

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.021

黄土丘陵沟壑区不同植被带植物群落的细根分布特征

寇萌¹ 焦菊英^{1,2} 王巧利³ 尹秋龙⁴

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 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. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 以黄土丘陵沟壑区延河流域3个植被带(森林带、森林草原带、草原带)不同植物群落的细根(直径 $d \leq 2$ mm)为研究对象,对植物群落0~20 cm土层细根根长密度、根系生物量、比根长进行了研究。结果表明,3个植被带不同植物群落直径 $d \leq 1$ mm的根系根长密度占总细根的90%以上,根系生物量占53%以上。有较大比例的直径 $d \leq 1$ mm的根系不仅在植物的生长活动中贡献很大,且在改善土壤结构方面发挥重要作用;植物群落细根 $d \leq 2$ mm生物量从南部森林带到北部草原带呈递减趋势,比根长从南部森林带到北部草原带呈递增趋势,草原带的根长密度显著低于其他植被带($P < 0.05$)。根长密度与根系生物量变化趋势一致,乔、灌群落高于草本群落,但比根长表现为草本群落显著高于乔、灌群落($P < 0.05$);乔、灌群落和以达乌里胡枝子为次优种或优势种的群落根长密度和根系生物量较高,植物根系生长能力强,根系发达。以狼牙刺、杠柳、白羊草为优势种的群落比根长较高,具有较高的水分、养分潜在吸收率和生长速率;以狼牙刺、杠柳、铁杆蒿、白羊草为优势种的群落,根系参数(根长密度、根系生物量、比根长)在森林草原带显著高于其他植被带($P < 0.05$),这些群落在此环境下,更能有效吸收土壤水分、养分,在提高土壤抗侵蚀能力方面发挥着重要作用。

关键词: 根长密度; 根系生物量; 比根长; 植物群落

中图分类号: S157; Q948.15 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)02-0161-11

Fine Root Distribution Characteristics of Plant Community in Different Vegetation Zones in Hill-gully Region of Loess Plateau

Kou Meng¹ Jiao Juying^{1,2} Wang Qiaoli³ Yin Qiulong⁴

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

4. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The objective of this study was to clarify the characteristics of fine roots (diameter $d \leq 2$ mm) parameters (root biomass, root length density and specific root length) in 0~20 cm soil layer under different plant communities in forest zone, forest steppe zone and steppe zone of the Yan river basin in hill-gully region of Loess Plateau. Soil drill method was used to collect root samples. Vernier caliper was used to measure root diameter in two grades of 0~1 mm and 1~2 mm. Root length of two diameter grades was measured, then root samples were dried to constant weight at 85°C and weighed. The main results were as follows: (1) In the three vegetation zones, the proportion of root length density ($d \leq 1$ mm) and root biomass of different communities accounted for 90% and 53% of the total fine root,

收稿日期: 2015-07-11 修回日期: 2015-07-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371280)

作者简介: 寇萌(1988—),女,博士生,主要从事土壤侵蚀与植被恢复研究,E-mail: mengkoumeng@126.com

通信作者: 焦菊英(1965—),女,研究员,博士生导师,主要从事植被恢复与水土保持环境效应评价研究,E-mail: jyjiao@ms.iswc.ac.cn

respectively. The root ($d \leq 1$ mm), which accounted for a large proportion of the total fine root, not only contributed greatly for the plant growth, but also played an important role in improving soil structure. (2) Root biomass ($d \leq 2$ mm) of different plant communities showed a decreasing trend from southern forest zone to northern steppe zone, while specific root length showed a increasing trend from southern forest zone to northern steppe zone, root length density in steppe zone was significantly lower than those in other two vegetation zones ($P < 0.05$). The variation tendency of root length density and root biomass was the same, and root length density and root biomass of tree community and shrub community were higher than those of herb community. But specific root length of herb community was significantly higher than those of tree community and shrub community ($P < 0.05$). (3) Root length density and root biomass of tree community, shrub community and *Lespedeza davurica* dominated community were higher than those of other communities, the root growth of these communities was vigorous, and root system of these communities developed well. The specific root lengths of *Sophora viciifolia*, *Periploca sepium* and *Bothriochloa ischaemun* respectively dominated communities were higher than those of other communities, thus these communities had stronger potential ability to absorb soil moisture and nutrients, and higher growth rate. (4) The root parameters of *Sophora viciifolia*, *Periploca sepium*, *Artemisia gmelinii* and *Bothriochloa ischaemun* respectively dominated communities, which distributed in forest steppe zone, were significantly bigger than those of other communities distributed in the other two vegetation zones ($P < 0.05$). It indicated that these communities could absorb soil moisture and nutrients more efficiently and play an important role in increasing soil anti-erodibility in forest steppe zone.

Key words: root length density; root biomass; specific root length; plant community

引言

根系是植物与土壤的动态界面,不仅将植物固定于土壤中,并从土壤中吸收水分、养分,供给地上部分生长;还具有独特的生物学特性及抵抗不良环境的能力。根系层的存在也能逐步改善土壤的内在特性:根系可增加土壤水稳性团粒及有机质含量,稳定土层结构,提高土壤入渗等^[1]。而细根是植物吸收水分、养分的主要途径^[2],决定植物对土壤资源的利用效果及潜力^[3-4]。目前,大多研究是以直径 $d \leq 2$ mm为细根划分范围^[5],有研究指出直径 $d \leq 1$ mm的根系在提高土壤水力学效应方面的贡献最大;也能有效提高土壤水稳性团聚体数量,进而提高土壤抗蚀性能^[6-7],所以,细根($d \leq 2$ mm)生长、分布及根长、生物量等参数的研究对探讨植被对土壤理化性质、机械组成等的改善作用具有重要意义。

在干旱环境中,植物对地下资源的竞争是植物相互竞争的主要方式^[8],多年生植物会向根系投入更多的资源以获取足够的水分和养分^[9-10]。根系随土层深度衰减的规律表明根系发育有显著的表聚现象,一般集中分布在表层0~20 cm^[11-12]。聚集于表层的细根有利于植被对有限降水的有效利用^[13];有效防止土壤侵蚀,强化土壤抗冲性等^[14-15]。在土壤侵蚀非常严重的黄土丘陵沟壑区,

多集中于对根系的分布特征与土壤理化性质的关系^[16-17]、根系强化土壤抗侵蚀性和固土作用^[18],及对不同植被类型、不同演替阶段和不同土层深度的细根生物量的研究^[12-19]。根系生物量(Root biomass, RB)反映了生态系统获得能量的能力。为了获取足够的水分和养分,植物必须维持一定的根系生物量^[20],但维持根系生物量及其生理活动依赖于大量光合产物的投入^[21],根系消耗的光合产物主要用于细根对水分、养分的吸收等,而细根的根长密度(Root length density, RLD)和比根长(Specific root length, SRL)决定着根系吸收养分和水分的能力^[22]。根长密度越大,表示其吸收土壤养分、水分的表面积越大,同时也表明其抵抗土壤侵蚀的能力越强^[1]。比根长是表征根系生理功能的一个重要指标,反映植物对不同生境的适应特征^[23]。RLD和SRL两个参数在反映细根生理功能方面可能比RB更具有意义^[24]。将根系生物量、比根长和根长密度3个参数有效地结合起来,可更好地表征单位土体根系的质和量的状况。因此,本文对黄土丘陵区延河流域3个植被带不同植物群落0~20 cm土层的细根参数(根系生物量、根长密度、比根长)进行分析,明确黄土丘陵沟壑区不同植物群落细根的分布特征,探讨细根分布对土壤侵蚀环境的改善作用,为完善该区植被恢复和生态建设提供基础资料与依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

选取陕北黄土丘陵沟壑区的延河流域作为研究区(图1)。延河流域(36°23'~37°17'N, 108°45'~110°28'E)位于陕西省北部,是黄河中游河龙区间的一级支流,流域全长286.9 km,总面积7 687 km²,海拔高度495~1 795 m;流域属暖温带大陆性半干旱季风气候,年均气温8.8~10.2℃,年均降水量约500 mm,其中7—9月份的降水量占全年降水量的60%以上,多暴雨^[25]。延河流域从东南向西北,气候、温度具有明显的梯度变化特征,降水减少、温度降低;植被随环境梯度的变化也很明显,从南向北依次为森林带、森林草原带和草原带^[26]。流域南部为森林带北缘,主要建群种为辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、槭树等,灌木有黄刺玫(*Rosa xanthina*)、丁香(*Syringa pekinensis*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、绣线菊(*Spiraea pubescens*)等,草本有披针叶苔草(*Carex lanceolata*)、长芒草(*Stipa bungeana*)等。流域中部为森林草原带,乔木以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、小叶杨(*Populus Simonii*)等人工林为主,灌丛为柠条(*Caragana intermedia*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等人工灌丛及封禁后形成的黄刺玫、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、杠柳(*Periploca sepium*)等天然灌丛,草本主要是铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、长芒草、白羊草(*Bothriochloa ischaemun*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)等。流域北部草原带是黄土高

原向沙地过渡的敏感区域,植被属温带干旱草原型,主要物种有芨芨蒿(*Artemisia giraldii*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、百里香(*Thymus mongolicus*)等^[27]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择与调查

于2011年7—8月份和2012年7—9月份在延河流域3个植被带各选取3个典型小流域(森林带的毛堡则流域、尚和年流域、洞子沟流域,森林草原带的三王沟流域、陈家圪流域、张家河流域,草原带的周家山流域、石子湾流域、高家沟流域)(图1),每个流域选取3对阴阳坡沟系统作为研究对象。共选取了100个样地(森林带25个,森林草原带43个,草原带32个)。植被调查样方尺寸视植被类型而定(乔木10 m×10 m,灌木5 m×5 m,草地2 m×2 m)。在每个样地内基本按对角线方向布设3个2 m×0.1 m样区(共308个,森林带88个,森林草原带124个,草原带96个)进行根系样品采集。

100个样地共包括18种典型的植物群落^[27],森林带(FZ)、森林草原带(FSZ)、草原带(SZ)分别有8种、10种、6种群落类型,具体信息如表1所示。

1.2.2 根系样品采集与测定

用土钻法采集根系样品,在每个样区内取2个样(共616个,森林带176个,森林草原带248个,草原带192个)。清除地上残存物,用根系取样器($\Phi=9$ cm)采集0~20 cm土层根系样品,将样品用0.5 mm的铜筛洗净,用电子游标卡尺测定根系直径,拣出细根(直径 $d\leq 2$ mm)并分成2个径级(直

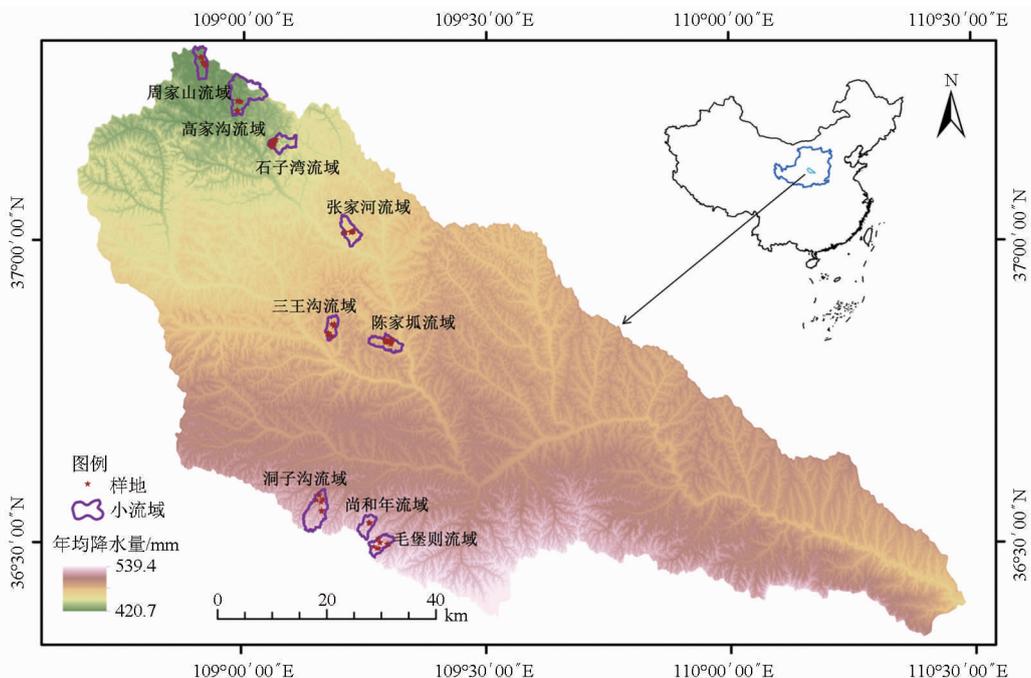


图1 延河流域和典型小流域位置及样地分布示意图

Fig. 1 Location of Yan river basin, small watersheds and sampling plots

表1 不同群落类型基本信息
Tab.1 Basic information of communities

植被带	群落类型	样地数	物种数	乔木层 盖度/%	灌木层 盖度/%	草本层 盖度/%	群落 盖度/%	有机质 质量比/ (g·kg ⁻¹)	全氮 质量比/ (g·kg ⁻¹)	土壤团聚体 平均质量 直径/mm
森林带	SHDP	4	21 ± 2	26 ± 9	39 ± 12	23 ± 6	76 ± 9	34.80 ± 5.52	2.06 ± 0.08	2.78 ± 0.08
	CLP	2	22 ± 2	25 ± 15	12 ± 6	45 ± 15	72 ± 13	42.61 ± 5.62	2.07 ± 0.06	3.31 ± 0.05
	LTP	3	23 ± 6	65 ± 15	22 ± 12	37 ± 10	95 ± 0	43.77 ± 5.87	2.57 ± 0.01	3.18 ± 0.12
	HHP	3	23 ± 4		40 ± 20	18 ± 2	58 ± 22	11.71 ± 1.50	1.16 ± 0.05	2.54 ± 0.02
	GL	3	20 ± 6		7 ± 2	18 ± 12	25 ± 10	8.85 ± 0.80	0.88 ± 0.01	2.78 ± 0.32
	LGB	3	20 ± 4		10 ± 4	13 ± 10	24 ± 14	9.77 ± 0.24	0.52 ± 0.01	3.33 ± 0.01
	DW	3	20 ± 6			33 ± 2	33 ± 2	16.83 ± 4.55	1.04 ± 0.20	3.28 ± 0.05
	TG	4	19 ± 2			33 ± 8	33 ± 8	11.59 ± 1.22	0.79 ± 0.03	3.19 ± 0.14
森林草原带	DZ	3	22 ± 3		13 ± 7	35 ± 5	48 ± 12	10.21 ± 0.0	0.57 ± 0.05	3.20 ± 0.03
	LGB	4	14 ± 0		70 ± 2	25 ± 5	29 ± 3	6.28 ± 0.55	0.52 ± 0.04	3.11 ± 0.05
	ST	3	22 ± 3		25 ± 5	25 ± 15	35 ± 5	7.73 ± 0.91	0.53 ± 0.07	3.23 ± 0.02
	ZH	3	26 ± 0			35 ± 0	35 ± 0	5.33 ± 0.22	0.47 ± 0.01	3.33 ± 0.01
	TJD	3	12 ± 1			42 ± 3	42 ± 3	6.95 ± 0.40	0.52 ± 0.01	3.34 ± 0.01
	TC	3	22 ± 2			23 ± 7	23 ± 7	6.11 ± 0.42	0.50 ± 0.01	3.13 ± 0.10
	TG	9	22 ± 1			28 ± 5	28 ± 5	6.68 ± 1.09	0.44 ± 0.03	3.15 ± 0.03
	JT	3	30 ± 0			46 ± 0	46 ± 0	9.45 ± 0.60	0.53 ± 0.01	3.29 ± 0.05
	BD	5	20 ± 2			37 ± 0	37 ± 6	8.89 ± 0.78	0.54 ± 0.06	3.05 ± 0.02
	BY	7	17 ± 1			31 ± 7	31 ± 7	6.70 ± 0.33	0.45 ± 0.07	3.22 ± 0.04
草原带	ST	3	28 ± 8		60 ± 15	55 ± 17	86 ± 4	5.92 ± 0.68	0.43 ± 0.01	2.85 ± 0.03
	BL	4	19 ± 1			39 ± 1	39 ± 1	7.42 ± 0.18	0.41 ± 0.01	2.88 ± 0.02
	DW	8	21 ± 2			47 ± 11	47 ± 11	9.86 ± 0.14	0.57 ± 0.04	3.15 ± 0.18
	TG	8	22 ± 1			38 ± 6	38 ± 6	6.40 ± 0.25	0.37 ± 0.01	3.07 ± 0.05
	TJD	6	20 ± 1			35 ± 0	35 ± 0	6.98 ± 0.20	0.54 ± 0.01	3.18 ± 0.01
	TY	3	35 ± 2			61 ± 16	61 ± 16	11.45 ± 0.49	0.67 ± 0.06	2.67 ± 0.30

注:森林带:SHDP,三角槭-黄刺玫-丁香-披针叶苔草群落;CLP,侧柏-狼牙刺-披针叶苔草群落;LTP,辽东栎-土庄绣线菊-披针叶苔草群落;HHP,虎榛子-黄刺玫-披针叶苔草群落;GL,杠柳群落;LGB,狼牙刺-杠柳-白羊草群落;DW,达乌里胡枝子群落;TG,铁杆蒿群落。

森林草原带:DZ,丁香-中华卷柏群落;LGB,狼牙刺-杠柳-白羊草群落;ST,沙棘-铁杆蒿群落;BD,白羊草-达乌里胡枝子群落;BY,白羊草群落;TJD,铁杆蒿-芡蒿-达乌里胡枝子群落;TC,铁杆蒿群落;TC,铁杆蒿-长芒草群落;JT,芡蒿-铁杆蒿群落;ZH,中华卷柏群落。

草原带:ST,沙棘-铁杆蒿群落;BL,百里香群落;DW,达乌里胡枝子群落;TJD,铁杆蒿-芡蒿-达乌里胡枝子群落;TG,铁杆蒿群落;TY,铁杆蒿-野菊花群落。下同。

径 $d \leq 1$ 和 $d = 1 \sim 2$ mm),再用直尺分别测量不同径级的根系长度,然后在 85°C 下干燥至质量恒定称其干质量^[28]。

1.2.3 数据分析

(1)细根生物量:某一时刻单位面积内实存生活的有机物质(干质量)总量,单位 g/m^2 ,计算公式为

$$R_B = \frac{W}{(0.09/2)^2 \pi}$$

式中 W ——平均每根土芯不同径级细根干质量, g

(2)根长密度:单位面积内根系长度,单位为 m/m^2 ,计算公式为

$$R_{LD} = \frac{L}{(0.09/2)^2 \pi}$$

式中 L ——不同径级细根总长度, m

(3)比根长:单位面积内根长密度和生物量的

比值,单位为 m/g ,计算公式为

$$S_{RL} = R_{LD}/R_B$$

1.2.4 数据处理

数据处理采用 Excel 软件进行,采用 SigmaPlot 10.0 软件作图。利用 SPSS 16.0 软件对数据进行统计分析,用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小差异显著法(LSD)比较不同植被类型间细根参数的差异($\alpha = 0.05$),数据用平均值 \pm 标准差表示。

2 结果与分析

2.1 不同径级的细根分布特征

3个植被带中,直径 $d \leq 1$ mm 的根系根长密度比例最大,占总细根的 96% ~ 98%,直径 $1 \sim 2$ mm 的根系根长密度只占不足 4%;直径 $d \leq 1$ mm 的根系生物量占总细根生物量的 73% ~ 87%,直径 $1 \sim$

2 mm 的根系生物量占 13% ~ 27%。直径 $d \leq 1$ mm 根系的比根长在 7.76 ~ 12.05 m/g 之间, 直径 1 ~

2 mm 根系的比根长在 0.73 ~ 1.72 m/g 之间 (图 2)。

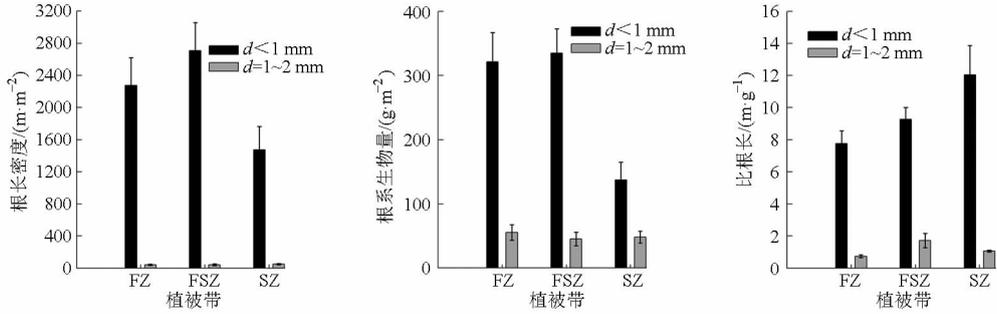


图 2 不同植被带不同径级根系参数的分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of root parameters with different diameter classes in different vegetation zones

在不同群落类型中, 不同径级根系参数的变化趋势一致, 直径 $d \leq 1$ mm 的根系占最大比例。在森林带的 8 种群落和森林草原带的 10 种群落中, 直径 $d \leq 1$ mm 根系的根长密度所占比例最大 (96% 以上), 根系生物量占 74.69 ~ 94.81%, 比根长在 4.79 ~ 13.67 m/g 之间。在草原带的 6 种群落中, 铁杆蒿-茭蒿-达乌里胡枝子群落直径 $d \leq 1$ mm 根系的根长

密度和根系生物量所占比例最小, 分别占细根的 89.06% 和 52.53%; 其他群落直径 $d \leq 1$ mm 根系的根长密度占 94% 以上, 根系生物量在 68% 以上, 直径 $d \leq 1$ mm 的根系生物量所占比例相对于森林带和森林草原带较小, 比根长在 7.14 ~ 12.26 m/g 之间 (表 2)。

表 2 不同径级根系参数的分布特征

Tab. 2 Distribution characteristics of root parameters with different diameter classes

植被带	群落类型	根长密度/($m \cdot m^{-2}$)				根系生物量/($g \cdot m^{-2}$)				比根长/($m \cdot g^{-1}$)	
		$d \leq 1$ mm	百分 比/%	$d = 1 \sim 2$ mm	百分 比/%	$d \leq 1$ mm	百分 比/%	$d = 1 \sim 2$ mm	百分 比/%	$d \leq 1$ mm	$d = 1 \sim 2$ mm
森林带	SHDP	3 594.75 ± 699.86	99.22	28.26 ± 6.67	0.78	553.26 ± 101.49	91.82	49.28 ± 13.55	8.18	6.52 ± 0.44	0.61 ± 0.05
	CLP	3 128.28 ± 219.27	97.91	66.87 ± 12.61	2.09	407.29 ± 49.28	83.67	79.46 ± 17.55	16.32	7.78 ± 0.41	0.86 ± 0.03
	LTP	1 836.45 ± 190.88	96.84	60.00 ± 6.09	3.16	390.63 ± 62.43	81.48	88.79 ± 13.37	18.52	4.79 ± 0.29	0.69 ± 0.03
	HHP	3 316.14 ± 106.14	98.56	48.49 ± 4.00	1.44	526.26 ± 11.88	88.06	71.35 ± 9.25	11.94	6.30 ± 0.12	0.69 ± 0.03
	GL	2 306.27 ± 601.88	98.00	46.97 ± 19.64	2.00	246.92 ± 54.18	84.48	45.37 ± 11.35	15.52	9.14 ± 0.46	0.93 ± 0.22
	LGB	686.71 ± 96.06	97.95	14.34 ± 7.06	2.05	70.43 ± 5.85	78.26	19.56 ± 9.10	21.74	10.12 ± 2.23	0.67 ± 0.07
	DW	1 963.18 ± 681.05	99.36	12.71 ± 2.05	0.64	198.55 ± 46.20	87.52	28.31 ± 9.51	12.48	9.26 ± 1.38	0.57 ± 0.18
	TG	1 395.5 ± 161.27	96.39	52.33 ± 15.01	3.61	178.13 ± 30.55	74.69	60.36 ± 13.93	25.31	8.20 ± 1.00	0.84 ± 0.06
森林草原带	DZ	6 488.41 ± 503.81	99.63	23.87 ± 0.52	0.37	805.31 ± 123.94	94.81	44.05 ± 9.99	5.19	8.26 ± 0.67	0.61 ± 0.17
	LGB	2 052.78 ± 130.80	98.31	35.27 ± 11.37	1.69	340.33 ± 29.96	83.02	69.62 ± 0.89	16.98	6.06 ± 0.15	0.50 ± 0.16
	ST	1 197.37 ± 338.41	96.71	40.79 ± 12.12	3.29	104.29 ± 36.79	93.91	6.76 ± 1.78	6.09	12.39 ± 1.36	6.08 ± 0.80
	ZH	2 630.57 ± 327.52	98.06	52.17 ± 17.73	1.94	341.88 ± 22.90	82.01	74.98 ± 31.06	17.99	7.88 ± 1.51	0.81 ± 0.17
	TJD	4 915.60 ± 740.88	98.74	62.83 ± 15.66	1.26	669.98 ± 28.49	89.53	78.36 ± 14.27	10.47	7.27 ± 0.80	0.78 ± 0.06
	TC	2 371.81 ± 365.57	99.12	21.05 ± 0.05	0.88	357.29 ± 31.35	88.92	44.51 ± 23.12	11.08	6.56 ± 0.45	1.82 ± 1.46
	TG	2 156.63 ± 308.46	98.17	40.30 ± 5.38	1.83	298.85 ± 55.56	84.76	53.75 ± 10.60	15.24	7.82 ± 0.45	1.21 ± 0.37
	JT	1 389.53 ± 81.81	97.41	36.98 ± 14.70	2.59	133.44 ± 3.05	78.09	37.44 ± 5.60	21.91	10.40 ± 0.38	0.91 ± 0.26
草原带	BD	2 291.78 ± 546.39	97.74	53.10 ± 16.11	2.26	179.90 ± 33.45	88.36	23.71 ± 6.00	11.64	12.42 ± 0.77	2.07 ± 0.25
	BY	1 602.28 ± 172.52	97.21	45.96 ± 17.94	2.79	117.48 ± 11.57	85.98	19.16 ± 3.17	14.02	13.67 ± 0.84	2.42 ± 0.83
	ST	1 832.02 ± 449.19	98.91	20.24 ± 0.29	1.09	147.05 ± 46.53	86.87	22.23 ± 0.05	13.13	13.26 ± 1.33	0.91 ± 0.01
	BL	1 543.17 ± 208.45	97.66	37.04 ± 11.76	2.34	84.46 ± 2.60	72.32	32.33 ± 9.84	27.68	18.15 ± 1.91	1.13 ± 0.02
	DW	2 634.79 ± 711.86	98.86	30.43 ± 7.06	1.14	268.13 ± 83.43	89.25	32.29 ± 7.73	10.75	12.26 ± 2.43	0.96 ± 0.09
	TG	967.92 ± 117.39	94.96	51.32 ± 5.12	5.04	112.20 ± 18.01	68.95	50.52 ± 11.79	31.05	9.47 ± 2.67	1.09 ± 0.17
TJD	874.87 ± 156.77	89.06	107.47 ± 9.82	10.94	124.82 ± 5.30	52.53	112.78 ± 13.36	47.47	7.14 ± 1.56	0.96 ± 0.03	
TY	1 007.64 ± 84.47	95.35	49.15 ± 16.13	4.65	86.04 ± 9.96	68.61	39.38 ± 12.45	31.40	11.98 ± 0.94	1.22 ± 0.03	

2.2 不同植物群落的细根分布特征

3个植被带不同根系参数表现出不同的变化趋势,根长密度在 $1\ 660.02 \sim 2\ 543.89\ \text{m}/\text{m}^2$ 之间变化,根长密度在森林草原带最高,草原带最低,且具有显著性差异($P < 0.05$);根系生物量在 $198.33 \sim$

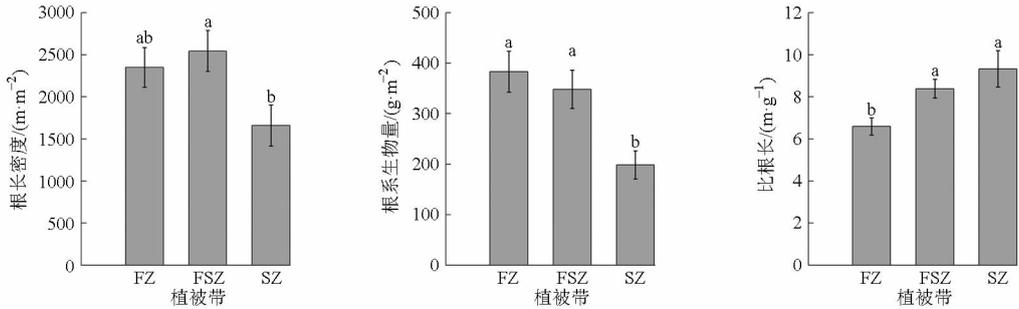


图3 不同植被带的根系参数特征

Fig. 3 Root parameters characteristics in different vegetation zones

对不同植物群落而言,不同根系参数表现各异,但根长密度和根系生物量的变化趋势基本类似,比根长则表现为与之相反的趋势。在森林带,不同群落的根长密度变化范围为 $701.05 \sim 3\ 623.01\ \text{m}/\text{m}^2$,根系生物量为 $89.99 \sim 602.5\ \text{g}/\text{m}^2$,比根长在 $3.96 \sim 8.66\ \text{m}/\text{g}$ 之间。对于乔、灌群落,除狼牙刺-杠柳-白羊草群落和杠柳群落外,辽东栎-土庄绣线菊-披针叶苔草群落的根长密度和比根长显著低于其他

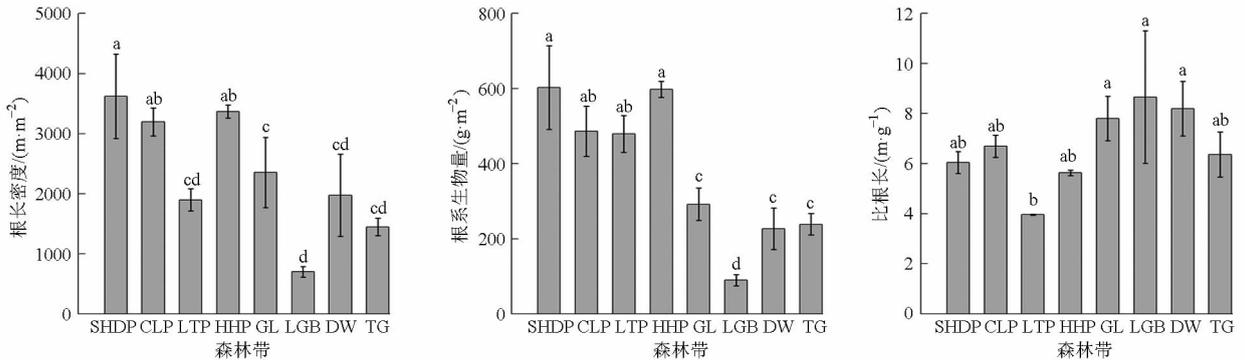


图4 森林带不同群落的根系参数特征

Fig. 4 Root parameters characteristics of different communities in forest zone

为 $1\ 238.15 \sim 6\ 512.27\ \text{m}/\text{m}^2$,根系生物量为 $111.05 \sim 849.36\ \text{g}/\text{m}^2$,比根长在 $5.10 \sim 12.07\ \text{m}/\text{g}$ 之间。丁香-中华卷柏群落的根长密度和根系生物量显著高于其他群落($P < 0.05$);狼牙刺-杠柳-白羊草群落的根长密度和根系生物量居中,但比根长显著低于其他群落($P < 0.05$);沙棘-铁杆蒿群落的根长密度和根系生物量显著低于其他群落($P < 0.05$),比根长则显著高于其他群落($P < 0.05$)。在草本群落中,以白羊草为优势种的群落,根长密度和根系生物量显著低于其他群落($P < 0.05$),比根长显著高于其他群落($P < 0.05$);以铁杆蒿为优势种的群落,各根系参数居中;以达乌里胡枝子为优势种的群落,根

$383.00\ \text{g}/\text{m}^2$ 之间,从森林带到草原带呈递减趋势,草原带显著低于其他2个植被带($P < 0.05$);比根长在 $6.60 \sim 9.33\ \text{m}/\text{g}$ 之间,从森林带到草原带呈递增趋势,森林带显著低于其他2个植被带($P < 0.05$)(图3)。

乔、灌群落($P < 0.05$),根系生物量与其他乔、灌群落无显著性差异。但整体上,乔、灌群落的根长密度和根系生物量显著高于草本群落($P < 0.05$),比根长的变化趋势与根长密度和根系生物量则相反,草本群落显著高于乔、灌群落($P < 0.05$),达乌里胡枝子群落和铁杆蒿群落的根系参数无显著性差异($P > 0.05$)(图4)。

在森林草原带,不同群落的根长密度变化范围

长密度和根系生物量较高,比根长则较低;铁杆蒿-菱蒿-达乌里胡枝子群落的根长密度和根系生物量显著高于其他群落($P < 0.05$),比根长显著低于以白羊草为优势种的群落和沙棘-铁杆蒿群落($P < 0.05$)(图5)。

在草原带,不同群落的根长密度变化范围为 $982.34 \sim 2\ 665.21\ \text{m}/\text{m}^2$,根系生物量为 $116.78 \sim 300.41\ \text{g}/\text{m}^2$,比根长在 $4.09 \sim 11.19\ \text{m}/\text{g}$ 之间。沙棘-铁杆蒿群落各根系参数居中;达乌里胡枝子群落的根长密度和根系生物量显著高于其他群落($P < 0.05$),比根长较低;百里香群落的比根长显著高于其他群落($P < 0.05$),但根长密度和根系生物量较

低;以铁杆蒿为优势种的群落,根长密度显著低于其他群落($P < 0.05$),但群落中次优种为达乌里胡枝子时根系生物量较高,比根长最低;次优种为白羊草时根系生物量较低,比根长较高(图 6)。

可以看出,乔、灌群落根长密度和根系生物量高于草本群落($P < 0.05$),比根长较低;以狼牙刺、杠

柳、沙棘、白羊草为优势种的群落,其根长密度和根系生物量均低于其他群落,比根长较高;以达乌里胡枝子为优势种的群落则表现出相反的趋势,根长密度和根系生物量均较高,比根长较低;在铁杆蒿群落中,当次优种为达乌里胡枝子时,根系生物量较高;次优种为白羊草时,比根长较高。

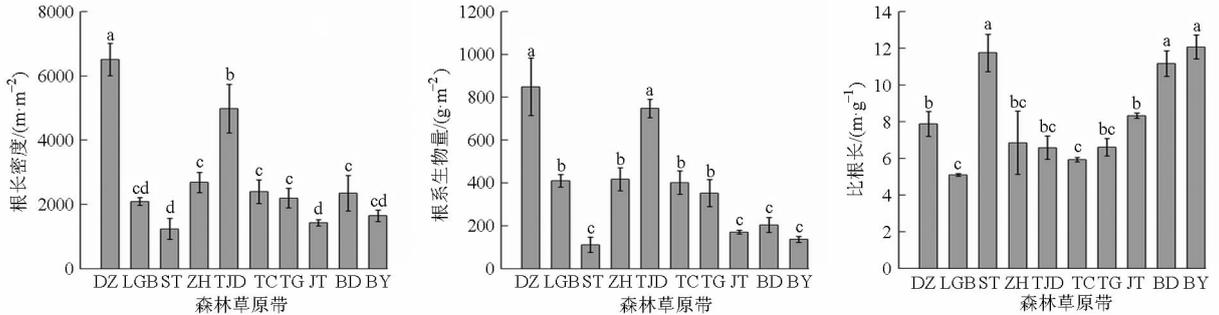


图 5 森林草原带不同群落的根系参数特征

Fig. 5 Root parameters characteristics of different communities in forest steppe zone

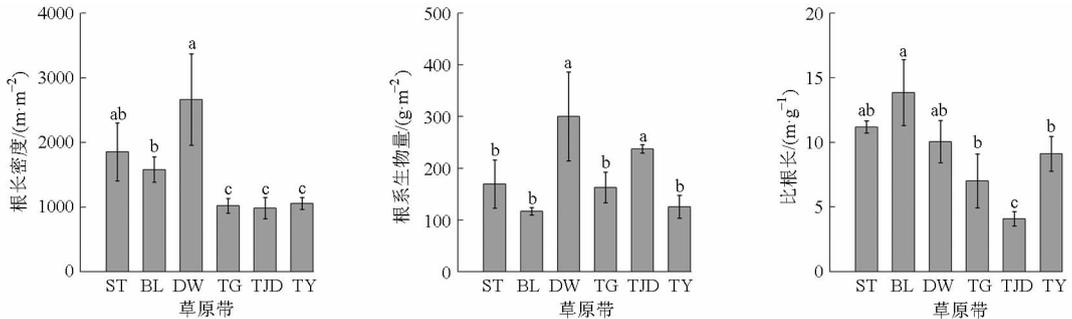


图 6 草原带不同群落的根系参数特征

Fig. 6 Root parameters characteristics of different communities in steppe zone

2.3 同一优势种群落的细根分布特征

由森林带的乔、灌、草本群落到草原带的草本群落,环境条件发生改变的同时群落类型也随之而变,但群落物种随环境条件的更替是连续性的,因此,不同植被带会有相同优势种的群落出现。同一优势种群落在不同环境条件下,根系参数的变化趋势略有差异(表 3)。

铁杆蒿群落在 3 个植被带均有分布,根长密度和根系生物量在森林草原带最高,草原带最低,且具有显著性差异($P < 0.05$);狼牙刺-杠柳-白羊草群落在森林带和森林草原带有分布,根长密度和根系生物量表现为森林草原带 > 森林带($P < 0.05$);铁杆蒿-芨芨草-达乌里胡枝子群落在森林草原带和草原带有分布,根长密度和根系生物量表现为森林草原带 > 草原带($P < 0.05$);以上群落的根系比根长差异均不显著($P > 0.05$)。达乌里胡枝子群落在森林带和草原带有分布,沙棘-铁杆蒿群落在森林草原带和草原带有分布,群落根系参数均无显著性差异。

以铁杆蒿为优势种的草本群落在 3 个植被带均有分布,在森林草原带的细根根长密度和根系生物

量最高,但比根长无显著性差异;狼牙刺-杠柳-白羊草群落也表现出类似的趋势,在森林草原带,根长密度和根系生物量最高,但比根长无显著性差异。由此可以看出,在森林草原带分布着以狼牙刺、杠柳、铁杆蒿、白羊草为优势种的群落,其根系参数要显著高于其他植被带。

3 讨论

在延河流域 3 个植被带不同群落类型中,直径 $d \leq 1$ mm 的根系根长密度和根系生物量分别占总细根的 90% 和 53% 以上。对黄土高原丘陵区刺槐林、落叶灌木、退耕草地和沙蒿群落 4 种植被类型不同径级细根参数分布特征的研究结果表明,直径 $d \leq 1$ mm 细根生物量占总细根的比例大于 62.0%,与本研究结果类似^[19]。直径 $d \leq 1$ mm 的根系不仅在植物的生长活动中贡献很大,可有效吸收土壤水分、养分及微量元素等,供给植物生长所需;也是不同植物群落改善土壤结构稳定性、提高土壤入渗及增强土壤抗冲性的有效根系^[29]。也有研究指出直径 $d \leq 1$ mm 的细根在提高土壤水力学效应方面的贡献最

表3 同一优势物种群落在不同植被带的根系参数特征

Tab. 3 Root parameters characteristics of the same dominant species community in different vegetation zones

群落类型	植被带	根长密度/($\text{m}\cdot\text{m}^{-2}$)	根系生物量/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	比根长/($\text{m}\cdot\text{g}^{-1}$)
TG	FZ	1 447.83 ± 146.69 ^{ab}	238.49 ± 28.62 ^{ab}	6.36 ± 0.90 ^a
	FSZ	2 196.93 ± 307.60 ^a	352.60 ± 62.80 ^a	6.61 ± 0.47 ^a
	SZ	1 019.24 ± 112.27 ^b	162.72 ± 29.80 ^b	7.01 ± 2.08 ^a
LGB	FZ	701.05 ± 89.12 ^b	89.99 ± 14.83 ^b	8.66 ± 2.64 ^a
	FSZ	2 088.05 ± 119.42 ^a	409.95 ± 29.07 ^a	5.1 ± 0.07 ^a
DW	FZ	1 975.89 ± 682.47 ^a	226.87 ± 54.87 ^a	8.19 ± 1.09 ^a
	SZ	2 665.21 ± 707.74 ^a	300.41 ± 85.87 ^a	10.05 ± 1.64 ^a
TJD	FSZ	4 978.43 ± 756.55 ^a	748.34 ± 42.76 ^a	6.58 ± 0.64 ^a
	SZ	982.34 ± 166.59 ^b	237.61 ± 8.05 ^b	4.09 ± 0.56 ^a
ST	FSZ	1 238.15 ± 326.28 ^a	111.05 ± 35.33 ^a	11.75 ± 1.02 ^a
	SZ	1 852.26 ± 449.48 ^a	169.28 ± 46.58 ^a	11.19 ± 0.48 ^a

大,也能有效提高土壤水稳性团聚体数量^[6-7]。这说明直径 $d \leq 1 \text{ mm}$ 的根系在细根中占有重要地位,有较大比例细根的植物群落在改善土壤结构方面发挥着重要作用。各植被带不同群落,土壤团聚体平均质量直径在 2.54 ~ 3.34 mm 之间(表1),表明土壤的团聚度较高,大团聚体含量较高,使土壤的孔隙、通气性较好,土壤结构稳定性较强^[30],再加上植物根系对土壤的粘结和机械加固作用,可提高土壤的抗侵蚀性。

本研究中,细根生物量从延河流域南部森林带到北部草原带呈递减趋势,与对黄土丘陵区从南到北4种植被类型的研究结果一致,即细根生物量从南到北随纬度升高呈显著减小趋势^[19]。这是由于南部森林带多为乔、灌群落,根系生物量显著高于草本群落($P < 0.05$);由于森林草原带水热条件相对较差,草本群落占优势,但也有少数灌木群落的分布;北部草原带水热肥等环境条件更加恶劣,基本为草本群落。草本群落细根生物量在 89.99 ~ 300.41 g/m^2 之间,也有研究发现黄土高原丘陵区不同植被类型的根系生物量在 64 ~ 292 g/m^2 之间^[19],与本研究结果相似。南部森林带和中部森林草原带的乔、灌群落根系生物量在 409.95 ~ 849.36 g/m^2 之间,与暖温带落叶阔叶林细根生物量的平均值(737 g/m^2)^[31]相近。根系生物量可以反映该植物在某一土层深度的生长能力,积累的生物量越多,说明在该土层中利用养分、水分的能力越强^[32],旺盛的植物根系可提高土壤抗冲性,增加土壤孔隙度,改善土壤有益微生物活性,推进土壤有机质氧化分解速度^[33]。乔、灌群落的根系生物量高于草本群落;以达乌里胡枝子为优势种的群落根系生物量较高;在铁杆蒿群落中,当次优种为达乌里胡枝子时,根系生物量也较高。这表明乔、灌群落和以达乌里胡枝子为次优种或优势种的群落根系生长能力更强,根

系更发达。

根长密度反映着植物根系吸收水分和养分的潜力^[34]。一般根长密度越大,在养分吸收方面就越具有优势,具有更强的活力和抵抗不良环境的能力;另外,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,提高土壤抗剪强度,丰富土壤有机碳和全氮含量^[17]。在本研究中,草原带的根长密度显著低于其他植被带($P < 0.05$);草本群落的根长密度在 982.34 ~ 2 682.74 m/m^2 之间,乔、灌群落的根长密度在 1 238.15 ~ 6 212.27 m/m^2 之间。根长密度表现出与根系生物量一致的变化趋势,乔、灌群落高于草本群落;以达乌里胡枝子为次优种或优势种的群落根长密度较高,表明乔、灌群落和以达乌里胡枝子为次优种或优势种的群落的植物根系在吸收土壤水分养分方面更具优势。这些群落的土壤团聚体平均质量直径、有机质、全氮含量均较高(表1),说明较高的根系生物量和根长密度不仅可以提高植物群落根系的吸收能力,也能改善土壤养分含量和土壤稳定性,提高土壤的抗侵蚀性。

比根长是反映根系获利(养分获取)与代价(根系构造与维护)关系的参数,是代表植物地下竞争力的形态指标^[35]。通常具有较高比根长的植物被认为具有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^[36]。在本研究中,从南部森林带到北部草原带比根长呈递增趋势,这是由于从南到北根长密度和根系生物量呈减小的趋势,但根系生物量减幅较大,因此,比根长表现出与根长密度和根系生物量相反的趋势。3个植被带不同植物群落比根长变化范围在 3.96 ~ 12.07 m/g 之间。根长密度和根系生物量会随着环境条件和植物自身特性的不同而发生变化,具有较高的可塑性^[15],而比根长随根长密度和根系生物量的变化而变化,当这两者的变幅不一致时,比根长会表现出明显不同的变化趋

势,比根长并没有表现出较高的可塑性。对黄土高原白羊草、沙棘和辽东栎细根比根长研究发现,0~10 cm 土层细根比根长为沙棘 > 辽东栎 > 白羊草^[37],而在本研究中,比根长表现为草本群落显著高于乔、灌群落($P < 0.05$),但以狼牙刺和杠柳为优势种的群落,也具有较高的比根长;以白羊草为优势种的群落比根长较高。这说明草本群落和以狼牙刺、杠柳、白羊草为优势种的群落,具有较高的水分、养分潜在吸收率和生长速率,从这一方面也可以说明这 3 种植物一般多见于阳坡,对阳坡干旱、强光、贫瘠的环境具有较强的适应性。也有研究从狼牙刺和杠柳的生长、生理生化特征方面阐明了这种植物具有抗旱、耐瘠薄、适应性强的特点,且主要分布在阳坡环境中^[38-39]。白羊草属于 C_4 植物,本身就更能适应干旱、强光的环境,可高效利用土壤水分、养分及光照资源^[40];另外,白羊草为须根植物,根长密度较大,但细小的须根生物量很低,因此,白羊草具有较大的比根长,白羊草的这种细小的毛根可发挥其对土壤的网络固持作用,有效提高土壤抗蚀性。

不同植物群落由于优势种各异,植物种自身的生物学特性对群落根系参数的分布有很大影响。乔、灌群落由于具有较大的冠幅和地上生物量,为了供给地上部分的生长,植物会向根系投入更多的资源以获取足够的水分和养分;由于细根是吸收水分、养分的主要途径,且土壤表层是提供植物所需水分、养分和热量的主要场所,因此,乔、灌群落的土壤表层具有较高的细根根长密度和根系生物量,可增强根系吸收能力,提高根系生长能力,以维持植物生长。但在本研究中,森林带以狼牙刺和杠柳为优势种的群落,其根系生物量和根长密度均较低,甚至低于某些草本群落,这可能是由于调查的狼牙刺和杠柳群落灌木层盖度不足 10%,草本层盖度不足 20%,群落整体盖度不足 30%,较低的植被覆盖度,会导致较低的根长密度和根系生物量。在草本群落中,达乌里胡枝子作为群落单优种或共优种时,群落具有较高的细根根长密度和根系生物量,一方面与

其较高的植被盖度(40%左右)有关;另一方面与其自身的根系构型有关,达乌里胡枝子根系生长快,主根分叉多且不十分明显,0~20 cm 的浅层根系发达,其基部也会产生不定根^[41],这可能是达乌里胡枝子群落表层维持较高的根长密度和根系生物量的原因,达乌里胡枝子的这种特性也可能是其作为天然草地群落优势种且分布广泛的原因。

4 结论

(1)在延河流域 3 个植被带不同群落类型中,直径 $d \leq 1$ mm 的根系根长密度和根系生物量分别占总细根的 90% 和 53% 以上。直径 $d \leq 1$ mm 的根系不仅在植物的生长活动中贡献很大;也是不同植物群落改善土壤结构、提高土壤入渗及增强土壤抗冲性的有效根系。各植被带不同群落土壤的团聚度较高,较高的大团聚体含量使土壤的孔隙、通气性较好,土壤结构稳定性较强,再加上植物根系对土壤的粘结和机械加固作用,可提高土壤的抗侵蚀性。

(2)细根生物量从延河流域南部森林带到北部草原带呈递减趋势;草原带的根长密度显著低于其他植被带($P < 0.05$)。乔、灌群落的细根生物量和根长密度高于草本群落;以达乌里胡枝子为次优种或优势种的群落细根生物量和根长密度较高。较高的根系生物量和根长密度不仅可以提高植物群落根系的吸收能力,也能改善土壤养分含量和土壤稳定性,提高土壤的抗侵蚀性。

(3)从南部森林带到北部草原带比根长呈递增趋势。比根长随根长密度和根系生物量的变化而变化,当这两者的变幅不一致时,比根长会表现出明显不同的变化趋势,比根长并没有表现出较高的可塑性。比根长表现为草本群落显著高于乔、灌群落($P < 0.05$)。以狼牙刺、杠柳、白羊草为优势种的群落比根长较高,表明这些群落具有较高的水分、养分潜在吸收率和生长速率,从这一方面也可以说明狼牙刺、杠柳、白羊草这 3 种植物一般多见于阳坡,对阳坡干旱、强光、贫瘠的环境具有较强的适应性。

参 考 文 献

- 1 Gyssels G, Poesen J. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2003, 28(4): 371-384.
- 2 Stokes A, Atger C, Bengough A G, et al. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides[J]. *Plant & Soil*, 2009, 324(1-2): 1-30.
- 3 张宇清,朱清科,齐实,等. 梯田埂坎立地植物根系分布特征及其对土壤水分的影响[J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 500-506.
Zhang Yuqing, Zhu Qingke, Qi Shi, et al. Root system distribution characteristics of plants on the terrace banks and their impact on soil moisture[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 500-506. (in Chinese)
- 4 刘晓丽,马理辉,杨荣慧,等. 黄土半干旱区枣林深层土壤水分消耗特征[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(12): 139-145.
Liu Xiaoli, Ma Lihui, Yang Ronghui, et al. Deep soil water depletion characteristic of jujube plantation in loess semiarid region[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(12): 139-145. (in Chinese)

- 5 黄建辉, 韩兴国, 陈灵芝. 森林生态系统根系生物量研究进展[J]. 生态学报, 1999, 19(2): 270-277.
Huang Jianhui, Han Xingguo, Chen Lingzhi. Advances in the research of (fine) root biomass in forest ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(2): 270-277. (in Chinese)
- 6 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]. 水土保持学报, 1997, 11(1): 45-49.
Wu Yan, Liu Shiquan, Fu Xiuqin, et al. Study on improving soil's waterstable aggregates amounts by botanic roots[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1997, 11(1): 45-49. (in Chinese)
- 7 蒋定生, 范兴科, 李新华, 等. 黄土高原水土流失严重地区土壤抗冲性的水平和垂直变化规律研究[J]. 水土保持学报, 1995, 9(2): 1-8.
Jiang Dingsheng, Fan Xingke, Li Xinhua, et al. Study on horizontal and vertical regulation of soil anti-scourability in area with serious soil erosion on Loess Plateau[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1995, 9(2): 1-8. (in Chinese)
- 8 Casper B B, Jackson R B. Plant competition underground[J]. Annual Review of Ecology & Systematics, 1997, 28(4): 545-570.
- 9 Yeaton R I, Travis J, Gilinsky E. Competition and spacing in plant communities: the Arizona upland association[J]. Journal of Ecology, 1977, 65: 587-595.
- 10 卫新东, 汪星, 汪有科, 等. 黄土丘陵区红枣经济林根系分布与土壤水分关系研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 88-97.
Wei Xindong, Wang Xing, Wang Youke, et al. Root distribution and soil water dynamics of jujube plantations in loess hilly regions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 88-97. (in Chinese)
- 11 Hendrick R L, Pregitzer K S. Temporal and depth-related patterns of fine root dynamics in northern hardwood forests[J]. Journal of Ecology, 1996, 84(2): 167-176.
- 12 张良德, 徐学选, 胡伟, 等. 黄土丘陵区燕沟流域人工刺槐林的细根空间分布特征[J]. 林业科学, 2011, 47(11): 31-36.
Zhang Liangde, Xu Xuexuan, Hu Wei, et al. Spatial distribution of fine roots of a *Robinia pseudoacacia* plantation in Yangou watershed in the hilly region of the Loess Plateau[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(11): 31-36. (in Chinese)
- 13 陈芙蓉, 程积民, 于鲁宁, 等. 封育和放牧对黄土高原典型草原生物量的影响[J]. 草业科学, 2011, 28(6): 1079-1084.
Chen Furong, Cheng Jimin, Yu Luning, et al. Effects of fencing and grazing on the biomass of typical steppe in the Loess Plateau[J]. Pratacultural Science, 2011, 28(6): 1079-1084. (in Chinese)
- 14 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.
Liu Dinghui, Li Yong. Mechanism of plant roots improving resistance of soil to concentrated flow erosion[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2003, 17(3): 34-37. (in Chinese)
- 15 胡建忠, 郑佳丽, 沈晶玉. 退耕地人工植物群落根系生态位及其分布特征[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 481-490.
Hu Jianzhong, Zheng Jiali, Shen Jingyu. Discussion of root ecological niche and root distribution characteristics of artificial phyto-communities in rehabilitated fields[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 481-490. (in Chinese)
- 16 韩凤朋, 郑纪勇, 张兴昌. 黄土退耕地植物根系分布特征及其对土壤养分的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 50-55.
Han Fengpeng, Zheng Jiyong, Zhang Xingchang. Plant root system distribution and its effect on soil nutrient on slope land converted from farmland in the Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 50-55. (in Chinese)
- 17 黄林, 王峰, 周立江, 等. 不同森林类型根系分布与土壤性质的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(19): 6110-6119.
Huang Lin, Wang Feng, Zhou Lijiang, et al. Root distribution in the different forest types and their relationship to soil properties[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(19): 6110-6119. (in Chinese)
- 18 李强. 黄土丘陵区植物根系强化土壤抗冲性机理及固土效应[D]. 杨凌: 中国科学院大学, 2014.
Li Qiang. Mechanism of plant roots in improving resistance of soil to concentrated flow erosion and reinforcement in loess hilly region[D]. Yangling: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- 19 邓强, 李婷, 袁志友, 等. 黄土高原4种植被类型的细根生物量和年生产量[J]. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3091-3098.
Deng Qiang, Li Ting, Yuan Zhiyou, et al. Fine root biomass and production of four vegetation types in Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(11): 3091-3098. (in Chinese)
- 20 Hendrick R I. The demography of fine roots in a northern hardwood forest[J]. Ecology, 1992, 73(3): 1094-1104.
- 21 Pregitzer K S. Woody plants, carbon allocation and fine roots[J]. New Phytologist, 2003, 158(3): 421-424.
- 22 Fransen B, Kroon H D, Berendse F. Root morphological plasticity and nutrient acquisition of perennial grass species from habitats of different nutrient availability[J]. Oecologia, 1998, 115(3): 351-358.
- 23 刘晚苟, 山仑, 邓西平. 不同土壤水分条件下土壤容重对玉米根系生长的影响[J]. 西北植物学报, 2002, 22(4): 831-838.
Liu Wan'gou, Shan Lun, Deng Xiping. Effects of soil bulk density on the growth of maize root system under different water condition[J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2002, 22(4): 831-838. (in Chinese)
- 24 Robinson D, Hodge A, Fitter A. Constraints on the form and function of root systems[J]. Ecological Studies, 2003, 168: 1-31.
- 25 王宁. 黄土丘陵沟壑区植被自然更新的种源限制因素研究[D]. 杨凌: 中国科学院大学, 2013.
Wang Ning. The limiting factors in vegetation recruitment in the hilly-gullied region of the Loess Plateau: on species resources aspect[D]. Yangling: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- 26 温仲明, 焦峰, 焦菊英. 黄土丘陵区延河流域潜在植被分布预测与制图[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 1897-1904.
Wen Zhongming, Jiao Feng, Jiao Juying. Prediction and mapping of potential vegetation distribution in Yanhe River catchment in

- hilly area of Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(9):1897-1904. (in Chinese)
- 27 寇萌. 黄土丘陵沟壑区植物改善土壤侵蚀环境的群落生态学特性[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2013.
Kou Meng. The characteristics of community ecology of plant in improving soil erosion environment in the hilly-gullied Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013. (in Chinese)
- 28 王巧利. 黄土丘陵沟壑区植物抵抗土壤侵蚀的机械特性[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2013.
Wang Qiaoli. The mechanical properties of plant in resisting soil erosion in the hilly-gullied Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013. (in Chinese)
- 29 李勇. 黄土高原植物根系与土壤抗冲性[M]. 北京:科学出版社, 1995.
- 30 刘雷. 黄土丘陵区不同植被类型土壤团聚体稳定性及有机碳官能团评价[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2013.
Liu Lei. Soil aggregate stability and functional groups of soil organic carbon under different vegetation on hilly-gully region of Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013. (in Chinese)
- 31 张小全, 吴可红. 森林细根生产和周转研究[J]. 林业科学, 2001, 37(3): 126-138.
Zhang Xiaoquan, Wu Kehong. Fine-root production and turnover for forest ecosystems[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2001, 37(3): 126-138. (in Chinese)
- 32 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.
Zhou Menghua, Cheng Jimin, Wan Huie, et al. Distribution characteristics of the root system of the *Stipa bungeana* Trin. community in Yunwu Mountain[J]. Acta Agrestia Sinica, 2008, 16(3):267-271. (in Chinese)
- 33 焦云祥, 王应刚. 森林对土壤侵蚀的调控作用研究综述[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(36): 13949-13952.
Jiao Yunxiang, Wang Yinggang. Review on regulation of forest to soil erosion[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(36): 13949-13952. (in Chinese)
- 34 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.
- 35 Cornelissen J H C, Lavorel S, Garnier E, et al. A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide[J]. Australian Journal of Botany, 2003, 51(4): 335-380.
- 36 Bauhus J, Khanna P K, Menden N. Aboveground and belowground interactions in mixed plantations of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2000, 30(12): 1886-1894.
- 37 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, Shanguan 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. (in Chinese)
- 38 卜崇峰, 刘国彬, 张文辉. 黄土丘陵沟壑区狼牙刺的生长特征研究[J]. 西北植物学报, 2004, 24(10): 1792-1797.
Bu Chongfeng, Liu Guobin, Zhang Wenhui. Growth characteristics of *Sophora viciifolia* population in the hilly and gully region of Loess Plateau[J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2004, 24(10):1792-1797. (in Chinese)
- 39 安玉艳, 梁宗锁, 郝文芳. 杠柳幼苗对不同强度干旱胁迫的生长与生理响应[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 716-725.
An Yuyan, Liang Zongsuo, Hao Wenfang. Growth and physiological responses of the *Periploca sepium* Bunge. seedlings to drought stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(3):716-725. (in Chinese)
- 40 尹秋龙. 黄土丘陵沟壑区主要植物叶解剖结构及其环境适应性研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2015.
Yin Qiulong. Anatomical structure of main plants and its environmental adaptations in the hilly-gullied Loess Plateau region[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- 41 孙启忠, 韩建国, 桂荣, 等. 科尔沁沙地达乌里胡枝子生物量研究[J]. 中国草地学报, 2001, 23(4): 21-26.
Sun Qizhong, Han Jianguo, Gui Rong, et al. Biomass in *Lespedeza dahurica*[J]. Grassland of China, 2001, 23(4): 21-26. (in Chinese)