

不同演替阶段群落根系分布与土壤团聚体特征的协同变化

由 政¹, 姚 旭², 景 航², 谷利茶³, 王国梁^{2,3}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:采用空间代替时间的方法,选取黄土高原丘陵区退耕地演替前期(茵陈蒿)、中期(铁杆蒿)和后期(白羊草)典型群落,研究了不同植物群落不同演替阶段的根系特征、分布格局及其与土壤团聚体之间的关系。结果表明:群落根系主要为 <2 mm 的细根,且多向土壤表层集中,根长密度、表面积、根系生物量以及比根长表现出随着直径的增大而减小规律。同时随着演替的进行,土壤团聚体稳定性有所增强,根长密度和根表面积也表现出增长趋势。对比群落根系分布与土壤团聚体的相关关系可知,表层 0.5~2 mm 的细根根长、表面积与根系生物量和土壤团聚体稳定性极显著相关,说明了植物细根在群落演替以及土壤结构变化中具有重要作用。

关键词:植被演替; 根系特征; 土壤团聚体

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)06-0020-06

Coordinated Variation Between Root Distributions and Soil Aggregate Characteristics at Different Successional Stages

YOU Zheng¹, YAO Xu², JING Hang², GU Licha³, WANG Guoliang^{2,3}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to understand the change of root distribution and the relationship with soil aggregate structure in different plant communities of succession stage, the characteristics of roots and soil aggregates of *Artemisia capillaries*, *Artemisia gmelinii*, *Bothriochloa ischaemum* community, which are typical species at abandoned stage in loess hilly region were studied by using the method of substituting spatial difference for time change. The results show that in the herbaceous community fine roots are the main part of whole roots and most of roots distribute in the upper soil layer; the root length density (RLD), root surface area (RSA), root biomass and specific root length (SRL) decreased with the increase of the size diameters (<0.5 , $0.5 \sim 1.0$, $1.0 \sim 1.5$, $1.5 \sim 2$, >2.0 mm). The stability of soil aggregates, RLD and RSA increased with succession durations. The stability of soil aggregates is significantly correlated with fine RLD, fine RSA and fine root biomass in the upper soil layer, which indicates that fine roots play an important role in vegetation succession and soil structure.

Keywords: vegetation succession; root characteristic; soil aggregate

根系作为土壤和植物的动态界面,不仅是固定和支撑植物体的重要器官,为地上部分生长吸收土壤养分和水分,对植被的生长具有决定性的作用,其形态和分布直接决定了植被对其所处立地条件的利用状况^[1],是陆地生态系统中能量循环分配过程的核心环节之一^[2]。根系作为连接植物生态系统地上与地下部分的直接纽带决定植物对土壤资源的利用效果及

影响潜力^[3-4]。在植被恢复过程中,植被群落组成结构及其土壤结构理化性质都会相应改变,根系及其分布特征为适应植被特征和环境因子的变化也会做出相应的改变,进而反馈于植被,进而影响演替进程。因此植物地下根系分布格局在植被演替过程中占有十分重要的地位,对不同演替阶段植被根系进行研究,可揭示植物群落演替的一般规律以及不同演替阶

段生态系统的功能^[5-6]。但由于采样方法及研究技术等方面的原因,至今人们在群落尺度上对植被根系结构与功能变化的了解仍十分有限。

黄土高原丘陵区地形破碎,土质疏松,脆弱的自然生态系统加之人类的不合理开发导致自然植被遭到破坏,是中国水土流失严重的地区之一。植被恢复是该区生态建设的重要措施,土壤植被复合系统可改善土壤结构,提高土壤质量。土壤团聚体作为土壤结构和功能的基本单元,其结构特征对土壤水分移动、养分循环和微生物活动等具有重要意义^[7]。诸多学者利用团聚体的数量和分布状况作为土壤结构的稳定性和抗侵蚀能力的评价指标。常用的评价指标包括 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量(water-stable aggregates content, $R_{0.25}$)、平均重量直径(mean weight diameter, MWD)、几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)数等。近年来土壤学研究中借鉴和应用分形理论,并且用分形维数(fractal dimension, D)来描述团聚体的分布状态,很多研究表明土壤颗粒及其团聚体的性状具有明显的分形特征,使得定量表述土壤结构特征成为可能^[8-9]。土壤团聚体的形成受物理、化学和生物因素的驱动,根际土壤是植物与微生物活动的重要场所^[10],植物根系及其分泌物在土壤团聚体的形成、稳定与周转过程中具有重要作用^[11],土壤的团聚化影响土壤通气性、水分入渗和土壤侵蚀。有研究证实大粒径土壤团聚体是小粒径土壤团聚体在植物根系和菌丝共同缠绕作用下形成的,特别是植物细根能够提高大粒径团聚体的含量和土壤团聚体的总量,除了与根系的穿插、挤压和缠绕等机械作用有关外,还与根系分泌物能够加速粘结土壤颗粒有关^[12]。然而这些研究结果

均在不同土地利用类型土壤中得以验证^[13-14],在黄土丘陵地区尤其是草地生态系统植被根系对团聚体结构的研究较少。本研究通过分析黄土丘陵区草地演替过程中土壤团聚体分布状态和稳定性特征及根系特征在土壤剖面上动态变化,探讨根系与土壤团聚体之间的关系,旨在初步揭示植物地下部分在植被演替过程土壤结构变化扮演的重要作用,为进一步研究土壤结构及生态环境恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

样地位于陕北黄土高原丘陵沟壑区安塞县内纸坊沟流域($36^{\circ}51'30\text{N}$, $109^{\circ}19'30\text{E}$),地处黄土高原中部,地形破碎,沟壑纵横,梁峁起伏为典型的侵蚀环境。流域面积约 8.72 km^2 ,海拔 $1\,068\sim1\,309\text{ m}$,年均日照时数 $2\,415\text{ h}$,属暖温带半干旱季风气候,年平均温度为 8.8°C ,平均无霜期 142 d ,年平均降雨量 549.1 mm ,降水年际变化较大,且年内分配不均,其中大部分落在 7—9 月。土壤为黄土母质上发育的黄绵土,土壤抗冲抗蚀能力差。植被类型处于暖温带落叶阔叶林向干草原过渡的森林草原带。

1.2 样地选择

纸坊沟流域为中国科学院水土保持研究所长期定位监测流域。植被长期定位监测表明,茵陈蒿群落是该区退耕地上最早出现的主要先锋群落,铁杆蒿群落与白羊草群落分别为演替中期与后期主要代表群落。在每样地内随机设置 6 个 $1\text{ m}\times1\text{ m}$ 样方,在每个样方内调查群落盖度、物种组成、地上生物量。样地基本情况见表 1。

表 1 样地信息表

样地	坡向	坡度	海拔/m	生物量/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	伴生植物
茵陈蒿(<i>Artemisia capillaries</i>)	半阳坡	12	1224	298.2	狗尾草(<i>Setaria viridis</i> (L.) beauv.)、阿尔泰狗娃花(<i>Heteropappus altaicus</i>)、香青兰(<i>Dracocephalum moldavica</i> L.)
铁杆蒿(<i>Artemisia gmelinii</i>)	阳坡	20	1235	554.5	达乌里胡枝子(<i>Lespedeza davurica</i>)、硬质早熟禾(<i>Poa sphondylodes</i> Trin.)、赖草(<i>Leymus secalinus</i> (Georgi) Tzvel.)、异叶败酱(<i>Patrinia heterophylla</i> Bunge)
白羊草(<i>Bothriochloa ischaemun</i>)	阳坡	20	1242	499	达乌里胡枝子(<i>Lespedeza davurica</i>)、委陵菜(<i>Potentilla chinensis</i> Ser.)、芨蒿(<i>Artemisia giraldii</i> Pamp.)

1.3 研究方法

调查样方群落情况后,将样方内所有群落根系按 0—20 cm 和 20—40 cm 分别挖出,用筛子将各层土壤进行过筛,并拣出所有根系,编号后装入塑料袋带回实验室进一步分析。将样品根系用水洗出,晾干后装入纸袋。对所获的根系样品用蒸馏水清洗干净后,采用根系扫描仪(EPSON PERFECTION 4490 PHOTO)和专业的根系形态学和结构分析应用系统

WINRhizo,对根系长度、根系表面等指标进行测定分析,其中生物量采用烘箱法测定(70°C 下烘 48 h)。

同时在每个样地内分为 3 个重复取样小区,取 0—20 cm 和 20—40 cm 土壤。3 个取样小区再分别取 3 个点的土壤作为该取样小区的样品。采取原状土样,室内自然风干,用手把大土块沿自然破碎面轻轻掰开,剔除大的植物残体和石块等,过 8 mm 筛后继续风干备用。

依据 Elliott^[15] 的土壤团聚体湿筛法测定方法。具体方法为:将样品放置于孔径自上而下为 2 mm, 0.25 mm 和 0.053 mm 的各级套筛之上,先用水缓慢湿润后,再放入水中;在整个套筛处于最下端时,最顶层筛的上边缘保持低于水面,竖直上下振荡 5 min;收集各级筛层团聚体并分别转移至铝盒当中,由于 >2 mm 和 0.25~2 mm 水稳性大团聚体中含有较多的根系,在烘干前仔细剔除可见根系,然后烘干称重,计算得到各级团聚体的质量百分比。

1.4 数据处理

土壤团聚体的平均质量直径(MWD)和几何均重直径(GMD)公式:

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

团聚体的分形维数 D 的计算采用杨培玲^[16] 推导的公式

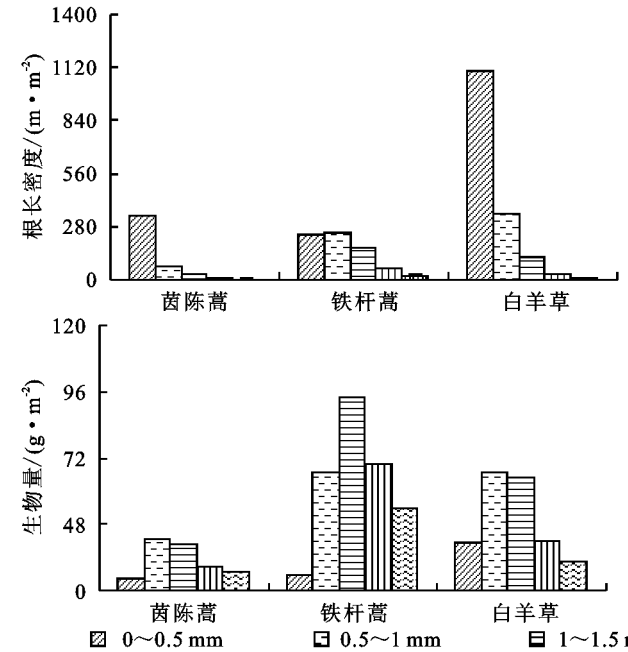


图 1 群落各级根系在 0—20 cm 土层的分布特征

在 0—40 cm 中,植被各级根系特征随着根系直径的增加表现出降低趋势,比根长表现尤最为明显,各级根系在一定程度上与总根参数表现出一致性。具体来看,茵陈蒿与白羊草群落根长密度主要集中在 0~0.5 mm,占总根长的 70%~75%,铁杆蒿群落根长在 <1.5 mm 的各径级下呈均匀分布,可见三种演替植被细根根长占总根长较大的比例。在根系表面积方面,茵陈蒿集中在 <1 mm 径级,其变化规律则与白羊草相同,变化规律为随着直径的增大而减小;铁杆蒿根系表面

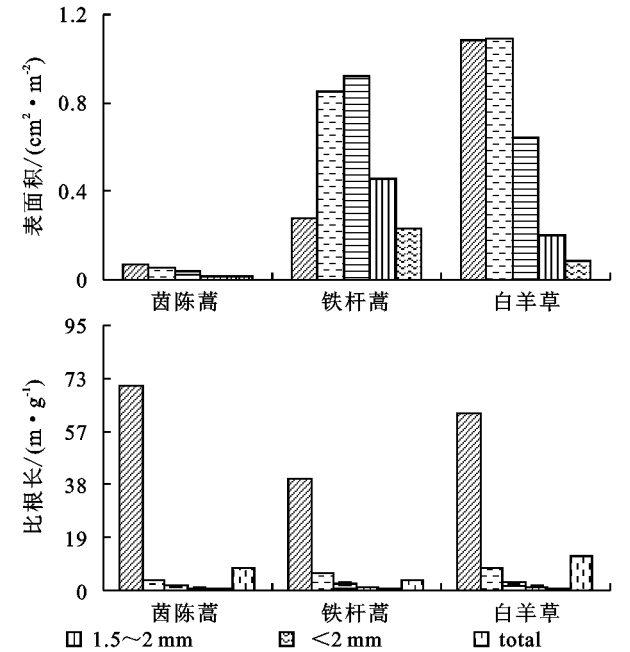
$$\frac{M(r < \overline{x_i})}{M_T} = \left(\frac{\overline{x_i}}{x_{\max}}\right)^{(3-D)}$$
$$\lg\left[\frac{M(r < \overline{x_i})}{M_T}\right] = (3-D) \lg\left(\frac{\overline{x_i}}{x_{\max}}\right)$$

式中: $\overline{x_i}$ 为某级团聚体的平均直径(mm); $M(r > \overline{x_i})$ 为直径小于 $\overline{x_i}$ 的团聚体的质量(g); M_T 为团聚体总质量(g); x_{\max} 为团聚体的最大直径(mm)。用 Excel 2010 和 SPSS 20.0 统计分析软件对所得试验数据进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 不同演替阶段根系形态特征在土壤中的特征

图 1 表明,在 0—20 cm 土层白羊草的根长密度与表面积随着演替阶段增加;铁杆蒿的根系生物量最大,白羊草生物量高于茵陈蒿;在群落比根长方面白羊草优势最为明显,其次为茵陈蒿。图 2 中 20—40 cm 土层植被群落根系特征与图 1 类似,都表现为根长密度白羊草群落最大;生物量铁杆蒿最大,茵陈蒿最小;表面积茵陈蒿最小;比根长铁杆蒿最低。对比不同土壤剖面可知,植物根系特征随着土层的增加而减少。



积主要集中在直径 0.5~1.5 mm,其变化特点为先增加再减小。与植被根长密度、表面积类似茵陈蒿与白羊草的根系生物也主要集中在 <2 mm 的细根,而铁杆蒿 >2 mm 的粗根生物量在总根重占有较高比例,随着深度的增加,茵陈蒿和白羊草大径级根重减小明显比其他径级根系生物量比例增加,而铁杆蒿各级根重比例并无明显变化。比根长为根长与重量之间的比值,故其随根系直径的增加而明显减少,在此不再赘述。与总根变化相同,0—40 cm 土层的细根根长密度以及

0—20 cm 细根表面积随演替阶段增加的特点。

2.2 不同演替阶段典型群落土壤团聚体分布及其稳定性特征

总体来看,0—20 cm 和 20—40 cm 土层团聚体分布情况类似(图 3),土壤微团聚体(<0.25 mm)含量较多,在 >2 mm 径级下铁杆蒿植被土壤团聚体含

量较多,在 $2\sim0.25$ mm 径级下土壤团聚体含量按演替年限呈增长趋势,在 >53 mm 径级下,茵陈蒿的团聚体含量最大。随着深度增加,各级土壤团聚体分布并无太大变化,表现为水稳性大团聚(>0.25 mm)含量减少,则微团聚体(<0.25 mm)含量增加,这也与其他研究者结果相同^[8]。

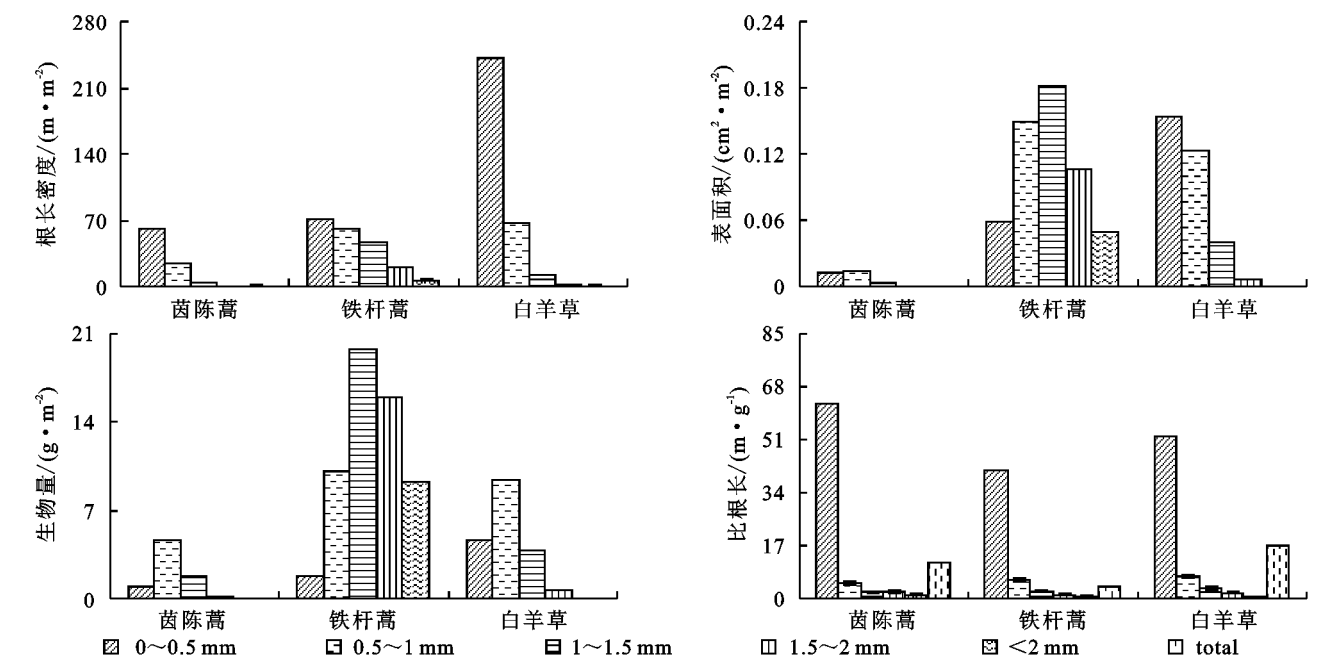


图 2 群落各级根系在 20—40 cm 土层的分布特征

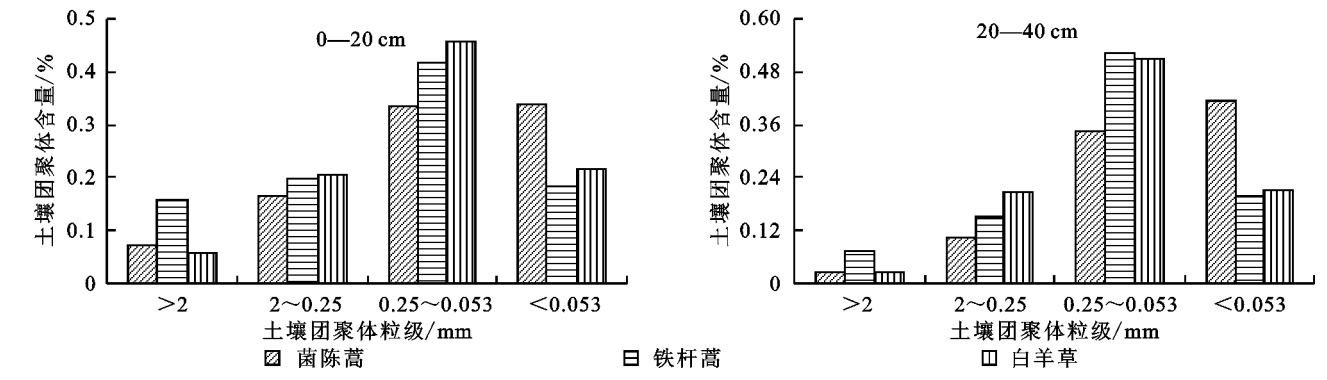


图 3 不同演替阶段各层土壤团聚体分布

在黄土高原地区,水稳性大团聚体含量(>0.25 mm)可作为土壤可蚀性的重要指标,MWD 和 GMD 是反映土壤团聚体大小分布状况的常用指标^[17]。MWD 和 GMD 值越大表明土壤团聚体稳定性越强,分形维数越高,则土壤团粒结构越不稳定。由表 2 可知,不同演替过程中土壤团聚体的稳定性特征有显著变化。在 0—20 cm 土层中,代表演替前期的茵陈蒿群落,其中 $R_{0.25}$ 含量最低,分形维数 D 高于其他两种群落。其中代表演替中期的铁杆蒿群落土壤团聚体稳定性表现最好。在 20—40 cm 土层中,土壤团聚体指标均表现出稳定性降低,同时茵陈蒿群落土壤团聚体在 $R_{0.25}$ 和分形维数 D 指标变化上与浅层土壤表现出同样规律。铁杆蒿群落与白羊草群落除了 MWD

外,其他指标变化并无明显差异。

2.3 土壤团聚体稳定性与植被根系特征的相关性分析

为了探讨植物地下根系与土壤结构稳定性的相互关系,对植被各级根系参数与土壤团聚体稳定性指标进行了相关分析,具体见表 3。在 0—20 cm 土层,土壤团聚体结构受根系生物量、表面积以及比根长的影响较大, $R_{0.25}$,MWD 与 GMD 和根系生物量、表面积呈正相关关系;和比根长呈负相关关系,分形维数则与之相反。在 20—40 cm 土层中,比根长作为影响团聚体稳定主要因素。比根长和 $R_{0.25}$,MWD,GMD 呈负相关关系,和分形维数呈正相关关系。土壤团聚体与其他根系参数指标并不表现相关关系,仅有根系生物与分形维数表现负相关关系($p<0.05$)。各级

根系参数与土壤团聚体稳定性指标的相关关系则与总根有所差异。由表 3 可知,在 0—20 cm 土层中,0.5~2 mm 根系的生物量、根长密度及表面积与团聚体稳定性指标相关性明显,多为极显著相关关系($p<0.01$)。比根长仅在 0~0.5 mm 径级下与团聚体稳定性指标表现相关关系。在 20—40 cm 土层根系与土壤相关性表现并无明显规律。其中>1 mm 根系生物量与 MWD,GWD 和分形维数 D 表现出相关关系,同样>2 mm 的根长密度与 MWD 和 GWD

表现相关关系,1~1.5 mm 径级根系表面积和 GWD、分形维数 D 表现相关,1.5~2 mm 根系表面积和分形维数 D 以及>2 mm 根系表面积和 MWD,GWD 表现相关关系。从相关性分析结果看出,在 0—20 cm 土壤中 0.5~2 mm 径级根系对土壤团粒结构有显著的促进作用,在 20—40 cm 土壤中>1 mm 径级根系对土壤团粒有影响作用,在 0—40 cm 土层中,仅比根长与土壤团聚体呈相关关系,侧面反映了根系生长情况与结构特征对土壤的综合影响。

表 2 不同演替阶段土壤各层团聚体稳定性指标 ($n=3$)

演替群落	0—20 cm				20—40 cm			
	$R_{0.25}$	MWD	GMD	D	$R_{0.25}$	MWD	GMD	D
茵陈蒿	0.20a	0.80a	0.23a	2.69b	0.13a	0.76a	0.20a	2.78b
铁杆蒿	0.36c	0.95b	0.31b	2.50a	0.26ab	0.86b	0.27b	2.56a
白羊草	0.29b	0.85a	0.28b	2.57a	0.20b	0.76a	0.24b	2.58a

表 3 土壤团聚体稳定性指标与各级根系特征参数之间的相关关系 ($n=3$)

土层	指标	团聚体稳定性指标	粒径/mm					合计
			0~0.5	0.5~1	1~1.5	1.5~2	>2	
0—20 cm	生物量/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	$R_{0.25}$	0.16	0.83**	0.92**	0.96**	0.68*	0.99**
		MWD	−0.001	0.79**	0.90**	0.90**	0.60	0.92**
		GWD	0.25	0.89**	0.93**	0.91**	0.57	0.97**
		D	−0.38	−0.86**	−0.85**	−0.85**	−0.54	−0.93**
	根长密度/ ($\text{m} \cdot \text{m}^{-2}$)	$R_{0.25}$	−0.07	0.71*	0.91**	0.92**	0.65*	0.28
		MWD	−0.27	0.55	0.79**	0.79**	0.56	0.06
		GWD	−0.03	0.74*	0.88**	0.82**	0.53	0.31
		D	−0.12	−0.78**	−0.84**	−0.79**	−0.51	−0.43
	表面积/ ($\text{cm}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)	$R_{0.25}$	0.19	0.77**	0.91**	0.92**	0.71*	0.79**
		MWD	−0.02	0.63	0.80**	0.81**	0.60	0.10
		GWD	0.25	0.81**	0.90**	0.85**	0.61	0.80**
		D	−0.39	−0.84**	−0.88**	−0.83**	−0.60	−0.85**
	比根长/ ($\text{m} \cdot \text{g}^{-1}$)	$R_{0.25}$	−0.65*	−0.47	−0.37	−0.35	0.24	−0.81**
		MWD	−0.67*	−0.50	−0.43	−0.41	0.02	−0.79**
		GWD	−0.74*	−0.55	−0.49	−0.47	0.11	−0.78**
		D	0.74*	0.55	0.51	0.49	−0.15	0.73*
20—40 cm	生物量/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	$R_{0.25}$	0.33	0.38	0.55	0.55	0.60	0.47
		MWD	0.27	0.27	0.65*	0.65*	0.75*	0.51
		GWD	0.34	0.46	0.66*	0.66*	0.65*	0.61
		D	−0.33	−0.55	−0.65*	−0.65*	−0.52	−0.67*
	根长密度/ ($\text{m} \cdot \text{m}^{-2}$)	$R_{0.25}$	−0.04	0.11	0.43	0.43	0.63	0.08
		MWD	−0.37	−0.09	0.50	0.50	0.77**	−0.20
		GWD	−0.03	0.15	0.55	0.55	0.66*	0.13
		D	−0.20	−0.32	−0.59	−0.59	−0.52	−0.35
	表面积/ ($\text{cm}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)	$R_{0.25}$	0.07	0.16	0.50	0.50	0.61	0.26
		MWD	−0.19	−0.02	0.59	0.59	0.75*	0.14
		GWD	0.16	0.30	0.63*	0.63	0.65*	0.42
		D	−0.37	−0.50	−0.65*	−0.65*	−0.51	−0.61
	比根长/ ($\text{m} \cdot \text{g}^{-1}$)	$R_{0.25}$	−0.43	−0.38	−0.47	−0.47	0.31	−0.65*
		MWD	−0.47	−0.37	−0.45	−0.45	0.34	−0.69*
		GWD	−0.49	−0.47	−0.55	−0.55	0.27	−0.73*
		D	0.46	0.48	0.56	0.56	−0.21	0.69*

注:表中“**”代表水平在 $p<0.01$ 相关,“*”代表水平在 $p<0.05$ 相关。

3 讨论与结论

黄土高原丘陵地区植被恢复过程促进了植被的演替,改善了植被结构及土壤性质。在退耕地植被演替过程中,植物为适应环境其根系特征也有所变化。在本研究中,植被根长密度随着演替阶段的进行而增加,根长密度反映着根系吸收水分和养分的潜力^[18],一般根长密度越大,在养分吸收方面就越具有优势应对不良环境条件。茵陈蒿与白羊草根系表面积与根长密度变化规律一致,铁杆蒿 20—40 cm 土层的根系表面积不仅高于演替前期的茵陈蒿,与演替后期的白羊草相比也占优势。这与铁杆蒿本身生物学特性有关,铁杆蒿作为半灌木草本,为适应黄土高原半干旱环境,群类根系生长能力较强,根系形态也更为发达,在不同演替阶段群落根系生物量变化中体现更明显。比根长是根长和生物量的比值,可以表征根系收益和花费的关系。作为关键的根系性状之一,它决定了根系吸收水分和养分的能力,是反映根系生理功能的一个重要指标。在本研究中,比根长与土壤团聚体稳定性呈负相关关系,这反映了植物群落根系为达到吸收效率最大化与土壤环境之间的相互平衡作用。具体来说,在撂荒地退耕起始阶段,土壤结构松散,水分及养分条件较好,先锋植物茵陈蒿利用其高根长比迅速占领。随着植被恢复的进行,在 20 a 左右地表植被组成发生了相应变化,土壤的理化性质被演替前期的先锋植被改善,地面土壤更加密实,不利于先锋物种生长,此时铁杆蒿靠其发达的根系在土层中投入较大的生物量成为群落新的优势种。李鹏等^[19]研究表明,退耕 20 a 土地的植被根系分布特征接近于天然草地,此时大部分植被根系集中在地表 0—40 cm 土层中,改变了恢复初期土壤的疏松状况,地表土壤变得逐渐密实,土壤表层在根系作用下形成的密实结构有效地控制了地表的水土流失,改善了土壤结构,因此铁杆蒿植被土壤结构指标要高于白羊草植被。然而这种密实的土壤结构也会降低土壤的入渗能力,不利于干旱、半干旱地区有限雨水资源的利用和储藏,白羊草为须根植物,根长密度较大,但细小的须根生物量因为随着细根直径减小,根系活动则需要较少的碳。通过较大的比根长,白羊草细小的毛根可发挥其对土壤高的水分和养分潜在吸收率、相对更高的竞争力和生长速率。

根系作为根系吸收土壤养分及水分的主要器官,不仅在物种竞争和植被演替过程中起着十分重要的作用^[20],也在诸多方面影响着土壤团聚体形成变化过程。首先根系通过穿插、挤压和缠绕等物理作用,增加土壤中的大粒级水稳性团聚体,并且植物根系分

泌物中的多糖对土壤颗粒有很强的粘着力,胶结物质与土壤颗粒相互作用,促进团聚体的形成^[11],同时根系产生的分泌物促进微生物生理活动及其自身的降解也为土壤微生物提供了碳源。在本研究中,0—20 cm 土壤团聚体稳定性与植物根系生物量及表面积呈现正相关关系,根系生物量作为草地根系生产力的重要指标,也是草地生态系统物质循环和能量流动的基础,旺盛的植物根系活动可改善土壤结构促进植被生长。吴彦^[21]、董慧霞^[22]等研究根系生物量与团聚体关系得到了相同结论。根表面积反映了根系与土壤的接触面积,结合根长密度可推断土壤空间中根系代谢及固土能力,根长密度越大,越有利于减小土壤容重,增加土壤孔隙度,改良土壤结构,本研究也印证了上述说法。同时在 0.5~2 mm 径级下各根系生物量、根长及其表面积与土壤稳定性指标相关系数多在 0.8~0.9 左右,进一步反映细根在团聚体形成与稳定起到了重要作用。

参考文献:

- [1] 周梦华,程积民,万惠娥,等. 云雾山本氏针茅群落根系分布特征[J]. 草地学报,2008,16(3):267-271.
- [2] 郝艳茹,彭少麟. 根系及其主要影响因子在森林演替过程中的变化[J]. 生态环境,2005,14(5):762-767.
- [3] 燕辉,苏印泉,朱昱燕,等. 秦岭北坡杨树人工林细根分布与土壤特性的关系[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2009,33(2):85-89.
- [4] 程云环,韩有志,王庆成,等. 落叶松人工林细根动态与土壤资源有效性关系研究[J]. 植物生态学报,2005,29(3):303-310.
- [5] 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.
- [6] 王长庭,王根绪,刘伟,等. 植被根系及其土壤理化特征在高寒小嵩草草甸退化演替过程中的变化[J]. 生态环境学报,2012,21(3):409-416.
- [7] 王清奎,汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. 土壤通报,2005,36(3):415-421.
- [8] 赵勇钢,赵世伟,华娟,等. 半干旱典型草原区封育草地土壤结构特征研究[J]. 草地学报,2009,17(1):106-112.
- [9] 周虎,吕贻忠,杨志臣,等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学,2007,40(9):1973-1979.
- [10] 李娜,韩晓增,尤孟阳,等. 土壤团聚体与微生物相互作用研究[J]. 生态环境学报,2013,22(9):1625-1632.
- [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.

[3] 王万茂,高波,夏太寿. 土地生态经济学[M]. 北京:科学技术文献出版社,1992.

[4] 张殿发,黄弈龙. 土地资源可持续利用的生态经济系统分析[J]. 生态与农村环境学报,2000,16(2):45-48.

[5] 吕晓,刘新平. 农用地生态经济系统耦合发展评价研究:以新疆塔里木河流域为例[J]. 资源科学,2010,32(8):1538-1543.

[6] 王国刚,杨德刚,乔旭宁,等. 基于生态足迹模型的新疆区域生态经济可持续发展能力变化分析[J]. 冰川冻土,2009,31(5):969-975.

[7] 刘海龙,石培基,李生梅,等. 河西走廊生态经济系统协调度评价及其空间演化[J]. 应用生态学报,2014,25(12):3645-3654.

[8] 王千,金晓斌,周寅康,等. 河北省耕地生态经济系统能值指标空间分布差异及其动因[J]. 生态学报,2011,31(1):247-256.

[9] 戴靓,姚新春,周生路,等. 长三角经济发达区金坛市土地生态状况评价[J]. 农业工程学报,2013,29(8):249-257.

[10] 李玉平,蔡运龙. 河北省土地生态安全评价[J]. 北京大学学报:自然科学版,2007,43(6):784-789.

[11] 马明德,马学娟,谢应忠,等. 宁夏生态足迹影响因子的偏最小二乘回归分析[J]. 生态学报,2014,34(3):682-689.

[12] 谢花林,邹金浪,彭小琳. 基于能值的鄱阳湖生态经济区耕地利用集约度时空差异分析[J]. 地理学报,2012,67(7):889-902.

[13] 刘引鸽,傅志军. 区域经济发展的土地利用及生态安全管理:以宝鸡地区为例[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(11):39-43.

[14] 徐美,朱翔,李静芝. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的湖南省土地生态安全评价[J]. 冰川冻土,2012(5):1265-1272.

[14] 徐美,朱翔,李静芝. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的湖南省土地生态安全评价[J]. 冰川冻土,2012,34(5):1265-1272.

[15] 林珍铭,夏斌. 熵视角下的广州城市生态系统可持续发展能力分析[J]. 地理学报,2013,68(1):45-57.

[16] 王浣尘. 可行性研究和多目标决策[M]. 北京:机械工业出版社,1990.

[17] 韦俊敏,胡宝清,张中秋. 新型城镇化背景下小城镇土地精明利用评价与应用:以广西上林县为例[J]. 资源科学,2014,36(8):1563-1571.

[18] 刘姝驿,杨庆媛,何春燕,等. 基于层次分析法(AHP)和模糊综合评价法的土地整治效益评价:重庆市 3 个区县 26 个村农村土地整治的实证[J]. 中国农学通报,2013,29(26):54-60.

[19] 廖晶晶,罗海波,韦举顺. 基于层次分析法的工矿废弃土地复垦潜力分区研究[J]. 中国农学通报,2011,27(9):216-220.

[20] 韦俊敏,胡宝清,张中秋. 新型城镇化背景下小城镇土地精明利用评价与应用:以广西上林县为例[J]. 资源科学,2014(8):1563-1571.

[20] 韦俊敏,胡宝清,张中秋. 新型城镇化背景下小城镇土地精明利用评价与应用:以广西上林县为例[J]. 资源科学,2014,36(8):1563-1571.



(上接第 25 页)

[12] 刘定辉,李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. 水土保持学报,2003,17(3):34-37.

[13] 李婕,杨学云,孙本华,等. 不同土壤管理措施下土团聚体的大小分布及其稳定性[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(2):346-354.

[14] 李勇,武淑霞,夏侯国. 紫色土区刺槐林根系对土壤结构的稳定作用[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(2):2-8.

[15] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986,50(3):627-633.

[16] 杨培岭,罗远培,石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报,1993,38(20):1896-1899.

[17] 曾全超,李娅芸,刘雷,等. 黄土高原草地植被土壤团聚体特征与可蚀性分析[J]. 草地学报,2014,22(4):743-749.

[18] Schlossberg M J, Karnok K J, Landry G. Estimation of viable root-length density of Heat-tolerant Crenshaw ‘ and L93’ Creeping Bentgrass by an Accumulative Degree-day Model[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2002,127(2):224-229.

[19] 李鹏,李占斌,澹台湛. 黄土高原退耕草地植被根系动态分布特征[J]. 应用生态学报,2005,16(5):849-853.

[20] Craine J M. Competition for Nutrients and Optimal Root Allocation[J]. Plant and Soil, 2006,285(1/2):171-185.

[21] 吴彦,刘庆,乔永康,等. 亚高山针叶林不同恢复阶段群落物种多样性变化及其对土壤理化性质的影响[J]. 植物生态学报,2001,25(6):648-655.

[22] 董慧霞,李贤伟,张健,等. 退耕地三倍体毛白杨林地细根生物量及其与土壤水稳性团聚体的关系[J]. 林业科学,2007,43(5):24-29.