

沙地固定程度对红砂灌丛叶-根功能性状权衡关系的影响

杨倩

(河南农业职业学院 园林工程学院, 河南 郑州 451450)

摘要: [目的] 研究沙地固定程度对红砂(*Reaumuria songarica*)灌丛叶-根功能性状的影响,为探究干旱区植物适应策略,保护植物多样性提供更多理论依据与数据支持。[方法] 选择鄂尔多斯高原不同固定程度沙地上红砂灌丛作为研究对象,采用方差分析、Pearson相关性等分析方法,探究叶片与根系的功能性状特征,解析其养分含量规律。[结果] ①流动沙地的植物叶片相较于固定-半固定沙地表现为低肉质化程度(2.08)、低叶含水量(51.68%)、低叶饱和含水量(57.47%)、低叶C(34.9 g/kg)和低叶N(2.32 g/kg)的保守型策略,而根系则表现为更广的根系分布范围和高根N含量的获取型策略。②相较于半固定沙地,流动沙地多数指标相对作用强度值(RII)更远离零值。③多数叶片与根系的功能性状之间存在显著相关性($p < 0.05$)。[结论] 红砂灌丛在适应胁迫环境时表现出地上地下性状解耦现象,并且随着环境压力的增加,植物性状变化更加明显。

关键词: 植物功能性状; 叶片; 根系; 荒漠草原过渡带

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)01-0048-09

中图分类号: S812

文献参数: 杨倩. 沙地固定程度对红砂灌丛叶-根功能性状权衡关系的影响[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 48-56. Yang Qian. Impact of sandy land fixation degrees on trade-off relationship between leaf-root functional traits in *Reaumuria songarica* shrubs [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 48-56.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.034

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.034

Impact of sandy land fixation degrees on trade-off relationship between leaf-root functional traits in *Reaumuria songarica* shrubs

Yang Qian

(College of Landscape Engineering, Henan Vocational College of Agriculture, Zhengzhou, Henan 451450, China)

Abstract: [Objective] The impact of sandy land fixation degrees on leaf-root functional traits of *Reaumuria songarica* shrubs was investigated in order to provide more theoretical foundations and data support for exploring plant adaptation strategies and conserving plant diversity in arid regions. [Methods] *R. songarica* shrubs on sandy lands with different fixation degrees in the Ordos Plateau were selected as the research object. Methods such as variance analysis and Pearson correlation were employed to investigate the functional traits of leaves and roots and analyze their nutrient content. [Results] ① Compared to those in fixed and semi-fixed sandy lands, plant leaves in mobile sandy lands exhibited a conservative strategy characterized by low succulence (2.08), low leaf water content (51.68%), low saturated leaf water content (57.47%), low leaf C (34.9 g/kg), and low leaf N (2.32 g/kg), while the roots showed an acquisitive strategy with a wider root distribution range and higher root N content. ② Compared to semi-fixed sandy lands, the relative interaction intensity (RII) values of most indicators in mobile sandy lands were further from zero. ③ Most leaf and root functional traits were significantly correlated ($p < 0.05$). [Conclusion] The *R. songarica* shrubs exhibit a decoupling phenomenon between above-ground and below-

收稿日期: 2025-06-07

修回日期: 2025-10-14

采用日期: 2025-10-15

资助项目: 2024年度河南省高等教育教学改革研究与实践项目“产教融合视域下高职院校专业群建设研究与实践: 以现代农业技术专业群为例”(2024SJGLX0740); 河南省高等教育教学改革研究与实践项目“基于产学研用协同创新的花卉生产与花艺专业人才培养模式研究与实践”(2021SJGLX700)

第一作者: 杨倩(1985—), 女(汉族), 河南省郑州市人, 硕士, 副教授, 主要从事风景园林规划设计方面的教学和研究工作。Email: m19914831201@163.com。

ground traits when adapting to stressful environments, and that plant trait variations become more pronounced with increasing environmental pressure.

Keywords: plant functional traits; leaves; roots; transition zone between desert and grassland

植物功能性状是植物在长期生存中对环境变化的响应与反馈^[1-2],植物功能性状的变化差异体现了植物对于环境的适应策略以及对资源的分配利用模式^[3]。植物通过功能性状的变异,不仅展现了其对生境胁迫与资源限制的差异化适应策略,也反映了其在资源获取与利用过程中的策略性权衡模式。其中,种内功能性状的变异程度作为衡量植物个体响应环境异质性与表型可塑性强度的关键指标,为解析植物适应机制提供了重要依据^[4]。相关研究^[5]表明,种内变异对植物的个体适应性、种间关系、群落动态、环境响应及气候变化缓解效应等方面均表现出重要的生态学价值。研究植物功能性状,有助于了解荒漠灌丛在胁迫环境中的适应机制,进而促进生物多样性的有效保护。

植物叶片在生长发育过程中,其形态和功能性状的形成受到遗传因素、生理代谢过程以及环境因子的多重调控^[6]。叶片功能性状的协同变异或权衡关系实质上反映了植物在资源获取与保护策略之间的适应性分化^[7]。具体而言,植物通过调整叶片性状组合来优化光合作用效率、养分利用以及抗逆能力,从而形成不同的生态适应策略^[8]。基于这一现象,叶经济谱理论(leaf economic spectrum, LES)被提出。根据相关研究,资源获取型叶片常表现出较高的比叶面积(SLA)与叶氮含量^[9],相比之下,保守型叶片则多具备较高的叶组织密度(LTD)及较低的SLA等特征^[10]。根系作为植物从土壤中获取水分与养分的关键结构,其吸收效率对地上部分的生长发育乃至整株植物的生存状况具有决定性影响^[11]。针对干旱区荒漠植物的研究发现,典型荒漠灌丛白刺(*Nitraria tangutorum*)和红砂(*Reaumuria songarica*)的根系均呈现近似叉状分枝的根系结构,通过扩展其根系覆盖范围以增加对土壤养分空间的占据能力,从而增强了其对贫瘠与胁迫生境的适应能力^[12]。在半干旱黄土丘陵沟壑区的胁迫生境中,红砂灌丛则会通过形成分支结构更为简化的根系特征来适应其贫瘠的生境,即在满足养分利用范围的基础上,有效降低根系内部的竞争压力并提高资源利用效率,从而增强植物对胁迫生境的适应能力^[13]。这一结果表明,植物根系不仅能够敏锐响应环境变化,同时也具备较强的适应与调整能力。在不同环境压力下,根系为适应环境将导致功能性状产生较大差异^[14]。

目前很多研究发现了植物叶片和根系在胁迫环境下的多种适应模式,并且植物地上地下器官可能存在一种尚不明晰的权衡关系。另一方面,有研究发现沿着海岸压力梯度,植物地上地下性状呈现出解耦适应策略^[15]。那么,这种植物地上、地下器官的解耦关系是否广泛存在于其他胁迫环境中,目前仍不明晰。为了探究这一问题,本研究以鄂尔多斯高原不同固定程度沙地来表示环境压力梯度,选择该区域的主要优势种红砂作为研究对象,分析其叶片和根系的功能性状及养分含量特征,探讨荒漠灌丛在面对干旱区典型土地退化情景时的适应策略以及对地上地下功能性状的权衡模式,为干旱区荒漠植物多样性保护提供更多理论依据以及数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为白音恩格尔自然保护区(107°02′—107°19′E, 40°08′—40°23′N),该区地处内蒙古自治区的鄂尔多斯高原。其气候类型为典型的大陆性季风气候,常年干旱且少雨,年均日照时长3 129.5 h,年均水分蒸发量2 278.7~3 274.7 mm,年均气温4.7~7.0℃,年降水量144~340 mm。研究区土壤以水分少、养分贫瘠的灰漠土和风沙土为主。研究区植被生存主要依靠天然降水,主要植被包括红砂、四合木(*Tetraena mongolica*)、沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)、霸王(*Zygophyllum xanthoxylum*)等珍贵的孑遗植物种,同时也伴生有少量的沙蒿(*Artemisia desertorum*)、猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)。

1.2 试验设计

于2024年7月,本研究依据植被覆盖度的差异,将研究区生境划分为3种类型:固定沙丘(FD,植被覆盖度 $\geq 30\%$)、半固定沙丘(SFD,植被覆盖度 $10\% \sim 30\%$)和流动沙丘(MD,植被覆盖度 $< 10\%$),每种生境类型分别设置3个小样方(20 m \times 20 m)。研究区不同生境类型间气候条件和土壤类型相同,地形均为平地,均无人为因素干扰。本研究在最大程度上降低了除植被覆盖度以外的其他因素干扰。

1.3 植物功能性状测定

于各小样方中,随机选定3株生长健壮,并能代表该样方特征的红砂灌丛作为观测样本,每株灌丛

采集植物叶片 15 片,装入密封袋并迅速放入低温冷藏箱内保存,以供后续带回实验室进行分析。关于红砂灌丛的根系记录,沿灌丛地上主干对灌丛的整株根系进行挖掘,直至地下根系全部暴露后停止挖掘工作。由于挖掘过程中对根径 < 3 mm 的细根损伤较大,很难进行有效调查与记录,因此本研究对根径 > 3 mm 的根系进行记录^[16]。分别记录红砂灌丛根系垂直向下和水平向外的最大延伸距离,以此作为红砂灌丛的根系深度和根系水平范围。根据 Berntson^[17] 和 Strahler^[18] 的根系排序法,分级由根系外围向内部进行。最外缘的细根被界定为 1 级根,两个 1 级根的汇合点形成 2 级根,而两个 2 级根进一步汇合则形成 3 级根,依此类推。同一根出现定义争议(如在不同观测下可同时被定义为第 1 级或第 2 级),则取较高根级(第 2 级)的作为最终根级。称取叶片的叶鲜重(FW)后使用 Win-RhIZO 软件扫描植物形态特征,并利用 Image J 软件对叶面积(LA, cm²)进行计算。将已扫描的叶片放入水中浸泡至少 12 h,等待叶片充分吸水且不继续增重,取出叶片,擦去表面水分后称取饱和鲜重(SFW, g)。利用游标卡尺测量叶片厚度计算叶体积(LV, cm³)。将叶片放入烘箱内进行杀青(105 °C, 30 min),杀青后烘干至恒重(60 °C, 24 h),烘干后称量叶干重(DW, g)。将红砂灌丛的叶片和根系碾碎后过筛,用以植物养分指标参数测量。叶片和根系的全碳(C)、全氮(N)含量分别采用重铬酸钾氧化加热法与凯氏定氮法测定;叶片全磷(P)含量采用钒钼黄比色法测定,并计算生态学计量比。

(1) 植物叶功能性状相关计算公式如下。

$$\text{肉质化程度(DOF)} = \frac{\text{FW}}{\text{DW}} \quad (1)$$

式中:DOF 为肉质化程度;FW 为叶鲜重(g);DW 为叶干重(g)。

$$\text{叶含水量(TWC)} = \frac{\text{FW} - \text{DW}}{\text{SFW}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:TWC 为叶含水量(%);SFW 为叶饱和鲜重(g);FW 为叶鲜重(g);DW 为叶干重(g)。

$$\text{叶相对含水量(RWC)} = \frac{\text{FW} - \text{DW}}{\text{SFW} - \text{DW}} \times 100\% \quad (3)$$

式中:RWC 为叶相对含水量(%).

$$\text{叶饱和含水量(SWC)} = \frac{\text{SFW} - \text{DW}}{\text{SFW}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:SWC 为叶饱和含水量(%).

$$\text{叶干物质重量(LDMC)} = \frac{\text{DW}}{\text{SFW}} \times 100\% \quad (5)$$

式中:LDMC 为叶干物质重量(mg/g)。

$$\text{比叶面积(SLA)} = \frac{\text{LA}}{\text{DW}} \quad (6)$$

式中:SLA 为比叶面积(cm²/g);LA 为叶面积。

$$\text{组织密度(TD)} = \frac{\text{DW}}{\text{LV}} \quad (7)$$

式中:TD 为组织密度(g/cm³);LV 为叶体积(cm³)。

根系总分支率(RB)。以根系等级 i 为横坐标,其对应数量的对数($\log_{10}N_i$)为纵坐标进行线性回归,所得直线斜率的逆对数值即定义为 RB。而相邻两级根系分支数之比(R_i/R_{i+1})则定义为逐步分支率。

1.4 相对作用强度计算

利用相对作用强度(relative interaction intensity, RII)^[19]表示不同沙地固定程度对植物功能性状产生的影响。计算公式为

$$\text{RII} = (X_n - X_i) / (X_n + X_i) \quad (8)$$

式中: X_n 分别代表半固定沙地、流动沙地的植物功能性状; X_i 代表固定沙地的植物功能性状。当 RII > 0 时,表明沙地退化对该指标造成正面影响,即该指标出现增加;当 RII < 0 时则相反。RII 值距离 0 值越远,表明这种影响效果越明显。

1.5 数据分析

植物功能性状参数利用 Excel 2019 进行统计与计算,采用 DPS 软件中的单因素方差分析(one-way analysis of variance)功能对数据显著性进行检测,显著水平为 0.05。利用 Pearson 相关性分析检测各植物功能性状间的相关关系。使用 Origin 2021 进行图像绘制。

2 结果与分析

2.1 不同类型沙地红砂灌丛叶片功能性状差异

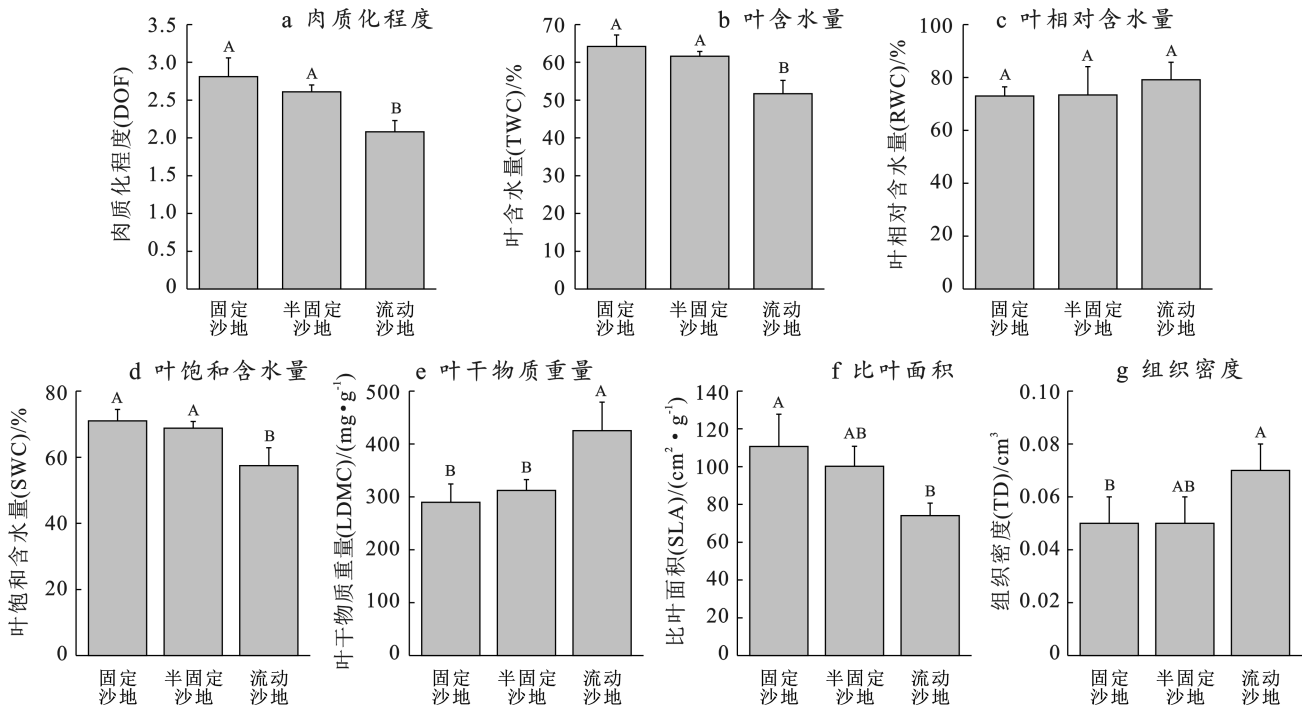
本试验发现,不同类型沙地的红砂灌丛叶片功能性状存在显著差异($p < 0.05$),特别是流动沙地,较固定、半固定沙地差异较大。

由图 1 可以看出,流动沙地的红砂叶肉质化程度(2.08)、叶含水量(51.68%)、叶饱和含水量(57.47%)显著低于固定沙地和半固定沙地($p < 0.05$);叶干物质重量(425.34 mg/g)显著高于固定沙地和半固定沙地($p < 0.05$);而组织密度(0.07 cm³)、叶比面积(74.13 cm²/g)较固定沙地存在显著差异($p < 0.05$),与半固定沙地无显著差异($p > 0.05$)。

其中,3 种不同类型沙地的红砂灌丛叶相对含水量并未表现出显著差异($p > 0.05$)。由图 2 可知,除

流动沙地的叶 C(34.9 g/kg)和叶 N(2.32 g/kg)显著
低于固定沙地和半固定沙地($p < 0.05$);C/N(15.1)

显著高于固定沙地和半固定沙地($p < 0.05$)外,其他
参数并未表现出显著的差异性($p > 0.05$)。



注:数值为平均值±标准差;不同字母标注 $p < 0.05$ 水平下不同沙地类型间的显著性差异。下同。

图 1 不同类型沙地红砂灌丛叶片的功能性状特征

Fig.1 Characteristics of leaf functional traits in *R. songarica* shrubs under different sandy land types

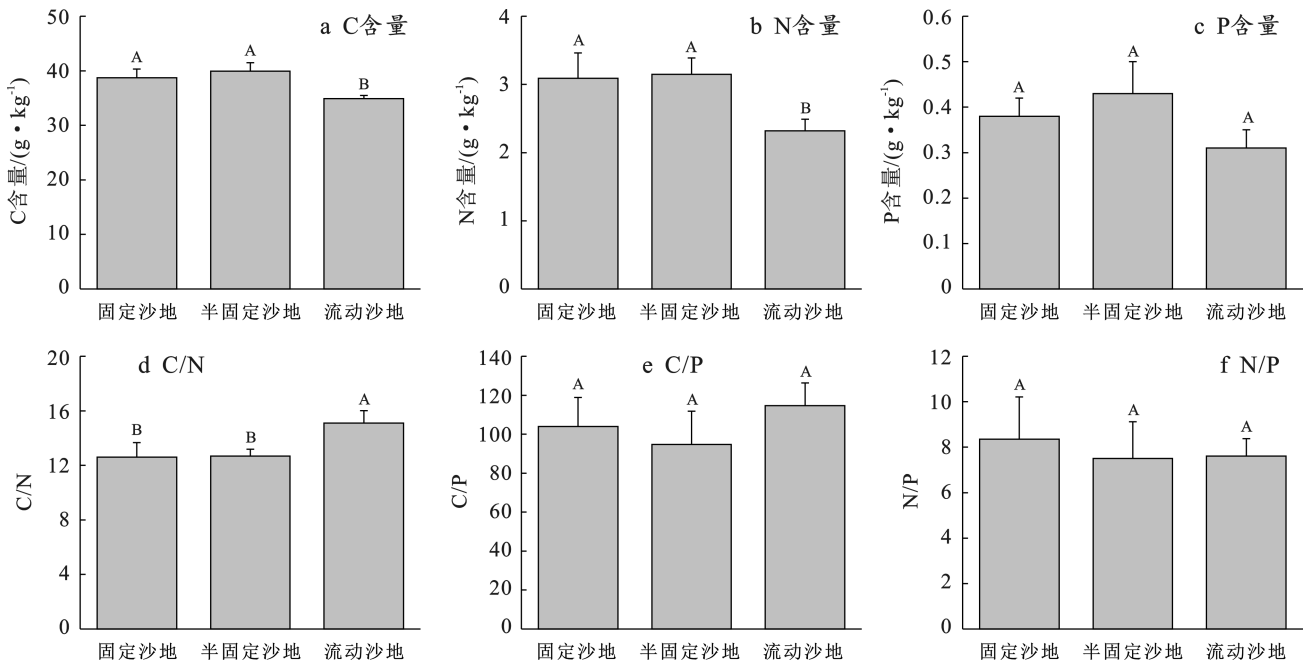


图 2 不同类型沙地红砂灌丛叶片的养分含量及其化学计量比特征

Fig.2 Characteristics of leaf nutrient contents and their stoichiometric ratios in *R. songarica* shrubs under different sandy land types

2.2 不同类型沙地红砂灌丛细根功能性状差异

由图 3 可知,关于不同类型沙地红砂灌丛细根功
能性状,本研究发现灌丛的分支率,包括逐级分支率

以及总分支率,均没有出现显著差异($p > 0.05$)。而
流动沙地的根系分布较固定沙地、半固定沙地更广,
其中根深(78.4 cm)和水平根长/根深(1.66)显著高

于固定沙地和半固定沙地 ($p < 0.05$), 而水平根长 (129.83 cm) 显著高于固定沙地 ($p < 0.05$)。图 4 表明, 3 种不同类型沙地的红砂根系养分含量及其化

学计量比, 除流动沙地的根 N (1.58 g/kg) 显著低于固定沙地 ($p < 0.05$) 外, 其他并未表现出显著的差异性 ($p > 0.05$)。

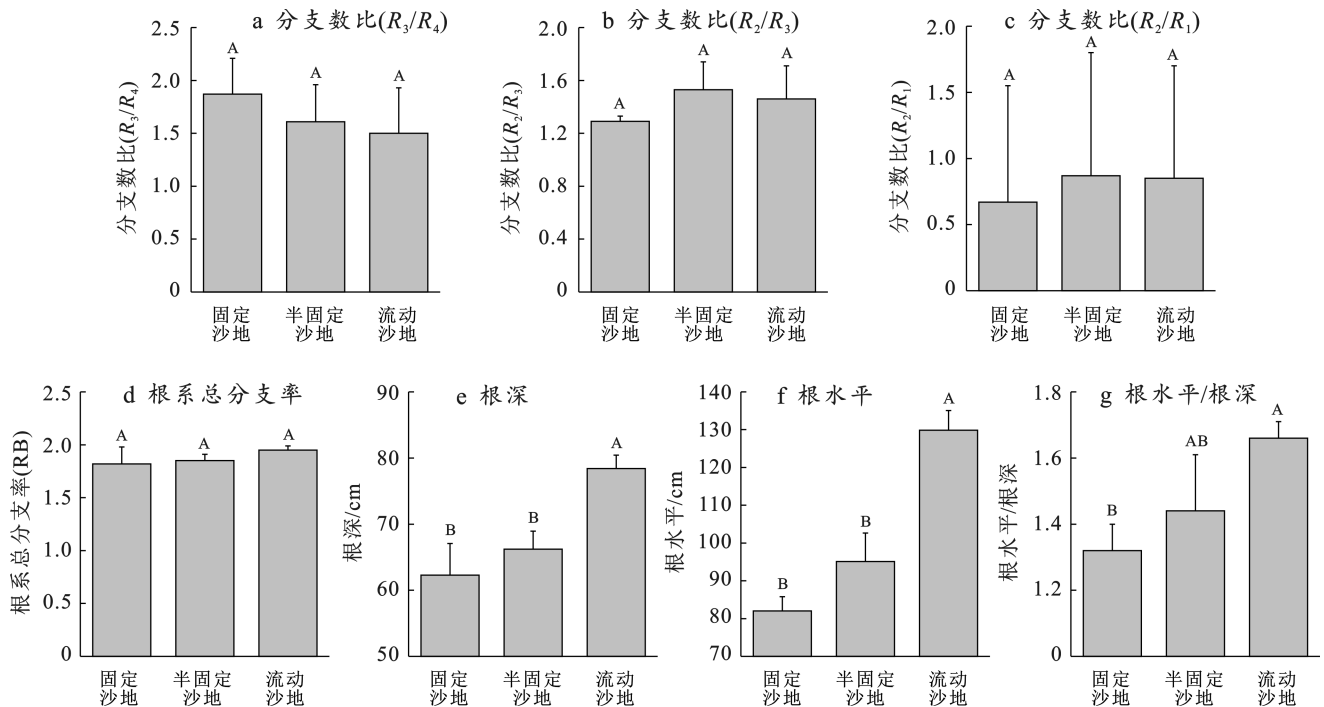


图 3 不同类型沙地红砂灌丛根系功能性状特征

Fig.3 Characteristics of root functional traits in *R. songarica* shrubs under different sandy land types

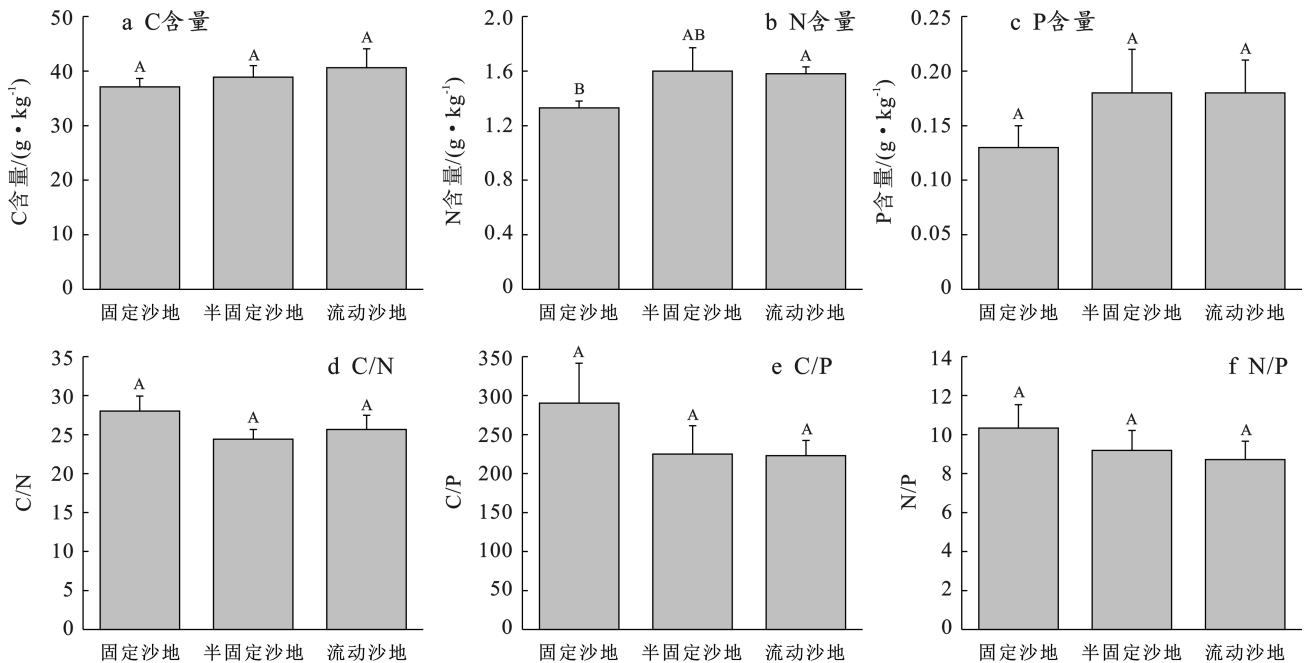


图 4 不同类型沙地红砂灌丛根系养分含量及其化学计量比特征

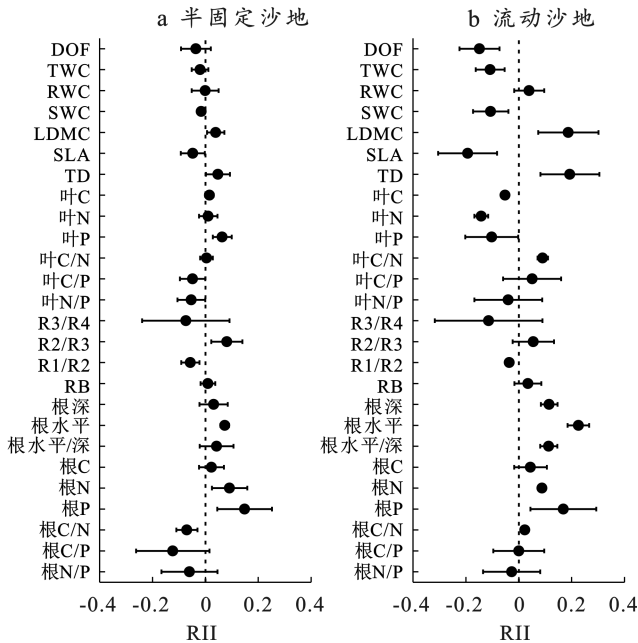
Fig.4 Characteristics of root nutrient contents and their stoichiometric ratios in *R. songarica* shrubs under different sandy land types

2.3 沙地退化程度对红砂灌丛植物功能性状的影响

利用 RII 来表示沙地退化程度对红砂灌丛植物功能性状的影响程度 (图 5), 当图中散点距离参考线

0 值越远表示对植物功能性状的影响程度越大。可以看出流动沙地的散点距离 0 值线更远, 其中除叶 P RII (-0.10), 叶 C/P RII (0.05), 叶 N/P RII (-0.04),

R_3/R_4 RII (-0.11), R_2/R_3 RII (0.06), R_1/R_2 RII (-0.04), 总分支率 RII(0.03)没有明显区别于半固定沙地 RII, 其他指标 RII 均显著区别于半固定沙地。



注: 当 RII>0 时, 表明沙地退化对该指标造成了正面影响, 即该指标出现了增加; 当 RII<0 时则相反。RII 值距离 0 值越远, 表明这种影响效果越明显。线段为标准差, 当线段与 0 值线无相交时, 表明出现显著差异。

图 5 不同沙地退化程度红砂灌丛植物功能性状 RII
Fig.5 RII of plant functional traits in *R. songarica* shrubs under different degrees of sandy land degradation

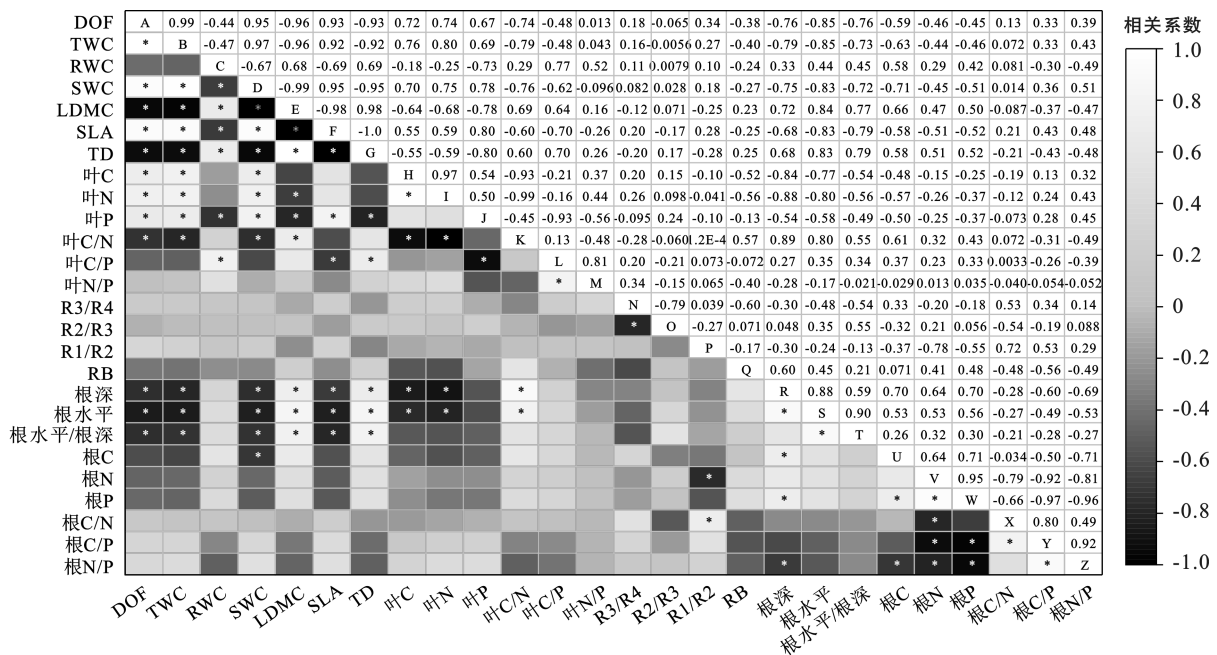
2.4 红砂灌丛植物功能性状的相关性

图 6 表明红砂灌丛叶片和根系功能性状间的相关性, 整体的相关系数 R^2 在 0.01~0.99。红砂灌丛的大多数叶功能性状参数以及叶片的养分 C, N, P 含量间表现为显著相关 ($p<0.05$), 而化学计量比与上述参数之间并没有表现出很好的相关性 ($p>0.05$)。根系的根深、根水平以及根水平\根深与叶功能性状参数以及叶片的养分 C, N, P 含量间表现为显著相关 ($p<0.05$), 而根系的逐级分支率、总分支率、根系的养分特征及其化学计量比与叶片功能性状参数间并没有表现出显著相关性 ($p>0.05$)。根系的养分特征及其化学计量比之间表现出显著相关性 ($p<0.05$)。

3 讨论

3.1 荒漠草原过渡带退化程度对红砂灌丛植物功能性状的影响

叶片的功能性状反映植物在面临胁迫环境下的适应与变化^[20]。根据叶片经济学谱(leaf economics spectrum)概念^[3], 即在资源匮乏的胁迫环境中, 植物倾向于采取“保守型”策略, 表现为高 LDMC 和低 SLA, 通过增加 LDMC 来提高植物保水性, 并且抑制细胞分裂, 进而降低比叶面积以减少蒸腾作用, 最终增强抗逆性和延长叶片寿命^[21]; 而在资源充裕的环境中, 则倾向于采取“获取型”策略, 植物因为可以吸收足够的水肥资源, 促进细胞分裂, 使 SLA 增大, 利用高 SLA 最大程度提高植物的光资源获取能力^[22-23]。



注: *表示在 $p<0.05$ 水平显著相关。

图 6 红砂灌丛植物功能性状的相关性

Fig.6 Correlation of plant functional traits in *R. songarica* shrubs

这与本研究中发现的结果一致。流动沙地的红砂灌丛叶片在肉质化程度、叶含水量、组织密度以及叶饱和含水量、叶干物质重量、叶比面积方面和固定沙地和半固定沙地存在显著差异。这标志着其在干旱、贫瘠的胁迫环境下采取了典型的“保守型”策略,旨在减少水分流失、增强机械抗性并延长投资回报时间。反之,固定与半固定沙地的植株叶片性状则更偏向于“获取型”策略,这与该生境下相对充裕的资源条件相符。C是构成植物骨架的基本元素,植物叶片中C含量的高低反映出植物对C的利用效率^[24],而植物叶片中的氮含量与光合速率有密切关系。本研究中发现固定沙地和半固定沙地的C含量、N含量以及C/N显著高于流动沙地(图2),也说明由于固定、半固定沙地的整体环境更适宜植物生存,因此植物可将资源更多地投入到叶片中去,提高叶的资源获取效率^[22]。

不同的养分和水分的条件下,根系形态也会产生不同变化^[25]。与叶片类似,根系性状也表现出类似的权衡谱系,即根系经济学谱(root economics spectrum)。该谱系一端是“保守型”根系,通常分支密集、寿命长、菌根共生率高;另一端是“获取型”根系,以快速延伸、广泛拓展但分支简单为特征^[26]。另外,许多研究^[27]发现植物分支率与环境胁迫程度呈负相关;单立山等^[13]在研究中指出,干旱胁迫条件下,红砂会不断简化根系结构、收缩分布范围,从而在资源短缺的胁迫环境中增强其适应性。因此在资源受限的胁迫环境中,分支简单则更容易生存适应^[28]。但这与本研究的结论相反,本研究发现不同沙地类型下红砂灌丛的分支率并没有表现出显著差异,但是流动沙地的根系根深更深、根水平也分布更远,即根系整体分布范围更广。这可能是由于植物根系采取了拓展策略而非分支策略以适应胁迫环境^[29-30]。已有研究表明,荒漠植物为应对环境胁迫,往往通过扩大根系分布范围主动获取资源^[27],具体表现为增加根深^[29]或扩展水平根范围^[30]。本研究中,根系在垂直和水平方向上均呈现显著拓展,与前人研究一致。此外,根水平范围与根深的比值较高,表明根系在垂直方向的拓展更为明显。这一现象可能与研究区干旱气候导致的地下水位较深有关^[31]。因此,红砂灌丛通过深化根系构型以获取深层地下水,也符合根系经济学谱理论。

3.2 红砂灌丛地上地下植物功能性状对草地退化的适应权衡

植物的功能性状遵循着资源分配理论,但同时,地上地下植物功能性状也部分独立于资源分配理

论^[15]。根据CSR三角形理论,植物可能同时采用多种策略的组合以应对复杂环境,即竞争能力(competitive ability, C)、耐受性(stress-tolerance, S)和资源获取(ruderal strategy, R)^[32]。本研究揭示了一个有趣的策略解耦现象,即随生境退化加剧,红砂灌丛的地上部分(叶片)倾向于采取典型的耐胁迫S策略(保守型),而地下部分(根系)却表现出强烈的资源获取(类似于竞争C策略)倾向。这种“保守型叶-获取型根”的组合策略,难以用单一的资源分配理论完全解释。在流动沙地这一强胁迫生境中,红砂灌丛的地上部分表现出强烈的S策略以适应严酷的地表气候,同时其根系采取主动的C型拓展策略,很可能是为了在极度干旱和不稳定的沙地中“搜寻”和“抢占”深层且稀有的水资源。这种地上地下策略的分离,体现了植物在多维环境压力下进行的精细化权衡,是CSR策略组合的一种具体体现。

这一系统性响应进一步得到了多性状协同变化的支持。本研究发现,不仅单个性状指标发生改变,多个叶功能性状参数之间、叶养分含量之间以及它们与根系形态参数之间均存在显著的相关性($p < 0.05$,图6)。这表明红砂灌丛对土地退化的适应并非个别性状的独立调整,而是地上与地下器官多个性状协同变化的系统级响应(syndromes)。图5中流动沙地多数指标的相对作用强度(RII)值更远离零值,正是这种系统性适应响应随压力增加而增强的有力证据。这一发现也支持了Tilman D等人^[33]的假设,即在资源丰富环境中生长的植物物种主要将资源投入到植株地上部分,表现出地上器官的主动获取策略,而在逆境条件下,植株将资源更多地分配给地下器官,并表现出地下器官的主动获取策略使其在逆境条件下更有利。

4 结论

对鄂尔多斯高原不同固定程度沙地上生长的红砂灌丛进行调查,结果发现,流动沙地的植物叶片相较于固定沙地和半固定沙地表现为低肉质化程度(2.08),低叶含水量(51.68%),低叶饱和含水量(57.47%),低叶C(34.9 g/kg)和低叶N(2.32 g/kg)。而流动沙地的植物根系相较于固定沙地和半固定沙地表现为更广的根系分布范围和根N含量。这说明,流动沙地的植物叶片采取“慢速投资-收益”的保守型策略,但是根系却采取“快速投资-收益”的主动获取策略。本研究观察到地上-地下性状存在解耦现象,且随沙地退化程度加剧,资源分配策略分化日益显著。这表明红砂灌丛可能通过动态变化来适应肋

迫环境。在流动、半流动沙地等退化严重的区域,红砂灌丛表现出较强的适应能力,对于该地区植被恢复具有开发应用潜力。

参考文献(References)

- [1] 刘晓娟,马克平.植物功能性状研究进展[J].中国科学(生命科学),2015,45(4):325-339.
Liu Xiaojuan, Ma Keping. Research progress of plant functional traits [J]. Scientia Sinica Vitae, 2015, 45(4): 325-339.
- [2] 唐青青,黄永涛,丁易,等.亚热带常绿落叶阔叶混交林植物功能性状的种间和种内变异[J].生物多样性,2016,24(3):262-270.
Tang Qingqing, Huang Yongtao, Ding Yi, et al. Interspecific and intraspecific variation of plant functional characters in subtropical evergreen deciduous broad-leaved mixed forest [J]. Biodiversity Science, 2016, 24(3): 262-270.
- [3] Wright I J, Reich P B, Westoby M, et al. The worldwide leaf economics spectrum [J]. Nature, 2004, 428(6985):821-827.
- [4] Jung V, Albert C H, Violle C, et al. Intraspecific trait variability mediates the response of subalpine grassland communities to extreme drought events [J]. Journal of Ecology, 2014, 102(1):45-53.
- [5] Weemstra M, Freschet G T, Stokes A, et al. Patterns in intraspecific variation in root traits are species-specific along an elevation gradient [J]. Functional Ecology, 2021, 35(2):342-356.
- [6] 钟巧连,刘立斌,许鑫,等.黔中喀斯特木本植物功能性状变异及其适应策略[J].植物生态学报,2018,42(5):562-572.
Zhong Qiaolian, Liu Libin, Xu Xin, et al. Variation of functional characters of karst woody plants in central Guizhou and its adaptive strategies [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(5):562-572.
- [7] Osnas J L D, Lichstein J W, Reich P B, et al. Global leaf trait relationships: Mass, area, and the leaf economics spectrum [J]. Science, 2013, 340(6133):741-744.
- [8] Hu Yukun, Pan Xu, Yang Xuejun, et al. Is there coordination of leaf and fine root traits at local scales? A test in temperate forest swamps [J]. Ecology and Evolution, 2019, 9(15):8714-8723.
- [9] Yu Wanying, Wang Congwen, Huang Zhenying, et al. Variations in the traits of fine roots of different orders and their associations with leaf traits in 12 co-occurring plant species in a semiarid inland dune [J]. Plant and Soil, 2022, 472(1):193-206.
- [10] Wright I J, Reich P B, Cornelissen J H C, et al. Assessing the generality of global leaf trait relationships [J]. The New Phytologist, 2005, 166(2):485-496.
- [11] 席本野,王焱,贾黎明,等.宽窄行栽植模式下三倍体毛白杨根系分布特征及其与根系吸水的关系[J].生态学报,2011,31(1):47-57.
Xi Benye, Wang Ye, Jia Liming, et al. Root distribution characteristics of triploid *Populus tomentosa* under wide and narrow row planting mode and its relationship with root water absorption [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(1):47-57.
- [12] 单立山,李毅,任伟,等.河西走廊中部两种荒漠植物根系构型特征[J].应用生态学报,2013,24(1):25-31.
Shan Lishan, Li Yi, Ren Wei, et al. Root architecture of two desert plants in central Hexi Corridor of north-west China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(1):25-31.
- [13] 单立山,李毅,董秋莲,等.红砂根系构型对干旱的生态适应[J].中国沙漠,2012,32(5):1283-1290.
Shan Lishan, Li Yi, Dong Qiulian, et al. Ecological adaptation of root architecture of red sand to drought [J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(5): 1283-1290.
- [14] Tsakalidimi M, Tsitsoni T, Ganatsas P, et al. A comparison of root architecture and shoot morphology between naturally regenerated and container-grown seedlings of *Quercus ilex* [J]. Plant and Soil, 2009, 324(1):103-113.
- [15] Bricca A, Sperandii M G, Acosta A T R, et al. Above- and belowground traits along a stress gradient: Trade-off or not? [J]. Oikos, 2023, 2023(9):e010043.
- [16] Oppelt A L, Kurth W, Dzierzon H, et al. Structure and fractal dimensions of root systems of four co-occurring fruit tree species from Botswana [J]. Annals of Forest Science, 2000, 57(5):463-475.
- [17] Berntson G M. The characterization of topology: A comparison of four topological indices for rooted binary trees [J]. Journal of Theoretical Biology, 1995, 177(3):271-281.
- [18] Strahler A N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography [J]. Geological Society of America Bulletin, 1952, 63(11):1117.
- [19] Armas C, Pugnaire F I. Measuring plant interactions: A new comparative index [J]. Ecology, 2004, 85(10): 2682-2686.
- [20] 臧淑敏.中国几种典型落叶栎属植物的叶经济谱研究[D].山东 济南:山东大学,2020.
Zang Shumin. Study on leaf economics spectrum of several typical deciduous *Quercus* in China [D]. Jinan, Shandong: Shandong University, 2020.
- [21] 冯宇,王雨晴,李沅楷,等.胡杨叶功能性状与土壤因子的关系[J].生态学报,2024,44(4):1717-1726.

- Feng Yu, Wang Yuqing, Li Yuankai, et al. Relationship between functional characters of *Populus euphratica* leaves and soil factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(4):1717-1726.
- [22] 何浩,李瑞,王红永,等.河西走廊荒漠绿洲过渡带沙丘不同固定阶段泡泡刺叶性状特征[J].*生态学报*,2025,45(3):1417-1428.
- He Hao, Li Rui, Wang Hongyong, et al. Characteristics of bubble thorn leaves at different fixed stages of sand dunes in desert-oasis transitional zone of Hexi Corridor [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025,45(3):1417-1428.
- [23] Blumenthal D M, Mueller K E, Kray J A, et al. Traits link drought resistance with herbivore defence and plant economics in semi-arid grasslands: The central roles of phenology and leaf dry matter content [J]. *Journal of Ecology*, 2020,108(6):2336-2351.
- [24] 郑莉莉,余林兰,戴萍,等.广西大石围天坑群植物叶片养分特征及其适应性[J].*植物生态学报*,2024,48(7):872-887.
- Zheng Lili, Yu Linlan, Dai Ping, et al. Nutrient characteristics and adaptability of leaves of plants in Dashiwei Tiankeng Group in Guangxi [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2024,48(7):872-887.
- [25] 马献发,宋凤斌,张继舟.根系对土壤环境胁迫响应的研究进展[J].*中国农学通报*,2011,27(5):44-48.
- Ma Xianfa, Song Fengbin, Zhang Jizhou. Research progress of root system response to soil environmental stress [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(5):44-48.
- [26] Carmona C P, Bueno C G, Toussaint A, et al. Fine-root traits in the global spectrum of plant form and function [J]. *Nature*, 2021,597(7878):683-687.
- [27] 李小乐,党晓宏,翟波,等.白刺(*Nitraria tangutorum*)灌丛不定根构型特征及生物量分配模式[J].*中国沙漠*,2022,42(4):172-180.
- Li Xiaole, Dang Xiaohong, Zhai Bo, et al. Configuration characteristics and biomass allocation model of adventitious roots in *Nitraria tangutorum* shrub [J]. *Journal of Desert Research*, 2022,42(4):172-180.
- [28] Fitter A H. An architectural approach to the comparative ecology of plant root systems [J]. *New Phytologist*, 1987,106(S1):61-77.
- [29] 陈永乐,张志山,吴攀,等.腾格里沙漠东南缘不同年代固沙区根系分布[J].*中国沙漠*,2013,33(2):515-521.
- Chen Yongle, Zhang Zhishan, Wu Pan, et al. Root distribution of sand binding vegetation in the southeastern Tengger Desert, China [J]. *Journal of Desert Research*, 2013,33(2):515-521.
- [30] 单立山,苏铭,张正中,等.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[J].*植物生态学报*,2018,42(4):475-486.
- Shan Lishan, Su Ming, Zhang Zhengzhong, et al. Vertical distribution pattern of mixed root systems of desert plants *Reaumuria soongarica* and *Salsola passerina* under different environmental gradients [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018,42(4):475-486.
- [31] 李小乐,魏亚娟,党晓宏,等.红砂灌丛沙堆土壤粒度组成及养分积累特征[J].*干旱区研究*,2022,39(3):933-942.
- Li Xiaole, Wei Yajuan, Dang Xiaohong, et al. Characteristics of soil particle size composition and nutrient accumulation in red sand shrub sand pile [J]. *Arid Zone Research*, 2022,39(3):933-942.
- [32] Grime J P. Competitive exclusion in herbaceous vegetation [J]. *Nature*, 1973,242(5396):344-347.
- [33] Tilman D. *Plant Strategies and the Dynamics and Structure of Plant Communities* [M]. Princeton, N. J. Princeton University Press, 1988.

(上接第 36 页)

- [26] 许小明.黄土丘陵区不同植被恢复方式的土壤生态水文效应[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2022.
- Xu Xiaoming. Soil eco-hydrological effects of different vegetation restoration patterns in the loess hilly region [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2022.
- [27] Yao Xiong, Yu Kunyong, Wang Guangyu, et al. Effects of soil erosion and reforestation on soil respiration, organic carbon and nitrogen stocks in an eroded area of southern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,683:98-108.
- [28] 王义贵,徐干君,白明,等.巫山针叶林与阔叶林乔灌草结构特征及碳汇功能对比[J].*中南林业科技大学学报*,2023,43(10):98-106.
- Wang Yigui, Xu Ganjun, Bai Ming, et al. Comparison of structural characteristics and carbon sink functions between trees, shrubs and herbs of coniferous and broad-leaf forests in Wushan [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2023,43(10):98-106.
- [29] 王文杰,王凯,王媛媛,等.东北针叶林与阔叶林乔灌草组成特征及碳汇功能对比研究[J].*北京林业大学学报*,2022,44(10):52-67.
- Wang Wenjie, Wang Kai, Wang Yuanyuan, et al. Comparative study on tree, shrub and herb composition and carbon sink function between coniferous and broad-leaved forests in northeast China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022,44(10):52-67.