

高寒山区混播草地燕麦和毛苕子根长密度分布格局*

盛亚萍 赵成章** 张静 任珩 李丽丽

(西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃省湿地资源保护与产业发展工程研究中心, 兰州 730070)

摘要 植物通过维系根长密度的大小及其分布格局逐渐优化资源利用格局。本实验在祁连山地建立禾本科牧草燕麦与豆科毛苕子混播草地, 按燕麦(*Avena sativa*)与毛苕子(*Vicia villosa*)的密度比例设置CK₁(0:10)、I(6:4)、II(5:5)、III(4:6)、IV(2:8)和CK₂(10:0)6个密度组, 研究了混播草地燕麦与毛苕子根系根长密度的空间分布格局。结果表明: 混播草地燕麦和毛苕子根长密度显著大于单播处理, 并且随着混播草地中燕麦密度的减小, 牧草根长密度逐渐增大, 出现高燕麦密度低根长密度的现象; 在空间分布上燕麦和毛苕子根长密度表现出明显差异, 燕麦根系主要分布在0~25 cm土层, 毛苕子根系主要分布在0~15 cm土层。根系的分层分布改变了其竞争格局, 垂直分布上出现的差异使根系结构和形态逐渐发生转变, 混播处理使I、II、IV处理的主根生长受到抑制, 5个处理的侧根生长受到促进。一年生牧草侧根在空间上的分层分布改变了混播草地的资源利用格局, 逐渐优化了根长密度配置格局, 实现了土壤资源利用最大化的目标。

关键词 燕麦; 毛苕子; 根长密度; 取代试验; 祁连山北坡

中图分类号 Q948.1 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2013)2-0279-06

Spatial distribution patterns of root length density of *Avena sativa* and *Vicia villosa* in their mixed-sowing grassland in alpine region. SHENG Ya-ping, ZHAO Cheng-zhang**, ZHANG Jing, REN Heng, LI Li-li (Research Center of Wetland Resources Protection and Industrial Development Engineering of Gansu Province, College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(2): 279-284.

Abstract: Plant can adjust its root length density and distribution pattern to optimize its resources utilization pattern. In this study, the mixed-sowing grassland of gramineous grass *Avena sativa* and leguminous grass *Vicia villosa* with the density ratio of 0:10 (CK₁), 8:2 (I), 6:4 (II), 5:5 (III), 4:6 (IV), 2:8 (V), and 10:0 (CK₂) was established in the upper reaches of Shiyang River in Sunan County of Gansu Province, Northwest China in 2010, aimed to study the spatial distribution patterns of root length density of the two mixed-sowing grasses. The root length density (RLD) of the two grasses was greater in mixed culture than in mono-culture. With the decrease of *A. sativa* density in mixed-sowing grassland, the RLD of the grass had a gradual increase, showing a phenomenon of high *A. sativa* density and low *A. sativa* RLD. Spatially, the RLD of *A. sativa* and *V. villosa* had obvious difference. *A. sativa* roots were mainly distributed in 0-25 cm soil layer, while *V. villosa* roots were concentrated in 0-15 cm soil layer. The hierarchical distribution of the roots changed their competition pattern, and the difference in the vertical distribution gradually changed the root structure and morphology. In the treatments except CK1 and CK2, the taproot growth was restrained, while the lateral root growth was promoted. The spatial hierarchical distribution of the lateral roots in the mixed-sowing grassland changed the resource utilization pattern, and gradually optimized the root length density configuration pattern, which achieved the goal of maximizing the resources utilization from soil.

Key words: *Avena sativa*; *Vicia villosa*; root length density; replacement series experiment; northern slope of Qilian Mountains.

* 国家自然科学基金项目(91125014和40971039)和甘肃省生态经济重点学科资助。

** 通讯作者 E-mail: zhaocz@nwnu.edu.cn

收稿日期: 2012-06-27 接受日期: 2012-12-03

根系的分布格局反映了植物对于环境的适应情况和竞争能力(de Dorlodot *et al.* 2007)。在相同的环境下不同的根系形态反映了植物在相互竞争时采取的生态策略(Eissenstat *et al.* 2000; Forde & Lorenzo 2001)。而根长密度可衡量植物获取水分和养分的能力,决定着根系的拓殖繁衍状况。高寒牧区冷季长,生长季短,从而影响了牧草的固碳能力(周瑞莲和赵哈林,2004),限制了根系的生长发育,制约了根系利用土壤有效资源的效率,不利于牧草的生长(鲁春霞等,2006)。人工草地牧草根对根系形态可塑性以及种间关系等方面的响应较为敏感,可以通过对根系形态可塑性等的调整来适应种内竞争,克服低温等环境的制约。建立禾本科和豆科牧草的混播草地,有效结合浅层分布散根型的禾草与直根系的豆科牧草,通过配置土层间的根系分配,调整根长大小和禾豆牧草间的种间竞争关系变化(王军邦等,2002; 向言词等,2005),从而调节根系可塑性以克服环境制约。牧草总是通过主侧根的形态变化(李文娆等,2010)、生理反应和根长配置的改变来适应异质生境,提高土壤资源的利用效率和牧草产草量。在密度差异下根系可塑性机制可以进一步反应两物种间的竞争空间差异,替代实验作为比较两个混播物种竞争输出的有效设计,尤其适合于两植物种之间的相互作用(Harper,1977)。

目前对高寒地区建立一年生豆科和禾本科混播人工草地的种间关系(李秋娜,2007; Haynes, 1980)、草群结构的影响和动态(杜国祯等,1993; Moreira,1989)的研究已有报道,这些研究表明,一年生禾豆混播草地在地上、地下生物量等方面都表现出了明显优势,但是,由于取样难度的限制,对高寒牧区人工草地的根系研究还较少,尤其是对根长密度的空间分布格局以及根系形态的差异对环境的可塑性响应机制等方面的研究较薄弱。鉴于此,本文以石羊河上游高寒山区人工草地为例,研究了不同混播处理下的燕麦与毛苕子根长密度的空间异质性,探讨了禾豆混播草地植物通过可塑性的调整,优化根系结构的响应机制,为深入了解高寒山区牧草根系的分布特征提供参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

实验地位于祁连山地的甘肃省肃南县皇城镇绵羊育种场(37°58'26"N,101°47'34"E),海拔2530 m,

具有大陆性气候和山地垂直气候特征。年均温1~2℃,最热和最冷月气温分别为12~15℃和-13~-11℃,≥0℃的年积温2450~2600℃。年均降水量350 mm左右,主要集中在6—9月,年蒸发量1500~1800 mm,相对湿度65%。年平均日照时数2200~2800 h,相对无霜期80 d左右。土壤以山地栗钙土为主,有机质36.5 mg·g⁻¹,全氮2.2 mg·g⁻¹,全磷0.6 mg·g⁻¹,全钾28.3 mg·g⁻¹,代换量15.1 me·100 g⁻¹土。种植人工草地是当地解决冷季家畜补饲的主要手段,研究区人工草地种植模式单一、草地单产较低,建立混播高产人工草地,是畜牧业生产可持续发展的关键途径之一。

1.2 试验设计

De Wit 取代试验研究法要求两物种的总密度不变而组分种的组成比例在0~100%之间变化(李博,2001)。运用取代实验方法,在单位面积总植株密度一定条件下,按照一年生燕麦和毛苕子的密度比例设置CK₁(0:10)、I(6:4)、II(5:5)、III(4:6)、IV(2:8)和CK₂(10:0)6种植方式。所有小区总密度为300株·m⁻²,浓硫酸处理打破毛苕子种子硬实,根据种子纯净度、干粒重和发芽率确定两种牧草单播和混播的播种量(CK₁和CK₂的用种量分别为9和19 g·m⁻²,其余依次类推)。小区面积2 m×5 m,3次重复,小区纵横间距均为0.50 m,共18个小区。2010年6月5—12日整理实验小区,去除地面植被,深翻30 cm内土层,平整地面。2010年6月15日播种,播种采用行播,行距20 cm,每行均匀播种燕麦与毛苕子,播种深度2~4 cm,实验过程中不施肥,分别于7月10日、8月5日、8月20日人工除草3次,8月2日人工灌溉1次。

在2010年7月17日—8月27日隔10 d取样一次,每个处理重复3次取样,考虑到一年生的燕麦与毛苕子根系相对较少,对其根系采取了沿根基周围逐层挖掘的全部挖掘法,深度为看不到细微根系的土层(冯福学等,2009),最大挖掘深度为60 cm,保留地上的植株并进行标记,根据外形、色泽、弹性区别燕麦与毛苕子根系重叠部分,并在现场绘制根系分布图,用游标卡尺测量根系直径,记录根系数目,最后收集起全部根系,将根系装入尼龙网后在水中浸泡30 min,然后再用自来水冲洗干净,用镊子去除杂质和杂根,之后将其分层平铺于根系扫描仪玻璃板上,经根系扫描仪灰度模式扫描并以图形文件格式存储到计算机中,再用WinRHZO(Pro 5.0)软件(加拿大

Regent Instruments 公司) 对之进行分析, 从而获得各处理不同土层的根长, 将扫描后的根系样品置入 80 °C 烘箱中, 烘干至恒重, 再分别称重和记录。

1.3 数据处理与分析

数据处理采用 Excel 软件和 SPSS 13.0 统计分析软件, 不同密度设置间的差异性采用单因素方差 (one-way ANOVA, Tukey's HSD) 分析。

2 结果与分析

2.1 燕麦与毛苕子根长密度垂直分布特征

在燕麦与毛苕子的混播草地中, 混播处理的植物根长密度较单播处理有明显差异, 且混播草地侧根根长密度大于主根根长密度(图 1)。I 处理下, 混播草地的根系主要集中在 0~10 cm 土层, 随着燕麦混播量减小, 侧根根长密度显著增大 ($P < 0.05$), 在 II 处理下, 0~5 和 5~10 cm 的侧根根长密度分别比单播增大了 0.39 和 0.41 $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$, 在 III 处理下, 各土层的主侧根同时增大, 其中 0~5、5~10 和 10~15 cm 土层的侧根根长密度比单播处理分别增大 1.01、0.38 和 0.12 $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$, 在 IV 处理下, 主根及 5 cm 土层的根长密度减小, 根系主要集中在 0~10 cm 土层, 侧根总根长密度达到 2.98 $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$, 比 CK 处理增大 1.23 $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

2.2 燕麦的根长密度分布特征

燕麦根系主要集中在 0~25 cm 土层, 随着土层加深, 主根根长密度和侧根根长密度逐渐减小(表 1)。随着燕麦混播量的减小, I、II 和 III 处理的主根根长密度显著增大 ($P < 0.05$), I 处理下主根总根长密度达到 0.048 $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$, 在 II 处理下, 总根长密度达到 0.017 $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$, III 处理主根总根长密度达到最大, 比 CK₁ 大 0.034 $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$, 且主根已分布至 15 cm, 在 IV 处理下, 总根长密度减小, 为 0.071 $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。与 CK₁ 相比, I、II、III 处理的燕麦侧根根长密度均集中在 0~5 cm 土层, 而 IV 处理的根长密度集中在 5~10 cm 土层, 其根长密度是燕麦单播的 2.7 倍, 且在 10~15、15~20 和 20~25 cm 土层 IV 处理的根长密度分别都达到最大值, CK₁ 的达到最小值。

2.3 毛苕子的根长密度分布特征

在不同的栽培处理下, 毛苕子主侧根的根长密度空间异质性存在显著差异(表 2)。毛苕子主根根长密度随着土层加深逐渐减小, 而侧根根长密度随着土层加深先增大后减小。随着毛苕子混播量增

大, 其根长密度显著增大 ($P < 0.05$), 且根系逐渐向底层土壤分布。在 5 个混播处理中, III 处理主根根长密度最大, 达到 0.3 $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$, 主根分布在 0~25 cm 土层; 其次是 CK₂ 处理, 其主根根长密度为 0.28 $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$; I 处理下毛苕子主根根长密度最小, 比 CK₂ 小 0.05 $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。与 CK₂ 相比, I 处理的侧根根长密度最小, 为 1.32 $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$, CK₂ 在 5 cm 以下土层的根长密度均达到最大值。

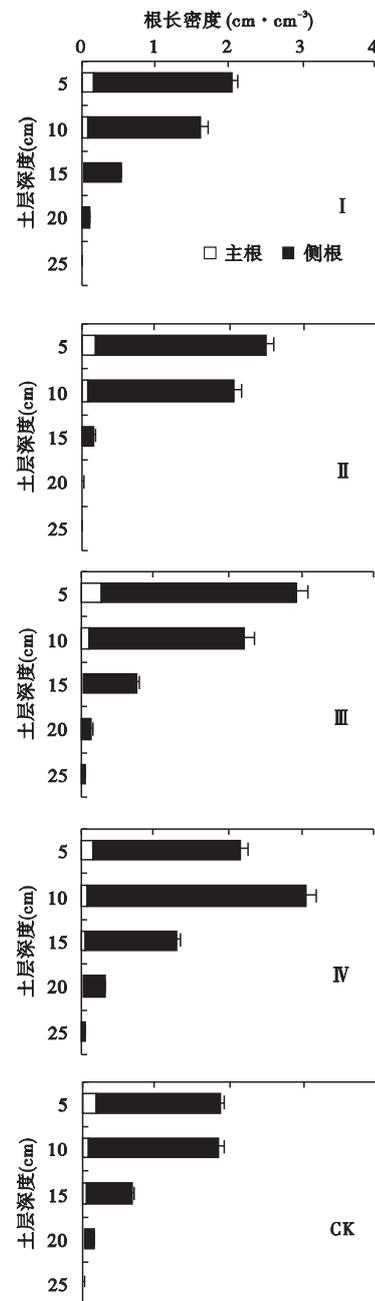


图 1 不同混播处理的主根与侧根根长密度
Fig.1 Root length density of taproot and lateral root in different treatments

表1 不同混播处理的燕麦根长密度

Table 1 Root length density of *Avena sativa* in different treatments

根系形态	土层深度 (cm)	密度设置($N_y : N_m$)				
		I (6 : 4)	II (5 : 5)	III (4 : 6)	IV (2 : 8)	CK ₁ (10 : 0)
主根	0~5	0.042±0.001 a	0.007±0.003 b	0.093±0.003 c	0.065±0.002 d	0.086±0.003 c
	5~10	0.006±0.001 a	0.010±0.001 a	0.031±0.001 b	0.006±0.001 c	-
	10~15	-	-	0.005±0.001	-	-
	15~20	-	-	-	-	-
	20~25	-	-	-	-	-
侧根	0~5	1.556±0.367 a	1.760±0.481 b	2.344±0.774 c	1.578±0.367 d	1.144±0.168 e
	5~10	0.947±0.101 a	1.275±0.268 b	1.532±0.367 c	2.238±0.774 d	0.839±0.096 e
	10~15	0.354±0.012 a	0.472±0.060 b	0.567±0.070 c	0.974±0.103 d	0.317±0.012 e
	15~20	0.096±0.002 a	0.101±0.003 a	0.094±0.003 b	0.270±0.011 c	0.059±0.001 d
	20~25	0.009±0.001 a	0.012±0.001 a	0.036±0.001 b	0.058±0.001 c	0.019±0.001 d

$N_y : N_m$ 表示燕麦和毛苕子的混播比例,表格中的数值为平均值±标准差,同行不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

表2 不同混播处理的毛苕子根长密度

Table 2 Root length density of *Vicia villosa* roots in different treatments

根系形态	土层深度 (cm)	密度设置($N_y : N_m$)				
		I (6 : 4)	II (5 : 5)	III (4 : 6)	IV (2 : 8)	CK ₂ (0 : 10)
主根	0~5	0.120±0.003 a	0.133±0.004 b	0.203±0.008 c	0.110±0.003 d	0.119±0.003 a
	5~10	0.074±0.002 a	0.088±0.003 b	0.084±0.003 c	0.081±0.003 c	0.097±0.003 d
	10~15	0.035±0.001 a	0.040±0.001 a	0.020±0.001 b	0.042±0.001 a	0.059±0.002 c
	15~20	-	0.010±0.001 a	0.009±0.001 a	0.016±0.001 b	0.024±0.001 b
	20~25	-	-	0.005±0.001 a	0.010±0.001 b	-
侧根	0~5	0.332±0.013 a	0.518±0.070 b	0.316±0.012 c	0.433±0.060 d	0.511±0.070 e
	5~10	0.622±0.080 a	0.708±0.093 b	0.592±0.080 c	0.740±0.094 d	0.908±0.101 e
	10~15	0.134±0.002 a	0.180±0.006 b	0.161±0.002 c	0.288±0.012 d	0.292±0.011 e
	15~20	0.009±0.003 a	0.014±0.001 b	0.004±0.001 b	0.046±0.001 c	0.089±0.003 d
	20~25	-	-	-	0.011±0.001	-

$N_y : N_m$ 表示燕麦和毛苕子的混播比例,表格中的数值为平均值±标准差,同行不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

3 讨论与结论

禾豆混播系统中,具须根系的禾草根系发达密集,竞争水分能力较强,激烈的水分竞争加剧了豆科植物在缺水条件下的根系可塑性 (Hoglund & Brock, 1978),从而达成禾豆共存机制,但是不同的播种密度根系生长机制不同 (Lloveras *et al.* 2004)。刘琳等 (2008) 通过单播与混播对两个冬小麦品种产量和水分利用效率的影响研究发现,混播使根系在深层土壤中的分布增加,提高了根系对深层土壤水分的吸收利用率。马春晖等 (1999) 对 70 黑麦 (*Avena sativa*) 和箭舍豌豆 (*Vicia sativa*) 混播草地生物量及种间竞争的动态研究发现,混播草地牧草在积累草地生物量上有明显优势。本研究表明,混播处理牧草的总根长密度明显高于单播处理,且燕麦的混播比例越小,混播草地牧草的总根长密度越大。通过燕麦与毛苕子密度的调整,改变了根长密度的配置策略和作物根系的生长发育,逐渐优化了根系

结构。混播处理下的根长密度明显大于单播处理,其中 4 个混播处理下的根长密度也存在显著性差异, I 处理的总根长密度最小, IV 处理的最大,并且随着燕麦密度的减小,混播草地牧草的根长密度呈逐渐增大的趋势。燕麦的密度大小是决定混播草地根系吸收能力的主导因素,这种高燕麦密度、低根长密度的现象可能与禾草与豆科牧草根系的分布格局有关。

根系的分布格局反映了植物对于环境的适应能力和竞争能力 (de Dorlodot 2007),适应能力越强,则植物地上部分越能适应其生存环境 (周艳松和王立群 2011),植物在长期进化过程中,为了最大限度地获取土壤资源,会对养分的空间异质性产生各种可塑性反应,如调整根系的根长密度以及空间构型等来实现斑块养分的高效利用 (Mou *et al.*, 1997)。在相同的环境条件下,不同的根长密度分布格局反映了具有不同特点的植物在相互竞争时采取的不同生态策略。李文尧等 (2010) 研究认为,干

旱胁迫抑制了紫花苜蓿主根的伸长生长,同时促进了侧根的生长并带来了根系总长度的增加。张喜英(1999)报道,干旱来临时,根系会通过增加在土壤中所占的体积和根长密度来提高土壤水分的供应能力。本研究发现,混播处理下的燕麦与毛苕子根系形态变化差异明显。在4个混播处理中,燕麦主根的平均根长密度在 $0.025 \sim 0.06 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$,与 CK_1 处理(0.09)相比,混播草地燕麦的主根根长密度明显受到抑制,但是在空间上有逐渐向底层土壤下移的趋势;而燕麦的侧根平均根长密度在 $0.59 \sim 1.02 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。与 CK_1 处理(0.48)相比,混播处理促进了燕麦侧根的生长发育,并且底层土壤的侧根根长密度明显大于 CK_1 。主根强迫式占据土壤空间,增大了侧根在底层土壤吸收能力的潜力。毛苕子作为直根系植物,其主侧根的根长密度构建决定着混播草地根系功能的转化。在4个混播处理中,毛苕子主根平均根长密度在 $0.08 \sim 0.10 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$,与 CK_2 (0.09)相比,混播草地毛苕子主根生长受到了抑制,而其侧根平均根长密度达到 $0.27 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 以上,毛苕子侧根生长受到促进。因此,在混播处理下,毛苕子通过增大侧根生长比重、促进侧根的生长等来扩大吸收范围,加强对深层土壤资源的利用,这是毛苕子避免和忍耐表层竞争的适应策略。

生态环境决定草地的自然生产力,而栽培措施(如混播量)决定着草地的竞争能力(盛亚萍等,2011)。在高寒山区,通过采取合理的农艺措施影响根系生长、促进作物根系合理分布,来提高作物产量和水分及养分利用效率是一项重要的研究内容。土壤资源的有效性在垂直分布上出现的差异,会使得各个层次根系的结构和功能发生转变,而转变的最基本反应就是通过调整其根长密度,以适应其空间环境(Jackson *et al.*, 1996)。众多研究表明,垂直梯度上根长密度空间分布特征有两种结论:1)垂直方向上随着土层的增加而减小(O'grady *et al.*, 2005);2)垂直方向上随着土层的增加先增大后减小。在本研究中,燕麦的分布特征与前者一致,而毛苕子与后者一致。燕麦主根主要分布在 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土层,表层土壤N含量高(水分充足和温度适宜),因而根系主要集结在表层内以获取养分。分蘖型植物根系的主根在表层土壤的分布可以在植物生长关键时期提供强大资源动力,主根强大的支撑和运输作用为表层侧根的生长提供了可能,致使44.5%的燕麦侧根也集中分布在 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 层。随着侧根数

量剧增,空间资源的有限性加剧了根系的种内竞争,种内竞争迫使侧根向下层拓展, 10 和 15 cm 土层燕麦的侧根比例分别达到36.8%和14.5%。毛苕子根长密度的配置策略与燕麦有很大差异。毛苕子主要选择通过增加主根的深度和底层侧根数量的投入(主根可分布至 25 cm 土层)的策略来扩展根系的生长空间,避免与燕麦表层根系的剧烈竞争。其次,主根强大的运输作用为侧根的生长提供了可能性,所以毛苕子集中增大了在 $5 \sim 10$ 和 $10 \sim 15 \text{ cm}$ 土层的侧根(侧根比例分别达到51.7%和14.8%)。燕麦和毛苕子主根和侧根等形态上的垂直变化虽然趋势不一,但彼此间的相互协调一方面维系了底层根系的吸收能力,另一方面减弱了单播植物“大根系”冗余消耗养分的弊端。因此混播条件下牧草根系形态上的变化在其对环境的适应中可能起到更大的作用。

综上所述,随着混播量的变化,高寒山区燕麦与毛苕子主根和侧根的根长密度均产生了适应性变化,这些变化存在于物种间、主侧根间以及土层间。面对不同的播种密度,根长密度的适应性变化是其适应种间竞争的主要机制。在高寒山区生长季短的生存环境下,为了保证捕获最大限度的自然资源,并以良好栽培模式获得最高的地上生物量,作物必须优化自身的根系结构。其中,在形态上主要是通过增加侧根的根长,栽培方式上主要是通过禾豆混播和减小燕麦密度的方式来达到优化的效果。但是,高寒山区混播草地如何通过调节根系构型适应土壤环境以及土壤水分等因素对根系的影响等问题还有待进一步的研究。

参考文献

- 杜国祯,王刚,赵松岭. 1993. 两种一年生植物在替代试验中的相互竞争关系. 草业学报, 2(1): 6-14.
- 冯福学,黄高宝,柴强,等. 2009. 不同耕作措施对冬小麦根系时空分布和产量的影响. 生态学报, 29(5): 2499-2506.
- 李博. 2001. 植物竞争: 作物与杂草相互作用的实验研究. 北京: 高等教育出版社.
- 李秋娜. 2007. 石羊河上游一年生人工草地种间关系及杂草群落动态研究(硕士学位论文). 兰州: 甘肃农业大学.
- 李文婧,张岁岐,丁圣彦,等. 2010. 干旱胁迫下紫花苜蓿根系形态变化及与水分利用的关系. 生态学报, 30(19): 5140-5150.
- 刘琳,李凤民,徐炳成,等. 2008. 单播与混播对两个冬小麦品种产量和水分利用效率的影响. 应用生态学报, 19(1): 93-98.

- 鲁春霞,于格,谢高地,等. 2006. 高寒草地土壤保持功能的风洞模拟及其定量评估. *自然资源学报*, **21**(2): 319-326.
- 马春晖,韩建国,李鸿祥,等. 1999. 冬牧70黑麦+箭舌豌豆混播草地生物量、品质及种间竞争的动态研究. *草业学报*, **8**(4): 56-64.
- 盛亚萍,赵成章,高福元,等. 2011. 高寒山区混播草地燕麦和毛苕子种间的竞争关系. *生态学杂志*, **30**(11): 2437-2441.
- 王军邦,王政权,胡秉民,等. 2002. 不同栽植方式下紫椴幼苗生物量分配及资源利用分析. *植物生态学报*, **26**(6): 677-683.
- 向言词,彭少麟,彭秀花,等. 2005. 地下根竞争对3种木本植物幼苗生长的影响. *热带亚热带植物学报*, **13**(2): 105-108.
- 张喜英. 1999. 高粱根系生长发育规律及动态模拟. *生态学杂志*, **18**(5): 65-67.
- 周瑞莲,赵哈林. 2004. 春季高寒山区牧草低温保护物质变化与其脱冻适应间关系研究. *西北植物学报*, **24**(2): 199-204.
- 周艳松,王立群. 2011. 星毛委陵菜根系构型对草原退化的生态适应. *植物生态学报*, **35**(5): 490-499.
- de Dorlodot S, Forster B, Pagès L, et al. 2007. Root system architecture: Opportunities and constraints for genetic improvement of crops. *Trends in Plant Science*, **12**: 474-481.
- Eissenstat DM, Wells CE, Yanai RD. 2000. Building roots in a changing environment: Implications for root longevity. *New Phytologist*, **147**: 32-42.
- Forde BG, Lorenzo H. 2001. The nutritional control of root development. *Plant and Soil*, **232**: 51-68.
- Harper JL. 1977. *Population Biology of Plants*. London: Academic Press.
- Haynes RJ. 1980. Competitive aspects of the grass-legume association. *Advances in Agronomy*, **33**: 227-261.
- Hoglund JH, Brock JL. 1978. Regulation of nitrogen fixation in a grazed pasture. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, **21**: 73-82.
- Jackson RB, Canadell JR, Ehleringer JR, et al. 1996. A global analysis of root distribution for terrestrial biomass. *Oecologia*, **108**: 389-411.
- Lloveras J, Manent J, Viudas J, et al. 2004. Seeding rate influence on yield and yield components of irrigated winter wheat in a Mediterranean climate. *Agronomy Journal*, **96**: 1258-1265.
- Moreira N. 1989. The effect of seed rate and nitrogen fertilizer on the yield and nutritive value of oat-vetch mixtures. *The Journal of Agricultural Science*, **112**: 57-66.
- Mou P, Michell RJ, Jones RH. 1997. Root distribution of two tree species under a heterogeneous environment. *Journal of Applied Ecology*, **34**: 645-656.
- O'grady AP, Worledge D, Battaglia M. 2005. Temporal and spatial changes in fine root distributions in a young *Eucalyptus globules* stand in southern Tasmania. *Forest Ecology and Management*, **214**: 373-383.

作者简介 盛亚萍,女,1986年生,硕士研究生。主要从事生物地理学研究。E-mail: shy_19@126.com
责任编辑 张敏
