

DOI: 10.20103/j.stxb.202407241743

李琰, 石兆勇, 靖慢慢, 韦文敬, 马路平, 高旭硕. 菌根类型对木本植物不同器官碳含量的影响及机制. 生态学报, 2025, 45(8): 3995-4008.

Li Y, Shi Z Y, Jing M M, Wei W J, Ma L P, Gao X S. The variations and mechanisms of carbon concentration among different organs of woody plants associated with mycorrhizal types. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(8): 3995-4008.

菌根类型对木本植物不同器官碳含量的影响及机制

李 琰^{1,2,3}, 石兆勇^{1,2,3,*}, 靖慢慢^{1,2,3}, 韦文敬^{1,2,3}, 马路平^{1,2,3}, 高旭硕^{1,2,3}

1 河南科技大学农学院, 洛阳 471000

2 河南科技大学河南省乡村人居环境工程中心, 洛阳 471000

3 河南科技大学洛阳市共生微生物与绿色发展重点实验室, 洛阳 471000

摘要: 植物作为重要的固碳途径和储碳库, 对减缓气候变化发挥着关键作用。菌根作为植物的互惠共生体, 影响着植物对碳的固定和储存, 同时, 不同类型菌根对植物碳含量发挥着各异的影响。然而, 关于不同菌根类型植物碳含量的影响机制尚不明确, 导致难以估算和预测气候变化下菌根对植物碳含量的影响。因此, 在全球范围内, 针对木本植物, 系统研究了 3 种常见菌根类型植物(丛枝菌根(AM)、外生菌根(ECM)和 AM+ECM)不同器官(茎、树枝、树皮、粗根和细根)碳含量的差异及其对地理、温度和降水因素的响应。结果表明: 菌根类型对植物碳含量有显著影响。在植物器官(茎、树枝、树皮、粗根、细根)中, ECM 植物碳含量(49.2%, 48.5%, 50.3%, 48.1%, 49.0%)显著高于 AM 植物(47.1%, 45.5%, 44.5%, 44.7%, 47.4%)和 AM+ECM 植物(47.4%, 47.3%, 48.2%, 44.4%, 46.3%)。其次不同菌根类型植物具有显著的纬度分布梯度, AM 植物主要分布在低纬度区域, 而 ECM 植物主要分布在高纬度区域。菌根类型影响着植物各器官碳含量和环境因素之间的关系, AM 植物碳含量主要受温度因素的影响, 而 ECM 和 AM+ECM 植物碳含量主要受降水因素的影响。可见菌根类型在调节植物碳含量方面有着重要作用, 且影响着植物碳含量对气候变化的响应, 并为预测植物碳含量提供科学依据, 从而更好地应对气候变化带来的挑战。

关键词: 碳含量; 菌根类型; 植物器官; 地理; 温度; 降水

The variations and mechanisms of carbon concentration among different organs of woody plants associated with mycorrhizal types

LI Yan^{1,2,3}, SHI Zhaoyong^{1,2,3,*}, JING Manman^{1,2,3}, WEI Wenjing^{1,2,3}, MA Luping^{1,2,3}, GAO Xushuo^{1,2,3}

1 College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, China

2 Henan Rural Human Settlements Engineering Center, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, China

3 Luoyang Key Laboratory of Symbiosis Microorganism and Green Development, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, China

Abstract: Plants, serving as vital conduits for carbon sequestration and acting as carbon sinks, are pivotal in the mitigation of climate change. Mycorrhizae, as mutualistic symbionts of plants, affect plant carbon fixation and sequestration. Meanwhile, different types of mycorrhizae have varying effects on the carbon concentration of plants. The study shows that AM plants have the highest species richness, but ECM plants account for more than 60% of the carbon storage of terrestrial ecosystems. However, the mechanisms through which different mycorrhizal types affect plant carbon concentration remain unclear, complicating the estimation and prediction of mycorrhizal effects on plant carbon concentration in a changing climate. Therefore, we built a new database based on Paroshy's data on the carbon concentration of major species in different climate zones around the world, this study systematically investigated the differences in carbon concentration among three common mycorrhizal types (AM, ECM, and AM+ECM) in different organs of woody plants (stem, branch, bark, coarse root and fine root) and their reactions to geographic, temperature and precipitation variables. The results showed that

基金项目: 国家自然科学基金项目(32171620); 河南省科技攻关项目(232102111005); 海南省重点研发项目(ZDYF2024XDNY172)

收稿日期: 2024-07-24; **网络出版日期:** 2025-01-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shizy1116@126.com

the type of mycorrhizal had a significant effect on plant carbon concentration. The carbon concentration of ECM plants (49.2%, 48.5%, 50.3%, 48.1%, 49.0%) was significantly higher than that of AM plants (47.1%, 45.5%, 44.5%, 44.7%, 47.4%) and AM+ECM plants (47.4%, 47.3%, 48.2%, 44.4%, 46.3%). Furthermore, a pronounced latitudinal distribution gradient was discerned among the distinct mycorrhizal types, with AM plants predominantly found in regions of lower latitude, in contrast to ECM plants, which were predominantly situated in higher latitude regions. To be more specific, the carbon concentration in the stem, branch, and coarse root of AM plants exhibits a trend of decreasing and then increasing with the augmentation of latitude. Whereas, the carbon concentration in the aboveground parts of ECM plants demonstrates a linear positive correlation with latitude. Furthermore, the carbon concentration in the stems, bark, and coarse roots of AM+ECM plant exhibits a significant trend of variation with respect to latitude. The mycorrhizal associations were also found to modulate the correlation between the carbon concentration in various plant organs and environmental parameters. Specifically, the carbon concentration in AM plants was predominantly influenced by temperature, whereas in ECM and AM+ECM plants, precipitation was identified as the primary factor affecting carbon concentration. These results underscore the essential role of mycorrhizal types in modulating plant carbon concentration and dictating plant responses to climate change, furnishing a scientific foundation for forecasting plant carbon concentration and more effectively tackling the challenges posed by climate change.

Key Words: carbon concentration; mycorrhizal type; plant organ; geography; temperature; precipitation

植物碳含量是评估其固碳潜力的关键指标^[1],它直接关系到植物通过光合作用固定二氧化碳的能力,这一过程对于减缓全球气候变化具有重要意义^[2]。近些年来,由于人为活动的增加导致大气中二氧化碳浓度不断上升^[3-4],这不仅加剧了全球变暖也对生态系统的稳定性和生物多样性构成了威胁^[5],以植物为主的生物固碳方式被认为是减缓大气二氧化碳浓度上升和改善全球气候变化的有效途径^[6]。植物不同器官碳含量的差异反映了植物对环境变化的适应性,通过调整碳氮比、碳含量的空间分布,使植物能够更好地适应不同的环境条件,优化其生长和生存策略^[7]。越来越多的研究表明碳含量在植物器官之间存在显著差异^[8],了解各器官碳含量有助于更准确地评估植物和生态系统的碳储存能力^[9],这对于理解和预测全球碳循环至关重要。

然而,植物碳含量并非孤立存在,是环境因素、生物因素等共同影响的结果。研究表明植物群落功能多样性是陆地生态系统碳积累的主要驱动力^[10]。非生物因素,如温度、降水、地理因素都对植物碳含量有显著影响^[11]。此外,生物因素也不容忽视,植物碳含量因生活型不同而存在显著差异^[8],尤其是菌根共生体与植物之间的相互作用^[12],Read指出不同菌根类型在生态系统的碳和养分循环中扮演者不同角色并发挥着各异的影响和作用^[13]。

菌根是土壤中的真菌与植物根系形成的互惠共生体^[14],在陆地植物中广泛存在^[15]。菌根真菌影响着植物的生长发育以及养分获取^[16],并与植物共同进化^[17]。具体来说,植物为菌根真菌提供光合来源的碳水化合物,而菌根真菌为植物提供营养和水分^[18]。丛枝菌根 (Arbuscular mycorrhiza, AM) 和外生菌根 (Ectomycorrhiza, ECM) 是分布最广泛且影响最大的两种菌根类型^[19]。AM 真菌能与超过 80% 的陆生植物形成共生关系^[20],AM 植物是所有生物群落中最丰富的植物类型^[21]。ECM 真菌主要由担子菌门 (Basidiomycota)、子囊菌门 (Ascomycota) 以及毛霉菌门 (Mucoromycota) 进化而来^[22],被认为是森林生态系统中碳和养分循环中的关键微生物群落^[23]。鉴于 AM 和 ECM 真菌与植物共生特性的异同,研究者提出了菌根营养经济框架理论^[24],以明确 AM 和 ECM 植物在陆地生态系统碳和养分循环中的不同影响和作用。Luo 等的研究进一步证实了不同菌根真菌对森林碳储量分布的调节作用,其中 AM 丛枝菌根真菌的物种丰富度最高,以 ECM 树种为主导的森林占据地上碳储量的 64.4%^[25]。

当前研究主要集中于菌根对植物地上部和地下部生物量碳的影响^[26],Jiang 等在研究中发表了关于菌根类型和环境如何影响根系性状的新见解^[27],以及 Jing 等在研究中证实不同菌根真菌在调节植物细根碳含量存在差异^[28],这些发现对于理解森林生态系统中的碳和营养循环具有重要意义。尽管如此,关于菌根类型对

植物各器官碳含量的系统研究尚未见报道。鉴于此,本研究构建全球不同菌根类型植物碳含量数据库,结合环境因素,旨在探讨不同菌根类型植物各器官碳含量的差异及其机制,并在未来气候变化下预测植物碳含量提供理论依据。

1 材料方法

1.1 数据的获取与整理

本研究数据来源于(1)Paroshy 建立的全球不同气候区主要物种碳含量的数据库(TRY Plant Trait Database, <https://www.try-db.org/TryWeb/Home.php>, dataset ID 728, doi:10.17871/TRY.78)^[11],该数据库包含全球 415 个主要物种的 1145 个木本植物的碳含量观测值,每个观测值都有完整的环境因子数据与之对应。(2)根据国家知识基础设施数据库(China national knowledge infrastructure, CNKI)和 SCI 科学引文数据库(Web of Science)对(1)所述的数据库进行补充,以“carbon concentration”和“plant tissue”为主题(topic),检索 2022—2024 年的文章(article),共计 1152 条文献,其中有效文献需满足以下条件:1)包含活的木本植物各组织碳含量。2)具体到树种。共提取到有效数据 1438 条,数据包含茎、树枝、树皮、粗根、细根碳含量、纬度、经度、以及温度和降水等相关指标。

为了研究菌根类型对木本植物碳含量的影响,针对数据库中的所有物种,根据已发表文献补充了其菌根类型数据^[20],最终确定了数据库中 2524 个植物的菌根类型。参考 Soudzilovskaia 等^[18]和石兆勇等^[14]对不同菌根类型植物的划分方法,将植物划分为 AM、ECM 和 AM+ECM 三大类植物,并针对不同菌根类型树木研究较多的茎、树枝、树皮、粗根、细根五个器官碳含量的差异及其机制进行了深入探究。本研究共包含了 1386 条 AM 植物数据、443 条 ECM 植物数据和 695 条 AM+ECM 植物数据。

1.2 数据处理

为了确定全球范围内植物各器官碳含量在不同菌根类型之间的差异,采用 SPSS 27.0 软件进行单因素(One-way ANOVA)方差分析,使用邓肯检验(Duncan's test)来确定不同菌根类型植物碳含量之间的显著差异,基于 SPSS 的分析结果利用 Origin 软件作图。为了明确不同菌根类型植物碳含量与环境因子之间的关系,采用 R 4.3.3 软件 MASS 包 stepAIC 函数进行逐步回归(Stepwise Regression)做变量筛选,根据最优方程确定对碳含量影响最显著的因子并使用 Car 包进行 VIF(Variance inflation factor)共线性诊断。其次为进一步明确不同菌根类型植物各器官碳含量与环境因子(纬度、经度、等温性、温度季节性变化、年平均降水量、降水季节性变化)之间的关系,使用 Origin 软件进行回归分析。在最后使用 R 软件 plspm 包构建结构方程模型(Structural Equation Modeling, SEM)分析各变量间及其和碳含量之间的关系,并基于 SEM 数据分析结果利用 Microsoft PowerPoint 进行作图。

2 结果与分析

2.1 菌根类型对植物各器官碳含量的影响

总体上来看,三种菌根类型的植物各器官碳含量都主要集中在 30%—70%之间(图 1)。在植物各器官(茎、树枝、树皮、粗根、细根),全部呈现出 ECM 植物碳含量(49.2%、48.5%、50.3%、48.1%、49.0%)显著高于 AM 植物(47.1%、45.5%、44.5%、44.7%、47.4%)和 AM+ECM 植物(47.4%、47.3%、48.2%、44.4%、46.3%)。其次在树枝和树皮中,AM+ECM 植物碳含量(47.3%、48.2%)显著高于 AM 植物(45.5%、44.5%)。而在茎、粗根、细根中,AM 植物和 AM+ECM 植物碳含量没有显著差异。

通过数据处理得到逐步回归分析(表 1),菌根类型、纬度、年平均降水量、等温性、温度季节性变化、降水季节性变化对植物碳含量有显著正向影响;经度对植物碳含量有显著负向影响。七个因素的赤池信息量准则(AIC)指标均在最优方程的模型范围内,根据方差膨胀因子(VIF)指标了解到各因素间均不存在共线问题。

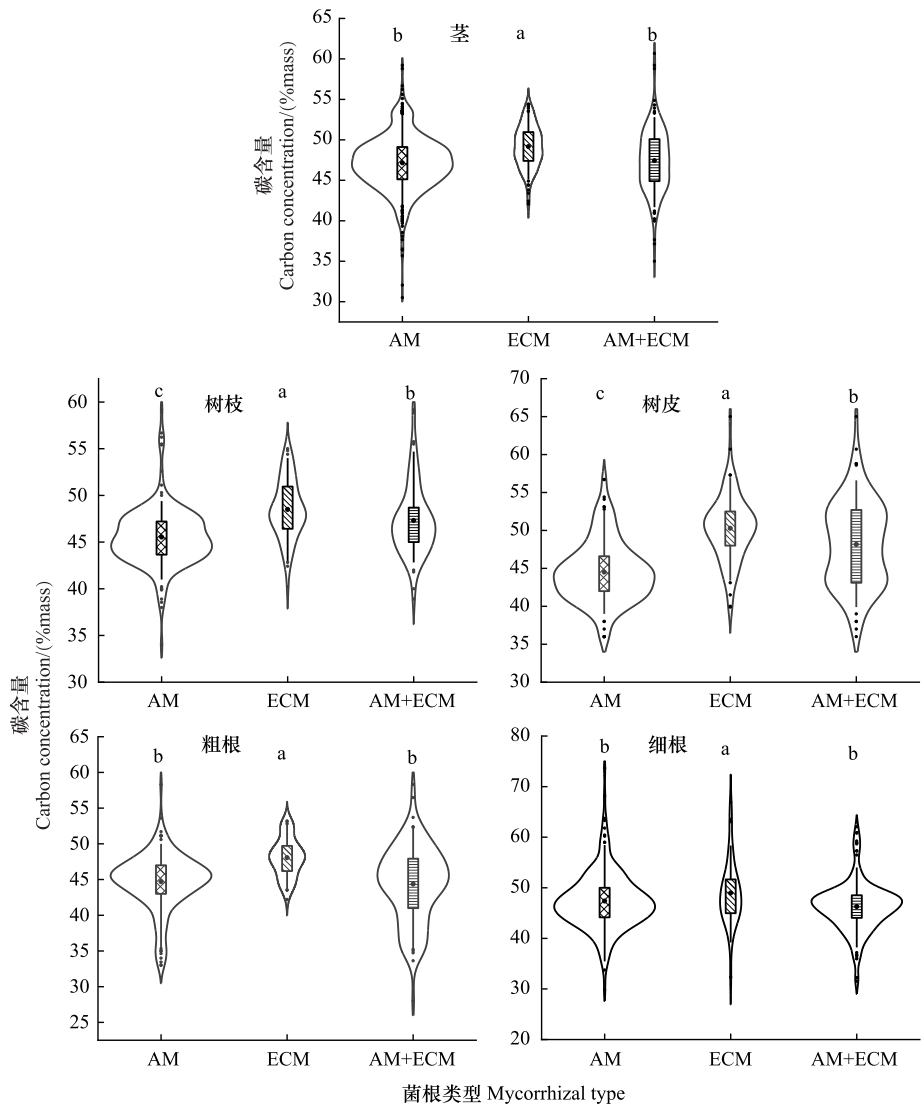


图 1 不同菌根类型植物各器官碳含量的差异

Fig.1 The difference of carbon concentration in various organs of plants with different mycorrhizal types

AM: 丛枝菌根 Arbuscular mycorrhiza; ECM: 外生菌根 Ectomycorrhiza; 不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)

表 1 菌根类型及环境因子与植物碳含量的逐步回归分析

Table 1 Stepwise regression analysis of mycorrhizal types, environmental factors and plant carbon concentration

因素 Factor	未标准化系数 Unstandardized coefficients		标准化系数 Standardized coefficients	t	P	AIC	VIF
	B	SE	Beta				
菌根类型 Mycorrhiza type	0.993	0.145	0.197	6.841	<0.001	3472.0	1.126
纬度 Latitude	0.129	0.014	0.442	9.099	<0.001	3508.5	1.980
经度 Longitude	-0.033	0.003	-0.301	-11.160	<0.001	3547.5	1.099
年平均降水量 Mean annual precipitation	0.001	0.001	0.208	6.066	<0.001	3464.3	1.399
等温性 Isothermality	0.092	0.013	0.433	6.922	<0.001	3475.1	2.552
温度季节性变化 Temperature seasonality	0.003	0.001	0.320	5.098	<0.001	3453.6	2.555
降水季节性变化 Precipitation seasonality	0.032	0.004	0.227	8.161	<0.001	3493.1	1.134

总体模型 $F = 50.461, P < 0.001$, Adjusted R-squared: 0.208, Step: AIC = 3429.71; B: 未标准化系数 Unstandardized coefficient; SE: 标准误 Standard error; Beta: 标准化系数 Standardized coefficient; t : t 检验 t -test; P : 显著性水平 P -value; AIC: 赤池信息量准则 Akaike information criterion; VIF: 方差膨胀因子 Variance inflation factor

2.2 地理因素对不同菌根类型植物各器官碳含量的影响

通过对植物碳含量进行数据处理得到不同菌根类型植物各器官碳含量与纬度和经度的线性回归图(图2、图3)。回归分析表明(图2),AM 植物主要分别在低纬度区域,ECM 和 AM+ECM 植物主要分布在高纬度区域。在茎、树枝、粗根中(图2),AM 植物碳含量随纬度的增加呈现出先降低后增加的趋势($P<0.01$),其树皮碳含量随纬度的增加而增加($P<0.01$);ECM 植物地上部(茎、树枝、树皮)碳含量与纬度呈现线性正相关($P<0.05$ 或 $P<0.01$);AM+ECM 植物大多数器官(茎、树皮、粗根)随纬度有显著的变化趋势,其茎碳含量随纬度的增加呈现出先增加后降低的趋势($P<0.05$),树皮、粗根碳含量与纬度呈现线性正相关($P<0.05$ 或 $P<0.01$)。然而在细根中,三种菌根类型植物碳含量与纬度间均没有显著的变化趋势。

不同菌根类型植物的碳含量在各器官中与经度存在各异的变化趋势(图3)。结果表明,AM 植物碳含量在树皮和粗根中随经度的变化有相反的变化趋势,其树皮碳含量与经度显著正相关($P<0.01$),这与粗根中的

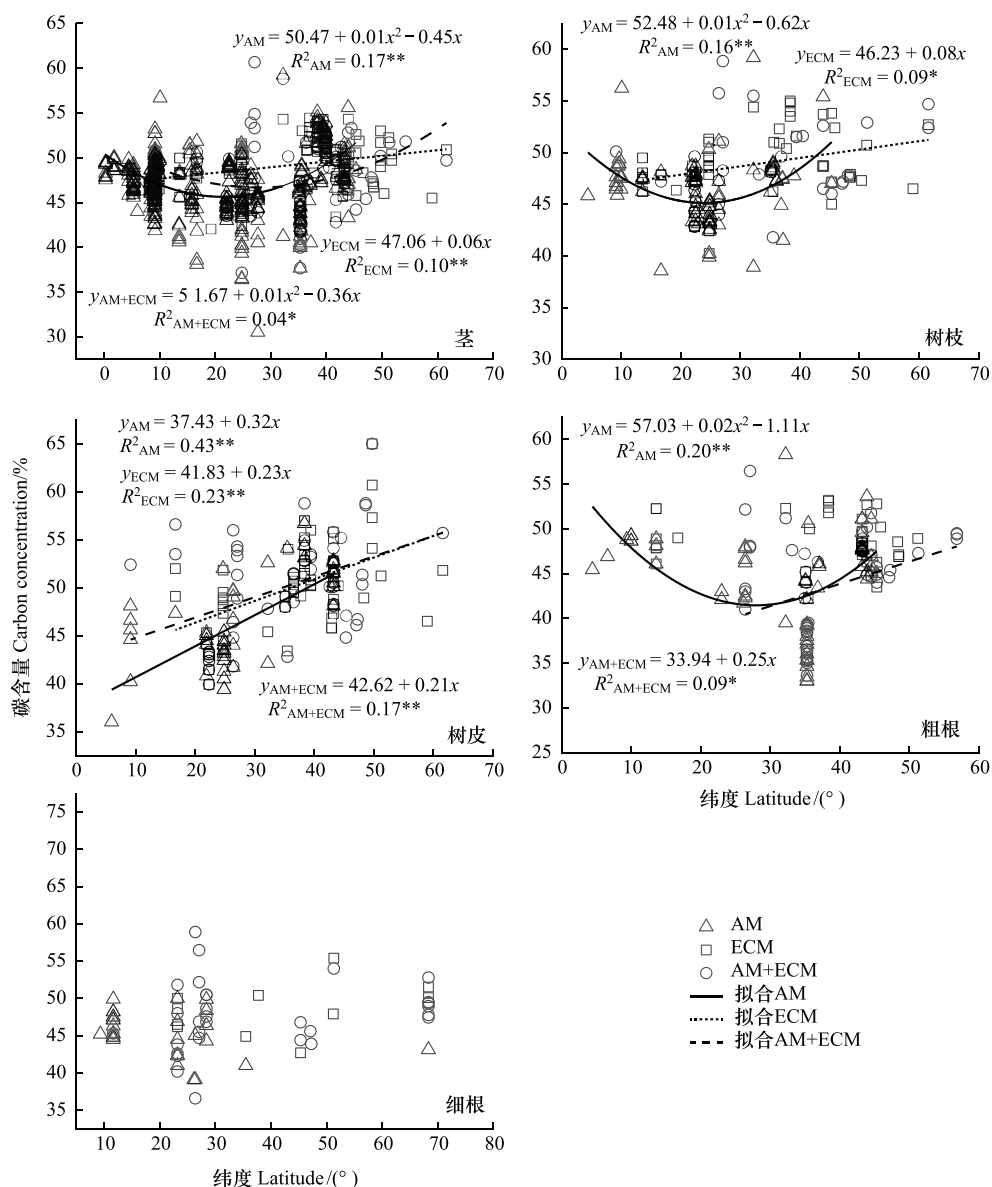


图2 不同菌根类型植物各器官碳含量与纬度的关系

Fig.2 Relationship between carbon concentration and latitude in various organs of plants with different mycorrhizal types

R^2 : 调整后 R 方 Adjusted R-squared; * $P<0.05$; ** $P<0.01$

趋势截然相反 ($P < 0.01$)。ECM 植物大多数器官(茎、树枝、粗根)碳含量随经度的增加而显著减小 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。在茎、树皮、粗根中,AM+ECM 植物碳含量随经度的增加整体上呈现增加的趋势 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。

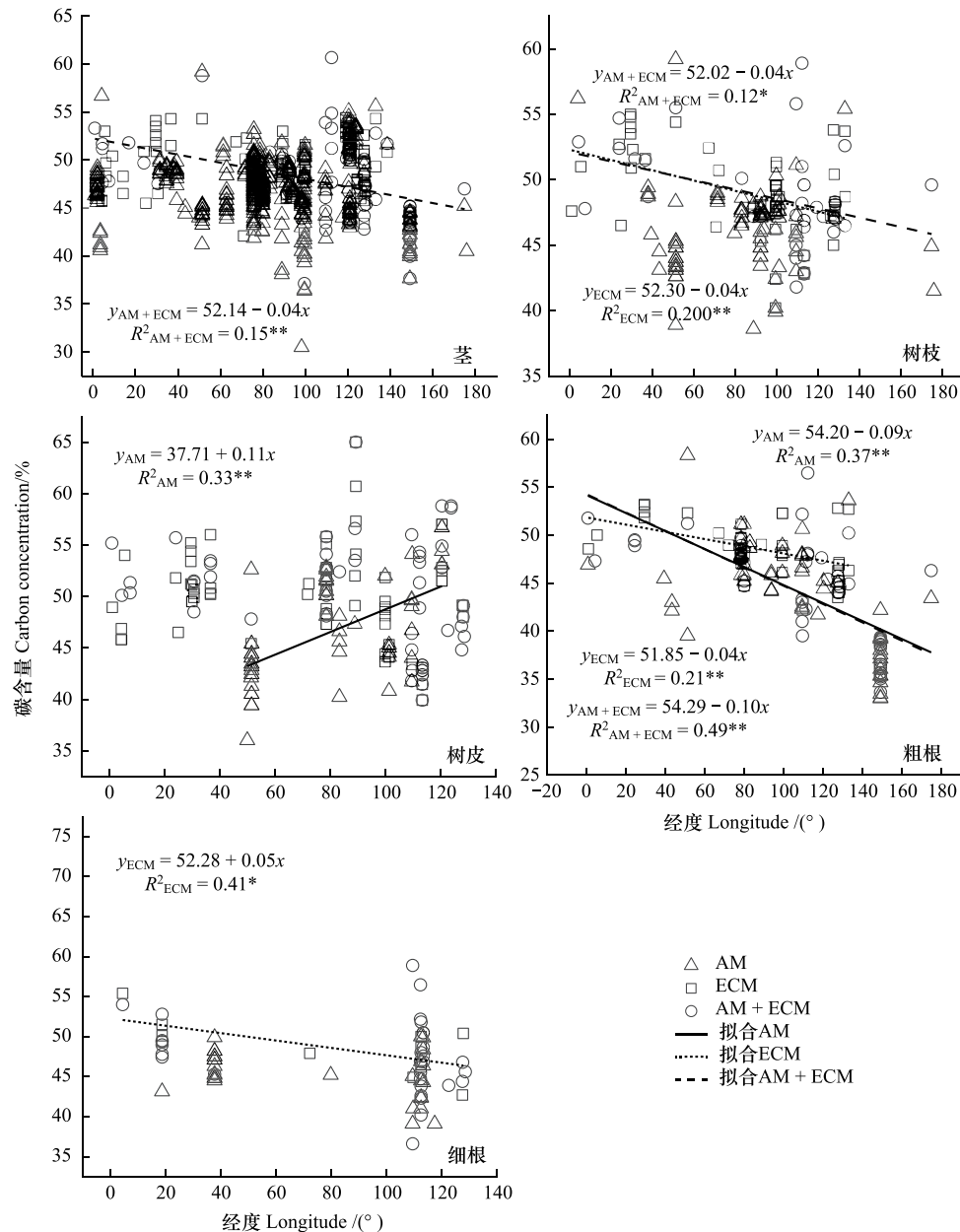


图3 不同菌根类型植物各器官碳含量与经度的关系

Fig.3 Relationship between carbon concentration and longitude in various organs of plants with different mycorrhizal types

2.3 不同菌根类型植物各器官碳含量随温度的变化

根据逐步回归分析的结果,选择了对植物碳含量影响显著的环境因子,与温度相关的因子包括等温性 (Isothermality) 和温度季节性变化 (Temperature seasonality) 指数,与不同菌根类型植物各器官碳含量的变化趋势如图 4 和图 5 所示。结果表明,AM 植物大多数器官(茎、树枝、粗根)与等温性有显著的变化,整体上呈现增加的趋势(图 4, $P < 0.05$ 或 $P < 0.01$);ECM 植物只有茎和粗根碳含量与等温性指数有显著的变化趋势 ($P < 0.01$),随等温性指数的增加呈现出先增加后减小的趋势。AM+ECM 植物茎、粗根碳含量与等温性指数呈现

线性负相关($P<0.05$ 或 $P<0.01$),这与树皮中呈现相反的趋势($P<0.05$)。

通过探讨植物碳含量与温度季节性变化指数的关系(图 5),发现在茎、树枝、粗根中,AM 植物碳含量随温度季节性变化指数呈现出先降低后增加的趋势($P<0.01$);ECM 植物仅茎和树皮碳含量与温度季节性变化指数有显著的变化趋势,其茎碳含量随温度季节性变化指数呈现先增加后降低的趋势($P<0.01$),树皮碳含量与温度季节性变化指数呈现线性正相关($P<0.01$)。AM+ECM 植物茎和粗根碳含量随温度季节性变化指数的增加而显著增加($P<0.05$ 或 $P<0.01$)。然而在细根中(图 4、图 5),整体上三种菌根类型植物碳含量与温度相关的因子间没有显著的变化趋势。

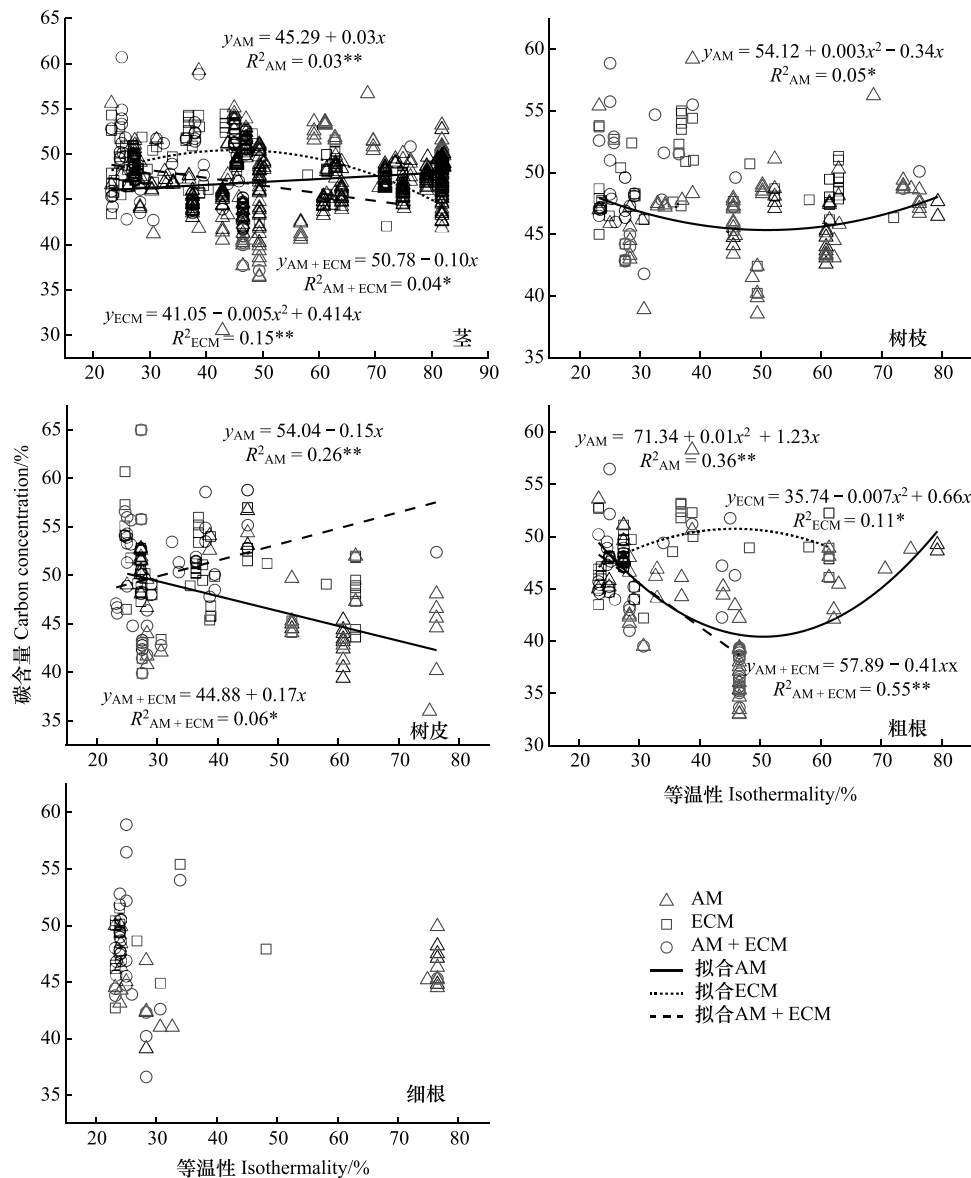


图 4 不同菌根类型植物各器官碳含量与等温性指数的关系

Fig.4 Relationship between carbon concentration and isothermality in various organs of plants with different mycorrhizal types

2.4 不同菌根类型植物各器官碳含量随降水的变化

进一步探讨降水相关因子对不同菌根类型植物各器官碳含量的影响,结果表明在茎、树枝、粗根中,AM 植物碳含量随年平均降水量的增加总体上呈现增加的趋势(图 6, $P<0.05$ 或 $P<0.01$),而 ECM 植物却与之相反,总体上呈现减少的趋势($P<0.05$ 或 $P<0.01$)。然而在树皮中,三种菌根类型植物都随年平均降水量的增

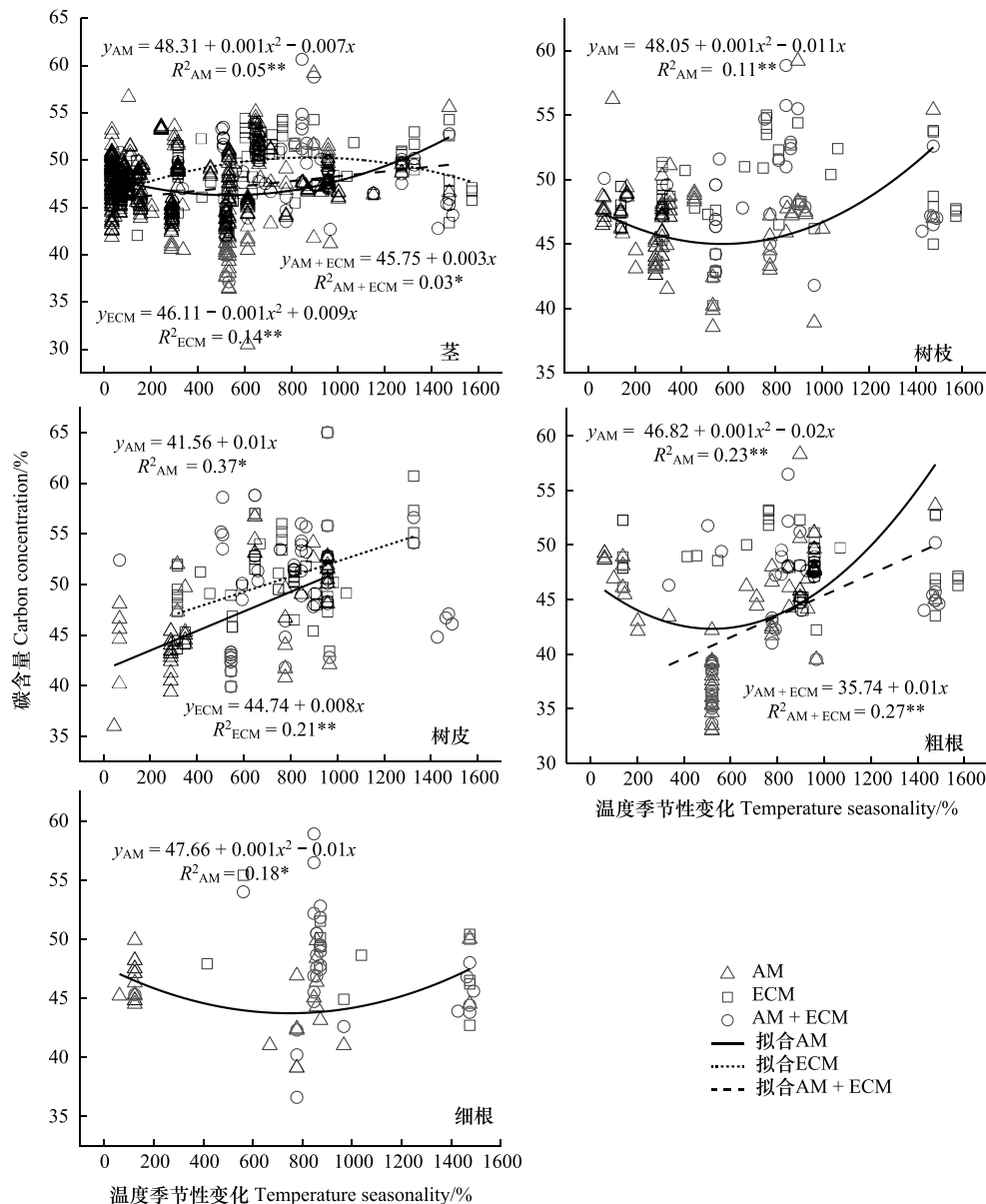


图5 不同菌根类型植物各器官碳含量与温度季节性变化指数的关系

Fig.5 Relationship between carbon concentration and temperature seasonality in various organs of plants with different mycorrhizal types

加而显著减小 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。

对于 AM 植物来说,其各器官碳含量与降水量季节性变化指数呈现显著正相关 (图 7, $P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。ECM 植物树皮和细根碳含量与降水量季节性变化指数线性关系显著 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$),随着降水量季节性变化指数的增加而减小。而 AM+ECM 植物碳含量随降水量季节性变化指数的变化趋势随不同器官而异,在茎和粗根中呈现线性正相关 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$),在树枝、树皮和细根中呈现线性负相关 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。

2.5 环境因素对不同菌根类型植物各器官碳含量影响的路径分析

在逐步回归分析的基础上,本研究进一步结合地理位置、温度因素和降水因素构建不同菌根类型植物各器官碳含量影响路径的结构方程模型 (图 8)。具体而言,对于茎来说,地理因素是影响 AM 和 ECM 植物碳含量的关键因素,对其有显著的正向影响效应。而 AM+ECM 植物碳含量主要受降水因素的显著正向调控。在

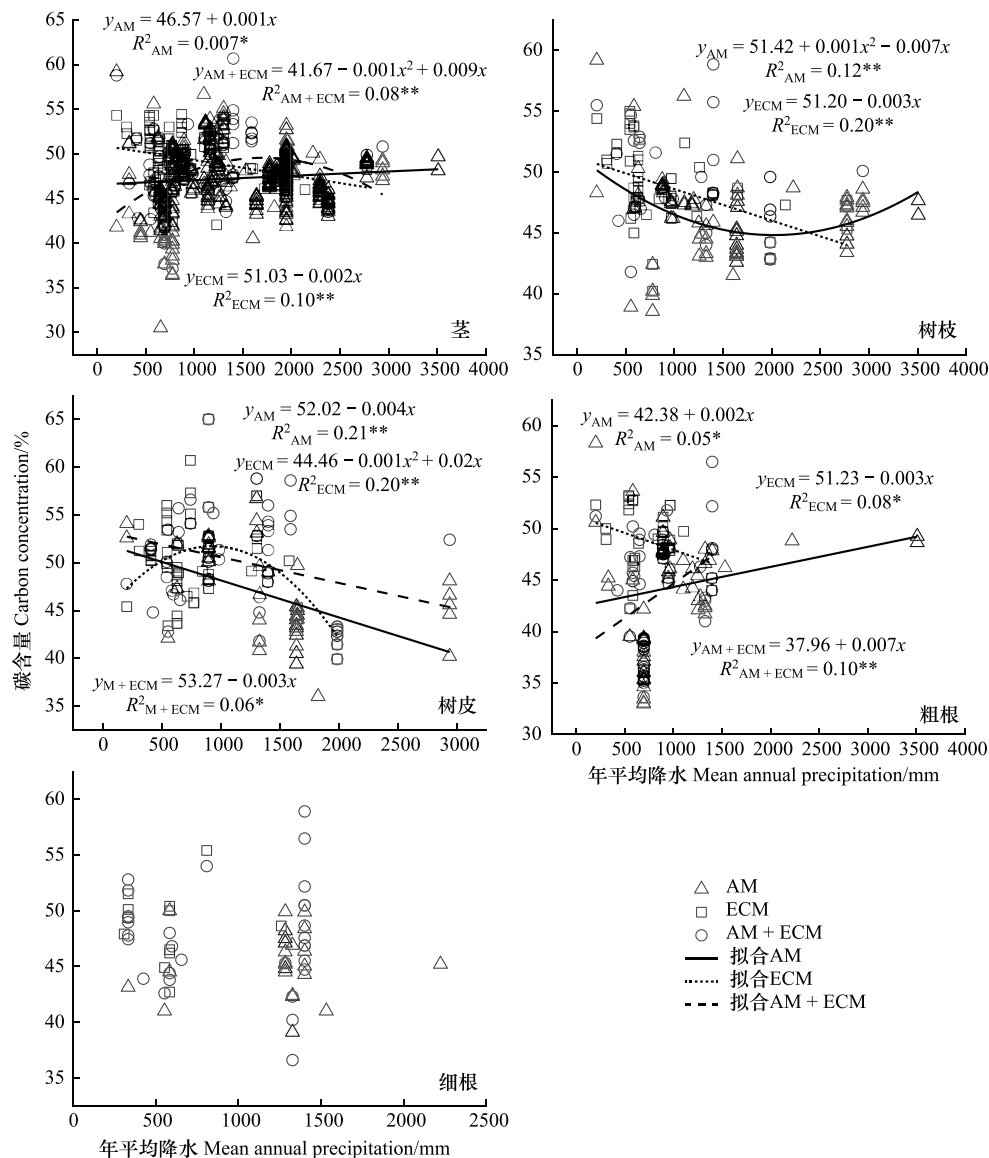


图 6 不同菌根类型植物各器官碳含量与年平均降水的关系

Fig.6 Relationship between carbon concentration and mean annual precipitation in various organs of plants with different mycorrhizal types

树枝中,当综合地理、温度、降水三种因素时不同菌根类型植物碳含量对环境因子的响应没有差异。在树皮和粗根中,AM 植物碳含量主要由温度因素决定的,而 AM+ECM 植物碳含量主要受到降水因素的显著影响,ECM 植物碳含量没有受到环境因子的显著影响。在细根中,AM 植物碳含量受到来自地理和温度因素两方面的显著影响,但影响效应不同,地理因素对 AM 植物碳含量产生显著的负向影响效应,而温度因素有正向促进作用。对于 AM+ECM 植物,其碳含量只受到来自降水的显著正向影响。总的来说,地理因素对不同菌根类型植物碳含量有显著的影响,此外,AM 植物碳含量对温度响应更敏感,ECM 和 AM+ECM 植物碳含量对降水响应更敏感。

3 讨论

本研究基于全球木本植物碳含量的数据库探讨了不同菌根类型植物各器官碳含量的差异及其机制,并深入分析了不同菌根类型植物各器官碳含量对地理、温度和降水因素的响应,为菌根与植物碳含量的相关研究

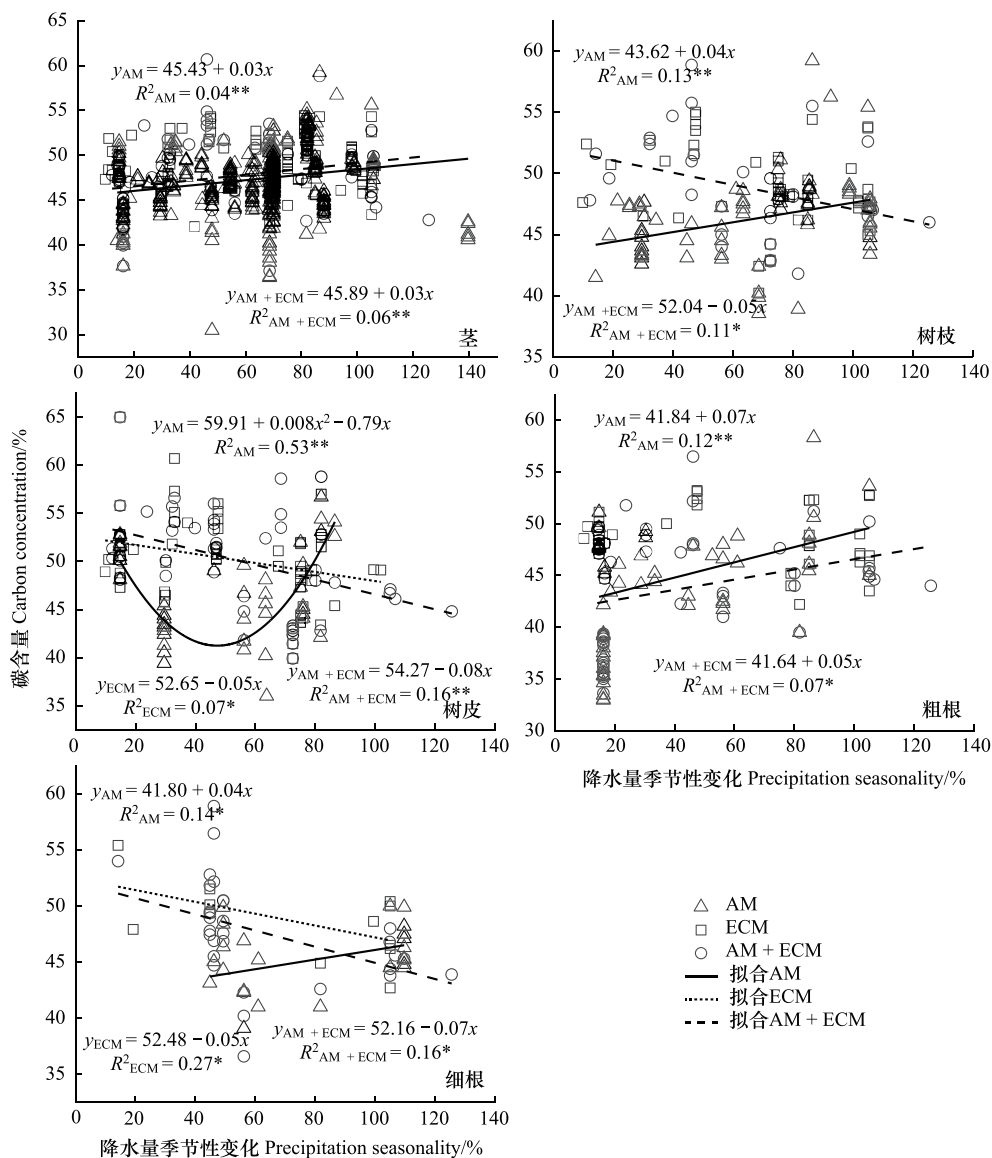


图7 不同菌根类型植物各器官碳含量与降水量季节性指数变化的关系

Fig.7 Relationship between carbon concentration and precipitation seasonality in various organs of plants with different mycorrhizal types

提供参考依据。本结果表明,不同菌根类型对植物各器官碳含量影响显著。在植物各器官中,ECM 植物碳含量显著高于 AM 和 AM+ECM 植物。

3.1 不同菌根类型植物碳含量的差异

在样本中 AM 植物的观测值是最多的,但 ECM 植物地上部和地下部碳含量均显著高于 AM 和 AM+ECM 植物。产生这个现象的原因一方面可能与不同菌根类型植物光合产物分配的差异有关^[29],通常来讲相比于 AM 植物,ECM 植物会分配到更多的碳水化合物给菌根真菌^[30],这些差别会影响到它们对植物地上生产力和地下碳汇功能的贡献度^[31]。另一方面这可能与不同菌根真菌产生的根外菌丝的数量及其功能上的差别有关,Soudzilovskaia 等研究证明 ECM 真菌的根外菌丝生物量比 AM 真菌高出一个数量级^[26],这些差异可能影响了土壤碳的积累,进而影响到植物各器官碳含量。

3.2 不同菌根类型植物碳含量与地理因素的关系

Zhong 等在研究中提到菌根真菌与植物建立的共生关系是导致植物跨纬度分布格局的最重要的生物相

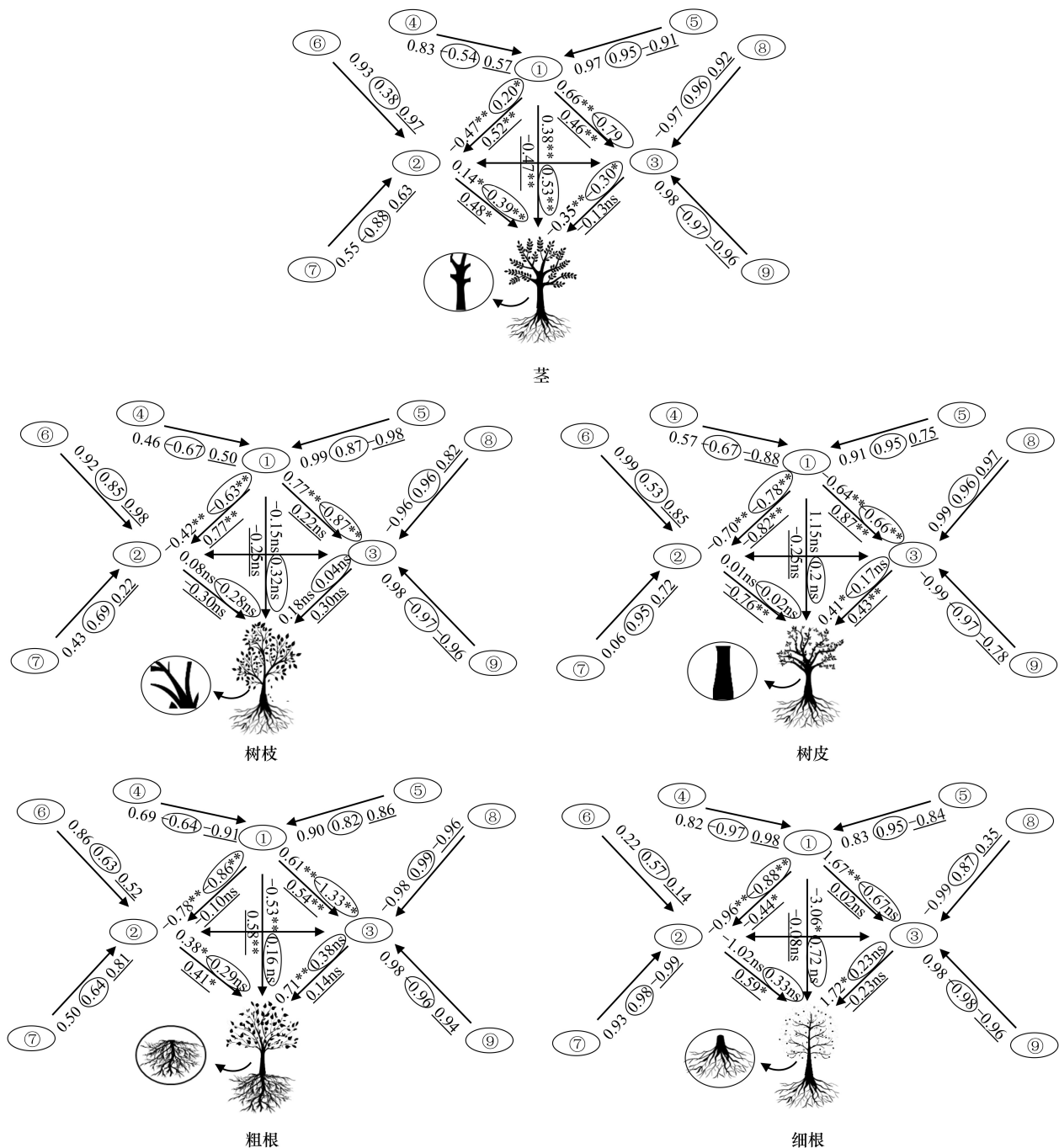


图 8 不同菌根类型植物各器官碳含量受环境因素影响的结构方程模型分析

Fig.8 Structural equation model (SEM) analysis of carbon concentration in various organs of plants with different mycorrhizal types affected by environmental factors

未做标记处理、圆圈、下划线分别代表 AM、ECM、AM+ECM 植物 Unmarked, circled, and underlined represent AM, ECM, and AM+ECM plants respectively; ①代表地理因素 Geographical factors; ②代表降水因素 Precipitation factors; ③代表温度因素 Temperature factors; ④代表经度 Longitude; ⑤代表纬度 Latitude; ⑥代表年平均降水量 Mean annual precipitation; ⑦代表降水季节性变化 Precipitation seasonality; ⑧代表等温性 Isothermality; ⑨代表温度季节性变化 Temperature seasonality; Significance levels: * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$ 地理因素、温度因素、降水因素为潜变量, 地理因素包括纬度和经度, 温度因素包括等温性和温度季节性变化指数, 降水因素包括年平均降水量和降水量季节性变化指数

互作用原因之一^[32]。不同菌根类型植物具有显著的纬度分布梯度, 在本研究中 AM 主要分布在低纬度区域, 而 ECM 和 AM+ECM 植物主要分布在高纬度区域。通过图 2 了解到在中低纬度范围 AM 植物碳含量随纬度

的增加具有显著的变化,而在高纬度范围内 ECM 植物碳含量随纬度增加具有显著的变化。产生这个现象原因可能是因为 AM 真菌具有极其丰富的物种类型^[33],在低纬度地区通过其多样性的增加而提高生产力。而在高纬度地区,植物的生长更容易受到可利用营养的限制,ECM 植物可以从土壤有机质中吸取大量的有机物从而促进植物生长和碳积累^[34]。通过图 3 发现相对于另外两种类型植物,AM 植物碳含量随经度变化有显著的线性趋势,这可能与菌根在全球的分布格局有关,由于菌根真菌对寄主植物的选择和对自然环境的适应不同或进化过程中的历史原因^[20],从而导致菌根真菌在自然生态系统的分布存在差异。

3.3 不同菌根类型植物碳含量与温度和降水因素的关系

不同菌根类型影响着植物碳含量对温度和降水的响应,菌根可以增加植物的养分吸收能力、提高植物的抗逆性和适应性^[24],从而帮助植物更好地应对气候变化。石兆勇等研究表明不同类型的菌根会影响到森林净初级生产力对温度和降水的响应^[35-36],且菌根能够参与碳循环,影响森林生态系统对气候变化的响应^[14]。Vargas 等研究表明生态系统 CO₂ 通量对温度和降水变化的响应因菌根类型不同而存在明显差异^[37]。在本研究中,AM 植物碳含量更易受到温度的影响,而 ECM 和 AM+ECM 植物碳含量对降水更敏感,这可能与不同菌根类型植物的养分和水分吸收策略有关^[38],目前已有的研究证明丛枝菌根真菌对升温的响应存在特定的阈值,当环境温度超过阈值时,丛枝菌根真菌生物多样性和丰度急剧下降,这表明 AM 真菌对温度响应十分敏感。ECM 植物表现出这种现象与其地理分布有很大联系,ECM 植物大多分布在高纬度地区,它们具有更高的水分利用效率和更广泛的水分吸收能力^[39],石兆勇等^[36]通过比较 AM 和 ECM 型森林的净初级生产力从而证明 ECM 型森林比 AM 型森林对降水变化更敏感。

在探讨植物碳含量的影响机制时,未来的工作应该加强土壤理化性质方面的研究,以多方面评估不同菌根类型对植物碳含量的影响。土壤作为影响植物碳含量的关键因素,可直接作用于植物根系的生长和养分吸收,还可以通过调节土壤微生物活动和土壤有机碳的动态平衡来间接影响植物碳含量^[40]。Craig 等的研究已证实森林中菌根组成的变化能够显著影响土壤有机质(SOM)的稳定性,与 AM 植物相比,ECM 植物在表层土壤中含有更多的 SOM^[41]。本研究的发现有助于解释菌根类型对植物各器官碳含量影响的差异及其对环境因子响应不同的原因,为在未来气候变化背景下预测植物碳含量,增加植物的碳积累提供了科学的依据。

4 结论

本研究基于全球不同菌根类型植物碳含量的数据库,结合地理位置、温度因素和降水因素三方面的因素,主要探讨了不同菌根类型对植物各器官碳含量影响的差异及其机制。研究发现,在植物各器官(茎、树枝、树皮、粗根、细根)中,ECM 植物碳含量显著高于 AM 和 AM+ECM 植物。其次菌根类型显著影响着植物各器官碳含量和环境因子的关系。AM 植物地上部(茎、树枝、树皮)碳含量主要受到地理因素和温度因素的显著影响,其地下部(粗根、细根)碳含量是由地理因素决定的。而 ECM 和 AM+ECM 植物各器官碳含量主要受到降水因素和地理因素的影响,其中降水因素是主要影响因子。

参考文献(References):

- [1] Whittinghill L J, Rowe D B, Schutzki R, Clegg B M. Quantifying carbon sequestration of various green roof and ornamental landscape systems. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 123: 41-48.
- [2] 杨谦敏,袁丹萍,邓存宝,王延生,乔玲. 碳中和背景下植物净固碳能力研究进展. *生态学杂志*, 2023, 42(6): 1484-1496.
- [3] Lamtom S H, Savidge R A. A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species. *Biomass and Bioenergy*, 2003, 25(4): 381-388.
- [4] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [5] 方精云,黄耀,朱江玲,孙文娟,胡会峰. 森林生态系统碳收支及其影响机制. *中国基础科学*, 2015, 17(3): 20-25.
- [6] 李威,黄玫,张远东,顾峰雪,巩贺,郭瑞,钟秀丽,严昌荣. 中国国家森林公园碳储量及固碳速率的时空动态. *应用生态学报*, 2021, 32

- (3): 799-809.
- [7] Zhang J H, He N P, Liu C C, Xu L, Chen Z, Li Y, Wang R M, Yu G R, Sun W, Xiao C W, Chen H Y H, Reich P B. Variation and evolution of C:N ratio among different organs enable plants to adapt to N-limited environments. *Global Change Biology*, 2020, 26(4): 2534-2543.
- [8] Ma S H, He F, Tian D, Zou D T, Yan Z B, Yang Y L, Zhou T C, Huang K Y, Shen H H, Fang J Y. Variations and determinants of carbon content in plants: a global synthesis. *Biogeosciences*, 2018, 15(3): 693-702.
- [9] Thomas S C, Martin A R. Carbon content of tree tissues: a synthesis. *Forests*, 2012, 3(2): 332-352.
- [10] Conti G, Díaz S. Plant functional diversity and carbon storage-an empirical test in semi-arid forest ecosystems. *Journal of Ecology*, 2013, 101(1): 18-28.
- [11] Paroshy N J, Doraisami M, Kish R, Martin A R. Carbon concentration in the world's trees across climatic gradients. *New Phytologist*, 2021, 232(1): 123-133.
- [12] Cornelissen J, Aerts R, Cerabolini B, Werger M, van der Heijden M. Carbon cycling traits of plant species are linked with mycorrhizal strategy. *Oecologia*, 2001, 129(4): 611-619.
- [13] Read D J. Mycorrhizas in ecosystems. *Experientia*, 1991, 47(4): 376-391.
- [14] 石兆勇, 刘德鸿, 王发园, 丁效东. 菌根类型对森林树木净初级生产力的影响. *生态环境学报*, 2012, 21(3): 404-408.
- [15] Pirozynski K A, Malloch D W. The origin of land plants: a matter of mycotrophism. *Biosystems*, 1975, 6(3): 153-164.
- [16] Yang K, Zhang Q, Zhu J J, Wang Q Q, Gao T, Wang G G. Mycorrhizal type regulates trade-offs between plant and soil carbon in forests. *Nature Climate Change*, 2024, 14: 91-97.
- [17] De Deyn G B, Cornelissen J H C, Bardgett R D. Plant functional traits and soil carbon sequestration in contrasting biomes. *Ecology Letters*, 2008, 11(5): 516-531.
- [18] Soudzilovskaia N A, Vaessen S, Barcelo M, He J H, Rahimlou S, Abarenkov K, Brundrett M C, Gomes S I F, Merckx V, Tedersoo L. FungalRoot: global online database of plant mycorrhizal associations. *New Phytologist*, 2020, 227(3): 955-966.
- [19] Deng M F, Hu S J, Guo L L, Jiang L, Huang Y Y, Schmid B, Liu C, Chang P F, Li S, Liu X J, Ma K P, Liu L L. Tree mycorrhizal association types control biodiversity-productivity relationship in a subtropical forest. *Science Advances*, 2023, 9(3): eadd4468.
- [20] Wang B, Qiu Y L. Phylogenetic distribution and evolution of mycorrhizas in land plants. *Mycorrhiza*, 2006, 16(5): 299-363.
- [21] Brundrett M C, Tedersoo L. Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. *New Phytologist*, 2018, 220(4): 1108-1115.
- [22] 陈保冬, 付伟, 伍松林, 朱永官. 菌根真菌在陆地生态系统碳循环中的作用. *植物生态学报*, 2024, 48(1): 1-20.
- [23] Anderson I C, Cairney J W G. Ectomycorrhizal fungi: exploring the mycelial frontier. *FEMS Microbiology Reviews*, 2007, 31(4): 388-406.
- [24] Phillips R P, Brzostek E, Midgley M G. The mycorrhizal-associated nutrient economy: a new framework for predicting carbon-nutrient couplings in temperate forests. *New Phytologist*, 2013, 199(1): 41-51.
- [25] Luo Y H, Ma L L, Seibold S, Cadotte M W, Burgess K S, Tan S L, Ye L J, Zheng W, Zou J Y, Chen Z F, Liu D T, Zhu G F, Shi X C, Zhao W, Li D Z, Liu J, Gao L M. The diversity of mycorrhiza-associated fungi and trees shapes subtropical mountain forest ecosystem functioning. *Journal of Biogeography*, 2023, 50(4): 715-729.
- [26] Soudzilovskaia N A, van Bodegom P M, Terrer C, Zelfde M V, McCallum I, Luke McCormack M, Fisher J B, Brundrett M C, de Sá N C, Tedersoo L. Global mycorrhizal plant distribution linked to terrestrial carbon stocks. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 5077.
- [27] Jiang L, Wang H M, Li S G, Fu X L, Dai X Q, Yan H, Kou L. Mycorrhizal and environmental controls over root trait-decomposition linkage of woody trees. *New Phytologist*, 2021, 229(1): 284-295.
- [28] Jing M M, Shi Z Y, Gao X S, Gao J K, Wu S W, Xu X F, Xu S X. Fine-root C: N: P stoichiometry and its driving factors are different between arbuscular and ectomycorrhizal plants in China. *Agronomy*, 2023, 13(10): 2512.
- [29] 金文豪, 邵帅, 陈俊辉, 秦华. 不同类型菌根对土壤碳循环的影响差异研究进展. *浙江农林大学学报*, 2021, 38(5): 953-962.
- [30] Soudzilovskaia N A, van der Heijden M G A, Cornelissen J H C, Makarov M I, Onipchenko V G, Maslov M N, Akhmetzhanova A A, van Bodegom P M. Quantitative assessment of the differential impacts of arbuscular and ectomycorrhiza on soil carbon cycling. *New Phytologist*, 2015, 208(1): 280-293.
- [31] 杨浩, 史加勉, 郑勇. 菌根真菌影响森林生态系统碳循环研究进展. *生态学报*, 2024, 44(7): 2734-2744.
- [32] Zhong Y L, Chu C J, Myers J A, Gilbert G S, Lutz J A, Stillhard J, Zhu K, Thompson J, Baltzer J L, He F L, LaManna J A, Davies S J, Aderson-Teixeira K J, Burslem D F R P, Alonso A, Chao K J, Wang X G, Gao L M, Orwig D A, Yin X, Sui X H, Su Z Y, Abiem I, Bissengou P, Bourg N, Butt N, Cao M, Chang-Yang C H, Chao W C, Chapman H, Chen Y Y, Coomes D A, Cordell S, de Oliveira A A, Du H, Fang S Q, Giardina C P, Hao Z Q, Hector A, Hubbell S P, Janík D, Jansen P A, Jiang M X, Jin G Z, Kenfack D, Král K, Larson A J, Li B H, Li X K, Li Y D, Lian J Y, Lin L X, Liu F, Liu Y K, Liu Y, Luan F C, Luo Y H, Ma K P, Malhi Y, McMahon S M, McShea W, Memiaghe H, Mi

- X C, Morecroft M, Novotny V, O'Brien M J, den Ouden J, Parker G G, Qiao X J, Ren H B, Reynolds G, Samonil P, Sang W G, Shen G C, Shen Z Q, Song G Z M, Sun I F, Tang H, Tian S Y, Uwolo A L, Uriarte M, Wang B, Wang X H, Wang Y S, Weiblen G D, Wu Z H, Xi N X, Xiang W S, Xu H, Xu K, Ye W H, Yu M J, Zeng F P, Zhang M H, Zhang Y M, Zhu L, Zimmerman J K. Arbuscular mycorrhizal trees influence the latitudinal beta-diversity gradient of tree communities in forests worldwide. *Nature Communications*, 2021, 12: 3137.
- [33] Peng Y, Yuan J, Hedě́nec P, Yue K, Ni X Y, Li W, Wang D Y, Yuan C X, Tan S Y, Wu F Z. Mycorrhizal association and life form dominantly control plant litter lignocellulose concentration at the global scale. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 926941.
- [34] Wright I J, Dong N, Maire V, Prentice I C, Westoby M, Díaz S, Gallagher R V, Jacobs B F, Kooyman R, Law E A, Leishman M R, Niinemets Ü, Reich P B, Sack L, Villar R, Wang H, Wilf P. Global climatic drivers of leaf size. *Science*, 2017, 357(6354): 917-921.
- [35] 石兆勇, 王发园, 苗艳芳. 不同菌根类型的森林净初级生产力对气温变化的响应. *植物生态学报*, 2012, 36(11): 1165-1171.
- [36] 石兆勇, 张凯, 苗艳芳, 王发园. 不同菌根类型森林净初级生产力对降水的响应. *水土保持通报*, 2014, 34(1): 14-19.
- [37] Vargas R, Baldocchi D D, Querejeta J I, Curtis P S, Hasselquist N J, Janssens I A, Allen M F, Montagnani L. Ecosystem CO₂ fluxes of arbuscular and ectomycorrhizal dominated vegetation types are differentially influenced by precipitation and temperature. *New Phytologist*, 2010, 185(1): 226-236.
- [38] Craine J M, Elmore A J, Aida M P M, Bustamante M, Dawson T E, Hobbie E A, Kahmen A, Mack M C, McLauchlan K K, Michelsen A, Nardoto G B, Pardo L H, Peñuelas J, Reich P B, Schuur E A G, Stock W D, Templer P H, Virginia R A, Welker J M, Wright I J. Global patterns of foliar nitrogen isotopes and their relationships with climate, mycorrhizal fungi, foliar nutrient concentrations, and nitrogen availability. *New Phytologist*, 2009, 183(4): 980-992.
- [39] Marjanović Ž, Uwe N, Hampp R. Mycorrhiza formation enhances adaptive response of hybrid poplar to drought. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2005, 1048(1): 496-499.
- [40] Han M G, Feng J G, Chen Y, Sun L J, Fu L C, Zhu B. Mycorrhizal mycelial respiration: a substantial component of soil respired CO₂. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 163: 108454.
- [41] Craig M E, Turner B L, Liang C, Clay K, Johnson D J, Phillips R P. Tree mycorrhizal type predicts within-site variability in the storage and distribution of soil organic matter. *Global Change Biology*, 2018, 24(8): 3317-3330.