

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第1期 Vol.32 No.1 **2012**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 1 期 2012 年 1 月 (半月刊)

目 次

局域种群的 Allee 效应和集合种群的同步性	刘志广, 赵 雪, 张丰盘, 等 (1)
叶片毛尖对齿肋赤藓结皮凝结水形成及蒸发的影响	陶 冶, 张元明 (7)
长江口锋面附近咸淡水混合对浮游植物生长影响的现场培养	王 奎, 陈建芳, 李宏亮, 等 (17)
河流流量对流域下垫面特性的响应	田 迪, 李叙勇, Donald E. Weller (27)
中国中东部平原亚热带湿润区湖泊营养物生态分区	柯新利, 刘 曼, 邓祥征 (38)
基于氮磷比解析太湖苕溪水体营养现状及应对策略	聂泽宇, 梁新强, 邢 波, 等 (48)
滇池外海蓝藻水华爆发反演及规律探讨	盛 虎, 郭怀成, 刘 慧, 等 (56)
采伐干扰对华北落叶松细根生物量空间异质性的影响	杨秀云, 韩有志, 张芸香, 等 (64)
松嫩草原榆树疏林对不同干扰的响应	刘 利, 王 赫, 林长存, 等 (74)
天山北坡不同海拔梯度山地草原生态系统地上净初级生产力对气候变化及放牧的响应	周德成, 罗格平, 韩其飞, 等 (81)
草原化荒漠草本植物对人工施加磷素的响应	苏洁琼, 李新荣, 冯 丽, 等 (93)
自然和人工管理驱动下盐城海滨湿地景观格局演变特征与空间差异	张华兵, 刘红玉, 郝敬锋, 等 (101)
晋、陕、宁、蒙柠条锦鸡儿群落物种多样性对放牧干扰和气象因子的响应	周 伶, 上官铁梁, 郭东罡, 等 (111)
华南地区 6 种阔叶幼苗叶片形态特征的季节变化	薛 立, 张 柔, 奚如春, 等 (123)
河西走廊不同红砂天然群体种子活性相关性	苏世平, 李 毅, 种培芳 (135)
江西中南部红壤丘陵区主要造林树种碳固定估算	吴 丹, 邵全琴, 李 佳, 等 (142)
酸雨和采食模拟胁迫下克隆整合对空心莲子草生长的影响	郭 伟, 李钧敏, 胡正华 (151)
棉铃虫在 4 个辣椒品种上的寄主适合度	贾月丽, 程晓东, 蔡永萍, 等 (159)
烟草叶面积指数的高光谱估算模型	张正杨, 马新明, 贾方方, 等 (168)
不同作物田烟粉虱发生的时空动态	崔洪莹, 戈 峰 (176)
长期施肥对稻田土壤固碳功能菌群落结构和数量的影响	袁红朝, 秦红灵, 刘守龙, 等 (183)
新银合欢篱对紫色土坡地土壤有机碳固持的作用	郭 甜, 何丙辉, 蒋先军, 等 (190)
一株产漆酶土壤真菌 F-5 的分离及土壤修复潜力	茆 婷, 潘 澄, 徐婷婷, 等 (198)
木论喀斯特自然保护区土壤微生物生物量的空间格局	刘 璐, 宋同清, 彭晚霞, 等 (207)
岷江干旱河谷 25 种植物一年生植株根系功能性状及相互关系	徐 琨, 李芳兰, 苟水燕, 等 (215)
黄土高原草地植被碳密度的空间分布特征	程积民, 程 杰, 杨晓梅, 等 (226)
棉铃发育期棉花源库活性对棉铃对位叶氮浓度的响应	高相彬, 王友华, 陈兵林, 等 (238)
耕作方式对紫色水稻土有机碳和微生物生物量碳的影响	李 辉, 张军科, 江长胜, 等 (247)
外源钙对黑藻抗镉胁迫能力的影响	闵海丽, 蔡三娟, 徐勤松, 等 (256)
强筋与弱筋小麦籽粒蛋白质组分与加工品质对灌浆期弱光的响应	李文阳, 闫素辉, 王振林 (265)
专论与综述	
蛋白质组学研究揭示的植物根盐胁迫响应机制	赵 琪, 戴绍军 (274)
流域生态风险评价研究进展	许 妍, 高俊峰, 赵家虎, 等 (284)
土壤和沉积物中黑碳的环境行为及效应研究进展	汪 青 (293)
研究简报	
青藏高原紫穗槐主要形态特征变异分析	梁坤伦, 姜文清, 周志宇, 等 (311)
菊属与蒿属植物苗期抗蚜虫性鉴定	孙 娅, 管志勇, 陈素梅, 等 (319)
滨海泥质盐碱地衬膜造林技术	景 峰, 朱金兆, 张学培, 等 (326)



封面图说: 白鹭展翅为梳妆, 玉树临风巧打扮——这是大白鹭繁殖期时的美丽体态。大白鹭体羽全白, 身长 94—104cm, 寿命 20 多年。是白鹭中体型最大的。繁殖期的大白鹭常常在湿地附近的大树上筑巢, 翩翩飞舞吸引异性, 其繁殖期背部披有蓑羽, 脸颊皮肤从黄色变成兰绿色, 嘴由黄色变成绿黑色。大白鹭是一个全世界都有它踪迹的广布种, 一般单独或成小群, 在湿地觅食, 以小鱼、虾、软体动物、甲壳动物、水生昆虫为主, 也食蛙、蝌蚪等。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201011261679

徐琨, 李芳兰, 苟水燕, 包维楷. 岷江干旱河谷 25 种植物一年生植株根系功能性状及相互关系. 生态学报, 2012, 32(1): 0215-0225.

Xu K, Li F L, Gou S Y, Bao W K. Root functional traits and trade-offs in one-year-old plants of 25 species from the arid valley of Minjiang River. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(1): 0215-0225.

岷江干旱河谷 25 种植物一年生植株根系 功能性状及相互关系

徐 琨, 李芳兰, 苟水燕, 包维楷*

(中国科学院成都生物研究所; 中国科学院山地生态恢复与生物资源利用重点实验室;
生态恢复与生物多样性保育四川省重点实验室, 成都 610041)

摘要: 相同条件下相同生长期的植物根系生长与适应策略及其差异性还不清楚。因此, 采集岷江干旱河谷地区 25 种乡土植物(木本 15/草本 10 种)的种子于 2009 年 3 月播种在同一干旱环境中, 9 月测定了 1 年生植株的最大根深(RD_{max})、根幅(RW)与根生物量(RB), 计算了总根长(TRL)、比根长(SRL)及细/粗根生物量比(RB_{ve}), 分析了它们之间的关系, 进行了根系功能组划分。结果表明: 1) 25 种植物 1 年生植株 RD_{max} 与 RW 变异较小, 总变异率为 14.9% 和 20.7%; TRL 和 SRL 变异相对较大, 分别为 28.5% 和 34.7%, 草本植物 SRL 明显大于木本植物; RB 和 RB_{ve} 种间变异较大, 总变异率分别为 50.1% 和 70.5%; 2) 25 种植物的 RD_{max} 、RW、RB 和 TRL 间呈显著正相关关系, 表明根系较深的物种 RW 较大, TRL 和 RB 也较高; SRL 与 RD_{max} 呈极显著负相关关系, 与 RB_{ve} 呈极显著正相关关系, 表明根系垂直分布较浅的物种细根发达, SRL 较大; 3) 主成分分析显示, 25 种植物可分为 3 个功能组: 第 1 组具有较大 RD_{max} 、RW 和 RB, 资源利用持续时间较长; 第 2 组具有较大 TRL、SRL 和 RB_{ve} , 资源利用效率较高; 第 3 组根系功能性状没有一致的突出特点, 可能通过降低自身生理机能适应生存条件。综合分析表明, 岷江干旱河谷区 25 种植物 1 年生植株根系的功能性状变异明显, 可塑性大, 历经长期自然选择压力而形成了不同的环境适应策略, 但生长型并不必然表达出 1 年生植株根系功能性状的差异性。

关键词: 根系功能性状; 适应策略; 比根长; 生物量; 最大根深; 根幅

Root functional traits and trade-offs in one-year-old plants of 25 species from the arid valley of Minjiang River

XU Kun, LI Fanglan, GOU Shuiyan, BAO Weikai*

ECORES Laboratory, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences; Key Laboratory of Mountain Ecological Restoration and Bioresource Utilization, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences; Ecological Restoration and Biodiversity Conservation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

Abstract: The functional traits and distribution patterns of roots affect the amount of soil resources used by the plant. These functional traits can mirror plant ecological resource utilization strategies for capturing soil water and nutrients. Changes in root functional traits can affect important plant processes, including water- and nutrient-use efficiencies and the ability to compete for belowground resources. In this study, root functional traits and correlations among them were investigated in one-year-old plants of 25 species from the arid valley of Minjiang River. The specific objectives were to compare plants of the same age growing in the same conditions to assess the trade-offs among root functions based on correlations among different functional traits, and to define plant functional types and their adaptation strategies. Seeds of vascular plant

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(C030301); 中国科学院“西部之光”项目(08C2041100)

收稿日期: 2010-11-26; 修订日期: 2011-02-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: baowk@cib.ac.cn

species were pretreated and sown in March 2009 in a field at the Maoxian Station for Ecosystem Research, Chinese Academy of Science. Complete root systems were sampled by excavating the entire individual in September, 2009, when plants were one year old. We measured six root functional traits; root depth_{max}, root width, total root length, specific root length, total root biomass, and ratio of fine/coarse root biomass. We examined the specific ecological strategies of the 25 species in adapting to the same habitat by comparing and contrasting the individual trait range and testing relationships among root functional traits. There was relatively low variability among the 25 species in terms of root depth_{max} (14.9%) and root width (20.7%), but higher variability in total root length (28.5%) and specific root length (34.7%). The specific root length of herbaceous plants was markedly greater than that of woody plants. Among the 25 species, there were significant differences in root biomass (total variance ratio, 50.1%) and the ratio of fine/coarse root biomass (total variance ratio, 70.5%). At the species level, there were significant positive correlations among root depth_{max}, root width, total root length, and root biomass, indicating that plants with deeper roots generated greater root width, longer total root length, and greater root biomass. In addition, specific root length was significantly positively correlated with the ratio of fine/coarse root biomass but negatively correlated with root depth_{max}. These results indicated that plants with higher specific root length tended to generate more fine roots but a relatively shallow root system. The principal component analysis showed that the 25 species could be divided into three functional groups, explaining nearly 80% of the total variation. The first group had larger root depth_{max}, greater root width, and greater root biomass; the second group had greater total root length, greater specific root length, and larger ratio of fine/coarse root biomass; the third group did not show uniform patterns for any of the six functional traits. This comprehensive analysis revealed that there was variability in the individual root functional traits among 25 different species from the arid valley of Minjiang River, and that different functional types showed various environmental adaptation strategies. Species adapt to local water and nutrient conditions either by improving water- and nutrient-use efficiencies or by decreasing root performance functions. The life-form of a given species could not predict differences in functional root traits at the one-year-old growth stage.

Key Words: root functional trait; adaptation strategy; specific root length; root biomass; root depth_{max}; root width

植物根系通过吸收土壤养分及水分形成了“土壤-植物-大气”的连续体^[1],在生态系统能量流动和物质循环过程中发挥着重要作用^[2]。在森林生态系 C 循环中,细根生产量占个体的 50%,可消耗 66% 的 C 同化产物^[3],因此,细根通过调控地上 C 同化,地下 C 释放、转运及贮存来影响土壤净 C 贮量,是陆地生态系统 C 过程的核心环节^[4-7]。根系的形态结构、大小、分布范围等直接决定着植物对土壤资源的吸收和利用能力^[8-9],同时决定了植物对环境变化的适应性,成为植物地上部分生产力的关键控制因素之一。尤其在土壤水分和养分贫瘠的环境中,地下竞争是植物竞争的主要形式。因此,弄清根系功能性状及其相互关系对于了解植物的生理生态特征以及群落和生态系统的结构与功能至关重要^[10]。

根长度、根分布深度、根幅大小以及生物量分配格局等性状体现了植物在空间上对土壤资源的占据和利用率,其变化影响着植物的地下竞争能力^[11]。最大根深(RD_{max})及总根长(TRL)大小主要反映根系利用土壤资源的集中程度,以及植物应对大气和土壤地下水变化的能力及其种间差异。研究表明,RD_{max}及 TRL 增加可以提高根系对土壤资源的利用率,有利于植物对地下资源的竞争^[12-15]。另外,植物对地下物质和能量的投资主要体现在根生物量(RB)上,当土壤资源不足时,植物通过增加 RB 投入,尤其是细根部分的比例以提高环境竞争力^[2,14,16-19]。因此,它们都是反映根系对水分和养分吸收及利用能力的可靠指标,对于揭示植物土壤资源利用效率具有重要意义^[10]。

比根长(Specific root length, SRL)是体现根系功能的核心指标之一,可综合反映植物吸收资源的能力与生态适应性。不同物种的 SRL 差异较大,通常 SRL 较高的植物有较多细根、较大根表面积和较低的根组织密度,以高效利用土壤资源快速生长^[10,20-21]。目前,不同生态系统中 SRL 在环境下如何变化尚无定论。大量的

研究表明,在土壤水分和 N 缺乏环境中根系的木质素含量与组织密度增大,导致 SRL 减小^[14,22-23]。相反, Metcalfe 等^[24]对亚马逊森林的研究表明,随着林地土壤湿度减小,细根生物量、根长和面积等均减小, SRL 增大。因此,目前对根系功能性状关系的认识还不完全清楚,现有关于植物根系的研究主要集中于生物量分配与垂直分布上,对根系功能性状所知甚少^[14,25]。

本文以岷江干旱河谷地区 25 种植物在相同环境条件下形成的 1 年生植株为研究对象,揭示以下问题:(1)岷江干旱河谷区代表性乡土植物根系功能性状有哪些基本特点,可划分为哪些功能组?(2)根系各个功能性状之间有什么关系?

1 实验地概况和实验物种

1.1 实验地

实验设在位于四川省西部阿坝藏族、羌族自治州茂县凤仪镇静州村德中国科学院茂县山地生态系统定位研究试验站,地理位置为 103°53'58"E,31°41'07"N,海拔 1830 m。年均日照时数 1373.8 h,年平均气温 9.3 °C,年无霜期有 200 多 d,年平均降水量 825.2 mm,全年降水量的 80% 以上集中在 5—10 月,年平均蒸发量 968.7 mm。实验地山坡坡度 10°左右,土壤主要为山地淋溶褐土和棕壤性土,土壤含页岩、泥岩、夹灰岩等。0—20 cm 土层总有机碳含量为 17.22 g/kg,pH 值 5.45,容重 1.01 g/cm³,全氮 1.64 g/kg,碳氮比 10.6,有效磷 9.19 mg/kg,速效钾 78.25 mg/kg。

1.2 实验物种

实验以分布于岷江干旱河谷地区具有代表性的 25 种不同生活型的植物为研究对象,其中有乔木 2 种、灌木 13 种、1 年生草本 2 种、多年生草本 8 种,分属 15 个科 23 个属,植物主要特性见表 1。

2 研究方法

2.1 播种及育苗

植物种子于 2008 年 8—11 月份采自岷江干旱河谷茂县境内,种子通过目测与水选,取形态大小相对一致、籽粒饱满且无虫害的种子晒干,室温下保存。2009 年 3 月份在实验地直接播种育苗。实验地共设 75 个小区,每种植物分别播于其中的 3 个小区内。播种时,将种子与湿沙混合,均匀撒播。不同生活型物种的播种小区的面积根据植物个体大小确定,乔木 3 m²,灌木 2.25 m²,草本 1 m²,尽可能避免植物之间的竞争作用。播种后,对所有小区统一浇水以保证顺利出苗。植物生长期间清除杂草。

2.2 根系取样

2009 年 9 月初,参照 Cornelissen^[23]的方法利用平板利铲在靠近植物基部直径约 30 cm 的范围内挖取完整根系。每个小区内每种植物随机选择 3 株,每个物种挖取 9 株幼苗。将取出的土柱(土壤和根系)置于塑料布上,保持根系为原始生长状态,用卷尺测量最大根深及根幅^[14];之后小心清除根周围的土壤,装进编号的自封袋。在实验室内,立即将根样品置于筛网(孔径 0.5 mm)内浸泡,轻轻地用流水冲洗净粘附在根表面的土壤及杂质后于 4 °C 下保存。

2.3 根系参数测定方法

本实验测定的根系功能性状包括最大根深(RD_{max})、根幅(RW)、总根长(TRL)、比根长(SRL)、根生物量(RB)和细/粗根生物量之比(RB_{Vc})。首先,将新鲜根系样品用扫描仪(Model F6580)获取图象,扫描过程中样品在盛有 4 °C 蒸馏水的玻璃皿保持低温^[26]。由于实验材料为幼苗,本研究中以直径 1 mm 为界限将粗根(>1 mm)与细根(<1 mm)分开^[27];所有根系样品在 65 °C 烘干,称量,计算细/粗根生物量比值(RB_{Vc})。扫描的根系图像采用分析系统软件 MapInfo Professional 8.0 SCP 进行数字化,测定各级根长度,最后计算比根长(SRL)=总长度(TRL)/根生物量(RB)。

2.4 数据整理与统计分析

首先,分别计算每个根系的 RD_{max}、RW、TRL、SRL、RB 和 RB_{Vc} 的均值、标准误差和总体变异率($n=3$)。对不同生活型物种,数据进行平方根或对数转换使其呈正态分布后,采用 Pearson 相关性分析和线性回归确定各

个功能性状之间的相互关系。采用主成分分析确定 25 个物种各个性状参数之间的关联,在此基础上对物种进行功能聚类。统计分析在 Microsoft Excel 2007 和 SPSS16.0 软件系统下完成。

表 1 岷江干旱河谷地区 25 种代表性植物科属及其生活型特征

Table 1 List of species family, genus and life form of 25 species from the arid valley of Mingjiang River

植物种 Species	科名 Family name	生活型 Life form	缩写 Abbreviation
臭椿 <i>Ailanthus altissima</i> (Mill.) Swingle.	苦木科 Simaroubaceae	乔木	Aa
小冻绿树 <i>Rhamnus rosthornii</i> Pritz.	鼠李科 Rhamnaceae	小乔木	Rr
川甘亚菊 <i>Ajania potaninii</i> (Krasch.) Poljak.	菊科 Compositae	灌木	Ap
金花小檗 <i>Berberis wilsonae</i> Hemsl.	小檗科 Berberidaceae	灌木	Bw
小角柱花 <i>Ceratostigma minus</i> Stapf ex Prain	白花丹科 Plumbaginaceae	灌木	Cm
胡颓子 <i>Elaeagnus stellipila</i> Rehd.	胡颓子科 Elaeagnaceae	灌木	Es
刺序木蓝 <i>Indigofera silvestrii</i> Pamp.	豆科 Leguminosae	灌木	Isi
四川木蓝 <i>Indigofera szechuensis</i> Craib.	豆科 Leguminosae	灌木	Isz
矮探春 <i>Jasminum humile</i> Linn.	木犀科 Oleaceae	灌木	Jh
枸杞 <i>Lycium chinense</i> Miller.	茄科 Solanaceae	灌木	Lc
长柄山蚂蝗 <i>Podocarpium podocarpum</i> (DC.) Yang et Huang.	豆科 Leguminosae	灌木	Pp
三叶针刺悬钩子 <i>Rubus pungens</i> Camb. var. <i>ternatus</i> Card.	蔷薇科 Rosaceae	灌木	Rp
川莓 <i>Rubus setchuenensis</i> Bureau et Franch.	蔷薇科 Rosaceae	灌木	Rse
川滇蔷薇 <i>Rosa soulieana</i> Crép.	蔷薇科 Rosaceae	灌木	Rso
白刺花 <i>Sophora davidii</i> (Franch.) Skeels.	豆科 Leguminosae	灌木	Sd
小鹿藿 <i>Rhynchosia minima</i> (Linn.) DC.	豆科 Leguminosae	1 年生草本	Rm
大狗尾草 <i>Setaria faberii</i> Herrm.	禾本科 Gramineae	1 年生草本	Sf
万年蒿 <i>Artemisia gmelinii</i> Web. et Stechm.	菊科 Compositae	多年生草本	Ag
木通 <i>Akebia quinata</i> (Houtt.) Deene.	木通科 Lardizabalaceae	多年生草本	Aq
铁线莲 <i>Clematis akebioides</i> .	毛茛科 Ranunculaceae	多年生草本	Ca
鸭儿芹 <i>Cryptotaenia japonica</i> Hassk.	伞形科 Umbelliferae	多年生草本	Cj
尼泊尔老鹳草 <i>Geranium nepalense</i> Sweet.	牻牛儿苗科 Geraniaceae	多年生草本	Gn
中华山黧豆 <i>Lathyrus deilsianus</i> Harms.	豆科 Leguminosae	多年生草本	Ld
毛茛 <i>Ranunculus japonicus</i> Thunb. var. <i>Japonicus</i> .	毛茛科 Ranunculaceae	多年生草本	Rj
歪头菜 <i>Vicia unijuga</i> A. Br.	豆科 Leguminosae	多年生草本	Vu

3 结果与分析

3.1 根系最大根深和根幅的特征及其差异性

25 种植物的最大根深在 10.79—33.48 cm 之间,总变异率 $CV = 14.9\%$;最大和最小者分别为枸杞 (*Lycium chinense*) 和小冻绿树 (*Rhamnus rosthornii*),二者 $CV = 39.0\%$ (图 1)。根幅在 2.79—10.74 cm 之间, $CV = 20.7\%$,最大和最小者分别为小角柱花 (*Ceratostigma minus*) 和小冻绿树, $CV = 53.4\%$ (图 1)。木本植物幼苗的最大根深及根幅大小与草本植物整体上没有明显的差异。最大根深在 10—15 cm 之间物种占物种数的 32%;在 15—30 cm 之间的总共占 64%,只有枸杞最大根深 > 30 cm。根幅在 2—6 cm 之间的物种占 64%, 6—10 cm 之间的总共占 32%,只有小冻绿树根幅 > 10 cm。

3.2 植株根系总根长和比根长的特征及其差异性

25 个物种的总根长在 16.68—190.32 cm 之间,总变异率 $CV = 28.5\%$;小冻绿树最小,大狗尾草 (*Setaria faberii*) 最大,二者 $CV = 85.2\%$ (图 2)。比根长在 49.49—807.67 cm/g 之间, $CV = 34.7\%$;鸭儿芹 (*Cryptotaenia japonica*) 最小,铁线莲 (*Clematis akebioides*) 最大, $CV > 100\%$ (图 2)。这些植物总根长及比根长有较大差异,草本植物比根长明显大于木本植物。总根长在 40—80 cm 的物种占 40%,在 80—120 cm 之间的总共占 56%,只有大狗尾草的总根长 > 120 cm。比根长在 100—300 cm/g 之间的物种占 44%,300—800 cm/g

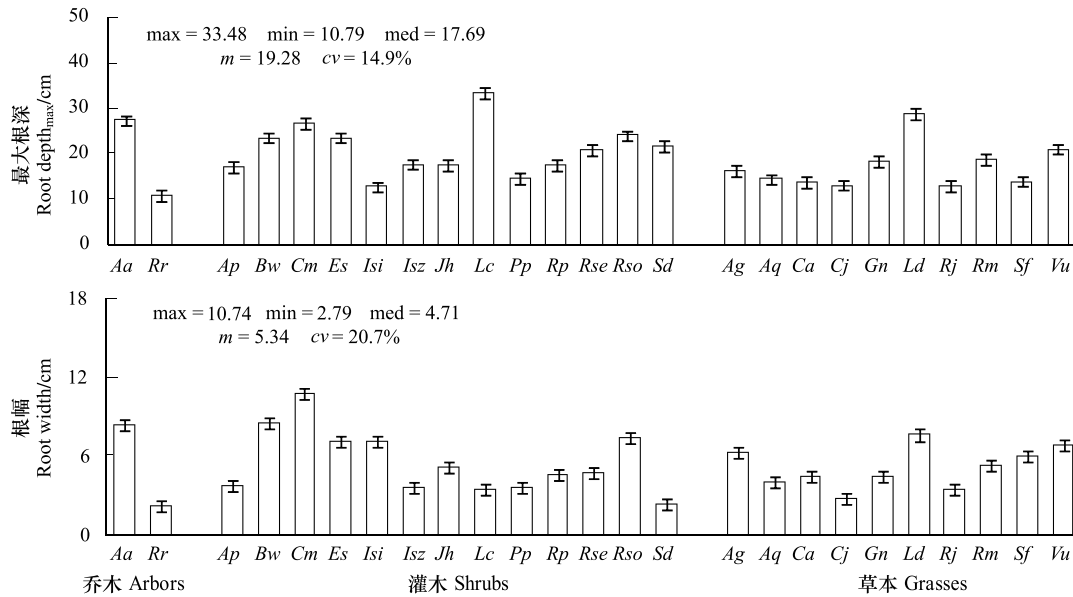


图 1 岷江干旱河谷地区 25 种植物 1 年生植株最大根深及根幅 ($n=3$)

Fig. 1 Root depth_{max} and root width of one-year-old plants of 25 species from the arid valley of Mingjiang River ($n=3$)

横条表示标准误;横坐标物种名称缩写见表 1

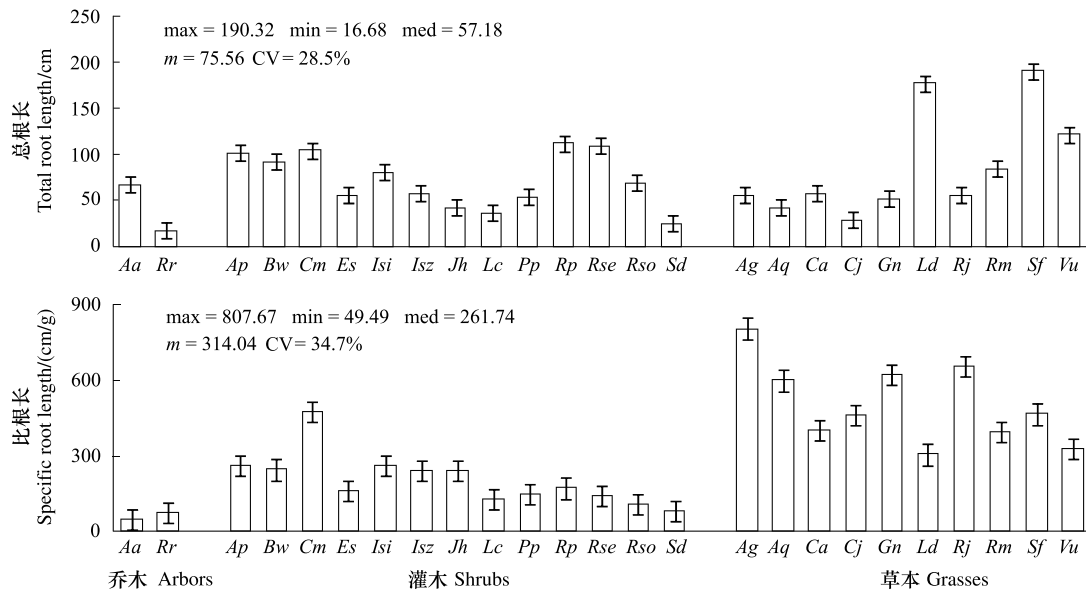


图 2 岷江干旱河谷地区 25 种植物 1 年生植株总根长及比根长 ($n=3$)

Fig. 2 Total root length and specific root length of one-year-old plants of 25 species from the arid valley of Mingjiang River ($n=3$)

横条表示标准误

之间的总共占 52%, 只有铁线莲比根长 >800 cm/g。

3.3 根系生物量和细/粗根生物量比的特征及其差异性

25 个物种的根系生物量在 0.06—2.67 g 之间, 总变异率 $CV = 50.1\%$; 小冻绿树最小, 臭椿 (*Ailanthus altissima*) 最大, 二者 $CV = 77.3\%$ (图 3)。细/粗根生物量比在 0.03—5.32 之间, $CV = 70.5\%$; 最小者为鸭儿芹, 最大者为小鹿藿 (*Rhynchosia minima*), $CV > 100\%$ (图 3)。这些植物虽然总变异率较大, 但是除了 *Aa* 的根生物量和 *Rm* 的细/粗根生物量之比之外, 绝大多数草本植物与木本植物之间也较相近。25 个物种中根生物

量(0—0.5 g)及细/粗根生物量比(0.03—1.03)较小的物种均为多数,都占 76%;根生物量(2.5—3 g)及细/粗根生物量(5.03—6.03)较大的物种均最少占 4%。

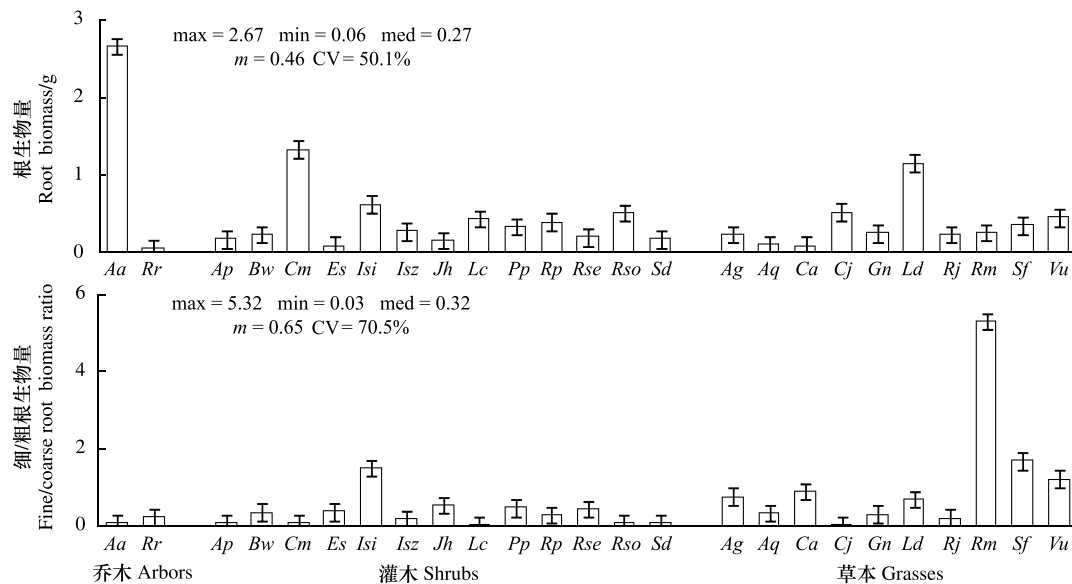


图3 岷江干旱河谷地区 25 种植物 1 年生植株根生物量及细根/粗根生物量比 ($n=3$)

Fig. 3 Root biomass and fine/coarse root biomass ratio of one-year-old plants of 25 species from the arid valley of Mingjiang River ($n=3$)
横条表示标准误

3.4 根系功能性状间的关系

对 25 种植物根系功能性状之间的相关性分析发现,最大根深与根幅及根生物量之间均极显著正相关,与比根长之间极显著负相关,但与总根长之间的正相关关系未达到极显著水平。根幅、总根长、根生物量两两之间极显著正相关。细/粗根生物量比与总根长、比根长之间极显著正相关(图 4)。

根系功能性状的相关程度在不同生活型之间发生一定的变化。例如,草本植物的总根长与最大根深之间显著正相关,但木本植物的相关性不显著,不相关概率为 50.9%。木本植物的比根长与最大根深显著负相关,但草本植物的相关性不显著,不相关概率高达 72.2% (图 4)。

3.5 根系功能性状的主成分分析

PCA 主成分分析将 25 种植物的 6 个根系功能性状分为 2 个主成分(图 5),第一主成分对根系功能性状变异的贡献率为 44.3%,其中根生物量的相关度最高(0.886),其次为根幅(0.867),最大根深的相关度最低(0.796)。第二主成分的贡献率为 32.3%,其中比根长的相关度最高(0.861),细/粗根生物量比次之(0.694),总根长最低(0.650)。

主成分分析将 25 个物种根系归为 3 个功能组(图 5):第 1 组位于包括臭椿(*Aa*)、小角柱花(*Cm*)和中华山黧豆(*Ld*) 3 个物种,该组植物具有较大的根深、根幅及根生物量。第 2 组包括万年蒿(*Ag*)、川甘亚菊(*Ap*)、金花小檗(*Bw*)、铁线莲(*Ca*)、刺序木蓝(*Isi*)、小鹿藿(*Rm*)、三叶针刺悬钩子(*Rp*)、川莓(*Rse*)、大狗尾草(*Sf*)和歪头菜(*Vu*) 10 个物种,该组植物具有较大的总根长、比根长及细/粗根生物量比;第 3 组包括木通(*Aq*)、鸭儿芹(*Cj*)、胡颓子(*Es*)、尼泊尔老鹳草(*Gn*)、四川木蓝(*Isz*)、矮探春(*Jh*)、枸杞(*Lc*)、长柄山蚂蝗(*Pp*)、毛茛(*Rj*)、小冻绿树(*Rr*)、川滇蔷薇(*Rso*)和白刺花(*Sd*) 12 个物种,该组物种根系各个功能性状并无明显一致的规律性。

4 讨论

4.1 岷江干旱河谷乡土植物 1 年生植株根系功能性状特点及其关联

干旱环境中生长的植物通常在幼苗期根系快速向下延伸,以获取土壤深层的水分,这对于幼苗定居极为

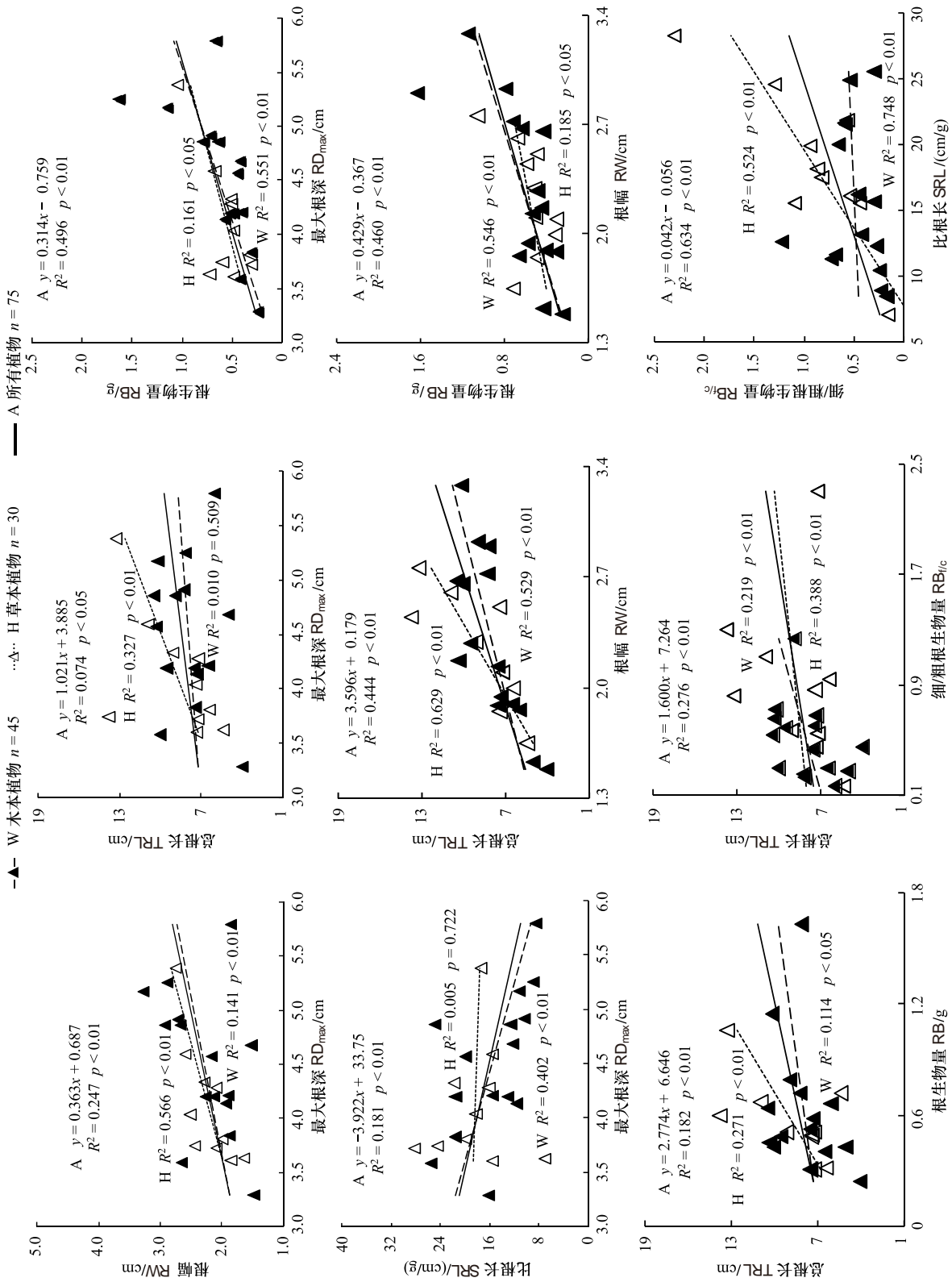


图 4 岷江干旱河谷地区 25 种植物一年生植株最大根深(RD_{max})、根幅(RW)、总根长(TRL)、比根长(SRL)、根生物量(RB)和细/粗根生物量比值(RB_{f/c})之间的相关性;
 Fig. 4 Correlations among root depthmax(RD_{max}), root width(RW), total root length(TRL), specific root length(SRL), root biomass(RB) and fine/coarse root biomass ratio (RB_{f/c}) of one-year-old plants of 25 species from the arid valley of Mingjiang River

拟合方程针对所有植物

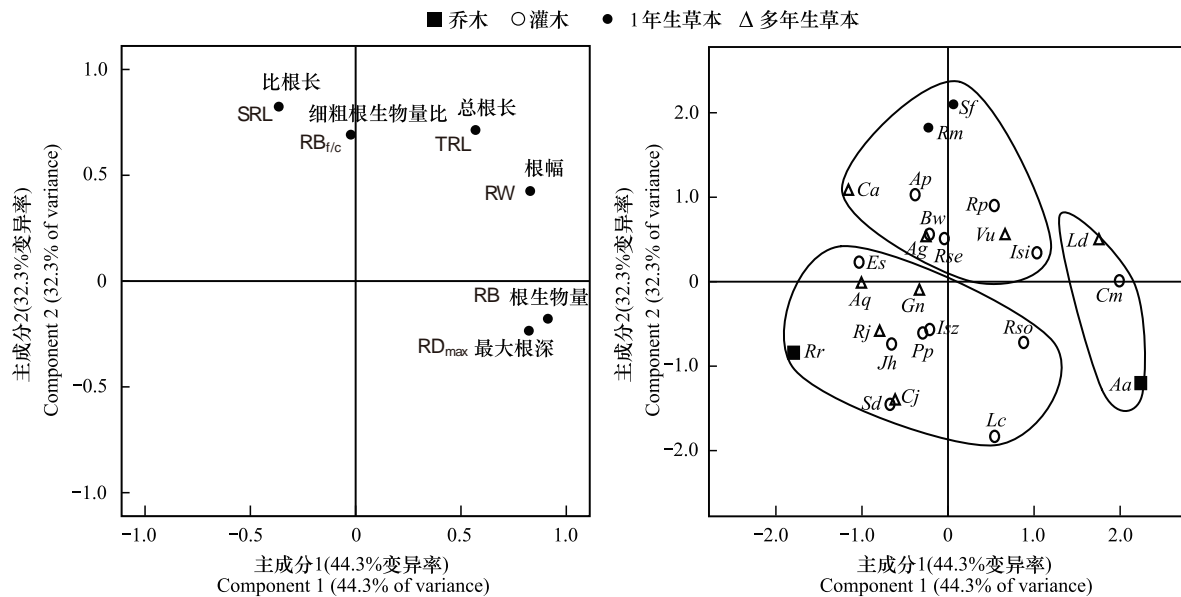


图5 岷江干旱河谷地区25种植物1年生植株根系最大根深(RD_{max})、根幅(RW)、总根长(TRL)、比根长(SRL)、根生物量(RB)和细/粗根生物量($RB_{f/c}$)的主成分分析

Fig 5 Principal-component analysis of root depth $_{max}$ (RD_{max}), root width (RW), total root length (TRL), specific root length (SRL), root biomass (RB) and fine/coarse root biomass ratio ($RB_{f/c}$) of one-year-old plants of 25 species from the arid valley of Mingjiang River. Species loadings on the first and second axis

关键^[14,18,28]。本研究结果表明,25种植物根系主要分布于10—30 cm土层,水平方向延伸2—6 cm的范围。比根长(SRL)在植物生长发育过程中发生变化。大量研究表明,相对于成熟植株,幼苗期的植物根系组织密度低,相对生长速率和周转率快,SRL大^[10,23,29-30]。与类似的生态系统中研究结果相比发现,就幼苗而言,本实验中木本植物SRL远大于典型干旱环境生长的梭梭(*Haloxylon ammodendron* (Mey.) Bunge)1龄幼苗0—40 cm土层的SRL(平均34.5 cm/g)^[31]。但是,草本植物的SRL小于类似的生态系统中草本植物(1700—7600 cm/g)^[6],不同根系功能性状的种间变异率存在较大差异。

研究发现,最大根深、根幅、总根长和细/粗根生物量比的变异较小,而根生物量和比根长变异较大。木本植物幼苗的最大根深、总根长、根幅大小都与草本植物较相近,表明不同生活型的植物在发育初期根系建成速率并没有明显差异。但是,SRL在不同生活型之间有明显差异,草本植物的SRL明显大于木本植物,与以往的研究结果一致^[22,32-34],表明不同生活型植物根系形态特征如细根或侧根比例,以及组织结构有明显差异。与木本植物相比,绝大多数草本植物细根较多,投入细根的生物量比例相对较大(图3),因此其比根长增大。

25种植物最大根深、根幅、根生物量和总根长之间两两正相关关系表明,根系较深的物种根幅也较大、总根长和根生物量也较高。另外,生活型对根系功能性状之间的相关性产生了影响,植物根系功能性状之间相互关联在不同生活型植物间存在相似或不同的特点。木本植物总根长与最大根深之间无显著相关性(图4b)。植物通过生成深根系获取较深土层资源或者充分发育细根,增大SRL,进而增加了对土壤资源的吸收面积^[35-37]。Metcalf等^[24]对亚马逊河森林的研究表明,细根根长在植物总根长中所占的比例高达93%,即细根越多,总根长越大。木本植物根系往往木质素含量高,通过发展较深的主根吸收利用深层土壤资源,整个根系的生物量主要集中在较粗的主根上,其细根不发达^[14,22,29],表明总根长与最大根深之间并不存在明显相关性,支持了本研究结果。Fornara等^[6]对美国明尼苏达州草地的研究表明,豆科和非禾本科草本植物对生态系统C、N循环的作用大于其他C₃和C₄草本植物,其原因主要是不同种类的根系质量和SRL等有所差异。SRL大小指示植物总生物量用来构建根系吸收面积时的效率高低。由于SRL较大的植物常常根系组织密度较小,根系周转速率和延伸率较快,具有较强的养分及水分吸收能力,相应地植物环境适应能力也较强^[10,32,38]。

在根系生物量相对固定的情况下,主根明显的根系倾向垂直向下生长,根深较大,侧向细根发育不充分^[35-38],其 SRL 较小;反之,则细根发达,SRL 较大^[16,22]。本研究结果也表明,25 种植物尤其是木本植物的 SRL 与最大根深呈显著负相关关系,与细/粗根生物量比呈显著正相关关系(图 4),进一步表明在相同的生长条件下,根系分布较浅、细根较发达的物种 SRL 较大,对表层土壤水分和养分的吸收利用能力可能较强。但是,对于草本植物而言,较大的 SRL 主要在于细根部分较多,与最大根深之间无明显关联,因为植物构建和维持单位长度细根所消耗的碳水化合物比粗根少^[39],从而提高了根系吸收功能,这对于植物幼苗适应环境是极为有利的。

4.2 岷江干旱河谷区乡土植物根系功能类型

根系功能性状的种间变异表明岷江干旱河谷区代表性植物根系功能有明显的多样性特征。Banziger 等^[40]将植物的环境适应策略分为防御型、忍耐型和逃避型 3 种类型,但这 3 种策略并非截然分离,受到植物生活型和生长阶段的影响,如 Cavender-Bares 和 Bazzaz^[41]对美国红橡木(*Quercus rubra*)的研究发现,植物在长期进化过程中形成的适应策略会随着生长发育阶段的改变发生变化,生长过程中幼树呈现逃避型,而成熟林呈现防御型。本研究就 25 种幼苗根系的主成分分析结果显示,聚类在图右下侧的物种最大根深、根幅及根生物量明显较大(图 5b),该组植物属于“防御型”物种,根系尽可能多开发利用土层及土壤空间以获取更多养分和水分,并以碳水化合物的形式存储而非直接消耗,从而增加了植物对土壤资源利用的持久性,其资源利用效率相对较低,更适宜于在资源相对丰富的生境中生长,这与 Wang 等^[15]对水稻(*Oryza sativa*)品系的研究一致。相反,聚类在图左上侧的物种具有较大的总根长、比根长及细/粗根生物量比,属于“忍耐型”物种,植物通过提高对养分和水分的利用效率来加快对土壤资源的利用,提高自身的竞争力以维持生存^[16,18,39],该组植物对贫瘠环境有较强适应性。然而,聚类在图左下侧的物种根系各功能性状未表现出明显一致的特征,可能属于“逃避型”物种,该组植物在土壤资源获取量与利用率方面均较低,但可能能够适应相对多变的环境条件^[42-43]。

从 25 种植物的生活型与根系功能型的综合分析结果表明,以生活型和功能型两种依据的植物分类结果并不一致。从植物功能型角度来看,我们研究的乔木、灌木、1 年生草本及多年生草本 4 种生活型在功能上没有明显的界限(图 5b),即不同生活型的物种可属于同一功能类型;而生活型相同的物种根系性状特征可归为不同的功能组。由于植物生长发育阶段对根系功能性状产生重要影响,处于不同生长时期的植物外部形态和内部生理机能会发生变化,导致对同一环境因子的敏感程度有所差异,从而表现出不同生长方式和适应策略^[10,30]。本实验揭示了岷江干旱河谷区 25 种乡土植物 1 年生时期的根系功能性状及其相关关系,这种关系是否随植物个体发育阶段(年龄)变化尚有待进一步研究。

致谢: 本研究得到中国科学院茂县山地生态系统定位研究站唐宗平和朱亚平的支持,特此致谢。

References:

- [1] Kuchenbuch R O, Ingram K T, Buczko U. Effects of decreasing soil water content on seminal lateral roots of young maize plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, 169(6): 841-848.
- [2] Zhang X Q, Wu K H, Dieter M. A review of methods for fine-root production and turnover of trees. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 875-883.
- [3] Meier I C, Leuschner C. Belowground drought response of European beech: fine root biomass and carbon partitioning in 14 mature stands across a precipitation gradient. *Global Change Biology*, 2008, 14(9): 2081-2095.
- [4] Joslin J D, Wolfe M H, Hanson P J. Effects of altered water regimes on forest root systems. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 117-129.
- [5] Xu Z Z, Zhou G S. Relationship between carbon and nitrogen and environmental regulation in plants under global change — from molecule to ecosystem. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(4): 738-747.
- [6] Fornara D A, Tilman D, Hobbie S E. Linkages between plant functional composition, fine root processes and potential soil N mineralization rates. *Journal of Ecology*, 2009, 97(1): 48-56.
- [7] Huang G, Zhao X Y, Huang Y X, Li Y L, Su Y G. The root longevity of *artemisia halodendron* inhabiting two sandy land habitats. *Chinese*

- Journal of Plant Ecology, 2009, 33(4): 755-763.
- [8] Wang J, Liu M S, Sheng S, Xu C, Liu X K, Wang H J. Spatial distributions of soil water, salts and roots in an arid arbor-herb community. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(9): 4120-4127.
- [9] Cheng X R, Huang M B, Shao M G, Warrington D N. A comparison of fine root distribution and water consumption of mature *Caragana korshinkii* Kom grown in two soils in a semiarid region, China. *Plant and Soil*, 2009, 315(1/2): 149-161.
- [10] Leva P E, Aguiar M R, Oesterheld M. Underground ecology in a Patagonian steppe: Root traits permit identification of graminoid species and classification into functional types. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(4/5): 428-434.
- [11] Manschadi A M, Hammer G L, Christopher J T, de Voil P. Genotypic variation in seedling root architectural traits and implications for drought adaptation in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant and Soil*, 2008, 303(1/2): 115-129.
- [12] Jose S, Williams R, Zamora D. Belowground ecological interactions in mixed-species forest plantations. *Forest Ecology and Management*, 2006, 233(2/3): 231-239.
- [13] Place G, Bowman D, Burton M, Ruffy T. Root penetration through a high bulk density soil layer: differential response of a crop and weed species. *Plant and Soil*, 2008, 307(1/2): 179-190.
- [14] Markesteijn L, Poorter L. Seedling root morphology and biomass allocation of 62 tropical tree species in relation to drought-and shade-tolerance. *Journal of Ecology*, 2009, 97(2): 311-325.
- [15] Wang H, Siopongco J, Wade L J, Yamauchi A. Fractal analysis on root systems of rice plants in response to drought stress. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 65(2/3): 338-344.
- [16] Koike T, Kitao M, Quoreshi A M, Matsuura Y. Growth characteristics of root-shoot relations of three birch seedlings raised under different water regimes. *Plant and Soil*, 2003, 255(1): 303-310.
- [17] Valdés M, Asbjornsen H, Gómez-Cárdenas M, Juárez M, Vogt K A. Drought effects on fine-root and ectomycorrhizal-root biomass in managed *Pinus oaxacana* Mirov stands in Oaxaca, Mexico. *Mycorrhiza*, 2006, 16(2): 117-124.
- [18] Cortina J, Green J J, Baddeley J A, Watson C A. Root morphology and water transport of *Pistacia lentiscus* seedlings under contrasting water supply: A test of the pipe stem theory. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 62(3): 343-350.
- [19] Jourdan C, Silva E V, Goncalves J L M, Ranger J, Moreir R M, Laclau J P. Fine root production and turnover in Brazilian *Eucalyptus* plantations under contrasting nitrogen fertilization regimes. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(3): 396-404.
- [20] Aerts R, Chapin F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30: 1-68.
- [21] Westoby M, Falster D S, Moles A T, Vesk P A, Wright I J. Plant ecological strategies: Some leading dimensions of variation between species. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, 33: 125-159.
- [22] Wahl S, Ryser P. Root tissue structure is linked to ecological strategies of grasses. *New Phytologist*, 2000, 148(3): 459-471.
- [23] Cornelissen J H C, Lavorel S, Garnier E, Díaz S, Buchmann N, Gurvich D E, Reich P B, ter Steege H, Morgan H D, van der Heijden M G A, Pausas J G, Poorter H. A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 2003, 51(4): 335-380.
- [24] Metcalfe D B, Meir P, Aragão L E O C, da Costa A C L, Braga A P, Goncalves P H L, de Athaydes Silva Junior J, de Almeida S S, Dawson L A, Malhi Y, Williams M. The effects of water availability on root growth and morphology in an Amazon rainforest. *Plant and Soil*, 2008, 311(1/2): 189-199.
- [25] He J S, Wang Z Q, Fang J Y. Belowground ecology under global change: problems and prospects. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(13): 1226-1233.
- [26] Chang W J, Guo D L. Variation in root diameter among 45 common tree species in temperate, subtropical and tropical forests in China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(6): 1248-1257.
- [27] Wu F Z, Bao W K, Li F L, Wu N. Effects of drought stress and N supply on the growth, biomass partitioning and water-use efficiency of *Sophora davidii* seedlings. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 63(1/3): 248-255.
- [28] Green J J, Baddeley J A, Cortina J, Watson C A. Root development in the Mediterranean shrub *Pistacia lentiscus* as affected by nursery treatments. *Journal of Arid Environments*, 2005, 61(1): 1-12.
- [29] Wright I J, Westoby M. Differences in seedling growth behaviour among species: trait correlations across species, and trait shifts along nutrient compared to rainfall gradients. *Journal of Ecology*, 1999, 87(1): 85-97.
- [30] Comas L, Bouma T, Eissenstat D. Linking root traits to potential growth rate in six temperate tree species. *Oecologia*, 2002, 132(1): 34-43.
- [31] Huang Y, Guo Y H. Root Distribution Characteristics of *Haloxylon ammodendron* (Mey.) Bunge Plantation. *Acta Agrestia Sinica*, 2009, 17(1): 84-87.

- [32] Ryser P. The importance of tissue density for growth and life span of leaves and roots: a comparison of five ecologically contrasting grasses. *Functional Ecology*, 1996, 10(6): 717-723.
- [33] Wright I J, Westoby M. Cross-species relationships between seedling relative growth rate, nitrogen productivity and root vs leaf function in 28 Australian woody species. *Functional Ecology*, 2000, 14(1): 97-107.
- [34] Tjoelker M G, Craine J M, Wedin D, Reich P B, Tilman D. Linking leaf and root trait syndromes among 39 grassland and savannah species. *New Phytologist*, 2005, 167(2): 493-508.
- [35] Díaz S, Hodgson J G, Thompson K, Cabido M, Cornelissen J H C, Jalili A, Montserrat-Martí G, Grime J P, Zarrinkamar F, Asri Y, Band S R, Basconcelo S, Castro-Díez P, Funes G, Hamzehee B, Khoshnevi M, Pérez-Harguindeguy N, Pérez-Rontomé M C, Shirvany F A, Vendramini F, Yazdani S, Abbas-Azimi R, Bogaard A, Boustani S, Charles M, Dehghan M, de Torres-Espuny L, Falczuk V, Guerrero-Campo J, Hynd A, Jones G, Kowsary E, Kazemi-Saeed F, Maestro-Martínez M, Romo-Díez A, Shaw S, Siavash B, Villar-Salvador P, Zak M R. The plant traits that drive ecosystems: Evidence from three continents. *Journal of Vegetation Science*, 2004, 15(3): 295-304.
- [36] Grime J P. Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. *The American Naturalist*, 1977, 111(982): 1169-1194.
- [37] Chapin III F S. Functional role of growth forms in ecosystem and global processes // Ehrlinger J R, Field C B, eds. *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe*. San Diego: Academic Press, 1993: 287-312.
- [38] Treseder K K, Allen M F. Direct nitrogen and phosphorus limitation of arbuscular mycorrhizal fungi: A model and field test. *New Phytologist*, 2002, 155(3): 507-515.
- [39] Robinson D, Hodge A, Fitter A H. Constraints on the form and function of root systems. *Root Ecology*, 2003, 168: 1-31.
- [40] Bänziger M, Edmeades G L, Beck D, Bellon M. *Breeding for Drought and Nitrogen Stress Tolerance in Maize: From Theory to Practice*. CIMMYT, Mexico D. F., 2000.
- [41] Cavender-Bares J, Bazzaz F A. Changes in drought response strategies with ontogeny in *Quercus tubra*: implications for scaling from seedlings to mature trees. *Oecologia*, 2000, 124(1): 8-18.
- [42] Voltaire F. Drought survival, summer dormancy and dehydrin accumulation in contrasting cultivars of *Dactylis glomerata*. *Physiologia Plantarum*, 2002, 116(1): 42-51.
- [43] Wittenmayer L, Merbach W. Plant responses to drought and phosphorus deficiency: contribution of phytohormones in root-related processes. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, 168(4): 531-540.

参考文献:

- [2] 张小全, 吴可红, Dieter Murach. 树木细根生产与周转研究方法评述. *生态学报*, 2000, 20(5): 875-883.
- [5] 许振柱, 周广胜. 全球变化下植物的碳氮关系及其环境调节研究进展——从分子到生态系统. *植物生态学报*, 2007, 31(4): 738-747.
- [7] 黄刚, 赵学勇, 黄迎新, 李玉霖, 苏延桂. 两种生境条件下差不嘎蒿细根寿命. *植物生态学报*, 2009, 33(4): 755-763.
- [8] 王珺, 刘茂松, 盛晟, 徐驰, 刘小恺, 王汉杰. 干旱区植物群落土壤水盐及根系生物量的空间分布格局. *生态学报*, 2008, 28(9): 4120-4127.
- [25] 贺金生, 王政权, 方精云. 全球变化下的地下生态学: 问题与展望. *科学通报*, 2004, 49(13): 1226-1233.
- [26] 常文静, 郭大立. 中国温带、亚热带和热带森林 45 个常见树种细根直径变异. *植物生态学报*, 2008, 32(6): 1248-1257.
- [31] 黄勇, 郭玉海. 人工梭梭林根系的分布特征. *草地学报*, 2009, 17(1): 84-87.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 1 January, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Allee effects of local populations and the synchrony of metapopulation	LIU Zhiguang, ZHAO Xue, ZHANG Fengpan, et al (1)
Effects of leaf hair points on dew deposition and rainfall evaporation rates in moss crusts dominated by <i>Syntrichia caninervis</i> , Gurbantunggut Desert, northwestern China	TAO Ye, ZHANG Yuanming (7)
The influence of freshwater-saline water mixing on phytoplankton growth in Changjiang Estuary	WANG Kui, CHEN Jianfang, LI Hongliang, et al (17)
The responses of hydrological indicators to watershed characteristics	TIAN Di, LI Xuyong, Donald E. Weller (27)
Lake nutrient ecosystems in the east-central moist subtropical plain of China	KE Xinli, LIU Man, DENG Xiangzheng (38)
The current water trophic status in Tiaoxi River of Taihu Lake watershed and corresponding coping strategy based on N/P ratio analysis	NIE Zeyu, LIANG Xinqiang, XING Bo, et al (48)
Reversion and analysis on cyanobacteria bloom in Waihai of Lake Dianchi	SHENG Hu, GUO Huaicheng, LIU Hui, et al (56)
Effects of cutting disturbance on spatial heterogeneity of fine root biomass of <i>Larix principis-rupprechtii</i>	YANG Xiuyun, HAN Youzhi, ZHANG Yunxiang, et al (64)
Responses of elm (<i>Ulmus pumila</i>) woodland to different disturbances in northeastern China	LIU Li, WANG He, LIN Changcun, et al (74)
Impacts of grazing and climate change on the aboveground net primary productivity of mountainous grassland ecosystems along altitudinal gradients over the Northern Tianshan Mountains, China	ZHOU Decheng, LUO Geping, HAN Qifei, et al (81)
Response of herbaceous vegetation to phosphorus fertilizer in steppe desert	SU Jieqiong, LI Xinrong, FENG Li, et al (93)
Spatiotemporal characteristics of landscape change in the coastal wetlands of Yancheng caused by natural processes and human activities	ZHANG Huabing, LIU Hongyu, HAO Jingfeng, et al (101)
Response of species diversity in <i>Caragana Korshinskii</i> communities to climate factors and grazing disturbance in Shanxi, Shaanxi, Ningxia and Inner Mongolia	ZHOU Ling, SHANGGUAN Tieliang, GUO Donggang, et al (111)
Seasonal change of leaf morphological traits of six broadleaf seedlings in South China	XUE Li, ZHANG Rou, XI Ruchun, GUO Shuhong, et al (123)
Correlation analysis on <i>Reaumuria soongorica</i> seed traits of different natural populations in Gansu Corridor	SU Shiping, LI Yi, CHONG Peifang (135)
Carbon fixation estimation for the main plantation forest species in the red soil hilly region of southern-central Jiangxi Province, China	WU Dan, SHAO Quanqin, LI Jia, et al (142)
Effects of clonal integration on growth of <i>Alternanthera philoxeroides</i> under simulated acid rain and herbivory	GUO Wei, LI Junmin, HU Zhenghua (151)
Difference of the fitness of <i>Helicoverpa armigera</i> (Hübner) fed with different pepper varieties	JIA Yueli, CHENG Xiaodong, CAI Yongping, et al (159)
Hyperspectral estimating models of tobacco leaf area index	ZHANG Zhengyang, MA Xinming, JIA Fangfang, et al (168)
Temporal and spatial distribution of <i>Bemisia tabaci</i> on different host plants	CUI Hongying, GE Feng (176)
Abundance and composition of CO ₂ fixating bacteria in relation to long-term fertilization of paddy soils	YUAN Hongzhao, QIN Hongling, LIU Shoulong, et al (183)
Effect of <i>Leucaena leucocephala</i> on soil organic carbon conservation on slope in the purple soil area	GUO Tian, HE Binghui, JIANG Xianjun, et al (190)
Isolation and the remediation potential of a Laccase-producing Soil Fungus F-5	MAO Ting, PAN Cheng, XU Tingting, et al (198)
Spatial heterogeneity of soil microbial biomass in Mulun National Nature Reserve in Karst area	LIU Lu, SONG Tongqing, PENG Wanxia, et al (207)
Root functional traits and trade-offs in one-year-old plants of 25 species from the arid valley of Minjiang River	XU Kun, LI Fanglan, GOU Shuiyan, et al (215)
Spatial distribution of carbon density in grassland vegetation of the Loess Plateau of China	CHENG Jimin, CHENG Jie, YANG Xiaomei, et al (226)
Effect of nitrogen concentration in the subtending leaves of cotton bolls on the strength of source and sink during boll development	GAO Xiangbin, WANG Youhua, CHEN Binglin, et al (238)
Long-term tillage effects on soil organic carbon and microbial biomass carbon in a purple paddy soil	LI Hui, ZHANG Junke, JIANG Changsheng, et al (247)
Effects of exogenous calcium on resistance of <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle to cadmium stress	MIN Haili, CAI Sanjuan, XU Qinsong, et al (256)
Comparison of grain protein components and processing quality in responses to dim light during grain filling between strong and weak gluten wheat cultivars	LI Wenyang, YAN Suhui, WANG Zhenlin (265)
Review and Monograph	
Salt-responsive mechanisms in the plant root revealed by proteomic analyses	ZHAO Qi, DAI Shaojun (274)
The research progress and prospect of watershed ecological risk assessment	XU Yan, GAO Junfeng, ZHAO Jiahu, et al (284)
A review of the environmental behavior and effects of black carbon in soils and sediments	WANG Qing (293)
Scientific Note	
Variation in main morphological characteristics of <i>Amorpha fruticosa</i> plants in the Qinghai-Tibet Plateau	LIANG Kunlun, JIANG Wenqing, ZHOU Zhiyu, et al (311)
Identification of aphid resistance in eleven species from <i>Dendranthema</i> and <i>Artemisia</i> at seedling stage	SUN Ya, GUAN Zhiyong, CHEN Sumei, et al (319)
Research of padded film for afforestation in coastal argillaceous saline-alkali land	JING Feng, ZHU Jinzhao, ZHANG Xuepei, et al (326)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 1 期 (2012 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 1 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元