

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2026.01.009

刘仁, 袁小东, 孙韵, 等. 矿区 6 种藤本植物的叶功能性状及其对覆土厚度的响应 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2026, 48(1): 99-114.

矿区 6 种藤本植物的叶功能性状 及其对覆土厚度的响应

刘仁^{1,2}, 袁小东³, 孙韵^{1,2}, 蔡宗明^{1,2}, 何平^{1,2},
宋云霞^{1,2}, 喻龙华^{1,2}, 张华聪^{1,2}, 厉月桥^{1,2}

1. 中国林业科学研究院 亚热带林业实验中心/新余市森林碳汇监测与调控重点实验室, 江西 新余 336600;
2. 生物多样性保护与资源利用江西省重点实验室, 江西 新余 336600; 3. 新余市生态保护中心, 江西 新余 336600

摘要: 明确 6 种藤本植物在不同覆土厚度下的适应性差异, 筛选出耐薄土或厚土的优势物种, 为矿区人工植被重建提供科学选种和覆土厚度依据, 提升生态修复效率。以矿区中 6 种藤本植物(五叶地锦、葛藤、常春藤、凌霄、常春油麻藤、爬山虎)为试验材料, 利用主成分分析法、隶属函数法研究 3 种覆土厚度下 6 种藤本植物叶功能性状及氮磷养分策略的差异, 对 6 种藤本植物各项指标进行综合分析及评价。结果表明: ① 在覆土厚度 20 cm 下五叶地锦生长状况最佳; 在覆土厚度 40 cm 下爬山虎和凌霄生长优势较高; 在覆土厚度 60 cm 下葛藤、常春藤和常春油麻藤表现出较好的适应性和生长优势。② 五叶地锦和凌霄在覆土厚度 20 cm 下增加根系投资以增强养分获取, 在覆土厚度 60 cm 下则转向增加叶生物量以优化光合作用; 葛藤和常春油麻藤在各厚度下均表现出较高的生物量积累, 显示出较强的适应潜力; 在覆土厚度 20 cm 下葛藤和常春油麻藤表现为“快投资-回报”资源获取型策略, 具有高比叶面积、低叶干物质含量特征, 利于快速生长与资源捕获, 而爬山虎和常春藤则倾向于“慢投资-回报”资源保守型策略, 具有高比叶质量和叶干物质含量, 增强了其对贫瘠环境的耐受性。③ 所有藤本植物生长均受氮磷限制, 不同藤本植物在不同覆土厚度下对氮磷养分的吸收与分配策略存在差异。五叶地锦在薄土层(20 cm)下茎根氮磷吸收量突出; 葛藤与常春油麻藤则在厚土层(60 cm)下各器官养分吸收量较高, 体现了豆科植物的固氮优势。总的来看, 藤本植物通过调整生物量分配、叶片形态和养分吸收策略来适应不同覆土厚度以提升生长和竞争力。

关键词: 藤本植物; 叶功能性状; 叶经济谱; 覆土厚度

中图分类号: Q948.1 文献标识码: A

文章编号: 1673-9868(2026)01-0099-16

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Leaf Functional Traits of Six Liana Species in Mining Area and Their Responses to Covering Soil Thickness

收稿日期: 2025-05-19

基金项目: 江西省林业科技创新项目(创新专项[2023]29号); 江西省自然科学基金青年基金项目(20242BAB20262); 新余市科技计划项目(余科发[2022]40号)。

作者简介: 刘仁, 硕士研究生, 工程师, 主要从事矿区生态修复研究。

LIU Ren^{1,2}, YUAN Xiaodong³, SUN Yun^{1,2},
 CAI Zongming^{1,2}, HE Ping^{1,2}, SONG Yunxia^{1,2},
 YU Longhua^{1,2}, ZHANG Huacong^{1,2}, LI Yueqiao^{1,2}

1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry/Key Laboratory of Forest Carbon

Sink Monitoring and Regulation in Xinyu City, Xinyu Jiangxi 336600, China;

2. Key Laboratory of Biodiversity Conservation and Resource Utilization in Jiangxi Province, Xinyu Jiangxi 336600, China;

3. Ecological Protection Center in Xinyu City, Xinyu Jiangxi 336600, China

Abstract: The adaptability differences of six vines plants under different soil thicknesses were clarified, and the dominant species resistant to thin soil or thick soil were screened out, which provides scientific selection and soil thickness basis for artificial vegetation reconstruction in mining area, and improves the efficiency of ecological restoration. In this study, six vines plants (*Parthenocissus quinquefolia*, *Pueraria lobata*, *Hedera nepalensis*, *Campsis grandiflora*, *Mucuna sempervirens*, *Parthenocissus tricuspidata*) in the mining area were used as experimental materials. The differences of leaf functional traits and nitrogen and phosphorus nutrient strategies of six vines plants under three soil thicknesses were studied. The indexes of six vines plants were comprehensively analyzed and evaluated by principal component analysis and membership function method. The results have shown that, ① The growth of *Parthenocissus quinquefolia* was the best when the soil was 20 cm, and the growth advantages of *Parthenocissus tricuspidata* and *Campsis grandiflora* are higher when the soil was 40 cm, while *Pueraria lobata*, *Hedera nepalensis* and *Mucuna sempervirens* showed better adaptability and growth advantages when the soil was 60 cm. ② *Parthenocissus quinquefolia* and *Campsis grandiflora* augmented root investment to enhance nutrient acquisition at a soil depth of 20 cm. Conversely, at a soil depth of 60 cm, they shifted towards increasing leaf biomass to optimize photosynthesis. *Pueraria lobata* and *Mucuna sempervirens* demonstrated higher biomass accumulation across all soil depths, suggesting strong adaptability. Moreover, *Pueraria lobata* and *Mucuna sempervirens* adopted a “fast investment-return” strategy at a soil depth of 20 cm, characterized by a high specific leaf area and low leaf dry matter content, which facilitated rapid growth and resource capture. In contrast, *Parthenocissus tricuspidata* and *Hedera nepalensis* tended to follow a “conservative” strategy, featuring a high specific leaf mass and leaf dry matter content, thereby enhancing tolerance to nutrient-poor environments. The growth of all vine plants was nitrogen-limited. ③ Different vines plants exhibited distinct nitrogen and phosphorus absorption and allocation strategies at varying soil depths. *Parthenocissus quinquefolia* displayed prominent nitrogen and phosphorus absorption in stems and roots in shallow soil (20 cm), while *Pueraria lobata* and *Mucuna sempervirens* showed significantly higher nutrient uptake in all organs in deep soil (60 cm), reflecting the nitrogen-fixation advantage of leguminous plants. Overall, vines plants adapted to different soil thicknesses to improve growth and competitiveness by adjusting biomass allocation, leaf morphology, and nutrient uptake strategies.

Key words: vines plants; leaf functional traits; leaf economic spectrum; thickness of covering soil

随着矿业开发活动的深入,矿区生态环境逐渐遭遇严重破坏,土壤侵蚀、植被退化和物种多样性减少等问题亟待解决^[1]。矿区生态修复的核心任务是恢复植被覆盖和生态功能,而植物的选择和生长状况直接决定了修复效果^[2]。在矿区生态修复过程中,覆土厚度是影响植物生长和适应性的关键因素之一。有研究表明:过薄的覆土层可能导致土壤水分和养分供给不足,影响植物的正常生长;过厚的覆土层则可能导致土壤透气性差,影响根系的呼吸和生长^[3]。覆土措施提高了植被高度和盖度,改善了渣山土壤的物理化学

性质,为生态群落恢复提供基础,促进植物生长^[4]。叶功能性状是植物在生存进化过程中为适应环境和提升生存能力而形成的生理或形态特征,能够反映植物物种间以及植物与生境之间的关系,体现植物与竞争者及其他生物的相互作用^[5-6]。研究表明,比叶面积、叶形因子、叶干物质含量、叶氮磷含量及其计量特征是决定植物生理功能和生物地球化学循环的重要因素^[7-8],而且植物叶片各性状之间存在着相互联系和相互依存的内在关系^[9]。土壤是影响植物叶功能性状的重要因素,能够引起多个功能性状的协同响应^[10-12],已有研究表明,土壤肥力、植物比叶面积和叶氮磷含量成正比;土壤的理化性质,如土壤水分、养分含量等,也会对植物功能性状产生显著影响^[10-12]。尽管已有研究揭示了土壤特性对植物功能性状的广泛影响,但针对矿区植物叶功能性状对覆土厚度的响应机制尚未得到充分探讨。矿区土壤的特殊性,如重金属污染、养分匮乏等,可能对植物功能性状产生独特的影响,因此深入研究矿区植物叶功能性状对覆土厚度的响应机制具有重要的生态学意义。

藤本植物是指茎部无法直立生长而呈蔓生状,通常依靠攀援器官、主茎缠绕或附着于其他物体来向上攀爬的植物^[13]。由于其较强的适应性和生长特性,藤本植物能够维持物种多样性与生态功能、增加绿量、缓解生态问题,成为矿区生态修复中备受关注的植物群体之一^[14-15]。目前国内外学者对乔灌木、草本植物的叶功能性状与气候、资源、种内关系的研究较多,对藤本植物的研究主要集中于森林群落生态^[16]、物种多样性分析^[17]、林层分布规律^[18]和观赏价值评价及应用^[14]等方面,未对矿区中的藤本植物叶功能性状进行比较分析。对藤本植物叶功能性状的研究可以在一定程度上量化植物生长与环境的相互作用,进一步探索藤本植物的生长策略,而矿区覆土厚度的变化可能会改变藤本植物生态特性对外界环境变化的适应性策略。基于此,本研究选择6种藤本植物(五叶地锦、葛藤、常春藤、凌霄、常春油麻藤、爬山虎)为研究对象,在矿区高陡岩壁底部进行不同覆土厚度栽植原位试验,通过测量藤本植物生长情况和叶功能性状指标,探讨不同藤本植物的多个叶功能性状差异及其相关性和对不同覆土厚度的适应能力,明确6种藤本植物在不同覆土厚度下的适应性差异,筛选出耐薄土或厚土的优势物种,以期为矿区生态修复中藤本植物的选择与覆土技术的完善提供理论依据和实践参考,为矿区人工植被重建提供科学选种依据,提升生态修复效率。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于江西省新余市仙女湖区九龙山乡中创铁矿高陡岩壁区,地理坐标为 $27^{\circ}36'N$ 、 $114^{\circ}50'E$,平均海拔150.81 m,属亚热带湿润季风气候,年平均日照时间约为1 512 h,年平均气温 $17.5^{\circ}C$,年平均降水量1 650 mm,降雨集中在每年4—6月,6月份降雨最多,无霜期约270 d,母质为千枚岩,土壤为红壤,大部分土层厚度在10 cm以上,适宜藤本植物生长。试验地土壤前期调查数据为:土壤有机碳含量1.86 g/kg,全氮含量0.23 g/kg,全磷含量0.53 g/kg,土壤含水率22.61%,土壤pH值4.92,有效磷含量1.76 mg/kg,铵态氮含量3.42 mg/kg,硝态氮含量1.73 mg/kg。

1.2 试验设计

2023年3月在新余市矿区高陡岩壁底部进行原位土回填覆盖试验,覆盖厚度分别为20 cm、40 cm、60 cm 3个水平,回填为宽1 m、长20 m的条带。利用6种藤本植物(五叶地锦、葛藤、常春藤、凌霄、常春油麻藤、爬山虎)对矿区高陡岩壁进行生态修复,将6种藤本植物容器苗分别移栽到3种土壤厚度中,每种厚度设置3个重复区,每个处理分别种植30株2年生容器苗,共1 620株。2024年8月进行样品采集,采集生长及结实状况良好的单株,每个处理的藤本植物选择5株生长发育良好的健壮植株,分别收集地上部分(叶、茎)、地下部分(根)生物样本,另外选取10片形状大小基本相同、叶片完全展开、无病虫害、叶边缘较完整的叶片作为样本进行表型指标测定,其余的叶片于 $105^{\circ}C$ 杀青15 min, $60^{\circ}C$ 烘干至恒定质量,粉碎过40目筛,即为叶片养分含量待测材料。2023年2月对矿区高陡岩壁底部的覆盖土进行混合取样,带回室内进行土壤样品的肥分指标(土壤含水率、有机质、全量养分、有效氮、有效磷)分析^[19]。

1.3 叶功能性状和养分指标测定

使用电子天平称取每株个体 10 片叶鲜质量,然后将所有叶片平铺于分辨率 300 dpi 的扫描仪(Epson PerfectionV 19)进行扫描,扫描的叶片图片用万深 LA-S 叶分析软件进行批量处理,计算叶面积、叶周长、叶长、叶宽、叶形指数、叶形状因子。将扫描后的叶片放入 60 °C 烘箱 48 h 后取出,称其叶干质量,然后结合叶干质量和叶面积计算比叶面积和比叶质量,结合叶片干质量和鲜质量计算叶含水率、叶肉质化程度和叶干物质含量^[20]。另外,分别称取适量的地上部分(叶、茎)、地下部分(根)的干样,测定其氮磷含量并计算氮磷比^[21]。

1.4 数据处理

使用 Excel 2010 软件和 IBM SPSS statistics 26.0 软件对数据进行统计汇总分析。利用单因素方差分析法比较 6 种藤本植物之间和不同覆土厚度下叶功能性状及氮磷养分策略差异($\alpha=0.05$);用双因素方差分析法检验藤本植被类型与覆土厚度的交互作用,并用 Duncan 法进行多重比较($\alpha=0.05$);采用 Origin Pro 2024 软件进行 Pearson 相关性分析和主成分分析;运用隶属函数法对不同覆土厚度下 6 种藤本植物叶功能性状及氮磷养分策略进行综合评价。

$$LSI = LL/LW \quad (1)$$

式中: LSI 代表叶形指数; LL 代表叶长; LW 代表叶宽。

$$LSF = 4\pi \times LA/LP^2 \quad (2)$$

式中: LSF 代表叶形状因子; LA 代表叶面积; LP 代表叶周长。

$$SLA = LA/LDW \quad (3)$$

式中: SLA 代表比叶面积; LA 代表叶面积; LDW 代表叶干质量。

$$LSW = LDW/LA \quad (4)$$

式中: LSW 代表比叶质量; LDW 代表叶干质量; LA 代表叶面积。

$$LSD = (LFW - LDW)/LA \times 100 \quad (5)$$

式中: LSD 代表叶肉质化程度; LFW 代表叶鲜质量; LDW 代表叶干质量; LA 代表叶面积。

$$LDMC = LDW/LSFW \times 100\% \quad (6)$$

式中: $LDMC$ 代表叶干物质含量; LDW 代表叶干质量; $LSFW$ 代表叶饱和鲜质量。

$$LMC = (LFW - LDW)/LFW \times 100\% \quad (7)$$

式中: LMC 代表叶含水率; LDW 代表叶干质量; LFW 代表叶鲜质量。

$$LN(P)U = LN(P)C \times LB \quad (8)$$

式中: $LN(P)U$ 代表叶氮(磷)素吸收量; $LN(P)C$ 代表叶氮(磷)含量; LB 代表叶生物量。

$$SN(P)U = SN(P)C \times SB \quad (9)$$

式中: $SN(P)U$ 代表茎氮(磷)素吸收量; $SN(P)C$ 代表茎氮(磷)含量; SB 代表茎生物量。

$$RN(P)U = RN(P)C \times RB \quad (10)$$

式中: $RN(P)U$ 代表根氮(磷)素吸收量; $RN(P)C$ 代表根氮(磷)含量; RB 代表根生物量。

$$TN(P)U = LN(P)U + SN(P)U + RN(P)U \quad (11)$$

式中: $TN(P)U$ 代表总氮(磷)素吸收量。

2 结果与分析

2.1 藤本植物在不同覆土厚度处理下的生长情况

由表 1 可知,植被类型、覆土厚度及其交互作用对各项生长情况指标均存在极显著影响。五叶地锦在 20 cm 和 60 cm 覆土厚度下表现出较高的 SL 和 SB ,其中 SB 显著高于其他 5 种藤本植物,平均值分别达 8.13 g 和 21.08 g;在 60 cm 覆土厚度下的 SMC 显著低于其他 5 种植物; SMC 随覆土厚度的增加而增加,但 RB 反之。葛藤在 3 种覆土厚度下的 RB 、 TB 、 LMC 和 SMC 均要高于其他 5 种植物;在 40 cm 覆土厚度下的 LB 和 RMC 也显著高于其他藤本植物;在 60 cm 厚度下,大部分指标均优于其他藤本植物;除 SL 、

RB 及 *RMC* 外, 其他生长情况指标随覆土厚度的增加而升高。常春藤在 3 种覆土厚度下各项生长指标均较低, 其中在 40 cm 和 60 cm 覆土厚度下的 *SL*、*LB*、*SB*、*RB*、*TB* 和 *RMC* 均显著低于其他 5 种植物; *SL* 随覆土厚度的增加而增加。凌霄的 *SL* 平均值在 40 cm 覆土厚度下是葛藤的 4.52 倍; *RMC* 在 60 cm 覆土厚度下最高(64.12%), 而 *LMC* 最低(41.70%); *LB*、*SMC* 和 *RMC* 随覆土厚度的增加而增加, 而 *RB* 和 *LMC* 反之。常春油麻藤在 20 cm 覆土厚度下 *LB*、*SMC* 和 *RMC* 显著高于其他藤本, 在 60 cm 覆土厚度下 *LB* 要显著高于其他植物; *LB* 随覆土厚度的增加而增加, 而 *LMC* 反之。爬山虎在 3 种覆土厚度下的各项生长指标总体上要低于其他植物, 其中在 20 cm 覆土厚度下的 *LB*、*RB* 和 *TB* 显著低于其他 5 种植物; 仅在 40 cm 覆土厚度下的 *SB* 平均值最高(10.70 g), 但 *LMC*、*SMC* 平均值最低; 在 60 cm 覆土厚度下的 *RB* 平均值最低(1.58 g), 显著低于其他 5 种植物; *SL* 和 *LB* 随覆土厚度的增加而增加, 而 *RMC* 反之。

表 1 藤本植物在不同覆土厚度处理下的生长情况

覆土厚度	植被类型	<i>SL</i> / m	<i>LB</i> / g	<i>SB</i> / g	<i>RB</i> / g	<i>TB</i> / g	<i>LMC</i> / %	<i>SMC</i> / %	<i>RMC</i> / %
20 cm	五叶地锦	3.03±0.24Aa	1.74±0.09Bc	8.13±0.02Ba	29.81±0.50Ab	36.49±0.69Ab	66.99±0.50Bc	54.03±0.34Cd	43.65±0.05Cf
	葛藤	0.77±0.04Bb	2.11±0.06Cb	4.94±0.11Cc	39.12±0.41Ba	46.17±0.58Ba	73.11±0.29Ba	64.37±0.12Ca	58.99±0.37Bc
	常春藤	0.14±0.01Cc	1.17±0.09Ad	0.47±0.03Bf	3.16±0.03Be	4.80±0.13Be	57.78±0.13Bf	56.81±0.24Bb	60.85±0.15Ab
	凌霄	1.14±0.12Bb	2.02±0.16Cc	5.73±0.26Bb	22.94±0.07Ac	30.69±0.43Bc	61.75±0.27Ad	48.41±0.27Be	57.13±0.19Be
	常春油麻藤	2.83±0.13Aa	2.85±0.05Ca	3.45±0.02Bd	17.28±0.04Bd	23.58±0.11Bd	69.37±0.30Ab	64.17±0.43Aa	62.57±0.23Aa
	爬山虎	0.23±0.01Bc	0.34±0.03Be	0.99±0.05Ce	1.65±0.18Bf	2.98±0.25Cf	59.42±0.17Be	55.19±0.28Bc	58.14±0.15Ad
40 cm	五叶地锦	0.95±0.04Bc	1.41±0.12Be	5.37±0.15Cd	8.09±0.09Bd	14.87±0.35Cd	62.82±0.28Cc	55.17±0.21Bc	61.71±0.43Ab
	葛藤	0.48±0.02Bd	8.76±0.13Ba	7.93±0.05Bb	29.49±0.13Ca	46.18±0.27Ba	75.14±0.29Aa	69.61±0.47Ba	63.86±0.35Aa
	常春藤	0.30±0.01Bd	1.21±0.17Ae	0.33±0.00Bf	2.84±0.08Cf	4.37±0.23Be	55.15±0.22Ce	55.55±0.38Cc	37.88±0.36Cd
	凌霄	2.17±0.25Aa	4.97±0.03Bc	6.88±0.03Ac	20.36±0.08Bb	32.21±0.12Ab	58.84±0.31Bd	59.47±0.42Ab	57.33±0.43Bc
	常春油麻藤	0.53±0.01Bd	5.53±0.09Bb	3.37±0.05Be	11.66±0.15Cc	20.56±0.30Cc	66.96±0.19Bb	59.03±0.45Bb	63.27±0.37Aa
	爬山虎	1.74±0.05Ab	3.43±0.08Ad	10.70±0.24Aa	7.17±0.11Ae	21.31±0.41Ac	52.19±0.28Cf	50.23±0.25Cd	57.02±0.35Bc
60 cm	五叶地锦	3.21±0.30Aa	2.75±0.08Ae	21.08±0.07Aa	7.84±0.13Bd	31.67±0.23Bc	73.46±0.24Ab	58.10±0.38Ad	56.98±0.21Bc
	葛藤	3.32±0.47Aa	17.07±0.12Ab	19.69±0.13Ab	93.78±0.40Aa	130.53±0.65Aa	75.41±0.42Aa	74.12±0.27Aa	49.08±0.28Cc
	常春藤	0.35±0.02Ac	0.78±0.09Bf	2.27±0.13Af	3.72±0.09Ae	6.76±0.25Af	67.26±0.26Ad	59.49±0.31Ac	46.51±0.04Bf
	凌霄	0.92±0.04Bc	8.02±0.16Ac	2.81±0.09Ce	9.53±0.11Cc	20.37±0.18Cd	41.70±0.34Cf	60.61±0.29Ab	64.12±0.30Aa
	常春油麻藤	3.03±0.16Aa	17.71±0.14Aa	14.10±0.09Ac	31.74±0.20Ab	63.56±0.41Ab	64.96±0.21Ce	59.85±0.13Bbc	59.96±0.09Bb
	爬山虎	1.99±0.19Ab	3.68±0.22Ad	6.93±0.26Bd	1.58±0.13Bf	12.20±0.61Be	68.42±0.44Ac	60.50±0.26Ab	55.51±0.13Cd
<i>F</i> 检验	植被类型	56.36***	2 709.23***	2 802.12***	23 972.59***	11 697.53***	1 774.78***	850.90***	862.13***
	覆土厚度	65.95***	4 819.21***	5 222.54***	4 497.09***	5 592.74***	220.97***	396.78***	59.04***
	植被类型×覆土厚度	36.46***	927.54***	1 425.74***	6 121.84***	3 140.56***	535.77***	136.97***	767.63***

注: *** 表示在 $p < 0.001$ 差异有统计学意义。表中数据为“平均值±标准差”。大写字母表示同一种藤本植物在不同覆土厚度间的差异具有统计学意义($p < 0.05$); 小写字母表示不同种藤本植物在同一覆土厚度下的差异具有统计学意义($p < 0.05$)。SL 代表茎长; TB 代表总生物量; SMC 代表茎含水率; RMC 代表根含水率。下同。

2.2 藤本植物在不同覆土厚度处理下叶功能性状的差异

由表 2 可知, 植被类型及其与覆土厚度的交互作用对各项叶功能性状指标均存在极显著影响, 除 *LSF* 外, 覆土厚度对各项叶功能性状指标均存在显著影响。五叶地锦的 *LA*、*LP*、*LL*、*LSW* 和 *LSD* 随覆土厚度的增加先降低后增加, 但 *LSF*、*SLA* 和 *LDMC* 与之相反; 仅 *LSI* 随覆土厚度的增加而增加。葛藤在覆土厚度 20 cm 下 *LA*、*LL*、*LW* 及 *SLA* 均显著高于其他 5 种植物, 但其 *LSW* 和 *LDMC* 要显著低于其他

5 种植物; 随覆土厚度增加, 其叶片多项指标均先降低后增加, 如 *LA*、*LP* 和 *SLA*, 而 *LSF*、*LSW* 和 *LSD* 先增加后降低, *LL* 和 *LSI* 则表现为持续降低。爬山虎的 *LSW*、*LSD* 在 20 cm 和 40 cm 覆土厚度下均要高于其他藤本; 随覆土厚度增加, *LA*、*LP*、*LL*、*LW* 呈增加趋势, 但 *LSD* 随覆土厚度增加而降低。常春油麻藤在 40 cm 覆土厚度下 *LA*、*LP*、*LL*、*LW* 和 *LSI* 均显著高于其他 5 种植物; 在 60 cm 覆土厚度下 *LA*、*LP*、*LL*、*LW* 和 *LSI* 要显著高于其他 5 种植物; *LA*、*LL*、*LW*、*LSF*、*SLA* 和 *LDMC* 随覆土厚度增加而增加, 但 *LSW* 和 *LSD* 反之。凌霄的 *LSI* 和 *LSF* 随覆土厚度的增加而降低, 但 *LDMC* 反之。

表 2 藤本植物在不同覆土厚度处理下叶功能性状

覆土厚度	植被类型	<i>LA</i> / cm ²	<i>LP</i> / cm	<i>LL</i> / cm	<i>LW</i> / cm	<i>LSI</i>	<i>LSF</i>	<i>SLA</i> / cm ² ·g ⁻¹	<i>LSW</i> / 10 ³ ·g·cm ⁻²	<i>LSD</i> / 10 ² ·g·cm ⁻²	<i>LDMC</i> / %
20 cm	五叶地锦	69.13±0.26Ac	68.09±3.60Ac	11.78±0.46Bd	8.97±0.33Cb	1.33±0.31Aab	0.19±0.02Babc	159.53±5.55Cb	6.28±0.21Ac	1.38±0.04Ac	31.31±0.92Bb
	葛藤	158.30±0.14Ba	116.43±4.66Ba	21.41±0.87Aa	11.70±0.41Ba	1.95±0.17Aa	0.15±0.01Bbc	240.09±18.78ABa	4.22±0.32ABd	1.13±0.02Bd	27.10±1.20Ac
	常春藤	21.17±0.24Be	29.48±0.96Bd	6.30±0.52Be	4.80±0.34Bc	1.19±0.30Ab	0.31±0.02Aab	100.50±5.54Bc	10.01±0.53Ab	1.45±0.06Ac	40.90±0.73Aa
	凌霄	52.85±0.20Bd	88.27±1.86Bb	16.85±0.71Ab	8.96±0.08Ab	2.03±0.02Aa	0.09±0.00Ac	168.01±7.42Bb	5.98±0.27Bc	0.91±0.02Be	39.49±1.31Ba
	常春油麻藤	87.75±0.32Cb	122.07±2.98Aa	14.62±0.27Cc	9.18±0.45Cb	1.68±0.06Bab	0.07±0.00Cc	110.00±3.60Cc	9.11±0.30Ab	2.01±0.01Ab	31.22±0.58Bb
	爬山虎	12.09±0.28Cf	23.00±4.36Bd	5.69±0.75Ce	4.19±0.12Cc	1.52±0.23Aab	0.36±0.13Aa	54.63±3.38Bd	18.45±1.17Ba	2.84±0.11Aa	39.35±2.02Ba
40 cm	五叶地锦	41.37±0.24Be	39.33±3.96Bed	9.29±0.24Cc	6.93±0.27Bc	1.36±0.27Ab	0.36±0.06Aa	252.41±3.89Aa	3.96±0.06Cd	0.65±0.04Bd	38.16±1.47Ab
	葛藤	145.41±0.30Cb	97.92±4.31Cb	19.74±0.85ABb	13.78±0.38Ab	1.31±0.27ABb	0.19±0.02Abc	208.91±1.10Bb	4.81±0.26Acd	1.40±0.01Ab	25.54±1.14Ae
	常春藤	21.03±0.24Be	31.99±3.99Bd	6.76±0.70Bc	5.07±0.26Bd	1.08±0.30Ab	0.28±0.06Aab	109.72±1.98Bd	9.12±0.17Ab	1.50±0.09Ab	37.83±1.05ABb
	凌霄	12.54±0.30Cf	50.37±3.39Cc	6.83±0.60Cc	3.72±0.35Cd	1.85±0.09ABb	0.06±0.01Bc	105.07±1.12Cd	9.52±0.10Ab	1.36±0.02Ab	41.12±0.08Bb
	常春油麻藤	234.08±0.59Ba	133.73±7.76Aa	46.12±1.47Ba	18.80±1.07Ba	7.44±0.64Aa	0.17±0.02Abc	182.17±5.78Bc	5.50±0.17Bc	1.11±0.01Bc	33.12±0.95ABc
	爬山虎	34.38±0.39Bd	42.61±4.14Ad	8.81±0.86Bc	7.61±0.31Bc	1.51±0.20Ab	0.25±0.05Aab	42.37±1.46Bc	23.66±0.79Aa	2.66±0.09Aa	47.11±1.70Aa
60 cm	五叶地锦	69.85±0.47Ac	65.65±1.16Ad	14.99±0.61Ac	10.26±0.26Ac	1.44±0.13Abc	0.20±0.01Bb	198.77±6.98Bb	5.04±0.17Bb	1.37±0.07Aa	26.92±0.34Cc
	葛藤	242.89±0.26Ab	148.04±4.11Aa	18.68±0.46Bb	14.76±0.22Ab	0.73±0.34Bc	0.14±0.01Bc	270.10±8.44Aa	3.71±0.11Bc	1.17±0.01Bb	24.14±0.68Ac
	常春藤	31.40±0.39Af	42.29±1.68Ae	13.02±0.78Acd	6.57±0.13Ad	2.00±0.15Ab	0.22±0.02Ab	156.97±10.42Ac	6.43±0.46Ba	1.20±0.05Bab	34.77±1.21Bb
	凌霄	60.69±0.16Ae	115.24±4.25Ac	10.06±0.65Be	7.47±0.25Bd	1.32±0.25Bbc	0.06±0.00Be	211.75±9.25Ab	4.74±0.21Cb	0.33±0.03Cd	58.77±2.91Aa
	常春油麻藤	276.04±0.83Aa	128.73±5.05Ab	51.06±1.51Aa	22.92±1.04Aa	6.58±0.66Aa	0.21±0.02Ab	224.63±16.90Ab	4.50±0.33Cb	0.87±0.09Cc	34.28±0.87Ab
	爬山虎	66.80±0.42Ad	44.62±0.87Ae	12.08±0.45Ade	9.52±0.23Ac	1.24±0.37Abc	0.42±0.01Aa	206.79±11.32Ab	4.87±0.28Cb	0.97±0.04Bc	33.39±0.99Cb
<i>F</i> 检验	植被类型	132.931.87***	333.87***	598.29***	303.97***	73.76***	17.16***	100.31***	286.90***	181.86***	95.48***
	覆土厚度	39.088.73***	62.98***	127.52***	121.34***	10.82***	0.55ns	118.20***	212.16***	207.14***	5.13*
	植被类型× 覆土厚度	12.856.28***	16.35***	122.03***	46.49***	19.28***	2.66**	24.37***	82.25***	81.55***	24.29***

注: *, **, *** 分别表示在 $p < 0.05$ 、 $p < 0.01$ 、 $p < 0.001$ 差异有统计学意义。ns 表示在 $p > 0.05$ 差异无统计学意义。下同。

2.3 藤本植物在不同覆土厚度处理下氮磷养分分配特征和吸收量的差异

由表 3 可知, 植被类型及其与覆土厚度的交互作用对各项氮磷养分分配特征指标均存在极显著影响; 除 *LPC* 外, 覆土厚度对各项氮磷养分分配特征指标均存在显著影响。五叶地锦的 *SNC*、*RNC* 随覆土厚度的增加显著降低; 葛藤的 *RPC* 随覆土厚度的增加而增加; 常春藤的 *LNC* 和 *LN/P* 随覆土厚度的增加而降低; 凌霄的 *SNC*、*SPC* 和 *RPC* 随覆土厚度的增加而增加, 但 *SN/P* 和 *RN/P* 反之; 常春油麻藤的 *SNC*、*RNC*、*SPC* 和 *RN/P* 随覆土厚度的增加显著提升; 爬山虎的 *LNC* 和 *LPC* 随覆土厚度的增加显著提升, 但 *RNC* 却与之相反。在不同覆土厚度下不同藤本植物的 *LN/P* 平均值均低于 14.00 mg/g。在覆土厚度 20 cm 下, 五叶地锦的 *LPC* 和 *SPC* 均要显著高于其他藤本植物; 常春藤的 *LPC* 最低; 爬山虎的 *RNC* 和 *RPC* 均要显著高于其他藤本植物; 凌霄的 *LNC*、*SNC*、*RNC*、*SPC*、*RPC* 和 *LN/P* 较低。在覆

土厚度 40 cm 下, 五叶地锦的 *LNC* 和 *LN/P* 均要显著高于其他藤本植物; 葛藤的 *SNC* 最高; 凌霄的 *SNC* 和 *RPC* 均显著低于其他植物, 但 *LPC* 最高; 爬山虎的 3 个部位磷含量均较高。在覆土厚度 60 cm 下, 五叶地锦的 *SNC*、*RNC*、*SN/P* 和 *RN/P* 显著低于其他藤本植物; 葛藤的 *LNC*、常春油麻藤的 *SNC*、*RNC*、*SPC*、*SN/P* 和 *RN/P* 以及爬山虎的 *LPC*、*RPC* 均显著高于其他藤本植物。

由表 4 可知, 覆土厚度、植被类型及其交互作用对不同覆土厚度下藤本植物各部位氮磷养分吸收量有显著影响。在覆土厚度 20 cm 下, 五叶地锦的 *SNU*、*SPU*、*RPU* 和 *TPU* 均要显著高于其他藤本植物; 葛藤和常春油麻藤的 *LNU* 较高, 葛藤的 *RNU* 和 *TNU* 均要高于其他藤本植物; 常春藤和爬山虎多个指标均较低, 其 *TNU* 和 *TPU* 均要低于其他 4 种藤本植物; *LPU* 较高的有五叶地锦、葛藤、凌霄和常春油麻藤, *RPU* 仅五叶地锦和葛藤相对较高。在覆土厚度 40 cm 下, 葛藤的 *SNU*、*RNU*、*LPU*、*RPU*、*TNU* 和 *TPU* 均显著高于其他植物, *TNU* 和 *TPU* 分别是常春藤的 11.83 倍和 12.00 倍; 常春藤根、茎、叶的氮磷吸收量均显著低于其他藤本植物; 常春油麻藤的 *LNU* 最高(69.22 mg), 是常春藤的 6.22 倍。在覆土厚度 60 cm 下, 葛藤和常春油麻藤的多个部位氮磷吸收量较高, 其中葛藤的 *LNU*、*RNU*、*RPU*、*TNU* 和 *TPU* 均显著高于其他植物; 常春藤和凌霄的茎、根氮磷吸收量较低。随覆土厚度增加, 凌霄和爬山虎的 *LNU* 呈增加趋势, 而五叶地锦和常春藤的 *LNU* 与之相反; 凌霄和爬山虎的 *LPU* 随覆土厚度增加而增加; 葛藤和常春油麻藤的 *LNU*、*SNU*、*LPU*、*SPU* 和 *TPU* 随覆土厚度的增加而增加, 常春油麻藤的 *RNU* 和 *TNU* 也表现出随之增加的趋势。

表 3 藤本植物在不同覆土厚度处理下氮磷养分分配特征

覆土厚度	植被类型	<i>LNC</i> / (mg·g ⁻¹)	<i>SNC</i> / (mg·g ⁻¹)	<i>RNC</i> / (mg·g ⁻¹)	<i>LPC</i> / (mg·g ⁻¹)	<i>SPC</i> / (mg·g ⁻¹)	<i>RPC</i> / (mg·g ⁻¹)	<i>LN/P</i>	<i>SN/P</i>	<i>RN/P</i>
20 cm	五叶地锦	13.64±0.43Bc	8.20±0.36Ac	9.89±0.45Ab	2.75±0.24Aa	0.88±0.03Aa	1.04±0.12Ab	5.00±0.27ABab	9.26±0.08Bd	9.68±0.80ABcd
	葛藤	19.98±0.26Ba	10.10±0.21Ba	11.85±0.82Aab	2.12±0.23Aab	0.42±0.02Bd	0.42±0.02Cd	11.35±2.71Aa	24.31±0.54Aa	28.35±0.53Aa
	常春藤	10.91±0.31Ad	6.59±0.24Bd	5.99±0.95Ac	1.58±0.01Ab	0.61±0.02Bb	0.80±0.08Bc	9.99±3.9Aab	10.76±0.05Bd	7.40±0.44Ad
	凌霄	8.40±0.24Bf	4.75±0.22Be	5.02±0.71Ac	2.36±0.20Aa	0.29±0.03Ce	0.31±0.02Cd	3.60±0.21Ab	16.75±0.92Ab	16.21±1.09Ab
	常春油麻藤	15.01±0.20Bb	9.00±0.05Cb	4.27±0.73Bc	2.08±0.41Aab	0.49±0.00Bc	0.36±0.01Cd	7.89±1.71Aab	18.37±0.04Bb	11.82±1.61Cc
	爬山虎	9.77±0.27Ce	7.43±0.33Ac	12.87±0.73Aa	2.38±0.04Ba	0.54±0.01Bc	1.34±0.04Aa	4.11±0.05Ab	13.74±0.88Ac	9.59±0.38Acd
40 cm	五叶地锦	14.95±0.22Aa	6.62±0.25Bc	4.79±0.71Bc	2.23±0.46Aab	0.51±0.04Cc	0.46±0.02Bcd	7.35±1.59Aa	13.21±0.81Ab	10.43±1.28Ac
	葛藤	5.32±0.44Ce	13.25±0.25Aa	7.56±0.84Bb	2.39±0.35Aab	0.83±0.06Ab	0.53±0.03Abcd	2.27±0.16Bc	16.03±0.93Aa	14.17±1.03Cb
	常春藤	9.14±0.31Bd	10.53±0.34Ab	3.52±0.63Ac	1.85±0.18Ab	0.83±0.02Ab	0.61±0.03Abc	5.03±0.43Aab	12.67±0.73Ab	5.74±0.72Cd
	凌霄	11.59±0.46Ac	5.62±0.31Ad	4.35±0.51Ac	3.10±0.30Aa	0.43±0.00Bc	0.40±0.02Bd	3.78±0.21Abc	13.03±0.62Bb	11.13±1.82ABbc
	常春油麻藤	12.52±0.15Cb	10.12±0.36Bb	11.93±0.63Aa	2.50±0.44Aab	0.76±0.05Ab	0.66±0.03Ab	5.34±0.92Aab	13.40±0.47Cb	18.01±0.33Ba
	爬山虎	11.33±0.43Bc	7.28±0.27Ac	6.95±0.60Bb	3.01±0.26Aa	1.16±0.07Aa	1.40±0.11Aa	3.79±0.17Abc	6.33±0.34Cc	4.96±0.10Bd
60 cm	五叶地锦	5.29±0.28Ce	4.73±0.37Ce	3.34±0.77Bd	2.21±0.30Ab	0.75±0.04Bab	0.53±0.03Bab	2.46±0.23Cb	6.26±0.16Cc	6.20±1.15Bd
	葛藤	21.19±0.03Aa	13.04±0.33Ab	10.10±0.63ABb	2.23±0.23Ab	0.64±0.14ABbc	0.55±0.08Aab	9.70±0.92Aa	22.60±4.97Ab	18.88±1.67Bb
	常春藤	5.26±0.51Ce	5.37±0.24Cde	4.01±0.76Ad	2.06±0.44Ab	0.59±0.01Bbc	0.62±0.04Aab	2.70±0.34Bb	9.12±0.51Bc	6.37±0.78Bd
	凌霄	11.05±0.29Ad	6.04±0.27Acd	4.22±0.66Ad	2.45±0.35Ab	0.50±0.02Ac	0.50±0.01Ab	4.67±0.53Ab	12.23±0.93Bc	8.54±1.43Bcd
	常春油麻藤	16.83±0.32Ab	25.01±0.40Aa	12.28±0.64Aa	1.77±0.29Ab	0.86±0.05Aa	0.49±0.02Bb	10.00±1.60Aa	29.26±1.33Aa	24.92±1.79Aa
	爬山虎	14.05±0.08Ac	6.73±0.33Ac	6.87±0.62Bc	3.52±0.30Aa	0.63±0.03Bbc	0.64±0.01Ba	4.04±0.34Ab	10.73±0.31Bc	10.75±0.82Ac
<i>F</i> 检验	植被类型	216.66***	454.58***	38.05***	5.22**	22.79***	71.86***	4.84**	43.87***	78.75***
	覆土厚度	72.46***	104.58***	11.51***	1.45ns	31.31***	14.39***	4.71*	9.15***	11.78***
	植被类型× 覆土厚度	238.71***	192.41***	18.51***	1.42***	16.98***	20.73***	4.38***	11.48***	17.83***

注: *LN/P* 代表叶氮磷比; *SN/P* 代表茎氮磷比; *RN/P* 代表根氮磷比。

表 4 藤本植物在不同覆土厚度处理下各部位氮磷养分吸收量差异

覆土厚度	植被类型	LNU/ (mg·株 ⁻¹)	SNU/ (mg·株 ⁻¹)	RNU/ (mg·株 ⁻¹)	LPU/ (mg·株 ⁻¹)	SPU/ (mg·株 ⁻¹)	RPU/ (mg·株 ⁻¹)	TNU/ (mg·株 ⁻¹)	TPU/ (mg·株 ⁻¹)
20 cm	五叶地锦	23.86±2.00Ab	66.64±3.02Ba	295.17±16.95Ab	4.85±0.68Aa	7.19±0.26Ba	31.14±4.15Aa	386.44±21.28Ab	57.09±5.76Aa
	葛藤	42.19±1.74Ba	49.93±2.00Cb	464.19±36.70Ba	4.52±0.61Ca	2.06±0.13Cb	16.34±1.04Bb	645.75±27.38Ba	43.00±7.18Bb
	常春藤	12.8±1.36Ac	3.08±0.24Cd	19.02±3.22Ad	1.85±0.16Cb	0.29±0.02Bc	2.54±0.29Ac	37.70±3.33Ad	4.63±1.04Bd
	凌霄	17.00±1.79Cc	27.32±2.47Bc	115.14±16.50Ac	4.81±0.75Ba	1.65±0.23Bb	7.03±0.52Ac	186.14±13.78Bbc	30.25±2.80Bbc
	常春油麻藤	42.76±1.31Ca	31.04±0.32Bc	73.86±12.87Ccd	5.95±1.25Ba	1.69±0.02Bb	6.18±0.27Cc	222.36±8.61Bc	23.01±3.42Bc
	爬山虎	3.38±0.38Cd	7.35±0.68Cd	21.45±3.53Bd	0.82±0.08Bb	0.53±0.02Cc	2.22±0.30Bc	30.05±3.83Cd	4.24±0.43Cd
40 cm	五叶地锦	21.15±2.06Ae	35.63±2.35Cc	38.84±6.21Bde	3.26±0.89Ac	2.72±0.25Cc	3.70±0.18Bd	130.92±8.52Bd	15.95±2.90Ccd
	葛藤	46.50±3.32Bc	105.06±2.22Ba	222.75±24.05Ca	20.86±2.80Ba	6.61±0.49Bb	15.68±0.95Ba	401.94±21.58Ca	57.75±6.59Ba
	常春藤	11.12±1.98Af	3.43±0.15Bd	10.06±2.03Ce	2.27±0.50Bc	0.27±0.00Bd	1.72±0.14Be	33.97±3.73Be	4.81±0.52Bd
	凌霄	57.59±2.45Bb	38.64±2.12Ac	88.71±10.80Ac	15.40±1.58Aad	2.96±0.03Ac	8.08±0.37Ac	231.54±14.37Ab	42.16±3.25Ab
	常春油麻藤	69.22±1.97Ba	34.11±1.74Bc	139.19±8.69Bb	13.87±2.63Bb	2.56±0.21Bc	7.72±0.38Bc	237.00±10.56Bb	26.93±3.84Bc
	爬山虎	38.93±2.43Bd	78.02±4.44Ab	50.01±5.02Ad	10.38±1.15Ab	12.40±0.99Aa	10.06±0.92Ab	181.90±12.66Ac	39.66±3.67Ab
60 cm	五叶地锦	14.61±1.15Be	99.78±7.65Ac	26.34±6.40Bc	6.13±0.98Acd	15.91±0.83Aa	4.18±0.30Bc	141.25±14.63Bc	36.94±4.11Bc
	葛藤	361.72±1.98Aa	256.59±5.13Ab	946.57±54.71Aa	37.98±3.71Aa	12.51±2.65Aa	51.31±7.05Aa	1 928.40±30.38Aa	148.33±18.41Aa
	常春藤	4.10±0.66Be	12.22±1.19Ae	15.04±3.21Bc	1.62±0.40Ad	1.33±0.07Ab	2.31±0.21Ac	33.21±4.49Bd	7.44±1.33Ad
	凌霄	88.78±3.94Ac	16.99±0.80Ce	40.27±6.65Bc	19.72±3.11Ab	1.40±0.06Bb	4.73±0.16Bc	144.83±9.40Bc	23.38±2.39Bcd
	常春油麻藤	298.22±7.73Ab	352.81±7.22Aa	389.91±22.09Ab	31.50±5.27Aa	12.13±0.75Aa	15.69±0.38Ab	1 146.92±34.73Ab	66.35±7.17Ab
	爬山虎	51.76±3.40Ad	46.85±4.03Bd	11.04±1.94Cc	13.11±1.87Abc	4.36±0.34Bb	1.01±0.10Cc	112.81±9.54Bc	19.61±2.28Bcd
F 检验	植被类型	1 431.02***	804.41***	324.66***	37.88***	50.23***	64.86***	1 380.84***	59.20***
	覆土厚度	2 824.84***	1 438.02***	89.08***	72.79***	89.61***	11.09***	920.52***	27.06***
	植被类型×覆土厚度	841.64***	525.16***	86.38***	10.85***	34.31***	34.09***	513.49***	21.80***

2.4 藤本植物叶功能性状特征与氮磷养分特征间的相关性分析

图 1 是一张整合了同一覆土厚度下 6 种植物所有样本数据的相关性热图, 计算的是在所有植物、所有样本混合在一起的情况下, 叶功能性状与氮磷养分指标之间的总体相关系数。横、纵坐标均表示 35 个指标, 右侧刻度标表示指标间相关系数的数值范围。如图 1 所示, 不同覆土厚度下各藤本植物的叶功能性状和氮磷养分特征的相关性各不相同。在覆土 20 cm 时(图 1a), *SL*、*LB*、*SB*、*RB* 和 *LMC* 与 *TB*、*LP*、*LW*、*SNU*、*LPU* 和 *TPU* 呈极显著正相关, 与 *LSF*、*LSW* 和 *LDMC* 呈显著负相关; *TB*、*LNC* 与 *RN/P*、*LA*、*LP*、*LL*、*LW*、*SLA*、*LNU*、*SNU*、*RNU*、*TNU* 和 *TPU* 呈极显著正相关, 与 *LSW* 和 *LDMC* 呈显著负相关; *RPC* 与大部分叶片指标均呈显著负相关, 仅与 *LSF*、*LSW* 和 *LSD* 呈极显著正相关; *SN/P*、*RN/P*、*LA*、*LP*、*LL* 和 *LW* 与 *LSI*、*SLA*、*LNU*、*SNU*、*RNU* 和 *TNU* 呈显著正相关, 而与 *LSD*、*LSW* 和 *LDMC* 呈显著负相关; *LSW* 和 *LDMC* 与 *LNU*、*SNU*、*RNU*、*LPU*、*RPU*、*TNU* 和 *TPU* 呈显著负相关; *SLA*、*LNU* 和 *SNU* 与 *RNU*、*LPU*、*TNU* 和 *TPU* 呈极显著正相关; *RNU*、*SPU*、*RPU* 和 *TNU* 均与 *TPU* 呈极限正相关。在覆土 40 cm 时(图 1b), *LB*、*LMC* 和 *RMC* 与 *TB*、

RN/P、*LA*、*LP*、*LL*、*LW*、*SNU*、*RNU*、*LPU*、*RPU*、*TNU* 和 *TPU* 呈显著正相关；*RNC* 与大部分叶片指标均呈极显著正相关；*RN/P*、*LA*、*LP*、*LL* 和 *LW* 与 *LSI*、*LNU*、*RNU*、*LPU* 和 *TNU* 呈显著正相关，而与 *LDMC* 呈显著负相关；*LNU*、*SNU* 和 *RNU* 与 *LPU*、*RPU*、*TNU* 和 *TPU* 呈极显著正相关。覆土 60 cm 时(图 1c)，*LB* 和 *RB* 与 *TB*、*LNC*、*RNC*、*LN/P*、*SN/P*、*RN/P*、*LA*、*LP*、*SLA*、*SNU*、*RNU*、*LPU*、*RPU*、*TNU* 和 *TPU* 呈极显著正相关，与 *LSW* 呈极显著负相关；*TB*、*LNC*、*SNC*、*RNC* 与 *LN/P*、*SN/P*、*RN/P*、*LW*、*LNU*、*SNU*、*RNU*、*LPU*、*TNU* 和 *TPU* 呈极显著正相关；*LN/P*、*SN/P*、*RN/P*、*LA*、*LP*、*LL*、*LW* 和 *SLA* 与大部分叶片指标均呈极显著正相关，仅与 *LSW* 呈显著负相关；*LSW* 与大多数指标呈显著负相关；*LNU*、*SNU*、*RNU*、*LPU*、*SPU*、*RPU*、*TNU* 和 *TPU* 与各指标之间基本呈极显著正相关。

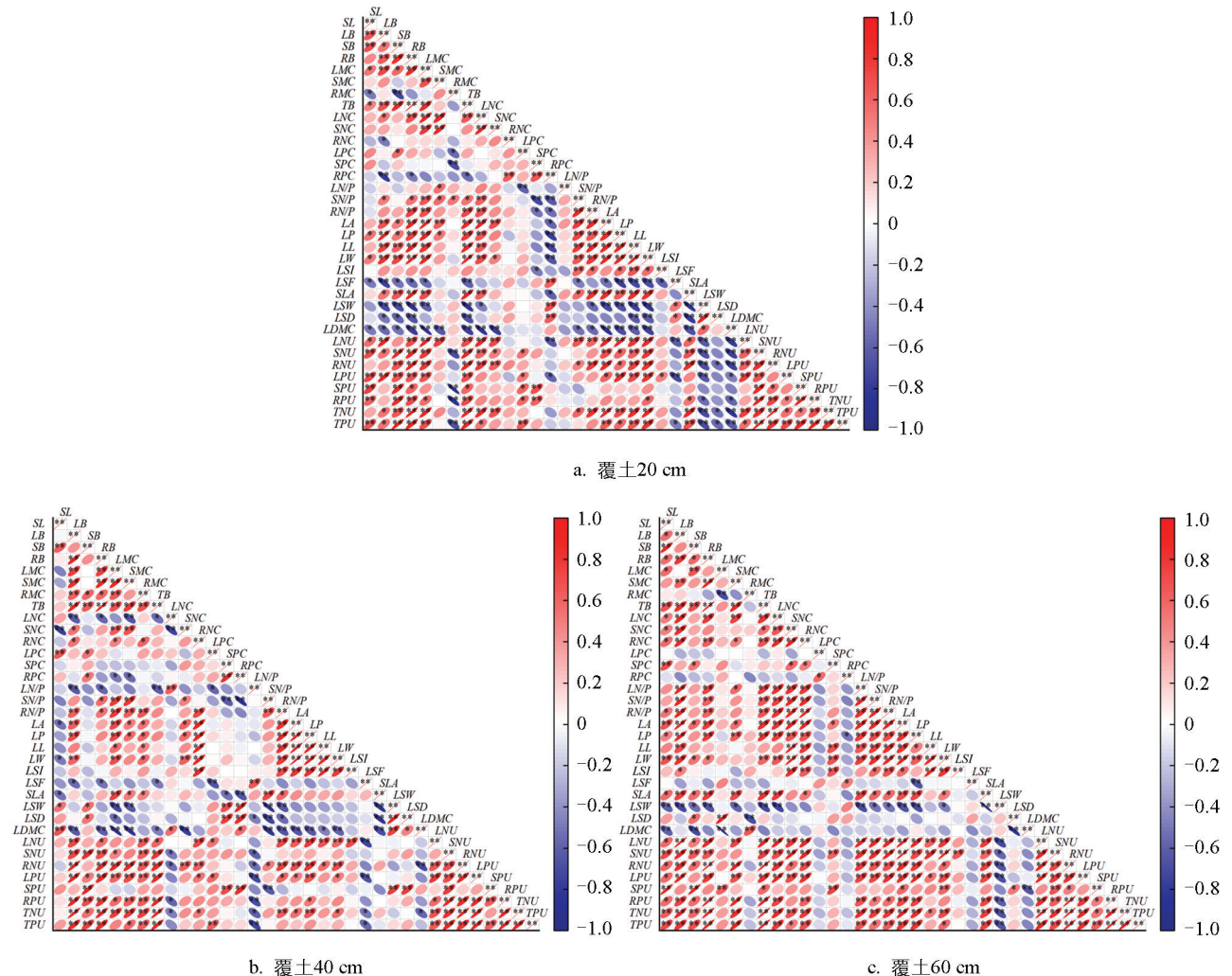


图 1 藤本植物叶功能性状特征和氮磷养分特征间相关性分析

2.5 藤本植物叶功能性状及氮磷养分特征综合评价

对不同覆土厚度下的 6 种藤本植物的 35 个指标进行主成分分析(图 2、表 5)。由图 2 可知：五叶地锦的主成分 1(PC1)和主成分 2(PC2)的贡献率分别为 53.47% 和 35.65%，累计贡献率达到 89.12%(图 2a)；PC1 轴(贡献率 53.47%)正方向主要与 *LA*、*SL*、*LSD* 和 *LP* 等形态建成指标紧密相关，而负方向则与 *LDMC*、*LSF*、*SLA* 等保守型性状关联，这表明 PC1 轴代表了该物种在“快速扩张”与“保守投资”之间的主要权衡策略；葛藤的主成分累计贡献率为 82.77%(图 2b)，PC1 轴(贡献率 54.63%)正方向聚集了 *SB*、

SL、*RPU* 和 *LNU* 等指标,表明 PC1 轴主导了其生物量分配与养分吸收的综合策略;常春藤的主成分累计贡献率为 78.29%(图 2c),其 PC1 轴(贡献率 53.56%)正方向与 *LA*、*SB*、*SNU* 和 *SPU* 等指标紧密相关,而 *LDMC*、*LNC*、*LNU* 等则位于负方向,这反映了常春藤的生长策略集中于光合器官构建与养分获取效率的协同变化;凌霄的主成分累计贡献率达 86.18%(图 2d),PC1 轴(贡献率 54.13%)正方向与 *TB*、*SB*、*LMC* 和 *RB* 等指标关联,负方向则与 *LDMC*、*RMC*、*RPC*、*LB*、*SLA* 等相关,此格局揭示了凌霄在响应环境时,其生物量积累、水分状况与叶片构建成本之间存在紧密的协同与权衡关系;常春油麻藤的主成分累计贡献率最高(90.01%),PC1 轴贡献率达 66.60%(图 2e),PC1 轴正方向强烈关联 *LPU*、*RNU*、*SN/P* 和 *TPU* 指标,说明磷养分的高效利用与体内化学计量平衡是该物种最核心的适应策略;爬山虎的 PC1 与 PC2 的贡献率较为均衡,累计达 87.31%(图 2f),PC1 轴(贡献率 47.03%)正方向与 *LP*、*SB*、*SNU* 和 *LB* 等相关,而负方向与 *RNC*、*SN/P* 等相关,这表明爬山虎的策略权衡同时涉及形态建成和体内养分的分配与循环。

藤本植物在不同覆土厚度下 2 个主成分的得分如表 5 所示。覆土厚度 20 cm 时,常春油麻藤和爬山虎在 PC1 负轴得分最高,葛藤和凌霄在 PC2 负轴得分最高,五叶地锦在 PC2 正轴的得分最高,说明在覆土厚度 20 cm 下五叶地锦长势较好,常春油麻藤、爬山虎、葛藤和凌霄长势较差;覆土厚度 40 cm 时,五叶地锦在 PC1 负轴得分最高,常春油麻藤在 PC2 负轴的得分最高,葛藤、凌霄和爬山虎在 PC2 正轴的得分最高,说明在覆土厚度 40 cm 下五叶地锦和常春油麻藤长势较弱,葛藤、凌霄和爬山虎长势较好;覆土厚度 60 cm 时,葛藤、常春藤和常春油麻藤在 PC1 正轴的得分最高,五叶地锦和爬山虎在 PC2 负轴的得分最高,说明在覆土厚度 60 cm 下葛藤、常春藤和常春油麻藤长势较好,但五叶地锦和爬山虎长势较弱。葛藤和常春油麻藤的 3 个覆土厚度的样本点沿 PC1 轴呈现梯度分布,揭示了厚度变化是驱动其策略转变的关键因子。其他藤本植物在不同覆土厚度下的点位分布较分散,显示出较高的表型可塑性。

利用相关公式: $F(\text{综合得分}) = F1(\text{主成分得分 } 1) \times \text{PC1 方差贡献率/累计贡献率} + F2(\text{主成分得分 } 2) \times \text{PC2 方差贡献率/累计贡献率}$,计算出不同覆土厚度下各藤本植物的叶功能性状和氮磷养分特征综合得分,并依据综合得分对其进行排序(表 6),发现常春油麻藤在 60 cm 覆土厚度下表现最佳,综合得分最高(1.05),排名第一;凌霄在 40 cm 覆土厚度下表现较好,综合得分 0.83,排名第四;葛藤在 60 cm 覆土厚度下综合得分 0.81,排名第五;五叶地锦在 20 cm 覆土厚度下表现较好,综合得分 0.79,排名第六;爬山虎在 40 cm 覆土厚度下表现较好,综合得分 0.91,排名第二,但在 60 cm 覆土厚度下表现较差,综合得分-0.30,排名第十一。

表 5 藤本植物在不同覆土厚度下的主成分 PC1 和 PC2 得分

植被类型	覆土厚度 20 cm		覆土厚度 40 cm		覆土厚度 60 cm	
	PC1 得分	PC2 得分	PC1 得分	PC2 得分	PC1 得分	PC2 得分
五叶地锦	0.54	1.17	-1.28	-0.06	0.74	-1.11
葛藤	-0.78	-1.01	-0.54	1.17	1.32	-0.17
常春藤	-0.66	0.69	-0.66	-0.60	1.33	-0.09
凌霄	0.66	-1.15	0.67	1.11	-1.32	0.04
常春油麻藤	-1.02	0.82	-0.23	-1.28	1.25	0.46
爬山虎	-1.30	0.20	0.80	1.03	0.50	-1.23

表 6 不同藤本植物叶功能性状和氮磷养分特征的综合评价和排名

覆土厚度	植被类型	主成分得分 1	主成分得分 2	综合得分	排序
20 cm	五叶地锦	0.32	0.47	0.79	6
	葛藤	-0.51	-0.35	-0.86	18
	常春藤	-0.45	0.21	-0.24	10
	凌霄	0.41	-0.42	-0.01	9
	常春油麻藤	-0.75	0.21	-0.54	13
	爬山虎	-0.70	0.09	-0.61	14
40 cm	五叶地锦	-0.77	-0.02	-0.79	16
	葛藤	-0.36	0.40	0.04	7
	常春藤	-0.45	-0.19	-0.64	15
	凌霄	0.42	0.41	0.83	4
	常春油麻藤	-0.17	-0.33	-0.50	12
	爬山虎	0.43	0.48	0.91	2
60 cm	五叶地锦	0.44	-0.44	0.00	8
	葛藤	0.87	-0.06	0.81	5
	常春藤	0.91	-0.03	0.88	3
	凌霄	-0.83	0.01	-0.82	17
	常春油麻藤	0.93	0.12	1.05	1
	爬山虎	0.27	-0.57	-0.30	11

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 藤本植物的生长情况对覆土厚度的响应

环境变化会引发植物一系列行为变化,其中形态和生物量的变化是评估植物对环境适应性的重要指标^[22]。在异质生境中,藤本植物通过调节生物量对不同器官的投资来适应环境变化,以确保器官生长发育,维持生存繁衍能力^[23]。本研究发现,五叶地锦和凌霄的叶生物量随覆土厚度的增加而增加,但根生物量反之,说明五叶地锦和凌霄协调生物量资源分配以适应外界环境变化,实现优化觅食行为。这可能是因为薄土层的环境下,五叶地锦和凌霄会增加根系生物量,以便扩大根系的吸收范围来获取更多的养分;相反,在厚土层中土壤养分更充足,五叶地锦和凌霄会减少对根系的投入,转而增加叶片的生物量用于提高光合作用,从而优化生长。此外,葛藤和常春油麻藤的叶生物量随覆土厚度的增加而增加,该结果与文献^[3]研究高寒区弃渣场植物地上生物量随着覆土厚度的增加而增加这一结果一致。由于环境资源有限,当植物增加某一器官的生物量投资时,必然会减少对其他器官的生物量投入^[24],而有限的环境资源导致植物各器官之间存在竞争,许多情况下植物会采用茎沉默策略以实现整体利益最大化^[25-26]。本研究中常春藤的茎生物量在覆土厚度 20 cm 和 40 cm 下显著低于叶生物量,但在覆土厚度 60 cm 下反之,在一定程度上说明当土壤资源减少时,常春藤会牺牲茎的投资来满足叶投资的稳定。五叶地锦和常春油麻藤在 20 cm 覆土厚度下茎生长迅速、攀岩能力强,更有利于矿区生态修复。凌霄在 60 cm 覆土厚度下根含水率最高,反映其对深层土壤水分利用能力较强。葛藤各部位生物量在 3 种覆土厚度处理下均高于其他藤本植物,而常春藤和爬山虎在 3 种覆土厚度下各项生长指标均较低,表明葛藤相较于常春藤和爬山虎更适合在该矿区生长。大多数植物叶片含水率占组织鲜质量的 65%~90%^[8],而本研究中凌霄在 3 种覆土厚度下的叶含水率

均在 65% 以下, 且其成熟叶片一般呈纸质化, 说明凌霄并不适于干旱地区种植。

3.1.2 藤本植物叶功能性状对覆土厚度的响应

叶经济谱系能够协同并量化一系列的叶功能性状指标, 反映植物在叶片结构成本与资源回报时间之间的权衡^[27]。根据叶经济谱系可将植物分为“快投资-回报”型(资源获取型)和“慢投资-回报”型(资源保守型)植物, 前者通常具有较高的比叶面积和氮含量, 而后者则往往具有较高的比叶质量和叶干物质含量^[28]。本研究中葛藤在覆土厚度 20 cm 下的叶面积、叶片长、叶片宽及比叶面积总体上高于其他 5 种植物, 但其比叶质量和叶干物质含量总体上低于其他藤本植物, 说明葛藤生长策略可能是通过较大、较薄的叶片和较低的干物质含量来快速扩大叶面积和提高光合效率, 适应覆盖土层较厚的环境, 属于“快投资-回报”型植物, 该结果与文献^[29]的研究一致。爬山虎在 20 cm 和 40 cm 覆土厚度下的叶面积、叶周长、叶片长和叶片宽总体上低于其他 5 种植物, 但其比叶质量、叶肉质化程度和叶干物质含量总体上高于其他藤本, 表明爬山虎在 20 cm 和 40 cm 覆土厚度下属于资源保守型植物, 其对资源和养分的利用效率高, 能将更多的养分投入叶片内部组织构建, 对环境有更强的耐受性、抗逆性, 但同时也降低了其光合作用能力^[5]。叶片的寿命与比叶质量呈显著正相关关系^[30], 因此葛藤在覆土厚度 20 cm 和 60 cm 下叶寿命相对较短, 而爬山虎在覆土厚度 20 cm 和 40 cm 下叶寿命较长。本研究中常春藤叶面积普遍较小, 但叶肉质化程度与叶干物质含量较高, 符合“慢投资-回报”型植物的特征^[28], 说明常春藤是资源保守型植物。

植物功能性状的相对稳定性和对外界环境变化的可塑性, 使其能够通过功能性状的变化反映植物在不同层面(从器官、物种、群落到生态系统)适应环境的策略和机制^[31]。本研究表明不同藤本植物的叶功能性状对覆土条件的响应具有物种特异性及环境依赖性。其中, 五叶地锦叶形状指数随覆土厚度的增加而增加, 而葛藤与之相反, 表明随覆土厚度的增加五叶地锦和葛藤会优先改变叶形来优化对水分和光照的利用。凌霄的叶形指数和叶形状因子随覆土厚度的增加而降低, 但叶干物质含量反之, 这些变化表明凌霄在更厚的覆土下采用了更加保守的资源配置策略, 减少了对叶片形态的投资, 减少不必要的能量消耗, 因此可以判断凌霄属于“慢投资-回报”型植物。常春油麻藤的叶面积、叶片长、叶片宽、叶形指数、叶形状因子、比叶面积和叶干物质含量总体上随覆土厚度增加而增加, 但比叶质量和叶肉质化程度反之, 这些特征表明常春油麻藤在不同覆土厚度下表现出更多的“快投资-回报”型特征, 这是因为覆土厚度增加导致资源供给充足, 从而降低了常春油麻藤对高代谢活力的需求, 促使其减少叶片的光合作用投资, 增加叶干质量投资的回报, 并通过缩短叶寿命来优化资源使用^[32]。爬山虎的叶面积、叶周长、叶片长和叶片宽随覆土厚度增加总体上呈增加趋势, 但叶肉质化程度随覆土厚度增加而降低, 这些特征表明爬山虎在覆土厚度较大时表现出更高的资源获取能力, 同时叶肉质化程度较低意味着其生长方式更加注重快速的资源获取而非长期的资源保守, 这是因为随着覆土厚度的增加, 爬山虎并不再依赖较厚的叶肉来应对水分和养分压力, 节省了用于增加叶片面积和比叶面积的资源, 提高了光合作用效率^[33]。这些适应机制帮助藤本植物在变化的环境中维持生长和繁殖的竞争力。

3.1.3 藤本植物氮磷养分策略对覆土厚度的响应

氮和磷是植物体重要的组成成分, 决定了植物的光合作用、生长、繁殖和其他生理过程, 被用来评估植物的生长状况是否受到氮元素或磷元素供应的限制^[34-35]。6 种藤本植物间的养分分配特征和吸收量存在显著差异, 这与植物自身特性有关, 说明不同的藤本植物对资源的利用率以及生存策略存在一定差异。文献^[36]分析了植物各个器官多种功能元素的异速分配规律, 发现这些功能元素在不同器官的分配具有一定的保守性。本研究发现五叶地锦在覆土厚度 60 cm 下茎氮含量和氮磷比相较于覆土厚度 20 cm 和 40 cm 显著降低, 与其生长策略和养分分配机制有关。根氮磷比显著高于其他植物, 表明其根系优先吸收氮源。随着覆土厚度增加, 五叶地锦的茎、根氮磷含量提升, 茎氮磷比下降, 植物会根据不同部位的生理需求来调节氮磷的分配, 通常植物根部用于吸收和储存养分, 茎部则更多地参与传输和支持功能, 而磷元素支持其细胞分裂和组织扩展^[37], 因此在土壤中氮磷供给增多时, 五叶地锦倾向于分配更多的养分用于茎的生长和结构支持, 从而使得茎部的氮含量减少, 导致氮磷比下降。葛藤和常春油麻藤在覆土厚度 60 cm 下根氮含

量高于其他植物,这是因为葛藤和常春油麻藤是豆科植物,其根系具备较强的氮吸收能力,能有效地从土壤中获取更多的氮^[38],导致其叶和茎中的氮含量显著高于其他植物。随着覆土厚度的增加,土壤中养分的供应量增加,磷在土壤中相对较难移动和被吸收,促进了葛藤根部和茎部的养分积累,尤其是磷元素在根部的富集。爬山虎的叶氮磷含量在一定覆土厚度下显著增加,但其根氮磷含量相反,这是由于爬山虎在生长过程中,叶片作为光合作用的主要部位优先吸收氮磷以支持蛋白质合成和能量储存,导致叶部氮磷含量随土壤养分浓度增加而显著提高,而根部的氮磷含量相对下降,是因为爬山虎在养分分配上倾向于优先供给叶片,促进其快速生长和光合作用。

文献^[34]的研究表明,叶片氮磷比大于 16 时,植物生长受到磷元素的限制;氮磷比小于 14 时,植物生长受到氮元素的限制;氮磷比介于 14~16 时,植物生长受氮、磷元素共同限制。本研究中,不同覆土厚度下,6 种藤本植物的叶氮磷比均低于 14,说明本试验区藤本植物生长受到氮的限制。本研究发现,在覆土 20 cm 覆土厚度下,五叶地锦的氮磷吸收量显著高于其他藤本植物,尤其是在茎和根上,葛藤和常春油麻藤的叶氮吸收量较高;在 60 cm 覆土厚度下,葛藤和常春油麻藤的多数部位氮磷吸收量较高。表明五叶地锦在较薄土层中展现出更强的适应性,能更好地利用土壤中的养分,而葛藤和常春油麻藤能够适应较深的土层,并且其根系能够在较深的土壤中寻找更多的养分,这有助于提高其氮磷吸收量。凌霄和爬山虎的叶氮素吸收量随着覆土厚度的增加呈上升趋势,而五叶地锦和常春藤的氮素吸收量则呈下降趋势,表明凌霄和爬山虎更适应较肥沃的土壤环境,能更好地利用土壤中的氮,而五叶地锦和常春藤在较贫瘠或养分相对较少的环境中生长较好,其对氮的需求较低。总而言之,植被类型与覆土厚度显著影响藤本植物氮磷养分分配和吸收特征,植被类型的生理特性和土壤养分的可利用性是导致这些差异的关键原因。

3.1.4 藤本植物叶功能性状与氮磷养分特征的相关性

从藤本植物叶功能性状与养分特征间相关性结果可以看出,不同覆土厚度下各藤本植物的叶功能性状和氮磷养分性状的相关性各不相同。在覆土 20 cm 和 40 cm 时,叶含水率与总生物量、叶周长、叶片宽、叶磷素吸收量和总磷吸收量呈极显著正相关,说明藤本植物在面对养分贫瘠的外界环境时叶片含水率降低,更倾向于构建防御组织以抵抗外界环境胁迫^[5],但也减少了植物对磷养分的吸收量。本研究发现比叶质量和叶干物质含量与叶面积、叶周长、叶片长、叶片宽、叶氮磷比、根氮磷比、叶氮含量、叶氮素吸收量、茎氮素吸收量、根氮素吸收量、叶磷素吸收量、根磷素吸收量、总氮吸收量和总磷吸收量呈显著负相关,说明高氮磷吸收量的植物往往表现为较薄的叶片,注重快速生长。这是因为藤本植物更多地将氮、磷等养分用于支持快速的生长而非增加叶片的结构密度。在覆土 40 cm 时,叶面积、叶周长、叶片长和叶片宽与叶氮素吸收量、根氮素吸收量、叶磷素吸收量和总氮吸收量呈显著正相关,表明了氮和磷元素在叶片发育中的重要作用。覆土 60 cm 时,叶生物量和根生物量与叶氮含量、根氮含量、叶氮磷比、茎氮磷比、根氮磷比、叶面积、叶周长、比叶面积、叶氮素吸收量、根氮素吸收量、叶磷素吸收量、根磷素吸收量、总氮吸收量和总磷吸收量呈极显著正相关,这是因为养分充足供应能够促进植物的生长和光合作用。然而,比叶质量与生物量之间的负相关关系表明植物在养分充足时倾向于增加叶片和根系的生长而非单纯增加干物质的积累。

植物不同器官在养分循环中扮演不同角色,各器官对养分元素的利用具有一定的相关性^[39]。本研究中不同覆土厚度下的叶氮素吸收量和茎氮素吸收量与根氮素吸收量、叶磷素吸收量、总氮吸收量和总磷吸收量呈极显著正相关;总氮吸收量与总磷吸收量呈极显著正相关。说明根氮素吸收量的增加通常会带动茎、叶等其他部位氮素的增加。植物为了维持平衡和促进健康生长,氮和磷的吸收需求相互依赖,磷不仅在能量传递和细胞分裂中扮演重要角色,也参与光合作用的调节^[37],因此磷的吸收能够促进叶片和茎部的氮素吸收,尤其在植物生长旺盛时期,叶片和茎部对于氮磷的需求往往是同步增加的,该结果与文献^[40]的研究结果一致。通过对不同覆土厚度下各藤本植物的叶功能性状和氮磷养分特征进行主成分分析和综合得分可知,在覆土 20 cm 时,五叶地锦生长状况最佳,爬山虎和凌霄在覆土 40 cm 时生长优势较高,葛藤、常春藤和常春油麻藤在覆土 60 cm 时的综合得分最高,表现出较好的适应性和生长优势。

3.2 结论

覆土厚度对藤本植物的生长和适应性有显著影响。不同藤本植物种类表现出不同的适应策略,如葛藤和常春油麻藤为资源获取型,而爬山虎和常春藤则为资源保守型。此外,不同覆土厚度下的 6 种藤本植物叶氮磷比数据表明该试验地栽植的藤本植物生长受到氮限制。在薄土层,五叶地锦具有较强的生长优势,葛藤、爬山虎、常春藤、凌霄和常春油麻藤适合栽植在较深土层中。总而言之,藤本植物通过调整生物量分配、叶片形态和养分吸收策略来适应不同覆土厚度以提升生长和竞争能力。

参考文献:

- [1] 多鑫,徐占军,杨璐,等.露天煤矿复垦土壤活性有机碳影响因素及管控策略[J].自然资源学报,2024,39(11):2735-2752.
- [2] 冯金超,杨侨,马琳娜,等.扎哈淖尔露天煤矿植被修复及降本增效潜力研究[J].测绘科学,2025,50(1):64-73.
- [3] 孙荣,吴建波,王鑫喜,等.高寒区裸石弃渣场植被恢复中覆土厚度对土壤细菌群落组成和功能的影响[J].天津师范大学学报(自然科学版),2025,45(1):27-33.
- [4] 李宏林,梁德飞,马丽,等.不同恢复措施和生境对高寒矿区渣山植被恢复的影响[J].青海科技,2021,28(5):34-41.
- [5] 刘新月,王立平,刘春和,等.北京百花山华北落叶松群落主要木本植物的叶性状变异及适应策略[J].林业科学,2023,59(7):12-23.
- [6] 管瑛,索朗玉珍,马竞文,等.降雨极端化对喀斯特草本植物功能性状的影响[J].西南大学学报(自然科学版),2022,44(9):20-31.
- [7] FICKEN C D, ROONEY R C. Linking Plant Conservatism Scores to Plant Functional Traits [J]. Ecological Indicators, 2020, 115: 106376.
- [8] 罗忠,党浩轩,梁李欣,等.闽楠演替过程中叶功能性状特征及其可塑性[J].中南林业科技大学学报,2022,42(12):133-141.
- [9] REN Y W, LI J L, ZHANG S D, et al. Leaf Trait Networks of Subtropical Woody Plants Weaken Along an Elevation Gradient [J]. Plant Science, 2025, 352: 112340.
- [10] JAGER M M, RICHARDSON S J, BELLINGHAM P J, et al. Soil Fertility Induces Coordinated Responses of Multiple Independent Functional Traits [J]. Journal of Ecology, 2015, 103(2): 374-385.
- [11] 冯莉绚,黄志群,贾辉,等.邻体竞争和土壤对植物叶功能性状及其种内变异的影响[J].森林与环境学报,2024,44(6):608-618.
- [12] 李祖婵,玄锦,王秋雪,等.闽江江心洲不同生境植物叶功能性状差异及其对土壤特性的响应[J].生态学报,2024,44(14):6301-6316.
- [13] 袁喆,翁殊斐,王琳琅.广州园林绿地木质藤本景观美景度评价[J].西北林学院学报,2015,30(4):301-306.
- [14] 李卓冉,翁殊斐,姜飘,等.广东省藤本植物地理成分和园林应用分析[J].热带亚热带植物学报,2024,32(6):807-812.
- [15] 王忠伟,张科萌,邬娜,等.河南鸡公山落叶阔叶林藤本植物对林下物种多样性的影响[J].云南农业大学学报(自然科学),2020,35(3):476-482.
- [16] LOMWONG N, CHANTHORN W, NATHALANG A, et al. Liana Abundance and Diversity Increase Along a Successional Gradient, Even with Homogeneous Closed Canopy [J]. Forest Ecology and Management, 2023, 534: 120878.
- [17] 夏常英,吴学学,傅连中,等.梵净山地区藤本植物的多样性及区系特征[J].广西植物,2020,40(2):264-271.
- [18] 胡亮.喜马拉雅地区藤本植物多样性及其地理格局[J].生物多样性,2016,24(10):1105-1116.
- [19] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科学技术出版社,2000.
- [20] 张凤琪,玉米提·哈力,石义强,等.不同林龄胡杨叶功能性状对土壤理化性质的响应[J].西北林学院学报,2024,39(6):79-86.
- [21] 唐雨欣,王小娜,黄百莹,等.青藏高原不同森林类型叶片、凋落物和土壤碳、氮、磷养分循环特征[J].兰州大学学报(自然科学版),2025,61(1):58-64.

- [22] 曾辰午, 李宗峰, 张学朝, 等. 喀斯特石漠化地区苔藓植物功能性状与微生境的关系 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(3): 131-137.
- [23] 姜飘, 朱锦心, 翁殊斐, 等. 藤本植物表型可塑性研究综述 [J]. 世界林业研究, 2023, 36(6): 14-19.
- [24] 范宏坤, 曾涛, 金光泽, 等. 小兴安岭不同生长型阔叶植物叶性状变异及权衡 [J]. 植物生态学报, 2024, 48(3): 364-376.
- [25] TRILLMICH F, GEIBLER E, GUENTHER A. Senescence and Costs of Reproduction in the Life History of a Small Precocious Species [J]. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(12): 7069-7079.
- [26] 陈哲. 高寒草地不同生境、干扰下植物资源分配与形态可塑性 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [27] 陈莹婷, 许振柱. 植物叶经济谱的研究进展 [J]. 植物生态学报, 2014, 38(10): 1135-1153.
- [28] WRIGHT I J, REICH P B, WESTOBY M, et al. The Worldwide Leaf Economics Spectrum [J]. *Nature*, 2004, 428(6985): 821-827.
- [29] 王钰雯, 何梅香, 江国东, 等. 乌蒙乡不同海拔梯度刺叶高山栎叶功能性状特征及其对环境因子的响应 [J]. 生态学报, 2024, 44(16): 7238-7248.
- [30] ONODA Y, WRIGHT I J, EVANS J R, et al. Physiological and Structural Tradeoffs Underlying the Leaf Economics Spectrum [J]. *New Phytologist*, 2017, 214(4): 1447-1463.
- [31] HE N P, LIU C C, PIAO S L, et al. Ecosystem Traits Linking Functional Traits to Macroecology [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2019, 34(3): 200-210.
- [32] NADAL M, CLEMENTE-MORENO M J, PERERA-CASTRO A V, et al. Incorporating Pressure-Volume Traits into the Leaf Economics Spectrum [J]. *Ecology Letters*, 2023, 26(4): 549-562.
- [33] ZHANG Y, LI Z B, HAN J C, et al. Effect of Covering-Soil Thickness on Crop Growth on Bare Rock and Gravel Land in an Ecological Restoration Project [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2018, 9(5): 484-492.
- [34] GÜSEWELL S. N : P Ratios in Terrestrial Plants: Variation and Functional Significance [J]. *New Phytologist*, 2004, 164(2): 243-266.
- [35] 李瑞, 单立山, 解婷婷, 等. 典型荒漠灌木叶片功能性状特征随降水梯度的变化研究 [J]. 干旱区研究, 2023, 40(3): 425-435.
- [36] ZHAO N, YU G R, WANG Q F, et al. Conservative Allocation Strategy of Multiple Nutrients Among Major Plant Organs: From Species to Community [J]. *Journal of Ecology*, 2020, 108(1): 267-278.
- [37] 孙建丽, 吴俊文, 赵娟钧, 等. 幼龄华山松不同部位碳氮磷生态化学计量的季节变化 [J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(3): 563-574.
- [38] 郝建平, 王峰, 宋强, 等. 山西省野葛种质资源分布与植物学性状研究 [J]. 植物遗传资源学报, 2016, 17(1): 39-44.
- [39] 谭长强, 申文辉, 郑威, 等. 我国南亚热带乡土珍贵树种人工幼林不同器官营养元素储量及分配特征 [J]. 东北林业大学学报, 2024, 52(11): 31-39.
- [40] 李娜娜, 黄健, 吴镜辉, 等. 马尾松林下套种阔叶树的叶功能性状和化学计量特征季节动态研究 [J]. 西北林学院学报, 2024, 39(6): 87-94.

责任编辑 廖坤
崔玉洁