可以有效降低土壤分离能力,提升土壤侵蚀阻力。首先,裸露于土壤表面的秸秆可以增加地面粗糙度,减小坡面径流动能,从而降低径流冲刷能力^[3-4];其次,混入土壤的秸秆通过形成空间网络结构,起到加筋锚固作用,直接增强土壤结构稳定性,提升土壤抗侵蚀能力^[5]。秸秆腐解后能够显著增加土壤有机质质量分数,增强土壤微生物活性,促进水稳性团聚体的形成,改善土壤结构,进而提升土壤侵蚀阻力^[6]。

秸秆分解后也能够向土壤输送养分,促进作物生长,增强作物根系的捆绑作用,进一步提升土壤侵蚀阻力,降低土壤分离能力^[7]。然而,秸秆阻控水土流失的效益并非随秸秆还田量的增加呈线性增加,而是存在明显的阈值效应,且不同区域的适宜还田量也有所差异,如Chen等^[8]和Xing等^[9]的研究得出,9.00 t/hm²的还田量是东北黑土区秸秆阻控土壤侵蚀的最佳还田量,而Ma等^[10]的研究表明,3.50 t/hm²的还田量是黄土高原秸秆阻控水土流失的最佳还田量。

重庆是西南地区粮食安全和农产品有效供给的重要基地,也是长江上游和三峡库区生态环境保护的重点区域。紫色土是该地区分布最为广泛的耕地土壤类型,约占全市总面积的33.22%^[11]。受地形地貌、成土母质及人为活动等的综合影响,该类土壤普遍表现出肥力较低、结构松散的特性,极易发生侵蚀^[12]。与此同时,该地区作物秸秆资源丰富,但利用率较低,有待提高^[13]。因此,探索秸秆还田对紫色土结构稳定性、抗冲性的影响,对保障区域粮食安全与保护生态环境具有重要意义。鉴于此,本研究基于紫色土特性,将秸秆碎混后设置不同梯度还田,探索

降低土壤分离能力,提高土壤侵蚀阻力的适宜秸秆还田量,旨在为降低紫色土区土壤侵蚀、推进秸秆资源绿色利用及实现农业可持续发展提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市石柱土家族自治县鱼池镇团结村(30°15′56″N, 108°13′24″E),处于方斗山背斜东南翼,地势西高东低,中间平坦;地形多为中山、低山、丘陵;海拔800~1 563 m,气候类型为亚热带季风气候,多年平均气温12℃,多年平均降水量1 100 mm。土壤类型以侏罗纪紫色泥(页)岩发育形成的紫色土为主,土层厚度不超过50 cm,具有土层浅薄、有机质质量分数低、蓄水保土能力差、抗蚀性能弱等特点。主要粮食作物为玉米和马铃薯。

1.2 试验设计

在前期野外调查的基础上发现,当地坡耕地坡度主要为2°~10°,平均坡度为8°。因此,本研究选取1块面积为2 000 m²、平均坡度为8°的典型紫色土坡耕地,以无秸秆还田作为对照,设置1.25、2.50、3.75、5.00 t/hm²共4个秸秆还田量,在2024年5月7日通过当地传统的人工翻耕方式将玉米秸秆(切碎为3~5 cm的小段)均匀混入土壤,翻耕深度为20 cm。于5月9日种植玉米,行距80 cm,株距50 cm,每个处理设置2个4 m²(长4 m,宽1 m)试验小区,各小区母质、坡度、耕作方式和种植管理均保持一致。在玉米收获后通过野外采样、室内分析相结合的方法对每个处理的秸秆腐解特性、土壤理化性质及土壤分离能力进行测定。

1.3 样品的采集与测定

1.3.1 秸秆腐解特性样品的采集与测定 秸秆腐解特性可用秸秆腐解量和秸秆残余量表征,其中秸秆腐解量由秸秆初始还田量(2024年5月7日)与秸秆残余量(2024年10月)的差值进行计算得到。由于土壤分离能力对表层土壤的性质更为敏感,因此本研究只分析表层0~10 cm的秸秆腐解量。2次土壤中秸秆量的测量均使用特制取土容器(高10 cm,底面积100 cm²),在每个小区距顶端1、2、3 m位置采集0~10 cm土层土壤样品。将采集的土壤样品带回实验室,过1 mm筛网用水冲洗土壤样品,收集土样中的秸秆,并在65℃的恒温下烘干,至恒重后作为秸秆初始还田质量(A_0)和秸秆残余质量(A_t),则秸秆腐解量和秸秆残余量分别为:

$$SDA = \frac{A_0 - A_t}{S \times 100} \quad (1)$$

$$SRA = \frac{A_t}{S \times 100} \quad (2)$$

式中:SDA为秸秆腐解量,t/hm²;S为取土容器底面

积,100 cm²; A_0 为初始还田的秸秆质量,g; A_t 为1个作物期后秸秆残余质量,g;100为g/cm²到t/hm²单位换算系数。

1.3.2 土壤理化性质样品的采集与测定 土壤理化性质的测定主要包括土壤体积质量、饱和含水量、黏结力、贯入阻力、团聚体平均质量直径和有机质质量分数。在选定的采样点使用直径5.0 cm、高5.0 cm的环刀采集原状土样,用于测定土壤体积质量和饱和水分体积分数,然后在采样点附近未扰动地表用喷水壶喷水至饱和状态后,分别使用Eijkelkamp袖珍式黏结力仪和贯入阻力仪原位测定土壤黏结力和贯入阻力^[14],每个处理重复15次。待土样和上述指标测定完成后,用铝盒单独采集原状土样带回实验室自然风干后采用湿筛法测定土壤水稳性团聚体并计算团聚体平均质量直径^[15]。

$$MWD = \sum_{i=1}^n (x_i w_i) \quad (3)$$

式中:MWD为团聚体平均质量直径,mm; x_i 为2个相邻筛孔的平均直径,mm; w_i 为剩余在第*i*级筛子上的团粒质量占土样总质量的百分比。

最后使用小铲子采集约2 kg表层0~5 cm的土样混匀,带回实验室风干后,去除石头、秸秆和根系等杂质并过0.25 mm孔径的筛网,用重铬酸钾比色法测定有机质质量分数^[16]。

1.3.3 土壤分离能力样品的采集与测定 在小区内选定的采样点附近,选择平整未扰动的地表,使用不锈钢环刀(内径10.0 cm,高5.0 cm)采集原状土壤样品,每个秸秆还田量下采集35个原状土样(其中5个用于测定土壤自然含水率,30个用于测定土壤分离能力),共采集175个原状土样。采样过程中将环刀垂直压入土壤,并在按压环刀时用剖面刀切割周围土壤,减小扰动。采集后的土样盖上环刀上盖,密封包装并编号。采样完成后将原状土样带回实验室后立即称重得到(M_1),其中5个土样直接烘干称重得到(M_2),用于计算土壤自然含水率(ω)[公式(4)],平均值(ω_{mean})被认为是该样地土壤的自然含水率。冲刷前环刀土样的干重可通过土样鲜重与土壤自然含水率计算得到[公式(5)]。试验前,先将样品放入水箱中,使液面高度低于环刀顶部1 cm,浸泡12 h达到饱和后,再静置12 h除去土壤重力水,使土壤在冲刷前均达到饱和状态。冲刷试验开始后,当土样被冲刷约2 cm深时停止冲刷^[17],记录冲刷时间,冲刷试验结束后,将冲刷后的土样烘干至恒重后称重,用冲刷前的干重减去冲刷后的干重计算土壤分离能力[公式(6)]。

$$\omega=\frac{M_1-M_2}{M_2}\times 100\% \tag{4}$$

$$W_1=\frac{W_0}{1+\omega_{\text{mean}}} \tag{5}$$

$$D_c=\frac{W_1-W_2}{t\times A} \tag{6}$$

式中： W_0 为冲刷土样鲜重，kg； W_1 和 W_2 分别为冲刷前后土壤的干重，kg； t 为冲刷历时，s，上限为 5 min； A 为冲刷环刀的面积， m^2 ； D_c 为土壤分离能力， $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

土壤分离能力试验在变坡冲刷水槽内进行测定（图 1）。冲刷水槽长 4.00 m、宽 0.12 m、深 0.10 m，坡度可在 $0^\circ\sim 30^\circ$ 内调节。为模拟地表粗糙，用油漆在水槽的两侧内壁和底面涂抹约 0.5 cm 厚的过 2 mm 筛的试验地表层土壤。调整好坡度后，首先用量筒和秒表率定流量并测定水深。流量、水深测定结束后，开始冲刷试验，冲刷过程中记录高锰酸钾流经放样室上侧 2 m 测速区所需时间，计算得到表面流速，重复 9 次，取平均值，平均表面流速与修正系数的乘积为平均流速，水力半径和水流剪切力^[18]计算公式为：

$$V=\overline{V}\times a \tag{7}$$

$$h=\frac{Q}{Vb} \tag{8}$$

$$R=\frac{hb}{2h+b} \tag{9}$$

$$\tau=\rho gRS \tag{10}$$

式中： $\overline{V}$ 为表面平均流速， m/s ； a 为修正系数，试验中雷诺数为 2 474~5 922，取 0.80； h 为径流深， m ； V 为平均流速， m/s ； b 为水槽宽度， m ； R 为水力半径， m ； τ 为水流剪切力， Pa ； ρ 为水的密度， kg/m^3 ； g 为重力加速度， m/s^2 ，取 $9.8\text{ m}/\text{s}^2$ ； S 为水力坡度，为坡度的正弦值。

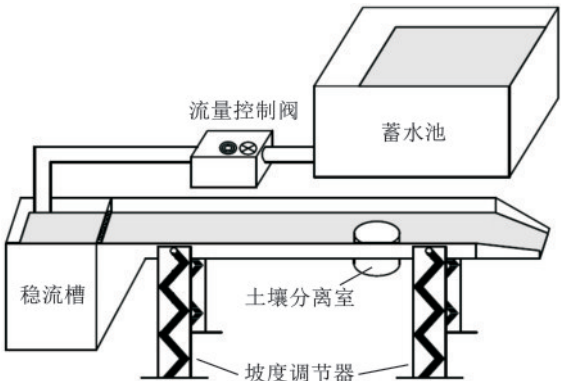


图 1 土壤模拟冲刷槽示意

Fig. 1 Schematic diagram of soil flume scouring experiment

基于前人的研究结果，本研究设置不同流量和坡度的组合进行冲刷试验（表 1）。为减小试验误差，每组在侵蚀动力条件下重复冲刷 5 个土样。基于前

述同一秸秆还田量不同水动力条件下的试验结果，以水流剪切力为横坐标、土壤分离能力为纵坐标进行线性拟合，则拟合直线的斜率为细沟可蚀性， x 轴上的截距为土壤临界剪切力^[19]。

$$D_c=K_t(\tau-\tau_c) \tag{11}$$

式中： K_t 为细沟可蚀性， s/m ； τ 为水流剪切力， Pa ； τ_c 为土壤临界剪切力， Pa 。

表 1 土壤分离试验采用的径流水动力学特征
Table 1 Hydraulic parameters of runoff used in soil detachment experiment

坡度/ ($^\circ$)	流量/ ($10^{-3}\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	水深/ (10^{-3} m)	水流 剪切力/ Pa
10	0.50	0.81	5.1	8.06
15	0.33	0.69	4.0	9.52
15	0.50	0.90	5.5	11.05
15	0.67	0.99	5.6	13.03
15	0.83	1.12	6.1	14.04
20	0.50	0.97	4.0	13.46

1.4 统计分析方法

数据分析过程中，分别计算 2 个小区距顶端 1、2、3 m 处测定的秸秆腐解特性与土壤理化性质数据的平均值作为不同处理的 3 个重复用于后续的数据分析。不同秸秆还田量下秸秆腐解特性、土壤理化性质和土壤分离能力的差异显著性采用单因素方差分析(One-way ANOVA, $p<0.05$)中的最小显著性差异(LSD)进行分析。土壤临界剪切力和细沟可蚀性与秸秆腐解特性、土壤理化性质之间的关系采用 Spearman($p<0.05$)相关分析方法确定，细沟可蚀性和土壤临界剪切力的主要影响因素以及路径分析主要通过 R 语言的随机森林包("randomForest")和结构方程模型包("lavaan")进行分析，统计分析采用 SPSS 24 软件完成，附图采用 Origin 2025b 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田量下秸秆腐解特性及近地表土壤理化性质

不同秸秆还田量下秸秆腐解量和残余量分别为 0.49~1.46、0.26~1.05 t/hm^2 ，且腐解量和残余量均随着秸秆还田量的增大而显著增加($p<0.05$)（表 2）。秸秆还田显著改善土壤结构，不同秸秆还田量的土壤体积质量和饱和水分体积分数分别为 1.27~1.40 g/cm^3 和 30.40%~34.48%，其中土壤体积质量随着秸秆还田量的增加而降低，而土壤饱和水分体积分数随着秸秆还田量的增加而增大。与对照相比，当秸秆还田量达到 2.50 t/hm^2 时，土壤体积质量的减小和饱和水分体积分数的增加具有显著性($p<0.05$)。

土壤黏结力和贯入阻力为 22.00~23.33、350.00~396.67 kPa,且土壤黏结力随着秸秆还田量的增大而增大,而贯入阻力则随着秸秆还田量增大而减小,但土壤黏结力和贯入阻力在不同秸秆还田量之间无显著差异。团聚体平均质量直径和有机质质量分

别为 1.77~3.03 mm 和 18.67~23.68 g/kg,秸秆还田显著提高土壤的团聚体平均质量直径有机质质量分数,并且二者均随着秸秆还田量的增大呈先增大后减小的变化规律,当秸秆还田量达到 3.75 t/hm²时达到最大值。

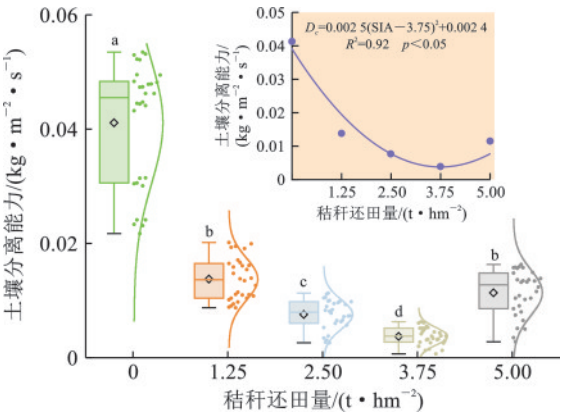
表 2 不同秸秆还田量下秸秆腐解特性及土壤理化性质
Table 2 Differences in straw decomposition characteristics and soil physicochemical properties under different straw return rates

秸秆还田量/ (t·hm ⁻²)	秸秆腐解量/ (t·hm ⁻²)	秸秆残余量/ (t·hm ⁻²)	土壤体积质量/ (g·cm ⁻³)	饱和水分体积 分数/%	黏结力/kPa	贯入阻力/kPa	团聚体平均质 量直径/mm	有机质质量分 数/(g·kg ⁻¹)
CK	—	—	1.40±0.01a	30.40±0.45c	22.00±1.00a	396.67±24.04a	1.77±0.04d	18.67±0.36d
1.25	0.49±0d	0.26±0d	1.36±0.01ab	31.52±0.48bc	22.33±0.88a	386.67±8.82a	2.77±0.02c	20.78±0.10c
2.50	0.74±0c	0.51±0c	1.33±0.02b	32.87±0.24ab	22.33±0.33a	383.33±14.53a	2.85±0.06bc	22.47±0.19b
3.75	1.09±0.04b	0.78±0.04b	1.32±0.03bc	32.93±0.78ab	23.33±1.20a	380.00±15.28a	3.03±0.03a	23.68±0.20a
5.00	1.46±0.01a	1.05±0.01a	1.27±0.02c	34.48±0.98a	23.33±0.67a	350.00±20.82a	2.94±0.01ab	23.22±0.16a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同秸秆还田量间差异显著($p<0.05$)。

2.2 不同秸秆还田量下土壤分离能力及侵蚀阻力的差异

秸秆还田显著降低土壤分离能力(图 2)。不同秸秆还田量下的土壤分离能力平均值为 0.003 8~0.041 1 kg/(m²·s)。与对照相比,1.25、2.50、3.75、5.00 t/hm²秸秆还田量下的土壤分离能力分别减小 66.57%、81.59%、90.88% 和 72.33%。



注:图中箱体表示 75% 和 25% 的四分位数;上下须线表示最大值和最小值;箱体中实线表示中位数;菱形方块表示平均值;不同小写字母表示各处理间差异显著($p<0.05$);SIA 为秸秆还田量, t/hm²。

图 2 不同秸秆还田量下土壤分离能力

Fig. 2 Soil detachment capacity under different straw return rates

随着秸秆还田量的增加,土壤分离能力呈先减小后增大的二次函数变化[$D_c=0.0025(SIA-3.75)^2+0.0024$, $R^2=0.92$]。在还田量为 3.75 t/hm²时达到最小值,而在还田量为 5.00 t/hm²时,土壤分离能力显著增加,说明秸秆还田对土壤分离能力的降低存在阈值效应,超过这一阈值后,随着秸秆还田量的增加,其降低土壤分离能力的作用减弱。

同时秸秆还田降低土壤细沟可蚀性(K_r)和提高土壤临界剪切力(τ_c)(图 3)。不同秸秆还田量下 K_r 和 τ_c 分别为 0.000 6~0.004 7 s/m 和 2.677~5.473 Pa。与对照相比,1.25、2.50、3.75、5.00 t/hm²秸秆还田量下的 K_r 分别降低 65.96%、76.60%、87.23% 和 68.09%,而 τ_c 在还田量为 1.25 t/hm² 时与对照没有明显变化,在还田量为 2.50、3.75、5.00 t/hm² 时分别增加 67.50%、100.67% 和 47.51%。随着秸秆还田量的增加, K_r 呈先减小后增大的变化规律,而 τ_c 呈先增大后减小的变化规律,并且 K_r 的最小值和 τ_c 的最大值均出现在秸秆还田量为 3.75 t/hm² 时。

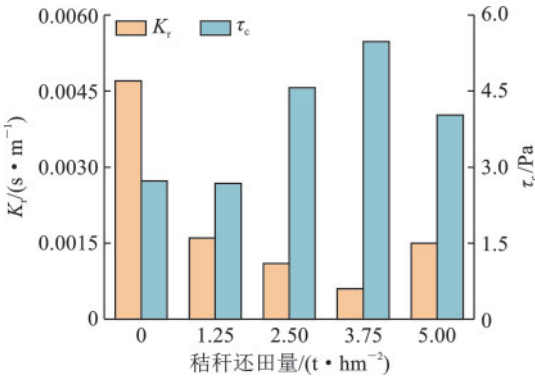
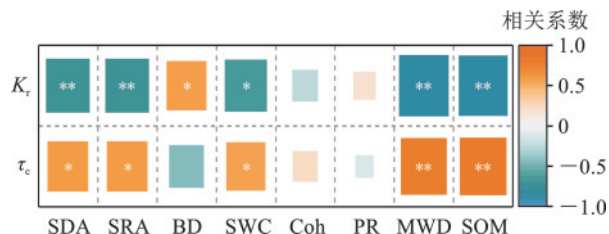


图 3 不同秸秆还田量下细沟可蚀性和临界剪切力变化规律
Fig. 3 Variation patterns of rill erodibility and critical shear stress under different straw return rates

2.3 土壤侵蚀阻力的主要影响因素

不同秸秆还田量下土壤侵蚀阻力与秸秆腐解特性及其驱动的土壤理化性质变化显著相关。相关分析结果(图 4)表明,细沟可蚀性与秸秆腐解量、秸秆残余量、饱和水分体积分、团聚体平均质量直径及土壤有机质质量分数均呈显著负相关($p<0.05$),

与土壤体积质量呈显著正相关($p < 0.05$),而土壤临界剪切力与秸秆腐解量、秸秆残余量、饱和含水量、团聚体平均质量直径及土壤有机质含量呈显著正相关($p < 0.05$)。



注: K_r 为细沟可蚀性; τ_c 为土壤临界剪切力; SDA 为秸秆腐解量; SRA 为秸秆残余量; BD 为土壤体积质量; SWC 为饱和含水量; Coh 为土壤黏结力; PR 为土壤贯入阻力; MWD 为团聚体平均质量直径; SOM 为有机质含量; * 表示在 0.05 水平显著相关; ** 表示在 0.01 水平显著相关。

图 4 土壤侵蚀阻力与土壤性质及秸秆腐解特性的相关热图
Fig. 4 Correlation heatmap of soil erosion resistance, soil properties and straw decomposition characteristics

鉴于细沟可蚀性(K_r)对秸秆还田量的响应更加敏感,且作为土壤侵蚀阻力的核心参数,故本研究进一步聚焦 K_r , 深度解析其受秸秆还田量驱动的具体调控路径。

利用随机森林算法对各影响因子进行重要性评价,由图 5 可知,土壤有机质含量、秸秆腐解量、团聚体平均质量直径和秸秆残余量是 K_r 的主要影响因素,其对 K_r 的重要性评分(%IncMSE)均超过 10。

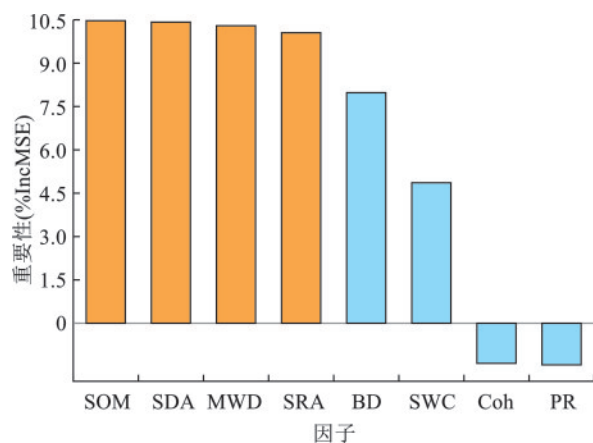


图 5 秸秆腐解特性与土壤理化性质对细沟可蚀性的变量重要性(%IncMSE)

Fig. 5 Variable importance (%IncMSE) of straw decomposition characteristics and soil physicochemical properties on rill erodibility

在此基础上,进一步构建路径分析模型,量化各因子对 K_r 的具体作用路径。模型拟合指标显示,尽管近似误差均方根(RMSEA=0.23)略高,但考虑到本研究样本量较小($n=15$),结合其他指标均优良($p=0.13$, CFI=0.97, TLI=0.94, SRMR=0.02),可用于

解释变量间的潜在作用路径。路径分析结果(图 6)显示,秸秆残余量对 K_r 表现为显著的直接正向影响,其标准化路径系数为 0.37,表明残余秸秆会增加土壤的细沟可蚀性;而秸秆腐解量对 K_r 表现为间接抑制影响,一方面直接通过增加土壤有机质质量分数降低 K_r ;另一方面,通过增加有机质含量后进一步提高团聚体平均质量直径来抑制侵蚀,2 条间接路径的标准化系数分别为 -0.40 和 -0.74。

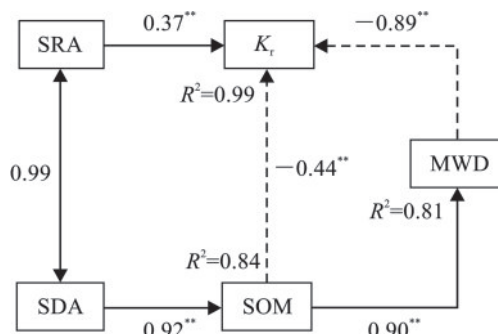


图 6 细沟可蚀性与其主要影响因素的作用路径
Fig. 6 Action pathways of rill erodibility and its main influencing factors

3 讨论

3.1 秸秆还田量对土壤理化性质的影响

秸秆还田显著改善紫色土坡耕地的土壤结构。总体而言,秸秆还田可显著增加土壤有机质含量、团聚体平均质量直径和饱和含水量,降低土壤体积质量,与前人^[20-24]的研究结果保持一致。其中有机质含量增加可能的原因:一方面秸秆通过微生物的分解作用,将其自身的碳转化为更稳定、更复杂的腐殖质,并将其固定在土壤中;另一方面,秸秆激发微生物的同化作用,将不稳定秸秆中的碳转化为微生物生物量碳,微生物死亡后的残体进一步与土壤矿物结合,形成稳定的矿物结合态有机碳,进而增加土壤中有机质含量^[20-21]。在此过程中,微生物秸秆分解活动产生真菌菌丝网络、微生物副产物(如脂质、蛋白质、黏液)及多糖、有机酸等活性有机物,这些物质充当土壤结构的生物黏合剂,促进土壤大团聚体的形成,使得团聚体平均质量直径显著增大^[22]。这种团聚化效应优化土壤的微观结构,使原本致密的土体变得疏松多孔,直接增加土壤的孔隙度^[23]。与此同时,秸秆本身作为一种低密度、多孔隙的有机物料,其本身体积质量远低于土壤颗粒,二者的共同作用导致秸秆还田后土壤体积质量显著减小,土壤饱和含水量显著增大^[24]。

秸秆还田对土壤的部分理化性质改善存在阈值,土壤有机质含量和团聚体平均质量直径均在还

田量为 3.75 t/hm^2 时达到最大值,在还田量增至 5.00 t/hm^2 时,指标反而会下降。可能归因于:一方面过量秸秆添加导致碳氮比失衡,使微生物活动受限,秸秆腐解作用降低,削弱其作为团聚体胶结剂的物质基础^[25];另一方面,过量秸秆还田在土壤致密、雨量充沛的地区更容易形成局部厌氧微环境,其厌氧分解产生的酚酸、有机酸等次生代谢物,不仅抑制腐殖化进程,更对构建团聚体骨架的关键生物种群产生生理毒性,削弱大团聚体的生成能力^[26]。

3.2 土壤侵蚀阻力对秸秆还田量的响应

本研究表明,秸秆还田通过改善土壤结构显著降低细沟可蚀性(K_r)并提升土壤临界剪切力(τ_c),与黑土区及黄土高原的相关研究^[9-10]结果一致。然而,紫色土侵蚀阻力并非随还田量的增加而增大,而存在阈值效应。研究结果表明,当还田量超过 3.75 t/hm^2 后, K_r 反而增大, τ_c 随之下落,表明过量还田会降低土壤的侵蚀阻力。可能由于过量的秸秆添加阻碍水分下渗,在土壤-秸秆界面形成一个水分饱和的薄弱层,破坏土壤基质的整体稳定性,从而降低其侵蚀阻力^[27]。

本研究确定的适宜还田量为 3.75 t/hm^2 ,接近于黄土高原的 3.50 t/hm^2 ,但远低于黑土区 9.00 t/hm^2 ^[9-10],可能与西南紫色土区的水热条件良好有关。秸秆腐解速率较快,使得土壤有机质含量在较低的秸秆还田量下较快趋于稳定,而有机质作为胶结物质是土壤侵蚀阻力的主要影响因素之一(图4、图5)。这种区域差异还可能与紫色土和黑土在质地组成、矿物组成、初始有机质含量及团聚体形成机制等方面的差异有关。相较于黑土,紫色土通常为风化土壤,结构稳定性较弱,有机质含量低,大团聚体含量和团聚体稳定性对外源有机物输入更为敏感;适量秸秆还田后,秸秆腐解产生的有机胶结物可较快促进微团聚体向大团聚体转化,并增强团聚体间的胶结和包裹作用,从而较快改善土壤结构,提高土壤抵抗径流分离和剪切破坏的能力^[28-29]。相比之下,黑土本身有机质含量较高,团聚体形成与稳定在更大程度上依赖持续有机碳输入、黏粒矿物保护及有机-矿物复合过程,往往需要更高的秸秆投入,才能使结构改良效应充分显现^[30]。因此,与低温限制秸秆分解的黑土区相比,紫色土地区提升土壤侵蚀阻力的适宜秸秆还田量阈值偏低。

3.3 影响土壤侵蚀阻力的主要因素

本研究通过路径分析进一步揭示细沟可蚀性(K_r)的驱动因子, K_r 受到秸秆残余直接作用和秸秆腐解间接作用的共同影响,残余秸秆直接阻断土壤颗

粒的连续性,削弱土体结构的稳定性,从而提高 K_r ,Chen等^[8]在黑土区也发现相似的结论。而秸秆腐解通过2条间接路径减小 K_r :一条是通过增加土壤有机质含量,借助有机质直接胶结作用降低 K_r ;另一条是通过提升有机质含量,进一步促进大团聚体的形成,增强土壤结构稳定性,从而降低 K_r ^[31-32]。值得注意的是,本研究中影响因素与Xing等^[9]在黑土区的结论存在差异,其研究指出根系分泌物的胶结与根系捆绑是抗冲性增强的主导因素,而本研究中有有机质与团聚体平均质量直径的调节作用更为突出。可能是源于作物种植模式的差异:本研究区的玉米采用穴播模式,其表层土壤根系分布密度远低于黑土区的大豆,导致根系的直接固结作用相对受限,进而使秸秆还田对土壤理化环境改善成为提高紫色土侵蚀阻力的主要因素^[33-34]。然而,本研究结果仅是基于1个玉米生长季及原位监测数据,存在一定的局限性。需要指出的是,本研究结论主要基于短期定位观测和有限样本分析获得。因此,在长期秸秆还田背景下,随着样本量的增加,秸秆还田量对土壤侵蚀阻力的影响规律及其作用路径是否发生变化,仍需进一步研究。

4 结论

1)秸秆碎混还田显著降低紫色土坡耕地的土壤分离能力,并提高土壤侵蚀阻力。与对照相比,秸秆还田下土壤分离能力和细沟可蚀性分别减小 $66.57\%\sim 90.88\%$ 和 $65.96\%\sim 87.23\%$,而土壤临界剪切力增加 $47.51\%\sim 100.67\%$ 。当秸秆还田量为 3.75 t/hm^2 时,土壤分离能力最小,土壤侵蚀阻力达到最大,可作为该区域类似条件下的参考还田量。

2)相关分析表明,土壤侵蚀阻力与秸秆腐解特性及其驱动的土壤理化性质变化显著相关。其中临界剪切力与土壤有机质含量、团聚体平均质量直径、秸秆腐解量及饱和含水量均呈显著正相关($p<0.05$);与此同时,细沟可蚀性与上述指标则表现出显著负相关($p<0.05$),但与土壤体积质量呈显著正相关($p<0.05$)。

3)基于随机森林和路径分析,本研究揭示紫色土坡耕地下秸秆还田对细沟可蚀性影响的双重作用路径:秸秆残余的直接物理作用,通过破坏土壤结构,提高细沟可蚀性;与此相反,秸秆腐解则通过2条间接途径,即增强有机质的胶结作用和促进大团聚体的形成,抑制细沟可蚀性。在确定的适宜还田量范围内,腐解过程的间接效应占据主导地位,是提高紫色土抗侵蚀性的重要因素。

参考文献:

- [1] Hartmann M, Six J. Soil structure and microbiome functions in agroecosystems [J]. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2023, 4(1): 4-18.
- [2] 张宁, 张光辉, 邢书昆. 东北黑土区土壤侵蚀阻力对土地利用类型的响应与影响因素 [J]. *水土保持学报*, 2024, 38(5): 40-48.
Zhang Ning, Zhang Guanghui, Xing Shukun. Soil resistance and its influencing factors under different land use types in the black soil region of northeast China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(5): 40-48.
- [3] Li Hui, Dai Mingwei, Dai Shunli, et al. Current status and environment impact of direct straw return in China's cropland: A review [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 159: 293-300.
- [4] 杜勇强, 常婷婷, 陈晓安, 等. 不同秸秆还田模式下红壤坡耕地产流产沙特征 [J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(4): 120-129.
Du Yongqiang, Chang Tingting, Chen Xiaolan, et al. Runoff and soil erosion characteristics in red soil slope croplands under various straw return modes [J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2024, 52(4): 120-129.
- [5] 张光辉, 杨扬, 刘瑛娜, 等. 秸秆还田阻控黑土侵蚀机理及效应 [J]. *土壤与作物*, 2022, 11(2): 115-128.
Zhang Guanghui, Yang Yang, Liu Yingna, et al. Mechanisms and benefits of straw return in mitigating black soil erosion [J]. *Soils and Crops*, 2022, 11(2): 115-128.
- [6] 贾瑞峰, 丛日环, 徐志宇, 等. 秸秆还田技术改善土壤理化性质提高作物产量的 meta 分析 [J]. *农业工程学报*, 2025, 41(4): 80-89.
Jia Ruifeng, Cong Rihuan, Xu Zhiyu, et al. Meta analysis of straw returning technology to improve soil physico-chemical properties and increase the yield of main cereal and oil crop [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(4): 80-89.
- [7] 王新雅, 何卓婷, 李潇, 等. 秸秆分层还田耦合腐解菌剂通过调控土壤有机碳转化和微生物群落结构提高水稻产量 [J]. *中国水稻科学*, 2026, 40(5): 648-662.
Wang Xinya, He Zhuoting, Li Xiao, et al. Layered straw returning coupled with decomposing agent enhances rice yield by regulating soil organic carbon transformation and microbial community structure [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2026, 40(5): 648-662.
- [8] Chen Shiqi, Zhang Guanghui, Wang Chengshu. Temporal variation in soil erodibility indicators of sloping croplands with different straw-incorporation rates [J]. *Soil and Tillage Research*, 2025, 246: e106340.
- [9] Xing Shukun, Zhang Guanghui, Chen Shiqi, et al. Response of soil erosion resistance to straw incorporation amount in the black soil region of northeast China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 357: e120801.
- [10] Ma Jianye, Ma Bo, Wang Yangxiu, et al. Combined effects of the wheat straw length and incorporation rate on reducing runoff and sediment yields [J]. *Catena*, 2022, 215: e106310.
- [11] 慈恩, 唐江, 连茂山, 等. 重庆市紫色土系统分类高级单元划分研究 [J]. *土壤学报*, 2018, 55(3): 569-584.
Ci En, Tang Jiang, Lian Maoshan, et al. Higher category partition for purple soils in Chongqing in Chinese soil taxonomy [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(3): 569-584.
- [12] 丁文斌, 蒋光毅, 史东梅, 等. 紫色土坡耕地土壤属性差异对耕层土壤质量的影响 [J]. *生态学报*, 2017, 37(19): 6480-6493.
Ding Wenbin, Jiang Guangyi, Shi Dongmei, et al. Effect of different soil properties on plow-layer soil quality of sloping farmland in purple hilly areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(19): 6480-6493.
- [13] Wang Bin, Shen Xia, Chen Shu, et al. Distribution characteristics, resource utilization and popularizing demonstration of crop straw in southwest China: A comprehensive evaluation [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 998-1004.
- [14] 冯滔, 陈晓燕, 朱平宗, 等. 三峡库区紫色土不同植被类型土壤抗蚀性能差异研究 [J]. *土壤学报*, 2025, 62(5): 1259-1270.
Feng Tao, Chen Xiaoyan, Zhu Pingzong, et al. Differences in soil erosion resistance between different vegetation types of purple soil in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(5): 1259-1270.
- [15] 王秀颖, 高晓飞, 刘和平, 等. 土壤水稳性大团聚体测定方法综述 [J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(3): 106-113.
Wang Xiuying, Gao Xiaofei, Liu Heping, et al. Review of analytical methods for aggregate size distribution and water-stability of soil macro-aggregates [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(3): 106-113.
- [16] Wang Hao, Zhang Guanghui, Li Ningning, et al. Soil erodibility influenced by natural restoration time of abandoned farmland on the Loess Plateau of China [J]. *Geoderma*, 2018, 325: 18-27.
- [17] Zhang Baojun, Zhang Guanghui, Yang Hanyue, et al. Temporal variation in soil erosion resistance of steep slopes restored with different vegetation communities on the Chinese Loess Plateau [J]. *Catena*, 2019, 182: e104170.
- [18] Zhang Guanghui, Liu Baoyuan, Liu Guobin, et al. Detachment of undisturbed soil by shallow flow [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(3): 713-719.
- [19] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, et al. A process-

- based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology [J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(5):1587-1593.
- [20] 高燕, 张延, 郭亚飞, 等. 不同秸秆还田模式对土壤有机碳周转的影响[J]. 土壤与作物, 2019, 8(1):93-101.
Gao Yan, Zhang Yan, Guo Yafei, et al. Effect of residue return patterns on soil organic carbon turnover: A review [J]. Soils and Crops, 2019, 8(1):93-101.
- [21] 王西亚, 吕继龙, 何萍, 等. 玉米秸秆分解过程中细菌群落组成演化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(1):45-53.
Wang Xiya, Lü Jilong, He Ping, et al. Succession in bacterial community during maize straw decomposition [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(1):45-53.
- [22] Rabbi S M F, Warren C R, Swarbrick B, et al. Microbial decomposition of organic matter and wetting-drying promotes aggregation in artificial soil but porosity increases only in wet-dry condition [J]. Geoderma, 2024, 447:e116924.
- [23] 董建新, 丛萍, 刘娜, 等. 秸秆深还对黑土亚耕层土壤物理性状及团聚体分布特征的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(4):921-934.
Dong Jianxin, Cong Ping, Liu Na, et al. Effects of deep straw incorporation on subsoil physical properties and aggregate distribution in black soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(4):921-934.
- [24] 王治统, 凌俊, 刘子熙, 等. 秸秆还田方式对土壤理化性质和玉米产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(4):663-674.
Wang Zhitong, Ling Jun, Liu Zixi, et al. Effect of straw return practices on soil physico-chemical properties and maize yield [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(4):663-674.
- [25] 马想, 黄晶, 赵惠丽, 等. 秸秆与氮肥不同配比对红壤微生物量碳氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6):1574-1580.
Ma Xiang, Huang Jing, Zhao Huili, et al. Straw and nitrogen fertilizer ratios influence microbial biomass carbon and nitrogen in red soil [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2018, 24(6):1574-1580.
- [26] Keiluweit M, Bougoure J J, Nico P S, et al. Mineral protection of soil carbon counteracted by root exudates [J]. Nature Climate Change, 2015, 5(6):588-595.
- [27] Zhang Yatong, Zhang Guanghui, Zhang Ning, et al. Response of soil erosion resistance to incorporated straw affected by different microbial inoculants in the black soil region of northeast China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2025, 392:e109765.
- [28] Wei Chaofu, Shao Jingan, Ni Jiupai, et al. Soil aggregation and its relationship with organic carbon of purple soils in the Sichuan basin, China [J]. Agricultural Sciences in China, 2008, 7(8):987-998.
- [29] Huang Chengyi, Huang Huijuan, Huang Shengjie, et al. Effects of straw returning on soil aggregates and its organic carbon and nitrogen retention under different mechanized tillage modes in typical hilly regions of south-west China [J]. Agronomy, 2024, 14(5):e928.
- [30] Kleber M, Bourg I C, Coward E K, et al. Dynamic interactions at the mineral-organic matter interface [J]. Nature Reviews Earth and Environment, 2021, 2(6):402-421.
- [31] 杨源峰, 杨岚惠, 张诗琴, 等. 喀斯特区生物结皮对不同岩性发育土壤分离过程的阻控效应研究[J]. 土壤学报, 2026, 63(1):179-194.
Yang Yuanfeng, Yang Lanhui, Zhang Shiqin, et al. Effects of biocrusts on soil detachment process across different lithology development in karst regions [J]. Acta Pedologica Sinica, 2026, 63(1):179-194.
- [32] 张冠华, 易亮, 丁文峰, 等. 三峡库区生物结皮对土壤分离过程的影响及其机制[J]. 土壤, 2021, 53(3):610-619.
Zhang Guanhua, Yi Liang, Ding Wenfeng, et al. Effects and mechanism of biocrusts on soil detachment process by overland flow in the Three Gorges Reservoir area [J]. Soils, 2021, 53(3):610-619.
- [33] 廖荣伟, 刘晶淼, 白月明, 等. 玉米生长后期的根系分布研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(3):284-291.
Liao Rongwei, Liu Jingmiao, Bai Yueming, et al. Spatial distribution and temporal variation of maize root in the soil under field conditions [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(3):284-291.
- [34] 龚岫, 张盼盼, 冯乃杰, 等. 不同结荚习性大豆品种根系的时空分布特征[J]. 中国油料作物学报, 2016, 38(4):431-442.
Gong Shen, Zhang Panpan, Feng Naijie, et al. Root spatial and temporal distribution characteristics of soybean cultivars with different growth habits [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2016, 38(4):431-442.