

DOI: 10.20103/j.stxb.202311272590

刘均阳,周正朝,苏雪萌.黄土高原典型草本植物根系影响土壤可蚀性的时空差异特征.生态学报,2025,45(10): - .

Liu J Y, Zhou Z C, Su X M. Spatial and temporal differences in soil erodibility influenced by typical herb roots on the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(10): - .

黄土高原典型草本植物根系影响土壤可蚀性的时空差异特征

刘均阳¹, 周正朝^{2,*}, 苏雪萌³

1 延安大学生命科学学院, 延安 716000

2 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119

3 陕西理工大学人文学院, 汉中 723001

摘要:结合人工种植试验(时间)和野外采样试验(空间),运用原状土水槽冲刷法,研究了黄土高原典型草本植物根系影响土壤可蚀性的时空差异特征。研究表明:(1)时间上(观测期内):黑麦草和紫花苜蓿的根系密度(根长密度和根表面积密度)呈现出先快速增长后缓慢下降的趋势。根系驱动下,植被样地的土壤有机质和阳离子交换量显著增长,黑麦草样地的变化范围是 1.65—2.74 g/kg 和 9.24—15.54 cmol/kg,紫花苜蓿样地的变化范围是 1.53—3.37 g/kg 和 8.63—15.91 cmol/kg。在根系及土壤理化性质变化的双重影响下,黑麦草和紫花苜蓿样地的土壤可蚀性在观测初期快速减少,减蚀率达到了 35.68%—54.40%,之后逐渐平稳;(2)空间上:长芒草的根系密度在永寿和神木地区显著高于安塞地区;铁杆蒿的根系密度在永寿地区显著高于神木和安塞地区。根系驱动下,土壤有机质在永寿地区增长最多,相较于对照地,长芒草和铁杆蒿样地分别增长了 43.63% 和 97.23%;长芒草和铁杆蒿样地的土壤阳离子交换量分别在神木和永寿地区增长最多,为 18.87% 和 68.21%。基于不同试验区植物根系的生长情况及土壤抗蚀性能,长芒草和铁杆蒿根系均在神木地区的减蚀效果最明显,其土壤可蚀性分别降低了 97.55% 和 98.54%。因此,黄土高原地区草本植物根系对土壤可蚀性的调控作用具有明显的时空差异,此结果有助于提升对植物根系减蚀效应与机理的系统认识,为该地区的水土流失防控提供理论依据。

关键词:草本植物;根系;土壤可蚀性;时空差异;黄土高原

Spatial and temporal differences in soil erodibility influenced by typical herb roots on the Loess Plateau

LIU Junyang¹, ZHOU Zhengchao^{2,*}, SU Xuemeng³

1 School of Life Sciences, Yan'an University, Yan'an 716000, China

2 School of Geographical Sciences and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

3 College of Humanities, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China

Abstract: In this study, artificial planting (temporal dimension) and field sampling (spatial dimension) experiments were conducted to examine the spatial and temporal variations in soil erodibility through flume scouring of undisturbed soil under the influence of root systems of representative herbal species on the Loess Plateau. The findings indicated in temporal dimension, a marked initial surge, followed by a gradual decline in root densities (expressed as root length density and root surface area density) of *Lolium perenne* and *Medicago sativa* over the course of the observational period. Propelled by the root growth, the organic matter content in soil enhanced significantly from 1.65 to 2.74 g/kg in *Lolium perenne* plot and from

基金项目:国家自然科学基金青年项目(42407478);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2024JC-YBQN-0314, 2024JC-YBQN-0496);延安大学博士启动项目(YAU202313804)

收稿日期:2023-11-27; **网络出版日期:**2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zezhou@snnu.edu.cn

1.53 to 3.37 g/kg in *Medicago sativa* plot. Meanwhile, cation exchange capacity of soil enhanced significantly from 9.24 to 15.54 cmol/kg in *Lolium perenne* plot and from 8.63 to 15.91 cmol/kg in *Medicago sativa* plot. The changes in root characteristics and soil physicochemical properties caused a prompt decline in soil erodibility in both *Lolium perenne* and *Medicago sativa* plots during the initial phase of observation, with erosion reduction rates ranging from 35.68% to 54.40%, followed by a phase of progressive stabilization. In the spatial dimension, root densities (expressed as root length density and root surface area density) of *Stipa bungeana* in Yongshou and Shenmu were significantly higher than those in Ansai. On the other hand, root densities of *Artemisia gmelinii* in Yongshou were significantly higher than those in Shenmu and Ansai. Changes in the root systems caused the most substantial increase in soil organic matter in Yongshou. In comparison to fallow land, soil organic matter contents in *Stipa bungeana* and *Artemisia gmelinii* plots were 43.63% and 97.23% higher, respectively. Furthermore, cation exchange capacity of soil in *Stipa bungeana* and *Artemisia gmelinii* plots enhanced most significantly in Shenmu and Yongshou, by 18.87% and 68.21%, respectively. The root characteristics and erosion resistance capacity of soil across different experimental areas indicated that the impacts of *Stipa bungeana* and *Artemisia gmelinii* roots on soil erosion were most pronounced in Shenmu, where soil erodibility reduced by 97.50% and 98.61%, respectively. Consequently, the reduction effects of herb roots on soil erodibility are significantly different in both temporal and spatial dimensions on the Loess Plateau. These results contribute to a systematic understanding of the mechanism of plant roots on soil erosion, and provide a theoretical basis for the prevention and control of soil and water loss in this region.

Key Words: herbaceous plant; root system; soil erodibility; spatiotemporal difference; Loess Plateau

土壤侵蚀会导致土壤肥力下降、洪涝灾害加剧等生态问题,是人类生存与发展面临的重要环境问题之一^[1-2]。土壤可蚀性是定量描述土壤抵抗侵蚀能力的常用指标参数,被广泛用于不同的土壤侵蚀预报模型,例如 USLE、REUSLE 和 WEPP 等^[3]。相较于经验模型 USLE 和 REUSLE,基于侵蚀过程建立的 WEPP 模型具有更好的外延性,适用于模拟不同条件下土壤侵蚀产沙的时空分布^[4]。研究发现,土壤可蚀性与土壤理化性质密切相关。例如,李以恒等^[5]通过水槽试验发现,土壤可蚀性与土壤有机质、土壤极细砂含量显著相关;朱启明等^[3]基于模型估算提出,土壤可蚀性与土壤容重、土壤有机碳和土壤阳离子交换量显著相关等。

植被恢复是阻控水土流失和防治土壤侵蚀的主要措施之一。一方面,植物的地上部分(冠层和枯落物)通过改变径流的空间分布、增加下垫面的粗糙度等方式,减小侵蚀营力^[6];另一方面,植被的地下部分(根系)通过捆绑、分泌、腐化等方式,改善土壤理化性质^[7-8],提升土壤的抗侵蚀能力。研究发现,在由坡面径流引起的细沟侵蚀过程中,相比植被的地上部分,植物根系在固土减蚀方面发挥更为重要的作用^[9-10]。因此,近十几年,植物根系的减蚀效应与机制在土壤侵蚀领域备受关注。

有关植物根系强化土壤抗侵蚀性能的研究已大量开展,并取得了丰厚的成果。例如,秦嘉惠等^[11]、程谅等^[12]、Wang 等^[13]和 Liu 等^[14]通过相关试验发现,根长密度、根表面积密度、根重密度和根面积比与土壤可蚀性显著负相关,并呈指数函数关系;Chen 等^[15]和 Li 等^[16]提出,根系直径是影响根系固土效果的重要因素,在水蚀过程中,浅而密的细根网是最有效的;Wang 等^[10]通过对黄土高原 10 种典型草本植物根系的研究得出,相比直根系,须根系能更好地阻控细沟侵蚀;Fan 和 Chen^[17]和 Li 等^[18]通过绘制不同植物根系的构成状况发现,R 型根系(具有较多的斜向根)在抵抗土壤剪切破碎和维护边坡稳定中的效果相对较好等。综合上述内容,土壤侵蚀对植物根系的响应结果与根系本身的结构特征密切相关。根据现有研究,植物根系的结构特征不仅具有明显的时间变化规律,还受立地条件的影响。例如:Liu 等^[14]证实根系特征参数随退耕时间的增加而增加;Hao 等^[19]发现土壤质地对植物根系的形态特征具有显著影响。所以,植物根系强化土壤的抗侵蚀能力具有一定的时空差异性。然而,以往关于植物根系对土壤可蚀性影响的研究,大多是在某一特定时间段或区域展开,并未区分不同时期以及不同立地条件下土壤可蚀性-根系参数之间响应关系的关键差异,限制了对根系阻控土壤侵蚀机理的系统了解,使得现有的土壤侵蚀-根系响应模型的适应性和应用性不强。因此,有关

植物根系对土壤可蚀性的影响还应开展进一步的动态监测研究(时间维度)和多区域的对比研究(空间维度)。

黄土高原因其特殊的地质地貌条件,成为我国土壤侵蚀最为严重的区域之一。为此,从1999年开始,我国政府开始实施“退耕还林(草)”工程,以期有效控制水土流失^[20]。直至今日,黄土高原的植被覆盖率高达60%以上,并且草地成为了此处主要的土地利用类型^[21]。因此,本研究以黄土高原为研究区域,以该区域典型的草本植物根系为研究对象,从时间和空间两个维度出发,研究植物根系影响土壤可蚀性的时空差异特征,以期深入认识植物根系的减蚀效应及机制、黄土高原的生态恢复研究与实践提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

1.1.1 野外试验区概况

黄土高原位于中国中部偏北地区(33.68°—41.27° N, 107.87°—114.55° E),面积约 $64 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。该地区受地理位置及地形的影响,具有典型的大陆季风气候特征;年降水量约为150—750 mm,主要集中在7—9月(约占全年降水量的60%—80%)^[22],极易发生暴雨天气;是我国最为严重的土壤侵蚀区域之一。

通过对黄土高原的考察和分析,从北至南选择了三个具有典型区域特征的野外试验区,即榆林市神木县、延安市安塞区和咸阳市永寿村(图1)。三个试验区域的年平均降水依次为441 mm、505 mm和602 mm,年平均温度依次为8.5℃、8.8℃和10.8℃^[23]。因“退耕还林(草)”等生态修复工程的实施,到2010年底,近一半的黄土高原区域变为草地。其中,须根系草本植物长芒草(*Stipa bungeana*)和直根系草本植物铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)因其极强的抗旱和繁殖能力,在该区域分布尤为广泛。因此,本试验选择以铁杆蒿或长芒草为优势种的坡面作为试验样地,同时选择1年左右的撂荒地作为对照。具体样地信息见表1。

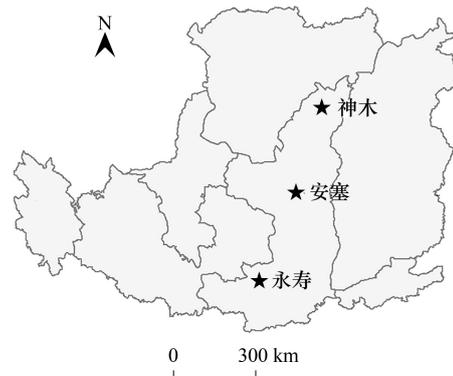


图1 试验区地理信息

Fig.1 Geographic information of the experimental areas

表1 样地信息

Table 1 Information of the sampling sites

编号 Code	地点 Location	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔/m Elevation	坡向/(°) Aspect	坡度/(°) Gradient	粘粒/% Clay	粉粒/% Silt	砂粒/% Sand	优势种 Dominant species
1	神木	38.79°N	110.37°E	1221.50	304	14	9.24	43.61	47.15	铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>
2		38.79°N	110.37°E	1214.34	273	14	12.26	41.56	46.18	长芒草 <i>Stipa bungeana</i>
3		38.80°N	110.36°E	1115.27	318	16	5.90	36.01	58.09	—
4	安塞	36.79°N	109.28°E	1241.93	328	16	8.42	56.12	35.47	铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>
5		36.80°N	109.28°E	1262.75	305	14	10.13	58.50	31.33	长芒草 <i>Stipa bungeana</i>
6		36.80°N	109.28°E	1240.91	220	15	8.29	59.30	32.41	—
7	永寿	34.84°N	108.13°E	1262.51	289	16	24.31	67.84	6.76	铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>
8		34.84°N	108.13°E	1245.27	311	15	26.97	66.81	6.12	长芒草 <i>Stipa bungeana</i>
9		34.84°N	108.13°E	1235.42	292	15	28.02	65.81	6.17	—

1.1.2 人工模拟种植试验概况

试验土壤:人工种植的试验用土采自于延安市安塞区方塌村纸坊沟流域(典型的丘陵沟壑区,36.75° N, 109.37° E)。该区域土壤为黄绵土,粘粒、粉粒和砂粒含量分别为15.04%、46.75%和38.21%。试验用土运回

试验地进行风干、过 5 mm 土筛后,分层填入试验样地内(每层 10 cm),共填装 3 层。填装的土壤容重与野外试验区土壤容重保持一致,即 1.25 g/cm^3 。播种前,向土壤中施加尿素(25 g/m^2),以利于后期种子的顺利萌发。

试验植被:

须根系草本植物黑麦草(*Lolium perenne*)和直根系草本植物紫花苜蓿(*Medicago sativa*)是黄土高原旱区水土保持常用植被,因人工培养易萌发、生长,被选为人工种植试验的对象。黑麦草和紫花苜蓿种子播种前需在温水中浸泡 10 h,室温控制在 25°C 左右,以达到促进种子萌发的目的。处理后,将种子按照设计密度精准地点播到试验样地中,即 500 株/m^2 。播种后,覆 1—2 cm 薄土,用手轻压使土壤与种子密接^[24]。留出一块空白样地作为对照。播种初期需对样地进行定期浇水、除草,对照地与种植样地的管理方式相同。具体种植样地情况如图 2 所示。

1.2 各指标的测定与计算方法

按照试验计划,人工种植试验于 2021 年 3—10 月的每月中旬(1 月为原始值)进行采样,每块样地重复采样三次,即每月采集用于根系及土壤理化性质测定的样品各 9 个,用于原状土水槽冲刷的样品 45 个(3 个样地 \times 3 个重复 \times 5 个径流梯度)。野外采样试验于 2020 年 7—9 月进行,每块样地按“S”形路线重复采样 3 次,即用于根系及土壤理化性质测定的样品各 27 个,用于原状土水槽冲刷的样品 135 个(9 个样地 \times 3 个重复 \times 5 个径流梯度)。

在人工种植试验和野外采样试验中,有关植物根系、土壤理化性质及土壤可蚀性的测定方法一致,具体如下:

1.2.1 土壤可蚀性

土壤可蚀性采用原状土水槽冲刷法测定(水槽长 \times 宽 \times 深=3 m \times 0.1 m \times 0.15 m)(图 3)。在冲刷试验开始前,采集的土壤样品(去除植被的地上部分)需在清水中饱和 12 h(水面保持在取样器上表面以下的 2 cm 处),然后排水 8 h,以去除重力水。冲刷径流水动力设置为 5 个梯度,人工种植试验的冲刷流量分别为 0.05、0.1、0.15、0.2、0.3 L/s;野外采样试验的冲刷流量分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.6 L/s。坡度设定为 15° 。

放样室下端放置 16 L 的水桶,用于收集冲刷下的水土混合物。冲刷过程中,在水槽起始端测定坡面径流的流速和水温。坡面径流流速采用高锰酸钾染色示踪法进行测定,重复 10 次,计算其平均值。冲刷时间为 10 min。冲刷试验结束后,将水桶中的样品澄清,余者转入大铝盆中,放入烘箱内(105°C , 8 h),然后记录泥沙样干重。土壤可蚀性(K_r , s/m)参照 WEPP 模型(Water Erosion Prediction Project)细沟水流分离能力方程获得,具体如下:

$$Dc = K_r(\tau - \tau_c)$$

$$Dc = \frac{W}{At}; \quad \tau = \rho g H S; \quad H = \frac{Q}{vB}$$

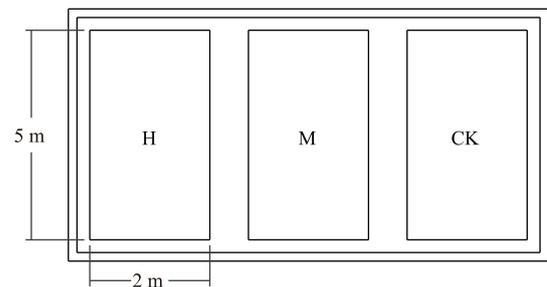


图 2 种植样地示意图

Fig.2 Schematic diagram of planting plots

字母代表不同样地,即 H-黑麦草样地 *Lolium perenne* plot, M-紫花苜蓿样地 *Medicago sativa* plot, CK-对照地 blank plot

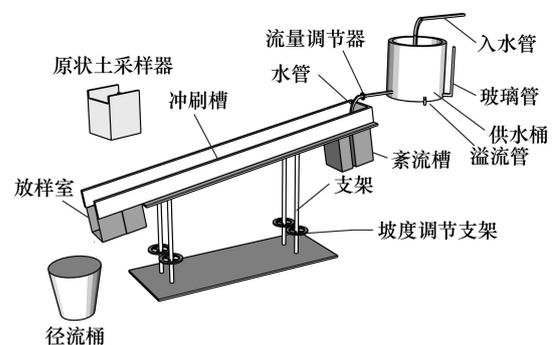


图 3 冲刷水槽示意图

Fig.3 Schematic diagram of scour flume

式中, D_c 为土壤分离能力($\text{g}/\text{m}^2 \text{ s}$), W 为烘干后泥沙质量(g), A 为原状土采样器横截面积(m^2), t 为冲刷时间(s), H 为坡面径流深(m), Q 为冲刷的径流流量(m^3/s), v 为坡面径流的流速(m/s), B 为试验水槽的宽度(m), τ 为径流剪切力(Pa), ρ 为水的密度(kg/m^3), S 为设置角度的正弦值。

1.2.2 根系参数

植物根系参数采用根系扫描仪进行测定。将根系样品平铺在扫描仪上(万深 LA-S 系列植物图像分析仪器系统)进行扫描。扫描完成的图片用 WinRHIZO 系统(加拿大 Regent Instruments Inc.)进行分析,可获得根系的总根长和总根表面积。根长密度(RLD, cm/cm^3)和根表面积密度(RSAD, cm^2/cm^3)的计算方法如下:

$$\text{RLD} = \frac{RL}{V}$$

$$\text{RSAD} = \frac{\text{RSA}}{V}$$

式中, RL 为根系总长度(cm), RSA 为根系总表面积(cm^2), V 是取样器的总体积(cm^3)。

1.2.3 土壤理化性质

土壤容重采用烘干法测定;土壤有机质采用重铬酸钾外加热法进行测定;土壤阳离子交换量采用置换法测定。

1.3 数据分析

基于试验测定与计算获得的数据,采用方差分析法检验不同生长时期以及不同试验区域间,根系和土壤理化性质的差异显著性;运用 Pearson 相关分析法,分析不同根系和土壤理化性质与土壤可蚀性之间的相关性。所有的数据分析及图形建立均使用软件 SPSS 26.0(IBM SPSS Statistics, 2019)和 Origin Pro 8.6(Origin Lab. Corp. 2018)完成。

2 结果与分析

2.1 根系的变化特征

2.1.1 根系的时间变化特征

观测期内(3—10月),植物根系受外部自然环境条件及自身生长规律影响,根长密度和根表面积密度均表现出先增长后减小的变化规律(图4)。须根系植物黑麦草的根长密度在7月前变化显著,增至 $12.56 \text{ cm}/\text{cm}^3$,7月之后其根长密度略有减少,但变化不显著($P < 0.05$);直根系植物紫花苜蓿的根长密度同样在7月前显著增加至 $3.93 \text{ cm}/\text{cm}^3$,但7月后其根长密度显著减小($P < 0.05$),至10月仅有 $1.07 \text{ cm}/\text{cm}^3$ 。

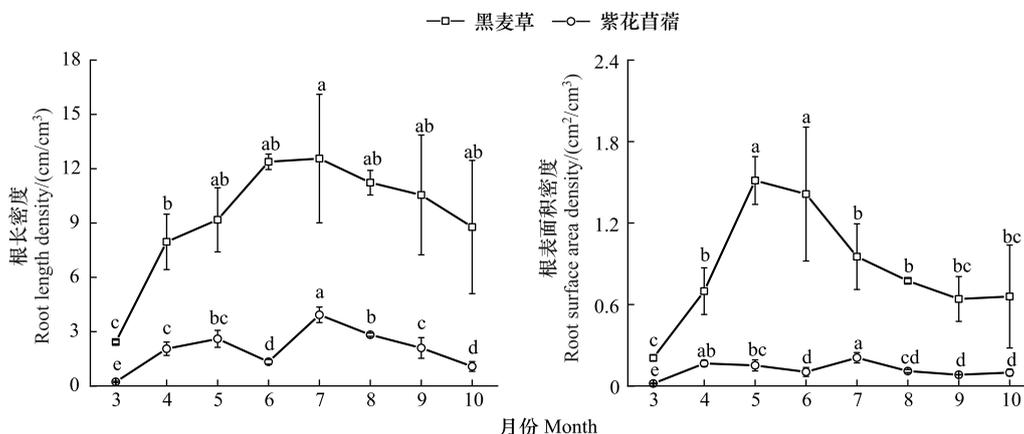


图4 不同根系参数的时间动态变化

Fig.4 Changes of different root parameters with growing time

误差棒上的小写字母表示不同时期根系参数的显著差异性

黑麦草的根表面积密度在 5 月前变化显著 ($P < 0.05$), 增至 $1.51 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$, 但 6 月后其根表面积密度持续减小至 $0.65 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ (9、10 月)。紫花苜蓿的根表面积密度的动态变化趋势与黑麦草相似, 其值在 7 月前显著增至 $0.21 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$, 7 月后显著减小至约 $0.10 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ ($P < 0.05$)。

2.1.2 根系的空间变化特征

在不同的野外试验区, 受降雨条件和土壤组成的影响^[25-26], 两种植物的根长密度和根表面积密度具有显著差异 (图 5)。长芒草在神木和永寿地区的根长密度分别为 $2.89 \text{ cm}/\text{cm}^3$ 和 $3.42 \text{ cm}/\text{cm}^3$, 显著高于安塞地区 ($P < 0.05$), 分别是其 2.24 倍和 2.65 倍; 铁杆蒿在永寿地区的根长密度是 $3.50 \text{ cm}/\text{cm}^3$, 显著高于神木和安塞地区 ($P < 0.05$), 分别是其 3.93 倍和 4.67 倍。

长芒草在神木和永寿地区的根表面积密度分别为 $0.23 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ 和 $0.21 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$, 显著高于安塞地区 ($P < 0.05$), 分别是其 2.09 倍和 1.91 倍; 铁杆蒿在永寿地区的根表面积密度是 $0.38 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$, 显著高于神木和安塞地区 ($P < 0.05$), 分别是其 2.38 倍和 2.71 倍。

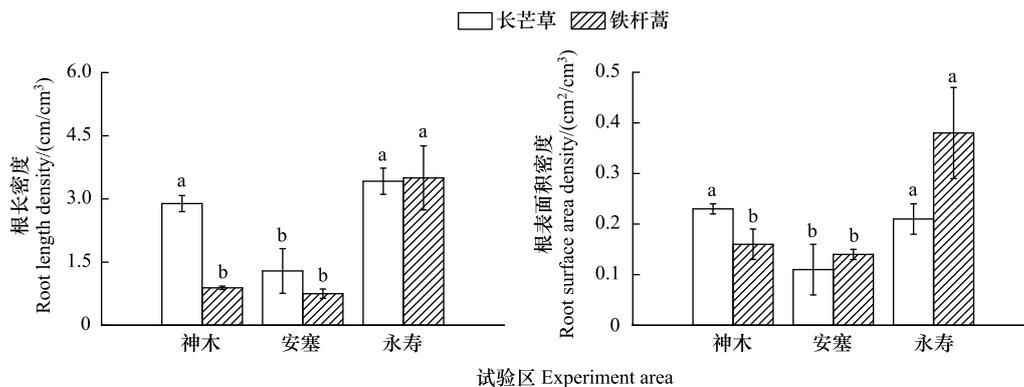


图 5 不同根系参数的空间变化

Fig.5 Spatial variation of different root characteristics

误差棒上的小写字母表示不同试验区根系参数的显著差异性

2.2 土壤理化性质的变化特征

植物根系的生长活动促进土壤理化性质发生相应的变化, 但在不同植物和环境影响下, 土壤理化性质的变化规律会存在一定的差异。

2.2.1 土壤理化性质的时间变化特征

观测期内, 植物样地和对照地的土壤容重、土壤有机质和土壤阳离子交换量表现出了不同的增长规律 (图 6)。黑麦草和紫花苜蓿样地的土壤容重变化显著, 最高增至 $1.39 \text{ g}/\text{cm}^3$ ($P < 0.05$), 但各时期与对照地的土壤容重无明显差别。这说明在本观测试验中, 根系未对土壤容重产生显著影响。但之前的部分研究结果表明在根系的不断伸展和挤压作用下, 土壤容重会显著下降^[27-28], 这可能是因为植物根系对土壤容重的影响需要较长时间的持续作用; 黑麦草和紫花苜蓿样地的土壤有机质增长显著 ($P < 0.05$), 变化范围分别为 $1.65-2.74 \text{ g}/\text{kg}$ 和 $1.53-3.37 \text{ g}/\text{kg}$ 。对照地的土壤有机质也有所增长, 但各时期均小于植物样地; 黑麦草和紫花苜蓿样地的土壤阳离子交换量增长显著 ($P < 0.05$), 变化范围分别为 $9.24-15.54 \text{ cmol}/\text{kg}$ 和 $8.63-15.91 \text{ cmol}/\text{kg}$ 。对照地的土壤阳离子交换量也呈现增加趋势, 但小于植物样地。

2.2.2 土壤理化性质的空间变化特征

在不同野外试验区, 植物根系对土壤理化性质的影响具有显著差异 ($P < 0.05$) (图 7)。其中, 长芒草和铁杆蒿样地的土壤容重大小关系均表现为神木 > 安塞 > 永寿。根据计算, 植物根系在神木地区对土壤容重的影响最大, 相比对照地, 长芒草和铁杆蒿样地的土壤容重分别降低了 15.09% ($0.23 \text{ g}/\text{cm}^3$) 和 20.13% ($0.32 \text{ g}/\text{cm}^3$); 长芒草和铁杆蒿样地的土壤有机质在不同地区大的小关系表现为永寿 > 神木 > 安塞, 且植物在永寿地区

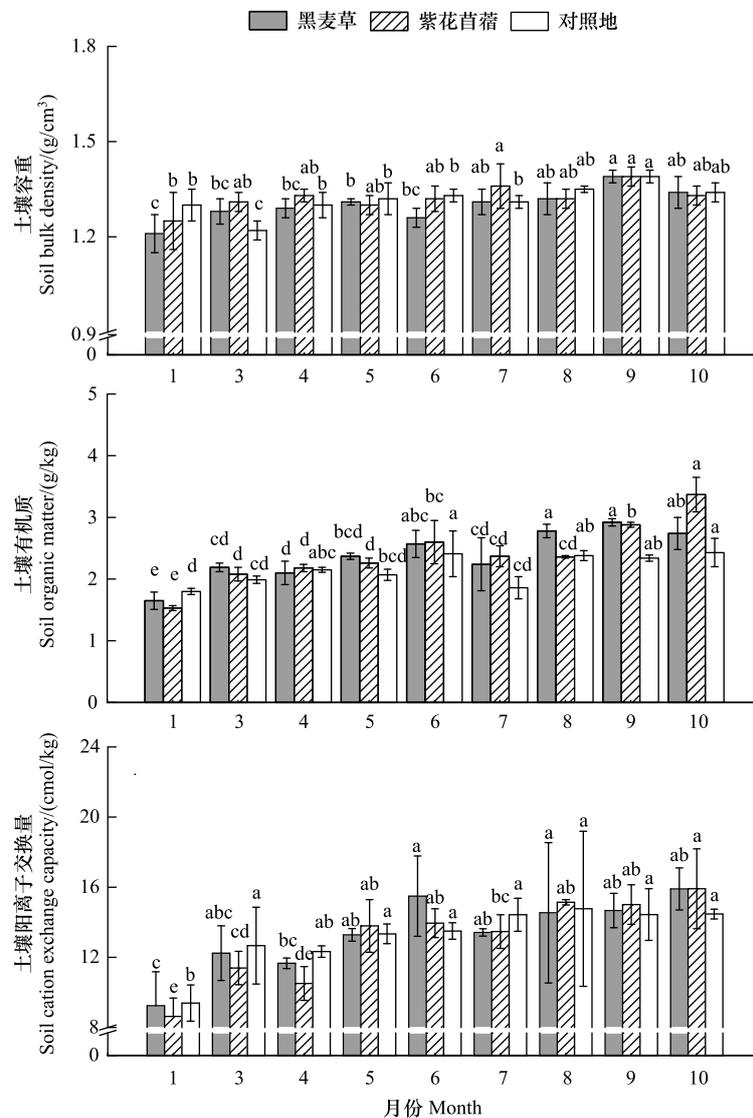


图6 土壤理化性质的时间动态变化

Fig.6 Changes of soil physical and chemical properties with growing time

对土壤有机质的影响最大,相比如对照地,长芒草和铁杆蒿样地的土壤有机质含量分别增加了 43.63% (11.81 g/kg) 和 97.23% (26.32 g/kg);长芒草样地的土壤阳离子交换量,在不同地区的大小关系为永寿>安塞>神木,铁杆蒿样地的为永寿>神木>安塞。长芒草和铁杆蒿根系分别在神木和永寿地区对土壤阳离子交换量的影响最大,相比如对照地,分别增加了 18.87% (4.41 cmol/kg) 和 68.21% (9.87 cmol/kg)。

2.3 土壤可蚀性的变化特征

土壤可蚀性根据 WEPP (Water Erosion forecast Project) 模型获得,即为实测土壤分离速率和土壤径流剪切力在线性回归上的斜率^[29]。

2.3.1 土壤可蚀性的时间变化特征

观测期内,植物样地的土壤可蚀性整体呈现先快速减小后波动变化的趋势,对照地的土壤可蚀性变化不明显(图 8)。黑麦草样地的土壤可蚀性在 1—4 月间快速从 30.83 s/m 降至 14.06 s/m,共减少了 54.40%。4 月之后其土壤可蚀性呈波动变化,集中在 16.54—20.34 s/m 之间,均值为 17.58 s/m。紫花苜蓿样地的土壤可蚀性在 1—5 月间快速从 30.83 s/m 降至 19.83 s/m,共减少了 35.68%。5 月之后,其土壤可蚀性呈波动变

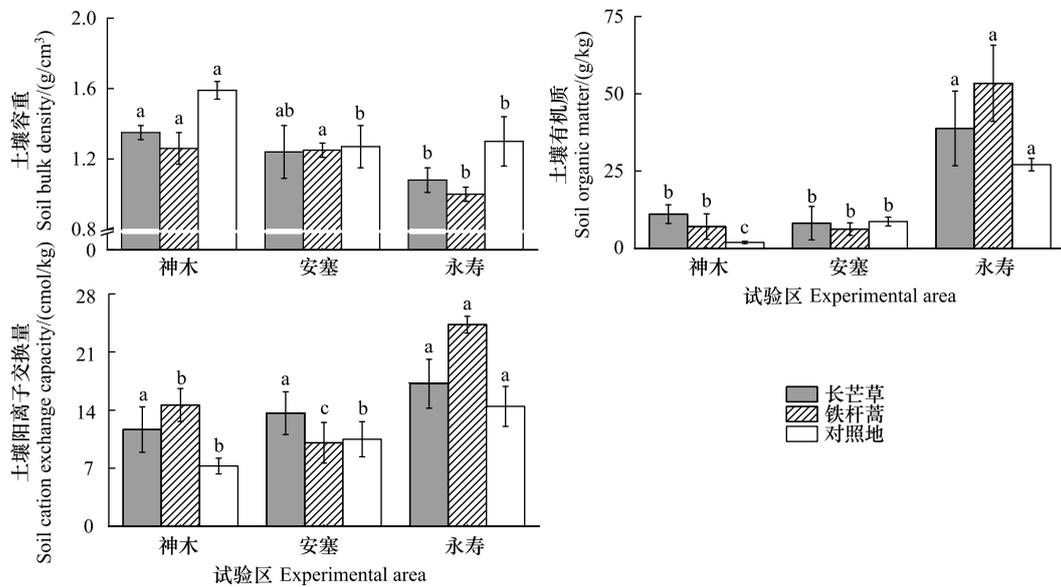


图7 不同土壤理化性质的空间变化

Fig.7 Spatial variation of soil physical and chemical properties

化,集中在 16.41—23.65 s/m 之间,均值为 20.19 s/m。对照地的土壤可蚀性的变化不明显(24.70—30.83 s/m)。由此可以推测,根系生长可减少土壤可蚀性,这与之前的研究结果基本一致^[11-12]。

2.3.2 土壤可蚀性的空间变化特征

在不同野外试验区,植物根系对土壤可蚀性的影响具有明显差异(图 9)。不同野外试验区,长芒草样地的土壤可蚀性表现为安塞(2.02 s/m) > 神木(0.32 s/m) > 永寿(0.15 s/m),铁杆蒿样地的土壤可蚀性同样表现为安塞(0.17 s/m) > 神木(0.19 s/m) > 永寿(0.17 s/m)。根据计算,长芒草和铁杆蒿根系均在神木地区对土壤可蚀性的影响最大,相比对照地,长芒草和铁杆蒿样地的土壤可蚀性分别降低了 97.55% (12.73 s/m) 和 98.54% (12.86 s/m)。因此,植物根系的减蚀作用具有显著的空间差异。

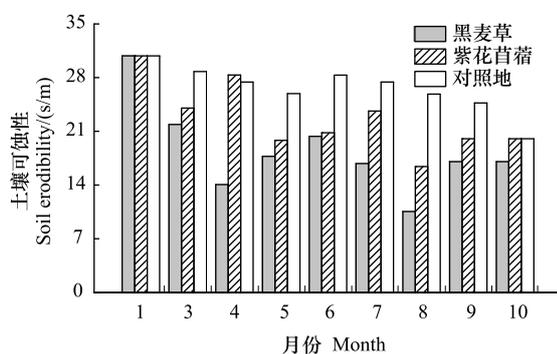


图8 土壤可蚀性的时间动态变化

Fig.8 Changes of soil erodibility with growth time

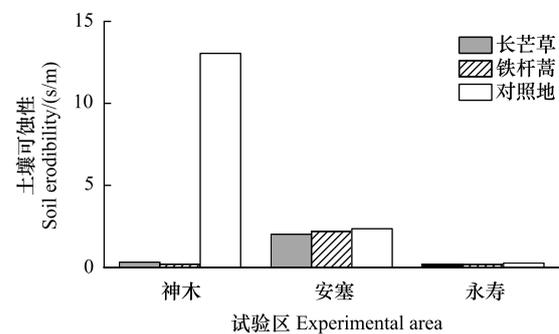


图9 土壤可蚀性的空间变化

Fig.9 Spatial variation of soil erodibility

3 讨论

本研究表明,植物根系有效减小土壤可蚀性。一方面,植物根系通过自身的交错、穿插和压缩等物理方式,使根际周围的细小颗粒不断变大,提高土体的团粒结构^[30];另一方面,植物根系通过各种分泌物改善土壤理化性质,例如土壤有机质、阳离子交换量等^[31-33],提升土体的稳定性。Wang 等^[10]、Gyssels 和 Poesen^[9]在

相关研究中也得到了类似的结果。

3.1 植物根系影响土壤可蚀性的时间差异

植物根系生长驱动下,土壤可蚀性的变化具有明显的时间差异。本研究中,黑麦草和紫花苜蓿样地的土壤可蚀性在观测初期均快速减少,减蚀率达到了 35.68%—54.40%,之后逐渐平稳(图 8)。这与之前的研究结果基本一致。例如:覃森^[27]对黑麦草和紫花苜蓿进行了类似的室内模拟试验,结果表明土壤相对分离速率随着植被根系的生长逐渐降低,由于观测时长仅有 16 周,相当于本试验的观测初期,因此,植物根系影响土壤可蚀性的时间规律与本试验基本一致;Liu 等^[34]对不同恢复年限(12、18、24、36 年)的长芒草和铁杆蒿样地进行试验发现,根系参数与土壤可蚀性呈负指数函数关系,即伴随植被根系数量的增加,土壤可蚀性先迅速下降,后逐渐变缓;Liu 等^[14]对不同年限(0、5、12、24、36 年)退耕样地的试验发现,在植物恢复初期,土壤可蚀性显著减小,退耕 12 年后无显著变化。

由表 2 可知,根系参数(根长密度和根表面积密度)和土壤理化性质(土壤有机质和土壤阳离子交换量)与土壤可蚀性具有显著的负相关关系。因此,本文中土壤可蚀性随时间的动态变化是根系自身及其驱动的土壤理化性质变化双重作用的结果。

表 2 根系和土壤理化性质与土壤可蚀性的相关性

Table 2 Relationships between root and soil physicochemical properties and soil erodibility

指标 Indicators	根长密度 Root length density/ (cm/cm ³)	根表面积密度 Root surface area density/(cm ² /cm ³)	土壤容重 Soil bulk density/ (g/cm ³)	土壤有机质 Soil organic matter /(g/kg)	土壤阳离子交换量 Soil cation exchange capacity/(cmol/kg)
土壤可蚀性 Soil erodibility/(s/m)	-0.699 **	-0.528 *	-0.432	-0.603 **	-0.745 **

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

观测期内,植物根系自身的动态变化规律表现为:根长密度和根表面积密度均表现出了先迅速增加后略有减小的趋势。秦嘉惠^[11]通过对南方的黄棕壤进行试验,也得到了一致的结果:在春季到夏季期间,白三叶、黑麦草、混播草的根系密度迅速升高,夏季以后各根系参数逐渐下降然后趋于稳定。这种变化规律与自然条件(温湿度等)的周期性有关^[35]。早春当土温达到 3—4℃ 以上时,根系开始生长,随着气温的不断回升以及降雨的增加,根系进入快速增长期,此时根系对土壤的“加筋锚固”作用达到高峰。之后,随着根系结构的逐渐成熟,根系的生长速度逐渐减缓以保证植被的正常发育,同时在土壤微生物及中小型动物的分解啃食作用下,根系生物量出现减小趋势,其减蚀作用也随之减弱。

观测期内,植物根系驱动的土壤理化性质的变化规律表现为:1) 植物根系的生长促进了土壤有机质含量的增加。黑麦草样地的土壤有机质含量从 1.65 g/kg 增至 2.74 g/kg,紫花苜蓿样地从 1.53 g/kg 增至 3.37 g/kg。Witzgall 等^[36]和 Wang 等^[37]通过相关试验也得到了一致的结果。植物根系可通过分泌或分解等生长代谢活动^[8,10]向土壤中输入大量有机物质,并减少分解和侵蚀的有机质损失,以此来增加土壤有机质的含量^[38];2) 植物根系的生长也增加了土壤阳离子交换量。黑麦草样地的土壤阳离子交换量从 9.24 cmol/kg 增至 15.54 cmol/kg,紫花苜蓿样地的土壤阳离子交换量从 8.63 cmol/kg 增至 15.91 cmol/kg。Saidian 等^[39]和范国艳等^[40]在试验中得到了相似的结果:根系生物量与土壤阳离子交换量有极显著相关性。这是因为根系的分泌物能产生可变电荷,并提供多样性阳离子替代位点,例如聚糖醛酸。聚糖醛酸的表面存在大量羧基,而羧基可以与土壤环境中的大量阳离子,例如 Fe^{3+} 和 Al^{3+} 进行交换,最终导致土壤中阳离子交换量的显著增加^[41]。植物根系驱动下土壤性状(土壤有机质和土壤阳离子交换量)的不断改善,可提升土壤的稳定性,缓解土壤侵蚀的发生和发展(表 2)。

此外,观测期内,对照地的土壤可蚀性也表现出了减小的趋势(图 8)。这主要是因为伴随对照地土壤环境的改善(土壤有机质和土壤阳离子交换量的增加),土壤结构的稳定性有所提高,土壤抵抗外部水力侵蚀的能力也随之增强。但由于对照地内无植物根系对土壤“加筋锚固”的强化作用,其土壤可蚀性的减小幅度有

限,仅为 6.13 s/m。这也从侧面反应了植物根系对土壤侵蚀强大的阻控作用。

3.2 植物根系影响土壤可蚀性的空间差异

植物根系对土壤可蚀性的影响具有显著的空间差异。本研究中,长芒草和铁杆蒿根系均在神木地区对土壤可蚀性的影响最大,相比对照地,长芒草和铁杆蒿样地的土壤可蚀性分别降低了 97.55% 和 98.54%,其次是安塞和永寿地区(图 9)。这种空间差异可能与不同环境下的植物根系生长情况以及土壤结构有关。

不同野外试验区,植物根系的生长情况存在显著差异。具体表现为:须根系植物长芒草在永寿和神木地区的根系密度(根长密度和根表面积密度)显著高于安塞地区;直根系植物铁杆蒿在永寿地区的根系密度显著高于神木和安塞地区($P < 0.05$)。这与不同地区的自然环境因素有关^[24-25]。例如,光照提供了植物生长所需的物质和能量来源、温度和降雨调控了植物的生理活动、土壤养分促进了植物器官的繁育等^[42]。本研究中,神木、安塞和永寿地区的年平均降水量分别为 441 mm、505 mm 和 602 mm,年平均温度分别为 8.5℃、8.8℃ 和 10.8℃,土壤阳离子交换量(土壤肥力的重要特征之一^[43])分别为 7.26 cmol/kg、10.50 cmol/kg 和 14.47 cmol/kg(对照地,图 7)。因此,相比而言,永寿地区的环境条件最适宜植物根系的生长,其次是神木地区,这与本试验的结果一致。

不同野外试验区,植物根系生长驱动的土壤理化性质变化具有明显差异。如图 7 所示:长芒草和铁杆蒿根系在永寿地区对土壤有机质的影响最大,分别增加了 43.63%(11.81 g/kg)和 97.23%(26.32 g/kg)(相比对照地);长芒草和铁杆蒿根系分别在神木和永寿地区对土壤阳离子交换量的影响最大,分别增加了 18.87%(4.41 cmol/kg)和 68.21%(9.87 cmol/kg)。由上述内容推测,植物根系应在永寿地区对土壤可蚀性的影响最为显著,但这与本试验的研究结果相悖。这是因为植物根系减蚀作用的表达,在很大程度上还依赖于土壤本身的结构特征和抗蚀性能。

本文中,不同野外试验区,对照地的土壤可蚀性具有显著差异,其大小关系表现为神木(13.05 s/m) > 安塞(2.36 s/m) > 永寿(0.27 s/m)(图 7)。崔晓薇等^[44]和周璟等^[45]通过对不同区域的可蚀性研究也得到了相似的结果。土壤可蚀性的空间差异是土壤一系列物理、化学的联合作用的结果。根据诺谟公式^[46]可知,土壤可蚀性与土壤有机质含量负相关,与土壤粉粒和砂粒百分含量的乘积正相关。本文中,神木地区有机质含量最低(图 7),粉粒和砂粒百分含量的乘积最高(表 1),导致其本身的抗侵蚀能力最弱。因此,植物根系在土壤抗蚀能力较弱的神木地区对土壤可蚀性的作用最为明显。

综合上述内容,植物根系对土壤可蚀性的影响存在明显的时空变化规律。通过对比之前的研究^[14,25,27,34]可以发现,植物阻控土壤侵蚀的这种规律普遍存在于不同的植物种类,即在时间上,随着植物根系数量的增多,土壤可蚀性先迅速下降后逐渐平稳;在空间上,植物根系在土壤抗侵蚀能力较弱的地区对土壤可蚀性的影响更为明显。但本试验中,植物根系调控土壤可蚀性的观测时间和空间范围相对有限,还不能精准、全面地反映植物根系影响土壤可蚀性的时空差异,因此,还需开展更多的科学研究加以佐证和补充。

4 结论

本研究以黄土高原为研究区域,以该区域典型的草本植物根系为研究对象,从时间和空间两个维度出发,研究植物根系影响土壤可蚀性的时空差异特征。主要结论如下:

(1) 植物根系的生长具有显著的时空差异性。人工种植试验中,在外部自然环境变化及根系自身生长规律影响下,黑麦草和紫花苜蓿的根长密度和根表面积密度在整个观测期呈现先快速增加后缓慢减小的趋势;野外采样试验中,在温度、降雨、土壤养分等自然条件综合作用下,长芒草的根系密度在永寿和神木地区显著高于安塞地区,铁杆蒿的根系密度在永寿地区显著高于神木和安塞地区($P < 0.05$)。

(2) 植被根系驱动的土壤理化性质变化具有显著的时空差异性。人工种植试验中,在植物根系的生长代谢活动影响下,观测期内黑麦草样地的土壤有机质显著从 1.65 g/kg 增至 2.74 g/kg,紫花苜蓿样地从 1.53 g/kg 增至 3.37 g/kg($P < 0.05$)。由于根系分泌物携带大量可变电荷,并能提供多样性阳离子替代位点,黑麦草

样地的土壤阳离子交换量显著从 9.24 cmol/kg 增至 15.54 cmol/kg, 紫花苜蓿样地从 8.63 cmol/kg 增至 15.91 cmol/kg ($P < 0.05$); 野外采样试验中, 植物根系在永寿地区对土壤有机质的影响最大, 相比对照地, 长芒草和铁杆蒿样地的土壤有机质含量分别增加了 43.63% 和 97.23%。长芒草和铁杆蒿根系分别在神木和永寿地区对土壤阳离子交换量的影响最大, 相比对照地, 分别增加了 18.87% 和 68.21%。

(3) 植物根系对土壤可蚀性的影响具显著的时空差异性。人工种植试验中, 由于植物根系及其驱动的土壤理化性质的动态变化, 黑麦草和紫花苜蓿样地的土壤可蚀性在观测初期快速减少, 减蚀率达到了 35.68%—54.40%, 之后逐渐趋于平稳; 野外采样试验中, 尽管植物根系在永寿地区的生长状况最佳, 但由于神木地区的土壤结构及抗侵蚀能力最弱, 长芒草和铁杆蒿根系均在神木地区的减蚀效果最明显。相比对照地, 长芒草和铁杆蒿样地的土壤可蚀性分别降低了 97.55% 和 98.54%。

参考文献 (References):

- [1] Li K K, Yang J Y, Wang J Y, Wang Z, Zeng Y, Borrelli P, Hubacek K, Hu Y C, Xu B D, Fang N F, Zeng C, Zhou Z H, Shi Z H. Human-altered soil loss dominates nearly half of water erosion in China but surges in agriculture-intensive areas. *One Earth*, 2024, 7(11): 2008-2018.
- [2] Wang B, Zhang G H, Shi Y Y, Li Z W, Shan Z J. Effects of near soil surface characteristics on the soil detachment process in a chronological series of vegetation restoration. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(4): 1213-1222.
- [3] 朱启明, 刘俊娥, 周正朝. 黄土高原土壤可蚀性因子空间分布特征及影响因素. *水土保持学报*, 2023, 37(6): 50-56, 64.
- [4] 周正朝, 上官周平. 土壤侵蚀模型研究综述. *中国水土保持科学*, 2004, 2(1): 52-56.
- [5] 李以恒, 唐科明, 陈柯霖, 吴怀雨, 康艺洋. 长江上游地区土壤理化性质对土壤侵蚀阻力的影响. *山地学报*, 2023, 41(4): 469-477.
- [6] Lacombe G, Valentin C, Souyafong P, de Rouw A, Souleuth B, Silvera N, Pierret A, Sengtaheuanghoung O, Ribolzi O. Linking crop structure, throughfall, soil surface conditions, runoff and soil detachment: 10 land uses analyzed in Northern Laos. *Science of the Total Environment*, 2018, 616: 1330-1338.
- [7] 王丹丹, 许海超, 单志杰, 秦伟. 黄土高原刺槐林地根系与枯落物对土壤侵蚀的影响. *水土保持学报*, 2023, 37(2): 83-89.
- [8] 刘均阳, 周正朝, 苏雪萌. 植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 267-273, 298.
- [9] Gyssels G, Poesen J. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28(4): 371-384.
- [10] Wang B, Zhang G H, Yang Y F, Li P P, Liu J X. Response of soil detachment capacity to plant root and soil properties in typical grasslands on the Loess Plateau. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 266: 68-75.
- [11] 秦嘉惠, 程谅, 曹丹妮, 郭忠录. 两种草本植物根系对土壤可蚀性的影响. *水土保持研究*, 2019, 26(2): 55-61.
- [12] 程谅, 占海歌, 郭忠录. 3 种草本植物根系对土壤抗蚀特性的响应. *草业科学*, 2019, 36(2): 284-294.
- [13] Wang J F, Yang Y F, Wang B, Liu G B, Li J M. Soil detachment caused by flowing water erosion in six typical herbaceous plant root systems on the Loess Plateau, China. *Biosystems Engineering*, 2022, 217: 56-67.
- [14] Liu L J, Zhang K D, Wang P F, Shi W B, Liu J J, Li Y. Effects of root traits on soil detachment capacity driven by farmland abandonment. *Catena*, 2024, 239: 107951.
- [15] Chen Y, Qi Y, Wei Y, Ning W H, He B H. Root traits and soil detachment in response to variable slope gradients in a representative purple-soil sloping grassland. *Catena*, 2024, 239: 107936.
- [16] Li Y, Yu H Q, Zhou N, Tian G, Poesen J, Zhang Z D. Linking fine root and understory vegetation to channel erosion in forested hillslopes of southwestern China. *Plant and Soil*, 2015, 389(1): 323-334.
- [17] Fan C C, Chen Y W. The effect of root architecture on the shearing resistance of root-permeated soils. *Ecological Engineering*, 2010, 36(6): 813-826.
- [18] Li Y P, Wang Y Q, Ma C, Zhang H L, Wang Y J, Song S S, Zhu J Q. Influence of the spatial layout of plant roots on slope stability. *Ecological Engineering*, 2016, 91: 477-486.
- [19] Hao H X, Qin J H, Sun Z X, Guo Z L, Wang J G. Erosion-reducing effects of plant roots during concentrated flow under contrasting textured soils. *Catena*, 2021, 203: 105378.
- [20] Chen L D, Wei W, Fu B, Lü Y. Soil and water conservation on the Loess Plateau in China: review and perspective. *Progress in Physical Geography*, 2007, 31: 389-403.
- [21] Li J J, Li Z, Lü Z M. Analysis of spatiotemporal variations in land use on the Loess Plateau of China during 1986-2010. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(11): 997.

- [22] 徐丽萍. 黄土高原地区植被恢复对气候的影响及其互动效应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [23] 郑淑霞, 上官周平. 黄土高原油松和刺槐叶片光合生理适应性比较. 应用生态学报, 2007, 18(1): 16-22.
- [24] 魏杰. 紫花苜蓿及其栽培技术. 畜牧与饲料科学, 2009, 30(3): 159-160.
- [25] Liu J Y, Yang Y N, Zheng Q W, Su X M, Zhou Z C. Response of soil aggregate stability and rill erodibility to soil electric field. *Catena*, 2022, 215: 106338.
- [26] Moustakidis I, Schilling K, Weber L. Soil texture and vegetation root density assessment on regulating erosion across river floodplains. *International Journal of Sediment Research*, 2024, 39(6): 855-867.
- [27] 覃森. 黄土区典型草被生长过程中根系对土壤抗冲性影响的实验研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2016.
- [28] 张岩松. 沙地营造樟子松林后土壤物理性质的变化及其影响因子[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2019.
- [29] Wang J G, Feng S Y, Ni S M, Wen H, Cai C F, Guo Z L. Soil detachment by overland flow on hillslopes with permanent gullies in the Granite area of south East China. *Catena*, 2019, 183: 104235.
- [30] Li Q, Liu G B, Zhang Z, Tuo D F, Bai R R, Qiao F F. Relative contribution of root physical enlacing and biochemical exudates to soil erosion resistance in the Loess soil. *Catena*, 2017, 153: 61-65.
- [31] Wang C G, Li H R, Xue S B, Ma B, Shang Y Z, Li Z B. How root and soil properties affect soil detachment capacity in different grass-shrub plots: a flume experiment. *Catena*, 2023, 229: 107221.
- [32] Zi R Y, Zhao L S, Fang Q, Qian X H, Fang F Y, Fan C H. Path analysis of the effects of hydraulic conditions, soil properties and plant roots on the soil detachment capacity of Karst hillslopes. *Catena*, 2023, 228: 107177.
- [33] 邓羽松, 李双喜, 丁树文, 蔡崇法, 夏栋, 刘丹露. 鄂东南崩岗不同层次土壤分形特征及抗蚀性研究. 长江流域资源与环境, 2016, 25(01): 63-70.
- [34] 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. *Soil and Tillage Research*, 2019, 195: 104420.
- [35] 王琪, 容丽. 环境影响下植物根系的生长分布特征研究进展. 贵阳学院学报: 自然科学版, 2015, 10(4): 61-66.
- [36] Witzgall K, Steiner F A, Hesse B D, Riveras-Muñoz N, Rodríguez V, Teixeira P P C, Li M, Osés R, Seguel O, Seitz S, Wagner D, Scholten T, Buegger F, Angst G, Mueller C W. Living and decaying roots as regulators of soil aggregation and organic matter formation—from the rhizosphere to the detritosphere. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024, 197: 109503.
- [37] Wang B, Zhang G H, Yang Y F, Li P P, Liu J X. The effects of varied soil properties induced by natural grassland succession on the process of soil detachment. *Catena*, 2018, 166: 192-199.
- [38] Ghafoor A, Poepplau C, Kätterer T. Fate of straw-and root-derived carbon in a Swedish agricultural soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53(2): 257-267.
- [39] Saidian M, Godinez L J, Prasad M. Effect of clay and organic matter on nitrogen adsorption specific surface area and cation exchange capacity in shales (mudrocks). *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 33: 1095-1106.
- [40] 范国艳, 张静妮, 张永生, 李刚, 王琦, 杨殿林. 放牧对贝加尔针茅草原植被根系分布和土壤理化特征的影响. 生态学杂志, 2010, 29(9): 1715-1721.
- [41] 郭山. Cd 胁迫对凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)根系分泌及体内小分子有机物代谢的影响研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [42] 张继澍. 植物生理学. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [43] Liu J F, Wang Z L, Hu F N, Xu C Y, Ma R T, Zhao S W. Soil organic matter and silt contents determine soil particle surface electrochemical properties across a long-term natural restoration grassland. *Catena*, 2020, 190: 104526.
- [44] 崔晓薇, 张喜风, 梁水明. 祁连山综合土壤可蚀性指数与环境因子的关联性. 山地学报, 2024, 42(1): 14-26.
- [45] 周璟, 张旭东, 何丹, 周金星, 王中建. 小流域土壤可蚀性的空间变异及其在不同土地类型下的比较. 土壤通报, 2011, 42(3): 715-720.
- [46] 翟子宁, 苏备. 土壤可蚀性研究进展. 土壤通报, 2016, 47(1): 253-256.