

# 不同放牧强度下荒漠草原植物群落 土壤的分离能力

赵文迪<sup>1,2</sup>, 杨振奇<sup>1,2</sup>, 郭建英<sup>1,2</sup>, 秦富仓<sup>2,3</sup>, 田甜<sup>1</sup>, 郭志文<sup>1,2</sup>

(1.水利部 牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2.内蒙古农业大学  
沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 3.内蒙古自治区林业科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010)

**摘要:** [目的] 研究不同放牧强度下草原植物群落根系性状对土壤分离能力的影响以及根系缠绕—固结效应和根系分泌物黏结效应对土壤抗侵蚀能力的相对贡献, 为荒漠草原水土流失治理提供科学依据。[方法] 以内蒙古希拉穆仁荒漠草原为研究对象, 采用土壤分离冲刷试验, 系统测定不放牧、轻度放牧、中度放牧及重度放牧 4 种处理条件下的土壤分离能力, 并计算根长密度等根系参数。[结果] 随放牧强度增加, 禾本科植物植被盖度和生物量降低, 0~1 mm 径级范围内的细根含量明显减少; 重度放牧强度下的土壤分离能力为不放牧样地的 2.5~3.1 倍; 根长密度可表征土壤的分离能力, 当根长密度  $>0.4 \text{ cm/cm}^3$  且根重密度  $>0.6 \text{ kg/m}^3$  时土壤分离能力显著降低; 根系缠绕—固结效应和根系分泌物黏结效应在抑制土壤侵蚀中的贡献率比例为 0.65:0.35。[结论] 放牧强度显著影响了荒漠草原的土壤分离能力, 根系的缠绕—固结效应对土壤分离能力的降低起到了关键作用。

**关键词:** 放牧强度; 荒漠草原区; 土壤分离能力; 根系性状; 根系总效应

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2025)03-0060-09

**中图分类号:** S157.1, S812, S152.4

**文献参数:** 赵文迪, 杨振奇, 郭建英, 等. 不同放牧强度下荒漠草原植物群落土壤的分离能力[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 60-68. Zhao Wendi, Yang Zhenqi, Guo Jianying, et al. Soil detachment capacity of plant communities in desert steppe under different grazing intensities [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 60-68. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.017; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.03.017.

## Soil detachment capacity of plant communities in desert steppe under different grazing intensities

Zhao Wendi<sup>1,2</sup>, Yang Zhenqi<sup>1,2</sup>, Guo Jianying<sup>1,2</sup>, Qin Fucang<sup>2,3</sup>, Tian Tian<sup>1</sup>, Guo Zhiwen<sup>1,2</sup>

(1.Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China; 2.College of Desert Control Science And Engineering Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 3.Inner Mongolia Autonomous of Forestry Sciences, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of root traits of grassland plant communities on the soil detachment capacity and the relative contribution of root winding-consolidation and root exudate bonding effects on soil erosion resistance under different grazing intensities were analyzed in order to provide a scientific basis for soil and water conservation efforts in a desert steppe. [Methods] The Xilamuren desert steppe in Inner Mongolia Autonomous Region was evaluated as the research object. Soil detachment scouring experiments were conducted to systematically measure the soil detachment capacity under four treatments: no grazing, light grazing, moderate grazing, and heavy grazing. Root parameters such as the root length and density were calculated. [Results] As the grazing intensity increased, the vegetation coverage and biomass of gramineous plants decreased, and the content of fine roots (0—1 mm diameter) significantly decreased. The soil detachment capacity under heavy grazing

收稿日期: 2024-12-31

修回日期: 2025-02-03

采用日期: 2025-02-07

资助项目: 国家自然科学基金项目“典型草原区放牧驱动下植被格局与根系对土壤水蚀的影响机制”(42177347); 中国水科院基本科研业务费项目(MK0145B022021); 内蒙古自治区科技计划项目(2024KYPT0004); 中国水科院基本科研业务费项目(MK110145B00012024)

第一作者: 赵文迪(2001—), 女(回族), 内蒙古自治区赤峰市人, 硕士研究生, 研究方向为森林水土保持。Email: 2407301830@qq.com。

通信作者: 杨振奇(1993—), 男(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 高级工程师, 主要从事水土保持方面的研究。Email: 843296578@qq.com。

intensity was 2.5—3.1 folds that of no grazing plots. The soil detachment capacity could be characterized based on the root length density; when the root length density exceeded  $0.4 \text{ cm/cm}^3$  and root weight density exceeded  $0.6 \text{ kg/m}^3$ , the soil detachment capacity significantly decreased. The contribution rates of the root entanglement-consolidation effects and root exudate binding effects on soil erosion inhibition were 0.65: 0.35. [Conclusion] Grazing intensity significantly influenced the soil detachment capacity of the desert steppe, with the root entanglement-consolidation effect playing a key role in this outcome.

**Keywords: grazing intensity; desert steppe area; soil detachment ability; root trait; total root effect**

荒漠草原是草原生态系统中最为脆弱的一种类型,其抗干扰能力较弱,干扰后恢复困难甚至不可逆转,极易受到破坏<sup>[1]</sup>。在荒漠草原区,土壤多以栗钙土为主,地表植被对维持区域生态系统服务功能至关重要<sup>[2]</sup>。然而,过度放牧会导致植被退化、土壤裸露和肥力下降,进而加剧水土流失,严重制约了区域可持续发展<sup>[3]</sup>。

在放牧草地生态系统中,家畜、植被和土壤是一个相互影响、相互制约的有机整体,土壤分离能力与放牧强度、植被根系性状等因素变化息息相关,而植物根系是改善土壤侵蚀环境的重要因素,对植物养分的吸收和团结土壤颗粒有着重要意义。在放牧过程中,家畜通过践踏、采食等活动直接影响土壤分离能力<sup>[4-5]</sup>,土壤分离能力是土壤在受到水力侵蚀的作用下土壤颗粒逐渐被分离土体的过程<sup>[6]</sup>,它是土壤侵蚀的第一阶段,可以直接决定水土流失程度的强弱<sup>[7]</sup>。土壤具有极强的抗压能力但几乎不具备抗拉能力,而植被根系在土壤中可对土体进行物理性穿插,使其缠绕固结,对土壤产生物理加固作用,直接提高土壤的抗侵蚀能力,从而显著影响土壤分离能力<sup>[8-9]</sup>,证实了植被的根系在预防水土流失中起到关键作用<sup>[10-11]</sup>,是维持草地生态系统稳定的重要因素。在已有的相关研究中,虽然多围绕着放牧程度对地表植被及土壤理化性质的影响这两方面展开,但对植被根系影响土壤抗侵蚀能力的研究也取得了一定进展。Wang Xiaodan等<sup>[12]</sup>发现植物根系通过其缠绕—固结效应和分泌物黏结效应,显著增强了土壤结构的稳定性和抗冲性,从而减小土壤侵蚀,根系的存在可以提升土壤孔隙度,增加土壤入渗速率,控制地表径流的形成;此外,卫智军<sup>[13]</sup>通过研究得出根系分泌物作为土壤团粒的胶结剂,配合须根的穿插和缠绕,使土壤中大粒级水稳性团聚体数量增加,提高了土壤的孔隙度和孔隙的稳定性,从而提高了土壤饱和渗透系数。这些研究均表明根系在防治土壤侵蚀方面的作用往往要明显强于植被地上部分。因此,在探讨放牧与土壤分离能力的关系时,必须充分考虑植被根系的作用机制及其对土壤产生物理加固作用的综合影响。

内蒙古希拉穆仁草原属于典型的荒漠草原生态系统,且该地区在降雨后易形成坡面径流,导致水力侵蚀。鉴于此,本研究以希拉穆仁荒漠草原为研究对象,通过开展不同放牧强度处理下的土壤分离冲刷试验,深入分析根系总效应与土壤分离能力之间的关系。旨在揭示放牧影响下荒漠草原土壤分离能力的变化规律,以及植物根系在其中的具体影响,为荒漠草原水土流失治理及放牧管理策略的制定提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

放牧试验小区位于内蒙古希拉穆仁草原的阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站放牧试验区内。该区地势起伏较小,海拔平均高度为1 600 m。气候属半干旱中温带大陆性气候,夏季短暂炎热,冬季寒冷干燥,早晚气温差异大;年际变化大,年日照时数达3 097 h,降水主要集中在夏季7—9月,年均降水量相对较低,为281 mm;试验区土壤主要为栗钙土,土壤质地主要为砂质壤土,该地区风蚀和水蚀的交替作用造成地表水土流失和地表颗粒粗化,使土壤质地变得较为粗糙,土壤养分含量相对较低,但由于其腐殖质层的存在,仍具有一定的肥力,能够为草原植被提供基本的养分需求,0—5 cm土层的有机碳含量(有机碳含量可大致反映有机质含量)在15.43~18.19 g/kg。土层有效厚度为4—50 cm,40 cm以下为钙积层;植物群落主要为克氏针茅(*Stipa krylovii*)、羊草(*Leymus chinensis*)等。

参照《家庭牧场草地放牧强度分级标准》(GB/T 34754—2017),将试验样地划分为重度放牧(HG)、中度放牧(MG)、轻度放牧(LG)和不放牧(CK)4种类型。将围栏放牧区划分为3个区组,即3次重复,共12个放牧小区,各放牧小区面积统一为100 m<sup>2</sup>(长10 m,宽10 m),每个小区均用1.5 m高的铁丝网围栏围挡,并设有小门以便于控制羊群数量。放牧情况依次为重度放牧(3只羊/hm<sup>2</sup>)、中度放牧(2只羊/hm<sup>2</sup>)、轻度放牧(1只羊/hm<sup>2</sup>)和不放牧(0只羊/hm<sup>2</sup>),所用羊只均为体型相近的成年绵羊。于2018年开始,每年

5月进行放牧试验,到11月底结束,并在2024年7月进行土壤分离冲刷试验土壤样品的采集。

## 1.2 研究方法

采用矩形钢槽(长30 cm,宽20 cm,高10 cm)在放牧小区内采集土壤原状土,取样前,用剪刀将地面上的植被齐地刈割,用软刷子去除地面垃圾。试验样地内共12个放牧小区,每个放牧小区采集8个土壤原状土,共采集96个土样。取其中的48块土样作为活根土壤土样,将其余的48块土样搁置两个月,待根系全部枯死后(刈割后所剩余叶片部分变得干枯、脆弱,用手触碰容易折断,失去原有的弹性和光泽,呈棕褐色或灰白色)将其设置为死根土壤土样。无根土壤土样在4种放牧强度试验样地中无植被生长的裸地部分各采集4块,共采集16块。此外,在试验样地放牧小区外铲除表层50 cm土体并削平,将获得的栗钙土母质土样作为土壤性状初始条件,采集其原状土样共4块。以上共计116块土壤土样均用于土壤分离冲刷试验。

依据希拉穆仁镇的地形条件和单次最大降雨量,试验将坡度设置为15°,流量分别设置5,10,15,20 L/min。冲刷试验装置主要包括储水箱、供水系统、调节阀、稳流箱、盛样桶和冲刷槽,冲刷槽的尺寸为长200 cm×宽30 cm×深20 cm。试验段为方形卡槽,长30 cm,宽20 cm,高10 cm,位于冲刷槽中部,距冲刷段尾部30 cm。矩形钢槽底部为可抽拉式,以便取放土壤原状土。进行冲刷试验前,将原状土浸泡在水中使其达到饱和状态,取出后静置12 h,去除重力水。将原状土放置在冲刷槽中,调整冲刷槽的坡度以及水流速度进行冲刷试验。冲刷开始时用秒表进行计时,并在冲刷过程中利用尺子观测土样的被冲刷深度,平均流速用高锰酸钾溶液染色水流进行测定,当冲刷最深处达2 cm时停止冲刷,记录试验结束时间,该时间为土样的冲刷时间(s)<sup>[14]</sup>。冲刷试验结束后,用湿洗法将根系从土壤中分离出,晾干后将根系逐一放在亚克力板上,使用11000 XL扫描仪在1 200 dpi下进行彩色扫描,利用Win RHIZO Pro2012b软件将根系进行统计分析,获得根长和根表面积。同时,该软件在分析过程中会将根系按照径级进行分类,具体分为0~1,1~2,2~3,3~4 mm和>4 mm共5种径级类型。扫描后,将根放置在60 °C的烘箱中干燥48 h,以获得根的干重。

1.2.1 植被调查 为确定试验区的主要植被的物种类型,在2024年植被生长的最旺季节8月,对轻度、中度、重度放牧和不放牧样地进行植被调查。在围栏放牧的12个区组中自北向南方向分别布设1条

100 m的植被调查样带,在每个放牧小区内沿植被调查样带设置10个1 m×1 m的样方,每个样方间隔10 m,共计120个样方。测量并计算每个样方内各个物种的盖度、生物量信息。

1.2.2 土壤分离能力及根系参数的计算 土壤分离能力计算公式为:

$$D_c = \frac{W_0 - W_a}{A \cdot t} \quad (1)$$

式中: $D_c$ 为土壤分离能力(kg/m<sup>2</sup>·s); $W_0$ 为冲刷前的干重(kg); $W_a$ 为冲刷后的干重(kg); $A$ 为冲刷面积(m<sup>2</sup>); $t$ 为冲刷时间(s)。

根系参数的计算公式为:

$$RD = \frac{MD}{V} \quad (2)$$

$$RLD = \frac{RL}{V} \quad (3)$$

$$RSAD = \frac{RSA}{V} \quad (4)$$

式中:RD为根重密度;MD为活根干根质量(kg);RLD为根长密度;RL为扫描仪测得根的长度(cm);RSAD为根表面积密度;RSA为扫描仪测得根的表面积(cm<sup>2</sup>); $V$ 为样品箱的体积(m<sup>3</sup>)。

1.2.3 根系效应相关指数计算 根系总效应即植物根系抑制土壤侵蚀的总效应,包括根系缠绕—固结作用和黏结作用。根系缠绕—固结效应即植物根系缠绕—固结作用抑制土壤侵蚀的效应。根系分泌物黏结效应即植物根系分泌物黏结作用抑制土壤侵蚀的效应。

根系总效应计算公式为:

$$Y_{TER} = \frac{D_{C,PML} - D_{C,TER}}{D_{C,PML}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $Y_{TER}$ 为根系总效应; $D_{C,PML}$ 为栗钙土母质土样的土壤分离能力; $D_{C,TER}$ 为活根土样的土壤分离能力。

根系缠绕—固结效应计算公式为:

$$Y_{ERB} = \frac{D_{C,NR} - D_{C,DR}}{D_{C,PML}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $Y_{ERB}$ 为根系缠绕—固结效应; $D_{C,NR}$ 为无根土样土壤分离能力; $D_{C,DR}$ 为死根土样土壤分离能力。

根系分泌物黏结效应:

$$Y_{ERE} = \frac{D_{C,DR} - D_{C,TER}}{D_{C,PML}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: $Y_{ERE}$ 为根系分泌物黏结效应。

## 1.3 数据处理与分析

利用Excel软件进行数据统计分析,为确保结果的准确性和相互关联性,采用SPSS软件进行单因素方差分析,用于比较不同放牧强度以及冲刷流速对

土壤分离能力的显著性差异,  $p < 0.05$  表明对土壤分离能力有显著影响; 相关性分析采用皮尔逊相关分析法, 分析根系性状与土壤分离能力之间的相关性,  $p < 0.05$  表明对土壤分离能力有显著相关,  $p < 0.01$  表明对土壤分离能力有极显著相关; 利用 Win RHIZO Pro2012b 软件将根系进行统计分析; 在制图方面使用 Origin 2022 软件进行制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同放牧强度下植物群落特征及根系径级分布特征

2.1.1 不同放牧强度下植物群落特征 由表1—2可知, 以不放牧样地的调查结果为准, 确定试验区的植被优势种为克氏针茅(相对盖度为32.91%, 生物量为26.96 g), 因此本试验所讨论的植被根系主体为克氏针茅的根系。同时分析可知, 放牧影响了植被盖度及生物量, 随着放牧强度的增加, 原有的优势物种如禾本科植物(克氏针茅、糙隐子草)的植被盖度和生物量逐渐降低, 而草地退化的代表性植物银灰旋花和一些耐牧或适口性较差的植物(猪毛菜、冰草)则逐渐占据优势。

表1 不同放牧强度样地植物群落相对盖度信息

Table 1 Relative coverage information of plant communities with different grazing intensities %

植物名	放牧强度			
	不放牧 (CK)	轻度 (LG)	中度 (MG)	重度 (HG)
克氏针茅	32.91	28.66	26.87	16.31
糙隐子草	19.09	11.54	0.86	1.10
猪毛菜	16.42	26.85	33.16	24.60
木地肤	14.25	7.01	5.94	2.28
阿尔泰狗娃花	4.31	0.42	0.86	1.27
羊草	1.54	0.71	6.04	3.47
无芒隐子草	9.02	17.41	10.70	15.30
银灰旋花	1.23	1.34	3.32	11.41
冰草	0.72	0.63	1.44	3.21

注: 表中植物学名分别为糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*), 猪毛菜(*Kali collinum*), 木地肤(*Kochia prostrata*), 阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*), 无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*), 银灰旋花(*Convolvulus ammannii*), 冰草(*Agropyron cristatum*)。

2.1.2 不同放牧强度下根系径级分布的差异 通过不同放牧强度下不同径级的根系长度、表面积来表示不同的径级组成情况(图1)。将根系径级以1 mm为间隙, 共分为5个等级。在0~1 mm径级范围内, 根系长度排序为: CK>LG>MG>HG, 根表面积排

序为: CK>LG>MG>HG; 在1~2 mm径级范围内, 根系长度和根表面积排序与0~1 mm径级范围排序一致。在2~3 mm径级范围内, 根系长度与根表面积排序则为: CK>MG>LG>HG。在3~4 mm径级范围内, 根系长度、根表面积同样表现为: CK>LG>MG>HG。当径级范围>4 mm时, 根系长度和根表面积表现为: LG>CK>MG>HG。本研究结果显示根系长度和根表面积的变化趋势基本一致, 表明根系长度减少的同时通常伴随着根表面积的减少。总体上来看, 0~1 mm径级范围内的根系长度和根表面积的比例最高, 平均所占比例大于85%。重度放牧样地与其他样地相比, 细根含量明显低于其他放牧样地, 不放牧样地和轻度放牧样地的细根含量普遍较高, 说明家畜的啃食与踩踏明显减少了地下细根的含量, 使其径级组配发生变化。

表2 不同放牧强度样地植物群落生物量信息

Table 2 Biomass information of plant community in sample plot with different grazing intensities g

植 被	放牧强度			
	不放牧 (CK)	轻度 (LG)	中度 (MG)	重度 (HG)
克氏针茅	26.96	21.49	12.67	5.18
糙隐子草	19.48	16.07	2.20	2.00
猪毛菜	22.76	27.22	36.83	9.50
木地肤	24.53	9.57	5.96	1.34
阿尔泰狗娃花	8.70	1.03	1.75	4.46
羊草	4.90	5.62	5.34	2.05
无芒隐子草	5.46	15.78	6.43	8.82
银灰旋花	2.13	4.20	3.27	5.13
冰草	1.44	1.60	1.70	4.22

### 2.2 不同放牧强度下的土壤分离能力及其影响因素分析

2.2.1 放牧强度对土壤分离能力的影响 由图2可知, 同一冲刷流速下, 随着放牧强度的增加土壤分离能力呈增加趋势, 土壤分离能力在冲刷流速为20 L/min的重度放牧试验区内达到峰值; 在5~15 L/min的冲刷流速下, 放牧强度对土壤分离能力有显著影响( $p < 0.05$ ), 而在20 L/min的冲刷流速下, 放牧强度对土壤分离能力无显著影响( $p > 0.05$ )。同一放牧强度下, 土壤分离能力随冲刷流速的增加而增大; 在LG和HG放牧强度下, 冲刷流速对土壤分离能力影响显著( $p < 0.05$ ); 在CK和MG放牧强度下, 冲刷流速对土壤分离能力无显著影响( $p > 0.05$ )。在冲刷流速和坡度条件相同的情况下, 重度放牧的土壤分离能力可达不放牧样地的2.5~3.1倍。

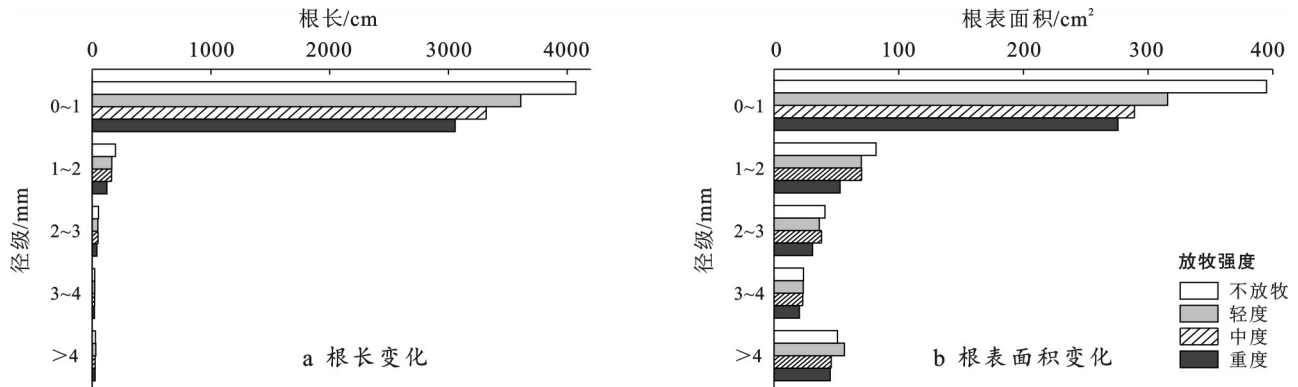
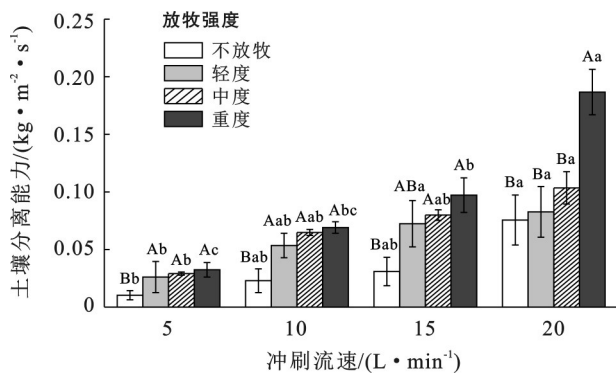


图1 不同放牧强度下根长和根表面积随径级分布的变化

Fig.1 Distribution changes of root length and root surface area with different diameter class under different grazing intensities



注:不同大写字母表示同一流速下不同放牧强度间差异显著( $p < 0.05$ );不同小写字母表示同一放牧强度下不同流速间差异显著( $p < 0.05$ )。

图2 不同放牧强度对土壤分离能力的影响

Fig.2 Effects of different grazing intensities on soil detachment capacity

2.2.2 不同放牧强度下根系性状与土壤分离能力的关系 由图3可得,将根表面积密度、根长密度、根重密度与土壤分离能力进行非线性拟合,4种放牧强度下3种根系性状与土壤分离能力均呈负相关关系,总体表现为随着根表面积密度、根长密度、根重密度的增加土壤分离能力减小。在CK与MG放牧强度下,根表面积密度 $< 0.06 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ 时,土壤分离能力变化显著,呈指数函数递减,表现为土壤极易受到侵蚀;根表面积密度 $> 0.06 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ 时,土壤分离能力的变化趋于稳定,递减趋势减缓。在CK, MG和HG放牧强度下,根长密度 $< 0.4 \text{ cm}/\text{cm}^3$ 且根重密度 $< 0.6 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时土壤分离能力变化显著,极易受到侵蚀;而当根长密度 $> 0.4 \text{ cm}/\text{cm}^3$ 且根重密度 $> 0.6 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时土壤分离能力的变化减缓,并且逐渐稳定在 $0.03 \sim 0.04 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,侵蚀程度减缓。在LG放牧强度下,随着根表面积密度、根长密度、根重密度的增加,土壤分离能力呈逐渐减少的趋势。其中MG放牧强度下根长密度和根表面积密度与土壤分离能力的拟

合程度最好, $R^2$ 分别为0.92,0.91;LG放牧强度下根重密度与土壤分离能力的拟合程度最差, $R^2$ 为0.30,其次是HG放牧强度下根重密度和根表面积密度与土壤分离能力的拟合程度, $R^2$ 分别为0.35,0.39。

2.2.3 根系性状与土壤分离能力的相关性分析 由图4可知,根长密度与土壤分离能力呈极显著负相关( $p < 0.01$ ),根表面积密度与土壤分离能力呈显著负相关( $p < 0.05$ ),根重密度与土壤分离能力呈负相关关系。在本研究中,根长密度可以更好地表征土壤分离能力。

## 2.3 不同放牧强度下根系在抑制土壤侵蚀中的作用

2.3.1 不同放牧强度下根系总效应与土壤侵蚀产沙量之间的关系 土壤侵蚀产沙量与根系总效应之间整体上呈线性负相关关系[ $Y_{\text{TER}} = 103.92 - 76.91x$  ( $R^2 = 0.68$ )],表现为随着土壤侵蚀产沙量的增加根系总效应呈逐渐减少的趋势(图5)。在CK放牧强度下,土壤侵蚀产沙量多在 $0.2 \sim 0.6 \text{ kg}$ ,根系总效应数值多在70%~80%;在LG放牧强度下,土壤侵蚀产沙量多在 $0.5 \sim 0.9 \text{ kg}$ ,根系总效应数值多在50%~70%;在MG放牧强度下,土壤侵蚀产沙量多在 $0.9 \sim 1.2 \text{ kg}$ ,根系总效应数值多在20%~40%;在HG放牧强度下,土壤侵蚀产沙量多在 $1.2 \sim 1.5 \text{ kg}$ ,根系总效应数值多在5%~20%,总体表现为随着放牧强度的增加,根系总效应减少,土壤侵蚀产沙量增大。

2.3.2 根系缠绕—固结效应及根系分泌物黏结效应在抑制土壤侵蚀中的贡献 由表3可知,根系缠绕—固结效应及根系分泌物黏结效应的相对贡献率平均为65.39%和34.61%,即0.65:0.35。4种放牧强度下的平均根总效应分别为73.70%,46.01%,37.31%和24.97%;其中MG的根系缠绕—固结效应贡献率比例最高,为0.73:0.27;HG的根系缠绕—固结效应贡献率所占比例最低,为0.63:0.37。

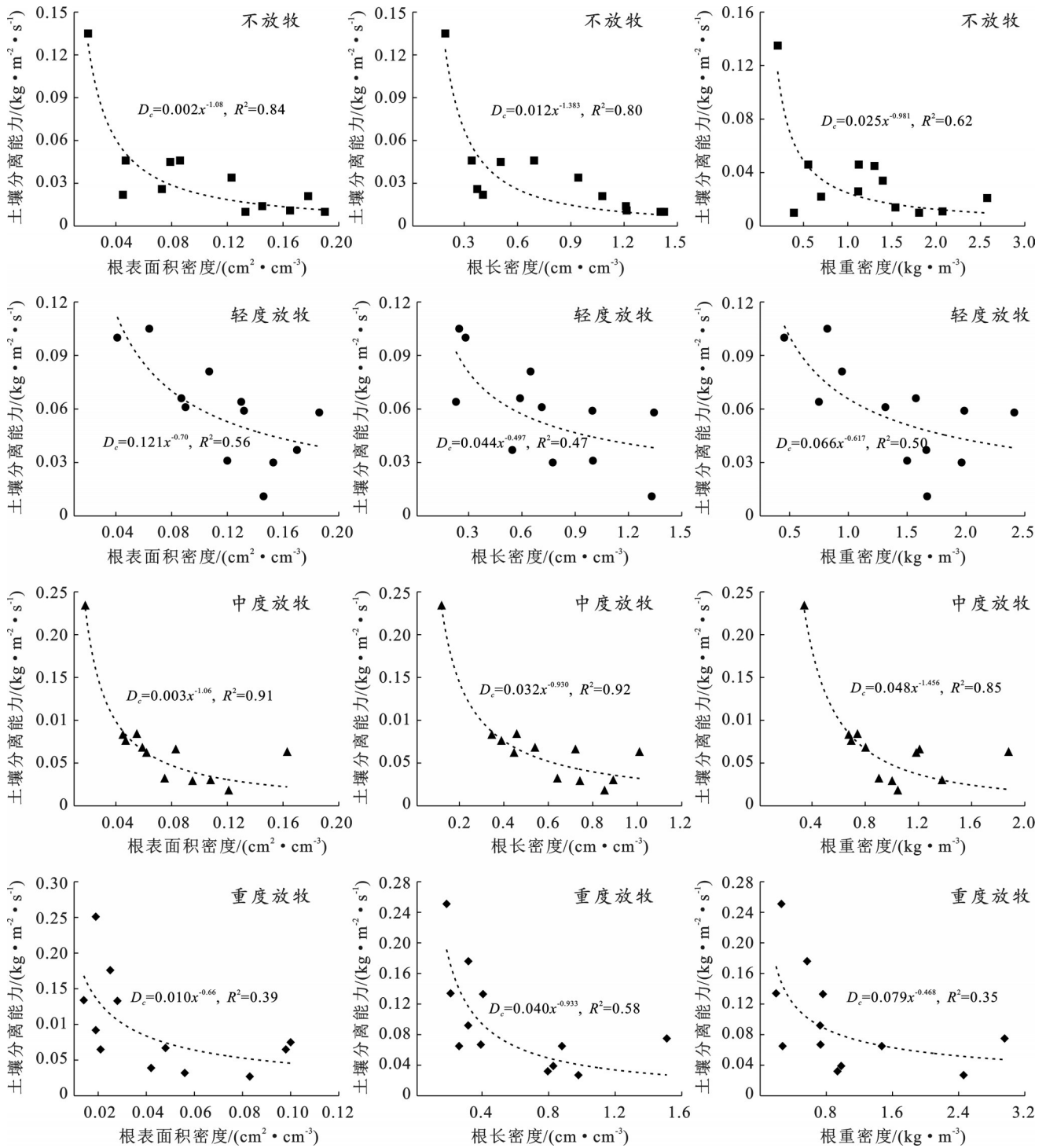


图 3 不同放牧强度下根系性状与土壤分离能力的关系

Fig.3 Relationship between root traits and soil detachment capacity under different grazing intensities

### 3 讨论

#### 3.1 放牧强度对植被及根系茎级分布的影响

牧过程中,牛羊可以通过选择性采食、踩踏、卧息及排泄物归还等途径直接或间接地改变草地植被的盖度和地上生物量,进而使草地生态系统的结构和功能发生变化,最终影响整个草地生态系统的稳定性和健康发展<sup>[15]</sup>。已有研究<sup>[16]</sup>证实,随放牧强度

的增加,植被因家畜的踩踏和采食而受损,导致植被叶片减少,盖度降低,从而限制了植被的正常生长。在本研究中,克氏针茅这一主要植被盖度相对百分比分别为 32.91%,28.66%,26.87%和 16.31%,表现为重度放牧的植被覆盖度急剧降低,这一结果与杨雅楠等<sup>[17]</sup>在阴山北麓的荒漠草原得出的试验结果一致。此外,当放牧程度超过重度放牧时,可以明显干扰甚至改变植物的群落结构,表现为禾本科植物的

生长受到抑制,毒杂草则会侵占其他植物的生存空间,成为该地的优势种<sup>[18]</sup>,说明随放牧强度增大,草地退化的代表性植物银灰旋花和猪毛菜、冰草等植物的盖度呈增加趋势。

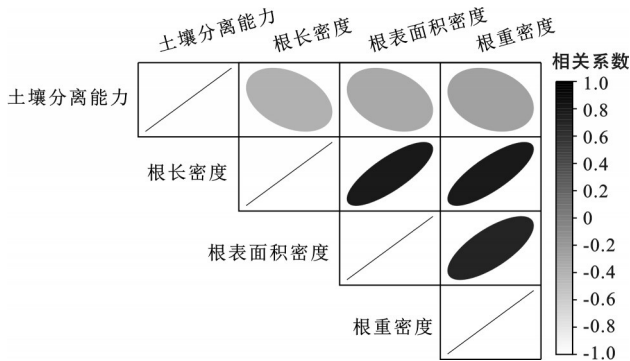


图 4 根系性状与土壤分离能力的相关性分析

Fig.4 Relationship between root weight density and soil detachment capacity

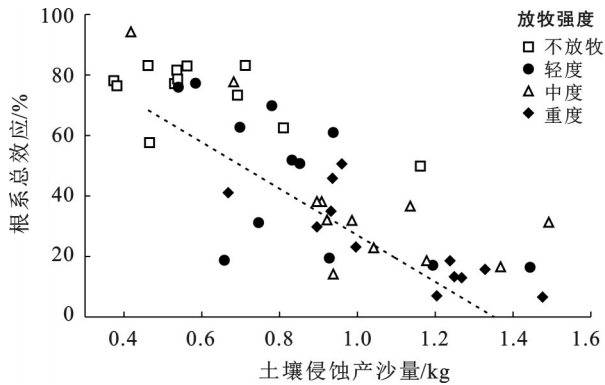


图 5 土壤侵蚀产沙量与根系总效应之间的关系

Fig.5 Relationship between sediment yield of soil erosion and total effect of root system

表 3 根系缠绕—固结效应及根系分泌物黏结效应的贡献率  
Table 3 Contribution rate of root entanglement and consolidation effects and root secretion bonding effect %

项目	不放牧 (CK)	轻度放牧 (LG)	中度放牧 (MG)	重度放牧 (HG)
缠绕—固结效应	47.70	30.35	27.31	15.81
分泌物黏结效应	26.00	15.66	10.00	9.16
根总效应	73.70	46.01	37.31	24.97

植物的根系是改善土壤侵蚀环境的重要因素,对植物养分的吸收和团结土壤颗粒都有着重要意义。而放牧会大量减少植物的地上部分和凋落物的量,导致植被盖度降低,裸地面积增大,养分含量降低,从而抑制根系生产<sup>[19]</sup>。本研究结果显示,随着放牧强度的增大,0~1 mm 径级范围内的细根含量明显减少,原因是地上部分是植物生产自身生长所需营养物质的关键器官,当地上部分减少时,向地下分配

的营养物质随之减少,造成地下生物量的下降<sup>[20]</sup>,且轻度放牧、中度放牧和重度放牧均会抑制根系生产,平均降低根系生产量的 15%,21% 及 35%<sup>[21]</sup>。

### 3.2 根系性状对土壤分离能力的影响

在本研究中,根长密度、根表面积密度和根重密度这 3 种根系性状与土壤分离能力之间呈负相关关系,试验通过相关性分析发现根系性状中的根长密度对土壤分离能力的影响高于根表面积密度和根重密度。王晨光等<sup>[22]</sup>在不同草灌复合样地的土壤分离能力研究中也得出了相同结论,即根长密度是影响土壤分离能力的主要因素。根长密度可以更好地表征土壤分离能力的一方面原因可能是根系长度能直接反映根系的生产量,根长密度越大其根系产量往往也越大;另一方面可能是根长密度在一定程度上反映了根系在土壤中的缠绕固结情况——土壤具有极强的抗压能力但几乎不具备抗拉能力,而植被根系在土壤中可对土体进行物理性穿插,使其缠绕固结,对土壤产生物理加固作用,直接提高土壤的抗侵蚀能力,从而显著影响土壤分离能力<sup>[9]</sup>。目前,究竟用哪一个根系特征参数可以更好地表征土壤分离能力,目前学者们的研究结论还不一致,郁耀闯等<sup>[23]</sup>认为根重密度是衡量根系强化土壤抗侵蚀性能的可靠参数,Wang Bing<sup>[9]</sup>则认为使用根表面积密度来表征土壤分离能力效果最佳。目前关于这一方向的深入研究较少,仍需进一步探究。

### 3.3 放牧强度对根系总效应的影响

本研究结果显示,根系的缠绕—固结效应最高可占根系总效应的 73.20%,平均为 65.39%,根系缠绕—固结效应和根系分泌物黏结效应的相对贡献率平均为 0.65:0.35。这一研究结果与 Li Qiang 等<sup>[24]</sup>的结论相似,即根系的缠绕—固结效应最高可达 81.95%,根系缠绕—固结效应和根系分泌物黏结效应的相对贡献率平均为 0.71:0.29,且随着放牧强度的增大,根系逐渐减少,根系的缠绕—固结效应呈递减趋势。在本试验中,随着放牧强度的增加,根系分泌物黏结效应的相对贡献略有下降,进一步表明根系的缠绕—固结效应是增强土壤抗侵蚀能力的主要原因,Mamo M 等<sup>[25]</sup>以及 Wang Bing 等<sup>[26]</sup>的研究发现,有根土壤的土壤分离能力比无根土壤的土壤分离能力减少了 50%~66%,这些结果均证实植物根系在增强土壤抵抗力和保护土壤免受流水冲刷方面有着重要作用。

## 4 结论

(1) 随着放牧强度的增加,地表禾本科植物的植

被盖度和生物量降低,0~1 mm 径级范围内的细根含量明显减少;重度放牧会使草地退化的代表性植物占据优势,使草地生态系统向退化方向发展,符合“中度干扰假说”这一理论。

(2) 本研究结果表明,放牧强度越大,土壤侵蚀越严重,重度放牧的土壤分离能力为不放牧样地的2.5~3.1倍,这与“中度干扰假说”并不完全一致;根长密度、根表面积密度和根重密度均与土壤分离能力呈负相关关系,表现为土壤分离能力随三者的增大而减小,其中根长密度可以更好地表征土壤的分离能力;当根长密度 $>0.4 \text{ cm/cm}^3$ 且根重密度 $>0.6 \text{ kg/m}^3$ 时土壤分离能力会受到抑制。

(3) 放牧强度的增加导致了根系总效应的减小,重度放牧样地的根系总效应仅有不放牧样地根系总效应的33%。根系缠绕—固结效应和根系分泌物黏结效应在抑制土壤侵蚀中贡献率之比为0.65:0.35。轻度放牧下的根系缠绕—固结效应(66%)与分泌物黏结效应(34%)的协同比例最接近这一均值,基于此,建议将放牧强度控制在轻度放牧(1只羊/hm<sup>2</sup>)以下。

#### 参考文献 (References)

- [1] 韩芳,牛建明,刘朋涛,等.气候变化对内蒙古荒漠草原牧草气候生产力的影响[J].中国草地学报,2010,32(5):57-65.  
Han Fang, Niu Jianming, Liu Pengtao, et al. Impact of climate change on forage potential climatic productivity in desert steppe in Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Grassland, 2010,32(5):57-65.
- [2] 耿林昇,李红丽,董智,等.放牧对希拉穆仁草原土壤粒度特征的影响[J].干旱区资源与环境,2021,35(12):121-126.  
Geng Linsheng, Li Hongli, Dong Zhi, et al. Distribution characteristics of soil particle size in Xilamuren grassland with different grazing intensities [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021,35(12):121-126.
- [3] 史志华,刘前进,张含玉,等.近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J].土壤学报,2020,57(5):1117-1127.  
Shi Zhihua, Liu Qianjin, Zhang Hanyu, et al. Study on soil erosion and conservation in the past 10 years: Progress and prospects [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020,57(5):1117-1127.
- [4] 常晶晶,徐丽,薛晶月,等.放牧强度对若尔盖高寒草甸土壤有机质和微生物的影响[J].草业学报,2018,27(1):22-31.  
Chang Jingjing, Xu Li, Xue Jingyue, et al. Effects of grazing intensity on soil organic matter and microorganisms in the Zoige alpine meadow [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018,27(1):22-31.
- [5] Smith R S, Shiel R S, Millward D, et al. Effects of sheep stocking on the plant community and agricultural characteristics of upland *Anthoxanthum odoratum*-*Geranium sylvaticum* meadow in Northern England [J]. Grass and Forage Science, 2017,72(3):502-515.
- [6] 卢进波,李子健.水力侵蚀的土壤分离能力影响因素述评[J].水土保持应用技术,2022(2):40-42.  
Lu Jinbo, Li Zijian. Review on influencing factors of soil detachment capacity of hydraulic erosion [J]. Technology of Soil and Water Conservation, 2022(2):40-42.
- [7] 张晓艳.黄土区草地植被恢复对土壤抗分离的影响及其作用机制研究[D].陕西西安:陕西师范大学,2015.  
Zhang Xiaoyan. Study on the effect of grassland vegetation restoration on soil anti-separation and its mechanism in loess area [D]. Xi'an, Shaanxi: Shaanxi Normal University, 2015.
- [8] 李家明.黄土高原典型植被根系特征及其对土壤分离过程的影响[D].北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2022.  
Li Jiaming. Root characteristics of typical vegetation on the Loess Plateau and their effects on soil detachment process [D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [9] Wang Bing, Zhang Guanghui. Quantifying the binding and bonding effects of plant roots on soil detachment by overland flow in 10 typical grasslands on the Loess Plateau [J]. Soil Science Society of America Journal, 2017,81(6):1567-1576.
- [10] 田培,毛梦培,潘成忠.植被调控水土流失机制研究进展及展望[J].中国水土保持科学(中英文),2024,22(1):131-140.  
Tian Pei, Mao Mengpei, Pan Chengzhong. Research progress and prospect of vegetation control mechanism of soil and water loss [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024,22(1):131-140.
- [11] 王通.植被改善土壤侵蚀和水分流失效应分析[J].海河水利,2023(7):8-10.  
Wang Tong. Vegetation effects on soil erosion and water loss mitigation [J]. Haihe Water Resources, 2023(7):8-10.
- [12] Wang Xiaodan, Yan Yan, Cao Yingzi. Impact of historic grazing on steppe soils on the northern Tibetan Plateau [J]. Plant and Soil, 2012,354(1):173-183.
- [13] 卫智军,韩国栋,杨静,等.短花针茅荒漠草原植物群落特征对不同载畜率水平的响应[J].中国草地,2000,(6):2-6.  
Wei Zhijun, Han Guodong, Yang Jing, et al. The response of *Stipa breviflora* community to stocking rate

- [J]. Grassland of China, 2000(6):1-5.
- [14] 田甜. 放牧对荒漠草原区根土复合体土壤分离能力的影响[D]. 内蒙古呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.  
Tian Tian. Effects of grazing on soil separation capacity of root soil complex in desert grassland [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.
- [15] 刘玉, 常小峰, 田福平, 等. 放牧对草地群落与土壤特征的影响[J]. 西北植物学报, 2016, 36(12):2524-2532.  
Liu Yu, Chang Xiaofeng, Tian Fuping, et al. Effects of grazing on community and soil characteristics in the semi-arid grassland [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2016, 36(12):2524-2532.
- [16] 张峰, 杨阳, 乔莽, 等. 利用方式对大针茅草原植物多样性、功能性状及地上生物量的影响[J]. 中国草地学报, 2019, 41(1):1-8.  
Zhang Feng, Yang Yang, Qiao Ji, et al. Effects of utilization ways on species diversity, functional traits and aboveground biomass in *Stipa grandis* steppe [J]. Chinese Journal of Grassland, 2019, 41(1):1-8.
- [17] 杨雅楠, 杨振奇, 郭建英. 放牧强度对荒漠草原植被、土壤及其侵蚀特征的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4):66-73.  
Yang Yanan, Yang Zhenqi, Guo Jianying. Effects of grazing intensity on features of vegetation, soil and its erosion in a steppe desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4):66-73.
- [18] 仁青吉, 武高林, 任国华. 放牧强度对青藏高原东部高寒草甸植物群落特征的影响[J]. 草业学报, 2009, 18(5):256-261.  
Ren Qingji, Wu Gaolin, Ren Guohua. Effect of grazing intensity on characteristics of alpine meadow communities in the eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(5):256-261.
- [19] Milchunas D. Measuring Roots: An updated Approach [M], Berlin: springerlink, 2012:303-339.
- [20] 陈浩. 放牧对青藏高原草地植被群落特征及土壤理化特性的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.  
Chen Hao. Response of vegetation community characteristic and soil physico-chemical properties grazing intensity on *Kobresia pygmaea* meadow of Qinghai-Tibet Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2012.
- [21] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 等. 放牧胁迫下沙质草地植被的受损过程[J]. 生态学报, 2003, 23(8):1505-1511.  
Zhao Halin, Zhao Xueyong, Zhang Tonghui, et al. Study on damaged process of the vegetation under grazing stress in sandy grassland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(8):1505-1511.
- [22] 王晨光, 马波, 李占斌, 等. 不同草灌复合样地对土壤分离能力的影响[J]. 土壤通报, 2024, 55(2):341-350.  
Wang Chenguang, Ma Bo, Li Zhanbin, et al. Effect of different grass and shrub compound sample plots on soil detachment ability [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(2):341-350.
- [23] 郁耀闯, 王长燕. 黄土丘陵区须根系作物地土壤分离季节变化研究[J]. 土壤, 2016, 48(5):1015-1021.  
Yu Yaochuang, Wang Changyan. Seasonal changes of soil detachment capacity under two typical fibrous crops in hilly region of Loess Plateau of China [J]. Soils, 2016, 48(5):1015-1021.
- [24] Li Qiang, Liu Guobin, Zhang Zheng, et al. Relative contribution of root physical enlacing and biochemical exudates to soil erosion resistance in the loess soil [J]. Catena, 2017, 153:61-65.
- [25] Mamo M, Bubenzer G D. Detachment rate, soil erodibility, and soil strength as influenced by living plant roots: part: I. Laboratory study [J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(5):1167.
- [26] Wang Bing, Zhang Guanghui, Shi Yangyang, et al. Effects of near soil surface characteristics on the soil detachment process in a chronological series of vegetation restoration [J]. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79(4):1213-1222.