

DOI: 10.11766/trxb202302060048

马建业, 马波, 余芳涛, 王晨光, 尚永泽, 李占斌. 基于力学参数解析黄土高原典型草地的土壤分离能力研究[J]. 土壤学报, 2024, 61 (4): 1009–1020.

MA Jianye, MA Bo, SHE Fangtao, WANG Chenguang, SHANG Yongze, LI Zhanbin. Analysis of Soil Detachment of Typical Grassland on Loess Plateau Based on Mechanical Parameters[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61 (4): 1009–1020.

基于力学参数解析黄土高原典型草地的土壤分离能力研究*

马建业^{1, 2}, 马波², 余芳涛¹, 王晨光², 尚永泽³, 李占斌^{1, 2}

(1. 西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710000; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨陵 712100; 3. 山东省水利勘测设计院有限公司, 济南 250013)

摘要: 为解析黄土高原地区典型草地土壤分离能力变化的力学机制, 选择代表性的须根系和直根系草地作为研究对象, 基于室内径流冲刷试验, 估算了相对土壤分离能力 (RSD), 测定了土壤抗剪强度和根系抗拉力, 并基于 Wu 氏模型估算了根系黏聚力 (C_r)。结果表明, 须根系草地的 RSD 较直根系草地显著低 77.27%, 而 C_r 较直根系草地高 14.84%。直根系草地的 C_r 对 RSD 的表达效果优于根长密度, 而须根系草地效果差异不明显。RSD 与 200 KPa 正应力下抗剪强度 (τ_{200}) 的相关性优于其他正压力。根土复合体中, C_r 对土壤分离的效应强于 τ_{200} 。通过根土复合体力学参数能够有效预测直根系草地的土壤分离能力, 但对于须根系草地的预测还需进一步探究。研究结果可为黄土高原根系减蚀机理的完善提供参考。

关键词: 黄土高原; 草地; 土壤分离; 根系黏聚力; Wu 氏模型

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A

Analysis of Soil Detachment of Typical Grassland on Loess Plateau Based on Mechanical Parameters

MA Jianye^{1, 2}, MA Bo², SHE Fangtao¹, WANG Chenguang², SHANG Yongze³, LI Zhanbin^{1, 2}

(1. State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710000, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Shandong Water Resources Survey and Design Institute Co., Ltd, Jinan 250013, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to understand the erosion mechanism of typical grassland in the Loess Plateau by analyzing the mechanical mechanism of soil detachment. 【Method】 The representative grassland with tap roots and fibrous roots was selected as the research object in this study. Undisturbed soil samples were collected and subjected to flow scouring, and the relative soil detachment capacity (RSD) was calculated. The soil shear strength and root tensile force were determined, and the root cohesion was estimated based on Wu's model. 【Result】 The RSD of grassland with fibrous roots was 77.27% significantly

* 国家自然科学基金项目 (42307452, U2040208, 42107352) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42307452, U2040208, 42107352)

† 通讯作者 Corresponding author, Email: zhanbinli@126.com

作者简介: 马建业, 博士, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: majianye126@126.com

收稿日期: 2023-02-06; 收到修改稿日期: 2023-10-09; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-11-30

lower than that of grassland with tap roots, while the soil cohesion (C_r) was 14.84% higher than that of grassland with tap roots. The expression effect of C_r on RSD in the grassland with tap roots was better than that of root length density, and this effect was not obvious in the grassland with fibrous roots. The correlation between the RSD and soil shear strength under normal stress of 200 Kpa (τ_{200}) was better than the shear strength under other normal stresses. In the root-soil composite, the effect of C_r on soil detachment was stronger than that of τ_{200} . Additionally, the soil detachment capacity of the root-soil composite in the grassland with tap roots, could be effectively predicted by the mechanical parameters, but the prediction of soil detachment capacity in the grassland with fibrous roots need to be further explored. 【Conclusion】 Thus, this study presents an effective way to analyze the soil detachment mechanism by mechanical properties of root-soil composites. The results could provide a reference for the study of the erosion reduction mechanism of roots in the Loess Plateau.

Key words: Loess Plateau; Grassland; Soil detachment; Root cohesion; Wu's model

土壤抗侵蚀能力是指土壤对侵蚀介质剥蚀和搬运的敏感性,分为可分离性和可搬运性。其中,土壤分离是指在降雨击溅或径流冲刷作用下,土壤颗粒脱离土体、发生位移的过程,是土壤侵蚀的初始阶段。而将清水条件下水流所能分离土壤的最大速率定义为土壤分离能力,该参数是侵蚀预报领域的重要研究对象^[1]。抗剪强度为土体抵抗剪切破坏的最大能力,是表征土壤抗侵蚀能力的重要力学参数^[2]。因此,从力学角度解析土壤分离过程也是当前研究的一个重要方向。

根系在削减土壤分离方面扮演着重要角色,根系形态、结构等参数均会对土壤分离产生影响,相关研究近年来取得了一定的成果^[3-4]。但存在表征土壤分离的最佳根系参数未统一、土壤分离与根系参数的拟合精度有待提高等一系列问题,严重影响了根系减蚀机理的探究和土壤分离模型的构建。且根系在土壤中穿插会与土壤形成根土复合体,在接受剪切作用时,其所受应力会由最初的土壤颗粒承担逐渐转变为根系抗拉力承担^[5]。因此针对根系对土体抗剪强度的强化进行了大量研究^[6-7],并利用 Wu 模型估算了根系黏聚力表征根系力学性质对土壤抗剪的增强作用^[8]。但是基于该力学参数表征土壤分离的研究较为欠缺。

此外,根土复合体中土壤性质也会对土壤分离产生影响,但主要集中于利用土壤黏粒、有机质、团聚体等理化性质参数表征土壤分离^[9-10]。由于试验条件的不同,各研究所选用的最佳参数也存在差异。部分学者尝试用便携式剪切仪测定的土壤黏结力这一力学参数预测土壤分离^[11],Hao 等^[12]利用黏结力估算了土壤抗剪强度,发现其对分离的表征效果优于一般的理化性质。也有研究发现基于直剪试

验测定的土壤抗剪强度与土壤分离也具有较好的拟合关系^[13-14]。但哪种方法得到的抗剪强度能更好地表征土壤分离,目前还没有明确结论。

针对上述研究中的不足,本研究以黄土区不同根系构型的草地为研究对象,采集原状根土复合体进行冲刷试验,通过测定土体抗剪强度和根系抗拉力等根土复合体力学参数,解析草地根土复合体土壤分离的变化机制,以期为黄土高原植被恢复条件下土壤侵蚀机理的完善提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土丘陵区的王茂沟小流域,面积为 5.97 km²,海拔为 936~1 188m。属大陆季风性气候,多年平均气温 10.2℃,平均降水量 513 mm,多集中在汛期(6—9 月)。土壤以黄绵土为主,抗侵蚀能力较弱。20 世纪 90 年代,为响应国家退耕还林(草)政策,该流域部分坡耕地通过自然或人工恢复的方式逐渐转变为草地。截至 2017 年,草地是流域内的主要土地利用类型(36.51%),高于其他土地利用类型^[15]。根据陕北黄土丘陵区的撂荒演替序列^[16],流域内天然草地已演替至中后期,代表性植物种为冰草、铁杆蒿、白羊草。而人工草地的代表性植物种为苜蓿。

1.2 试验材料

分别选择以冰草、白羊草、铁杆蒿、苜蓿为主要植物种的 4 个典型坡面作为研究样地(图 1),并以裸地作为对照。其中冰草、白羊草为须根系草本,铁杆蒿和苜蓿为直根系草本。样地基本信息见表 1。

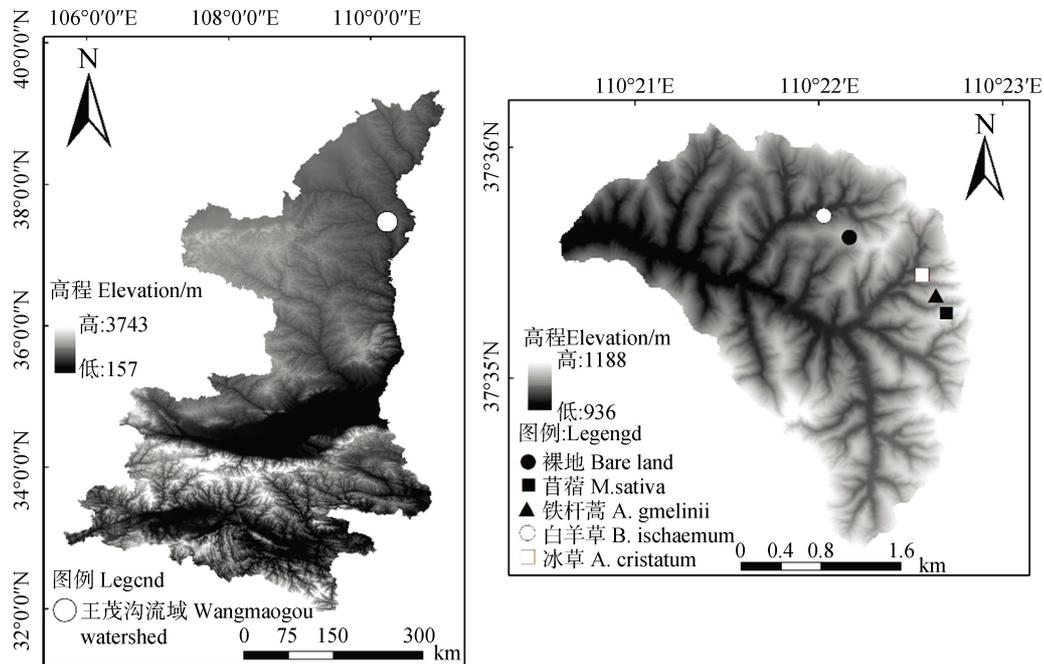


图 1 样点布设示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sample sites

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of sampling sites

根系构型 Root type	主要植物种 Dominant plant species	海拔 Elevation/m	坡度 Slope/°	盖度 Coverage/%	砂粒 Sand /%	粉粒 Silt /%	黏粒 Clay/%	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)
裸地 Bare land	—	1 112	8	—	22.47	63.12	14.41	3.20
须根系 Fibrous roots	冰草	1 119	17	62	24.30	61.87	13.83	9.30
	白羊草	1 112	15	75	19.80	65.63	14.57	5.18
直根系 Tap roots	铁杆蒿	1 108	16	52	35.11	54.07	10.82	6.39
	苜蓿	1 119	19	48	38.29	52.16	9.55	7.06

2021年5—6月,利用铁质环刀($\Phi 5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$)分2层(0~5 cm和5~10 cm)采集0~10 cm土层的原状土样,用于土壤分离试验,具体采样方法详见文献[17]。每个深度采集2个样品作为重复,每个样地采集24个样品。

在分离样品采集点周围利用环刀($\Phi 6.18\text{ cm} \times 2\text{ cm}$),采集各土层表面2 cm深度的原状土样,用于直剪试验。每个深度采集4个样品,每个样地共采集48个样品。同时利用便携式剪切仪在采样点周围测定土壤黏结力,每个深度重复6次^[18]。

利用挖掘法采集根系^[19]。每个样地选择生长情况较好的植株3株,以所选植株基部为中心,采集长度和宽度均为15 cm,深度为20 cm的根土复合体样品。在室内将样品置于0.5 mm的筛子上进行反复冲洗,直至洗出所有的根系。

1.3 试验方法

(1) 径流冲刷试验。冲刷试验装置主要包括供水槽、流量计、稳流槽和冲刷槽(长 \times 宽 \times 深=400 cm \times 15 cm \times 8 cm)(图2),具体试验过程详见文献[17]。从土壤被冲刷开始计时,直至土样的冲

刷深度达到 2 cm 时停止试验^[20]。样品采集前, 在空环刀内壁距离环刀上表面 2 cm 处提前用马克笔进行标记, 然后进行采样和分离试验, 当样品被不断剥离直至出现标记后, 此时认为土样被冲刷至 2 cm 深度。对收集的泥沙样进行烘干称重。流速采用高锰酸钾染色示踪法进行测定, 每次试验测定 3 组流速, 调整表面流速接近于水流平均流速^[1], 取 3 组修正后的流速均值作为单次试验平均流速。



图 2 试验实物图

Fig. 2 Diagram of the test device

(2) 直剪试验。采用直剪仪 (ZJ 型应变控制式直剪仪, 南京土壤仪器厂有限公司) 测定土体抗剪强度。将采集的土样完整地压入剪切盒内, 设定剪切速度为 $12 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。对每组土样分别施加 100、200、300、400 KPa 的垂直荷载, 每个荷载作用于一个土样, 每组试验共需进行 4 次测试。启动仪器后待百分表指针开始变化后用秒表记录时间, 同时观察百分表读数, 待量力环中百分表指针不再前进或出现倒退现象, 记录百分表读数和时, 此时认为样品已被剪断^[21]。

(3) 根系抗拉试验。将通过挖掘法采集的根系统一截成 60 mm, 用电子游标卡尺 (精度为 0.01 mm) 测定根系直径。每种植物选择不同径级的单根共 30 个左右。利用拉力仪 (HM-1K, 温州市海宝仪器有限公司) 进行根系抗拉试验。记录单根被拉断时所受的拉力, 即该根所能承受的最大抗拉力^[7]。

1.4 试验数据计算与分析

(1) 水流功率 (ω , $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) 采用如下公式进行

计算:

$$h = \frac{Q}{vB} \quad (1)$$

$$\tau = \rho ghS \quad (2)$$

$$\omega = \tau v \quad (3)$$

式中, τ 为水流剪切力 (Pa); h 为流深 (m); Q 为流量 ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$); v 为流速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); B 为水槽宽度 ($B=0.15 \text{ m}$); ρ 为水流密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); g 为重力加速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$); S 为水力坡度。设计 6 组单宽流量 (12 、 24 、 36 、 $48 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$) 和水力坡度 (25.9% 、 34.2% 、 42.3%) 的组合, 得到 6 个水流功率, 分别为 3.42 、 10.15 、 11.07 、 13.52 、 16.57 和 $21.92 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-3}$ ^[11]。

(2) 相对土壤分离能力 (RSD): 相同水流功率下, 根土复合体和裸地的土壤分离能力比值。探究相对土壤分离能力与根土复合体性质间的关系, 可以有效弱化水力参数对土壤分离结果的影响^[3]。相对土壤分离能力通过以下公式进行计算:

$$\text{SDC} = \frac{W}{A \times t} \quad (4)$$

$$\text{RSD} = \frac{\text{SDC}_r}{\text{SDC}_0} \quad (5)$$

式中, SDC 为土壤分离能力 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); SDC_r 、 SDC_0 分别为根土复合体、裸地的分离能力 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); W 为冲刷泥沙质量 (g); t 为冲刷时间 (s); A 为土样面积 (m^2)。

(3) 抗剪强度 (S_1 , KPa): 直剪试验结束后, 土样所受的抗剪强度按如下公式计算:

$$S_1 = 10CR/A \quad (6)$$

式中, R 为量力环测表的读数 (0.01 mm); C 为量力环校正系数 ($1.538\text{KPa}/0.01 \text{ mm}$); A 为试样受力面积 (cm^2)。

(4) 根系参数。根长密度 (RLD, $\text{cm}\cdot\text{cm}^{-3}$): 在每次冲刷试验结束后, 将样品置于 0.5mm 的筛网上反复冲洗, 洗出样品中的根系, 并去除杂物。将

洗干净的根本平铺于透明胶片上，放入扫描仪（日本 EPSON Perfection V700 PHO-TO）。用万深 LA-S 系列植物图像分析仪对扫描得到的图像进行分析，得到根长数据，根长与取样环刀体积的比值即为根长密度^[4]。

根系黏聚力 (C_r , KPa): 为根系对土壤抗剪强度的增加值，是基于根系长度、根系直径和单根抗拉力计算得到的根系综合参数。常采用当前国际上流行的 Wu 氏模型估算^[22]:

$$T = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (7)$$

$$C_r = 1.15 \frac{\sum T_i n_i a_i}{A} \quad (8)$$

$$S = S_1 + C_r \quad (9)$$

式中, T 为单根抗拉强度 (KPa); F 为单根最大抗拉力 (N); D 为根系平均直径 (mm); a_i 为某一根径级的根系平均横截面积 (mm^2); A 为样品的横截面积 (mm^2); n_i 为根系数量, 本研究利用总根长除以分离环刀的高度进行估算; S 为根土复合体的总抗剪强度 (KPa); S_1 为土体抗剪强度 (KPa)。

1.5 统计分析

利用 Excel 进行统计分析, 采用 Spss20.0 进行单因素方差、Spearman 相关性和非线性回归分析, 采用 Origin 2021 进行制图, 采用 JMP 10.0 中的最小二乘法进行因子效应分析。以纳什效率系数 (NSE) 评估模型预测结果的精度。

2 结 果

2.1 根系和土壤特性

(1) 根系特征。单根最大抗拉力随根径的增大均呈幂函数增加 (图 3)。不同植物种间根系抗拉力受根径的影响较大, 当根径较小时, 须根系草本 (冰草和白羊草) 的根系抗拉力高于直根系草本 (铁杆蒿和苜蓿); 而直根系草本的根系抗拉力随根径的增幅较大, 当其根径达到临界值, 抗拉力会高于须根系草本。而这一临界值随着植物种而发生变化, 如对于冰草和铁杆蒿, 该临界值为 1.70 mm, 而对于冰草和苜蓿, 临界值则为 1.12 mm。同时得到了抗

拉力与根径的拟合公式, 若根系黏聚力估算过程中需要更大根径的抗拉力, 则可通过公式进行计算。

须根系属纤维根系, 其纤维素含量高于直根系^[23]。由于根系抗拉力与纤维素含量呈正相关关系^[24], 因此本研究中, 当根径较小时, 须根系冰草和白羊草的单根最大抗拉力高于直根系的铁杆蒿和苜蓿。随着根径的增加, 根系木质素含量增加, 纤维素含量减小^[25], 此时直根系的木纤比高于须根系^[26], 使得须根系的抗拉强度较高, 而抗拉力与抗拉强度呈反比^[19]。因此根径较大时, 须根系的单根抗拉力低于直根系。

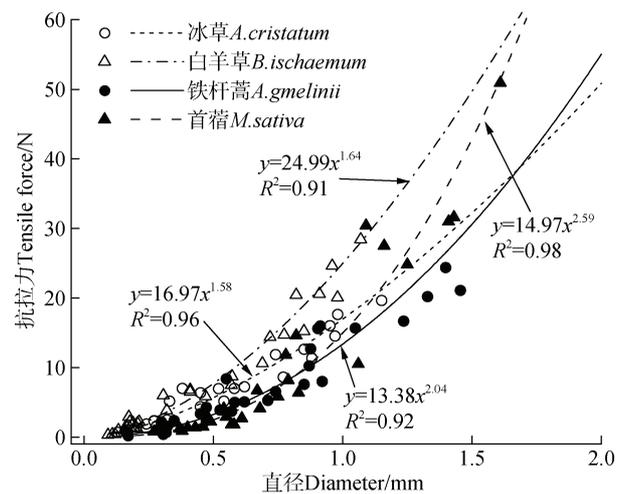


图 3 不同根系直径下的抗拉力

Fig. 3 Root tensile force of different root diameters

不同样地的根长密度为: 白羊草 > 冰草 > 铁杆蒿 > 苜蓿 (表 2)。而根系黏聚力为: 白羊草 > 苜蓿 > 冰草 > 铁杆蒿。其中苜蓿样地的根系黏聚力高于冰草和铁杆蒿样地, 这一趋势与根长密度变化趋势不一致。主要是因为苜蓿根系最大抗拉力随根径的增幅最大, 当根系较粗时, 其根系抗拉力高于其他草本根系, 导致其在较小的根长密度下出现较高的根系黏聚力。总体上直根系草本的根系黏聚力均值 (8.39 KPa) 较须根系低 14.84%。

(2) 土壤性质。对不同样地的土壤力学参数进行分析 (表 2), 发现除 100KPa 外, 其他 3 个法向应力下, 冰草和苜蓿样地的土壤抗剪强度均高于白羊草和铁杆蒿。这一现象主要与土壤有机质有关, 由表 1 可知, 冰草和苜蓿样地有机质高于白羊草和铁杆蒿, 而土壤抗剪强度与有机质呈正相关关系^[27], 使得具有较高有机质的样地抗剪强度也较高。不同

表 2 不同样地的根系和土壤性质

Table 2 Root and soil properties of different sampling sites

样地类型 Sampling sites	根长密度 Root length density/ (cm·cm ⁻³)	根系黏聚力 Root cohesion /KPa	土壤抗剪强度 Soil shear strength /KPa				黏聚力 Cohesion /KPa	内摩擦角 Internal friction angle/°	黏结力 Soil cohesion/K Pa	
			100	200	300	400				
须根系 Fibrous roots	冰草 白羊草	16.42 26.60	8.61 12.19	30.53 26.24	48.89 46.87	80.13 69.17	104.33 93.74	2.81 2.80	14.18 12.70	21.06 46.23
直根系 Tap roots	铁杆蒿 苜蓿	12.96 8.53	6.04 10.61	24.97 23.24	44.79 53.29	69.15 76.14	89.54 101.02	2.60 3.38	12.30 10.78	33.25 16.35

样地土壤黏聚力的变化与抗剪强度的变化趋势一致。而冰草和白羊草样地的内摩擦角高于铁杆蒿和苜蓿，主要与其土壤黏粒含量有关^[28]，冰草和白羊草样地的黏粒含量高于铁杆蒿和苜蓿样地，而内摩擦角与黏粒含量呈正相关关系，使得须根系草本样地的内摩擦角高于直根系草本样地。

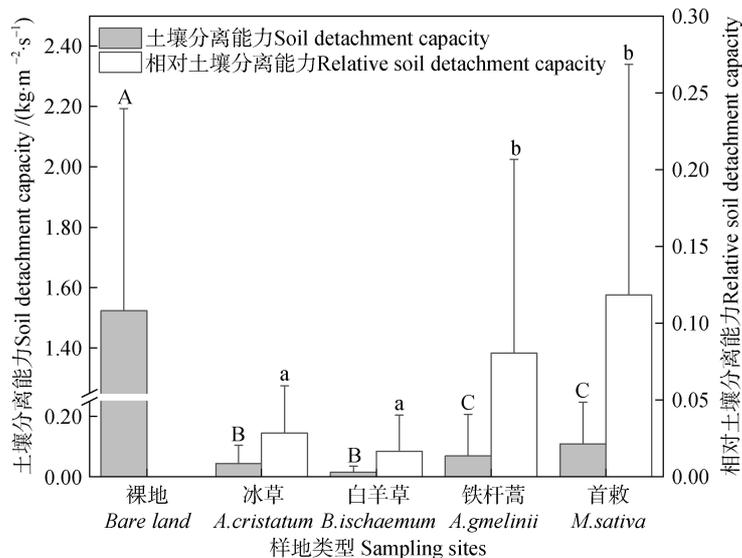
2.2 土壤分离能力

不同样地的土壤分离能力与相对土壤分离能力如图 4 所示。裸地的土壤分离能力为 1.52 kg·m⁻²·s⁻¹，相对于裸地，冰草和白羊草样地的土壤分离能力分

别降低了 97.11%和 99.00%，铁杆蒿和苜蓿样地分别降低了 95.51%和 92.81%。须根系草地（冰草和白羊草）的土壤分离能力较直根系草地（铁杆蒿和苜蓿）低 3.94%，且二者存在显著差异（ $P < 0.05$ ）。相对土壤分离能力的变异规律与土壤分离能力一致，即须根系草地的相对土壤分离能力较直根系草地低 77.27%。

2.3 相对土壤分离能力与根系黏聚力的关系

在铁杆蒿和苜蓿样地，相对土壤分离能力与根系黏聚力的相关性高于与根长密度的相关性（表 3）。



注：不同大写字母表示不同样地类型土壤分离能力差异显著（ $P < 0.05$ ），不同小写字母表示不同样地类型相对土壤分离能力差异显著（ $P < 0.05$ ）。 Note: Different capital letters indicate significant differences at a confidence level of 0.05 between the SDCs, and different lowercase letters indicate significant differences at a confidence level of 0.05 between the RSDs.

图 4 不同样地的土壤分离能力

Fig. 4 Soil detachment capacity under different sampling sites

在冰草样地，相对土壤分离能力与根系黏聚力的相关性高于与根长密度的相关性，白羊草样地，二者关系无显著差异。说明根系黏聚力对直根系草地的相对土壤分离能力的表达效果优于根长密度。

对相对土壤分离能力与根系黏聚力和根长密度两参数的拟合分析也发现了相似的现象（图 5）。在

铁杆蒿和苜蓿样地，相对土壤分离能力与根长密度拟合关系的 R^2 分别为 0.20 和 0.12，而与根系黏聚力的 R^2 分别为 0.22 和 0.33，拟合精度较根长密度有了一定的提升。而在冰草和白羊草样地，相对土壤分离能力与根系黏聚力拟合关系的 R^2 分别为 0.48 和 0.63，而与根长密度的 R^2 分别为 0.46 和 0.70，拟合精度无一致变化规律。

表 3 不同样地相对土壤分离能力与根系黏聚力和根长密度的相关性

根系参数 Root parameters	Spearman 相关系数 Spearman correlation coefficient			
	冰草 <i>A. cristatum</i>	白羊草 <i>B. ischaemum</i>	铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i>	苜蓿 <i>M. sativa</i>
根系黏聚力 Root cohesion	-0.62*	-0.86**	-0.51	-0.79**
根长密度 Root length density	-0.80**	-0.86**	-0.44	-0.48

注：**表征在 0.01 水平上显著相关，*表征在 0.05 水平上显著相关。Note: □□ indicates a significant correlation at a level of 0.01, □ indicates a significant correlation at a level of 0.05.

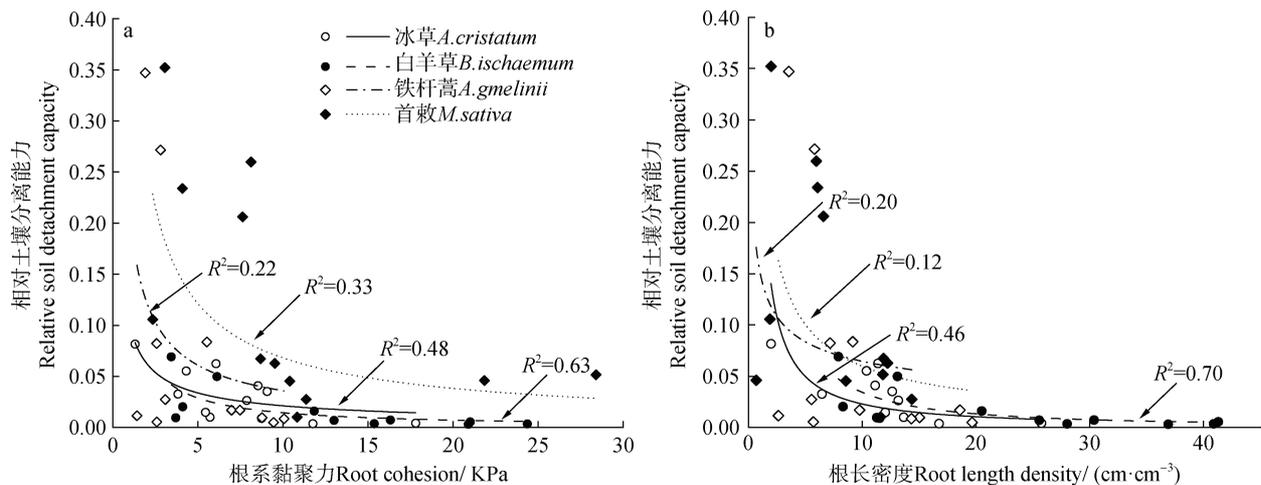


图 5 相对土壤分离能力与根系黏聚力和根长密度的关系

Fig. 5 Variation of relative soil detachment capacity with root cohesion and root length density

2.4 相对土壤分离能力与土壤抗剪强度的关系

对相对土壤分离能力与不同正应力下的土壤抗剪强度进行相关性分析（表 4）。除冰草外，白羊草、铁杆蒿、苜蓿样地的相对分离能力与正应力为 200 KPa 下的抗剪强度相关性最高，甚至优于与土壤黏聚力（便携式剪切仪测定）的相关性。因此选用 200 KPa 下的抗剪强度作为土壤抗剪强度的表征参数，探究其与土壤分离能力的关系。

除苜蓿样地外，其余样地的相对土壤分离能力随土壤抗剪强度的增加均呈幂函数减小趋势（图 6a）。并

且在须根系的冰草和白羊草样地，二者的拟合关系（ R^2 ）弱于直根系的铁杆蒿样地。基于式（9），得到冰草、白羊草、铁杆蒿、苜蓿 200 KPa 正应力下根土复合体的总抗剪强度为 60.64、58.48、52.00、54.94 KPa，须根系草地根土复合体抗剪强度较直根系草地高 10.22%。同时发现相对土壤分离能力与根土复合体总抗剪强度的拟合精度（ R^2 ）（图 6b）优于与根系黏聚力和土壤抗剪强度两单一要素的拟合精度。说明基于根土复合体的力学特性可以对土壤分离有效的进行表达。

表 4 相对土壤分离能力与不同应力下的抗剪强度的相关性

Table 4 Correlation coefficient of relative soil detachment capacity with shear strength under different stresses

根系构型 Root type	植物种 Plant species	相关系数 Correlation coefficient				
		抗剪强度 Shear stress				土壤黏结力 Soil cohesion
		100	200	300	400	
须根系 Fibrous root	冰草 <i>A. cristatum</i>	-0.31	-0.08	0.50	0.08	0.27
	白羊草 <i>B. ischaemum</i>	0.03	-0.23	0.10	0.15	-0.13
直根系 Tap root	铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i>	-0.43	-0.58	0.44	-0.26	-0.18
	苜蓿 <i>M.sativa</i>	0.15	0.43	0.38	0.35	0.17

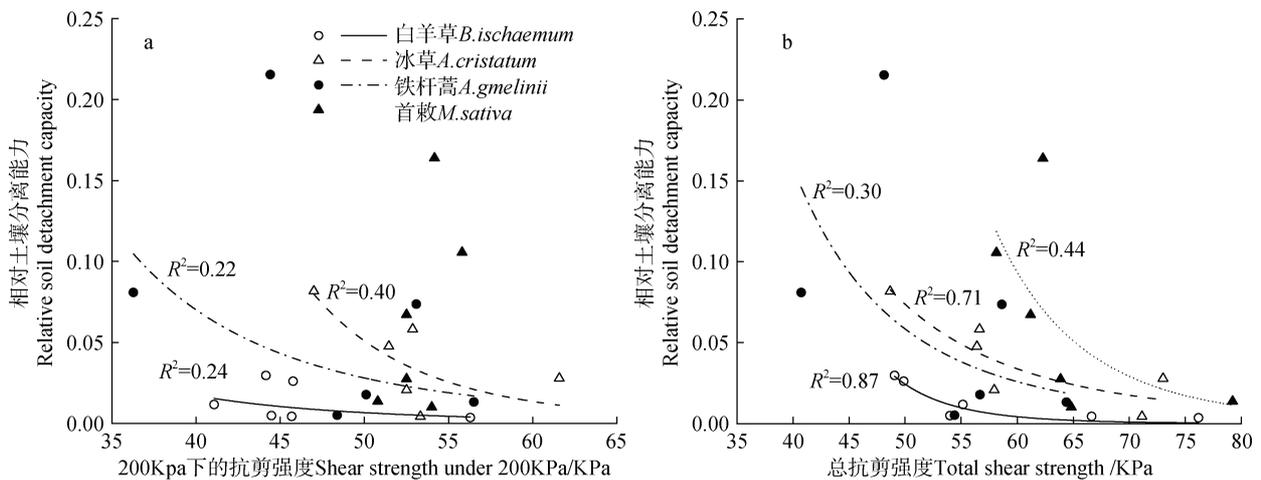


图 6 相对土壤分离能力与抗剪强度的关系

Fig. 6 Relationship between relative soil detachment capacity and shear strength

2.5 根土复合体力学参数对土壤分离能力的效应及模拟

基于最小二乘法，解析根土复合体的力学性质

对相对土壤分离能力的影响（表 5）。根系黏聚力对相对土壤分离能力的影响强于土壤抗剪强度，强于根系黏聚力与抗剪强度的交互效应。

表 5 力学参数对相对土壤分离能力的功效

Table 5 Effect analysis of mechanical parameters on relative soil detachment capacity (%)

力学参数 Mechanical parameter	冰草 <i>A. cristatum</i>	白羊草 <i>B. ischaemum</i>	铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i>	苜蓿 <i>M.sativa</i>
根系黏聚力 Root cohesion	66.41	24.40	28.17	59.91
抗剪强度 Shear stress (200KPa)	27.48	6.84	9.88	45.67
根系黏聚力×抗剪强度 Root cohesion×Shear stress (200KPa)	5.36	5.98	9.34	5.01

虽然相对土壤分离能力与根土复合体总抗剪强度具有较好的拟合关系，但利用该参数对冰草和铁杆蒿样地相对土壤分离能力进行预测时，精度难以满足要求（表 6）。因此，本研究基于根系黏聚力、

200 KPa 的土壤抗剪强度两个力学参数，对相对土壤分离能力进行预测，发现预测效果有了较好的提升（NSE ≥ 0.84）。说明虽然在 Baets 等^[22]的研究中，将二者通过相加的方式表征土壤的有效抗剪强度，

但是在本研究中并不能完全反映土壤分离过程中侵蚀阻力特征，根土交互作用也扮演着重要角色。同时也发现根系黏聚力和 200 KPa 的土壤抗剪强度

两力学参数对直根系的铁杆蒿和苜蓿样地相对土壤分离能力的预测精度要优于须根系的冰草和白羊草样地。

表 6 不同样地相对土壤分离能力拟合公式

Table 6 Fitting equations of relative soil detachment capacity of different sampling sites

样地类型 Sampling sites	拟合公式 ¹⁾ Fitting equations	<i>n</i>	<i>NSE</i>	拟合公式 ²⁾ Fitting equations	<i>n</i>	<i>NSE</i>	
须根系 Fibrous root	冰草 <i>A. cristatum</i>	$RSD = 3.06 \times 10^8 S^{-5.44}$	6	0.44	$RSD = 1.24 \times 10^{-15} e^{-0.58C_r} \tau_{200}^{8.86}$	6	0.86
	白羊草 <i>B. ischaemum</i>	$RSD = 13.32 \times 10^5 S^{-4.27}$	6	0.77	$RSD = 3.00 \times 10^{-3} e^{-0.21C_r} \tau_{200}^{0.95}$	6	0.84
直根系 Tap root	铁杆蒿 <i>A. gmelinii</i>	$RSD = 7.89 \times 10^8 S^{-5.75}$	6	0.42	$RSD = 1.42 \times 10^3 e^{-1.53C_r} \tau_{200}^{-0.81}$	6	0.99
	苜蓿 <i>M. sativa</i>	$RSD = 7.91 \times 10^8 S^{-5.67}$	6	0.74	$RSD = 8.44 \times 10^5 e^{-0.16C_r} \tau_{200}^{-3.86}$	6	0.89

注：RSD 为相对土壤分离能力，*S* 为正应力为 200 KPa 下根土复合体总抗剪强度 (KPa)， τ_{200} 为正应力 200 KPa 下的抗剪强度 (KPa)， C_r 为根系黏聚力 (KPa)，*n* 为样本量。1) 表格第一列为 RSD 与单一参数 *S* ($C_r + \tau_{200}$) 的拟合公式，2) 表格第二列为 RSD 与 C_r 和 τ_{200} 两个参数的拟合公式。Note: RSD is the relative soil detachment capacity, *S* is the total shear strength (KPa) of the root-soil composites under a normal stress of 200KPa, τ_{200} is the shear strength (KPa) under a normal stress of 200 KPa, C_r is the root cohesion (KPa), *n* is the sample number. 1) The first table lists are the fitting equations of RSD with the single parameter of *S* ($C_r + \tau_{200}$), 2) while the second table lists are fitting equations of RSD with both parameters of C_r and τ_{200} .

此外，基于上述的根系黏聚力 (C_r)、200KPa 正压力下的抗剪强度 (τ_{200})，结合水流功率 (ω)，分别构建了适用于须根系草地和直根系草地土壤分离能力 (SDC) 的预测公式 (式 (10) 和式 (11))。发现公式对须根系样地土壤分离能力的预测能力 ($NSE=0.65$) 弱于直根系样地 ($NSE=0.86$)，进一步说明了根土复合体力学参数是预测直根系草本样地土壤分离能力较好的指标，但是对于须根系样地的预测还需进一步探究。同时本研究综合 4 个样地的数据，构建了同时适用于两类草本样地的土壤分离能力预测公式 (式 (12))，*NSE* 可达到 0.90，能够满足预测要求。

须根系草地：

$$SDC = e^{-21.09} e^{-0.06C_r} \tau_{200}^{4.57} \omega^{-0.24}$$

$$NSE=0.65, n=12 \quad (10)$$

直根系草地：

$$SDC = e^{-21.37} e^{-0.01C_r} \tau_{200}^{1.11} \omega^{5.32}$$

$$NSE=0.86, n=12 \quad (11)$$

须根系和直根系草地：

$$SDC = e^{-9.89} e^{-0.09C_r} \tau_{200}^{-0.77} \omega^{4.02}$$

$$NSE=0.90, n=24 \quad (12)$$

3 讨论

本研究中，相对于裸地，须根系和直根系草地土壤分离能力分别降低了 98.06% 和 94.19%，这与 Gyssels 等^[29]得到根系对分离能力的削减效应高于 90% 的结论一致，但较 Wang 等^[7]结论偏高。Hao 等^[12]研究表明须根系和直根系使分离能力分别降低了 65.7% 和 41.6%，根长密度分别为 0~20 $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 0~15 $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。而本研究中须根系和直根系样地的根长密度分别为 0~40 $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 0~20 $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，较大的根长密度使本研究中土壤分离能力较 Wang 等^[7]偏低。同时，须根系样地较大的根系密度也使其土壤分离能力低于直根系样地。

从力学角度而言，须根系草本样地较高的细根含量^[30]及其较高的根系抗拉力，使得本研究估算的

须根系草本的根系黏聚力高于直根系。赵丽兵和张宝贵^[23]也指出须根系的马唐根由于具有较高的木纤比,使其平均抗拉强度高于直根系的紫花苜蓿。高根系黏聚力使得须根系对抗剪强度的强化效应优于直根系。此外,根系还可通过根尖分泌有机物质,增加土壤有机质含量,进而强化土壤力学性能^[19]。须根系根尖数量较多,其分泌的有机物质较高,导致须根系样地土壤有机质含量高于直根系样地^[9]。因此本研究中,须根系草地(冰草和白羊草)200 KPa下的土体抗剪强度较直根系(铁杆蒿)偏高。须根系较高的黏聚力和土壤抗剪强度使其根土复合体抗剪强度高于直根系,这与姜义宝等^[31]研究中须根系(冰草)样地土壤抗剪强度参数高于直根系(铁杆蒿)的结论相近。较高的抗剪强度使得须根系样地的土壤分离能力低于直根系样地。但根土复合体抗剪强度不仅与根系相关,还取决于土壤质地。本研究中,虽然苜蓿的根系黏聚力高于冰草,但其土壤有机质和黏粒含量偏低^[32],导致内摩擦角等力学参数较小,使其相对于冰草具有较小的根土复合体抗剪强度和较高的土壤分离能力。

虽然根系黏聚力能够较好地表征相对土壤分离能力,但是基于水流功率和根土复合体力学参数构建预测模型时,发现其对直根系草地的预测能力强于须根系草地。这与Wu氏简化模型的构建原理有关,该模型假设剪切区的所有根系与剪切面垂直相交,土壤发生剪切时,土壤内部产生的剪应力转移到根系上,使之产生拉伸,形成拉应力。所有根系同时达到最大抗拉强度,并瞬间完全断裂^[8],这一假设符合直根系在土体中的分布,使其估算的根系黏聚力能够有效地表征土壤分离。而须根系中,根系分布较为复杂,多数不与剪切面垂直相交,通过Wu氏模型估算的根系黏聚力并不能完全表征须根系对土壤抗剪强度的增强效应,因此须根系的根系黏聚力对土壤分离的表达提升效果有限。今后工作应该进一步选择能够对不同构型根系在剪切过程中的作用力均能有效表达的力学模型,估算根系和土壤力学参数,探究其与土壤分离的关系,解析土壤分离的力学机制。

4 结 论

本研究采集了黄土高原典型须根系草地(冰草和白羊草)和直根系草地(铁杆蒿和苜蓿)原状根

土复合体样品,并对其进行室内冲刷试验,基于根土复合体力学参数解析了土壤分离的变化机制,主要结论如下:(1)须根系草地的根长密度、根系黏聚力高于直根系草地,但土壤分离能力低于直根系草地。(2)须根系草地,根系黏聚力和根长密度对相对土壤分离能力的表达效果无显著差异,但在直根系样地,根系黏聚力的表达效果优于根长密度。相对土壤分离能力与200 KPa正压力下的土壤抗剪强度的相关性优于正压力为100、300、400 KPa下抗剪强度,且优于土壤黏结力。(3)根系黏聚力和200 KPa正压力下的土壤抗剪强度能够较好地直根系样地土壤分离能力进行预测,但是对须根系样地表达优化有限。基于上述力学参数构建了同时适用于须根系和直根系草地土壤分离能力的预测公式,预测精度较好。

参考文献 (References)

- [1] Shen N, Wang Z L, Guo Q, et al. Soil detachment capacity by rill flow for five typical loess soils on the Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 213: 105159.
- [2] Wang R Z, Chen Y, Li T, et al. Root distribution characteristics of *Vetiveria zizanioides* and *Digitaria sanguinalis* and their effects on the anti-erodibility of purple soil in slopelands[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26 (7): 45—54. [王润泽, 谌芸, 李铁, 等. 香根草和马唐的根系特征及对坡地紫色土抗侵蚀性的影响[J]. 草业学报, 2017, 26 (7): 45—54.]
- [3] Liu J E, Zhang X C, Zhou Z C. Quantifying effects of root systems of planted and natural vegetation on rill detachment and erodibility of a loessial soil[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 195: 104420.
- [4] Wang B, Li P P, Huang C H, et al. Effects of root morphological traits on soil detachment for ten herbaceous species in the Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2021, 754: 142304.
- [5] Xu Z H, Huang L P, Yang Z H, et al. Influence of different root contents on shear strength of mountain red earth[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39 (5): 54—59, 66 [徐宗恒, 黄丽苹, 杨正辉, 等. 不同根系含量对山原红壤抗剪强度的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39 (5): 54—59, 66]
- [6] Gonzalez-Ollauri A, Mickovski S B. Plant-soil reinforcement response under different soil hydrological regimes[J]. Geoderma, 2017, 285: 141—150.
- [7] Wang Y, Du F, Zhou M, et al. Research on shear strength of root-soil composite in a forest and grass standing site in northern Shaanxi[J]. Research of Soil and Water

- Conservation, 2018, 25 (2): 213—219. [王月, 杜峰, 周敏, 等. 陕北林草混交根土复合体抗剪强度研究[J]. 水土保持研究, 2018, 25 (2): 213—219.]
- [8] Zhong R H, Bao Y H, He X B, et al. Root tensile properties and root cohesion of 4 herbaceous plant species in the riparian zone of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29 (4): 188—194 [钟荣华, 鲍玉海, 贺秀斌, 等. 三峡水库消落带 4 种草本根系抗拉特性及根系粘聚力[J]. 水土保持学报, 2015, 29 (4): 188—194]
- [9] Ma J Y, Li Z B, Sun B Y, et al. Mechanism and modeling of different plant root effects on soil detachment rate[J]. Catena, 2022, 212: 106109.
- [10] Guo M M, Wang W L, Kang H L, et al. Effect of natural vegetation restoration age on slope soil anti-scourability in gully region of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34 (22): 138—146. [郭明明, 王文龙, 康宏亮, 等. 黄土高原沟壑区植被自然恢复年限对坡面土壤抗冲性的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34 (22): 138—146.]
- [11] Li Z W, Zhang G H, Geng R, et al. Land use impacts on soil detachment capacity by overland flow in the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2015, 124: 9—17.
- [12] Hao H X, Di H Y, Jiao X, et al. Fine roots benefit soil physical properties key to mitigate soil detachment capacity following the restoration of eroded land[J]. Plant and Soil, 2020, 446 (1): 487—501.
- [13] Ye C, Guo Z L, Li Z X, et al. The effect of Bahiagrass roots on soil erosion resistance of Aquults in subtropical China[J]. Geomorphology, 2017, 285: 82—93.
- [14] Li Q, Liu G B, Xu M X, et al. Soil anti-scourability and its related physical properties on abandoned land in the Hilly Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (10): 153—159. [李强, 刘国彬, 许明祥, 等. 黄土丘陵区撂荒地土壤抗冲性及相关理化性质[J]. 农业工程学报, 2013, 29 (10): 153—159.]
- [15] Xu G C, Cheng S D, Li P, et al. Soil total nitrogen sources on dammed farmland under the condition of ecological construction in a small watershed on the Loess Plateau, China[J]. Ecological Engineering, 2018, 121: 19—25.
- [16] Du F, Shan L, Chen X Y, et al. Studies on the vegetation succession of abandoned farmland in the loess hilly region of northern Shaanxi-succession series after being abandoned[J]. Acta Agrestia Sinica, 2005, 13 (4): 328—333. [杜峰, 山仑, 陈小燕, 等. 陕北黄土丘陵区撂荒演替研究—撂荒演替序列[J]. 草地学报, 2005, 13 (4): 328—333.]
- [17] Ma J Y, Ma B, Li Z B, et al. Determining the mechanism of the root effect on soil detachment under mixed modes of different plant species using flume simulation[J]. Science of the Total Environment, 2023, 858: 159888.
- [18] Sun B Y, Wu Z G, Li Z B, et al. Effects of freeze-thaw on soil detachment capacity and erosion resistance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36 (11): 57—65 [孙宝洋, 吴志广, 李占斌, 等. 冻融对土壤分离能力及侵蚀阻力的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36 (11): 57—65]
- [19] Su X M, Liu J E, Zhou Z C, et al. Root tensile and mechanical properties of three typical plants in the loess hilly region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26 (3): 259—264 [苏雪萌, 刘俊娥, 周正朝, 等. 黄土丘陵区不同植物根系抗拉力学特性[J]. 水土保持研究, 2019, 26 (3): 259—264.]
- [20] Cao L X, Zhang K L, Zhang W. Detachment of road surface soil by flowing water[J]. Catena, 2009, 76 (2): 155—162.
- [21] Wang L, Zuo X F, Zheng F L, et al. The effects of freeze-thaw cycles at different initial soil water contents on soil erodibility in Chinese Mollisol region[J]. Catena, 2020, 193: 104615.
- [22] De Baets S, Poesen J, Reubens B, et al. Correction to: Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength[J]. Plant and Soil, 2018, 426 (1): 429—430.
- [23] Zhao L B, Zhang B G. Experimental study on root bio-mechanics and relevant factors of *Medicago sativa* and *Digitaria sanguinalis*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23 (9): 7—12. [赵丽兵, 张宝贵. 紫花苜蓿和马唐根的生物力学性能及相关因素的试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23 (9): 7—12.]
- [24] Lü C J, Chen L H. Relationship between root tensile mechanical properties and its main chemical components of typical tree species in North China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (23): 69—78. [吕春娟, 陈丽华. 华北典型植被根系抗拉力学特性及其与主要化学成分关系[J]. 农业工程学报, 2013, 29 (23): 69—78.]
- [25] Li S S. Relationship between tensile characteristics and microscopic properties of roots of herbaceous plants in hilly erosion areas[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2018. [李思诗. 崩岗侵蚀劣地草本植物根系抗拉特性与微观性质的关系[D]. 福州: 福建农林大学, 2018.]
- [26] Comino E, Marengo P. Root tensile strength of three shrub species: *Rosa canina*, *Cotoneaster dammeri* and *Juniperus horizontalis*. Soil reinforcement estimation by laboratory[J]. Catena, 2010, 82 (3): 227—235.
- [27] Xing S K, Zhang G H, Zhu P Z. Effects of vegetation restoration age on shear strength of root-soil system in hilly and gully region of the Loess Plateau[J]. Journal of

- Soil and Water Conservation, 2021, 35 (4): 41—48, 54. [邢书昆, 张光辉, 朱平宗. 黄土丘陵沟壑区退耕年限对根—土复合体抗剪强度的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35 (4): 41—48, 54.]
- [28] Feng S Y, Wang J G, Wen H, et al. Soil shear strength of collapsing erosion area in South Jiangxi of China relative to position of the soil and its influencing factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (1): 71—83. [冯舒悦, 王军光, 文慧, 等. 赣南崩岗侵蚀区不同部位土壤抗剪强度及影响因素研究[J]. 土壤学报, 2020, 57 (1): 71—83.]
- [29] Gyssels G, Poesen J, Liu G, et al. Effects of cereal roots on detachment rates of single- and double-drilled topsoil during concentrated flow[J]. European Journal of Soil Science, 2006, 57 (3): 381—391.
- [30] Hao H X, Wei Y J, Cao D N, et al. Vegetation restoration and fine roots promote soil infiltrability in heavy-textured soils[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 198: 104542.
- [31] Lou Y B, Kang H L, Wang W L, et al. Vertical distribution of vegetation roots and its influence on soil erosion resistance of gully heads on the gullied Loess Plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56 (1): 90—103. [娄义宝, 康宏亮, 王文龙, 等. 黄土高原沟壑区沟头植被根系垂直分布及其对土壤抗侵蚀性的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56 (1): 90—103.]
- [32] Ma J Y, Li Z B, Ma B, et al. Response mechanism of the soil detachment capacity of root-soil composites across different land uses[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 224: 105501.

(责任编辑: 檀满枝)