

我国西北地区芨芨草-苦豆子群落 根系分布与种间关系

晨乐木格¹ 刘茂松^{1*} 黄 峰¹ 陈 斌¹ 张明娟^{1,2} 徐 驰¹

(1 南京大学生命科学学院,南京 210093) (2 南京农业大学园艺学院,南京 210095)

摘 要 以宁夏沙湖的一个典型的干旱区草本型植物群落——芨芨草(*Achnatherum splendens*)-苦豆子(*Sophora alopecuroides*) (禾草-非禾草型)群落为研究对象,自芨芨草-苦豆子聚生丛的基部向丛间裸地依次划分为植冠区、过渡区和空旷区3个分区,通过比较分析两个优势种根系生物量密度在这3个分区的空间分布格局,研究了干旱胁迫生境中芨芨草和苦豆子的根际关系。结果表明:在水平方向上,芨芨草根系总生物量主要集中分布于植冠区,而苦豆子根系总生物量密度在3个分区间无显著差异;在垂直方向上,芨芨草的根系总生物量密度和细根生物量密度最大的土壤层次从植冠区到空旷区埋深渐深,而苦豆子的根系总生物量在3个分区主要分布于10~30 cm土层,但其细根生物量密度最大的土层从植冠区向外呈上升趋势;同时发现,在植冠区,根系总生物量密度较高,两种植物细根生物量密度最大的土壤层次不同,但在空旷区和过渡区,两种植物细根生物量密度的垂直分布格局趋于一致。群落中两个主要植物种的根系在植冠区具有垂直层次的分异性,在不同分区间具有水平分布格局的差异性,这可能是群落中两种主要植物种间为了避免根系间直接竞争共同适应干旱胁迫生境的重要机制。

关键词 干旱区 聚生丛 根系竞争 根系分布格局 生态位分离

DISTRIBUTION PATTERN OF ROOT BIOMASS AND INTER-SPECIFIC RELATIONSHIP IN *ACHNATHERUM SPLENDENS-SOPHORA ALOPECUROIDES* COMMUNITY IN NORTHWEST CHINA

URIANKHAI Tselmeg¹, LIU Mao-Song^{1*}, HUANG Zheng¹, CHEN Bin¹, ZHANG Ming-Juan¹, and XU Chi¹

¹School of Life Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China, and ²College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

Abstract *Aims* Linking spatial patterns to ecological processes is a central topic in ecology. Inter-specific relationships in arid plant communities have been extensively studied by investigating aboveground patterns, but research on underground distribution patterns is inadequate. Our objective was to explore the inter-specific relationships between two dominant species, *Achnatherum splendens* (grass) and *Sophora alopecuroides* (forb), in a typical grass-forb community of arid/semi-arid regions of China.

Methods We selected a 30 m×30 m plot in a representative *A. splendens*-*S. alopecuroides* community in Sand Lake, Ningxia Hui Autonomous Region, Northwest China. The two dominant species usually spatially assemble as clumps aboveground. We partitioned the spatial gradient from the base of the assemblages to the non-vegetated open spaces between assemblages into under-canopy, transitional and open subareas to characterize the horizontal differences of microhabitat. Five assemblages of the two species were randomly chosen, and a 150 cm deep soil profile with coverage of 100 cm×100 cm was excavated in each subarea. Root biomass in terms of fine roots (diameter <2 mm) and coarse roots (diameter ≥2 mm) of the two species was investigated at soil depths of 0–10, 10–30, 30–60, 60–100 and 100–150 cm.

Important findings Horizontally, biomass density of the total roots of *A. splendens* decreased along the gradient from under-canopy to open subareas. Also, ANOVA showed that biomass density of the to-

收稿日期: 2008-12-17 接受日期: 2009-03-19
基金项目: 国家重大基础研究项目(2006CB400505)和国家自然科学基金(40675040)
* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: mslu@nju.edu.cn

tal roots significantly differed among the three subareas for *A. splendens*, but no significant differences were detected for *S. alopecuroides*. Vertically, the soil layers with the highest biomass density of the total and fine roots of *A. splendens* increased in depth from under-canopy to open subareas, while that of the total roots of *S. alopecuroides* remained at 10–30 cm depth and that of the fine roots of *S. alopecuroides* tended to decrease in depth along the gradient. Also, the fine roots of the two species were different in the highest biomass density layer in the under-canopy subareas where root systems were densely distributed, but showed similar vertical patterns in the transition and open subareas. Niche separation in the under-canopy subareas and discrepancy in horizontal patterns of the two dominant species could represent an important adaptive strategy of avoiding direct competition and facilitating coexistence in arid communities.

Key words arid environment, species assemblage, root competition, root distribution pattern, niche separation

DOI: 10.3773/j.issn.1005-264x.2009.04.013

群落中种间的根际关系可以通过其地下根系的空间分布格局反映出(Martens *et al.*, 1997; Meyer *et al.*, 2007)。早在1939年Walter对亚热带稀树草原植物群落研究时,就提出了双层模型假设,认为群落中草本植物在上层土壤水分竞争中占优势,上层土壤多被草本植物占据,而灌木和乔木下移至下层土壤利用深层的水分(Casper & Jackson, 1997; Schenk & Jackson, 2002)。虽然该模型得到了一系列试验结果的支持(Canadell *et al.*, 1996; Jackson *et al.*, 1997),但也有研究指出,木本植物和草本植物的根系竞争强度取决于土壤上层与下层含水量之比,由于土壤属性和降水强度的差异,土壤湿度的垂直异质性可能会导致与双层模型不一致的植物根系分布格局(Knoop & Walker, 1985; Callaway *et al.*, 2003; Rodríguez *et al.*, 2007)。事实上,在结构不连续的干旱区植物群落中,植被冠层投影区和植被相对较少的裸地间的生境条件存在显著差异(Breshears, 2006),这可能导致群落中不同区位间的植物根系分布格局的差异性。因此,有必要按不同分区研究群落中的植物根际关系。

宁夏沙湖地区位于我国西北干旱区,该地区植物群落结构通常表现为不连续的乔木或灌木层以及相对连续的草本层,形成乔-草(Arbor-grass)、灌-草(Shrub-grass)、禾草-非禾草(Grass-forb)型等二元结构的典型群落(张程等, 2007; 张琴妹等, 2007)。在空间格局上,各群落中的主要植物种多表现为丛聚分布(张程等, 2007),且不同生活型的植物之间呈正空间关联(刘小恺等, 2009)。在干旱区,水分为主要限制因子(Kizito

et al., 2006; Simmons *et al.*, 2008),植物种内个体的丛聚分布(成丛性)和种间的正空间关联,有利于群落在整体上适应生长季干热风的胁迫(张程等, 2007),但同时可能会增加对土壤水分的竞争。研究群落中主要植物种间的根际关系,有助于深入揭示物种的共存机制及其相应的生态过程。

本文通过分析宁夏沙湖地区芨芨草(*Achnatherum splendens*)-苦豆子(*Sophora alopecuroides*)群落的两个优势植物种根系的空间分布格局,探讨干旱区禾草-非禾草型群落中不同生活型植物种间的根际关系及群落对干旱胁迫的适应机制。

1 研究地概况

研究地位于宁夏回族自治区的平罗县西大滩(106°20' E, 38°45' N)。这里南距银川市60 km,西接贺兰山,东临黄河,海拔1 100 m,地势开阔平坦。主要受西北来的干冷空气控制,为典型的中温带干旱荒漠气候。该地区年平均日照时数为3 000 h,冬季寒冷漫长,夏季炎热短暂,昼夜温差大,年平均气温为6.4 °C,年均降水量约187.2 mm,降水年际、月际分配不均,多雨年的降水量是少雨年的3~4倍,7~9月的降水量占全年降水量的66.6%。年均蒸发量可高达1 755 mm。土壤盐碱化严重。西大滩主要非耕种土壤为白僵土(龟裂碱土),高度碱性,遇水高度分散,透气、通水性差,是该地区主要土壤类型之一。

研究对象属干旱区典型的禾草-非禾草草本型植物群落。芨芨草和苦豆子分别占群落多度的

48.7% 和 38.6%，伴生有少量的碱蓬 (*Suaeda glauca*)、藜 (*Chenopodium album*)、蓟 (*Cirsium japonicum*)、甘草 (*Glycyrrhiza uralensis*)、披针叶黄华 (*Thermopsis lanceolata*) 等 (表 1)。芨芨草为禾本科芨芨草属多年生草本，为盐生、旱中生密丛型植物，须根系，叶茂密，具有很强的抗旱特性；苦豆子是豆科槐属的多年生草本植物，属于旱中生植物，根系木质化。芨芨草和苦豆子在空间上高度正关联，并形成若干聚生丛 (刘小恺等, 2009)。根据本文群落调查结果，群落中 91% 的苦豆子植株分布于芨芨草冠层的覆盖范围内。

2 研究方法

群落调查开始于 2007 年 9 月上旬。在群落中设置一个 30 m×30 m 的样方，调查样方后，在样地内随机选取 5 个芨芨草-苦豆子聚生丛。Breshears (2006) 曾根据植被地上格局特征，将植被冠层垂直投影区定义为植冠区，而植株间非冠层投影区定义为空旷区。本文根据根系分布格局研究的需要，沿每个聚生丛基部向裸地依次设置 3 个分区：聚生丛冠层垂直投影区定义为植冠区，聚生丛之间的裸地定义为空旷区，植冠区外沿到空旷区之间的分区定义为过渡区。分别在 5 个聚生丛的植冠区、过渡区和空旷区，设置 1 个深度为 1.5 m、长和宽各为 1 m 的土壤剖面，齐地表剪除每个土壤剖面的植物地上部分，从地表垂直向下分别在 0~10、10~30、30~60、60~100 和 100~150 cm 5 个层次，利用分层挖掘法采集植物根系 (王珺等, 2008)；每个剖面间不重叠。对每层土壤过筛后收集全部根系，在室内用清水洗净去除泥沙、杂物和死根后，自然晾干约 24 h。考虑到植物细根和粗根在养分和水分吸收过程中的作用不同 (Casper

et al., 1998; 郝仲勇等, 1998; 韦兰英和上官周平, 2006)，本研究中，将每种植物的根系分为细根 (直径 < 2 mm) 和粗根 (直径 ≥ 2 mm) (Trumbore & Gaudinski, 2003; Wilcox *et al.*, 2004; 韦兰英和上官周平, 2006)，分别装入信封内，在 85 °C 下烘干至恒重，称重获得生物量数据。应用 SPSS 13.0 统计软件，采用单因素方差分析方法，对 3 个分区根系生物量密度进行统计分析，以检验不同分区根系分布的差异性。

3 结果和分析

3.1 根系生物量密度的水平分布格局

经统计，研究地群落中 15 个土壤剖面内芨芨草和苦豆子的平均根系总生物量分别为 (202.22±21.89) 和 (216.96±17.73) g，而两者对应的细根的生物量分别为 (40.55±4.17) 和 (3.42±0.98) g，芨芨草细根生物量显著高于苦豆子细根生物量 ($p<0.01$) (表 2)。对比植冠区、过渡区和空旷区各层次根系生物量的密度分布发现，在水平方向上，芨芨草根系总生物量密度和细根生物量密度都沿植冠区到空旷区梯度减小，3 个分区间差异极显著 (根系总生物量密度: $F=17.025$, $p=0.000$; 细根生物量密度: $F=8.868$, $p=0.003$)；苦豆子根系总生物量密度和细根生物量密度在植冠区最高，但在 3 个分区间均无显著差异 (根系总生物量密度: $F=0.166$, $p=0.846$; 细根生物量密度: $F=0.450$, $p=0.646$)；表明芨芨草根系集中分布于植冠区，而苦豆子根系在不同分区间的分布较均匀。

3.2 根系生物量密度的垂直分布格局

在垂直方向上 (图 1a、1c、1e)，芨芨草根系总生物量在植冠区的密度从 0~10 cm 层到 100~150 cm 层依次减小；过渡区生物量密度重心则下移至

表1 群落概况
Table 1 Basic status of the study community

	平均高度 Average height (m)	平均冠幅 Average crown diameter (m)	盖度 Coverage (%)
芨芨草 <i>Achnatherum splendens</i>	1.13	0.79	42.58
苦豆子 <i>Sophora alopecuroides</i>	0.32	0.20	2.19
碱蓬 <i>Suaeda glauca</i>	0.18	0.29	0.31
藜 <i>Chenopodium album</i>	0.32	0.23	0.12
蓟 <i>Cirsium japonicum</i>	0.14	0.15	0.07
甘草 <i>Glycyrrhiza uralensis</i>	0.19	0.16	0.05
披针叶黄华 <i>Thermopsis lanceolata</i>	0.15	0.10	<0.01

表2 不同分区芨芨草和苦豆子根系生物量密度(平均值±标准误差)
Table 2 Root biomass densities of *Achnatherum splendens* and *Sophora alopecuroides* in 3 subareas of the community (mean ± SE)

		植冠区 Under-canopy subarea	过渡区 Transition subarea	空旷区 Open area
芨芨草根系生物量密度 Root biomass densities of <i>Achnatherum splendens</i> (g·m ⁻³)	根系总生物量 Total root biomass	268.37 ± 36.61	106.54 ± 21.90	69.52 ± 12.30
	细根生物量 Fine root biomass	47.53 ± 7.65	24.38 ± 3.96	17.20 ± 3.27
苦豆子根系生物量密度 Root biomass densities of <i>Sophora alopecuroides</i> (g·m ⁻³)	根系总生物量 Total root biomass	166.70 ± 25.75	148.77 ± 17.08	161.37 ± 24.02
	细根生物量 Fine root biomass	2.95 ±1.37	1.76 ± 0.58	2.79 ± 0.74

10~30 cm土层, 以下各层依次减小; 而在空旷区, 10~30 cm土层根系总生物量密度最高, 其次为60~100 cm层次, 30~60 cm层次略低于60~100 cm层次。总体上, 芨芨草根系的 空间分布趋势是: 离聚生丛越远, 根系分布越深。而苦豆子根系总生物量在3个分区的垂直分布格局相对一致, 密度最大的土层均为10~30 cm, 0~10 cm土层密度较小, 30~60 cm土层至100~150 cm土层依次减小。对比两个植物种根系总生物量在3个分区土壤中的垂直分布格局发现, 30 cm以下层次两种植物的根系生物量密度均急剧下降, 10~30 cm土层是群落中植物根系生物量密度最高的层次(仅芨芨草根系总生物量密度在植冠区0~10 cm土层最高)。

对比细根生物量与根系总生物量的垂直分布(图1b、1d、1f)发现, 除绝对值差异外, 相对趋势也存在一定差异。芨芨草在植冠区、过渡区、空旷区0~10 cm土层的细根生物量密度均小于10~30 cm土层, 10~30 cm土层细根生物量密度最高, 30~60 cm土层则显著下降; 在过渡区与空旷区(图1d、1f), 60~100 cm土层芨芨草细根生物量的密度分布均有所增加, 形成10~30 cm土层密度最大、30~60 cm土层显著下降、60~100 cm土层略有上升的“M”型分布格局, 且从植冠区到空旷区10~30 cm和60~100 cm两土层间细根生物量密度差值减小, 分布重心呈下降趋势; 苦豆子细根生物量密度的层间分布在植冠区和空旷区总体上也呈“M”型格局(图1b、1f); 但其植冠区密度最大的层次为60~100 cm层次, 在过渡区和空旷区则为10~30 cm土层, 从植冠区向外, 苦豆子细根生物量密度的分布重心总体上有上移趋势。

4 讨 论

水分在干旱区是最重要的限制因子, 植物成丛分布能够有效地降低丛内风速和土壤温度, 提

高空气湿度(范文波等, 2006)和土壤养分(王库等, 2002)。研究地群落中, 芨芨草和苦豆子在一定尺度上的成丛分布有利于彼此对于热风的适应(张程, 2007; 刘小恺等, 2009), 但两种植物形成聚生丛可能加剧种间对土壤水分的竞争, 影响植物根际关系及土壤水分梯度。

植物根系作为吸收水分的主要器官, 可以通过增殖, 调整结构和生理过程来适应土壤水分变化(Campbell *et al.*, 1991; Gersani *et al.*, 2001; 单立山等, 2007)。干旱区土壤水分主要来源于降水入渗(Noy-Meir, 1973), 上层土壤的水分和养分供给能力较好(Stark, 1994; Peek & Forseth, 2005), 植物根系总体上存在浅层化分布趋势, 但同时因为蒸发量较大, 通常浅表层土壤含水率较低, 且其水分条件稳定性远小于相对较深的土壤层次(孙栋元等, 2007), 不利于植物根系在浅表层的分布。芨芨草属于须根系植物, 主要根系着生于植株基部, 相应地, 其植冠区0~10 cm土层总根生物量密度较大, 但在其他分区, 0~10 cm浅表层土壤中总根及细根生物量密度均小于10~30 cm土层; 而苦豆子在3个区位的0~10 cm浅表层, 总根系生物量密度与细根生物量密度均小于其下的10~30 cm层次。

随着土壤深度的增加, 植物根系生物量密度趋于下降。但由于干旱区总体上水分匮乏, 根系密集分布层水分消耗量较大, 降水难以下渗, 易于形成下层土壤含水率低于上层含水率的逆水势层(张琴妹等, 2007), 但更下层次可能因短期相对丰富的降水下渗、累积含水率上升, 同时也可能得到少量地下水的补充, 在一定程度上有利于植物根系的生长。研究地芨芨草和苦豆子的细根生物量密度在不同分区不同程度的“M”型垂直分布格局的形成, 可能是逆水势层、降水积累和地下水补充等机制的共同结果。在野外采样的15个

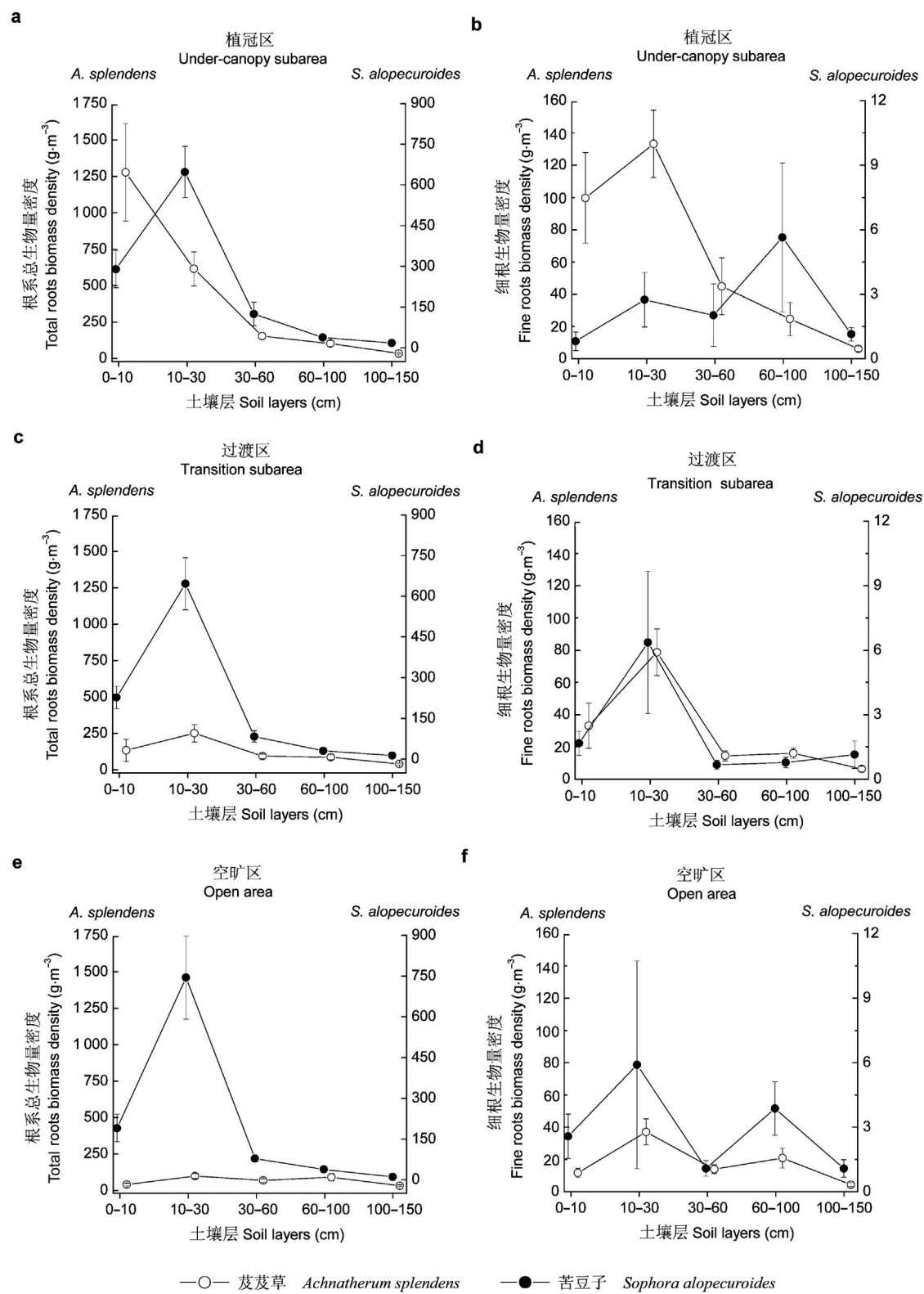


图1 芨芨草-苦豆子群落根系生物量密度分布

Fig. 1 Distribution of root biomass density in the *Achnatherum splendens*-*Sophora alopecuroides* community
a: 植冠区根系总生物量 Total roots biomass in under-canopy subarea b: 植冠区细根生物量 Fine roots biomass in under-canopy subarea c: 过渡区根系总生物量 Total roots biomass in transition subarea d: 过渡区细根生物量 Fine roots biomass in transition subarea e: 空旷区根系总生物量 Total roots biomass in open area f: 空旷区细根生物量 Fine roots biomass in open area

土壤剖面中, 1.5 m深处均未见潜水位, 地下水位相对较深, 植物根系含量也极少, 相应地, 地下水补充在群落中的作用也应较弱。阶段性相对丰富的短期降水可能是植物细根系生物量密度“M”型垂直分布格局产生的主要原因, 但需要对群落中土壤水分状况及其运动规律做进一步研究证实。

种间根系竞争也是影响植物根系分布的重要因素。芨芨草的须根系特点可能是造成该群落中芨芨草根系总生物量的相对埋深从植冠区到空旷区逐渐增加的重要原因; 而苦豆子属多年生宿根性草本植物, 根系木质化程度较高, 在群落中以横向伸展为主。有研究指出, 浅层土壤中横向根的生长有利于植物利用浅层土壤的短期降水(Ehleringer, 1994; Zhang *et al.*, 2008), 但从植冠区到空旷区, 芨芨草根系渐少而“空出的”生态位, 可能也是造成苦豆子细根生物量从植冠区向外总体上埋深变浅的原因之一。

比较两种植物间细根生物量的垂直分布格局发现: 在植冠区芨芨草细根生物量密度最高的土壤层次为10~30 cm, 而苦豆子为60~100 cm, 表现出明显的层次分异特征; 但在过渡区与空旷区, 两者的密度分布格局相对一致。两种植物在植冠区的细根生物量密度都是3个分区中最高的, 根际竞争相对较强可能是产生种间根系分布层次分异的重要原因; 而在过渡区和空旷区, 根系生物量密度相对较小, 根系间竞争也相对较小, 种间根系分布格局表现出一定的资源利用性趋同。

综合比较不同区位间两种植物间根系生物量密度的水平与垂直分布格局, 从植冠区到空旷区, 芨芨草细根分布重心下移, 而苦豆子细根在过渡区和空旷区的分布重心较之植冠区相对上移; 而在根系密集的植冠区, 两种植物的细根生物量密集分布的层次不同, 两种植物的根系分布特征在垂直与水平方向上均表现出一定的空间生态位分离现象。结合该群落地上部分植物间多呈聚集分布的格局特征, 可以认为: 地上与地下生物量的总体格局反映了群落中主要植物种间有效的协同与共存机制, 即两个主要植物种的地上部分聚集分布形成聚生丛以减少蒸腾失水等生理胁迫, 地下部分通过根系的一定程度的空间生态位分离而减少了对土壤资源的竞争。这样的协同共存机制总体上有利于两种植物协同适应干旱胁迫生境。

参 考 文 献

Breshears DD (2006). The grassland-forest continuum: trends in ecosystem properties for woody plant mosaics? *Frontier in Ecology and the Environment*, 4, 96–104.

Callaway RM, Pennings SC, Richards CL (2003). Phenotypic plasticity and interactions among plants. *Ecology*, 84, 1115–1128.

Campbell BD, Grime JP, Mackey JML (1991). A trade-off between scale and precision in resource foraging. *Oecologia*, 87, 532–538.

Canadell J, Jackson RB, Ehleringer JR, Mooney HA, Sala OE, Schulze ED (1996). Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia*, 108, 583–595.

Casper BB, Jackson RB (1997). Plant competition underground. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 28, 545–570.

Casper BB, Cahill JF, Hyatt LA (1998). Above-ground competition does not alter biomass allocated to roots in *Abutilon theophrasti*. *New Phytologist*, 140, 231–238.

Ehleringer JR (1994). Variations in gas exchange characteristics among desert plants. In: Schulze ED, Caldwell MM eds. *Ecophysiology of Photosynthesis, Ecological Studies 100*. Springer, Berlin, 302–388.

Fan WB (范文波), Lei Y (雷雨), Mo L (莫亮), Zheng YK (郑耀凯), Chen B (陈兵), Liu LY (刘丽英) (2006). Studies on improving microclimate of desert by *Achnatherum splendens*. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, (石河子大学学报(自然科学版)), 24, 213–216. (in Chinese with English abstract)

Gersani M, Brown JS, O’Brien EE, Maina GM, Abramsky Z (2001). Tragedy of the commons as a result of root competition. *Journal of Ecology*, 89, 660–669.

Hao ZY (郝仲勇), Yang PL (杨培岭), Liu HL (刘洪禄), Yao CM (姚春梅) (1998). Experimental investigation on root system distribution of apple tree. *Journal of China Agricultural University (中国农业大学学报)*, 3 (6), 63–66. (in Chinese with English abstract)

Jackson RB, Mooney HA, Schulze ED (1997). A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 94, 7362–7366.

Kizito F, Dragila M, Sène M, Lufafa A, Diedhiou I, Dick RP, Selker JS, Dossa E, Khouma M, Badiane A, Ndiaye S (2006). Seasonal soil water variation and root patterns between two semi-arid shrubs co-existing with pearl millet in Senegal, West Africa. *Journal of Arid Environments*, 67, 436–455.

Knoop WT, Walker BH (1985). Interactions of woody and

- herbaceous vegetation in a southern African savanna. *Journal of Ecology*, 73, 235–253.
- Liu XK (刘小恺), Liu MS (刘茂松), Huang Z (黄铮), Xu C (徐驰), Zhang MJ (张明娟), Wang HJ (王汉杰) (2009). Pattern analysis of inter-specific relationships in four typical arid communities in Sand Lake, Ningxia Hui Autonomous Region, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 33, 320–330. (in Chinese with English abstract)
- Martens SN, Breshears DD, Meyer CW, Barnes FJ (1997). Scales of above-ground and below-ground competition in a semi-arid woodland detected from spatial pattern. *Journal of Vegetation Science*, 8, 655–664.
- Meyer KM, Ward D, Wiegand K, Moustakas A (2007). Multi-proxy evidence for competition between savanna woody species. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 10, 63–72.
- Noy-Meir I (1973). Desert ecosystems: environment and producers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 25–51.
- Peck MS, Forseth IN (2005). Non-destructive estimation of lateral root distribution in an arid land perennial. *Plant and Soil*, 273, 211–217.
- Rodríguez MV, Bertiller MB, Bisigato A (2007). Are fine roots of both shrubs and perennial grasses able to occupy the upper soil layer? A case study in the arid Patagonian Monte with non-seasonal precipitation. *Plant and Soil*, 300, 281–288.
- Schenk HJ, Jackson RB (2002). Rooting depths, lateral root spreads and below-ground / above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems. *Journal of Ecology*, 90, 480–494.
- Shan LS (单立山), Zhang XM (张希明), Hua YH (花永辉), Wei J (魏疆), Yan HL (闫海龙), Xie TT (解婷婷) (2007). Response of root distribution of *Haloxylon ammodendron* seedlings to irrigation amounts in the Taklimakan desert, China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)* (植物生态学报), 31, 769–776. (in Chinese with English abstract)
- Simmons MT, Archer SR, Teague WR, Ansley RJ (2008). Tree (*Prosopis glandulosa*) effects on grass growth: an experimental assessment of above- and belowground interactions in a temperate savanna. *Journal of Arid Environments*, 72, 314–325.
- Stark JM (1994). Causes of soil nutrient heterogeneity at different scales. In: Caldwell MM, Pearcy RW eds. *Exploitation of Environmental Heterogeneity by Plants, Ecophysiological Processes Above- and Belowground*. Academic Press, San Diego, 255–284.
- Sun DY (孙栋元), Wang H (王辉), Ma ZW (马仲武), Yang JL (杨君珑) (2007). Soil water variation of fencing sandy land in arid desert area. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 22(2), 49–53. (in Chinese with English abstract)
- Trumbore SE, Gaudinski JB (2003). The secret lives of roots. *Science*, 302, 1344–1345.
- Wang J (王珺), Liu MS (刘茂松), Sheng S (盛晟), Xu C (徐驰), Liu XK (刘小恺), Wang HJ (王汉杰) (2008). Spatial distributions of soil water, salts and roots in an arid arbor-herb community. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 28, 4120–4127. (in Chinese with English abstract)
- Wang K (王库), Xu LY (徐礼煜), Yu TF (于天富) (2002). Effect of *Achnatherum splendens* (Trin.) Nevski, a soil and water conservation plant, on soil nutrients. *Soil* (土壤), 3, 170–172. (in Chinese)
- Wei LY (韦兰英), Shangguan ZP (上官周平) (2006). Relationship between vertical distribution of root in different successional stages of herbaceous vegetation and soil environment in Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 26, 3740–3748. (in Chinese with English abstract)
- Wilcox CS, Fergusona JW, Fernandezb GCJ, Nowaka RS (2004). Fine root growth dynamics of four Mojave Desert shrubs as related to soil moisture and microsite. *Journal of Arid Environments*, 56, 129–148.
- Zhang C (张程), Zhang MJ (张明娟), Xu C (徐驰), Liu MS (刘茂松), Wang HJ (王汉杰), Hu HB (胡海波) (2007). Analysis of aggregation in desert plant species in Sand Lake, Ningxia Hui Autonomous Region, China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)* (植物生态学报), 31, 32–39. (in Chinese with English abstract)
- Zhang QM (张琴妹), Zhang C (张程), Liu MS (刘茂松), Yu W (郁文), Xu C (徐驰), Wang HJ (王汉杰) (2007). The influences of arboraceous layer on spatial patterns and morphological characteristics of herbaceous layer in an arid plant community. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 27, 1265–1272. (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZS, Li XR, Wang TW, Xin P, Xue QW, Liu LC (2008). Distribution and seasonal dynamics of roots in a revegetated stand of *Artemisia ordosica* Krasch. in the Tengger Desert (North China). *Arid Land Research and Management*, 22, 195–211.