

# 两种灌木根系对异质生长空间的适应分布特征

潘露<sup>1</sup>, 唐丽霞<sup>1</sup>, 张乔艳<sup>2</sup>, 郭欢<sup>1</sup>, 阮仕航<sup>1</sup>

(1. 贵州大学 林学院, 贵阳 550025; 2. 贵州省国有扎佐林场, 贵阳 550025)

**摘 要:**为探究灌木根系对异质空间的适应策略,以紫穗槐和胡枝子两种灌木为研究对象,采用盆栽控制生长空间的研究方法,以放置不同形状的木板在盆内模拟不同喀斯特异质空间条件(孔隙型、圆形裂缝型、条形裂缝型和孔隙+岩石阻挡型),研究了异质空间条件下两种灌木根系分布特征。结果表明:(1) 异质空间条件下紫穗槐和胡枝子根系各项指标均高于均质空间,异质空间条件对根系生长有促进作用。不同植物受异质空间的影响程度不同,胡枝子在异质空间下的根系生物量显著高于均质空间。不同异质空间对根系生长的影响不同,紫穗槐和胡枝子根系均在孔隙型和圆形裂缝型两种空间条件下最为发达。(2) 紫穗槐和胡枝子根生物量分布特征受异质空间影响。在异质空间下两种树种根生物量的垂直分布均集中分布在土层深度 5—10 cm 和 15—20 cm 范围内,水平分布均集中分布在距植株中心 0—3 cm 内。紫穗槐根系生物量的水平分布受异质空间具体形状影响较大,孔隙型空间和圆形裂缝型空间对其水平分布影响较为显著。(3) 两种灌木对异质空间的适应策略不同,紫穗槐根系对异质空间的适应策略为寻找更多空间,而胡枝子根系对异质空间的适应策略为占据有限空间。综上,紫穗槐和胡枝子根系生长受空间影响,两种灌木根系对生长空间适应策略不同。

**关键词:**适应策略; 生长空间; 根系生物量; 紫穗槐; 胡枝子

**中图分类号:**Q945; S718.51<sup>+</sup>9

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2022)02-0330-07

## Distribution Characteristics of Two Shrubs Roots in Heterogeneous Growth Space

PAN Lu<sup>1</sup>, TANG Lixia<sup>1</sup>, ZHANG Qiaoyan<sup>2</sup>, GUO Huan<sup>1</sup>, RUAN Shihang<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Zhazuo State-owned Forest Farm of Guizhou Province, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** In order to explore the adaptation strategy of *Amorpha fruticosa* and *Lespedeza bicolor* roots in heterogeneous spaces, potted plant experiments were employed in this study. Different karst heterogeneous space conditions were simulated by placing different shapes of wooden boards in plant pot. The simulated spatial types include pore type, circular fracture type, strip fracture type and pore+rock barrier type. The root distribution characteristics of *Amorpha fruticosa* and *Lespedeza bicolor* under these spatial conditions were studied. The results show that: (1) all root indexes of *Amorpha fruticosa* and *Lespedeza bicolor* in heterogeneous spaces are higher than those in homogeneous spaces, which indicates that heterogeneous space can promote root growth; the root biomass of *Lespedeza bicolor* in heterogeneous space is significantly higher than that in homogeneous space, and the roots of *Amorpha fruticosa* and *Lespedeza bicolor* are most developed in pore type and circular crack type conditions; (2) the distribution characteristics of root biomass of *Amorpha fruticosa* and *Lespedeza bicolor* are affected by heterogeneous space; under heterogeneous situation, the root biomass of the two shrubs mainly concentrates in the 5—10 cm and 15—20 cm soils vertically, and within 3 cm around the plant stem horizontally; heterogeneous spatial shape has great influence on the horizontal distribution of root biomass of *Amorpha fruticosa*, especially in pore type and circular crack type; (3) the adaptation strategies of two shrubs in heterogeneous space are different; the adaptation strategy of *Amorpha fruticosa* roots in heterogeneous space is to find more space, while the adaptation strategy of *Lespedeza bicolor* roots in heterogeneous space is to occupy limited space. The growth of the root systems of

收稿日期: 2021-03-06

修回日期: 2021-04-07

资助项目: 国家自然科学基金“喀斯特地区护坡灌木根系构型的固土变形机制研究”(31960332)

第一作者: 潘露(1996—), 女, 贵州大方人, 硕士研究生, 研究方向为根系形态及其力学。E-mail: 1102324199@qq.com

通信作者: 唐丽霞(1976—), 女, 内蒙古呼伦贝尔人, 博士, 副教授, 主要从事根系护坡研究。E-mail: 248206125@qq.com

*Amorpha fruticosa* and *Lespedeza bicolor* are affected by space, and the root systems of the two shrubs have different adaptation strategies in the growth space.

**Keywords:** adaptation strategies; growth space; root biomass; *Amorpha fruticosa*; *Lespedeza bicolor*

根系是植物的重要组成部分,其生理作用主要是吸收、传导水分和营养物质<sup>[1]</sup>,在边坡生态修复和防治水土流失过程中,植物根系所发挥的作用主要是提高边坡的稳定性、增强土体抗剪强度以及改善边坡土体应力状态<sup>[2-4]</sup>。根系形态是影响根系对养分、水分吸收能力的重要因素,良好的根系形态可提高植物对营养物质的吸收率<sup>[5]</sup>,根系分布特征对于根系对土体抗剪强度的增强作用也有重要意义<sup>[6-7]</sup>。植物的根系分布形态多样,不同分布形态的根系发挥固土护坡作用方式以及强度也不相同。颜正平<sup>[8]</sup>通过壕沟法对 117 种植物进行调查,将根系基本形态分为横走型(PH-type)、直角型(R-type)、垂直与水平型(VH-type)、垂直型(V-type)、团网型(M-type),其中横走型和垂直水平型根系主要发挥锚固作用,直角型和团网型则起到网络、加筋作用,增强土体抗剪强度。刘秀萍等<sup>[9]</sup>试验得出复合根布根方式对增强土体抗剪强度效果最显著。常婧美等<sup>[10]</sup>对红叶石楠(*Photinia* × *fraseri* Dress)的根系进行拉拔试验,结果表明根系形态是影响根系抗拔力的关键因素,根系形态越复杂,其抗拔力越大。

植物根系是一个非规则的复杂形体,难以定量测量,且根系形态可塑性强,易受环境影响,使得对根系形态研究难度大大增加。目前关于根系形态的研究主要在环境因子对根系形态影响方面,包括水分胁迫、养分胁迫、重金属胁迫及生物胁迫等<sup>[11-14]</sup>。李金航等<sup>[15]</sup>对黄栌(*Cotinus coggygia*)幼苗进行干旱处理时发现其根表面积、根体积和根系平均直径均随土壤含水量的降低而显著上升。其他研究也表明当水分成为影响根系生长的限制因子时,植物根系会通过调整根冠比、根系生物量,增加根系长度及根系表面积等来提高对土壤水分的吸收能力来适应干旱<sup>[16-18]</sup>。营养元素亦对根系生长有很大的影响,低磷胁迫能促进侧根的形成,韦如萍等<sup>[19]</sup>对杉木(*Cunninghamia lanceolata*)进行缺磷处理,其根冠比、根毛长度、密度及侧根长度都有不同程度增加,细根比例显著提高。氮在合适的中等水平时,橡胶的侧根生长得到促进。当碳氮比较高时,拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)侧根生长速率增加,初生根生长受到抑制<sup>[5]</sup>。重金属主要通过影响植物根系对营养元素的吸收对根系生长造成影响,较低浓度的镉可促进侧根的生长,但镉浓度的增加会降低根系代谢酶的活性,破坏根系细胞结构,从而导致根对水

分吸收效率下降,根长、根表面积等随之降低<sup>[20-22]</sup>。李金波等<sup>[23]</sup>研究表明神胁迫对黑麦草(*Lolium perenne*)的根总长和根总表面积有抑制作用。根系在受到环境胁迫时通常对其生理形态做出调整以更好地适应逆境。生长空间也是影响根系生长的环境因子之一,但是关于空间胁迫对根系形态影响的研究相对较少。

喀斯特地区地势复杂、地表破碎、小生境多样、土层浅薄,贵州省为西南喀斯特地貌的中心,区内喀斯特分布面积占全省面积的 85%,由于基岩为含可溶性岩石的碳酸盐岩,裂缝、天坑、洞穴等在喀斯特区地下高度发育<sup>[24]</sup>。在复杂的地理条件下,植物根系是以何种生存策略来生存,根系形态与生长空间条件关系如何?黄丽同等<sup>[25]</sup>对喀斯特地区 3 种灌木根系形态进行调查,结果表明根系为适应有限生存空间,3 种灌木均以减少分支,增强根系连接长度的策略来适应喀斯特特殊的环境。但是根系在受限空间的生长适应策略尚不明确,从根系可塑性角度来探究根系对不同生长空间环境的响应特征和规律,对喀斯特地区生态恢复有重要意义。紫穗槐(*Amorpha fruticosa* L.)是一种喜光,耐寒、耐旱、耐湿、耐盐碱、耐沙压、抗逆性极强的多年生豆科丛生小灌木,多用于北方营造水土保持林和薪炭林,是不错的护坡灌木树种。胡枝子(*Lespedeza bicolor* T.)也是北方一种抗旱性强、抗逆性强的乡土野生优良水土保持灌木。本研究通过放置不同形状木板来模拟喀斯特地区异质性强的地下有限空间条件,探究植物根系在异质空间条件下的生长策略,试图为喀斯特地区的护坡树种选择提供理论依据。

## 1 研究区概况

研究区位于贵州省贵阳市花溪区,地理坐标为 26.45°N,106°65'E,地貌以山地和丘陵为主,区内 94%为喀斯特地貌,地下结构复杂多样,海拔 1 130~1 326 m,属亚热带湿润气候。年平均气温为 15.3℃,年日照时间 1 164.9 h,阴天多,日照少,辐射能量低,年均相对湿度为 77%。年均降水量为 1 200 mm,雨季集中在 5—10 月,全年气候温和,雨量充沛。土壤多数为酸性黄壤和石灰土。盆栽种植土壤为酸性黄壤。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验材料与设计

在岩溶作用下,喀斯特形成独特的地表—地下

“二元生境”，地下孔裂隙高度发育<sup>[26]</sup>，导致喀斯特地区地下空间环境复杂，为探究植物根系在复杂的生长空间下的适应策略，通过在塑料盆内放置不同形状的木板模拟不同的地下生境。以在木板上钻孔和开缝的方式来模拟几种极端孔裂隙情况下的地下生长空间，分别为地下全为孔隙——孔隙型；裂缝为圆形——圆形裂缝型；裂缝为直线型——条形裂缝型和一边为孔隙、一边没有孔隙——孔隙+岩石阻挡型，具体形状及尺寸见图 1。据前期调查，两年生紫穗槐主根根径为 150 mm 左右，胡枝子无明显主根，根径均小于 150

mm，故孔隙型的孔隙直径以及裂缝型的裂缝宽度均为 1.5 cm，即两种灌木根系均可自由穿过木板。2018 年 4 月，将半年生紫穗槐、胡枝子幼苗分别移栽至放置不同形状木板的塑料盆内，塑料盆口径为 28 cm，高为 22 cm。木板位置为土层深度 10 cm 处，木板厚度为 0.5 cm，土壤距离盆口距离为 1.5 cm，即土体为直径为 28 cm，高为 20 cm 的圆柱体。土壤容重为 1.31 g/cm<sup>3</sup>。以不放置木板作为空白对照，每种处理设置 3 个重复。共栽种 30 株幼苗，将盆栽置于学校试验地，让其在野外自由生长。

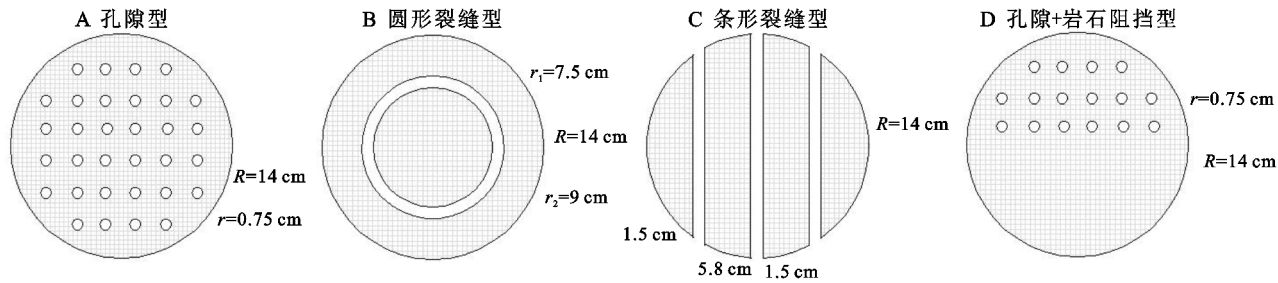


图 1 不同空间条件阻挡木板形状

2.2 样品采集

2019 年 10 月，采用分层分段挖掘法对紫穗槐和胡枝子两种灌木根系生长情况进行调查。为方便对根系进行定位，将盆栽在水平方向上以植株中心为交点划分为 8 个区域；再根据距植株的距离将每个区域划分为 5 段，距植株中心 3 cm 为 1 段；垂直方向上分为 4 层，以木板为界限，木板上面 2 层，下面 2 层，每层 5 cm，每个盆栽被划分为 160 个小单元(5×8×4)。

采集根系前对植株的地径、树高、冠幅、分支数等地上部分生理指标进行测量。采用分层分段全挖法，把整株根系挖出后再进行裁剪，挖掘过程中利用细线进行标记。将各小单元内的根系在网筛内洗净后放到 EPSON 根系扫描仪内扫描，再通过 WinRHIZO 根系分析系统分析得到根长、根表面积、根体积等数据。最后，将各层各段根系放入干燥箱，在 80℃ 下烘干至恒重后称重，得到生物量。

3 结果与分析

3.1 不同空间条件对根系生长的影响

根长、根表面积、根体积可反映根系对资源的占据情况及植物对土壤水分、养分等的吸收能力，根生物量能随环境改变做出相应的适应，其分布情况可直接反映出根系的分布特点。由于植物生长具有不可控性，相同条件下植物长势并不完全相同，为了减小其他因素对试验结果造成的影响，选取地上部分长势相近的植株作为标准株，对其试验结果进行分析。

表 1 为在不同空间条件下两种灌木根系生长状况统计表，从表中可以明显看出在异质空间条件下的紫穗槐根系的根长除条形裂缝型略低于空白外，其余空间条件下的根长均高于对照，异质空间下的根表面积、根体积和根生物量均高于对照。胡枝子根系在异质空间条件下的各项指标均显著高于空白对照组。

表 1 不同空间条件下两种护坡灌木根系的生长情况

空间类型	紫穗槐				胡枝子			
	根长/cm	根表面积/cm <sup>2</sup>	根体积/cm <sup>3</sup>	根生物量/g	根长/cm	根表面积/cm <sup>2</sup>	根体积/cm <sup>3</sup>	根生物量/g
孔隙型	5276.45	933.61	39.76	10.47	25176.10	6717.19	282.56	8.24
圆形裂缝型	4661.35	820.71	45.11	12.49	23088.10	6862.41	419.56	11.00
条形裂缝型	2543.99	472.05	25.19	9.37	23535.02	6217.82	269.33	8.91
孔隙+岩石阻挡型	4473.49	759.65	34.95	9.95	22248.52	5669.35	251.66	8.18
空白对照	2669.62	442.80	21.03	6.82	13064.27	3063.99	104.66	3.504

不同植物根系在不同异质空间下的生长情况也有所差异，紫穗槐在孔隙型空间的根长和根表面积都是 4 种异质空间下最大的，其次是圆形裂缝型。但根体积和

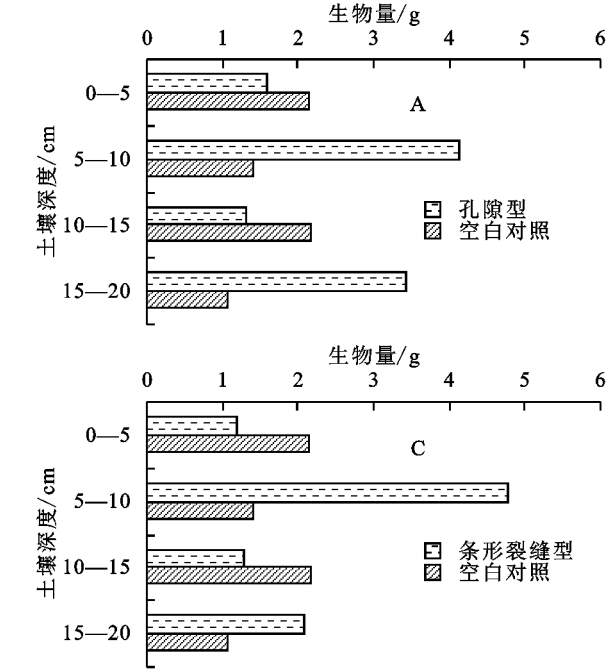
根生物量为圆形裂缝型最大，其次为孔隙型，条形裂缝型的各项根系生长指标在 4 种异质空间中均为最小。

胡枝子根系对不同异质空间的响应与紫穗槐有所



差异,胡枝子根表面积、根体积及根生物量均在圆形裂缝型中最大,胡枝子根系在孔隙+岩石阻挡型空间下生长最不发达,具体表现为各项指标均低于其余 3 种异质空间。与紫穗槐相似,胡枝子根长在孔隙型最大。

综上,异质空间有刺激根系生长的作用,不同生长空间对不同树种的影响程度不同,孔隙型和圆形裂缝型空间对紫穗槐根系影响较大,条形裂缝型影响最小。圆形裂缝型和孔隙型对胡枝子根长影响较大,孔隙+岩石阻挡型影响最小。此外,从表中还可以看出紫穗槐和胡枝子在 5 种生长空间的根生物量都相差不多,但胡枝子的根长、根面积和根体积均远远大于紫穗槐,这与植物的物种特性有关,紫穗槐属于深根型直根植物,须根较胡枝子少,胡枝子根系为水平轴根型,细根居多。



### 3.2 不同空间条件下根系生物量的垂直分布特征

根系生物量是反映根系生长能力的指标,生物量越多,根系对养分、水分等的利用能力越强。为研究不同土层深度下根系生长差异,以根系生物量为指标,定量研究生长空间限制对根系分布的影响。

由图 2 可知,紫穗槐根系生物量在异质空间条件下的垂直分布情况与空白对照均有显著差异,空白对照组根系生物量在各土层分布均匀,土层 0—5 cm 和 10—15 cm 范围内根系生物量略高于其他两个土层,15—20 cm 范围内根生物量最少,而异质空间条件下 5—10 cm 土层的生物量均显著多于其他土层,对于除孔隙+岩石阻挡型外的 3 种异质空间,根系生物量主要还集中在 15—20 cm 范围内,表明在生长空间受限时根生物量会显著增加。

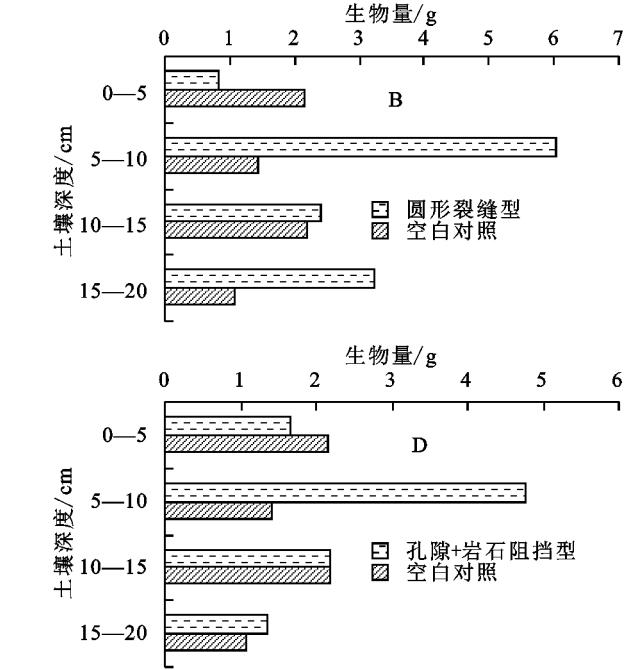


图 2 不同生长空间下紫穗槐根生物量垂直分布特征

对于胡枝子,异质空间根系生物量随土层深度增加的变化趋势同紫穗槐相似,均在 5—10 cm 和 15—20 cm 范围有陡增,根系生物量均集中分布在 5—10 cm 和 15—20 cm。空白对照根系生物量在各土层深度分布均匀(图 3)。综上,在生长空间不受限时,紫穗槐、胡枝子根系生物量在各土层内均匀分布,在异质生长空间条件下,根系生物量均显著高于空白对照且集中分布在 5—10 cm 和 15—20 cm。即根系在生长空间受限时,通过增加其根系(生物量)以及改变其生物量分配方式来汲取水分和养分,以维持正常生长。值得注意的是,空间条件的具体形式对根生物量垂直分布影响不大,即不同异质空间条件下根系生物量垂直分布特征相同。分析原因在于,植物生长受限空间形状各异,但其生长受限空间的面积差异不大所致。

### 3.3 不同空间条件下根系生物量的水平分布特征

从图 4A 可以看出,不同生长空间条件下紫穗槐根系在距离植株中心不同距离处的生物量存在差异,随着与植株中心距离增大,生物量总体呈减少趋势,即距离植株中心越远,根系生物量越少,生物量在距离植株中心 0~3 cm 范围内最大。空白对照组生物量表现为随距离增大生物量均匀减小,不同异质空间条件下根生物量在 >3 cm 处随距离变化不同,孔隙型空间条件下根生物量在 3~12 cm 范围内均匀分布,在 12~14 cm 处显著减小,圆形裂缝型生物量在距离 9~12 cm 范围内有陡增现象。这是异质空间的具体形状造成的,孔隙型 12~14 cm 处为木板边缘,属于完全阻挡,木板以上的根系不能穿过,故此范围内根系生物量较少,而 9~12 cm 刚好为圆形

裂缝型空间的裂缝处,上层根系均在这个范围内穿到下层土壤,所以此范围内生物量较大。

胡枝子根系生物量也主要集中在距植株中心 0~3 cm 处,但不同生长空间下根生物量在各距离范围内的分布有所差异(图 4B)。空白对照组根生物量主要分布在 0~3 cm 和 12~14 cm,3~12 cm 范围内均匀分布。胡枝子根生物量在孔隙型空间条件下径向分布较均匀,

各距离范围内根生物量相差不大。圆形裂缝型根生物量在距植株中心 0~3 cm 处最大,其他距离均匀分布。条形裂缝型根生物量在各距离范围内分布较为均匀,总体趋势为随距离增大而减小。孔隙+岩石阻挡型根生物量径向分布特征与条形裂缝型相似,但在距离 12~14 cm 处有增大现象。总的来说,胡枝子根系在距离植株中心不同距离下分布较为均匀。

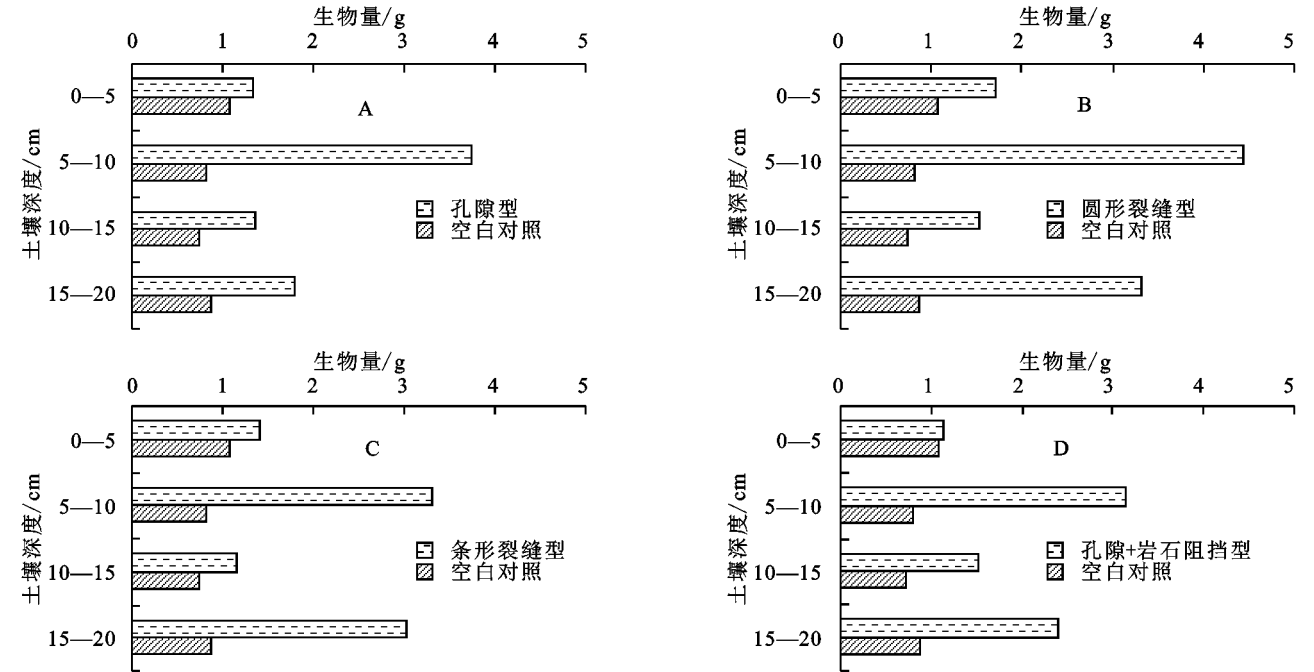


图 3 不同生长空间下胡枝子根生物量垂直分布特征

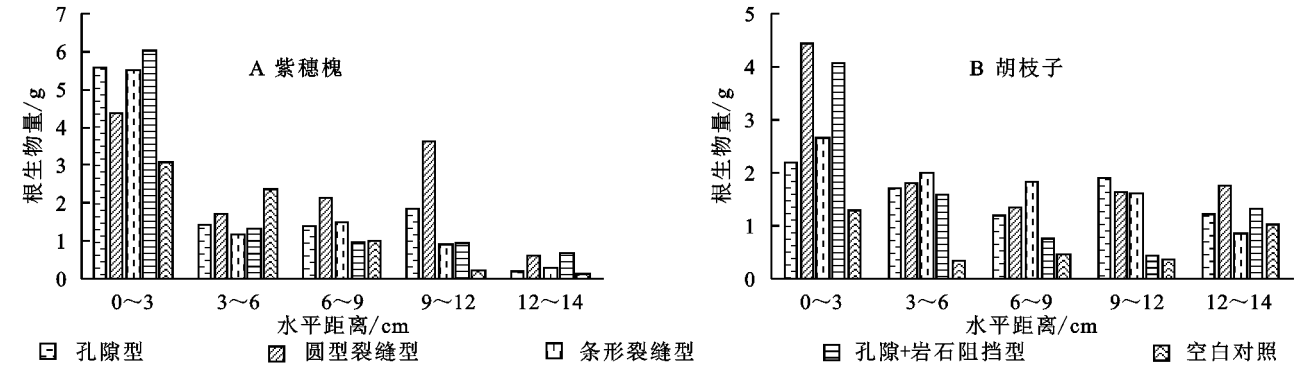


图 4 不同生长空间下紫穗槐和胡枝子根生物量水平分布特征

综上,异质空间的具体形状对根生物量的径向分布影响较大,且不同树种对于不同异质空间的响应程度不同。两种植物根系生物量均集中分布在距植株中心 0~3 cm,究其原因在于距离植株中心处的根系其根径较粗,木质化较严重。值得注意的是,紫穗槐根生物量对于空间的寻求更为强烈,表现为受阻挡处根生物量较少,在不受阻挡处的根生物量较多,而胡枝子根生物量在径向上差异不明显,这与植物生理特性有关,紫穗槐属于主根型植物,对于异质空间的适应策略是去寻找更多的空间,而胡枝子属于散生根型,对于异质空间的适应策略为通过增多须根的方式

去占据有限的空间,所以阻挡木板的具体形状对其影响较小。紫穗槐根系生物量在 0~3 cm 处占比较大也是受根型影响。

3.4 不同空间条件下根系生物量的水平分布雷达图

为更全面地阐述紫穗槐和胡枝子根生物量在不同生长空间条件下的水平分布情况,将根生物量水平分布情况绘制成雷达图,见图 5—6。由图 5 可以明显看出,不同生长空间下紫穗槐根系在水平方向上呈不均匀性和偏向性,根生物量主要集中在某几个区域,孔隙+岩石阻挡型空间条件下尤为显著,根生物量基本分布在 6 区域。从图 6 可以明显看出,不同生

长空间条件下胡枝子根生物量水平分布特征较紫穗槐根系均匀,不同生长空间条件下各区域均有分布,且在圆形裂缝型和条形裂缝型空间条件下在大部分区域均匀分布。

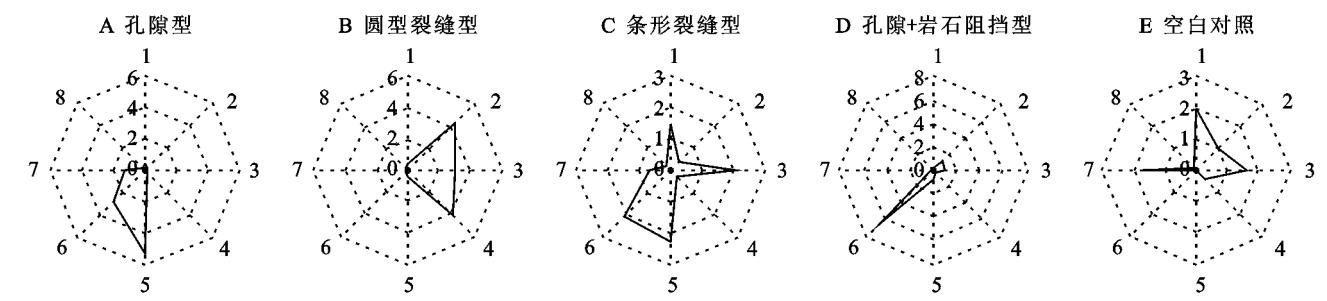


图 5 不同生长空间下紫穗槐根生物量分布雷达图

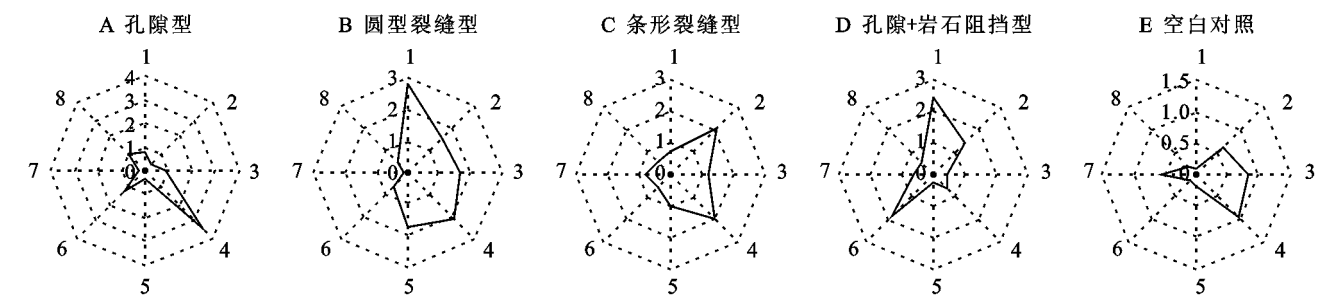


图 6 不同生长空间下胡枝子根生物量分布雷达图

# 4 讨论

植物根系分布特征差异不仅是其生物学特性的差异,更是受到养分、水分、空间等环境因素的影响,为使其自身生长稳定、进一步加强土壤养分、水分的吸收,形成不一样的生长形态。植物通过调节各器官的光合产物分配比例来应对环境胁迫,功能平衡假说认为植物生长受某种资源限制时,其光合产物将优先分配给吸收该资源的器官<sup>[27]</sup>。在养分资源受限时,植物会将更多生物量分配到根系,以增强地下竞争能力<sup>[28]</sup>。黄同丽等<sup>[25]</sup>对喀斯特地区的灌木根系调查结果表明在高度异质的环境下灌木根系为寻找生长空间而呈多方向性和不均匀性。

根系通过改变生物量的分配来适应复杂的生长空间,本研究中在异质生长空间下紫穗槐和胡枝子根系生物量均大于空白对照,两种植物根系在生长空间受到胁迫时均以增大根系生物量的策略来适应环境,这用功能平衡假说解释即为根系的生长空间资源受限时,植物通过增加根生物量的方式来“占据”和“寻求”更多的空间以保证对空间资源的需求。两种植物根系受空间影响程度有所差异,胡枝子根生物量在异质空间下与空白对照的差值比紫穗槐大,即胡枝子根系对异质空间条件更为敏感。且两种植物对不同生长空间的适应策略也不一致,具体表现为两种树种根系在不同异质空间下的生长情况及其根生物量分布特征不同。孔隙型和圆形裂缝型空间对紫穗槐根系影响较大,条形

裂缝型影响最小。圆形裂缝型和孔隙型对胡枝子根长影响较大,孔隙+岩石阻挡型影响最小。

在本研究中,在异质空间条件下紫穗槐和胡枝子根生物量的垂直分布特征相似,均为集中分布在土层深度 5—10 cm 和 15—20 cm 范围内,这与前人对植物根系生物量的研究结果存在差异,即在生长空间不受限制时,根系生物量的垂直分布随土层深度的增加而呈逐渐减少的趋势<sup>[29-30]</sup>。其原因在于根系在生长空间受限时,通过增加其根系生物量的分配方式来汲取水分和养分,以维持正常生长。值得注意的是,紫穗槐空白对照组根系生物量在土层深度 10—15 cm 处有增大的现象,其原因为空白组紫穗槐主根在 10—15 cm 处分化为一二级侧根,主根和一二级侧根的木质化较严重,故其根生物量较大。异质空间的具体类型对根系生物量的垂直分布特征影响不显著,这可能是受到异质空间面积影响。

紫穗槐和胡枝子根生物量的水平分布特征受异质空间条件类型影响,且两种灌木根系对不同异质空间的适应策略不同。紫穗槐根系生物量在孔隙型空间条件下距离植株中心 3~12 cm 范围内均匀分布,在距离 12~14 cm 处显著减小,圆形裂缝型生物量在距离 9~12 cm 范围内有陡增现象。而胡枝子根系在不同生长空间条件下水平分布均较为均匀。说明紫穗槐在生长空间受限时,其适应策略是去寻找更多的空间,而胡枝子对于异质空间的适应策略则为通过增多须根的方式去占据有限的空间,所以阻挡木板的具体形状对其

影响较小,两种树种在水平方向上对异质空间的不同策略与其植物根系特性有关,紫穗槐属于主直根型,主要策略为“寻找”,胡枝子为散生根型,主要策略为“占据”。罗维成等<sup>[31]</sup>的研究也表明骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)根系更愿意往空间大的地方生长,这与本研究紫穗槐根系对异质空间的适应策略一致。

## 5 结论

(1) 紫穗槐和胡枝子根系在不同空间条件下生长有差异,异质空间条件根系各项生长指标均大于均质空间条件,两种树种受空间的影响程度有所差异,胡枝子根系受空间条件影响更大。不同空间条件对根系生长的影响不同,紫穗槐和胡枝子根系均在孔隙型和圆形裂缝型两种空间条件下最为发达。

(2) 紫穗槐和胡枝子根生物量分布特征受异质空间影响。在异质空间下两种树种根生物量的垂直分布特征为均集中分布在土层深度 5—10 cm 和 15—20 cm,有限空间条件有利于刺激促进根系生长,异质空间形状对根生物量垂直分布影响不大。紫穗槐和胡枝子根系生物量水平方向上均在距离植株中心 0~3 cm 范围内最大,紫穗槐根系生物量的水平分布受异质空间具体形状影响较大,孔隙型空间和圆形裂缝型空间对其水平分布影响较为显著。

(3) 不同树种对异质空间条件的适应策略不同,紫穗槐根系对异质空间的适应策略为寻找更多空间,而胡枝子根系对异质空间的适应策略为占据有限空间。

### 参考文献:

- [1] 任杰,赵成章,赵夏纬,等.金塔绿洲荒漠交错带沙蓬根系分形特征[J].生态学报,2020,40(15):5298-5305.
- [2] 付江涛,李光莹,虎啸天,等.植物固土护坡效应的研究现状及发展趋势[J].工程地质学报,2014,22(6):1135-1146.
- [3] Stokes A, Douglas G B, Fourcaud T, et al. Ecological mitigation of hillslope instability: Ten key issues facing researchers and practitioners[J]. Plant and Soil, 2014, 377(1/2):1-23.
- [4] Hu X S, Brierley G, Zhu H L, et al. An exploratory analysis of vegetation strategies to reduce shallow landslide activity on loess hillslopes, Northeast Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10(4):668-686.
- [5] 李秉钧,颜耀,吴文景,等.环境因子对植物根系及其构型的影响研究进展[J].亚热带水土保持,2019,31(3):41-45.
- [6] Li J, He B, Chen Y, et al. Root distribution features of typical herb plants for slope protection and their effects on soil shear strength [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013,29(10):144-152.
- [7] 刘亚斌,胡夏嵩,余冬梅,等.西宁盆地黄土区草本和灌木组合根系分布特征及其增强土体抗剪强度效应[J].工程地质学报,2020,28(3):471-481.
- [8] 颜正平.植物根系分布生态学理论与体系模式之研究[J].水土保持研究,2005,12(5):5-10,26.
- [9] 刘秀萍,陈丽华,宋维峰.林木根系与黄土复合体的抗剪强度试验研究[J].北京林业大学学报,2006,28(5):67-72.
- [10] 常婧美,王桂尧,胡圣辉,等.灌木根系几何特性对拉拔力影响的试验研究[J].水土保持通报,2018,38(6):67-73.
- [11] 王继伟,赵成章,赵连春,等.内陆盐沼芦苇根系形态及生物量分配对土壤盐分因子的响应[J].生态学报,2018,38(13):4843-4851.
- [12] 孙百生,钱金平,赵欢蕊.西北典型荒漠植物红砂生物量及根系形态特征对降水格局的响应[J].生态环境学报,2018,27(11):1993-1999.
- [13] 严青青,张巨松,徐海江,等.盐碱胁迫对海岛棉幼苗生物量分配和根系形态的影响[J].生态学报,2019,39(20):7632-7640.
- [14] 王树凤,施翔,孙海菁,等.镉胁迫下杞柳对金属元素的吸收及其根系形态构型特征[J].生态学报,2013,33(19):6065-6073.
- [15] 李金航,徐程扬,朱济友,等.黄栌幼苗在持续干旱胁迫环境中的表型适应对策[J].西北林学院学报,2019,34(2):28-34.
- [16] 张玲,王树凤,陈益泰,等.3种枫香的根系构型及功能特征对干旱的响应[J].土壤,2013,45(6):1119-1126.
- [17] 高成杰,崔凯,张春华,等.干旱胁迫对不同种源云南松幼苗生物量与根系形态的影响[J].西北林学院学报,2020,35(3):9-16.
- [18] Markesteijn L, Poorter L. Seedling root morphology and biomass allocation of 62 tropical tree species in relation to drought- and shade-tolerance[J]. Journal of Ecology, 2009,97(2):311-325.
- [19] 韦如萍,胡德活,陈金慧,等.低磷胁迫下杉木无性系根系形态及养分利用响应研究[J].南京林业大学学报:自然科学版,2018,42(2):1-8.
- [20] 刘伟强,钟小玉,薛文涛,等.重金属污染对根系的影响[J].科技视界,2014,92(5):282-283.
- [21] 李希铭,宋桂龙.镉胁迫对紫花苜蓿镉吸收特征及根系形态影响[J].草业学报,2016,25(2):178-186.
- [22] He J Y, Zhu C, Ren Y F, et al. Root morphology and cadmium uptake kinetics of the cadmium-sensitive rice mutant[J]. Biologia Plantarum, 2007,51(4):791-794.
- [23] 李金波,李诗刚,宋桂龙,等.砷胁迫对黑麦草根根系形态及养分吸收的影响[J].草业科学,2018,35(6):1385-1392.



- study from Switzerland[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 101(2): 149-156.
- [7] 崔家兴, 顾江, 孙建伟, 等. 湖北省三生空间格局演化特征分析[J]. *中国土地科学*, 2018, 32(8): 67-73.
- [8] 黄金川, 林浩曦, 漆潇潇. 面向国土空间优化的三生空间研究进展[J]. *地理科学进展*, 2017, 36(3): 378-391.
- [9] 江曼琦, 刘勇. “三生”空间内涵与空间范围的辨析[J]. *城市发展研究*, 2020, 27(4): 43-48.
- [10] 金贵, 王占岐, 姚小微, 等. 国土空间分区的概念与方法探讨[J]. *中国土地科学*, 2017, 27(5): 48-53.
- [11] 李广东, 方创琳. 城市生态—生产—生活空间功能定量识别与分析[J]. *地理学报*, 2016, 71(1): 49-65.
- [12] 周浩, 金平, 夏卫生. 省级国土空间“三生”功能评价及其分区研究: 以河南省为例[J]. *中国土地科学*, 2020, 34(8): 10-17.
- [13] 刘继来, 刘彦随, 李裕瑞. 中国“三生空间”分类评价与时空格局分析[J]. *地理学报*, 2017, 72(7): 1290-1304.
- [14] 李晓青, 刘旺彤, 谢亚文, 等. 多规合一背景下村域三生空间划定与实证研究[J]. *经济地理*, 2019, 39(10): 146-152.
- [15] 金贵, 邓祥征, 张倩, 等. 武汉城市圈国土空间综合功能分区[J]. *地理研究*, 2017, 36(3): 541-552.
- [16] 刘鹏, 陈荣蓉, 杨朝现, 等. 基于“三生空间”协调的农村居民点布局优化研究[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(2): 283-288.
- [17] 高慧慧, 王征强, 王涛, 等. 三生空间协调度的中泉镇农村居民点布局优化[J]. *测绘科学*, 2021, 46(3): 176-182.
- [18] 席建超, 王首琨, 张瑞英. 旅游乡村聚落“生产—生活—生态”空间重构与优化: 河北野三坡旅游区苟各庄村的案例实证[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(3): 425-435.
- [19] 李伟松, 李江风, 姚尧, 等. 三生空间重构视角下的镇域农村居民点整治分区: 以湖北省荆门市沙洋县官垌镇为例[J]. *地域研究与开发*, 2016, 35(1): 139-143.
- [20] 崔树强, 朱佩娟, 周国华, 等. “三生”视角下的城市空间功能变化及调控路径: 以长沙市为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(8): 1733-1745.
- [21] 王强, 陈田田, 李爱迪, 等. “三生”视角下的国土空间利用质量评价: 以攀西地区为例[J]. *山地学报*, 2020, 38(2): 290-302.
- [22] 张军涛, 翟婧彤. 中国“三生空间”耦合协调度测度[J]. *城市问题*, 2019(11): 38-44.
- [23] 马利邦, 田亚亚, 郭晓东, 等. 基于格网的河西绿洲乡村聚落时空演变及其与水土资源的耦合关系[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(5): 775-787.
- [24] 孙建伟, 孔雪松, 田雅丝, 等. 基于空间组合特征的农村居民点重构方向识别[J]. *地理科学*, 2017, 37(5): 748-755.
- [25] 傅俐, 王勇, 曾彪, 等. 基于改进两步移动搜索法的北碚区医疗设施空间可达性分析[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(10): 1565-1575.
- [26] 邓丽, 邵景安, 郭跃, 等. 基于改进的两步移动搜索法的山区医疗服务空间可达性: 以重庆市石柱县为例[J]. *地理科学进展*, 2015, 34(6): 716-725.
- [27] 孔雪松, 蒋献佳, 刘叶, 等. 国土空间开发强度与资源环境承载时空耦合及规划启示: 以江苏省为例[J]. *中国土地科学*, 2020, 34(6): 10-17.
- [28] 王成, 唐宁. 重庆市乡村三生空间功能耦合协调的时空特征与格局演化[J]. *地理研究*, 2018, 37(6): 1100-1114.

(上接第 336 页)

- [24] Dai Q, Peng X, Zhao L, et al. Effects of underground pore fissures on soil erosion and sediment yield on karst slopes[J]. *Land Degradation and Development*, 2017, 28(7): 1922-1932.
- [25] 黄同丽, 唐丽霞, 陈龙, 等. 喀斯特区 3 种灌木根系构型及其生态适应策略[J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(1): 89-94.
- [26] 彭旭东. 喀斯特高原坡地浅层孔(裂)隙水土漏失过程及特征研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
- [27] 平晓燕, 周广胜, 孙敬松, 等. 基于功能平衡假说的玉米光合产物分配动态模拟[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(1): 129-135.
- [28] Wijesinghe D K, John E A, Hutchings M J. Does pattern of soil resource heterogeneity determine plant community structure: An experimental investigation[J]. *Journal of Ecology*, 2005, 93(1): 99-112.
- [29] 韩烈保, 王琼, 王晓蓓, 等. 不同立地条件下荆条根系分布规律[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2009, 17(2): 231-237.
- [30] 单立山, 张希明, 花永辉, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地梭梭幼苗根系分布特征对不同灌溉量的响应[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(5): 769-776.
- [31] 罗维成, 曾凡江, 刘波, 等. 疏叶骆驼刺根系对土壤异质性和种间竞争的响应[J]. *植物生态学报*, 2012, 36(10): 1015-1023.