

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第7期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.07.003

论文标题： 杉木茎干矿质元素种源变异及其对生长与碳汇的影响

作　　者： 何 平，汪盛民，厉月桥，等

收稿日期： 2025-09-07

引文格式： 何平,汪盛民,厉月桥,等.杉木茎干矿质元素种源变异及其对生长与碳汇的影响[J].中南林业科技大学学报,2026,46(7):22-32.

He P, Wang S M, Li Y Q, et al. Variation in stem mineral elements among *Cunninghamia lanceolata* provenances and its impact on growth and carbon sequestration[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(7):22-32.

相关论文推荐

Recommended articles

不同密度对长周期经营杉木林生长、土壤理化性质和微生物的影响

Effects of different densities on growth, soil physicochemical properties and microorganisms of long-period management Cunninghamia lanceolata forest

不同龄组杉木林空间结构和土壤养分特征及其关联度

Spatial structure and soil nutrient characteristics of *Cunninghamia lanceolata* forest of different age groups and their correlations

杉木不同世代育种群体遗传多样性回溯分析与核心种质构建

Genetic diversity retrospective analysis and core collection construction for different generations of *Cunninghamia lanceolata* breeding population

间伐对杉木人工林结构、组成复杂性和固碳能力的影响

Effects of thinning on structural and compositional complexity, and carbon sequestration capacity in Chinese fir plantations

林龄对长周期经营杉木林土壤理化性质与酶活性的影响

Effects of stand age on soil physicochemical properties and enzyme activities in long period management *Cunninghamia lanceolata* forests

第 46 卷 第 7 期
2026 年 7 月
中南林业科技大学学报
Journal of Central South University of Forestry & Technology
Vol. 46 No. 7
Jul. 2026
Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.07.003
http: //qks.csuft.edu.cn

杉木茎干矿质元素种源变异及其对生长与碳汇的影响

何　平[1]，汪盛民[2]，厉月桥[1]，孙建军[1]，喻龙华[1]，刘　仁[1]，宋云霞[1]，聂林芽[1]

（1. 中国林业科学研究院亚热带林业实验中心 a. 生物多样性保护与资源利用江西省重点实验室；b. 新余市森林碳汇能力监测与调控重点实验室，江西 新余 336600；2. 景德镇市枫树山林场有限公司，江西 景德镇 333000）

摘　要：【目的】阐明杉木 *Cunninghamia lanceolata* 茎干矿质元素的种源变异规律，解析其对生长与碳汇功能的驱动效应，为高碳汇种质选育与精准养分管理提供科学依据。【方法】2017 年，以江西大岗山 36 年生杉木种源试验林为对象，选取 15 个地理种源，测定茎干碳（C）、氮（N）、磷（P）、硫（S）、钾（K）、钙（Ca）、镁（Mg）、铁（Fe）、锰（Mn）、锌（Zn）10 种元素含量并计算 C、N、P 化学计量比，结合原产地地理与气候因子、生长与碳汇性状，采用方差分析、冗余分析与结构方程模型解析其关联与驱动路径。【结果】茎干生长、生物量、有机碳储量及矿质元素含量存在明显种源变异，其中有机碳储量变异最大（变异系数为 50.73%），表明不同种源碳汇潜力差异巨大。茎干 P、K 含量是驱动胸径、材积、生物量及有机碳储量增加的核心因子（如生物量对有机碳储量的直接路径系数为 0.916，呈极强的正向影响），而 Mn 含量则显著抑制生物量积累。原产地的地理与气候因子（7 月均温、年均降水量）主要通过调控 C、N、P 化学计量平衡，而非 P、K 绝对含量来间接影响杉木的生长与碳汇功能。聚类筛选出福建顺昌、湖南芷江等 4 个具有高 P、高 K、高碳汇功能的优良种源。【结论】P、K 是驱动生物量积累与碳汇提升的核心营养因子。种源筛选与人工林管理中，应高度重视茎干 P、K 含量及其利用效率。

关键词：杉木；茎干矿质元素；种源变异；生态化学计量；碳汇功能

中图分类号：S791.27；S718.5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)07-0022-11

Variation in stem mineral elements among *Cunninghamia lanceolata* provenances and its impact on growth and carbon sequestration

He Ping[1], Wang Shengmin[2], Li Yueqiao[1], Sun Jianjun[1], Yu Longhua[1], Liu Ren[1], Song Yunxia[1], Nie Linya[1]

(1.a. Xinyu City Key Laboratory of Forest Carbon Sink Monitoring and Regulation; b.Jiangxi Provincial Key Laboratory of Biodiversity Conservation and Resource Utilization, Experimental Center of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Xinyu 336600, Jiangxi, China; 2.Fengshushan Forest Farm, Jingdezhen 333000, Jiangxi, China)

Abstract:【Objective】To clarify the patterns of provenance variation in mineral elements in the stems of *Cunninghamia lanceolata*, analyze their driving effects on growth and carbon sequestration function, and to provide a theoretical basis for breeding high-carbon-sink germplasm and implementing precise nutrient management.【Method】In 2017, a provenance trial plantation of 36-year-old *C. lanceolata* at Dagang mountain, Jiangxi Province, was studied. Fifteen geographical provenances were selected to determine the contents of ten elements in stem wood, including carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P), sulfur (S), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), iron (Fe), manganese (Mn), and zinc (Zn), and the stoichiometric ratios of C, N, and P were calculated. By integrating geographic and climatic factors from the provenance origins, as well as growth and carbon sequestration traits, analysis of variance (ANOVA), redundancy analysis (RDA), and structural equation modeling (SEM) were employed to elucidate the associations and driving pathways among these variables.【Result】Obvious provenance variations were observed in stem growth, biomass, carbon storage, and mineral element content. Carbon storage showed the highest variation (the coefficient of variation is 50.73%), indicating

收稿日期（Received）：2025-09-07　　**修订日期**（Revised）：2025-12-15

基金项目：中国林业科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项（重点项目）（CAFYBB2022ZC005）；江西省重点研发计划项目（20223BBF61005）；江西省林业补助专项资金项目（300100208）。

第一作者：何平（peacejx@163.com），工程师，硕士。

通信作者：厉月桥（575886548@qq.com），正高级工程师，博士，硕士研究生导师。

引文格式：何平 , 汪盛民 , 厉月桥 , 等 . 杉木茎干矿质元素种源变异及其对生长与碳汇的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(7): 22-32.

He P, Wang S M, Li Y Q, et al. Variation in stem mineral elements among *Cunninghamia lanceolata* provenances and its impact on growth and carbon sequestration[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(7):22-32.

substantial differences in carbon sink potential among provenances. Stem P and K contents were the core drivers of increases in DBH, volume, biomass, and carbon storage (For example, the direct path coefficient from biomass to carbon storage was 0.916, indicating an extremely strong positive effect).), while Mn content significantly inhibited biomass accumulation. Geographic and climatic factors of the provenance origin (July mean temperature, annual mean precipitation) indirectly influence growth and carbon sequestration function primarily by regulating the stoichiometric balance of C, N, and P, rather than through the absolute contents of P and K. Cluster analysis identified four superior provenances, including Shunchang (Fujian) and Zhijiang (Hunan), characterized by high P, high K, and high carbon sink potential.【Conclusion】Phosphorus and potassium are the core nutrient elements driving biomass accumulation and carbon sequestration enhancement. Provenance selection and plantation management should prioritize stem P and K contents and their utilization efficiency.

Keywords: *Cunninghamia lanceolata*; stem mineral elements; provenance variation; ecological stoichiometry; carbon sequestration function

杉木 *Cunninghamia lanceolata* 是我国南方最重要的速生用材树种之一。第九次全国森林资源清查数据显示，其人工林总面积达 1 138.66×10^4 hm^2，蓄积量 8.52×10^8 m^3，约占全国人工林总面积的 14.31%[1-2]，在维护国家木材战略安全、支撑区域林业经济发展，提升亚热带森林碳汇储备中发挥着关键作用 [3-4]。然而长期多代连栽导致的杉木人工林土壤养分衰退，已成为其生产力与碳汇潜力的重要限制因素 [5-6]。在此背景下，通过遗传改良选育高养分效率与高碳汇能力相结合的优良种源，实现林分生产力和生态功能的协同提升，成为当前杉木人工林遗传改良的重要方向 [7]。

近年来，植物生态化学计量学的兴起与发展为理解林木养分利用策略及其与环境因子的互作机制提供了新的理论框架与研究视角。该理论聚焦于生物体主要元素（如 C、N、P 等）组成的平衡关系，能够深入揭示植物的养分限制状态、利用效率以及对环境适应的内在机理 [8]。目前，有关杉木化学计量特征的研究多集中于叶片和根系等器官。例如，徐睿等 [9] 探讨了不同种源杉木幼树根、叶 C、N、P 化学计量比与环境因子之间的关系；Wang 等 [10] 发现，在成龄林阶段环境因子的遗传效应可解释杉木叶片功能性状异质性的 43.19%。这些研究为杉木人工林科学经营奠定了良好的理论基础。

茎干作为林木体内物质运输与能量储存的核心器官，其元素组成是反映林木养分利用效率的关键指标，并直接调控木材形成、生物量分配及碳固定等关键生理过程 [11]。然而，杉木茎干多元素化学计量特征的种源变异规律及其对生长与碳汇功能的驱动机制，目前尚缺乏系统性认知。尽管 Wu 等 [12] 研究揭示了不同杉木种源在 C、P、K 利用效率上存在显著差异，但对于其他必需矿质元素在茎干材中的种源变异格局及其形成机制仍待深入解析。这一研究短板严重制约了基于遗传改良提升林木养分效率与碳汇能力的潜力，也限制了人工林精准养分管理策略的有效制定。

本研究以位于江西大岗山年珠实验林场的杉木全国种源试验林为对象，依托长期定位观测数据，一是解析不同地理种源杉木茎干矿质营养元素含量及化学计量特征的遗传变异规律；二是阐明茎干关键元素（尤其是 P、K）积累对生物量及有机碳储量形成的驱动效应及作用机制；三是筛选茎干 P、K 含量高且碳汇能力突出的优良种源。本研究旨在揭示杉木茎干养分分配的种源适应性机制，为杉木高碳汇、高养分效率种质的定向选育，以及人工林精准养分管理提供理论依据与实践参考。

1　材料与方法

1.1　试验林概况

试验区位于江西省新余市分宜县境内的中国林业科学研究院亚热带林业实验中心年珠实验林场（27°34′36″N，114°34′11″E）。该区域属罗霄山脉北端武功山支脉大岗山林区，海拔 278 ～ 314 m，属亚热带季风湿润性气候区，年均气温 16 ℃，年均降水量 1 656 mm，年均蒸发量 1 505 mm，年均日照时数 1 650 h。成土母岩为板页岩风化的黄棕壤。林地土壤基本理化性质见表 1。试验林前茬植被为樟科 *Lauraceae* 和壳斗科 *Fagaceae* 为主的亚热带常绿阔叶林 [13]。

杉木地理种源实验林于 1981 年营建，保存了来自 13 个省（区）的 181 个杉木种源。试验采用裂区区组设计，根据地形坡向和土壤条件将试验地划分为 14 个区组（主区），每个区组内环境条件基本一致。使用 1 年生实生苗造林，定植密度为 2 m×2 m。造林前进行炼山整地，开挖规格为 40 cm×40 cm×40 cm 的定植穴。造林后前 3 年，每年进行 2 次抚育管理。

1.2　试验材料与方法

1.2.1　试验材料

2017 年，从 181 个种源中筛选具有地理代表性的 15 个种源，涵盖了广东、广西、福建、江西、湖南、贵州、四川、浙江共 8 个省（区）。各参试种源的地理与气候参数见表 2。在每个区组（主区）内，将 13 个裂区（副区）按随机区组方式排列，并将各参试种源随机分配至各裂区。裂区采用单行布置，每行 4 株，方向垂直于等高线。为减少林分竞争，中龄林期进行隔株间伐 1 次。14 个区组即 14 次重复。林分年龄达 36 a 时，从 14 个区组中选择立地环境条件一致的 6 个区组作为采样区组（即从每个种源的 14 次重复中，选取 6 个立地条件一致的重复用于本研究）。在每个选定的区组内，每个种源选取 1 ～ 2 株（全部活立木）作为样本植株，共取样 146 株，占参试种源现存植株总数的 38.93%。

1.2.2　数据采集与分析

1）木材基本密度、生长及形质特征测定

采用胸径尺（精度 0.1 cm）测量胸径，红外测高仪（精度 0.1 m）测定树高。在每株样本树干上坡位离地 1.3 m 处，使用直径为 6 mm 的生长锥（Haglöf，瑞典）钻取髓心至树皮的完整木芯。干质量（m_d）采用电子天平（精度 0.0001 g，Mettler Toledo ME204/02）称量茎干木芯样品经 65 ℃烘干 12 h 至恒定质量后的质量。水分饱和时的体积

表 1　林地土壤基本理化性质

Table 1　Basic physicochemical properties of forest soils

指标类型 Indicator type	指标名称 Indicator name	参数 Parameter	指标类型 Indicator type	指标名称 Indicator name	参数 Parameter
交换性离子 Exchangeable ion	钙离子含量	5.5 μmol/g	大量元素 Macronutrient	有机质含量	25 100 μg/g
	镁离子含量	2.98 μmol/g		全氮含量	1 600 μg/g
	钾离子含量	3.25 μmol/g		全磷含量	490 μg/g
	钠离子含量	4.28 μmol/g		全钾含量	9 470 μg/g
	铝离子含量	42.35 μmol/g		速效氮含量	64.13 μg/g
	氢离子含量	4.36 μmol/g		有效磷含量	3.66 μg/g
	总酸含量	47.39 μmol/g		速效钾含量	69.40 μg/g
	阳离子交换量	89.94 μmol/g		缓效钾含量	42.07 μg/g
	盐基总量	92.9 μmol/g	中微量元素有效态 Available micro-nutrient	铁	22.04 μg/g
物理性质 Physical property	质地	粉黏土		铜	11.87 μg/g
	粘粒	20.79%		钼	0.11 μg/g
	土壤容重	1.23 g/cm^3		硼	0.67 μg/g
	pH 值	5		锰	2.55 μg/g
				锌	0.55 μg/g
				硫	568.23 μg/g

表 2　杉木地理种源采样地理位置及主要气象因子

Table 2　Geographical locations and main meteorological factors of the sampled *C. lanceolata* provenances

种源地编号 Provenance code	种源地 Provenances	纬度 Latitude（N）	经度 Longitude（E）	年均温 Annual temperature /℃	1 月均温 January temperature /℃	7 月均温 July temperature /℃	年降水量 Annual precipitation /mm	无霜期 Frost-free period /d	日照时数 Sunshine hours /h
1	四川合江	28°46′12″	106°08′24″	17.40	10.40	32.00	1 184.20	357.00	1 348.90
2	浙江开化	29°07′48″	118°32′60″	15.30	11.00	35.00	1 814.00	252.00	1 712.50
3	福建顺昌	26°45′00″	117°54′00″	18.20	15.00	36.00	1 756.00	305.00	1 740.70
4	福建邵武	26°16′48″	117°27′00″	16.70	13.00	34.00	1 857.60	262.00	1 740.40
5	福建沙县	26°16′48″	117°53′24″	17.90	10.00	27.00	1 511.00	255.00	1 887.00
6	江西安福	27°22′12″	114°09′36″	15.60	5.90	28.90	1 553.00	279.00	1 649.00
7	湖南会同	26°42′36″	110°01′48″	15.20	4.90	27.30	1 340.20	280.00	1 317.00
8	湖南芷江	27°34′12″	109°47′24″	16.40	10.00	34.00	1 156.40	279.00	1 527.70
9	广东河源	23°25′48″	115°20′60″	20.80	11.90	28.10	1 665.00	355.00	1 733.90
10	广东蕉岭	24°51′00″	116°22′48″	20.10	10.70	28.90	1 484.70	315.00	1 780.90
11	广东连山	24°13′48″	112°01′12″	18.00	10.00	27.50	1 753.30	354.70	1 382.00
12	广西融水	25°12′36″	109°12′00″	18.90	10.00	33.00	2 194.60	322.00	1 616.90
13	广西隆林	24°47′24″	105°06′36″	16.50	6.00	28.00	1 157.90	290.00	1 763.90
14	云南镇雄	27°37′48″	105°17′24″	11.80	3.50	22.00	914.60	218.60	1 341.00
15	贵州黎平	26°28′48″	108°46′48″	15.40	5.00	26.10	1 325.90	277.00	1 317.90

（V_{max}）采用排水法测定，即将茎干木芯浸泡至恒定质量后，用精度 0.001 g 的电子天平（Mettler Toledo JE1002）配合浮力称量组件测定水中质量，计算样品体积。木材基本密度（ρ_y）按照《木材基本密度测定方法》（GB/T 1933—2009）测定，如公式（1）所示，结果精确至 0.001 g/cm^3。茎干木芯样品经 65 ℃烘干 12 h 至恒定质量后，用于有机碳及矿质元素分析。

$$\rho_y=m_d/V_{max}。\quad（1）$$

2）单株材积与干材生物量计算

根据参考文献 [14] 计算单株材积（V），公式如下：

$$V=0.000\ 058\ 774\ 02D^{1.969\ 983\ 1}H^{0.896\ 461\ 57}。\quad（2）$$

式中：D 为胸径，H 为树高。

单株干材生物量（G）为单株材积与木材基本密度的乘积。

1.3　茎干矿质元素含量检测

茎干木芯样品经液氮超低温冷冻后，使用球磨机粉碎过 0.15 mm 孔径筛。采用凯氏定氮法测定 N 含量 [15]，采用重铬酸钾氧化法测定植物样品有机碳含量 [16]，采用微波消解 - 电感耦合等离子体发射光谱法（ICP-OES）测定 Fe、Mn、Ca、Mg、B、P、S 和 K 含量 [17]。所有测定均进行平行试验以确保数据准确性。

1.4　数据分析

原始数据经 Excel 2019 软件整理后，采用 SPSS 26.0 软件进行方差分析、Duncan 多重比较及基于关键元素因子及有机碳储量的系统聚类分析，并利用 Origin 2022 软件构建变量柱状图和相关性热图；基于 R 语言平台（版本 4.2.1），通过冗余分析（Redundancy analysis，RDA）和结构方程模型（Structural equation modeling，SEM）解析原产地地理、气候因子同生长性状、有机碳储量及化学计量特征的关系。冗余分析时先对数据进行赫林格转换后再开展分析。SEM 建模将显变量（观测指标）与潜变量残差方差设为自由参数进行估计。本研究中，C、N、P 化学计量比均采用质量比表示。

2　结果与分析

2.1　不同种源杉木生长、材性及有机碳储量性状比较

从表 3 可知，总体而言，杉木茎干生长、生物量和有机碳储量性状在不同种源间表现出不同程度的差异。参试种源性状变异丰富，变异系数在 9.58% ～ 50.74% 波动。其中，木材基本密度遗

表 3　不同种源杉木茎干生长、材性及有机碳储量差异 †

Table 3　Variations in stem growth, wood properties and organic carbon storage among *C. lanceolata* provenances

种源地编号 Provenance code	种源地 Provenance	胸径 DBH /cm	树高 Tree height /m	单株材积 Volume per tree /m^3	木材基本密度 Wood basic density /(g·cm^{-3})	生物量 Biomass /(kg·株$^{-1}$)	有机碳储量 Organic carbon stock /(kg·株$^{-1}$)
1	四川合江	26.15±4.84 de	21.53±1.88 bcd	0.555±0.219 efg	0.317±0.011 bcdef	175.32±67.61 d	68.07±25.69 f
2	浙江开化	31.95±2.94 abc	23.65±1.81 abcd	0.871±0.192 abcde	0.329±0.022 abc	285.14±57.68 abc	126.90±26.02 def
3	福建顺昌	35.42±3.26 a	23.90±2.36 abc	1.074±0.223 a	0.298±0.023 fg	318.91±64.45 ab	207.35±42.44 ab
4	福建邵武	30.40±3.23 abcd	24.44±4.83 ab	0.823±0.275 abcdef	0.282±0.024 g	232.14±79.78 bcd	129.67±42.99 def
5	福建沙县	33.88±3.77 ab	24.00±2.31 abc	1.001±0.282 ab	0.307±0.003 def	306.76±86.21 ab	161.85±45.09 bcd
6	江西安福	26.09±3.57 de	20.92±2.81 cd	0.537±0.178 fg	0.307±0.017 def	164.62±55.63 d	83.79±29.75 ef
7	湖南会同	31.98±7.54 abc	24.12±2.99 abc	0.950±0.463 abc	0.298±0.018 fg	286.75±150.42 abc	196.69±105.46 abc
8	湖南芷江	32.49±4.56 abc	23.31±2.55 abcd	0.903±0.306 abcd	0.328±0.023 abcd	293.88±91.14 abc	236.25±73.89 a
9	广东河源	29.45±4.25 bcde	22.49±4.30 bcd	0.736±0.254 abcdefg	0.312±0.027 bcdef	225.78±70.19 bcd	136.58±42.39 de
10	广东蕉岭	24.65±2.96 e	21.15±2.20 cd	0.481±0.149 g	0.331±0.035 ab	159.07±53.91 d	92.15±31.78 ef
11	广东连山	27.8±5.54 cde	21.34±2.95 bcd	0.636±0.282 cdefg	0.304±0.016 ef	194.15±90.96 cd	120.73±56.81 def
12	广西融水	33.45±4.93 ab	26.05±2.29 a	1.054±0.352 ab	0.320±0.004 bcde	337.09±111.17 a	142.17±51.72 cde
13	广西隆林	30.45±5.11 abcd	23.55±2.11 abcd	0.809±0.277 abcdef	0.348±0.012 a	281.41±95.78 abc	219.22±74.55 ab
14	云南镇雄	26.02±6.93 de	20.67±4.29 d	0.577±0.344 defg	0.309±0.009 cdef	179.21±108.86 d	125.96±77.76 def
15	贵州黎平	33.32±9.46 ab	24.49±4.11 ab	1.088±0.619 a	0.281±0.029 g	307.07±174.82 ab	165.86±91.53 bcd
均值 Mean		30.14±5.93**	22.95±3.23**	0.799±0.360**	0.313±0.030**	248.65±109.54**	147.01±74.59**
变异系数 Coefficient of variation /%		19.67	14.07	45.06	9.58	44.05	50.74

† 数据为（平均值 ± 标准误差）。同列不同小写字母表示各组间存在显著差异（$P < 0.05$）。“**”表示差异极显著（$P < 0.01$）。下同。
Data are presented as (mean ± standard error). Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$) among groups. “**” indicates highly significant differences ($P < 0.01$). The same below.

传稳定性最高（变异系数为 9.58%），而有机碳储量的种源分化最为剧烈（变异系数为 50.74%）。福建顺昌种源的胸径表现最优，其胸径显著高于表现最差的广东蕉岭种源，增幅达 43.69%。广西融水种源在树高与生物量上均表现最优良，与树高最低的云南镇雄种源相比，其树高显著提高 26.03%；与生物量最低的江西安福种源相比，其生物量显著提高 104.77%。单株材积以贵州黎平种源最大（1.088 m^3），为广东蕉岭种源的 2.26 倍。广西隆林种源木材基本密度最高（0.348 g/cm^3），较最低的贵州黎平种源显著增加 23.84%。有机碳储量在种源间差异最为显著，其中湖南芷江种源有机碳储量最高，达 236.25 kg/ 株，是四川合江种源的 3.47 倍。这一结果充分凸显了优良种源筛选对提升杉木碳汇能力的巨大潜力。由此表明，杉木茎干生长、生物量积累与碳汇功能均表现出不同程度的种源遗传分化。

2.2　不同种源杉木茎干矿质元素含量及 C、N、P 化学计量比特征

不同种源杉木茎干矿质元素含量及 C、N、P 化学计量比存在不同程度的遗传分异（图 1）。大量元素中，P、K 元素的种源间含量差异较大，其含量分别为 0.011 ～ 0.024、0.50 ～ 0.67 g/kg。福建顺昌种源 P 含量最高（0.024 g/kg），显著高于最低种源。湖南会同种源 K 含量最高（0.668 g/kg）。C 和 N 含量差异相对较小，湖南芷江种源 C 含量最高，为最低种源 C 含量的 1.51 倍。中、微量元素中，Fe 的积累特征在不同种源间存在不同程度的差异，其含量为 26.93 ～ 79.85 μg/g，其中湖南芷江种源最高。

化学计量比分析进一步揭示了种源间差异化的元素平衡策略。C∶P 与 N∶P 变异系数较大（变异系数分别为 37.8%、31.9%），福建邵武种源拥有最高的 C∶P（55 457）和 N∶P（82），指示其可能受到较强的磷限制。相反，湖南芷江种源表现出最高的 C∶N，反映了其具有较高的氮利用效率。

2.3　地理与气候因子对杉木茎干生长及元素分配的驱动作用

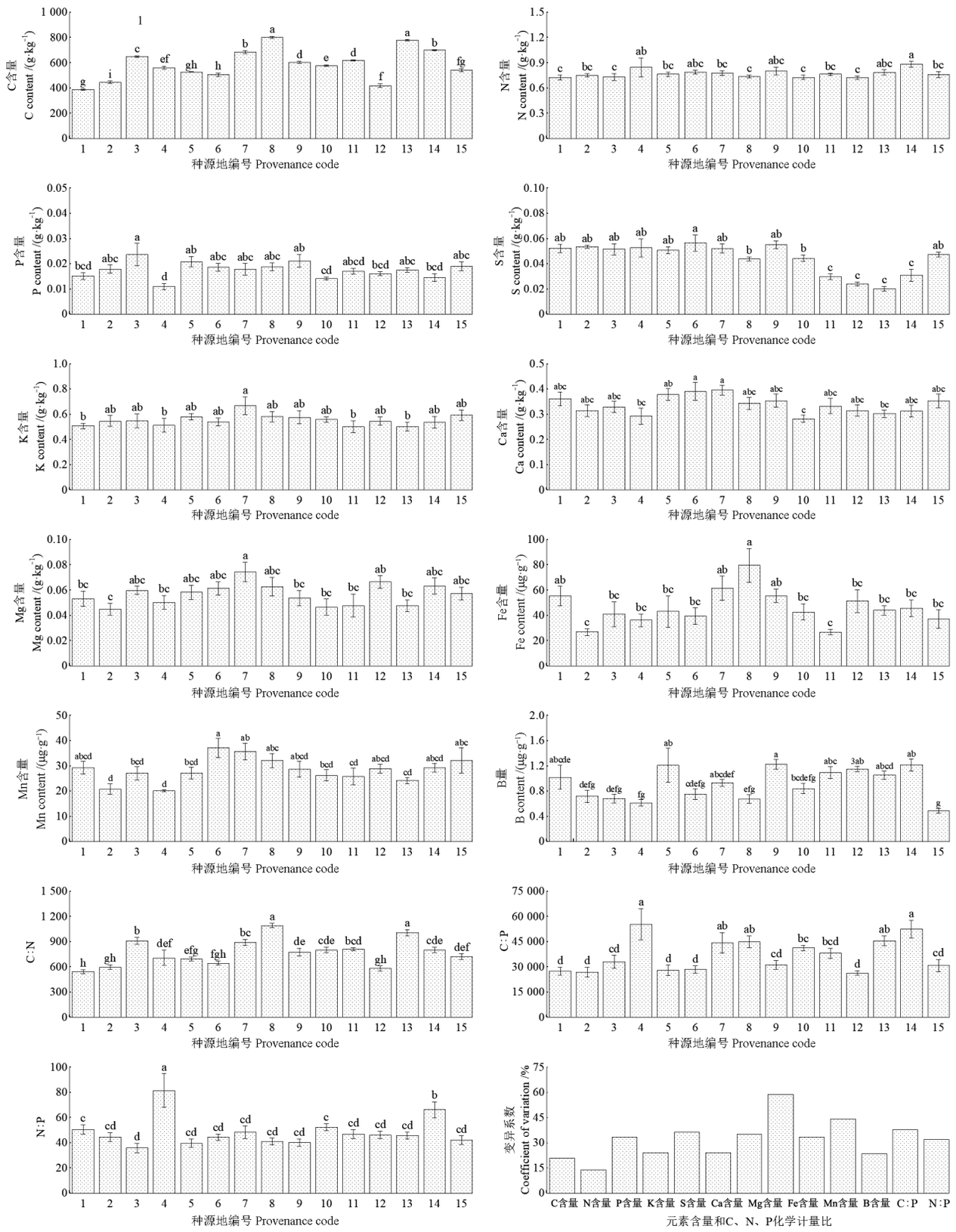
冗余分析结果表明，杉木茎干生长性状与营养元素分配特征对原产地地理、气候因子的响应存在明显差异。种源原产地地理与气候因子共同解释了生长与碳汇性状 15.59% 的变异（图 2），以及元素分配 26.31% 的变异（图 3）。其中，年均降水量是驱动茎干生长（胸径、树高、生物量、单株材积）的最关键气候因子（R^2=0.1411，P ＜ 0.001），其与经度、纬度共同主导了杉木茎干生长与碳汇性状的空间格局，而木材基本密度与有机碳储量则呈现出与其他生长性状不同的响应模式。对于杉木茎干营养元素特征（图 3），经度（R^2=0.326 3，P ＜ 0.001）、纬度（R^2=0.168 4，P ＜ 0.001）、年均降水量（R^2=0.112 8，P ＜ 0.001）和 7 月均温（R^2=0.132 9，P ＜ 0.01）是主导茎干营养元素分配格局的核心因子。进一步向量分析表明，经度与 C 含量、C∶N、C∶P 呈显著正相关，而与 Mg、Ca、K 等矿质元素含量呈负相关；年均降水量则与 N、B、Mg 等元素含量呈正相关，与 C 含量、C∶N、C∶P 呈负相关。

相关分析进一步揭示了其具体作用方向（图 4）。7 月均温与 C 含量、N 含量、C∶P 均呈显著负相关，年均降水量与 C 含量、N 含量和 C∶N、C∶P 同样呈显著负相关。上述规律表明，较高的水热条件提升了杉树 C、P 元素的利用效率。其它地理与气候因子对元素分配及化学计量比的影响程度不同。例如，经度与 C 含量、Mn 含量、C∶N、C∶P 呈显著负相关；纬度与 C 含量、B 含量、C∶N 呈显著负相关；经度、纬度与 S 含量呈显著正相关；日照时数与木材基本密度呈显著正相关，但与 C、Mg、Mn 含量呈负相关。值得注意的是，P、K 含量与原产地地理、气候因子之间未检测到显著的直接相关性（P ＞ 0.05）。综上所述，地理与气候因子可能通过调控关键元素的内部平衡与利用效率，而非元素绝对含量，间接影响林木的生理生态功能。

2.4　茎干矿质元素对杉木生长和碳汇功能的驱动作用

相关分析表明（图 5），茎干矿质元素间存在复杂的互作关系。P 含量与 K、Ca、Mg、S 等元素含量呈显著正相关，显示出协同积累效应；P、K 含量与生物量、有机碳储量呈显著正相关；而 N∶P、Mn 含量则与多项生长指标呈显著负相关；由此初步揭示了 P、K 元素的关键正驱动作用及 Mn 的抑制潜力。

冗余分析显示（图 6），茎干矿质元素共同解释了生长与碳汇性状总变异的 21.01%，其解释率高于地理与气候因子（15.59%）。第一排序轴（83.3%）为核心驱动轴，其中 P、K 含量的向量与生物量、单株材积及有机碳储量的向量方向高度一致，表明它们是促进林木生长与碳积累的关键元素因子。



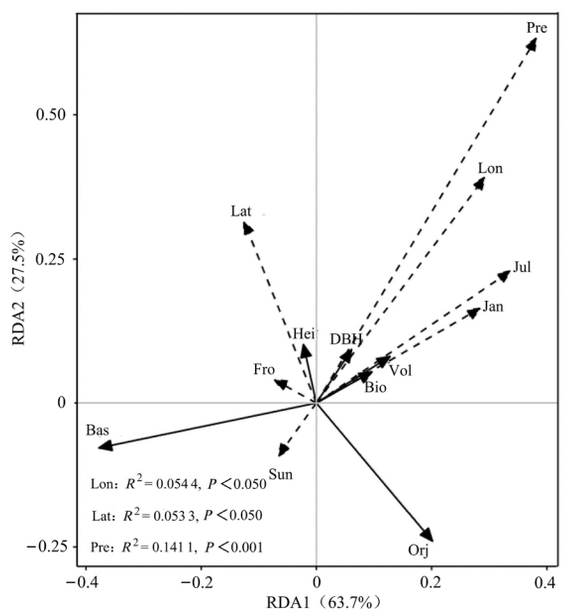
不同小写字母表示差异显著（$P < 0.05$）。Different lowercase letters in the figure indicate significant differences ($P < 0.05$).

图 1　不同种源杉木茎干矿质元素含量、变异系数及 C、N、P 化学计量比

Fig. 1　Mineral element contents coefficients of variation, and C, N, P stoichiometric ratios in stems of *C. lanceolata* from different provenances

基于冗余分析结果，本研究通过结构方程模型进一步解析了其驱动路径（图 7）。本研究模型拟合良好，证实了茎干 P、K 含量对生物量积累存在极显著的直接正向效应（路径系数为 0.410，

$P < 0.01$），是驱动生物量形成的关键元素因子；同时生物量对有机碳储量存在极显著的正向直接效应（路径系数为 0.916，$P < 0.001$）。综合说明，P、K 元素主要通过促进生物量积累，进而以间接传导路径驱动有机碳储量的增加，地理、气候因子则通过调控营养元素含量、生物量变化，多路径间接影响有机碳固存能力。



Lat. 纬度；Lon. 经度；Ann. 年均温；Jul.7 月均温；Jan.1 月均温；Pre. 年均降水量；Fro. 无霜期；Sun. 日照时数；DBH. 胸径；Hei. 树高；Bio. 生物量；Orj. 有机碳储量；Vol. 单株材积；Bas. 木材基本密度。下图同。
Lat. Latitude; Lon. Longitude; Ann. Mean annual temperature; Jul. Mean July temperature; Jan. Mean January temperature; Pre. Mean annual precipitation; Fro. Frost-free period; Sun. Sunshine duration; DBH. Diameter at breast height; Hei. Tree height; Bio. Biomass; Orj. Organic carbon stock; Vol. Volume; Bas. Wood basic density. Same as the previous figure.

图 2　杉木茎干生长性状与地理、气候因子的 RDA 分析
Fig. 2　RDA of stem growth traits of *C. lanceolata* and geographic and climatic factors

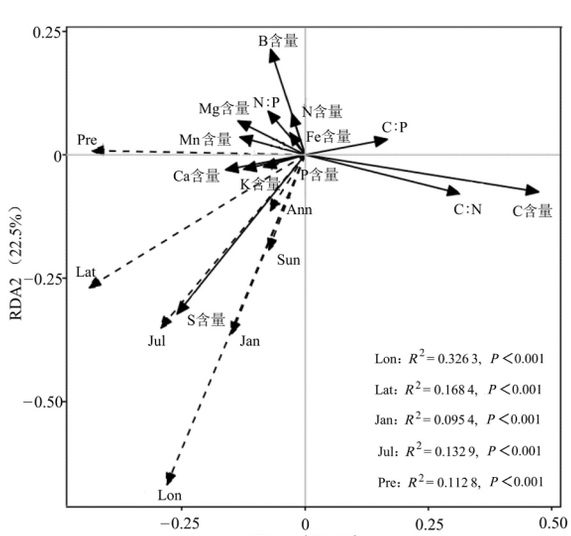
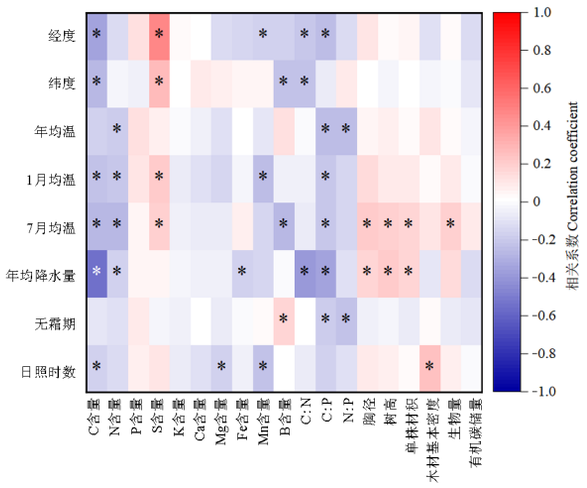
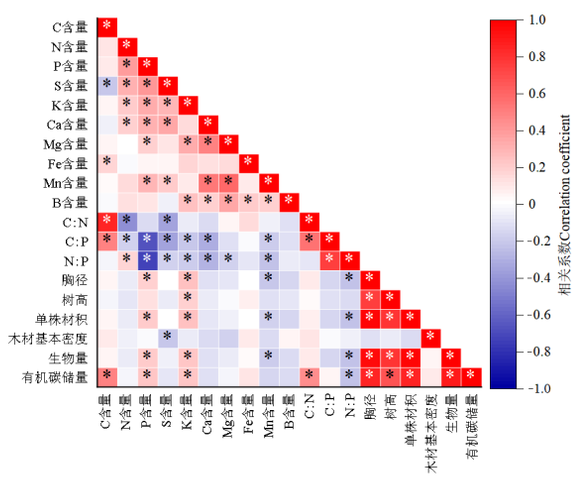


图 3　杉木茎干营养元素与地理、气候因子的 RDA 分析
Fig. 3　RDA of stem nutrient elements of *C. lanceolata* and geographic and climatic factors



“*”表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。
“*” denotes significance at the $P < 0.05$ level.

图 4　不同种源杉木茎干生长、营养元素含量与地理、气候因子的相关分析
Fig. 4　Correlation analysis of stem growth traits, nutrient element contents, and geographic and climatic factors of *C. lanceolata* from different provenances



“*”表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。
“*” denotes significance at the $P < 0.05$ level.

图 5　不同种源杉木茎干生长性状、营养元素含量及有机碳储量的相关分析
Fig. 5　Correlation analysis of stem growth traits, nutrient element contents, and organic carbon stock among *C. lanceolata* from different provenances

2.5　不同种源杉木茎干 P、K 含量与碳汇能力的聚类特征

基于茎干 P、K 含量及有机碳储量的系统聚类分析（图 8），在欧氏距离为 5 处将 15 个杉木种源划分为 3 个特征鲜明的类群。第 I 类群（高碳汇 - 高磷钾型）包含福建顺昌、湖南会同、湖南芷江和广西隆林 4 个种源。该类群同时兼具较高的有机碳储量（均不小于 196.70 kg/ 株）、较高的 P 含量（均不小于 0.018 g/kg）和 K 含量（均不小于 0.567 g/kg），代表了碳汇功能与 P、K 养分积累

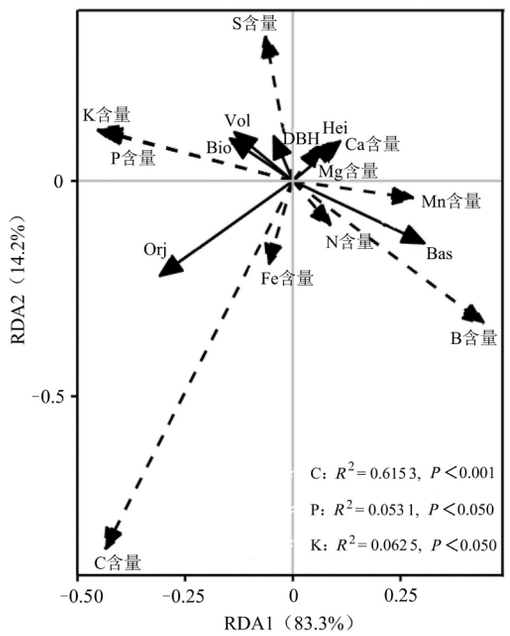
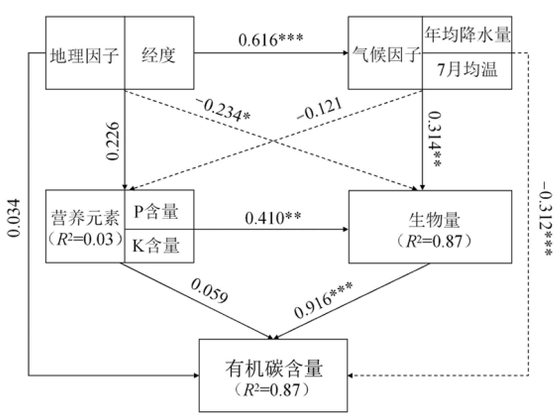


图 6　不同种源杉木茎干生长性状、营养元素含量及有机碳储量 RDA 分析

Fig. 6　RDA analysis of growth traits, nutrient element contents, and organic carbon stock in stems of *C. lanceolata* from different provenances



卡方自由度比为2.35，比较拟合指数为0.978，RMSEA=0.096，SRMR=0.046

数字为路径系数，实线箭头表示变量间正相关，虚线箭头表示变量间负相关。“*”“**”和“***”分别表示在 P < 0.05、P < 0.01 和 P < 0.001 水平上差异显著。

The numbers represent path coefficients. Solid arrows indicate positive correlations between variables, and dashed arrows indicate negative correlations. “*”, “**”, and “***” denote significance at the P < 0.05, P < 0.01, and P < 0.001 levels, respectively.

图 7　杉木茎干生物量 - 有机碳储量与地理、气候因子的多层级驱动 SEM

Fig. 7　Multilevel driving SEM of *C. lanceolata* stem biomass-organic carbon stock with geo-climatic factors

能力协同优化的优良种源。这些种源主要分布于杉木分布区的核心适生地带。第Ⅱ类群（低碳汇 - 低磷钾型）包括江西安福、广东蕉岭和四川合江 3 个种源。该类群表现为有机碳储量、P 含量、K 含量均处于较低水平，其碳汇潜力与养分积累能力均相对较弱。第Ⅲ类群（过渡型）包含其余 8 个种源（如云南镇雄、广东连山等）。该类群的有机碳储量及 P、K 含量均处于中等水平，其特征介于第 I 类群和第Ⅱ类群之间。该聚类结果直观地印证了前述分析结论：茎干中较高的 P、K 元素积累与高碳汇能力密切相关。筛选出的第 I 类群种源（如福建顺昌、湖南芷江等）可为实现杉木人工林碳汇定向改良提供直接的优良种质材料。

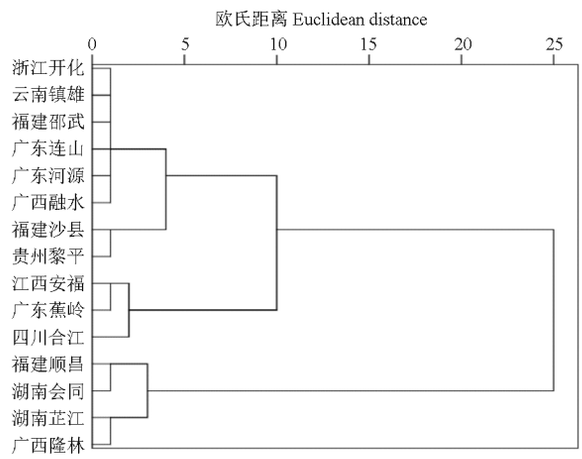


图 8　基于不同种源杉木茎干 P、K 含量和有机碳储量的种源聚类分析

Fig. 8　Cluster analysis of *C. lanceolata* provenances based on stem P content, K content, and organic carbon stock

3　讨　论

3.1　杉木地理种源生长、养分与碳汇多维特征解析及良种选育策略

本研究通过多性状协同分析，系统探究杉木茎干生长、矿质元素及碳汇功能的种源分化规律，研究维度全面、分析方法可靠，能够客观反映不同地理种源杉木的表型遗传特征。林木种源变异是基因型长期适应地域环境形成的遗传分化现象，也是开展林木遗传改良与良种筛选的核心前提。本研究证实杉木茎干生长指标、矿质元素含量与有机碳储量均存在明显种源差异，其中 P、K 含量的种源变异规律与生长（生物量）、有机碳储量特征表现出高度协同性，这一发现不仅验证了前人在杉木养分利用效率种源差异上的研究结果 [11-12]，更进一步拓展了现有研究认知，将养分特征与碳汇功能建立直接关联，明确了 P、K 含量在杉木碳汇形成中的核心地位。

不同种源杉木在材积、生物量与有机碳储量上呈现明显的功能分化，这种性状分异是物种地理适应性的综合体现。福建顺昌、湖南芷江等优良种源地集中分布于杉木自然分布核心区域 [12]，推测其在长期自然选择过程中，演化形成了养分

吸收利用（尤其是 P、K 含量）、生物量合成与碳同化分配相协调的高效遗传机制。依托本研究构建的生长、养分、碳汇多维评价体系，可针对不同经营目标制定差异化种源选择方案。在以提升碳汇能力为核心的杉木人工林营建中，优先选用高 P、K 含量且碳汇表现突出的种源，能够借助遗传改良手段，同步实现林分生产力与生态固碳功能的提升，为杉木定向育种与生产应用提供实操依据。

3.2　地理与气候因子对杉木生长及元素利用的调控机制

水热条件是调控森林植被生长发育的核心环境因子，本研究结论与全球尺度上乔木生长受温度、水分限制的普遍规律一致 [18-19]。较高的夏季温度（7 月均温）和充沛降水（年均降水量）等气候要素，很可能通过延长生长季、增强光合速率及同化物转运效率，进而直接促进杉木的生物量积累。

深入分析发现，地理与气候因子对杉木生理功能的调控存在独特路径，并非通过改变茎干 P、K 等关键元素的绝对含量，而是通过调控 C、N、P 化学计量平衡，间接影响植株养分利用效率与生理状态。本研究中较高的水热条件与较低的 C∶N、C∶P 显著正相关，这表明在温暖湿润的环境中，杉木能够更高效地利用 N 和 P 元素来同化碳，即养分利用效率更高。这一“计量平衡”调控机制可能源于以下 2 个过程的耦合：1）高温高湿加速了土壤有机质矿化与养分淋溶，迫使林木提高对有限养分（如 N）的吸收和利用效率；2）南方酸性红壤对磷的强固定效应 [8] 可能在一定程度上缓冲了气候对土壤有效磷的直接影响，使得林木茎干中的 P 含量保持相对稳定，转而通过优先调整碳与磷的平衡（降低 C∶P），大幅提高磷的利用效率来适应环境。在此生境条件下，杉木并未通过大幅调整元素吸收总量来响应环境变化，而是选择优化体内元素配比、提升养分利用效率的适应性策略。这一生态对策也合理解释了本研究中茎干 P、K 含量与地理气候因子无显著直接关联，但 C、N、P 化学计量比特征对水热条件响应灵敏的现象，完善了杉木与环境互作的理论认知。

3.3　磷、钾元素驱动杉木生物量与碳汇积累的关键机制

本研究结合相关性分析、冗余分析与结构方程模型，从关联关系与因果路径 2 个层面，明确 P、K 是驱动杉木茎干生物量积累与碳汇功能提升的 2 个最关键矿质元素，厘清了多级驱动链路，为解析杉木养分 - 碳汇耦合机制提供了有力支撑。P、K 参与植物细胞分裂、光合作用、有机物转运等一系列核心生理过程，二者协同作用保障林木正常生长与碳固定。磷是核酸 [20]、腺苷三磷酸 [21]、磷脂等功能物质的重要组分，直接作用于树干形成层的分裂、分化过程，同时作为关键辅因子参与光合产物转化与长距离运输 [22]，是杉木茎干生长的物质基础。K 作为植株体内重要的渗透调节物质与酶激活剂，一方面调控气孔开闭，平衡光合与蒸腾作用 [23]，另一方面维持韧皮部膨压 [24]、激活碳水化合物合成相关酶 [25]，推动光合产物在茎干中不断积累与固存。SEM 揭示了碳汇积累的核心路径：P 和 K 主要通过直接促进生物量积累，进而间接驱动有机碳储量的极显著增加，表明了林木通过光合作用固定的碳（以生物量形式存在）是碳汇的实质载体，而充足的 P、K 供应，则是驱动同化产物向生物量高效转化的关键营养限制因子。本研究结果也为高碳汇种源的筛选提供了直接、可量化的指标：应优先选择茎干有机碳储量不小于 196 kg/ 株、P 含量不小于 0.018 g/kg、K 含量不小于 0.554 g/kg，且 N∶P 不大于 47 的种源，如湖南芷江、福建顺昌、湖南会同种源。这些指标确保了树种兼具高碳固持能力和高效的磷钾利用基础，阐明了养分调控杉木碳汇形成的内在逻辑。

此外，本研究发现 Mn 含量、N∶P 均与杉木生物量及有机碳储量显著负相关。过量 Mn 会抑制镁离子吸收、损伤光合机构 [26]，南方酸性红壤易活化 Mn 离子，加剧 Mn 毒害风险 [27]；氮素过剩也会打破植株元素稳态，制约碳汇功能。因此，南方杉木人工林经营中，除补充磷、钾肥外，还需严控氮肥用量，对酸性林地适量施用石灰调节土壤 pH 值以降低锰活性，维持元素平衡，将氮素与锰元素控制在生态安全阈值内，从而协同提升林分生物量积累与生态系统固碳增汇能力。

3.4　本研究的局限性及展望

本研究围绕杉木茎干矿质元素的种源变异特征及其功能驱动机制开展系统性分析，虽取得一定研究成果，但受研究尺度、样本条件与试验设计限制，仍存在若干不足之处。首先，试验仅聚焦茎干单一器官，而植物根、枝、叶等器官分别承担养分吸收、转运、合成等不同功能 [28]，各器官间存在紧密的“源 - 库”协作关系。本研究未涉

及多器官联合分析，无法完整阐释杉木整体养分吸收、分配与利用的遗传调控规律。其次，本研究试验样地为单一试验林（江西大岗山杉木种源试验林），林木表型表达通常受基因型和环境共同作用，单点数据难以全面反映不同生态区环境对种源性状表达的影响，筛选得到的优良种源跨区域适应性与推广价值仍需进一步验证。

因此，后续研究应开展多生态区联网试验，通过建立元素含量 - 环境因子互作模型，量化气候因子、土壤理化性质与遗传背景对元素变异的贡献率。这些工作的推进可系统阐明杉木矿质元素循环的稳态机制，为人工林精准施肥和优良种质跨区配置提供理论支撑。

4　结　论

1）杉木茎干生长性状、碳汇功能（有机碳储量）及矿质元素含量存在不同程度的种源遗传变异。其中，P、K 含量的种源分化尤为突出，且与生物量、有机碳储量的格局高度一致。

2）7 月均温与年均降水量是驱动杉木生物量积累的关键气候因子。茎干 P、K 含量主要由遗传特性决定。环境因子则通过改变 C、N、P 化学计量平衡间接影响林木生长与碳汇功能。

3）P、K 是驱动杉木碳汇功能的核心因子。结构方程模型证实，P、K 含量通过直接促进生物量积累（路径系数为 0.410）间接决定有机碳储量（路径系数为 0.916）。Mn 含量过高、N∶P 比例失衡会抑制林木生长，制约碳汇功能。

4）筛选出福建顺昌、湖南芷江、湖南会同和广西隆林 4 个兼具高茎干 P、K 含量与高有机碳储量的优良种源地，可为杉木高碳汇人工林建设提供优质种质资源。

参考文献：

[1] 国家林业和草原局 . 中国森林资源报告 (2014—2018)[M]. 北京 : 中国林业出版社 ,2019:6-9.
National Forestry and Grassland Administration. China forest resources report (2014-2018)[M]. Beijing: China Forestry Publishing House,2019:6-9.

[2] 徐克芹 , 喻龙华 , 张华聪 , 等 . 杉木不同世代育种群体遗传多样性回溯分析与核心种质构建 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2025,45(9):39-49.
Xu K Q, Yu L H, Zhang H C, et al. Genetic diversity retrospective analysis and core collection construction for different generations of *Cunninghamia lanceolata* breeding population[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2025,45(9):39-49.

[3] 丁波 , 丁贵杰 , 李先周 , 等 . 短期间伐对杉木人工林生态系碳储量的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2016,36(8):66-71.
Ding B, Ding G J, Li X Z, et al. Effects of short-term thinning on the carbon storage in *Cunninghamia lanceolata* plantation ecosystem[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2016,36(8):66-71.

[4] 夏政 , 沈亚雄 , 张勰 . 杉木大径木培育林分立地选择及轮伐期研究 [J]. 湖南林业科技 ,2025,52(2):35-41.
Xia Z, Shen Y X, Zhang X. Study on stand site selection and rotation period of large-diameter Chinese fir cultivation[J]. Hunan Forestry Science & Technology,2025,52(2):35-41.

[5] Tian Y L, Xu J J, Li L X, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal symbiosis on growth and biochemical characteristics of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) seedlings under low phosphorus environment[J]. PeerJ,2024,12:e17138.

[6] Zhao Z Q, Yang Y H, Lyu H F, et al. Retained tree biomass rather than replanted one determines soil fertility in early stand reconstruction in Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations[J]. Forests,2025,16:654.

[7] 于贵瑞 , 郭珂歆 , 郝天象 . 新时期林业生态经济体系构建的初步探索 [J]. 林业科学 ,2025,61(7):8-22.
Yu G R, Guo K X, Hao T X. Preliminary exploration on the construction of forestry ecological economic system in the new era[J]. Scientia Silvae Sinicae,2025,61(7):8-22.

[8] 田地 , 严正兵 , 方精云 . 植物生态化学计量特征及其主要假说 [J]. 植物生态学报 ,2021,45(7):682-713.
Tian D, Yan Z B, Fang J Y. Review on characteristics and main hypotheses of plant ecological stoichiometry[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2021,45(7):682-713.

[9] 徐睿 , 刘静 , 王利艳 , 等 . 不同地理种源杉木根叶功能性状与碳氮磷化学计量分析 [J]. 生态学报 ,2022,42(15):6298-6310.
Xu R, Liu J, Wang L Y, et al. Analysis of root and leaf functional traits and C, N, P stoichiometry of *Cunninghamia lanceolate* from different provenances[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(15):6298-6310.

[10] Wang D, Bormann F H, Lugo A E, et al. Comparison of nutrient-use efficiency and biomass production in five tropical tree taxa[J]. Forest Ecology and Management,1991,46:1-21.

[11] 何念鹏 , 于贵瑞 , 刘聪聪 , 等 . 植物功能生态学 : 从器官到生态系统 [M]. 北京 : 科学出版社 ,2024:99.
He N P, Yu G R, Liu C C, et al. Plant functional ecology: from organ to ecosystem[M]. Beijing: Science Press,2024:99.

[12] Wu P F, Tigabu M, Ma X Q, et al. Variations in biomass, nutrient contents and nutrient use efficiency among Chinese fir provenances[J]. Silvae Genetica,2011,60(3-4):95-105.

[13] 惠刚盈 , 胡艳波 , 罗云伍 , 等 . 杉木中大径材成材机理的研究 [J]. 林业科学研究 ,2000,13(2):177-181.
Hui G Y, Hu Y B, Luo Y W, et al. Study on the mechanism of producing high quality wood of Chinese fir[J]. Forest Research, 2000,13(2):177-181.

[14] 郭光智 , 段爱国 , 张建国 . 南亚热带杉木林分蓄积量生长立地与密度效应 [J]. 林业科学研究 ,2019,32(4):19-25.
Guo G Z, Duan A G, Zhang J G. The site and planting density effects on the wood volume growth of Chinese fir plantations in south subtropical area[J]. Forest Research, 2019,32(4):19-25.

[15] NY/T 2017—2011 植物中氮、磷、钾的测定 [S].
NY/T 2017—2011 Determination of nitrogen, phosphorus and potassium in plants[S].

[16] T/NAIA 070—2021 植物全碳含量的测定 [S].
T/NAIA 070—2021 Determination of total carbon content in plants[S].

[17] LY/T 1239—1999 森林土壤 pH 值的测定 [S].
LY/T 1239—1999 Determination of pH value in forest soil[S].

[18] 陈禹光 , 乐新贵 , 陈宇涵 , 等 . 基于 MaxEnt 模型预测气候变化下杉木在中国的潜在地理分布 [J]. 应用生态学报 ,2022,33(5):1207-1214.
Chen Y G, Le X G, Chen Y H, et al. Identification of the potential distribution area of *Cunninghamia lanceolata* in China under climate change based on the MaxEnt model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2022,33(5):1207-1214.

[19] Leites L, Garzón M B. Forest tree species adaptation to climate across biomes: building on the legacy of ecological genetics to anticipate responses to climate change[J]. Global Change Biology,2023,29:4711-4730.

[20] Kolodiazhnyi O I. Phosphorus compounds of natural origin: prebiotic, stereochemistry, application[J]. Symmetry,2021, 13:889.

[21] Fang X Y, Yang D M, Deng L C, et al. Phosphorus uptake, transport, and signaling in woody and model plants[J]. Forestry Research,2024,4: e017.

[22] 曾德雯 , 朱龙英 , 冯岩 , 等 . 高等植物蔗糖磷酸合成酶 (SPS) 的研究进展 [J]. 植物生理学报 ,2020,56(5):931-938.
Zeng D W, Zhu L Y, Feng Y, et al. Research advance of sucrose phosphate synthase (SPS) in higher plant[J]. Plant Physiology Journal,2020,56(5):931-938.

[23] 陆志峰 , 鲁剑巍 , 潘勇辉 , 等 . 钾素调控植物光合作用的生理机制 [J]. 植物生理学报 ,2016,52(12):1773-1784.
Lu Z F, Lu J W, Pan Y H, et al. Physiological mechanisms in potassium regulation of plant photosynthesis[J]. Plant Physiology Journal,2016,52(12):1773-1784.

[24] De Schepper V, De Swaef T, Bauweraerts I, et al. Phloem transport: a review of mechanisms and controls[J]. Journal of Experimental Botany,2013,64(16):4839-4850.

[25] Sardans J, Peñuelas J. Potassium control of plant functions: ecological and agricultural implications[J]. Plants, 2021,10:419.

[26] 谢地香 , 马雪宁 , 赵雨晴 , 等 . 植物锰元素的吸收转运及调控 [J]. 中国科学 : 生命科学 ,2023,53(9):1199-1212.
Xie D X, Ma X N, Zhao Y Q, et al. Absorption, transport and regulation of manganese in plants[J]. Scientia Sinica (Vitae), 2023,53(9):1199-1212.

[27] 朱凡 , 雷佳奇 , 黄鑫浩 , 等 . 木本植物光反应对重金属胁迫响应机制的研究进展 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2022,42(10):9-21.
Zhu F, Lei J Q, Huang X H, et al. Advances in response mechanism of the light reaction of woody plants to heavy metal stress[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022,42(10):9-21.

[28] Yu C, Xu L, Li M X, et al. Phosphorus storage and allocation in vegetation on the Tibetan Plateau[J]. Ecological Indicators, 2022,145:109636.

[本文编校：张雨朦]