

# 不同生境下荒漠植物红砂-珍珠猪毛菜混生根系的垂直分布规律

单立山\* 苏 铭 张正中 王 洋 王 珊 李 毅

甘肃农业大学林学院, 兰州 730070

**摘 要** 植物种间相互作用及其对环境胁迫的响应一直是物种共存和生物多样性维持研究的一个热点, 从地下根系入手来探讨混生群落植物种间关系及其对环境胁迫响应的研究少见报道。该文以荒漠草原区(灵武)、典型荒漠区(张掖)和极端荒漠区(酒泉) 3个不同生境条件下单生与混生红砂(*Reaumuria soongarica*)和珍珠猪毛菜(*Salsola passerina*)为实验材料, 采用分层取样法对其垂直根系参数进行测定和分析, 探讨了两种植物根系分布对混生及荒漠环境梯度的响应。结果表明: 同一生境条件下, 混生红砂和珍珠猪毛菜比根长和比表面积均高于单生, 说明红砂、珍珠猪毛菜混生后其根系相互作用关系表现为互惠, 促进了植株对土壤养分和水分的吸收。不同生境条件下, 同一生长方式的红砂根系分布深度均大于珍珠猪毛菜, 且根系消弱系数也普遍高于珍珠猪毛菜, 说明二者在不同生境条件下占据不同生态位, 红砂表现为深根性, 根系位于土壤深层, 珍珠猪毛菜表现为浅根性, 根系分布于土壤浅层。随着荒漠环境胁迫增强, 单生和混生红砂与珍珠猪毛菜的比根长和比表面积均呈现出极端荒漠区>典型荒漠区>草原荒漠区的规律, 且生境越干旱, 混生群落根系分离越明显; 单生与混生红砂根系消弱系数也逐渐增大, 在极端干旱区达到最大值, 珍珠猪毛菜变化不大, 表明红砂-珍珠猪毛菜混生群落根系生态位分离随荒漠环境胁迫增强而加大, 验证了环境胁迫梯度假说。可见“地上聚生, 地下分离”的混生方式可能是红砂-珍珠猪毛菜混生群落适应干旱胁迫环境的生长策略。

**关键词** 根系垂直分布; 根系消弱系数; 种间关系; 环境胁迫梯度假说; 红砂; 珍珠猪毛菜

单立山, 苏铭, 张正中, 王洋, 王珊, 李毅 (2018). 不同生境下荒漠植物红砂-珍珠猪毛菜混生根系的垂直分布规律. 植物生态学报, 42, 475–486. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0300

## Vertical distribution pattern of mixed root systems of desert plants *Reaumuria soongarica* and *Salsola passerina* under different environmental gradients

SHAN Li-Shan\*, SU Ming, ZHANG Zheng-Zhong, WANG Yang, WANG Shan, and LI Yi

College of Forestry Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

### Abstract

**Aims** How plant species interaction changes along environmental gradients has remained a hot issue in studies of species coexistence and biodiversity maintenance. This study was conducted to determine the responses of root systems to drought stress in desert *Reaumuria soongarica*-*Salsola passerina* communities, in order to better understand the interspecific relationships of plant communities in response to environmental stresses.

**Methods** Monocultural and mixed *R. soongarica* and *S. passerina* communities were selected in Lingwu, Zhangye and Jiuquan, representing a drought stress gradient varying from desert steppe habitat to extreme desert habitat. Measurements were made on the vertical structures of root traits including specific root length (SRL) and specific root surface area (SRA). Root samples were collected by trench method by layers.

**Important findings** Both SRL and SRA had greater values in mixed *R. soongarica*-*S. passerina* communities than in monocultural communities of either species within given habitat, suggesting a mutually beneficial relationship between the two species and the enhanced ability of roots to absorb soil nutrients and water when in mixture. *Reaumuria soongarica* had deeper roots and a greater root extinction coefficient in vertical distribution than *S. passerina* in either monocultural or mixed communities, indicating the belowground niche segregation

收稿日期Received: 2017-11-15 接受日期Accepted: 2018-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(31560135)、甘肃省自然科学基金(1606BJZA005)、甘肃省科技支撑项目(1604FKCA088)和甘肃省重点研发计划项目(17YF1WA161)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (31560135), the Province Natural Foundation of Gansu (1606BJZA005), the Gansu Science and Technology Support Program (1604FKCA088), and the Key Research and Development Program of Gansu Province (17YF1WA161).

\* Email: shanls@gsau.edu.cn

between the two species. We also found that greater the environmental stress, the higher values of *SRL* and *SRA* in both *R. soongarica* and *S. passerina*. The root extinction coefficient was about the same between the monocultural and mixed communities for *R. soongarica*, but changed a little for *S. passerina*. With increasing drought stress, the belowground niche segregation became more apparent, conforming to the stress gradient hypothesis. The observed patterns of aggregation aboveground and segregation belowground between *R. soongarica* and *S. passerina* in the mixed communities might be an adaptive strategy to drought environment of these two desert plant species.

**Key words** vertical root system; root extinction coefficient; interspecific relationship; stress gradient hypothesis; *Reaumuria soongarica*; *Salsola passerina*

Shan LS, Su M, Zhang ZZ, Wang Y, Wang S, Li Y (2018). Vertical distribution pattern of mixed root systems of desert plants *Reaumuria soongarica* and *Salsola passerina* under different environmental gradients. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 475–486. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0300

物种共存和多样性形成机制一直是生态学研究的核心问题(Debra *et al.*, 2014), 植物间的正负相互作用对于物种分布(Xue *et al.*, 2017)、植物生理生态特性(Su *et al.*, 2012)、种群动态(Grime, 1979)、群落结构(Tilman, 1988)以及生态系统功能有重要影响(Callaway, 2007)。经典的生态位理论认为, 物种在某种(或多种)环境资源利用上存在差异, 即物种之间的生态位分化是物种共存的基本机制(Chesson, 2000)。其中, 相邻同种和异种个体根系竞争形成的生态位分离是物种共存和生物多样性维持的一条重要途径(February *et al.*, 2011)。由于地下部分研究的困难, 人们对根系相互作用的关系了解甚少(Copely, 2000)。已有研究指出, 植物种间关系主要靠地下根系与土壤之间的物理、化学和生物过程表现出的竞争关系, 来实现对水资源进行合理分配利用(王政权等, 2003), 在判定竞争平衡、竞争强度和资源利用方面, 地下部分的竞争作用明显重要于地上部分, 从地下根系形态和分布特征来认识物种间竞争和互利共生现象, 才能了解种间关系的本质(陈伟和薛立, 2004)。已有研究表明, 植物会因相邻植物(同种或异种)的竞争来调整根系的分布格局(Hodge, 2004); 且这种变化在非生物胁迫环境(干旱/半干旱地区、高寒地区和盐沼地带)中更容易观测到(张炜平等, 2013)。在自然条件下, 植物同时与环境以及竞争者的根系产生联系, 但是我们不知道植物是如何整合与这些因子有关的信号, 并且如何做出响应(罗维成等, 2012)。因此, 从地下根系入手, 开展植物种间相互作用及其对环境胁迫梯度响应的研究, 对胁迫环境下植被的恢复有重要指导意义, 同时对农林系统中混交林、纯林以及林木-草-农作物系统的构建具有实践意义。

植物根系之间的相互作用是一种复杂的生态学过程, 在此过程中, 为了适应竞争环境, 提高竞争效率, 吸收较多的养分和水分, 根系表现出明显的可塑性(王政权和张彦东, 2000; Meyer *et al.*, 2007; 王鹏等, 2012)。多数关于植物种间地下根系分布的研究表明, 为实现物种共存, 植物通过根系的生态位分离以避免或减少竞争(Holdo & Timberlake, 2008; Hajek *et al.*, 2014)。早在20世纪30年代, Walter (1939)就对热带亚热带稀树草原中乔草共存机制进行了研究, 率先提出根系“双层分布”模型。林木混交因其根竞争也会诱发根系空间分布变化, 使林木在土壤水分和养分利用上存在差异(Leuschner *et al.*, 2001; Curt & Prévosto, 2003; Bolte & Villanueva, 2006), 而发生根系生态位分离现象。然而, 植物根系生态位分离不仅与竞争者有关, 而且与环境的异质性关系紧密(Cahill, 2010)。Bertness和Callaway (1994)提出了环境胁迫梯度假说, 认为植物种间互利的强度或重要性随着环境胁迫度的增加而增加。Callaway等(2002)研究发现随着海拔的升高, 植物间互惠作用增强, 植物间邻体作用有利于其生态位的扩充, 也就是说, 正相互作用更多发生在较寒冷的环境中, 而竞争更多发生在较温暖的环境中。O'Connor和Roux (1995)也发现, 在草-灌共存的干旱生态系统中, 随着水分胁迫程度的增加, 植物可通过地下根系形态调整来减少种间竞争实现互惠。Schenk和Jackson (2002)、Padilla和Pugnaire (2007)研究指出, 随干旱胁迫进一步加剧, 在草本植物和豆科灌木混生的群落中, 豆科灌木通过根系深扎和根系进一步扩展形成地下根系生态位分离, 减少种间根系对土壤水分竞争。以上研究均表明, 随着干旱胁迫的增加, 根系竞争作用减

弱, 而促进作用相应增强, 当干旱胁迫增加到一定程度时, 根间的关系便会从竞争转变为促进作用。然而, 目前大多数对环境胁迫梯度假说的研究多集中在混交林、草-灌、草-草等植物群落, 而对荒漠区珍贵的木本植物混生群落, 特别是其地下根系相互作用关系及其对荒漠环境梯度的响应研究较缺乏。因此, 开展荒漠环境梯度下荒漠木本植物群落地下根系的分配格局及其相互关系的研究, 对揭示荒漠区物种共存和生物多样性维持具有重要意义。

红砂 (*Reaumuria soongarica*) 和珍珠猪毛菜 (*Salsola passerina*) 是干旱荒漠和荒漠草原区分布最广的植物种, 两者常互为共建种组成混生群落, 混生群落适应极端环境的能力要高于单生群落, 这种混生群落对维持生态系统稳定和高效利用降水资源有着极其重要的作用 (Su *et al.*, 2012)。在自然分布的混生群落中, 有时红砂和珍珠猪毛菜各自单独生长, 称之为单生, 有时它们紧密生长在一起, 称之为混生 (Su *et al.*, 2012)。近年来, 人工控制实验条件下红砂和珍珠猪毛菜混生后两者的生理变化特征正逐渐受到人们的重视 (周海燕等, 2012), 就水分胁迫下红砂和珍珠猪毛菜混生后其垂直根系变化也有一些零星报道 (严巧娣等, 2012)。然而, 红砂和珍珠猪毛菜组成的混生群落广泛分布于我国荒漠东部和荒漠草原区, 其生境类型多样, 由东向西其气候形成光-温-湿的明显梯度和多种多样的水热组合, 在我国形成了沿荒漠环境梯度从荒漠草原区、典型荒漠区到极端荒漠区的分布格局。这种沿荒漠环境梯度分布的木本植物自然混生群落是珍贵的植物混生生长类型, 为研究植物种间的相互作用关系提供了很好的研究对象和场所, 也为验证环境胁迫梯度假说提供了很好的实验材料。为此, 本研究按自然降雨梯度选取了单生和混生的红砂与珍珠猪毛菜为实验材料, 比较了其单生和混生时地下垂直根系分布差异, 试图回答以

下几个问题: 1) 同一生境条件下, 两种荒漠植物在单生和混生时其垂直根系分布规律是否有差异? 2) 荒漠环境梯度下, 单生和混生红砂或珍珠猪毛菜其垂直根系分布格局如何变化, 是否支持环境胁迫梯度假说? 回答这些问题对深化理解环境胁迫驱动的植物相互作用负/正的转变和完善该理论具有重要的学术价值, 对指导胁迫环境下的植被恢复具有重要的意义。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

在灵武、张掖、酒泉红砂-珍珠猪毛菜自然混生群落中设定采样点。其中, 灵武 (38.10° N, 106.34° E) 为荒漠草原区。气候干燥, 雨量少而集中, 蒸发强烈, 冬冷夏热, 气温日较差大; 日照较长, 光能丰富; 无霜期较短, 冬春季风沙天气较多。其地带性植被为沙生针茅 (*Stipa glareosa*)、野蓟 (*Cirsium maackii*)、甘草 (*Glycyrrhiza uralensis*)、沙蒿 (*Artemisia sphaerocephala*) 等荒漠植被。张掖 (38.55° N, 100.27° E) 为典型荒漠区, 夏季炎热, 干旱少雨; 日照时间长, 光热资源充足, 冬寒夏暖, 四季分明, 降雨集中于夏季。其地带性植被为红砂、珍珠猪毛菜、甘草等荒漠植被。酒泉 (39.53° N, 98.47° E) 为极端荒漠区, 降水量少, 蒸发强烈, 日照时间长, 昼夜温差大, 冬季寒冷, 夏季炎热, 春季多风。其地带性植被有红砂、珍珠猪毛菜、盐爪爪 (*Kalidium foliatum*)、合头草 (*Sysmpeigma regelii*) 等。不同研究区的水热状况见表1。

1.2 试验方法

本研究于植物生长季末2016年9月下旬至10月上旬开展。在灵武、张掖、酒泉3个红砂和珍珠猪毛菜混生群落自然分布区设定样地, 在各样地分别选取有代表性、大小均一的单生红砂与单生珍珠猪毛菜以及混生红砂和珍珠猪毛菜, 重复数为3。选择植株时, 尽量使所选取的灌丛微环境相同, 以减少环

表1 研究区水热条件比较  
Table 1 Comparison of hydrothermal conditions in the study areas

采样点 Sample site	平均海拔 Mean elevation (m)	年平均气温 Mean annual temperature (°C)	年降水量 Mean annual precipitation (mm)	年蒸发量 Mean annual evaporation (mm)	年日照时间 Mean annual sunshine times (h)
灵武 Lingwu	1 278	8.9	213	1 762	3 011
张掖 Zhangye	1 590	6.0	110	2 003	3 075
酒泉 Jiuquan	1 500	7.5	58	2 038	3 228

境不同而造成的实验误差。所选植物周围1 m的范围内无其他植物生长,避免来自周围植物的种间或种内作用的影响。采用分层取样法(高杰, 2014; 孙文泰等, 2016)挖取根系,具体方法为:在离植株根茎为1 m处挖壕沟(长×宽×深= 50 cm × 70 cm × 120 cm),沿沟壁将根系(主根与侧根)慢慢从上到下按10 cm一层分层挖出,直至把根挖完,用土筛将根系筛出,然后分别装于不同的信封标记,带回实验室。将这些根样用水洗净杂质和泥沙,用Epson扫描仪进行扫描,然后用Win-RhIZO根系分析软件分析出根系垂直分布指标,如根长、根表面积。将扫描过的根系重新装入信封,105 °C杀青2 h后,在65 °C恒温烘箱中烘48 h至恒质量,用天平称量得到红砂、珍珠猪毛菜单生和混生地下各层生物量(马晓东等, 2012)。根据Win-RhIZO根系分析软件测定的根系形态指标以及根系生物量(RB),计算出两种荒漠植物根系的比根长(SRL)、比表面积(SRA)等参数。计算公式如下:

$$\text{比根长}(\text{cm}\cdot\text{g}^{-1})=\text{根长}/\text{生物量}$$

$$\text{比表面积}(\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1})=\text{表面积}/\text{生物量}$$

利用Gale和Grigal (1987)植物根系垂直分布的非线性模型计算了单生和混生条件下红砂和珍珠猪毛菜的根系消弱系数 $\beta$ ,具体计算公式如下:

$$Y=1-\beta^d$$

式中, $Y$ 代表从土壤表面至某土层深度 $d$  (cm)的根系生物量的累积百分比, $\beta$ 为根系消弱系数。其中, $\beta$ 值越大(越接近1),表明植物根系在较深土壤层次中分布的比例越多;反之,则表示植物根系在浅层土壤中分布的比例越多。

### 1.3 数据统计分析

所有的数据采用SPSS 22.0进行统计分析,对同一生境不同生长方式下同种植物根系生态指标进行了独立样本 $t$ 检验,对同一生长方式不同生境条件

下同种植物根系形态指标进行了单因素方差分析;用一般线性模型对环境梯度和生长方式的交互效应进行双因素方差分析;使用Matlab拟合红砂和珍珠猪毛菜根系从地表至 $d$  cm深度的根系累积消弱曲线。做图采用Microsoft Excel 2010,图中数值均为平均值±标准误差。

## 2 结果和分析

### 2.1 不同生境下单生和混生红砂与珍珠猪毛菜根系比根长(SRL)的垂直分布特征

从表2可以看出,环境梯度和生长方式及两者的交互作用对SRL均无显著影响( $p > 0.05$ )。然而,各生境条件下,单生或混生珍珠猪毛菜同层SRL均大于单生或混生红砂(图1)。同一生境下,单生和混生红砂SRL随土壤深度加深均呈现出先增加后减少的趋势,其根系垂直分布深度相同;而单生和混生珍珠猪毛菜SRL随土壤深度加深呈现出增加的变化趋势,单生珍珠猪毛菜的根系垂直分布深度比混生珍珠猪毛菜少10–20 cm。与单生相比,混生红砂和珍珠猪毛菜各层SRL均有较大增幅,最大可达89.65%和89.92%,其中红砂在灵武的40–50 cm和张掖的0–10 cm土壤深度差异性达到显著水平( $p < 0.05$ ),珍珠猪毛菜在酒泉的0–10 cm土壤深度差异性达到极显著水平( $p < 0.001$ )。从图1还可看出,随着荒漠环境梯度的增强,单生和混生红砂与珍珠猪毛菜SRL大小排序均为:酒泉>张掖>灵武;在灵武与张掖、张掖与酒泉比较中发现,同一生长方式红砂SRL于0–10 cm土壤深度的差异分别达到显著水平,单生珍珠猪毛菜SRL则在灵武和酒泉地区10–20土壤深度的差异达到显著水平( $p < 0.05$ )。

### 2.2 不同生境下单生和混生红砂与珍珠猪毛菜根比表面积(SRA)的垂直分布特征

从表2可以看出,环境梯度和生长方式及两者

表2 环境胁迫梯度和生长方式对红砂和珍珠猪毛菜比根长(SRL)、比表面积(SRA)、根系生物量(RB)和根系消弱系数( $\beta$ )影响的双因素方差分析( $F$ 值)  
Table 2 Two-way ANOVA ( $F$ -values) of the effects of environmental stress gradient and community type on specific root length (SRL), specific root surface area (SRA), root biomass (RB) and root extinction coefficients ( $\beta$ ) in *Reaumuria soongarica* and *Salsola passerina*

变异来源 Source of variation	红砂 <i>R. soongarica</i>				珍珠猪毛菜 <i>S. passerina</i>			
	SRL	SRA	RB	$\beta$	SRL	SRA	RB	$\beta$
环境梯度 Environment gradient	0.444	1.237	121.887**	2.104	1.554	1.363	28.556**	0.844
生长方式 Community type	0.224	1.212	84.367**	2.194	0.284	1.083	106.824**	3.265
环境梯度×生长方式 Environment gradient × community type	2.797	0.080	14.944**	2.303	1.978	0.088	18.258**	1.398

\*\*, 极显著。

\*\*, highly significant.

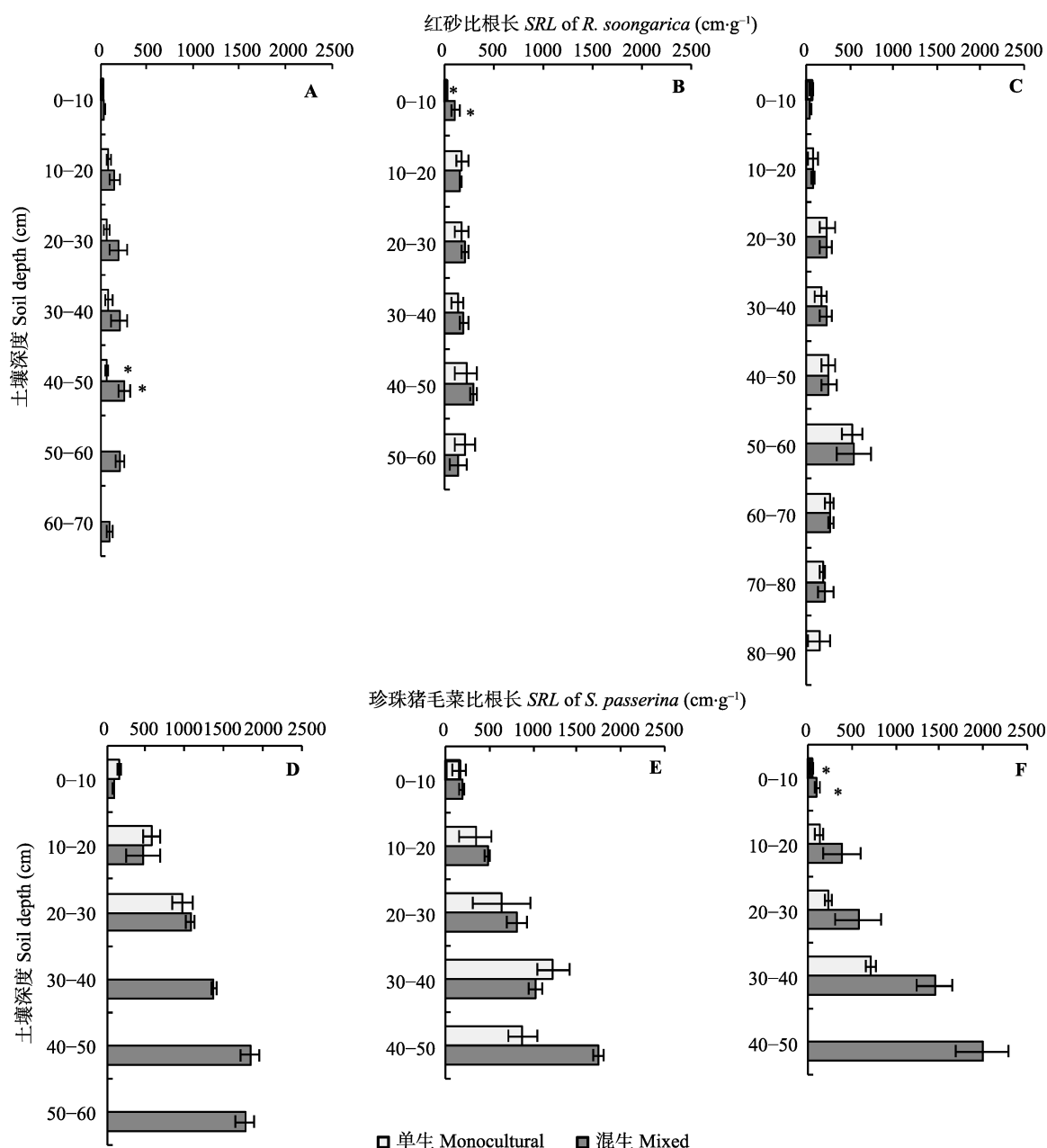


图1 不同生境下单生和混生的红砂与珍珠猪毛菜根系比根长的垂直分布特征(平均值±标准误差)。A, 灵武红砂。B, 张掖红砂。C, 酒泉红砂。D, 灵武珍珠猪毛菜。E, 张掖珍珠猪毛菜。F, 酒泉珍珠猪毛菜。\*表示同一生境下同层单生和混生红砂或珍珠猪毛菜的差异显著( $p < 0.05$ )。

**Fig. 1** The vertical distributions of specific root length (SRL) in monocultural and mixed communities of *Reaumuria soongarica* and *Salsola passerina* in different habitats (mean  $\pm$  SE). A, *R. soongarica* in Lingwu. B, *R. soongarica* in Zhangye. C, *R. soongarica* in Jiuquan. D, *S. passerina* in Lingwu. E, *S. passerina* in Zhangye. F, *S. passerina* in Jiuquan. \* indicates the significant difference between monocultural and mixed communities of *R. soongarica* and *S. passerina* within the same habitat ( $p < 0.05$ ).

的交互作用对SRA均无显著影响( $p > 0.05$ )。然而, 不同生境条件下, 单生或混生珍珠猪毛菜同层SRA均大于单生或混生红砂(图2)。相同生境下, 单生和混生红砂SRA基本随土壤深度增加呈现出先增加后减少, 珍珠猪毛菜则随土壤深度增加呈现出增加的趋势。与单生相比, 混生红砂和珍珠猪毛菜各层SRA

均有较大增幅, 最大可达78.70%和86.76%, 其中, 红砂在灵武的50–60 cm土壤深度差异性达到极显著水平( $p < 0.001$ ), 而珍珠猪毛菜在张掖和酒泉的0–10 cm土壤深度差异性达到显著水平( $p < 0.05$ )。图2还显示, 随着环境胁迫梯度的增强, 单生和混生红砂和珍珠猪毛菜SRA基本呈现出灵武<张掖<酒泉的

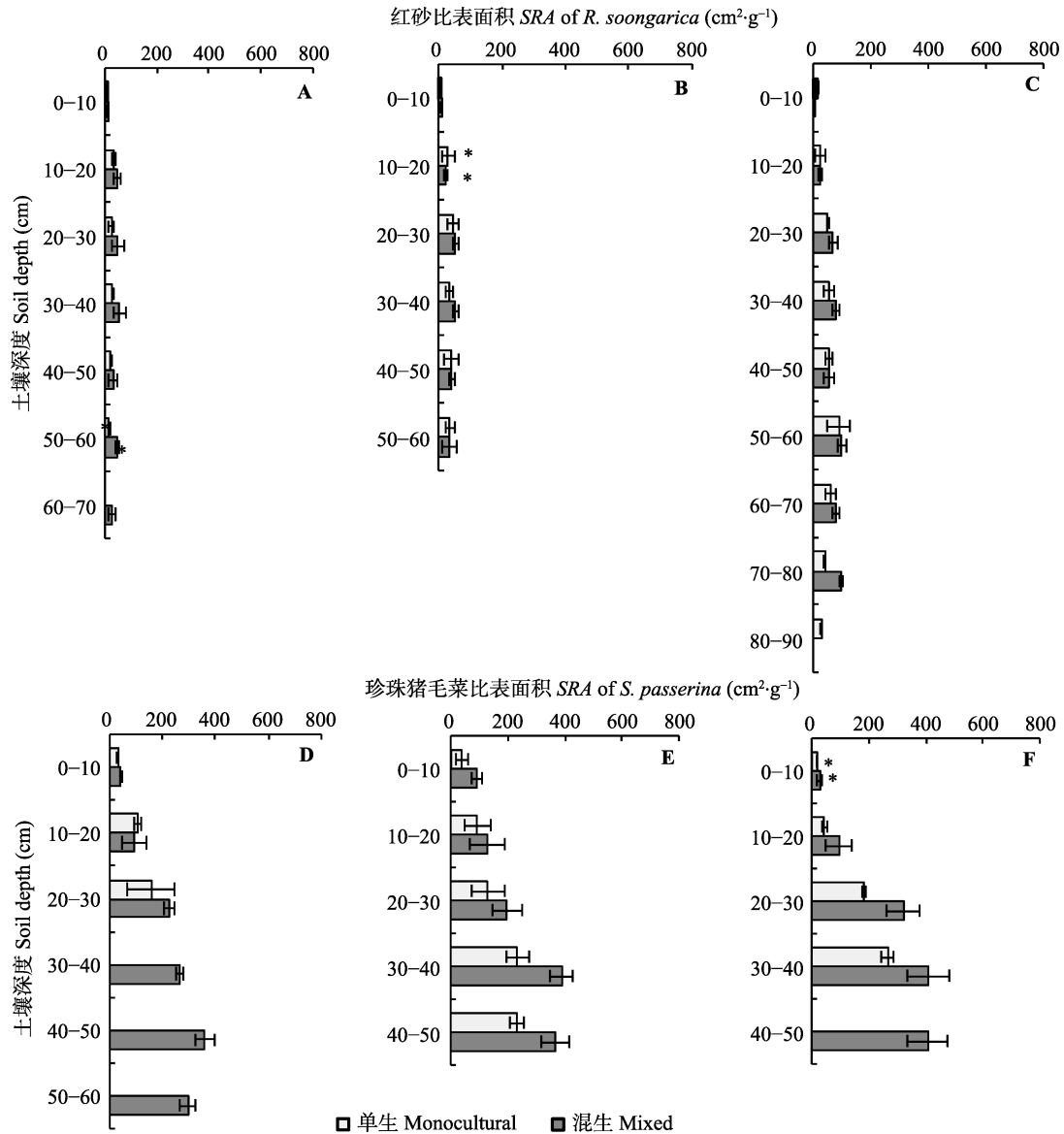


图2 不同生境下单生和混生的红砂与珍珠猪毛菜根系比表面积的垂直分布特征(平均值 $\pm$ 标准误差)。

**Fig. 2** The vertical distributions of specific root surface area (SRA) in monocultural and mixed communities of *Reaumuria soongarica* and *Salsola passerina* in different habitats (mean  $\pm$  SE).

趋势。相同生长方式不同生境条件下,在0–10 cm和20–30 cm土壤深度红砂SRA差异达到极显著水平( $p < 0.001$ ),单生珍珠猪毛菜在不同生境条件下10–20 cm土壤深度的SRA差异达到显著水平( $p < 0.05$ )。

### 2.3 不同生境下单生和混生红砂与珍珠猪毛菜根系生物量垂直分布特征

从表2可以看出,环境梯度和生长方式及两者的交互作用对两种荒漠植物根系生物量均有极显著的影响( $p < 0.001$ )。不同生境条件下,单生或混生红砂和珍珠猪毛菜根系生物量均随着土壤深度增加呈现出递减的趋势。同一生境条件下,混生红砂根系

生物量大于同层单生红砂,珍珠猪毛菜则刚好相反;其中,红砂在张掖的0–10 cm和酒泉的10–20 cm土壤深度差异性达到显著水平( $p < 0.05$ ),珍珠猪毛菜在酒泉的0–10 cm和30–40 cm土壤深度差异性达到极显著水平( $p < 0.01$ )。图3还显示,同一生长方式下,极端荒漠区(酒泉)两种荒漠植物同层根系生物量均大于典型荒漠区(张掖)和半干旱区(灵武)。不同生境条件下,在0–20 cm土壤深度,单生与混生红砂根系生物量差异达到极显著水平( $p < 0.01$ );而单生与混生珍珠猪毛菜在0–10 cm和30–40 cm达到极显著水平( $p < 0.01$ )。同时,单生和混生红砂根系垂直分布

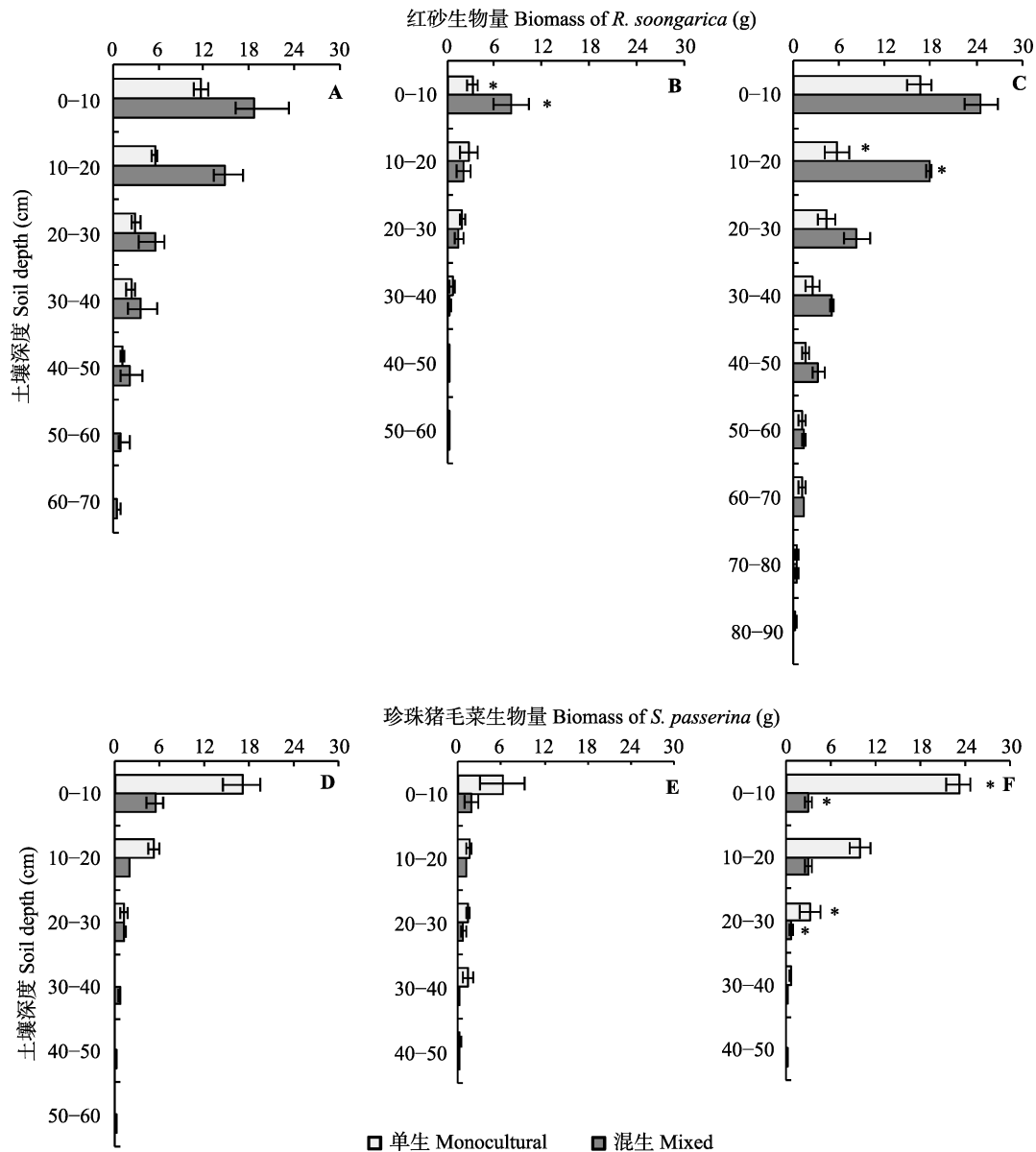


图3 不同生境下单生和混生的红砂与珍珠猪毛菜根系生物量的垂直分布特征(平均值±标准误差)。  
Fig. 3 The vertical distributions of biomass between in monocultural and mixed communities of *Reaumuria soongarica* and *Salsola passerina* in different habitats (mean ± SE).

深度随着环境胁迫的加剧而增加, 酒泉根深可达 90 cm, 而单生和混生的珍珠猪毛菜根系垂直分布深度基本维持在30–50 cm。

2.4 不同生境下单生和混生红砂与珍珠猪毛菜根系消弱系数的比较

双因子方差分析表明, 环境梯度和生长方式及两者的交互作用对根系消弱系数均无显著影响( $p > 0.05$ )(表2)。从表3可以看出, 同一生境条件下, 单生或混生红砂根系削弱系数均大于单生或混生珍珠猪毛菜; 不同生境条件下两种荒漠植物混生后其根系消弱系数均大于或等于单生, 其中, 在灵武地区混

生珍珠猪毛菜根系消弱系数显著大于单生珍珠猪毛菜( $p < 0.01$ )。在相同生长方式下, 红砂根系消弱系数随着环境胁迫梯度增加呈现上升变化趋势, 在极端干旱区酒泉达到最大值; 不同生境条件下珍珠猪毛菜根系消弱系数无明显变化规律, 各生境条件下差异不大。

3 讨论

3.1 混生对红砂和珍珠猪毛菜根系形态特征的影响

一般认为, 植物可通过根系形态结构的变化实现对资源的竞争(班芷桦和王琼, 2015)。SRL和SRA

表3 不同生境下单生和混生红砂与珍珠猪毛菜的根系消弱系数( $\beta$ )与决定系数( $R^2$ )(平均值 $\pm$ 标准误差)

Table 3 The root extinction coefficients ( $\beta$ ) and coefficient of determination ( $R^2$ ) in *Reaumuria soongarica* and *Salsola passerina* of monocultural and mixed communities in different habitats (mean  $\pm$  SE)

物种 Species	生长方式 Interspecific relationship	灵武 Lingwu		张掖 Zhangye		酒泉 Jiuquan	
		$\beta$	$R^2$	$\beta$	$R^2$	$\beta$	$R^2$
红砂 <i>R. soongarica</i>	单生 Monocultural	0.934 9 $\pm$ 0.002 4	0.981 8	0.941 2 $\pm$ 0.007 8	0.929 1	0.942 4 $\pm$ 0.011 2	0.936 7
	混生 Mixed	0.934 9 $\pm$ 0.011 2	0.962 0	0.942 1 $\pm$ 0.025 6	0.897 1	0.943 7 $\pm$ 0.004 5	0.968 6
珍珠猪毛菜 <i>S. passerina</i>	单生 Monocultural	0.875 8 $\pm$ 0.007 8 <sup>a</sup>	0.949 9	0.921 7 $\pm$ 0.026 1	0.947 6	0.896 5 $\pm$ 0.004 9	0.902 3
	混生 Mixed	0.925 3 $\pm$ 0.006 0 <sup>b</sup>	0.986 1	0.919 3 $\pm$ 0.025 1	0.870 8	0.918 1 $\pm$ 0.003 9	0.923 4

不同小写字母表示在同一生境下单生和混生红砂与珍珠猪毛菜 $\beta$ 值差异显著( $p < 0.05$ )。

The lowercase letters indicate significant difference between *Salsola passerina* of monocultural and mixed communities within the same habitats ( $t$ -test,  $p < 0.05$ ).

作为根系形态结构的重要指标,决定了根系吸收水分和养分的能力,其值越大,表明投入相同的成本有较高的养分利用效率(Bauhus *et al.*, 2000)。已有研究表明,相邻植物可通过增加SRL和SRA来适应邻体根竞争(Curt & Prévosto, 2003; Fujii & Kasuya, 2008; Gao *et al.*, 2010)。本研究发现,同一生境条件下,混生红砂和珍珠猪毛菜SRL和SRA均远远大于单生红砂和珍珠猪毛菜,说明混生能促进两种植物SRL和SRA的增加,以此提高对资源的获取能力,以适应种间竞争。这与Zhang等(2014b)的张掖龙首山山前戈壁红砂-珍珠猪毛菜混生促进了两种荒漠植物细根SRL显著增加的结果一致;也与王政权和张彦东(2000)对水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)和落叶松(*Larix gmelinii*)混栽导致水曲柳根系密度和根长度的增加, Bolte和Villanueva (2006)对欧洲山毛榉(*Fagus sylvatica*)和挪威云杉(*Picea abies*)混交改变欧洲山毛榉根系形态,提高其细根的SRL和SRA结果一致。Gao等(2010)和Zhang等(2013)在农作物间作研究中也发现了相似的研究结果,间作显著增加作物的SRL、SRA、根长密度。表明相邻同种或异种植物可通过增加SRL和SRA促进根系对土壤水分和养分的吸收以适应竞争环境。然而, Beyer等(2013)和Hajek等(2014)基于根序理论发现植物种内和种间根竞争对细根形态影响不显著。由此可见,由植物种间竞争引起的根系形态变化并不是一个普遍现象。本研究还发现,不同生境条件下,同一生长方式珍珠猪毛菜的SRL和SRA均大于红砂,这可能是由于珍珠猪毛菜为非深根型植物,其主要水源为大气降水(许皓和李彦, 2005),因强烈蒸发,其水分来源少,为适应西北干旱环境,通过增加根系次级分支来增大比根长和比表面积,以获取维持水源适应干旱胁迫环境;而红砂为深根型植物,其主要维持水

源为地下水,主根发达根系分支少(单立山等, 2012),其SRL和SRA小。

### 3.2 混生对红砂和珍珠猪毛菜根系分布的影响

根系之间的相互作用包括竞争和互利,它们可以同时同时对植物生长产生影响(陈伟和薛立, 2004)。其中,植物的根竞争对根系最为明显的效果就是影响根系的分布。大量研究表明,植物种间根竞争导致根系空间分布发生变化而发生生态位分离现象(Holdo & Timberlake, 2008; Hajek *et al.*, 2014)。本研究发现,各生境条件下,混生红砂根系分布深度均大于混生珍珠猪毛菜,说明红砂比珍珠猪毛菜分布于更深的土壤深度,珍珠猪毛菜则是在较浅的土壤深度分布,这与杨昊天等(2013)的研究结果类似,即珍珠猪毛菜主要分布在0–50 cm土层,而红砂主要分布于0–70 cm土层。Bolte和Villanueva (2006)研究发现欧洲山毛榉和挪威云杉混交促进欧洲山毛榉根系深扎,避免了根系间的过度竞争,为充分利用不同层次土壤中的水分和养分奠定了基础。同样,在农作物间作(Zhang *et al.*, 2013, 2014a)、农林复合系统(Dawson *et al.*, 2001)、混生草本(Fargione & Tilman, 2005; Mommer *et al.*, 2011)、草灌混生群落(February *et al.*, 2011)和入侵物种之间(Daneshgar & Jose, 2009)也发现了根系生态位分离现象,表明植物根系的分布会在相邻植物根系格局的影响下做出相应调整(Cahill, 2010; 陈斌等, 2017),以减少对资源的竞争(Schmid *et al.*, 2015)。红砂-珍珠猪毛菜混生根系分离现象也说明两种植物虽地上部分以聚集丛生的混生群落生长,而其地下根系垂直分布则存在分层现象,即以空间生态位分离的方式减少种间对土壤资源的竞争(晨乐木格等, 2009),实现物种共存,这也是维持植物多样性的一种重要机制。

为了描述根系的垂直分布规律, Gale和Grigal



(1987)通过不同演替阶段不同树种根系分布特征提出了植物根系垂直分布非线性模型, 该模型为研究土壤垂直梯度中植物根系的总体分布提供了简洁标准的办法(Zhang *et al.*, 2014)。目前, 该方法主要运用于比较不同群落根系垂直分布的差异性, 以及分析植物根系垂直分布特征对非生物环境的响应(陈斌等, 2017)。陈斌等(2017)研究发现, 在不同微生境分区内芨芨草(*Achnatherum splendens*)与白刺(*Nitraria tangutorum*)的根系消弱系数差异具有显著性, 说明两种植物根系的地下垂直分布在总体上存在分层现象。李鹏等(2005)研究表明, 在渭北黄土区的刺槐(*Robinia pseudoacacia*), 其细根根系消弱系数在阳坡要小于阴坡, 说明阳坡的生长环境对树木吸收深层土壤水分和养分有一定的限制作用。本研究发现, 同一生境条件下, 单生或混生红砂根系消弱系数大于单生或混生珍珠猪毛菜, 且同一生境条件下, 混生红砂和珍珠猪毛菜根系消弱系数均大于单生红砂和珍珠猪毛菜, 在灵武地区混生珍珠猪毛菜根系消弱系数显著大于单生珍珠猪毛菜, 说明两种植物混生后可以增大根系在深层土壤中分布的百分比。

### 3.3 环境胁迫梯度对根系相互作用的影响

植物间的互作类型及互作强度与其所处的环境条件之间存在着密切的关联。胁迫梯度假说认为, 当环境条件较好时, 物种间的负相互作用占据主导地位; 而在恶劣的环境条件下, 正相互作用的重要性上升, 并且其作用强度随着环境的恶劣程度而增加(Bertness & Callaway, 1994)。本研究发现, 随着荒漠环境胁迫梯度增强, 单生和混生红砂与珍珠猪毛菜SRL与SRA呈现出增加的趋势, 不同生境间的差异接近或达到显著水平, 表明两种荒漠植物可通过增大SRL和SRA获取更多维持水源适应干旱胁迫环境。两种荒漠植物的地下根系占有不同的生态位, 并随环境胁迫梯度增加表现更明显, 红砂根系在极端荒漠区可至地下90 cm, 而珍珠猪毛菜根系则是维持在地下30–50 cm的深度, 这与He等(2012)及He和Bertness (2014)的研究结果一致, 即随着环境胁迫度的增加物种间互利的强度或重要性加强, 从而支持了环境胁迫梯度假说。本研究也发现, 随着生境干旱胁迫程度的增强, 相同生长方式下, 红砂根系消弱系数呈上升趋势, 在酒泉到最大值, 而珍珠猪毛菜根系消弱系数无明显变化规律, 各生境条件

下差异不大, 说明干旱胁迫的增强进一步促进了两种植物在地下的根系生态位分离现象。这与Zhang等(2014b)关于不同水分条件下混生红砂、珍珠猪毛菜根系对环境的适应策略相一致, 也与前面得出的结论一致, 进一步验证了Bertness和Callaway(1994)的环境胁迫梯度假说在我国西北荒漠地区适用。

## 4 结论

本研究发现, 相同生境条件下, 混生红砂和珍珠猪毛菜SRL和SRA均高于单生, 表明红砂、珍珠猪毛菜混生时两者表现为互惠关系, 促进了根系对土壤养分和水分的吸收能力。不同生境条件下, 单生和混生红砂根系分布深度均大于珍珠猪毛菜, 且根系消弱系数也普遍高于珍珠猪毛菜, 说明两种植物虽然地上部分以聚集丛生的混生群落生长, 但地下根系形成了分层现象, 即生态位分离, 这是其共存的重要机制。随着荒漠胁迫环境梯度增加, 单生和混生红砂与珍珠猪毛菜SRL与SRA均呈现出增加的趋势, 且混生红砂和珍珠猪毛菜根系分离更明显; 单生与混生红砂根系消弱系数也逐渐增大, 在极端干旱区达到最大值, 珍珠猪毛菜变化不大, 表明红砂-珍珠猪毛菜混生群落的垂直根系发生生态位分离现象, 并随着干旱胁迫增强而加剧, 支持环境胁迫梯度假说。可见, 在西北干旱区红砂-珍珠猪毛菜混生群落地上部分的“成丛性”分布, 即通过聚集分布以降低蒸腾失水等生理胁迫; 而地下部分通过根系分布变化呈现出空间生态位分离, 即通过根系错位来增强对土壤不同深度的养分吸收, 减少种间竞争。这种“地上聚生、地下分离”的空间格局是其适应干旱胁迫环境的重要策略, 对揭示物种多样性及植物共存机制具有重要的意义。

**致谢** 甘肃农业大学青年导师基金(GAU-QNDS-201605)资助。

## 参考文献

- Ban ZH, Wang Q (2015). Responses of the competition between *Alternanthera philoxeroides* and *Sambucus chinensis* to simulated warming. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 43–51. [班芷桦, 王琼 (2015). 喜旱莲子草和接骨草竞争对模拟增温的响应. *植物生态学报*, 39, 43–51.]
- Bauhus J, Khanna PK, Menden N (2000). Aboveground and belowground interactions in mixed plantations of *Eucalyptus globules* and *Acacia mearnsii*. *Canadian Journal of*

- Forest Research*, 30, 1886–1894.
- Bertness MD, Callaway RM (1994). Positive interactions in communities. *Trends in Ecology and Evolution*, 9, 191–193.
- Beyer F, Hertel D, Leuschner C (2013). Fine root morphological and functional traits in *Fagus sylvatica* and *Fraxinus excelsior* saplings as dependent on species, root order and competition. *Plant and Soil*, 373, 143–156.
- Bolte A, Villanueva I (2006). Interspecific competition impacts on the morphology and distribution of fine roots in European beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *European Journal of Forest Research*, 125, 15–26.
- Cahill C (2010). The multifunctionality of agriculture. *Eurochoices*, 1, 36–41.
- Callaway RM (2007). *Positive Interactions and Interdependence in Plant Communities*. Springer-Verlag, Dordrecht, The Netherlands.
- Callaway RM, Brooker RW, Choler P, Kikvidze Z, Lortiek CJ, Michalet R, Paolini L, Pugnaire FI, Newingham B, Aschehoug ET, Armasq C, Kikodze D, Cook BJ (2002). Positive interactions among alpine plants increase with stress. *Nature*, 417, 844–848.
- Chen B, Liu MS, Huang Z, Zhang MJ, Xu C (2017). Root distribution and interaction in a *Nitraria tangutorum-Achnatherum splendens* (shrubgrass) community in arid Northwest China. *Chinese Journal of Ecology*, 36, 2692–2698. [陈斌, 刘茂松, 黄峥, 张明娟, 徐驰 (2017). 西北干旱区灌草型白刺——芨芨草群落根系分布与互作. 生态学杂志, 36, 2692–2698.]
- Chen W, Xue L (2004). Root interactions: Competition and facilitation. *Acta Ecologica Sinica*, 24, 1243–1251. [陈伟, 薛立 (2004). 根系间的相互作用——竞争与互利. 生态学报, 24, 1243–1251.]
- Chesson P (2000). Mechanisms of maintenance of species diversity. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 31, 343–366.
- Copley J (2000). Ecology goes underground. *Nature*, 406, 452–454.
- Curt T, Prévosto B (2003). Rooting strategy of naturally regenerated beech in silver birch and scots pine woodlands. *Plant and Soil*, 255, 265–279.
- Daneshgar P, Jose S (2009). Role of species identity in plant invasions: Experimental test using *Imperata cylindrical*. *Biological Invasions*, 11, 1431–1440.
- Dawson LA, Duff EI, Campbell CD, Hirst DJ (2001). Depth distribution of cherry (*Prunus avium* L.) tree roots as influenced by grass root competition. *Plant and Soil*, 231, 11–19.
- Debra ZD, Bernhard S, Jana P, Varuna Y, Gerlinde DD, Dan FBF (2014). Selection for niche differentiation in plant communities increases biodiversity effects. *Nature*, 515, 108–111.
- Fargione J, Tilman D (2005). Niche differences in phenology and rooting depth promote coexistence with a dominant C<sub>4</sub> bunchgrass. *Oecologia*, 143, 598–606.
- February EC, Allsopp N, Shabane T, Hattas D (2011). Coexistence of a C<sub>4</sub> grass and a leaf succulent shrub in an arid ecosystem. The relationship between rooting depth, water and nitrogen. *Plant and Soil*, 349, 253–260.
- Fujii S, Kasuya N (2008). Fine root biomass and morphology of *Pinus densiflora* under competitive stress by *Chamaecyparis obtusa*. *Journal of Forest Research*, 13, 185–189.
- Gale MR, Grigal DF (1987). Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status. *Canadian Journal of Forest Research*, 17, 829–834.
- Gao J (2014). *Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subtropical Evergreen Broad-leaved Forest on Tiantong, Zhejiang*. PhD dissertation, Fudan University, Shanghai. [高杰 (2014). 浙江天童亚热带常绿阔叶林土壤呼吸空间异质性研究. 博士学位论文, 复旦大学, 上海.]
- Gao XF, Wang JX, Zhang B, Ma HF, Zhong N (2010). Effects of drought stress on dry matter partitioning of young *Robinia pseudoacacia* at its different growth stages. *Chinese Journal of Ecology*, 29, 1103–1108. [高小锋, 王进鑫, 张波, 马惠芳, 钟楠 (2010). 不同生长期干旱胁迫对刺槐幼树干物质分配的影响. 生态学杂志, 29, 1103–1108.]
- Gao Y, Duan A, Qiu X, Liu Z, Sun J, Zhang J, Wang H (2010). Distribution of roots and root length density in a maize/soybean strip intercropping system. *Agricultural Water Management*, 98, 199–212.
- Grime JP (1979). *Plant Strategies and Vegetation Processes*. Wiley, Chichester, UK.
- Hajek P, Hertel D, Leuschner C (2014). Root order- and root age-dependent response of two poplar species to below-ground competition. *Plant and Soil*, 377, 337–355.
- He Q, Bertness MD (2014). Extreme stresses, niches, and positive species interactions along stress gradients. *Ecology*, 95, 1437–1443.
- He Q, Cui B, Bertness MD, An Y (2012). Testing the importance of plant strategies on facilitation using congeners in a coastal community. *Ecology*, 93, 2023.
- Hodge A (2004). The plastic plant: Root responses to heterogeneous supplies of nutrients. *New Phytologist*, 162, 9–24.
- Holdo RM, Timberlake J (2008). Rooting depth and above-ground community composition in Kalahari sand woodlands in western Zimbabwe. *Journal of Tropical Ecology*, 24, 169–176.
- Leuschner C, Hertel D, Coners H, Büttner V (2001). Root competition between beech and oak: A hypothesis. *Oecologia*, 126, 276–284.

- Li P, Zhao Z, Li ZB, Zhan TZ (2005). Characters of root biomass spatial distribution of *Robinia pseudoacacia* in Weibei loess areas. *Ecology and Environment*, 14, 405–409. [李鹏, 赵忠, 李占斌, 澹台湛 (2005). 渭北黄土区刺槐根系空间分布特征研究. 生态环境, 14, 405–409.]
- Luo WC, Zeng FJ, Liu B, Zhang LG, Song C, Peng SL, Stefan KA (2012). Response of root systems to soil heterogeneity and interspecific competition in *Alhagi sparsifolia*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 36, 1015–1023. [罗维成, 曾凡江, 刘波, 张利刚, 宋聪, 彭守兰, Stefan K, ARNDT (2012). 疏叶骆驼刺根系对土壤异质性和种间竞争的响应. 植物生态学报, 36, 1015–1023.]
- Ma XD, Zhu CG, Li WH (2012). Response of root morphology and biomass of *Tamarix ramosissima* seedlings to different water irrigations. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 36, 1024–1032. [马晓东, 朱成刚, 李卫红 (2012). 多枝怪柳幼苗根系形态及生物量对不同灌溉处理的响应. 植物生态学报, 36, 1024–1032.]
- 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.
- Mommer L, Visser EJW, van Ruijven J, de Caluwe H, Pierik R, de Kroon H (2011). Contrasting root behaviour in two grass species: A test of functionality in dynamic heterogeneous conditions. *Plant and Soil*, 344, 347–360.
- O'Connor TG, Roux PW (1995). Vegetation changes in a semi-arid, grassy dwarf shrub land in the Karoo, South Africa: Influence of rainfall variability and grazing by sheep. *Journal of Applied Ecology*, 32, 612–626.
- Padilla FM, Pugnaire FI (2007). Rooting depth and soil moisture control Mediterranean woody seedling survival during drought. *Functional Ecology*, 21, 489–495.
- 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.
- Schmid C, Bauer S, Bartelheimer M (2015). Should I stay or should I go? Roots segregate in response to competition intensity. *Plant and Soil*, 391, 283–291.
- Shan LS, Li Y, Dong QL, Geng DM (2012). Ecological adaptation of *Reaumuria soongorica* root system architecture to arid environment. *Journal of Desert Research*, 32, 1283–1290. [单立山, 李毅, 董秋莲, 耿东梅 (2012). 红砂根系构型对干旱的生态适应. 中国沙漠, 32, 1283–1290.]
- Su PX, Yan Q, Xie T, Zhou Z, Gao S (2012). Associated growth of  $C_3$  and  $C_4$  desert plants helps the  $C_3$  species at the cost of the  $C_4$  species. *Acta Physiologiae Plantarum*, 34, 2057–2068.
- Tilman D (1988). *Plant Strategies and the Dynamics and Structure of Plant Communities*. Princeton University Press, Princeton.
- Uriankhai TL, Liu MS, Huang Z, Chen B, Zhang MJ, Xu C (2009). Distribution pattern of root biomass and interspecific relationship in *Achnatherum splendens-Sophora alopecuroides* community in Northwest China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 33, 748–754. [晨乐木格, 刘茂松, 黄峥, 陈斌, 张明娟, 徐驰 (2009). 我国西北地区芨芨草-苦豆子群落根系分布与种间关系. 植物生态学报, 33, 748–754.]
- Walter H (1939). Grasland: Savanne und Busch der arideren Teile Afrikas in ihrer ökologischen Bedingtheit. *Jahrbücher für Wissenschaftliche Botanik*, 87, 750–860.
- Wang P, Mou P, Li YB (2012). Review of root nutrient foraging plasticity and root competition of plants. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 36, 1184–1196. [王鹏, 牟溥, 李云斌 (2012). 植物根系养分捕获塑性与根竞争. 植物生态学报, 36, 1184–1196.]
- Wang ZQ, Wang JB, Sun ZH, Fan ZQ, Han YZ (2003). Quantitative study of below- and above-ground competitions in *Fraxinus mandshurica* seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 23, 1512–1518. [王政权, 王军邦, 孙志虎, 范志强, 韩有志 (2003). 水曲柳苗木地下竞争与地上竞争的定量研究. 生态学报, 23, 1512–1518.]
- Wang ZQ, Zhang YD (2000). Study on the root interactions between *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelinii*. *Acta Phytocologica Sinica*, 24, 346–350. [王政权, 张彦东 (2000). 水曲柳落叶松根系之间的相互作用研究. 植物生态学报, 24, 346–350.]
- Xu H, Li Y (2005). Water use strategies and corresponding leaf physiological performance of three desert shrubs. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 25, 1309–1316. [许皓, 李彦 (2005). 3种荒漠灌木的用水策略及相关的叶片生理表现. 西北植物学报, 25, 1309–1316.]
- Xue WY, Yang B, Zhang WH, Yu SC (2017). Spatial pattern and spatial association of *Quercus acutissima* at different developmental stages in the Qiaoshan Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 3375–3384.
- Yan QD, Su PX, Gao S (2012). Response of photosynthetic characteristics of  $C_3$  desert plant *Reaumuria soongorica* and  $C_4$  desert plant *Salsola passerina* to different drought degrees. *Journal of Desert Research*, 32, 364–371. [严巧娣, 苏培玺, 高松 (2012). 干旱程度对 $C_3$ 植物红砂和 $C_4$ 植物珍珠光合生理参数的影响. 中国沙漠, 32, 364–371.]
- Yang HT, Li XR, Liu LC, Jia RL, Wang ZR, Li XJ, Li G (2013). Biomass allocation patterns of four shrubs in desert grassland. *Journal of Desert Research*, 33, 1340–1348. [杨昊天, 李新荣, 刘立超, 贾荣亮, 王增如, 李小军, 李刚 (2013). 荒漠草地4种灌木生物量分配特征. 中国沙漠, 33, 1340–1348.]

- Zhang C, Chen L, Jiang J (2014a). Vertical root distribution and root cohesion of typical tree species on the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Land*, 6, 601–611.
- Zhang GG, Zhang CY, Yang ZB, Dong ST (2013). Root distribution and N acquisition in an Alfalfa and corn intercropping system. *Journal of Agricultural Science*, 5, 1916–19752.
- Zhang HN, Su PX, Li SJ, Zhou ZJ, Xie TT (2014b). Response of root traits of *Reaumuria soongarica* and *Salsola passerina* to facilitation. *Journal of Arid Land*, 6, 628–636.
- Zhang WP, Pan S, Jia X, Chu CJ, Xiao S, Lin Y, Bai YY, Wang GX (2013). Effects of positive plant interactions on population dynamics and community structures: A review

- based on individual-based simulation models. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 37, 571–582. [张炜平, 潘莎, 贾昕, 储诚进, 肖洒, 林玥, 白燕远, 王根轩 (2013). 植物间正相互作用对种群动态和群落结构的影响: 基于个体模型的研究进展. *植物生态学报*, 37, 571–582.]
- Zhou HY, Tan HJ, Zhang ZS, Jiang XH, Zhang JG, Fan HW (2012). Physiological response and adjustment mechanism of *Reaumuria soongarica* and *Salsola passerina* to extreme environment. *Journal of Desert Research*, 32, 24–32. [周海燕, 谭会娟, 张志山, 贾晓红, 张景光, 樊恒文 (2012). 红砂和珍珠对极端环境的生理响应与调节机制. *中国沙漠*, 32, 24–32.]

责任编辑: 王根轩 责任编辑: 王 薇



扫码加入读者圈  
听语音, 看问答

## 《凋落物去除和添加处理对典型草原生态系统碳通量的影响》作者更正

发表在 2018 年 42 卷第 3 期 349–360 页张素彦等的文章《凋落物去除和添加处理对典型草原生态系统碳通量的影响》中, 作者蒋红志的单位只标注了中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 漏标了中国科学院大学。现更正如下:

张素彦<sup>1,2\*</sup> 蒋红志<sup>2,3\*</sup> 王 扬<sup>2</sup> 张艳杰<sup>1</sup> 鲁顺保<sup>1,2\*\*</sup> 白永飞<sup>2</sup>

<sup>1</sup>江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西省亚热带植物资源保护与利用重点实验室, 江西师范大学生命科学学院, 南昌 330022;

<sup>2</sup>中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; <sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

ZHANG Su-Yan<sup>1,2\*</sup>, JIANG Hong-Zhi<sup>2,3\*</sup>, WANG Yang<sup>2</sup>, ZHANG Yan-Jie<sup>1</sup>, LU Shun-Bao<sup>1,2\*\*</sup>, and BAI Yong-Fei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, College of Life Sciences, Key Laboratory of Protection and Utilization of Subtropic Plant Resources, Jiangxi Normal University, Nanchang, 330022, China; <sup>2</sup>State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; and <sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China