

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.007; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.007.

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.

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

杨程高歌^{1,2}, 雷少华², 耿韧², 周岩³,
金秋², 赵广举², 卢慧中², 孙国昌⁴

(1.流域水土保持江西省重点实验室, 南昌 330029;

2.南京水利科学研究院 水文学资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029;

3.江苏省水文水资源勘测局, 南京 210005; 4.连云港市连云区农林水利局, 江苏 连云港 222005)

摘要:[目的]探究黄棕壤草地不同根系结构下土壤团聚体稳定性随季节的变化特征及其影响因素,为区域水土流失治理提供理论和实践依据。[方法]借助配对 T 检验分析须根系(狗尾草)、直根系(青蒿)和裸地对照 3 类样地间土壤团聚体稳定性季节变化差异,借助 Pearson 相关分析确定影响土壤团聚体稳定性季节变化的因素,并使用回归分析建立土壤团聚体稳定性拟合方程。[结果]狗尾草样地和青蒿样地土壤团聚体稳定性随季节变化出现明显的波动,均与裸地样地差异性显著($p < 0.05$),但二者之间差异性不显著($p > 0.05$)。狗尾草样地和青蒿样地土壤团聚体稳定性受根系密度影响显著($p < 0.05$),此外,青蒿样地土壤团聚体稳定性与土壤紧实度存在显著相关性。非线性回归分析表明,土壤团聚体稳定性可以用根系密度和土壤紧实度很好地拟合($R^2 = 0.730$, $NSE = 0.730$)。[结论]两种草地的根系结构均可以提升黄棕壤的土壤团聚体稳定性,并显著影响土壤团聚体稳定性的季节变化特征。但不同根系结构对土壤团聚体稳定性的影响无明显差异。

关键词:土壤团聚体稳定性; 季节变化; 植物根系; 根系类型

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0066-07

Seasonal variation of soil aggregate stability of typical yellow brown soil in grasslands with different root structures

Yang Chenggaoge^{1,2}, Lei Shaohua², Geng Ren², Zhou Yan³,
Jin Qiu², Zhao Guangju², Lu Huizhong², Sun Guochang⁴

(1.Jiangxi Key Laboratory of Watershed Soil and Water Conservation, Nanchang 330029, China; 2.State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029,

China; 3.Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210005, China;

4.Lianyungang Lianyun District Agriculture Forestry and Water Conservancy Bureau, Lianyungang, Jiangsu 222005, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the seasonal variation characteristics of aggregate stability and its influencing factors in Yellow Brown Soil, and to provide a theoretical and practical basis for regional soil erosion control. [Methods] The paired T-test was used to analyze the seasonal variation differences of aggregate stability among the three types of plots, fibrous root (*Setaria viridis*), straight root (*Artemisia apiacea*) and bare ground control. The factors affecting the seasonal variation of aggregate stability were determined by Pearson correlation analysis. The fitting equation of aggregate stability was

收稿日期: 2023-02-02

修回日期: 2023-03-05

资助项目: 国家自然科学基金项目(41907049); 安徽省自然科学基金项目(2308085US04); 南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y923005; Y922001); 江西省水利科学院开放研究基金(2023SKTR06)

第一作者: 杨程高歌(2000—), 女, 河南郑州人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: cgggyang01@163.com

通信作者: 耿韧(1990—), 男, 安徽阜南人, 博士, 高级工程师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: rgeng@nhri.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

established by regression analysis. [Results] The MWD of *Setaria viridis* and *Artemisia apiacea* fluctuated significantly with seasonal changes. Both MWD of *Setaria viridis* and *Artemisia apiacea* were significantly different from that of bare ground ($p < 0.05$). However, there existed no significant difference between them ($p > 0.05$). The MWD in *Setaria viridis* and *Artemisia apiacea* was significantly affected by root density ($p < 0.05$). There was a significant correlation between the MWD of *Artemisia apiacea* and soil compactness. Regression analysis showed that MWD could be well fitted with root density and compactness ($R^2 = 0.730$, $NSE = 0.730$). [Conclusion] The root structures of both grasslands enhanced soil aggregates stability in yellow brown soil and significantly influenced the seasonal variations of soil aggregate stability. However, the impact of different root structures on soil aggregates stability did not show any significant differences.

Keywords: soil aggregate stability; seasonal variation; plant roots; root type

土壤团聚体是由矿物颗粒与有机和无机物结合而形成的次生颗粒,是土壤结构的基本单元,对维持土壤平衡状态有重要意义,可作为评价土壤质量和结构稳定性的指标^[1-2]。土壤团聚体稳定性直接影响着土壤孔隙性、持水性等土壤理化性质,显著影响土壤保水能力和抗侵蚀能力^[3-5]。因此,研究土壤团聚体稳定性的季节变化及其影响因素,具有重要理论意义和实践价值。

土壤团聚体稳定性受到土壤有机质含量、根系生长发育、气候条件、土地利用方式等因子的综合影响^[6]。土壤有机质可影响土壤团聚体的数量和大小分布,且其含量与土壤结构的稳定性存在正相关关系^[7]。植物根系能够通过物理缠绕作用和根系分泌物产生的根—土粘结作用,促进土壤团聚体的形成和稳定^[8]。一般而言,根系结构可分为直根系和须根系两类,不同根系结构可对土壤理化性质产生显著影响^[9]。吴彦^[10]和熊燕梅^[11]等指出根系对土壤水稳性团聚体数量的提高,主要受 ≤ 1 mm 的须根的影响。季节变化体现在降水和温度等的改变,降水、温度等的季节分配影响着植物类型、生长周期和根系状况^[12];同时影响凋落物分解速率、土壤生物量生产分解平衡和有机质储存能力,从而控制土壤有机质总量^[13]。不同季节植物根系、土壤有机质等土壤理化性质的变化导致土壤中团聚体稳定性及功能的差异^[14]。

以往对土壤团聚体的研究多立足于不同土地利用方式和空间变异^[15-17],针对不同根系结构下其季节变化特征的研究鲜有报道。因此,本文选取狗尾草地(须根系)、青蒿地(直根系)和裸地(对照样地)为研究对象,测定土壤团聚体稳定性及其影响因素(根系密度、土壤有机质等指标),以探究不同根系条件下土壤水稳性团聚体的季节性变化规律及影响因素,旨在为区域水土流失治理提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于安徽省滁州市来安县半塔镇白云村

农田内。该区域属亚热带季风气候,温暖湿润,光照充足,雨热同季,多年平均气温 15.8 °C,多年平均降水量 1 028.7 mm,主要降水量集中在 6—8 月,占全年降水量的 50%,多年平均日照 2 076.9 h。试验区地形为丘陵缓坡,土壤类型为黄棕壤,颗粒组成为粉砂黏壤土,其中砂粒含量 21.89%、粉粒含量 67.44%及黏粒含量 10.67%。土壤肥力较高,土壤颗粒结构相对松散,孔隙度较高,透气性好。

1.2 研究方法

在原状土样地设置须根系、直根系和裸地对照 3 类样地,须根系植物和直根系植物分别选择当地常见的狗尾草和青蒿。二者生物量大且根系特征分明:狗尾草根呈胡须状丛生结构,可以有效地保持土壤结构和水;青蒿主根单一,侧根少,根系发达,抗逆性强。

试验于 2 月上旬布设样地,对须根系、直根系和对照样地统一进行翻耕处理,确保每个样地表的土壤容重一致。狗尾草、青蒿和裸地对照的样地的面积皆为 150 m²,狗尾草和青蒿样地设定播种密度为 600 粒/m²,裸地对照样地需要施用除草剂,保证裸地无杂草生长。

4 月上旬在草地尚未返青时进行第 1 次采样,此后以约 30 d 为周期进行采样,直至 11 月中旬草地生长结束时截止,一共进行 8 次土样采集。通过采集不同时间点的土样的方式,每次采集土样时,分别在狗尾草、青蒿和裸地对照样地采集 0—5 cm 土层深度的原状土土样,以获得较大的土壤理化性质(团聚体稳定性、黏结力、紧实度、容重和有机质)和植物根系密度数据。

土壤团聚体测定分为干筛和湿筛两个步骤,具体过程如下:

干筛法:将采集的原状土样放入铁盒中带回实验室,使其自然风干并保持每批土样风干程度一致。将较大土块轻轻掰成小土块,并将其中的石砾、动植物残体等去除。将土样分别过孔径依次为 7.5, 3, 2, 1, 0.5, 0.25 mm 的筛子,称量各粒级土壤团聚体质量,并计算各粒级所占的质量百分比。按照各粒级土壤

团聚体所占的质量百分比配置 50 g 土样。

湿筛法:将上述 50 g 土样放置在土壤团粒分析仪的套筛最上层,套筛由孔径分别为 5,2,1,0.5,0.25 mm 的 5 个筛子组成,调整桶内水面的高度,使水面高于最上层筛面 1 cm。待土样在水中浸泡 10 min 后开启分析仪,震荡 30 次。湿筛后,将每层筛子上的团聚体洗出,并进行烘干、称重,计算各级孔径土壤水稳性团聚体占土样的质量百分比。

土壤团聚体稳定性用平均质量直径表示:

$$MWD=\sum_{i=1}^n(x_iw_i) \tag{1}$$

式中:MWD 为平均质量直径(mm); x_i 为第 i 个孔径筛土壤团聚体的平均颗粒直径,在数值上取两级筛孔的平均值(mm); w_i 为第 i 个孔径筛上烘干团聚体所占质量百分比; n 为湿筛孔径筛总个数。

土壤黏结力取原状土块,借助土壤黏结力测定仪进行测定。土壤紧实度在 0—45 cm 土层采用 M0 603 e 便携式土壤紧实度仪测定。土壤容重测定选用经典环刀法。土壤有机质含量采取重铬酸钾容量法—外热源法测定。

植物根系密度借助高 5 cm、直径 10 cm 的环刀采集 0—5 cm 表层原状土,使用 5 mm 筛子将根系洗出并 65 ℃ 烘干 24 h,称取烘干后的根系质量并计算。每个采样点设置 5 组重复,结果取其平均值。

1.3 统计分析

使用 IBM SPSS Statistics 25 软件对不同处理方式下的结果进行描述性统计分析,不同样地土壤团聚

体稳定性采用配对 T 检验的方法进行季节变化差异分析,用 Pearson 法进行土壤团聚体稳定性与其影响因素的相关性分析,并对土壤团聚体稳定性与其影响因素进行线性和非线性回归分析。所有图均采用 Origin 2018 软件进行绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质及团聚体稳定性统计特征值分析

由表 1 看出,狗尾草样地、青蒿样地和裸地样地的有机质含量均值分别为 13.00 g/kg,14.46 g/kg 和 12.39 g/kg;最大有机质含量为青蒿样地(16.37 g/kg),其次为狗尾草样地(13.69 g/kg),二者有机质含量均值与裸地样地相差不大,分别为裸地样地的 1.05,1.17 倍。狗尾草样地、青蒿样地和裸地样地容重最高分别可达 1.27,1.19,1.18 g/cm³,均值大小依次为狗尾草样地 1.13 g/cm³>青蒿样地 1.09 g/cm³=裸地样地 1.09 g/cm³。3 类样地土壤紧实度均值大小近似相同,但裸地的最小紧实度明显高于狗尾草样地和青蒿样地。青蒿样地土壤黏结力均值(3.12 kPa)略高于狗尾草样地(2.93 kPa)和裸地样地(3.06 kPa)。以上土壤理化性质的差异可能与植被盖度、植物种类、土壤微生物数量等因素相关^[18]。根系密度最大值由大到小依次为青蒿样地(54.81 kg/m³)、狗尾草样地(46.75 kg/m³)和裸地样地(4.14 kg/m³)。按照变异等级划分^[19],青蒿样地和狗尾草样地为中等变异性,裸地样地为强变异性。

表 1 各类样地土壤理化性质统计特征值

Table 1 Statistical characteristics of soil physical and chemical properties for various sample plots

样地	统计特征值	团聚体 稳定性/mm	黏结力/kPa	紧实度/MPa	容重/ (g·cm ⁻³)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	根系密度/ (kg·m ⁻³)
狗尾草	最小值	1.38	2.58	0.20	1.00	11.36	0.00
	最大值	2.76	3.67	0.85	1.27	13.69	46.75
	均值	2.02	2.93	0.50	1.13	13.00	21.49
	标准偏差	0.59	0.40	0.21	0.08	0.89	17.88
	变异系数	0.29	0.14	0.42	0.07	0.07	0.83
青蒿	最小值	1.25	2.51	0.17	1.01	11.57	0.00
	最大值	3.19	3.55	0.83	1.19	16.37	54.81
	均值	2.13	3.12	0.51	1.09	14.46	24.94
	标准偏差	0.66	0.34	0.20	0.07	1.61	21.13
	变异系数	0.31	0.11	0.39	0.06	0.11	0.85
裸地	最小值	1.00	2.71	0.30	0.98	10.77	0.00
	最大值	1.58	3.68	0.86	1.18	13.58	4.14
	均值	1.32	3.06	0.51	1.09	12.39	0.68
	标准偏差	0.23	0.39	0.17	0.07	0.95	1.47
	变异系数	0.18	0.13	0.35	0.06	0.08	2.17

在 8 个不同的样点监测中,狗尾草样地、青蒿样地和裸地样地土壤团聚体稳定性的最小值为 1.38 mm,

1.25 mm 和 1.00 mm,最大值为 2.67 mm,3.19 mm 和 1.58 mm,最大值与最小值之比依次为 2.00,2.55,1.58。

青蒿样地土壤团聚体稳定性的均值最大(2.13 mm),其次是狗尾草样地(2.02 mm),二者的均值分别是裸地样地土壤团聚体稳定性均值(1.32 mm)的 1.61, 1.53 倍。狗尾草样地、青蒿样地和裸地样地的变异系数分别为 0.29, 0.31, 0.18, 均为中等变异性。总体来看,狗尾草样地和青蒿样地土壤团聚体稳定性明显高于裸地样地,且在数值上具有更大的波动。

2.2 团聚体稳定性季节变化及差异分析

由图 1 可见,狗尾草样地和青蒿样地土壤团聚体稳定性的变化趋势大致相同,总体呈现出先增后减的趋势;裸地样地土壤团聚体稳定性呈现波动状态,无明显增加或减少。狗尾草样地土壤团聚体稳定性在 4—6 月无明显变化,6 月出现显著增加并于 8 月达到峰值,9 月降低后于 10 月开始大幅上升。青蒿样地土壤团聚体稳定性前期为波动增长,7—9 月急剧增加并达到峰值,之后不断降低。配对 T 检验表明(表 2):狗尾草样地与裸地样地土壤团聚体稳定性存在极显著差异($p < 0.01$),青蒿样地与裸地样地土壤团聚体稳定性存在显著差异($p < 0.05$),狗尾草样地和青蒿样地土壤团聚体稳定性无显著差异。

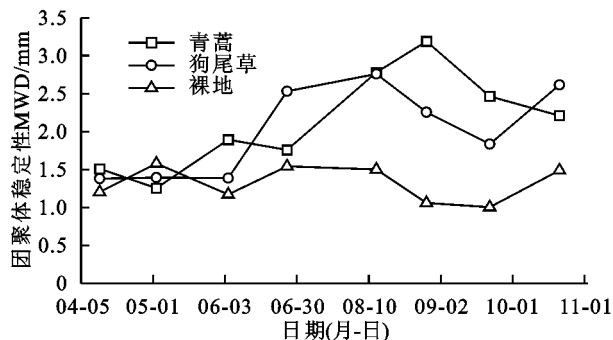


图 1 狗尾草、青蒿和裸地样地团聚体稳定性季节变化

Fig. 1 Seasonal variation of soil aggregate stability in *Setaria viridis*, *Artemisia apiacea* and bare ground

表 2 狗尾草、青蒿和裸地样地配对样本 T 检验

Table 2 Paired Samples T-test of *Setaria viridis*, *Artemisia apiacea* and bare ground

配对样本	平均值	标准偏差	标准误差	显著性
青蒿—狗尾草	0.113	0.563	0.199	0.588
青蒿—裸地	0.814	0.783	0.277	0.022
狗尾草—裸地	0.701	0.553	0.195	0.009

为进一步探究狗尾草样地和青蒿样地土壤团聚体稳定性的差异,将二者分别消除裸地对照影响(青蒿样地 MWD、狗尾草样地 MWD 分别与裸地样地 MWD 作差)后得到图 2。狗尾草样地土壤团聚体稳定性大体上呈现增加趋势,青蒿样地呈现“减—增—减”趋势。土壤团聚体稳定性 4 月份均下降至最低值,并在 5 月开始回升,5 月至 9 月经过大幅增加并达到峰值,而后

开始不断减小。青蒿样地土壤团聚体稳定性峰值明显高于狗尾草样地。青蒿样地 MWD 平均值(0.81 mm)是狗尾草样地(0.70 mm)的 1.16 倍,配对 T 检验结果显示二者土壤团聚体稳定性无显著性差异($p > 0.05$)。

2.3 团聚体稳定性季节变化影响因素分析

土壤理化性质与植物根系对土壤团聚体季节变化的影响密不可分。总体上,土壤紧实度对土壤团聚体稳定性季节变化影响显著(表 3)。青蒿样地土壤团聚体稳定性与土壤紧实度呈现显著相关关系($p = 0.031$),狗尾草样地土壤团聚体稳定性与土壤紧实度不相关($p > 0.05$)。去除裸地对照影响后(表 4),狗尾草样地和青蒿样地土壤团聚体稳定性与土壤紧实度相关性均降低,土壤紧实度虽然对青蒿样地的影响程度仍高于狗尾草样地,但并没有达到显著状态。

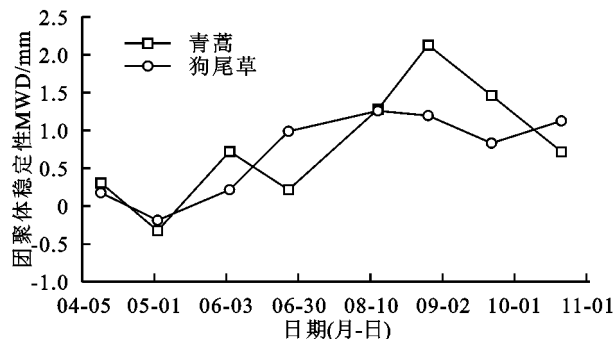


图 2 狗尾草、青蒿样地(消除裸地对照)团聚体稳定性季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of soil aggregate stability in *Setaria viridis* and *Artemisia apiacea* (excluding bare ground control)

表 3 狗尾草、青蒿和裸地样地团聚体稳定性与土壤理化性质和根系密度的相关分析

Table 3 Pearson coefficients between soil physical and chemical properties and aggregate stability for *Setaria viridis*, *Artemisia apiacea* and bare ground

样地	容重	黏结力	紧实度	土壤有机质	根系密度
总体	0.039	-0.037	0.425 *	0.460 *	0.810 **
狗尾草	0.225	-0.126	0.545	-0.033	0.739 *
青蒿	-0.205	-0.006	0.752 *	0.582	0.739 *
裸地	-0.458	0.147	-0.061	-0.458	-0.116

注: * 在 0.05 水平上显著相关; ** 在 0.01 水平上显著相关,下同。

表 4 狗尾草和青蒿样地(去除裸地对照)团聚体稳定性与土壤理化性质、根系密度的相关分析

Table 4 Pearson coefficients between soil physical and chemical properties and aggregate stability for *Setaria viridis* and *Artemisia apiacea* (excluding bare ground control)

样地	黏结力	紧实度	容重	土壤有机质	根系密度
总体	-0.042	0.540 *	0.016	0.464	0.653 **
狗尾草	-0.202	0.433	0.475	0.187	0.735 *
青蒿	0.040	0.637	-0.325	0.612	0.603

各样地根系密度随季节变化产生的变化(图 3)与土壤团聚体稳定性季节变化具有一定的相似性。消除裸地影响前后土壤团聚体稳定性与根系密度均表现出极显著相关关系($p < 0.01$)。

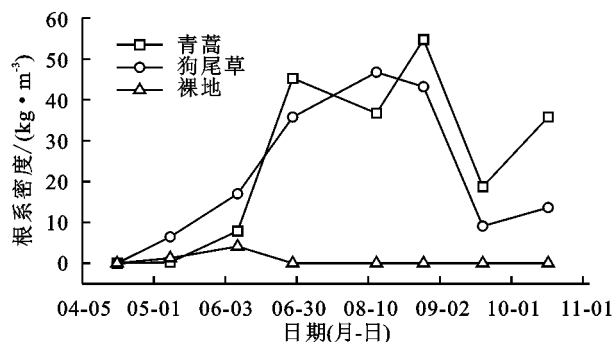


图 3 各样地根系密度季节变化趋势

Fig. 3 Seasonal variation trend of root density in different grasslands

2.4 团聚体稳定性拟合

基于上述土壤团聚体季节变化与影响因素的关系,运用回归分析方法建立狗尾草样地、青蒿样地和裸地样地土壤团聚体稳定性拟合方程。

多元非线性回归结果表明,土壤团聚体稳定性可用根系密度(RD)和土壤紧实度(Coh)很好地拟合(图 4),拟合结果如下:

$$\text{MWD} = 0.358 \text{ Coh}^{0.780} \cdot \text{RD}^{0.388} + 1.310$$

$$R^2 = 0.730 \quad \text{NSE} = 0.730 \quad (3)$$

从拟合方程的决定系数(R^2)和纳什系数(NSE)来看,以根系密度和紧实度拟合的效果较好。

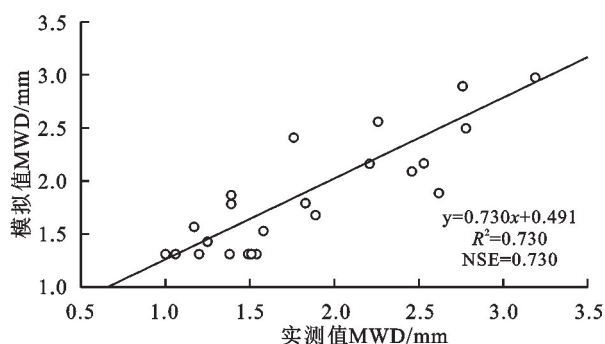


图 4 团聚体稳定性(MWD)模拟值与实测值比较

Fig. 4 Comparison between measured and predicted soil aggregate stability (MWD)

3 讨论

平均质量直径 MWD 越大,表明土壤团聚体的聚集程度越高,稳定性越好。播种前期,狗尾草样地和青蒿样地土壤团聚体稳定性变化近似相同(图 1),即随季节变化呈现波动递增趋势。随季节迁移,狗尾草样地和青蒿样地土壤团聚体稳定性逐步高于裸地样地,说明植被生长增强了土壤团聚体稳定性。植被具有拦截

降雨、调节土壤微生物、提高土壤有机质含量进而提升土壤团聚体稳定性、发挥水土保持的作用,且不同植被类型对土壤团聚体的影响具有差异^[20]。

狗尾草的根系为须状根,生长初期主根长出并吸收养分,一段时间后主根停止生长并死亡,从胚轴和茎的基部长出粗细相同的不定根并萌发侧根。5 月上、中旬狗尾草迎来生长高峰,受植物根系生长发育影响,狗尾草样地土壤团聚体稳定性在 6 月至 8 月大幅提高。青蒿作为直根系植物,其根系由发达的主根及其侧根组成,青蒿样地土壤团聚体稳定性呈现波动增大的状态,稳定性的大幅提高出现在 6 月末,于 9 月达到峰值。通常研究结果认为,须根系植物比直根系植物有较强的抗侵蚀性能^[21-22]。但本研究中,青蒿样地土壤团聚体稳定性最大值和均值都大于狗尾草样地,即表明:在季节变化下,青蒿样地的土壤团聚体聚集程度略高、稳定性略强。该结果与植物根系密度密切相关:De Baets 等^[23]研究表明根系占据的表土面积的百分比增大可削弱土壤流失,青蒿根系密度较大(表 1),其根系占土表面积比例大,故土壤团聚体稳定性优于狗尾草样地。除此之外,配对 T 检验结果表明,狗尾草和青蒿样地土壤团聚体稳定性无显著差异性(表 2),这可能是植物根系和草冠影响叠加的结果。草本植物抵抗土壤侵蚀的作用主要体现在草冠和根系对降水和径流的阻滞作用。研究区 5—9 月为雨季,在降雨过程中,草本植物叶面会对雨水进行截留,削弱降雨打击,且大多数情况下,植被覆盖率越高、叶面积指数越大,削弱作用就越强^[1,24]。本研究中,青蒿受冠层平均叶面积指数影响,青蒿草冠相对于狗尾草草冠对雨滴动能有较好的削弱作用,故同等降水条件下,青蒿样地土壤所受到的降雨打击影响更小,使得土壤团聚体因受到扰动较小而无显著差异^[8]。在消除裸地对对照影响后,狗尾草和青蒿样地土壤团聚体稳定性配对 T 检验结果仍显示无显著差异性,说明产生该结果的原因与未消除裸地影响前二者无显著差异的原因相同:狗尾草和青蒿样地土壤团聚体稳定性季节变化的差异,主要受植物根系、冠层等因素的影响。

本研究中,影响土壤团聚体稳定性产生季节变化的因素主要是植物根系密度,其次是土壤紧实度。研究结果显示植物根系的存在明显提高了土壤团聚体的稳定性,该结论与 Hudek 等^[25]研究一致。根系密度显著影响土壤抗侵蚀能力,不同形态(直根系或须根系)根系的根系密度对土壤性能影响效果具有差异^[23]。消除裸地影响后(表 4),狗尾草样地土壤团聚体稳定性与根系密度显著相关,而青蒿样地土壤团聚体稳定性与根系密度无相关关系,说明狗尾草的根系

密度对土壤团聚体稳定性季节变化的影响更为稳定。土壤紧实度对狗尾草样地和青蒿样地土壤团聚体稳定性季节变化影响存在细微差异,这是紧实度受植物根系、土壤水肥气热状况的间接影响的结果。

4 结论

(1) 狗尾草(须根系)样地随季节变化呈现先增后趋于稳定的季节变化趋势,青蒿(直根系)样地呈现先波动增加后减小的季节变化趋势;狗尾草样地和青蒿样地团聚体稳定性均与裸地样地差异性显著,二者之间无显著性差异($p>0.05$)。

(2) 土壤紧实度和根系密度是影响团聚体稳定性差异的显著相关和极显著相关因素。狗尾草样地和青蒿样地团聚体稳定性分别受根系密度影响显著($p<0.05$)。此外,青蒿样地团聚体稳定性与土壤紧实度存在显著相关性,去除裸地影响后无显著相关关系。

(3) 狗尾草样地、青蒿样地和裸地样地团聚体稳定性可用根系密度和紧实度非线性较好拟合,其 $R^2=0.730$, $NSE=0.730$ 。

参考文献(References):

- [1] 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 Z K, Li X Y, Zhou S, et al. A comprehensive review on coupled processes and mechanisms of soil-vegetation-hydrology, and recent research advances[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 65(11): 2083-2114.
- [2] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review[J]. Geoderma, 2005, 124(1/2): 3-22.
- [3] 史奕,陈欣,闻大中.东北黑土团聚体水稳定性研究进展[J].中国生态农业学报,2005,13(4):95-98.
Shi Y, Chen X, Wen D Z. Advance in water stability of black soil aggregates in Northeast China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(4): 95-98.
- [4] 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 J W, Li Z B. Advance in soil aggregate study[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(1): 81-85.
- [5] Cantón Y, Solé-Benet A, Asensio C, et al. Aggregate stability in range sandy loam soils relationships with runoff and erosion[J]. Catena, 2009, 77(3): 192-199.
- [6] 刘亚龙,王萍,汪景宽.土壤团聚体的形成和稳定机制:研究进展与展望[J].土壤学报,2023,60(3):627-643.
Liu Y L, Wang P, Wang J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: progress and prospect[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(3): 627-643.
- [7] 彭新华,张斌,赵其国.土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J].土壤学报,2004,41(4):618-623.
Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 618-623.
- [8] 杨帆,程金花,张洪江,等.坡面草本植物对土壤分离及侵蚀动力的影响研究[J].农业机械学报,2016,47(5):129-137.
Yang F, Cheng J H, Zhang H J, et al. Effect of herb plants on soil detachment and erosion dynamics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 129-137.
- [9] 桑凯新,胡淦林,黄超,等.黄河河岸带5种植物类型根系结构特征对土壤渗透性的影响[J].中国水土保持科学,2020,18(5):1-8.
Sang K X, Hu G L, Huang C, et al. Effects of root structure characteristics of 5 plant types on soil infiltration in the Yellow River riparian[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(5): 1-8.
- [10] 吴彦,刘世全,付秀琴,等.植物根系提高土壤水稳性团粒含量的研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1997,11(1):45-49.
Wu Y, Liu S Q, Fu X Q, et al. Study on improving soil's waterstable aggregates amounts by botanic roots[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1997, 11(1): 45-49.
- [11] 熊燕梅,夏汉平,李志安,等.植物根系固坡抗蚀的效应与机理研究进展[J].应用生态学报,2007,18(4):895-904.
Xiong Y M, Xia H P, Li Z A, et al. Effects and mechanisms of plant roots on slope reinforcement and soil erosion resistance: a research review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(4): 895-904.
- [12] 孟婷婷,倪健,王国宏.植物功能性状与环境和生态系统功能[J].植物生态学报,2007,31(1):150-165.
Meng T T, Ni J, Wang G H. Plant functional traits, environments and ecosystem functioning[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(1): 150-165.
- [13] Xiao H L. Climate change in relation to soil organic matter[J]. Soil and Environmental Sciences, 1999(4):304.
- [14] 耿韧,张光辉,郁耀闯,等.陕北典型农地表层土壤物理性质季节变化[J].水土保持研究,2014,21(4):1-6.
Geng R, Zhang G H, Yu Y C, et al. Seasonal variability in physical properties of topsoil in the typical croplands in northern Shaanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(4): 1-6.
- [15] 李可依,愚广灵,陈末,等.不同利用方式对高寒草地土壤团聚体稳定性及其有机碳含量分布的影响[J].水土保持通报,2023,43(1):332-340,349.
Li K Y, Yu G L, Chen M, et al. Effects of different land utilization methods on soil aggregate stability and organic carbon content in alpine grassland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 332-340, 349.

- [16] 郑子成,李廷轩,张锡洲,等.不同土地利用方式下土壤团聚体的组成及稳定性研究[J].水土保持学报,2009,23(5):228-231,236.
Zheng Z C, Li T X, Zhang X Z, et al. Study on the composition and stability of soil aggregates under different land use [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009,23(5):228-231,236.
- [17] 耿韧,张光辉,洪大林,等.黄土高原农地草地林地土壤团聚体稳定性沿降水梯度的变化特征[J].农业工程学报,2019,35(3):141-148.
Geng R, Zhang G H, Hong D L, et al. Variation characteristics of aggregate stability of cropland, grassland and woodland along precipitation gradient in Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(3):141-148.
- [18] 王长庭,龙瑞军,王根绪,等.高寒草甸群落地表植被特征与土壤理化性状、土壤微生物之间的相关性研究[J].草业学报,2010,19(6):25-34.
Wang C T, Long R J, Wang G X, et al. Relationship between plant communities, characters, soil physical and chemical properties, and soil microbiology in alpine meadows[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(6):25-34.
- [19] 宋丰骥,常庆瑞,钟德燕.黄土高原沟壑区土壤养分空间变异及其与地形因子的相关性[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2011,39(12):166-172,180.
Song F J, Chang Q R, Zhong D Y. Spatial variability of soil nutrients and its relations to topographical factors in hilly and gully area of Loess Plateau [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2011,39(12):166-172,180.
- [20] Zhang G., Tang K., Ren Z., et al. Impact of grass root mass density on soil detachment capacity by concentrated flow on steep slopes[J]. Transactions of the Asabe, 2013;927-934.
- [21] 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.
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.
- [22] 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(14):2304.
- [23] De Baets S, Poesen J, Knapen A, et al. Impact of root architecture on the erosion-reducing potential of roots during concentrated flow[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2007,32(9):1323-1345.
- [24] 程颖,刘鸿雁,王红亚,等.中全新世以来中国中部高山植被生产力和土壤侵蚀演变的古生态学证据[J].中国科学:地球科学,2021,51(12):2140-2149.
Cheng Y, Liu H Y, Wang H Y, et al. Indication of paleo-ecological evidence on the evolution of alpine vegetation productivity and soil erosion in central China since the mid-Holocene[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2021,51(12):2140-2149.
- [25] 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.

~~~~~  
(上接第 65 页)

- [27] 刘卓昕,高鹏,穆兴民,等.黄土区植被恢复对土壤水文物理性质的影响[J].水土保持研究,2023,30(6):206-213.  
Liu Z X, Gao P, Mu X M, et al. Effects of vegetation restoration on soil hydrophysical properties in loess region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(6):206-213.
- [28] 赵恩辉,吴磊,赵生华.黄河三角洲不同植被类型土壤水源涵养功能综合评价[J].水土保持研究,2023,30(6):255-263.  
Zhao E H, Wu L, Zhao S H. Comprehensive evaluation of soil water conservation function of different vegetation types in the Yellow River Delta [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(6):255-263.
- [29] 简永旗,吴家森,盛卫星,等.间伐和林分类型对森林凋落物储量和土壤持水性能的影响[J].浙江农林大学学报,2021,38(2):320-328.  
Jian Y Q, Wu J S, Sheng W X, et al. Effects of thinning and stand types on litter stock and soil water-holding capacity[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2021,38(2):320-328.
- [30] 刘汗,雷廷武,赵军.土壤初始含水率和降雨强度对黏黄土入渗性能的影响[J].中国水土保持科学,2009,7(2):1-6.  
Liu H, Lei T W, Zhao J. Effects of initial soil water content and rainfall intensity on Loess infiltration capacity [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009,7(2): 1-6.