

黄土高原白羊草、沙棘和辽东栎细根比根长特性

韦兰英, 上官周平 *

(1. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘要:以黄土高原地区典型草本(白羊草)、灌木(沙棘)和乔木(辽东栎)为对象,研究了 3 种植物细根比根长在不同土层的分布状况以及与其它细根参数和土壤物理因子之间的相关性。结果表明,3 种植物细根比根长的变化范围为 6~55 mm/mg。在 0~80cm 土层,白羊草、沙棘和辽东栎细根比根长变化范围分别为 18~55 mm/mg, 14~40 mm/mg, 6~33 mm/mg。3 种植物 0~80cm 土层平均细根比根长从大到小依次为白羊草>沙棘>辽东栎。3 种植物 0~10cm 土层细根比根长依次为沙棘>辽东栎>白羊草,10~80cm 依次为白羊草>辽东栎>沙棘,表明 3 种植物细根比根长不仅在这两土层中的分布不具一致性,而且与 0~80cm 土层平均比根长也不具有一致性,进一步说明 3 种植物沿土壤剖面的生物量分配策略不同。相关分析表明,3 种植物细根比根长与其它细根参数之间的相互关系各不相同,制约程度存在差异。与土壤物理因子的相关分析表明,3 种植物细根比根长均随土壤含水量的增加而减少。土壤各级水稳性团聚体和土壤颗粒对 3 种植物细根比根长并无一致的影响。

关键词:细根比根长;土壤物理因子;黄土高原

文章编号:1000-0933(2006)12-4164-07 **中图分类号:**Q948,S181 **文献标识码:**A

Specific root length characteristics of three plant species, *Bothriochloa ischaemum*, *Hippophae rhamnoides* and *Quercus liaotungensis* in the Loess Plateau

WEI Lan-Ying, SHANGGUAN Zhou Ping (1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 4164~4170.

Abstract: Plant traits can be morphological, eco-physiological and phenomenological, studies of plant traits which relate to the key plant functions have primarily concentrated on leaf structure and physiology, however, much less is known about the interspecific variations in root structure and physiology. The specific root length (SRL) is one of the plant traits that are related to plant functions such as resource uptake, biomass allocation and root structure and function. It can not only reflect the environmental change, but also provide information about the shaping of itself by climate, soil nutrients or other factors. The vertical distributions of fine roots in the soil profile (0~80cm) for *Bothriochloa ischaemum*, *Hippophae rhamnoides*, *Quercus liaotungensis*, which are three typical plant species in Loess Plateau were studied. The fine roots distributed from 0~80cm soil depth were collected for each 10 cm interval in each experimental plot, and then the fine root traits, soil water content, soil water stable aggregates and soil granules were determined in this study. The results showed that the SRL of *Bothriochloa ischaemum*, *Hippophae rhamnoides*, *Quercus liaotungensis*, was ranging from 18~55 mm/mg, 14~40 mm/mg, 6~33 mm/mg in the 0~80 cm soil profile, respectively. Comparatively, the mean SRL (0~80cm) of three species stood in the following order of *Bothriochloa ischaemum* >

基金项目:西北农林科技大学拔尖人才和团队培养计划资助项目;中国科学院西部之光人才培养计划联合学者资助项目(2005LH01)

收稿日期:2006-05-09;**修订日期:**2006-10-04

作者简介:韦兰英(1980~),女,广西桂林人,硕士,主要从事植物生态研究。E-mail:weilanyingccn@163.com

*通讯作者 Corresponding author. E-mail:shangguan@ms.ismc.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by the Program for New Century Excellent Talents in Universities and the United Scholar's Item of Talent Training Program in West China of Chinese Academy of Sciences(No. 2005LH01)

Received date:2006-05-09;**Accepted date:**2006-10-04

Biography: WEI Lan-Ying, Master, mainly engaged in plant ecology. E-mail:weilanyingccn@163.com

Hippophae rhamnoides > *Quercus liaotungensis*. The mean SRL in the 0—10 cm soil layer for three species were ranked in the order of *Hippophae rhamnoides* > *Bothriochloa ischaemum* > *Quercus liaotungensis*, and that in the 10—80 cm soil layer ranked in the order of *Bothriochloa ischaemum* > *Quercus liaotungensis* > *Hippophae rhamnoides*. It is indicated that three species have different strategies for biomass allocation in different soil profile. The correlation analysis showed that the SRL was negatively correlated with the root biomass and root length density (RLD) for *Bothriochloa ischaemum*, however, it was positively correlated with the root biomass and RLD for *Hippophae rhamnoides*. For *Quercus liaotungensis*, the SRL was negatively correlated with the root biomass, but positively correlated with the RLD. It is suggested that the interactions between root traits were dependent on species. The SRL of three species were all decreased with the soil water content increased. And the relationships between the SRL and soil water stable aggregates and soil granules indicated that different soil physical factors have different effects on the SRL.

Key words: specific root length; soil physical factor; Loess Plateau

细根是植物吸收水分和养分的重要器官,其性状特征对植物的生长和分布具有重要的指示作用,并且能承载一定的环境变化的信息^[1]。细根不仅在碳和养分循环,资源摄取以及全球生物地球化学循环中具有重要作用^[2],而且影响植物群落和生态系统特性^[3,4],因此人们对细根生长、分布、生产和周转、细根生产力和细根动态以及细根与环境之间的关系等进行了大量的研究^[5~8],但关于不同植物细根性状的比较研究却较为有限。由于植物生理功能和形态结构具有一定的协同性,植物在长期进化过程中已形成各种适应类型,其结构特征最能体现环境因子的影响或植物对生境的适应^[9,10]。探明不同种类和生境中植物根系性状特性对于了解根系性状的物种差异以及由于气候和环境因子变化对根系性状的影响和根系性状间的相互关系具有重要作用,且可以进一步了解根系对环境的响应和适应机制。

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^[11]。比根长是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,是反映细根生理功能的一个重要指标,并且与根系功能、根系分泌物、根系寿命、根系呼吸、根系可塑性^[12]和根系增殖^[13]等密切相关。植物根系吸收水分和养分的能力更多的取决于根长而不是生物量,所以具有较大比根长的植物在根系生物量投入方面比具有较小比根长的植物更有效率^[12],因此研究植物比根长对于了解根系功能和探明其生物量分配策略具有重要意义。植物比根长与生长节律密切相关,并且受环境条件影响^[14],一般认为生长较快的植物通常比生长慢的植物具有较大的比根长^[15],而且具有较大比根长的植物在水分和养分获取方面更为有利^[16]。比根长反映了植物对不同生境的适应特征,研究表明紧实土壤使植物比根长降低^[17]。在养分丰富的斑块中,植物通常具有较高的比根长^[18],但在资源缺乏环境中植物比根长较低^[19]或者较高^[14],可见,植物比根长对土壤环境因子的响应并不具有一致性。由于土壤环境具有高度的异质性,因此不同土层深度根系的生长、分布不仅受自身遗传特性的影响,而且也受土壤环境的影响。由于植物在自然环境中的分布与其适应环境的能力密切相关,比根长随植物种类和生长环境而异,目前对不同植物或者同一植物不同土层比根长的研究较少,而对比根长地研究有助于我们较好的理解植物适应环境的机制,因此本文选取黄土高原典型植物白羊草、沙棘和辽东栎进行研究,探明这三种植物对黄土高原这一特殊环境的生存适应机制,为黄土高原植被恢复和生态建设提供理论依据。

1 研究区自然条件和研究方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于黄土高原子午岭北部甘肃省合水县连家砭林场,该区属典型的丘陵沟壑区,平均海拔 1500m。该区年平均气温 7.4℃,≥10℃的积温 2671℃,年均降雨量 587.6mm,干燥度 0.97,阴阳坡水热条件变化较大但无气候的垂直带状变化。土壤为原生或次生黄土,厚度一般为 50~100m,其下为厚约 80~100 m 的红土,以石灰性褐土为主。白羊草(*Bothriochloa schaeumun*),沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和辽东栎(*Quercus liaotungensis*)为该区典型草本、灌木和乔木,其样地基本特征如表 1 示。

1.2 研究方法

在白羊草、沙棘和辽东栎样地内随机选择 3 个点,分别用土钻($\phi=9\text{cm}$)从 0~80cm 分土层(每 10cm 为一

层) 钻取土样, 从各土层钻取的土样中拣出所有根系, 编号后装入塑料袋带回实验室。采集的根系样品, 用水清洗干净后, 按直径 $\Phi \leq 2\text{mm}$ 和 $\Phi > 2\text{mm}$ 分为两级。用根系扫描仪和专业的根系形态学和结构分析应用系统 DT-SACN 对直径 $\Phi \leq 2\text{mm}$ 的根系进行根长的测定分析。扫描后的根系样品置入 80 ℃ 烘箱中, 烘干至恒重, 再分别称重和记录。比根长 = 根长/根系生物量。

表 1 调查样地概况

Table 1 Status of experimental plots					
样地 Plot	坡向 Aspect	坡度 Slope (°)	海拔 Altitude (m)	盖度 Coverage (%)	伴生植物 Main plant species of the vegetation composition
白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i>	阴坡 Shaded slope	20	1330	90	达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i> , 委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i> , 茭蒿 <i>Artemisia giraldii</i> , 白头翁
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	阴坡	20	1343	75	披针苔草 <i>Carex lancifolia</i> , 白头翁 <i>Pulsatilla chinensis</i> , 达乌里胡枝子
辽东栎 <i>Quercus liaotungensis</i>	阴坡	25	1427	80	山杨 <i>Populus davidiana</i> 和白桦 <i>Betula platyphylla</i> , 蛇葡萄 <i>Ampelopsis grossedentata</i> , 虎榛子 <i>Ostryopsis davidiana</i> , 披针苔草

同时测定 0~80 cm 土壤含水量、0~50 cm 土壤水稳性团聚体和土壤颗粒。在 3 个样地内的每个样地随机打 3 个土钻, 用小铝盒每 10cm 土层钻取土样, 直至 80cm 土层, 烘干法测定土壤含水量。从地表以下每 10cm 分层采集原状土样, 用萨维诺夫湿筛法测定土壤水稳性团聚体, 用颗粒分析仪 (Masterixer 2000, UK) 测定土壤颗粒组成。

1.3 数据分析

采用 SPSS 统计分析软件包 (SPSS 11.0 for Windows, Chicago, USA) 对数据进行相关分析、One-Way ANOVA 方差分析, 并用 LSD 法进行多重比较。

2 结果分析

2.1 植物细根比根长在土壤中的分布特点

白羊草、沙棘和辽东栎 0~80cm 土层平均比根长分别为 33、26 mm/mg 和 17.52 mm/mg, 3 种植物比根长变化范围及其在各土层中的分布规律各不相同。白羊草比根长分布范围为 18~55 mm/mg, 其最大比根长分布在 60~70cm 土层, 最小比根长分布在 50~60cm 土层。沙棘比根长分布范围为 14~40 mm/mg, 其最大比根长和最小比根长分别分布在 40~50cm 土层和 20~30cm 土层。辽东栎比根长分布范围为 6~33 mm/mg, 其最大比根长和最小比根长分别分布在 60~70cm 土层和 40~50cm 土层。白羊草和辽东栎细根比根长在 0~80cm 土层随土层加深而增加, 沙棘细根比根长随土层加深而下降 (图 1)。相关分析表明土层深度分别能解释白羊草、沙棘和辽东栎细根比根长变异的 13%、34% 和 7%。

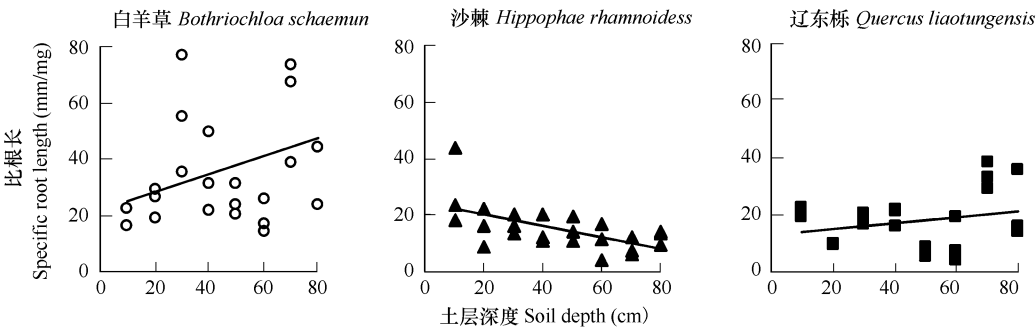


图 1 3 种植物比根长在不同土层的分布规律

Fig. 1 Vertical distribution of specific root length in different soil depth of three species

2.2 植物根系参数在土壤中的分布特点

3 种典型植物 0~10cm 土层和 10~80cm 土层细根生物量、根长密度和比根长均存在显著差异。因此本文对 3 种植物在 0~10cm 土层和 10~80cm 土层细根生物量、根长密度和比根长的分布进行详尽分析(表 2)。

3 种植物细根生物量、根长密度和比根长在 0~10cm 和 10~80cm 两土层均存在显著差异。

在 0~10cm 土层,白羊草细根生物量最大,比根长却最小。在 10~80cm 土层,白羊草细根生物量最小,但根长密度和比根长却最大,说明白羊草在下层土壤以较小的生物量投入却具有较高的吸收水分和养分的效率。在 0~10cm 和 10~80cm 土层,沙棘细根生物量与根长密度和比根长并无一致的对应关系,但根长密度与细根比根长具有较好的对应关系,相关分析表明二者为正相关。辽东栎细根生物量、根长密度和比根长在 0~10cm 和 10~80cm 土层的分布与白羊草和沙棘具有明显差别。在 0~10cm 土层其细根生物量和根长密度都最小,在 10~80cm 土层细跟生物量最大,但在这两个土层其比根长与白羊草和沙棘相比却不是最小的。以上分析表明,3 种植物在不同土层用以构建根长的细根生物量与其构建的根长之间的对应关系因物种不同而异,细根生物量与根长之间表现为不对称的关系。

3 种植物 0~10cm 土层和 10~80cm 土层细根比根长的分布不具一致性,表明植物在土壤剖面的生物量分配策略不同,这种分配策略不仅受植物自身遗传特性的影响,也受制于所处的土壤环境条件。3 种植物不同土层细根比根长的差异表明这与根系功能转变和土壤环境变化有关,因为比根长不仅是表征根系功能的重要指标,而且能够反应其生存的环境条件。

2.3 植物细根比根长与其它根系性状之间的关系

对 3 种植物细根比根长与其根系性状之间的相关分析有助于探明不同植物根系性状之间的相互关系及种间差异。白羊草细根比根长与细根生物量和根长密度均为负相关,沙棘细根比根长与细根生物量和根长密度表现为一定程度的正相关(图 2)。辽东栎细根比根长与生物量表现为负相关,但与根长密度为正相关。3 种植物细根比根长与细根生物量和根长密度的相关性强弱存在差别,表明细根根系性状之间相互关系各不相同,制约程度存在差异。

表 2 白羊草、沙棘和辽东栎细根生物量,根长密度和比根长在不同土层中的分布状况

Table 2 Distribution of fine root biomass, root length density and specific root length of the three species in two different soil depths

群落 Community	土层深度 Soil depth (cm)	
	0~10	10~80
生物量 Root dry mass (mg/cm ³)		
白羊草 <i>Bothriochloa schaeumun</i>	1.43 ±0.11 a	0.16 ±0.01 a
沙棘 <i>Hippophae rhamnoidess</i>	1.25 ±0.18 a	0.26 ±0.03 b
辽东栎 <i>Quercus liaotungensis</i>	0.74 ±0.09 b	0.30 ±0.01 c
根长密度 Root length density (RLD) (mm/cm ³)		
白羊草 <i>Bothriochloa schaeumun</i>	28.80 ±2.79 b	4.79 ±0.48 a
沙棘 <i>Hippophae rhamnoidess</i>	36.99 ±2.63 a	3.57 ±0.78 b
辽东栎 <i>Quercus liaotungensis</i>	15.12 ±0.84 c	3.96 ±0.04 b
比根长 Specific root length (mm/mg)		
白羊草 <i>Bothriochloa schaeumun</i>	20.27 ±3.30 b	41.26 ±0.79 a
沙棘 <i>Hippophae rhamnoidess</i>	28.52 ±3.67 a	17.36 ±2.25 b
辽东栎 <i>Quercus liaotungensis</i>	20.62 ±1.59 b	17.79 ±1.83 b

相同字母代表无差异,不同字母代表有差异 Values in the same column followed by the same letter are not significantly different according to LSD 's test

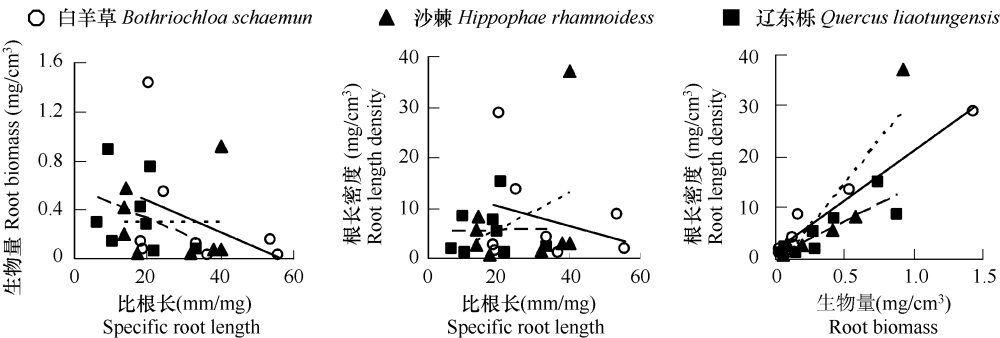


图 2 3 种植物比根长与其它根系性状的关系
Fig.2 Relationships between specific root length and other root traits of three species

2.4 植物细根比根长与土壤物理因子之间的关系

3种植物细根比根长与土壤水分相关分析表明,白羊草、沙棘和辽东栎细根比根长均随土壤含水量的增加而减少,且沙棘比根长与土壤含水量相关性达到显著水平(表3),土壤含水量对沙棘细根比根长的影响要大于对白羊草和辽东栎细根比根长的影响。3种植物细根比根长与不同粒径土壤颗粒的相关分析表明,辽东栎细根比根长与各级土壤颗粒相关性很弱,但白羊草和沙棘与不同粒径土壤颗粒关系明显。从这些分析可以说明,土壤物理因子对植物细根比根长的影响因物种而异,不是所有物理因子都会对细根比根长产生影响。相对而言,沙棘细根比根长受土壤物理因子的影响多于白羊草和辽东栎。

表3 3种植物比根长与土壤含水量和不同粒径土壤颗粒相关分析

Table 3 Correlation analysis of the specific root length and soil parcels of three plants						
测定项目 Item	植物 Plant	土壤含水量 Soil water content	土壤颗粒 Soil parcels (cm)			
			< 0.002	0.002 ~ 0.02	0.02 ~ 0.2	0.2 ~ 2
比根长 Specific root length (mm/mg)	白羊草 <i>Bothriochloa schaeumun</i>	- 0.070	- 0.240	0.688 * *	0.181	- 0.395
	沙棘 <i>Hippophae rhamnoidess</i>	- 0.547 *	- 0.554 *	0.044	- 0.251	0.577 *
	辽东栎 <i>Quercus liaotungensis</i>	- 0.514	- 0.453	0.170	- 0.288	0.404

比根长和土壤含水量的样本数为24,比根长与土壤颗粒的样本数为15 *代表差异达显著水平 Correlation is significant at the 0.05 level; * *代表差异达极显著水平 Correlation is significant at the 0.01 level;白羊草 (*Bothriochloa ischaemum*),沙棘 (*Hippophae rhamnoidess*)和辽东栎 (*Quercus liaotungensis*)

3种植物细根比根长与各级土壤水稳性团聚体的相互关系存在差别,辽东栎和沙棘细根比根长与各级土壤水稳性团聚体相关性较弱,但白羊草比根长与各级土壤水稳性团聚体相关性较强(图3)。白羊草细根比根长与>5mm水稳性团聚体呈显著的负相关关系,与0.5~1mm水稳性团聚体呈显著正相关关系。3种植物细根比根长与各级水稳性团聚体均呈一定的正或负的相关关系,这说明土壤水稳性团聚体对3种植物细根比根长均有一定的影响,但影响程度和影响方向各异,表明不同土壤团聚体对3种植物细根比根长的影响并无一致性。

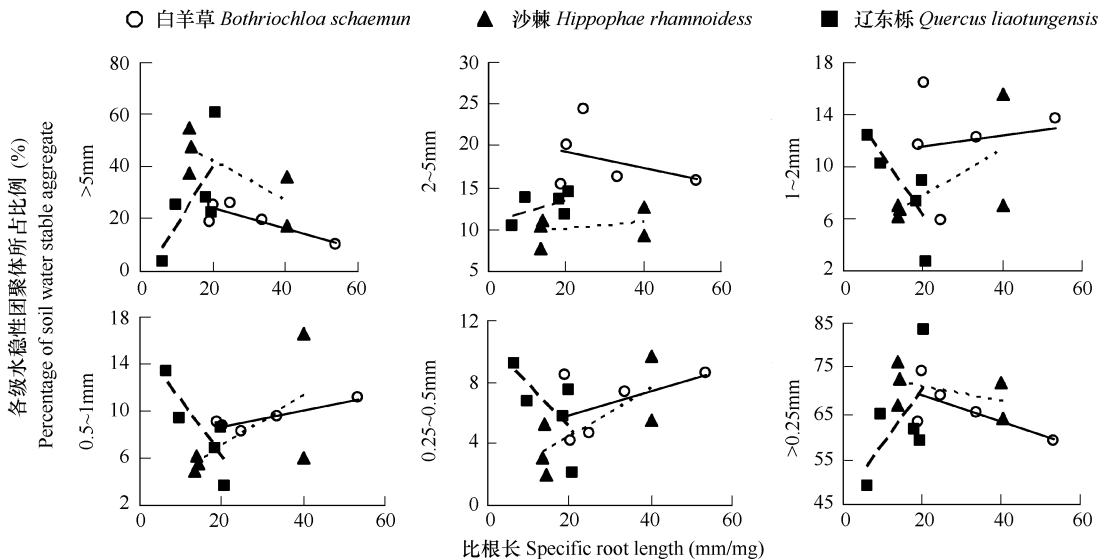


图3 3种植物细根比根长与各级水稳性团聚体占土壤总水稳性团聚体比例的关系

Fig.3 Relationship between specific root length and percentage of the soil water stable aggregates of three species

3 讨论

尽管植物性状种间差异明显,但不同植物仍具有一些共有性状和性状间的协同变异^[10,20~22]。虽然根系在形态结构和生理功能方面差异很大,但是关于根系性状的研究却非常有限,这使得人们对调控根系性状变

异的机制和影响因子以及根系性状变异与植物功能的关系尚不清楚^[15]。因此探明不同种类和生境中植物根系性状对于了解根系特性的物种差异,以及由于气候与环境因子变化对根系性状的影响和根系性状间的相互关系具有重要意义。

本文通过对 3 种植物比根长变化特征的研究发现,0~80cm 土层平均细根比根长为白羊草>沙棘>辽东栎,3 种植物中白羊草单位生物量构建的根长最大,因此比根长最大,辽东栎用以构建其根系的碳投入最多,但是其比根长却最小。3 种植物用以构建根长的生物量投入效率从高到低依次为白羊草>沙棘>辽东栎。方差分析表明 3 种植物在 0~80cm 土层范围平均比根长并无显著差异,但根系生物量差异显著,这说明 3 种植物用以摄取土壤资源的碳分配策略不同。相关分析表明,白羊草细根比根长与细根生物量和根长密度均为负相关,沙棘细根比根长与细根生物量和根长密度表现为一定程度的正相关,辽东栎细根比根长与生物量表现为负相关,但与根长密度为正相关。3 种植物细根比根长与其它根系性状的相互关系各不相同,制约程度存在差异,说明根系性状之间的相互作用是其变异的重要调控因子之一。

比根长能反映植物对不同生境的适应特征,3 种植物 0~10cm 土层细根比根长从大到小依次为沙棘>辽东栎>白羊草,10~80cm 土层依次为白羊草>辽东栎>沙棘,这表明不同植物在不同土层深度用于构建根长的生物量投入存在明显差异,即使是同一植物,在不同土层其比根长也各不相同,这不仅说明了植物对其生存环境具有较高的可塑性,同时也反映了土壤环境条件存在差异。3 种植物细根比根长与不同粒径土壤水稳性团聚体的相关分析表明辽东栎和沙棘细根比根长受各级土壤水稳性团聚体影响较小,但白羊草比根长受各级土壤水稳性团聚体影响要大于辽东栎和沙棘。3 种植物与土壤水稳性团聚体的关系表明植物根系性状对外界条件的响应缺乏种间一致性,即使是在种内,其响应也存在明显差异^[23]。与不同粒径土壤颗粒的相关分析表明,辽东栎细根比根长与各级土壤颗粒相关性很弱,但白羊草和沙棘与土壤各级颗粒关系明显,这表明土壤物理因子对植物细根比根长的影响因物种而异,不是所有物理因子都会对细根比根长产生影响。相对而言,沙棘细根比根长受土壤物理因子的影响多于白羊草和辽东栎。

比根长是表征植物根系功能特征的重要指标,Burton 等^[24]认为,土壤表层或上层分布的细根以吸收养分和水分为主,而下层细根的主要功能是吸收水分。本文 3 种植物细根比根长与土壤水分的相关关系表明,3 种植物细根比根长均随土壤含水量的增加而减少,且沙棘比根长与土壤含水量相关性达到显著水平,表明土壤水分资源对比根长的影响因物种不同而异。Craine 等^[4]认为单位土体中细根生物量与土壤水分具有很强的相关关系,可能是因为细根使土壤水分减少。本研究中 3 种植物细根比根长与土壤水分相关分析表明土壤水分条件对沙棘细根比根长的影响要大于白羊草和辽东栎。

本研究 3 种植物细根比根长在不同土层的分布状况及其与土壤物理因子的关系表明这可能与植物的遗传特性和具体的生境条件有关。沙棘细根比根长在不同土层的分布状况受土壤环境因子的影响要大于白羊草和辽东栎,这表明环境因子对不同植物的影响不同。总之,植物对气候环境的变化都有一定的响应能力及适应对策,且在漫长的进化过程中已经形成了一种自我调节机制,能够通过自身的形态变化来适应不断变化的环境,但不同物种之间对气候环境变化的适应能力不同,具有明显的差异性^[25]。比根长是植物重要的根系性状之一,对植物和生态系统功能都具有重要影响,研究不同植物的比根长有助于探明植物根系性状的差异以及形成这种根系性状的气候和环境因子,且可以深入了解根系对气候和环境变化的响应和适应机制。

References:

- [1] Farrish K W. Spatial and temporal fine root distribution in three Louisiana forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(6): 1752~1757.
- [2] Jackson R B, Mooney H A, Schulze E D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proceedings of National Academy Science, USA*, 1997, (94): 7362~7366.
- [3] Craine J M, Wedin D A, Chapi F S, et al. The dependence of root system properties on root system biomass of 10 North American grassland species. *Plant and Soil*, 2003, 250: 39~47.

- [4] Craine J M, Wedin D A, Chapi F S, *et al.* Relationship between the structure of root systems and resource use for 11 North American grassland plants. *Plant Ecology*, 2002, 165: 85 ~ 100.
- [5] Vogt K A, Gier C C, Vogt D J. Production, turnover and nutrient dynamics of above- and belowground detritus of world forests. *Advances in Ecological Research*, 1986, 15: 303 ~ 377.
- [6] Zhang X Q, Wu K H. Fine-root production and turnover for forest eco systems. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(3): 126 ~ 138.
- [7] Schenk H. Vertical vegetation structure below ground: scaling from root to globe. *Progress in Botany*, 2005, 66: 341 ~ 373.
- [8] Norby R J, Ledford J, Reilly C D, *et al.* Fine- root production dominates responses of a deciduous forest to atmospheric CO₂ enrichment. *Proceedings of National Academy Science, USA*, 2004, 101(26): 9689 ~ 9693.
- [9] Wang X L, Wang J. *Plant Morphology and Environment*. Lanzhou: Lanzhou Publication, 1989. 105 ~ 138.
- [10] Tjoelker M G, Craine J M, Wedin D, *et al.* Linking leaf and root trait syndromes among 39 grassland and savannah species. *New Phytologist*, 2005. 1 ~ 16.
- [11] Fitter A H. Characters and functions of root systems. In: Waisel Y, Eshel E, Kafkafi U, eds. *Plant Roots: The Hidden Half*. Dekker, New York, 1991. 3 ~ 25.
- [12] Eissenstat D M. Costs and benefits of construction roots of small diameter. *Journal of Plant Nutrition*, 1992, 15: 763 ~ 782.
- [13] Eissenstat D M. On the relationship between specific root length and the rate of root proliferation: a field study using citrus rootstocks. *New Phytologist*, 1991, 118: 63 ~ 68.
- [14] Peter Schippers, Han Olff. Biomass partitioning, architecture and turnover of six herbaceous species from habitats with different nutrient supply. *Plant Ecology*, 2000, 149: 219 ~ 231.
- [15] Comas L H, Eissenstat D M. Linking fine root traits to maximum potential growth rate among 11 mature temperate tree species. *Functional Ecology*, 2004, 18: 388 ~ 397.
- [16] Eissenstat D M, Caldwell M M. Competitive ability is linked to rates of water extraction: a field study of two arid land tussock grasses. *Oecologia*, 1989, 71: 1 ~ 7.
- [17] Liu W G, Shan L, Deng X P. Effects of soil bulk density on the growth of maize root system under different water condition. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin*, 2002, 22(4): 831 ~ 838.
- [18] Fitter A H. Functional significance of root morphology and root system architecture. In: Fitter A H, Read D J, Atkinson D, *et al.*, eds. *Ecological Interactions in Soil*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985. 86 ~ 106.
- [19] Eissenstat D M. Root structure and function in an ecological context. *New Phytologist*, 2000, 148: 353 ~ 354.
- [20] Schulze E D, Kelliher F M, Körner C, *et al.* Relationships among maximum stomatal conductance, ecosystem surface conductance, carbon assimilation rate, and plant nitrogen nutrition: a global scaling exercise. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1994, 25: 629 ~ 660.
- [21] Reich P B, Walters M B, Ellsworth D S. From tropics to tundra: global convergence in plant functioning. *Proceedings of National Academy Science, USA*, 1997, 94: 13730 ~ 13734.
- [22] Wright I J, Philip K, Groom, *et al.* Leaf trait relationships in Australian plant species. *Functional Plant Biology*, 2004, 31: 551 ~ 558.
- [23] Angela H. The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients. *New Phytologist*, 2004, 162: 9 ~ 24.
- [24] Burton A J, Pregitzer K S, Hendrick R L. Relationships between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forests. *Oecologia*, 2000, 125(3): 389 ~ 399.
- [25] Zheng S X, Shangguang Z P. Variation in the $\delta^{13}\text{C}$ value of typical plants of Loess Plateau over the last 70 years. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(2): 289 ~ 295.

参考文献:

- [6] 张小全, 吴可红. 森林细根生产和周转研究. *林业科学*, 2001, 37(3): 126 ~ 138.
- [9] 王勋陵, 王静. 植物的形态结构与环境. 兰州: 兰州大学出版社, 1989. 105 ~ 138.
- [17] 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. *西北植物学报*, 2002, 22(4): 831 ~ 838.
- [25] 郑淑霞, 上官周平. 近 70 年来黄土高原典型植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化研究. *植物生态学报*, 2005, 29(2): 289 ~ 295.