水保监测与应用技术

排土场典型植被恢复过程对土壤可蚀性的影响

段 旭[1], 王崇宵[1], 陈创创[1], 杨自康[1], 石鲁豫[2], 闫汉洋[2], 王 博[3], 屈 进[4]

(1.西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054;
2.陕西省建筑材料工业设计研究院有限公司, 陕西 西安 710000;
3.西北综合勘察设计研究院, 陕西 西安 710003; 4.金堆城钼业股份有限公司, 陕西 渭南 714101)

摘 要: [目的] 探究露天排土场不同恢复年限草本植物根系对土壤团聚体稳定性和抗侵蚀能力的影响,为矿区生态环境恢复和水土保持效益评价提供科学依据。[方法] 选取高羊茅、紫花苜蓿为研究对象,以荒草地为对照,通过Le_Bissonna法模拟暴雨侵蚀扰动情况下对恢复不同年限(1,3,5 a)和不同深度(0—10,10—20,20—30 cm)的2种草本植物进行处理,对直径R>0.2 mm团聚体含量($W_{R>0.2}$)、平均重量直径(MWD)、平均几何直径(GMD)和土壤可蚀性因子K值进行测定。分析紫花苜蓿和高羊茅土壤团聚体组成和稳定性以及在不同年限、不同土层间根系与土壤可蚀性的关系,并进一步探究其影响因素。[结果] ①5年生紫花苜蓿在表层(0—10 cm)的根横截面积比(RAR)较1年生增加了16.03倍,高羊茅增加了5.6倍,且紫花苜蓿深层(20—30 cm)根生物量密度(RMD)的增幅(16.56倍)高于高羊茅(5.5倍)。②两种植被根系影响下的土壤在快速湿润(FW)扰动模式下不同恢复年限团聚体稳定性指标MWD和GMD总体表现为:5 a>3 a>1 a>荒草地,在土层深度上表现为:0—10 cm>10—20 cm>20—30 cm。土壤可蚀性因子K值则有相反的趋势。③对于反映大团聚体比例情况的$W_{R>0.2}$指标,紫花苜蓿根系生长5 a后的20—30 cm深度范围土层$W_{R>0.2}$较1年生和3年生分别增加25.46%和7.93%,而高羊茅根系生长区仅0—10 cm深度范围内大团聚体比例存在小幅度提高。[结论] 对于近乎重构性质的排土场边坡浅层土体,直根型紫花苜蓿的生长区内土壤团聚体稳定性指标$W_{R>0.2}$,MWD和GMD与RAR相关性明显大于须根型的高羊茅。紫花苜蓿根系有利于大团聚体的形成和增强深层土壤的稳定性;高羊茅通过表层密集的须根物理缠绕减少团聚体颗粒的分散,使其表层土壤抗侵蚀能力优于紫花苜蓿。

关键词: 排土场; 根系参数; 土壤团聚体; 土壤可蚀性; 恢复年限

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)03-0126-11 **中图分类号:** S157.1

文献参数: 段旭, 王崇宵, 陈创创, 等.排土场典型植被恢复过程对土壤可蚀性的影响[J].水土保持通报, 2026,46(3):126-136. Duan Xu, Wang Chongxiao, Chen Chuangchuang, et al. Effects of typical vegetation restoration on soil erodibility at waste dumps [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(3): 126-136.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.016 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.03.016**

Effects of typical vegetation restoration on soil erodibility at waste dumps

Duan Xu[1], Wang Chongxiao[1], Chen Chuangchuang[1],
Yang Zikang[1], Shi Luyu[2], Yan Hanyang[2], Wang Bo[3], Qu Jin[4]

(1.*School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*; 2.*Shaanxi Construction Materials Industry Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi* 710000, *China*; 3.*Northwest Research Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an, Shaanxi* 710003, *China*; 4.*Jinduicheng Molybdenum Co., Ltd., Weinan, Shaanxi* 714101, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of herbaceous plant root systems with different restoration durations in open-pit waste dumps on soil aggregate stability and erosion resistance were investigated in order to provide a scientific basis for ecological restoration and assessment of soil and water conservation benefits in mining areas. [Methods]

收稿日期: 2025-09-21 **修回日期:** 2025-12-13 **采用日期:** 2025-12-15

资助项目: 陕西省重点研发计划项目"关键核心技术攻关:基于脱硫石膏胶结的煤基固废充填材料研发与绿色应用技术研究"(2024CY2-GJHX-80); 国家自然科学基金项目"基于工后地下水分场再平衡过程的超深黄土填方体沉降变形机理研究"(41902299)

第一作者: 段旭(1991—),男(汉族),陕西省西安市人,博士,副教授,主要从事矿山生态修复与地质灾害防控方面的研究。Email: duanxutim@163.com。

Festuca elata and *Medicago sativa* were selected as the study subjects, with fallow grassland serving as the control. The Le_Bissonna method was applied to simulate heavy rainfall-induced erosion disturbance on two herbaceous plants with different restoration durations (1, 3, 5 years) and different soil depths (0—10, 10—20, 20—30 cm). The content of aggregates with diameter $R > 0.2$ mm ($W_{R>0.2}$), mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), and soil erodibility factor K were measured. The soil aggregate composition and stability of *M. sativa* and *F. elata* were analyzed, along with the relationship of root systems across different restoration durations and soil layers with soil erodibility, and the influencing factors were further explored. [Results] ① The root area ratio (RAR) of 5-year-old *M. sativa* in the surface soil layer (0—10 cm) increased by 16.03 times compared with 1-year-old plants, while that of *F. elata* increased by 5.6 times. Furthermore, the increase in root biomass density (RMD) of *M. sativa* in the deep soil layer (20—30 cm) (16.56 times) was higher than that of *F. elata* (5.5 times). ② Under the influence of root systems of the two vegetation types, soil aggregate stability indicators MWD and GMD under the rapid wetting (FW) disturbance mode of different restoration years generally followed the order: 5 years > 3 years > 1 year > fallow grassland. At different soil depths, the order was 0—10 cm > 10—20 cm > 20—30 cm. Conversely, the soil erodibility factor K exhibited the opposite trend. ③ For the $W_{R>0.2}$ indicator reflecting the proportion of large aggregates, the $W_{R>0.2}$ value in the 20—30 cm soil layer after 5 years of *M. sativa* root growth increased by 25.46% and 7.93% compared with 1-year-old and 3-year-old plants, respectively. In contrast, only a slight increase in the proportion of large aggregates was observed within the 0—10 cm soil layer in the root growth zone of *F. elata*. [Conclusion] For shallow soil layers of dump slopes with near-reconstructed properties, the soil aggregate stability indicators $W_{R>0.2}$, MWD, and GMD in the growth zone of taproot-type *M. sativa* show significantly stronger correlations with RAR than those of fibrous-rooted *F. elata*. The roots of *M. sativa* facilitate the formation of large aggregates and enhance the stability of deep soil, while *F. elata* reduces the dispersion of aggregate particles through dense fibrous roots in the surface layer that physically entangle, resulting in stronger erosion resistance of surface soil than *M. sativa*.

Keywords: waste dump; root parameters; soil aggregates; soil erodibility; restoration durations

对于排土场顶部的植生土层,其原始土体在地质历史中风化、沉积形成的孔隙、层理等原生结构在挖掘、运输与堆排过程中已遭到破坏。在排土场堆排至设计高度后,铺设于矿渣顶部用于复垦与生态环境修复的土层,形成“重构土壤”,其土壤结构的稳定性成为影响排土场整体水土流失状况的关键。土壤团聚体是反映土壤结构稳定性的基本单元,其尺寸、组分的演化可作为评价土壤结构稳定性的指标[1-2]。土壤团聚体是指土壤颗粒通过各种自然力量(土壤有机质和根系压力等)黏结在一起形成较大的颗粒,如通常可以分为大团聚体(直径大于0.25 mm)和微团聚体(直径小于0.25 mm)。土壤有机质是团聚体形成的重要胶结物,有利于促进团聚体的形成和稳定[3-4]。植物根系通过捆绑、分泌、腐化等方式,改善土壤理化性质,增强土壤团聚体稳定性,提升土壤的抗侵蚀能力[5-6]。土壤团聚体的稳定性是指在外力作用下或受到外部环境变化影响时保持原有形态的能力。主要通过湿筛法、干筛法和崩解试验法3类试验,结合团聚体稳定性指标量化反映土壤可蚀性。干筛法仅测试团聚体抗机械破碎能力,忽略了水力分散这一关键因素,不能真实反映土壤的抗侵蚀能力,崩解试验法不能区分不同粒径团聚体的抗分散能力,崩解程度依赖人工判断。而湿筛法可以通过浸泡、振荡来模拟降雨冲击、径流冲刷的复合水力作用,可获得 $W_{R>0.25}$,MWD和GMD等核心指标来反映土壤团聚体稳定性和土壤可蚀性[7]。

排土场顶部的“重构土壤”,由于原始结构的缺失,根系的作用成为土壤结构与可蚀性演化的主要驱动力之一[8-9]。物理网结是根系对于土壤团粒的最直观作用形式,通过压缩和缠绕等方式,将根周围细小的颗粒聚集并形成较大颗粒[10]。同时,根系分泌物作为胶结物质,可作为土粒团聚的胶结剂,配合须根的穿插和缠结,能够提高水稳性大团聚体的比例[11]。除了对土体的胶结作用,在根系分泌物中,根源有机物还可以在团聚体周围形成疏水涂层,降低土壤的湿润性,减缓湿润速率,从而降低土壤的可蚀性[12]。根系对土壤水分的吸收可以使根周围土壤含水量降低,水分能够通过根系通道快速地储存在地下深层,进而增加土壤的稳定性。土壤侵蚀对植物根系的响应结果与根系本身的结构密切相关[13]。通常,土壤中的根系越多,根土间的接触面积越大,根系覆盖的范围也越大,因此根系的构型与土壤团聚

体有着密切的关系。相较于直根系，须根系可以更好地抵抗细沟侵蚀[14]，较多的斜向根能够更好地抵抗土壤剪切破坏和维护边坡稳定[15]。关于根系参数的定量分析，秦嘉惠等[16]、程谅等[17]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；Hudek等[18]通过测定不同草本植物的根长密度与土壤团聚体稳定性之间的关系，发现草本植物根系生长发育更有利于土壤团聚体的稳定。同时，土壤团聚体稳定性也受植被恢复年限的影响，An Shaoshan等[19]研究发现随着植被恢复年限的增加可以显著提高>0.25 mm团聚体的含量，且在草地恢复7 a后土壤团聚体稳定性维持在较高的稳定状态。韩金丹等[20]通过研究不同林龄刺槐林对土壤团聚体稳定性与可蚀性影响的差异发现，$W_{R>0.25}$，MWD和GMD随刺槐林龄增加显著增大。综上所述，植物恢复过程中，根系的动态生长是影响排土场土壤团聚体稳定性的重要因素，进而成为影响排土场土壤可蚀性的驱动因素。为深入揭示不同根系构型特征（直根、须根）植物在生长过程中如何影响排土场土壤团聚体的稳定性，本文以金堆钼矿分阶段封顶复垦的排土场作为试验研究区，选取植被恢复1～5 a的排土场为研究对象，采集不同生长时间的紫花苜蓿（直根系）、高羊茅（须根系）及其周围土壤，研究不同恢复年限两类植物的根系构型参数发展，分析其对地下0—30 cm土层土壤团聚体结构的影响。探究排土场中，高羊茅和紫花苜蓿2种植物生长时间、根系垂直分布特征参数、土壤团聚体结构特征和稳定性之间相关性，旨在为矿区生态修复和水土流失治理提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及取样

研究区域位于陕西省渭南市华州区金堆镇（109°40′12″—109°55′36″E，34°05′20″—34°18′45″N），东秦岭山系南缘，属于关中东部区域。属暖温带半湿润大陆性季风气候，年降水量为600～800 mm，年平均气温为12.0～14.5 ℃。经团队野外现场调查，选取植被自然恢复过程中不同阶段的高羊茅和紫花苜蓿为样地，本研究根系材料主要取自西川、北沟、新北沟排土场，复垦时间分别为2019年（5 a），2021年（3 a），2023年（1 a）。

每个排土场边坡对不同植被类型分别选取3个采样区，3个排土场共选取18个采样区（5 m×5 m），采用五点取样法对每个区域的中间位置和4个对角线方向分别进行取样，每个采样点分为3个深度取样，分别是0—10 cm，10—20 cm和20—30 cm，每个深度取100 g土样（表1），将每个采样区同一土层深度的土样混合后作为代表性土样装入铝盒带回实验室。一部分用于土壤基本理化性质的测定（表2），一部分清除其中的植物根系、碎石块，并用手将大块沿纹理轻轻地掰成小块，自然风干后用于土壤团聚体的测定。在取土点50 cm范围内选取生长良好，根系发达，土质均匀的根系土层，进行整根取样，每个采样点至少采集3株完整的植物根系，将取回的植物根系，经过稳定的流水冲刷以去除根系表面的土壤颗粒，保留其完整性和原貌，用湿巾包裹并每隔2 h喷水保证根系活性，以供后续根系扫描试验使用。

表1 不同恢复年限排土场采样点基本信息

Table 1 Basic information of sampling sites at waste dumps with different restoration durations

排土场	排土场恢复年限/a	海拔/m	植物类型	样点编号		
				1	2	3
新北沟	1	1 515	高羊茅	E109°57′42″，N34°20′31″	E109°57′42″，N34°20′31″	E109°57′42″，N34°20′30″
			紫花苜蓿	E109°57′41″，N34°20′31″	E109°57′42″，N34°20′32″	E109°57′42″，N34°20′31″
北沟	3	1 487	高羊茅	E109°58′11″，N34°20′21″	E109°58′11″，N34°20′22″	E109°58′11″，N34°20′23″
			紫花苜蓿	E109°57′11″，N34°20′21″	E109°58′11″，N34°20′21″	E109°58′11″，N34°20′22″
西川	5	1 440	高羊茅	E109°56′44″，N34°19′54″	E109°56′44″，N34°19′55″	E109°56′44″，N34°19′56″
			紫花苜蓿	E109°56′44″，N34°19′55″	E109°55′44″，N34°19′55″	E109°56′44″，N34°19′54″

1.2 根系扫描特征参数试验

根系参数的测定。将土壤放置在0.5 mm的筛网上反复冲洗，洗出土壤中的所有的根系且无杂物，将洗净后的根系通过ScanWizard EZ根系扫描仪获取根系图像，进而利用根系分析软件DJ-GX02（最小分辨率为0.005 mm，误差小于5%），分析总根长L，总表面积S，平均直径D等参数，最后将根系装入培养皿在65 ℃条件下，烘干72 h，获得根系生物量。计算

得到根横截面积比RAR(mm²/cm²)、根表面积密度比RSAD(mm²/cm³)、根长密度比RLD(mm/cm³)及根生物量密度比RMD(mg/cm³),计算公式为

$$RAR=\frac{A_r}{A_s}\times 100\%=\frac{\sum_{i=1}^{n}\pi r_i^2}{a\cdot b}\times 100\% \quad (1)$$

$$RLD=\frac{RL}{V_s}\times 100\% \quad (2)$$

$$RMD=\frac{RM}{V_s}\times 100\%=\frac{G_1+G_2+\cdots G_n}{a\cdot b\cdot h}\times 100\% \quad (3)$$

$$RSAD=\frac{RSA}{V_s}\times 100\% \quad (4)$$

式中:A_r为横断面上所有根系面积之和(mm²);A_s为土体的横断面积(mm²);RL,RM和RSA分别为根系总长度(mm),全部根系质量(mg)和根系总表面积(mm²);V_s为土壤的总体积(mm³);a,b分别为土体宽度和长度(mm);n为所研究的横断面上所有根系;G为研究范围内所有根系称量质量之和(mg);h为土体高度(cm)。

表 2　各排土场土壤基本理化性质

Table 2　Basic soil physicochemical properties of each dump

排土场	土层深度/cm	机械组成/%			容重/(g·cm⁻³)	含水率/%	pH值
		黏粒	粉粒	砂粒			
新北沟	0—10	35.62	55.24	9.14	1.35	7.12	7.24
	10—20	33.46	53.86	12.68	1.42	7.69	7.35
	20—30	32.19	49.51	18.30	1.50	10.15	7.59
北 沟	0—10	33.94	56.08	9.98	1.32	8.16	6.83
	10—20	32.02	53.16	14.82	1.38	7.94	7.29
	20—30	29.84	50.41	19.75	1.45	11.29	7.44
西 川	0—10	34.10	53.13	12.77	1.29	7.42	7.05
	10—20	32.42	50.85	16.73	1.35	8.45	7.19
	20—30	31.32	49.53	19.15	1.48	10.67	7.65

1.3　土壤团聚体稳定性的测定

Le_Bissonna(LB)法作为一种新的土壤团聚体稳定性测定方法,根据不同团聚体崩解的作用力采用不同处理,从不同的处理结果中更为清晰地表现出土壤团粒解体的状态和原因。本研究选用FW处理法模拟暴雨侵蚀情况下土壤团聚体的破坏,水分快速浸入土壤中,在土壤表面形成水膜,少部分水渗入土体中破坏土体颗粒的连接效果,水分对土壤的挤压作用导致土体孔隙中的气体压强不断增大直至团聚体结构发生崩解,对团聚体造成破坏。采用干筛法筛出3～5 mm的团聚体为测定样品,用铝盒装好后放于恒温鼓风烘箱中,设置温度为40 ℃,烘干至恒重,保证样品初始含水量一致,将5～10 g土壤团聚体快速倒入装有50 ml去离子水的烧杯中,静置10 min后用吸管吸干水分,用乙醇溶液将团聚体洗入预先浸在乙醇中的0.05 mm铜筛,均匀用力将套筛在乙醇中螺旋振荡5次,之后将各筛上的团聚体洗入蒸发皿内,在40 ℃烘干48 h,冷却后到室温称重,之后将处理后的团聚体土样依次过2,1,0.5,0.2,0.1和0.05 mm的土壤套筛,并对各粒级团聚体进行称重,精确值0.000 1 g。在试验过程中注意细心操作,每组做2组平行试验,在误差较小的情况下取均值作为试验结果。

1.4　土壤可蚀性指标参数的测定

(1)平均重量直径(MWD)和平均几何直径(GMD)。土壤团聚体平均重量直径是指一定粒级土壤团聚体的重量百分比与这一粒级平均直径的乘积,计算公式为

$$MWD=\sum_{i=1}^{n}x_i\cdot w_i \quad (5)$$

式中:x_i为筛分出来的任一大小范围团聚体的平均直径(mm);w_i为对应x_i团聚体百分含量(%)。

土壤团聚体平均几何直径是指一定粒级的重量乘以这一粒级平均直径的对数,所有粒级上述乘积之和除以样品的总重,计算公式为

$$GMD=\exp\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}w_i\ln\overline{X_i}}{\sum_{i=1}^{n}w_i}\right) \quad (6)$$

MWD,GMD均为反映土壤团聚体大小分布状况的常用指标,MWD和GMD值越大,表示土壤团聚体平均粒径团聚度越高,说明其抗侵蚀能力越强。

(2)粒径$R>0.2$ mm土壤团聚体含量的测定。土壤团聚体水稳定性是反映土壤团聚体抗蚀性参数的重要指标,其中,确定水稳定性采用湿筛方法,试

验操作中并无0.25 mm孔筛，因此选用0.2 mm孔筛进行替代。

计算公式为

$$R_{>0.2}=\frac{>0.2\ \text{mm团聚体总质量}}{\text{未筛分土壤总质量}}\times 100\% \quad (7)$$

（3）土壤团聚体可蚀性因子K值。土壤可蚀性因子K值是反映土壤抗蚀能力强弱的重要参量，在国际上有多种计算土壤可蚀性因子K值的公式，由于公式(8)计算简单且自变量易测定，在国内外学者的研究中广泛应用。因此本文选用该公式进行可蚀性因子K值的计算。

$$K=7.954\times\left\{0.001\,7+0.049\,4+\exp\left[-0.5\times\left(\frac{\lg \text{GMD}+1.675}{0.698\,6}\right)^{2}\right]\right\} \quad (8)$$

1.5 数据分析

用Excel 2016和SPSS 27.0软件进行数据整理及统计分析，用单因素方差分析法对同一因素不同水平间的显著性差异进行分析；用Pearson法分析土壤团聚体稳定性指标与根系参数和环境因子的相关性。绘图均采用Origin 2022软件。

2 结果与分析

2.1 根系形态特征与参数分析

通过根系扫描仪对紫花苜蓿和高羊茅根系生长过程中各个年限的形态特征进行扫描，初步得到根系形态特征的生长规律（图1）。由图1可知，紫花苜蓿和高羊茅2种植物根系的共同点是随着时间的增加，单株植物根系的主根逐渐变长增粗，向土层更深处不断生长，由主根分生更多侧根，侧根分生出更多毛细须根，因此几何形态也趋于复杂。不同点在于紫花苜蓿为典型的直根系草本，主根优势明显，随着年限的增加，根系由细向粗转变，根系向深层土壤延伸。根系随土层加深逐渐变细，从主根根茎处发出数条侧根，侧根上有少量细根分布，细根多分布于0—20 cm土层，随土层的深入逐渐减少，发达的主根具有良好的锚固作用，分布的细根有助于吸收土壤浅层的水分和养分。高羊茅则是以须根为主，没有明显的主根，须根有明显的向地性生长特性，须根上分布大量水平或近水平的细根，细根较为柔软纤细，根系整体分布较为均匀，众多根系交织在一起，形成密集的根系网络，可有效增强表层土壤的抗侵蚀能力。

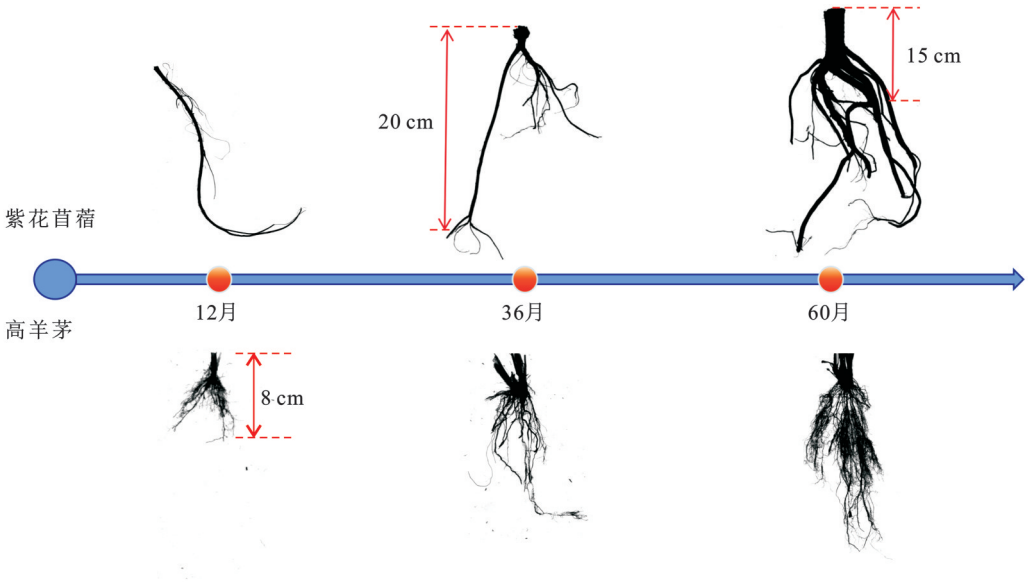


图1 根系生长时间轴

Fig.1 Root growth timeline

对表3数据分析可知，紫花苜蓿与高羊茅的根系参数在不同年份间呈现显著差异。紫花苜蓿的RAR随种植年限增加显著升高，5年生达到42.06±2.04^{b}，较1年生（2.57±0.84^{b}）和3年生（13.28±1.25^{a}）分别增长约16.03倍和3.20倍（$p<0.05$），其RLD和RSAD同样随年限递增，5年生分别达50.12±5.21^{a}和36.81±6.12^{a}，显著高于其他年份（$p<0.05$），表明随着种植年限的增加，紫花苜蓿根系的空间扩展能力增强。相比之下，高羊茅根系参数变化趋势不同，其RAR和RLD虽逐年上升，但增幅较小，5年生较1年

生仅增长5.8和1.7倍,明显低于紫花苜蓿,且根生物量始终低于紫花苜蓿。此外,高羊茅平均直径显著低于紫花苜蓿,其根系以须根为主,空间占据依赖数量而非单根粗度。

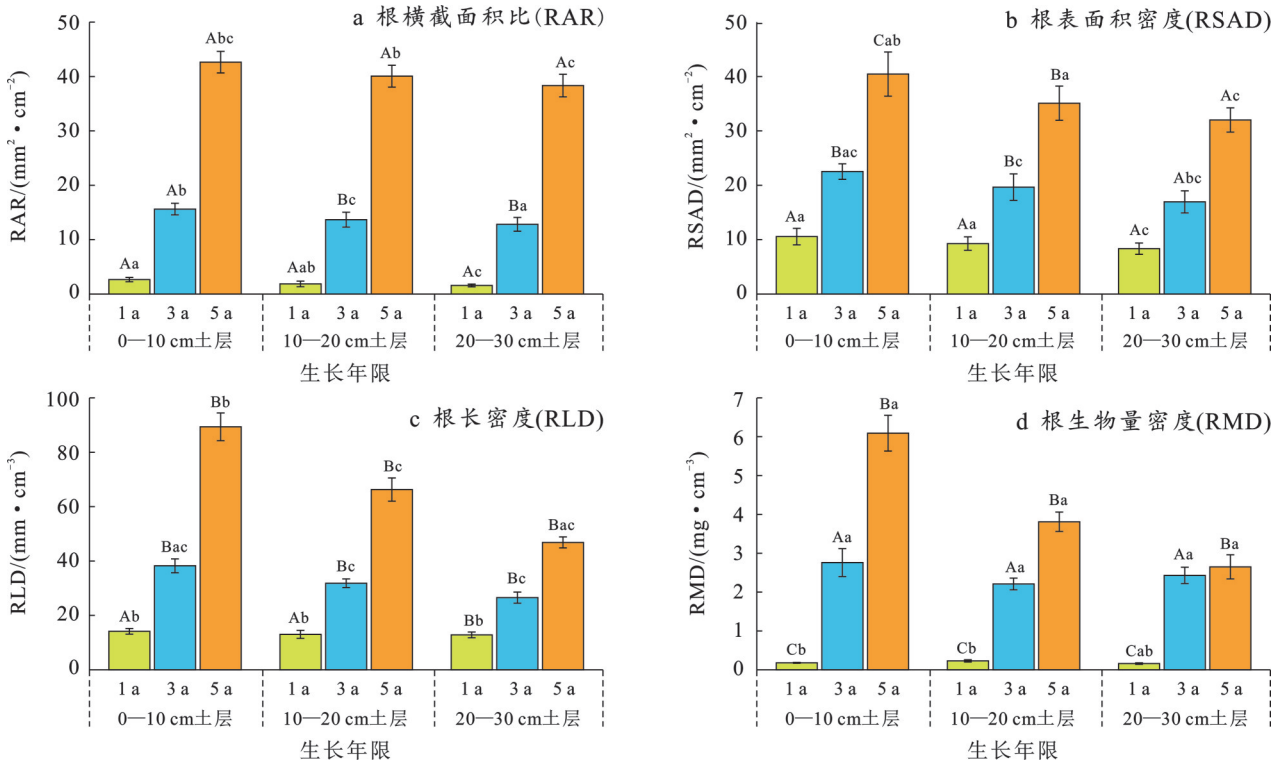
表3　不同年限草本植物根系形态特征参数显著性分析

Table 3　Significance analysis of root morphological parameters in herbaceous plants with different growth durations

植物类型	植物年限/a	根横截面积比/($mm^2 \cdot cm^{-2}$)	根长密度/($mm \cdot cm^{-3}$)	根表面积密度/($mm^2 \cdot cm^{-3}$)	根生物量密度/($mg \cdot cm^{-3}$)	平均直径/mm
紫花苜蓿	1	2.57±0.84^b	13.75±2.34^c	8.54±1.22^c	1.24±0.16^a	1.13±0.05^c
	3	13.28±1.25^a	28.56±3.16^b	19.42±5.34^b	2.36±0.25^b	4.25±0.28^b
	5	42.06±2.04^b	50.12±5.21^a	36.81±6.12^a	4.63±1.32^b	6.46±1.13^c
高羊茅	1	3.01±0.43^a	5.14±0.05^a	6.02±0.04^c	0.11±0.01^b	0.16±0.01^b
	3	10.25±0.84^b	6.52±0.08^a	12.27±1.13^c	0.20±0.02^b	0.58±0.02^a
	5	17.53±0.65^b	8.95±0.14^c	18.54±1.22^b	0.46±0.05^a	1.32±0.05^a

注:数据均为平均值±标准差;不同小写字母表示同种植被不同年限根系参数差异显著($p<0.05$)。

由图2可见,紫花苜蓿根系形态特征参数在不同土层深度(0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm)及生长年限(1 a,3 a,5 a)间呈现显著差异($p<0.05$)。RAR随土层加深显著降低,如1年生20—30 cm土层RAR显著低于0—10 cm和10—20 cm,而随种植年限延长,各深度土层RAR显著提高,0—10 cm深度范围内5年生根系RAR为1年生的16.03倍。RSAD随种植年限延长显著增加,5年生20—30 cm土层RSAD为1年生同土层的3.83倍,表明长期种植促进深层根系扩展与结构复杂化。RLD随着种植年限的增加呈上升趋势,5年生20—30 cm土层RLD是1年生的3.65倍,此深度根系的RLD参数降幅相比更加显著。1～3年生的紫花苜蓿各土层深度RMD变化范围不显著,而5年生变化范围显著提高。



注:不同大写字母表示紫花苜蓿相同年限不同深度差异显著($p<0.05$),不同小写字母表示相同深度不同年限差异显著($p<0.05$)。下同。

图2　紫花苜蓿根系形态特征参数

Fig.2　Root morphological parameters of *Medicago sativa*

此外,根系特征参数随土层由浅到深变化更显著,主要原因是根系由主根分级的支根增加。表层土壤(0—10 cm)在种植初期根系分布更密集,深层土壤(10—20 cm,20—30 cm)则随种植年限增加逐渐成为根系主要分布区域。

综上所述,紫花苜蓿根系形态参数受种植年限

与土层深度都具有显著性影响，随着种植年限延长，根系向深层土壤延伸且结构复杂性增强。

由图3可知，高羊茅根系形态参数在不同土层深度及生长年限间呈现显著差异（$p<0.05$）。RAR随土层加深呈现减小趋势，随种植年限延长显著提升；RSAD随年限延长显著提高，说明长期种植促进根系表面积与体积的深层扩展。对比紫花苜蓿与高羊茅根系特征：两者均表现为随年限延长根系向深层迁移，但紫花苜蓿RAR随土层加深持续降低，而高羊茅RAR在0—20 cm土层间波动，表明前者更依赖深层资源竞争。RLD随种植年限延长显著增加，5年生根系在20—30 cm土层中的RLD为1年生同土层深度的2.02倍，深层根系延伸能力显著增强。1年生RMD与3年生差异显著，5年生深层（20—30 cm）RMD较1年生同土层提升5.5倍，表明长期种植能显著增加深层根系生物量积累。此外，紫花苜蓿深层RMD的年限增幅（3.83倍）低于高羊茅（5.5倍），表明高羊茅在长期种植下深层生物量积累更具优势。两者均通过延长种植年限优化深层根系结构，但紫花苜蓿更适应深层土壤的稳定性需求。

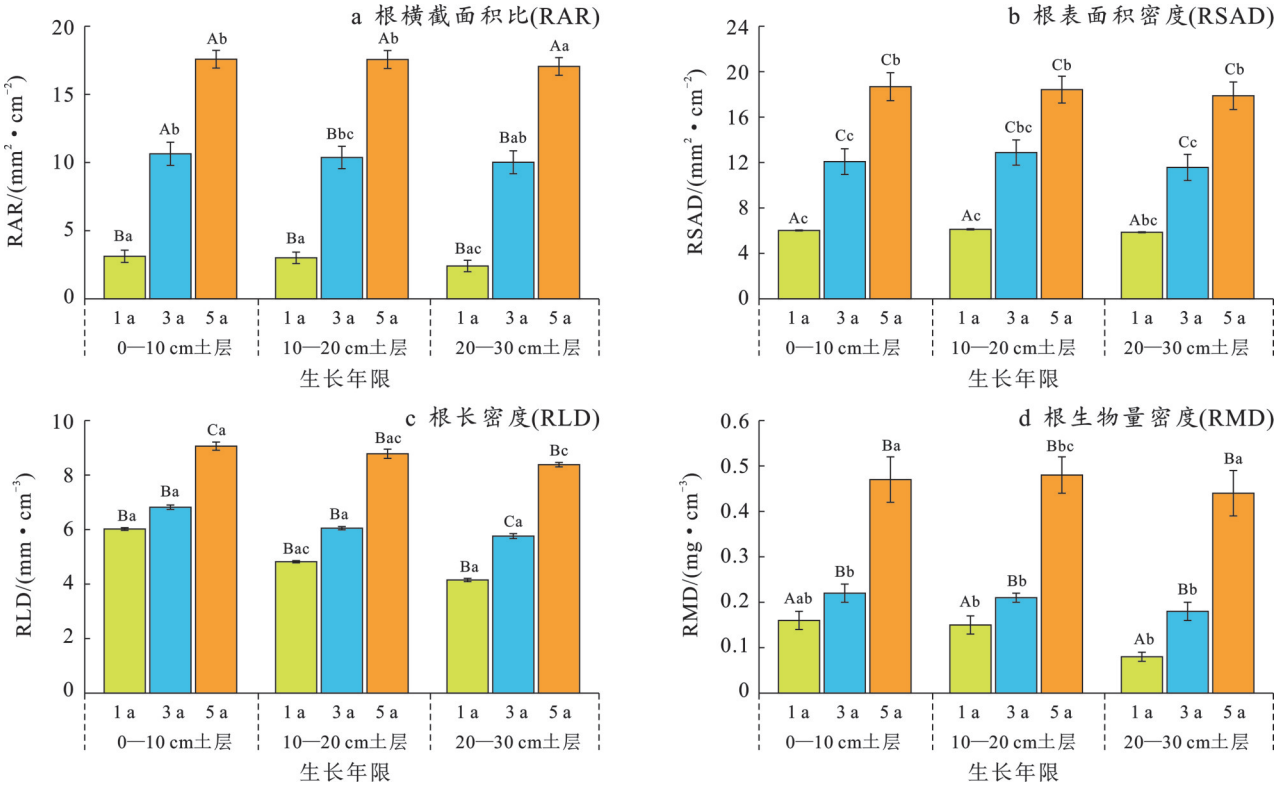


图3 高羊茅根系形态特征参数

Fig.3 Root morphological characteristic parameters of *Festuca elata*

2.2 不同年限不同土层各草本植物土壤团聚体粒径分布特征

图4为不同年限草本植物土壤团聚体粒径分布特征。由图4可知，高羊茅根系影响下的土壤主要分布于0.1～0.2 mm和0.2～0.5 mm粒径范围，其平均质量分数分别为29.12%和21.12%，粒径＞2 mm的土壤团聚体含量最少（2.89%）。苜蓿根系影响下的土壤主要分布于＞2 mm的粒径范围，其平均质量分数为25.37%，粒径＜0.05 mm的土壤团聚体含量最少（6.16%）。高羊茅根系下的土壤粒径为0.5～1 mm的团聚体分布随着年限的增大而增多，0.05～0.1 mm粒径的小团聚体含量随着年限的增大而逐渐降低。苜蓿根系下的土壤粒径＞2 mm的团聚体分布随着生长年限的增加而增多，小于0.05 mm粒径的小团聚体含量随着年限的增大逐渐降低。总体而言，随着年限的增加，高羊茅根系下的土壤对于0.2～2 mm粒径的团聚体数量逐渐增多，在恢复5 a后0.1～0.2 mm粒径的团聚体含量达到最大值（36.74%），较荒草地增加了5.14%，苜蓿根系下的土壤对于粒径＞2 mm的大团聚体数量逐渐增多，在恢复5 a后＞2 mm的团聚体达到最大值（30.71%），较荒草地增加23.33%。对于高羊茅根系下的土壤，年限主要影响粒径范围为0.05～0.1 mm和0.5～1 mm的团聚体含量，而对于粒径＞2 mm大团聚体含量影响较弱，对于紫花苜蓿根系下的土壤，年限主要影响粒径＞2 mm的团聚体含量，而对中间粒径团聚体（0.1～2 mm）影响较弱。此外，相同年限同一粒径土壤团聚体在不同土层间的变化规律较明显。

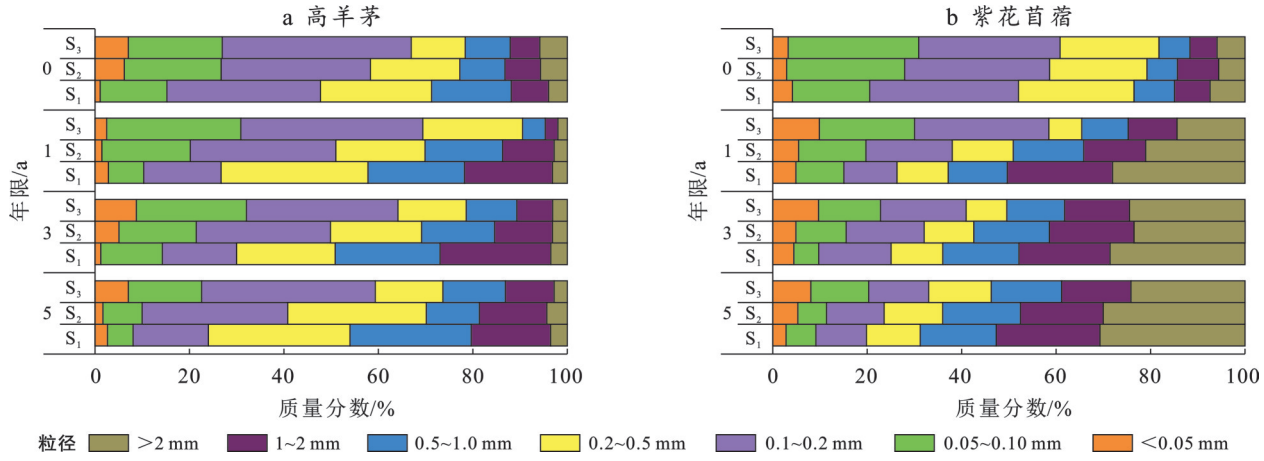


图 4　不同年限草本植物土壤团聚体粒径分布特征

Fig.4　Particle size distribution characteristics of soil aggregates in herbaceous plants with different growth durations

2.3　不同年限不同土层对土壤团聚体稳定性指标的影响

如图 5 所示,随着年限的增加,高羊茅和紫花苜蓿在 0—20 cm 土层 $W_{R>0.2}$ 均显著增大,但是在更深的 20—30 cm 土层,高羊茅根系生长对 $W_{R>0.2}$ 的提高作用明显弱于紫花苜蓿。在 20—30 cm 土层中 5 年生紫花苜蓿 $W_{R>0.2}$ 达到 66.99%,较 1 a 生(41.53%)和 3 年生(59.06%)分别增加了 25.46% 和 7.93%。表明随着生长年限的增加,紫花苜蓿根系由细向粗转型,根系向深层土壤延伸,深层发达的主根与分布的细根有助于 $R>0.2$ mm 土壤团聚体的形成。两种草本植物的 MWD 和 GMD 均随着种植年限的增加而增大,但高羊茅的变化趋势较缓慢,紫花苜蓿随年限变化较明显。在 20—30 cm 土层 5 a 生紫花苜蓿 GMD 较 1 年生提高了 49.5%,高羊茅仅为 7.9%。两种草本植物可蚀性因子 K 值随着年限的增大总体呈现减小的趋势,相比荒草地,不同年限高羊茅和紫花苜蓿 K 值明显减小。在 20—30 cm 土层深度,高羊茅根系下的土壤可蚀性因子 K 值随着年限增加有所减小并逐渐趋于稳定状态,紫花苜蓿根系下土壤可蚀性因子 K 值随着年限增加下降趋势较显著,在荒草地阶段不同土层深度的可蚀性因子 K 值变化较小。两种草本植物根系影响下的土壤抗侵蚀能力从大到小依次为:5 a>3 a>1 a>荒草地,紫花苜蓿在 1 a 时与高羊茅无显著差异,在年限为 3 a 和 5 a 时抗侵蚀能力明显优于高羊茅。从垂直土壤层次来看,两种植被的 $W_{R>0.2}$,MWD 和 GMD 均随着土层的加深而减小,高羊茅和紫花苜蓿在 0—10 cm 土层 $W_{R>0.2}$,MWD 和 GMD 均显著大于 20—30 cm 土层,均明显大于荒草地。两种植被根系下的土壤可蚀性因子 K 值随着土层深度增大而增大,总体而言,两种草本植物表层土壤结构稳定性和抗侵蚀能力最强,且随着土层深度的加深抗侵蚀能力减弱。

2.4　土壤团聚体稳定性和可蚀性影响因子

图 6 中紫花苜蓿和高羊茅相关性分析结果表明,2 种草本植物根系下土壤团聚体稳定性指标 $W_{R>0.2}$,MWD,GMD 和可蚀性因子 K 值与土层深度均有显著($p<0.05$)相关性,$W_{R>0.2}$,MWD,GMD 与土层深度呈显著负相关,可蚀性因子 K 值与土层深度呈显著正相关。紫花苜蓿根系作用下 $W_{R>0.2}$,MWD 和 GMD 与 RAR 呈正相关性,分别达到 0.55,0.58 和 0.60,远优于高羊茅根系下的 0.091,0.18,0.12。这表明以直根为主的紫花苜蓿在增强 RAR 方面远胜于须根型的高羊茅,在大团粒结构中土壤团聚体稳定性和土壤可蚀性主要受>2 mm 粒径团聚体控制,紫花苜蓿的根系能显著提高>2 mm 粒级团聚体,有助于增强土壤团聚体的稳定性,降低深层土壤可蚀性,这得益于其主根粗壮且深入土壤,通过机械穿插促进大团聚体的形成。高羊茅根系下的土壤团聚体稳定性指标 $W_{R>0.2}$,MWD 和 GMD 与 RLD 呈正相关性,分别为 0.45,0.50 和 0.47,高羊茅通过表层纤细密集的须根使得 RLD 远高于紫花苜蓿,这种差异使得高羊茅增强表层土壤抗侵蚀性的能力优于紫花苜蓿。

3　讨　论

本文选取 2 种典型草本植物紫花苜蓿(直根系)、高羊茅(须根系)为研究对象,发现两种草本植物的 RMD,RLD,RSAD 随土层加深逐渐减小,呈表层聚集型分布,说明 2 种草本植物根系对浅层土的固土效果最好。这与万海霞等[21]研究 5 种典型草本群落根系垂直分布特征与土壤团聚体的关系发现,RSAD,RLD 和 RMD 具有垂直分布特征,随着土层的加深而减小,以及李建兴等[22]研究得出 4 种护坡草本植物的 RLD 和 RSAD 随着土层深度的加深而减小,且随着深度的增加各个草本植物之间的差异逐渐缩小的结果一致。

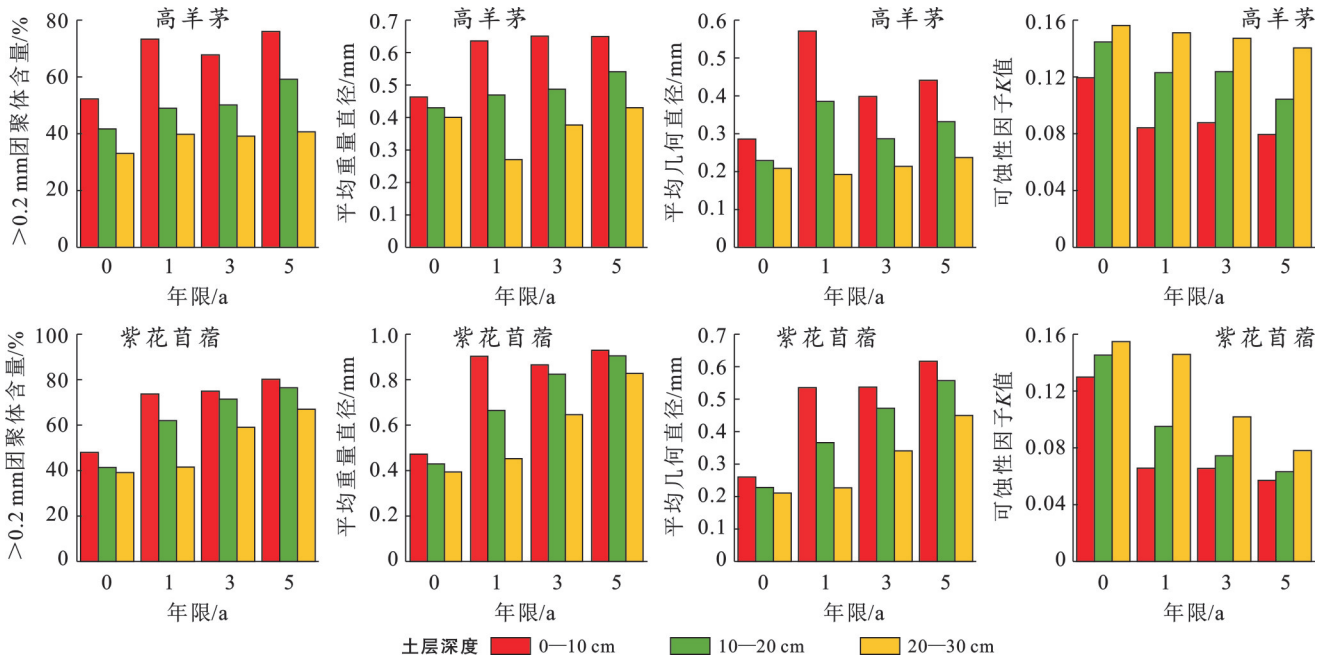
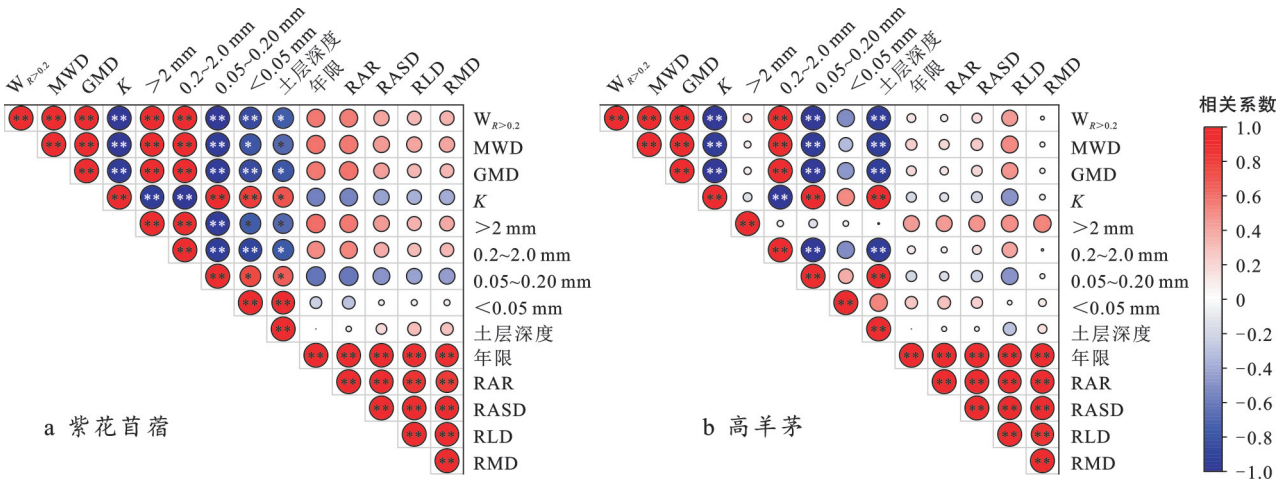


图 5 不同年限各草本植物土壤团聚体稳定性指标随土层深度变化

Fig.5 Variation of soil aggregate stability indicators with soil depth in herbaceous plants with different growth durations



注:*表示在$p<0.05$水平显著相关,**表示$p<0.01$水平极显著相关。

图 6 土壤团聚体稳定性指标与影响因素的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis between soil aggregate stability and influencing factors

学界普遍选用MWD, GMD和水稳定性团聚体$W_{R>0.2}$衡量土壤团聚体稳定性,0.25 mm被认为是划分大团聚体和小团聚体的分界线,其含量是评价土壤团聚体的重要指标[23-24]。MWD, GMD和$W_{R>0.2}$值越大,表明土壤团聚体稳定性越强,而可蚀性因子K值越小则表明土壤抗侵蚀能力越强[25-26]。本研究发现,2种草本植物的MWD, GMD和$W_{R>0.2}$随土层而显著降低,这与庄正等[27]和赵世伟等[28]的研究结果相似。不论是荒草地、苜蓿地还是高羊茅地,表层土壤团聚体稳定性和土壤可蚀性对植被恢复的响应比深层土壤中的响应更为显著。草本植物根系分布较浅,其根系对土壤团聚体的形成和稳定性具有重要作用,0—10 cm土层可能因为根系分布密集,团聚体稳定性最好,在10—30 cm土层,随着土层深度的增加,土壤团聚体稳定性和土壤可蚀性呈现降低的趋势,一方面可能是深层植物根系的减少直接或间接影响了土壤团聚体的形成,从而导致团聚体稳定性在深度上发生变化,另一方面是因为土壤有机碳含量、微生物量随着土层加深而降低影响了土壤团聚体的形成。此外,随着紫花苜蓿和高羊茅种植年限的增加,植被的地上部分可以通过改变径流的空间分布,减弱降雨对土壤表面的影响,有助于提高表

层土壤结构的稳定性[29-30]。研究中发现,紫花苜蓿和高羊茅在种植年限大于1 a后,土壤团聚体稳定性会出现波动的趋势,朱志昊等[31]也出现类似的研究结果,他们对不同年限柠条土壤团聚体稳定性研究发现,MWD表现为:荒草地>9 a生柠条>35 a柠条>24 a柠条。其原因可能是长期种植柠条会导致土壤水分下降和土壤有机质下降。本研究采用常用的4种根系参数,RAR, RSAD, RLD和RMD与土壤团聚体稳定性指标进行相关性分析,结果发现紫花苜蓿根系参数RAR与团聚体稳定性指标的相关性明显优于高羊茅,高羊茅根系参数RLD与团聚体稳定性指标的相关性大于紫花苜蓿。这与两种植被的根系形态有着密切的联系,直根为主的紫花苜蓿主根优势明显,随着年限的增加,根系由细向粗转型,向深层土壤延伸,发达的主根具有良好的锚固作用,增强深层土壤的稳定性。高羊茅则是以须根为主,由根系扫描图像可以看出,须根有明显的向地性,而须根上又分布大量的毛细根,形成非常密集的根系网络,可以有效降低表层土壤的可蚀性。

4　结　论

(1)紫花苜蓿和高羊茅的根系参数RAR, RSAD, RLD和RMD均随着土层加深持续递减,随着生长年限的增加而递增。5年生紫花苜蓿在0—10 cm土层的RAR较1年生增加了约16.03倍,高羊茅增加了约5.6倍,紫花苜蓿深层(20—30 cm)RMD的增幅高于高羊茅。

(2)随着生长年限的增加,紫花苜蓿和高羊茅根系影响下的土壤团聚体稳定性指标 $W_{R>0.2}$,MWD和GMD总体表现为:5 a>3 a>1 a>荒草地,在土层深度上表现为:0—10 cm>10—20 cm>20—30 cm。土壤可蚀性因子 K 值则有相反的趋势。在20—30 cm土层,紫花苜蓿根系生长5 a后的 $W_{R>0.2}$(66.99%)较1年生(41.53%)增加25.46%,高羊茅根系生长范围内的大团聚体比例无显著提高趋势。

(3)相关性分析表明,紫花苜蓿通过粗壮的直根和高RAR促进大团聚体的形成,降低深层土壤的可蚀性,高羊茅通过密集的须根和高RLD使其表层土壤抗侵蚀的能力优于紫花苜蓿。

参考文献(References)

[1] 卢金伟,李占斌.土壤团聚体研究进展[J].水土保持研究,2002,9(1):81-85.
Lu Jinwei, Li Zhanbin. Advance in soil aggregate study [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(1):81-85.

[2] 李中恺,李小雁,周沙,等.土壤-植被-水文耦合过程与机制研究进展[J].中国科学(地球科学),2022,52(11):2105-2138.
Li Zhongkai, Li Xiaoyan, Zhou Sha, et al. A comprehensive review on coupled processes and mechanisms of soil-vegetation-hydrology, and recent research advances [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2022,52(11):2105-2138.

[3] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. Journal of Soil Science, 1982,33(2):141-163.

[4] 郭力铭,陈宇琳,周碧青,等.猪粪配施化肥对侵蚀林地土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J].福建农业学报,2021,36(9):1092-1099.
Guo Liming, Chen Yulin, Zhou Biqing, et al. Effect of pig manure combined with chemical fertilizer on soil properties and aggregate organic carbon distribution on eroded forest lands [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2021,36(9):1092-1099.

[5] 张科利,彭文英,杨红丽.中国土壤可蚀性值及其估算[J].土壤学报,2007,44(1):7-13.
Zhang Keli, Peng Wenying, Yang Hongli. Soil erodibility and its estimation for agricultural soil in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007,44(1):7-13.

[6] Nciizah A D, Wakindiki I I C. Physical indicators of soil erosion, aggregate stability and erodibility [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2015,61(6):827-842.

[7] 冯强,张骁,段宝玲.基于湿筛法与水滴冲击法的土壤团聚体指标与土壤侵蚀关系[J].山西农业科学,2016,44(7):965-971.
Feng Qiang, Zhang Xiao, Duan Baoling. Relation between soil erosion and two kinds of soil aggregate stability indices based on wet sieving and water-drop method [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2016,44(7):965-971.

[8] 马海霞,刘小荣,鱼海霞,等.黄土丘陵沟壑区土壤团聚体抗蚀性研究[J].中国水土保持,2025(3):82-86.
Ma Haixia, Liu Xiaorong, Yu Haixia, et al. Study on the erosion resistance of soil aggregates in the loess hilly and gully region [J]. Soil and Water Conservation in China, 2025(3):82-86.

[9] Lacombe G, Valentin C, Sounyafong P, et al. Linking crop structure, throughfall, soil surface conditions, runoff and soil detachment: 10 land uses analyzed in northern Laos [J]. Science of the Total Environment, 2018,616:1330-1338.

[10] 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.

[11] 宋日,刘利,马丽艳,等.作物根系分泌物对土壤团聚体大小及其稳定性的影响[J].南京农业大学学报,2009,32(3):93-97.
Song Ri, Liu Li, Ma Liyan, et al. Effect of crop root exudates on the size and stability of soil aggregate [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2009, 32(3):93-97.

[12] Bengough A G. Water dynamics of the root zone: Rhizosphere biophysics and its control on soil hydrology [J]. Vadose Zone Journal, 2012,11(2):vzj2011.0111.

[13] 杨程高歌,雷少华,耿韧,等.黄棕壤典型草地不同根系结构土壤团聚体稳定性季节变化特征[J].水土保持研究,2025,32(1):66-72.
Yang Chenggaoge, Lei Shaohua, Geng Ren, et al. Seasonal variation of soil aggregate stability of typical yellow brown soil in grasslands with different root structures [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(1):66-72.

[14] Wang Bing, Zhang Guanghui, Yang Yanfen, et al. Response of soil detachment capacity to plant root and soil properties in typical grasslands on the Loess Plateau [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 266:68-75.

[15] Li Yunpeng, Wang Yunqi, Ma Chao, et al. Influence of the spatial layout of plant roots on slope stability [J]. Ecological Engineering, 2016,91:477-486.

[16] 秦嘉惠,程谅,曹丹妮,等.两种草本植物根系对土壤可蚀性的影响[J].水土保持研究,2019,26(2):55-61.
Qin Jiahui, Cheng Liang, Cao Danni, et al. Effects of root system of two herbs on soil erodibility [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(2):55-61.

[17] 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[J].草业科学,2019,36(2):284-294.
Cheng Liang, Zhan Haige, Guo Zhonglu. Root system responses of three herbs to soil anti-erodibility [J]. Pratacultural Science, 2019,36(2):284-294.

[18] Hudek C, Stanchi S, D'Amico M, et al. Quantifying the contribution of the root system of alpine vegetation in the soil aggregate stability of moraine [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2017, 5(1):36-42.

[19] An Shaoshan, Darboux F, Cheng Man. Revegetation as an efficient means of increasing soil aggregate stability on the Loess Plateau (China) [J]. Geoderma, 2013, 209:75-85.

[20] 韩金丹,毕华兴,赵丹阳,等.刺槐人工林林龄对土壤团聚体稳定性和土壤可蚀性的影响[J].水土保持研究,2025,32(5):1-10.
Han Jindan, Bi Huaxing, Zhao Danyang, et al. Effects of the age of *Robinia pseudoacacia* on soil aggregate stability and soil erodibility [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(5):1-10.

[21] 万海霞,马璠,许浩,等.宁夏南部黄土丘陵区典型草本群落根系垂直分布特征与土壤团聚体的关系[J].水土保持研究,2019,26(6):80-86.
Wan Haixia, Ma Fan, Xu Hao, et al. Relationship between vertical distribution characteristics of roots and soil aggregates in typical herb communities in loess area of southern Ningxia [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(6):80-86.

[22] 李建兴,何丙辉,谌芸,等.不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J].农业工程学报,2013,29(10):144-152.
Li Jianxing, He Binghui, Chen Yun, et al. Root distribution features of typical herb plants for slope protection and their effects on soil shear strength [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013,29(10):144-152.

[23] 张钦弟,刘剑荣,杨磊,等.半干旱黄土区植被恢复对土壤团聚体稳定性及抗侵蚀能力的影响[J].生态学报,2022,42(22):9057-9068.
Zhang Qindi, Liu Jianrong, Yang Lei, et al. Effect of vegetation restoration on stability and erosion resistance of soil aggregates in semi-arid loess region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(22):9057-9068.

[24] 刘雷,安韶山,黄华伟.应用Le Bissonnais法研究黄土丘陵区植被类型对土壤团聚体稳定性的影响[J].生态学报,2013,33(20):6670-6680.
Liu Lei, An Shaoshan, Huang Huawei. Application of Le Bissonnais method to study soil aggregate stability under different vegetation on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(20):6670-6680.

[25] 陈国靖,蔡进军,马璠,等.宁夏黄土丘陵区典型林草植被类型对土壤水稳性团聚体的影响[J].水土保持研究,2018,25(5):49-53.
Chen Guojing, Cai Jinjun, Ma Fan, et al. Effects of typical forest and grass vegetation structure on soil water-stable aggregates in hilly Loess Plateau of Ningxia [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(5):49-53.

[26] 韦兰英,上官周平.黄土高原不同演替阶段草地植被细根垂直分布特征与土壤环境的关系[J].生态学报,2006,26(11):3740-3748.
Wei Lanying, Shangguan Zhouping. Relationship between vertical distribution of fine root in different successional stages of herbaceous vegetation and soil environment in Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006,26(11):3740-3748.

(下转第148页)