

闽北人工林叶片、凋落叶和土壤的碳、氮循环及分配策略

罗丹丹^{1a,1b,1c}, 洪希群^{1a,1b,1c}, 林 晗^{1a,1b,1c,①}, 陈 灿^{1b,1c,1d}, 张 斌², 何 俊², 欧阳玉莹³

(1. 福建农林大学: a. 林学院, b. 福建省南方森林资源与环境工程技术研究中心, c. 森林生态系统过程与经营福建省高校重点实验室, d. 菌草与生态学院, 福建 福州 350002; 2. 南平市建阳区林业局, 福建 南平 354200; 3. 福建省水土保持实验站, 福建 福州 350003)

摘要: 以闽北地区常见人工林树种壳菜果(*Mytilaria laosensis* Lecomte)、木荷(*Schima superba* Gardner et Champ.)、蕙荊锥[*Castanopsis fissa* (Champ. ex Benth.) Rehder et E. H. Wilson]、南酸枣[*Choerospondias axillaris* (Roxb.) B. L. Burt et A. W. Hill]、杉木[*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.]为研究对象,对5种林分叶片、凋落叶和土壤的碳(C)、氮(N)含量(w_C 和 w_N)及其稳定碳同位素比值($\delta^{13}C$)和稳定氮同位素比值($\delta^{15}N$)进行比较和普通最小二乘回归分析(OLS),对不同林分叶片与土壤间 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 的差值($\Delta\delta^{13}C$ 和 $\Delta\delta^{15}N$)进行比较,并对叶片、凋落叶和土壤的 w_C 、 w_N 、 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 进行Pearson相关性分析。结果显示:5种林分中,蕙荊锥林的叶片 w_C 及南酸枣林的叶片 w_N 最高,杉木林的叶片 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 最高;壳菜果林的凋落叶 w_C 及南酸枣林的凋落叶 w_N 最高,杉木林的凋落叶 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 最高;杉木林的土壤 w_C 、 w_N 、 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 均最高。回归分析结果显示:5种林分叶片和凋落叶的 $\delta^{13}C$ 与 $\ln w_C$ 以及 $\delta^{15}N$ 与 $\ln w_N$ 均在0.001水平呈显著正相关;南酸枣林土壤的 $\delta^{13}C$ 与 $\ln w_C$ 以及壳菜果林土壤的 $\delta^{15}N$ 与 $\ln w_N$ 在0.05水平呈显著正相关,杉木林土壤的 $\delta^{15}N$ 与 $\ln w_N$ 在0.001水平呈显著正相关,其余林分土壤的 $\delta^{13}C$ 与 $\ln w_C$ 以及 $\delta^{15}N$ 与 $\ln w_N$ 均在0.01水平呈显著正相关。5种林分的 $\Delta\delta^{13}C$ 和 $\Delta\delta^{15}N$ 分别为 -7.14‰ ~ -5.98‰ 和 -4.01‰ ~ -3.36‰ ,且这2个指标在林分间的差异不显著。相关性分析结果显示:有34对指标的相关性达到显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)水平。综合分析认为,不同叶习性树种在碳、氮分配策略上存在显著差异;比较来看,杉木林土壤的碳、氮富集效应较强,有机碳的周转和分解速率较高;稳定碳、氮同位素信号在森林生态系统养分循环过程中表现出较强的继承性和耦合性。

关键词: 碳、氮含量; 稳定同位素; 森林生态系统; 养分循环; 分配策略

中图分类号: Q948.1; S718.5 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2025)06-0090-12

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2025.06.10

Cycles and allocation strategies of carbon and nitrogen in leaves, litters, and soils of plantations

in northern Fujian Province LUO Dandan^{1a,1b,1c}, HONG Xiqun^{1a,1b,1c}, LIN Han^{1a,1b,1c,①}, CHEN Can^{1b,1c,1d}, ZHANG Bin², HE Jun², OUYANG Yuying³ (1. Fujian Agriculture and Forestry University: a. College of Forestry, b. Fujian Southern Forest Resources and Environmental Engineering Technology Research Center, c. Key Laboratory for Forest Ecosystem Processes and Management in Fujian Province, d. College of JunCao Science and Ecology, Fuzhou 350002, China; 2. Forestry Bureau of Jianyang District in Nanping, Nanping 354200, China; 3. Fujian Soil and Water Conservation Experimental Station, Fuzhou 350003, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2025, 34(6): 90-101

Abstract: Taking common plantation species of *Mytilaria laosensis* Lecomte, *Schima superba* Gardner et Champ., *Castanopsis fissa* (Champ. ex Benth.) Rehder et E. H. Wilson, *Choerospondias axillaris* (Roxb.) B. L. Burt et A. W. Hill, and *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. in northern Fujian

收稿日期: 2025-04-13

基金项目: 福建省水利科技项目(MSK202432); 福建省水保站科技合作项目(KH220045A); 福建农林大学科技创新项目(KFB23049A)

作者简介: 罗丹丹(2000—),女,重庆丰都人,硕士研究生,主要从事森林培育方面的研究工作。

①通信作者 E-mail: fjinhan@163.com

引用格式: 罗丹丹, 洪希群, 林 晗, 等. 闽北人工林叶片、凋落叶和土壤的碳、氮循环及分配策略[J]. 植物资源与环境学报, 2025, 34(6): 90-101.

Province as research objects, the carbon (C) and nitrogen (N) contents (w_C and w_N) and their stable carbon isotope ratio ($\delta^{13}C$) and stable nitrogen isotope ratio ($\delta^{15}N$) in leaves, litters, and soils of the five stands were compared and analyzed via ordinary least squares regression (OLS), the differences in $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ between leaves and soils ($\Delta\delta^{13}C$ and $\Delta\delta^{15}N$) of different stands were compared, and the Pearson correlation analysis was conducted for w_C , w_N , $\delta^{13}C$, and $\delta^{15}N$ in leaves, litters, and soils. The results show that leaf w_C in *C. fissa* forest and leaf w_N in *C. axillaris* forest are the highest, and leaf $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ in *C. lanceolata* forest are the highest. Litter w_C in *M. laosensis* forest and litter w_N in *C. axillaris* forest are the highest, and litter $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ in *C. lanceolata* forest are the highest. Soil w_C , w_N , $\delta^{13}C$, and $\delta^{15}N$ in *C. lanceolata* forest are the highest. The regression analysis result shows that $\delta^{13}C$ and $\ln w_C$ as well as $\delta^{15}N$ and $\ln w_N$ in leaves and litters of the five stands show significant positive correlations at 0.001 level; $\delta^{13}C$ and $\ln w_C$ in soils of *C. axillaris* forest and $\delta^{15}N$ and $\ln w_N$ in soils of *M. laosensis* forest show significant positive correlations at 0.05 level, while $\delta^{15}N$ and $\ln w_N$ in soils of *C. lanceolata* forest show a significant positive correlation at 0.001 level, and $\delta^{13}C$ and $\ln w_C$ as well as $\delta^{15}N$ and $\ln w_N$ in soils of the other stands show significant positive correlations at 0.01 level. $\Delta\delta^{13}C$ and $\Delta\delta^{15}N$ of the five stands are -7.14‰ – -5.98‰ and -4.01‰ – -3.36‰ , respectively, and the differences in these two indexes are not significant among stands. The correlation analysis result shows that the correlations of 34 pairs of indexes reach significant ($P<0.05$) and extremely significant ($P<0.01$) levels. The comprehensive analysis suggests that there are significant differences in carbon and nitrogen allocation strategies among the tree species with different leaf habits; in comparison, the carbon and nitrogen enrichment effects of *C. lanceolata* forest soil are relatively strong, and its organic carbon turnover and decomposition rates are relatively high; stable carbon and nitrogen isotope signals exhibit relatively strong inheritance and coupling during nutrient cycle processes in the forest ecosystem.

Key words: carbon and nitrogen contents; stable isotope; forest ecosystem; nutrient cycle; allocation strategy

植物叶片、凋落物和土壤是森林生态系统物质循环与能量流动的核心载体,其碳(C)、氮(N)养分的动态分配与转化过程深刻影响着森林生态系统的结构与功能^[1]。叶片C、N含量直接影响植物的光合效率和养分分配^[2];凋落物为植物与土壤间的“纽带”,可将植物体内的养分归还土壤,影响土壤养分的积累和循环^[3];土壤则是森林生态系统的最终C、N储存库,根据其养分含量能够有效预测森林生态系统的养分饱和状态及养分循环能力^[4]。因此,探明森林生态系统叶片、凋落物和土壤的C、N含量特征,能够有效揭示C、N元素在森林生态系统各组分间的迁移转化过程及养分循环规律,为阐明森林生态系统养分循环的动态耦合关系和驱动机制提供理论依据。

稳定碳、氮同位素技术为追踪生态系统中C、N的循环过程提供了独特的示踪工具^[5]。植物稳定碳同位素比值($\delta^{13}C$)能够反映生境信息,揭示植物对降水、温度等环境因子的响应规律,反映植物C分配策略与生态适应性^[6]。凋落物是土壤有机质的主要来源,土壤 $\delta^{13}C$ 受植物 $\delta^{13}C$ 和有机碳分解的共同影响,不仅可以表征土壤有机质的来源及周转速率^[7],还能根据 $\delta^{13}C$ 在土壤中的垂直分布情况反映新碳和旧

碳的混合程度以及不同历史时期地表C₃和C₄植物优势度的变化,进而推测植物群落的动态演替过程和气候变化趋势^[5,8]。植物和土壤稳定氮同位素比值($\delta^{15}N$)是氮循环转化的结果,可提供氮输入、转化和输出的综合信息^[9]。稳定氮同位素技术已被广泛用于指示生态系统氮饱和状态、评估植物氮素利用效率、示踪植物氮素来源^[10]。叶片与土壤间 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 的差值($\Delta\delta^{13}C$ 和 $\Delta\delta^{15}N$)减少了来源差异的影响,能够更准确地反映环境因子对C、N周转的调控作用^[11]。通过分析森林生态系统中叶片及林下凋落物和土壤的上述指标,可以揭示碳从植物同化至土壤固存的关键路径,阐明氮素输入、转化与输出的动态过程,以深入理解森林生态系统碳、氮循环的关键过程、驱动机制、环境响应及耦合关系。

闽北地区属于中亚热带南部典型林区,近年来依托环武夷山国家森林公园生态廊道建设,全面实施森林“三改”措施(即改单一针叶林为针阔混交林,改单层林为复层异龄林,改常绿用材林为常绿彩化花果化“镶嵌”多功能景观林),不断提升森林质量、优化林分、美化林相,以期构建生态保护与可持续发展并重的廊道体系。然而,随着全球气候变化加剧,中亚

热带地区水资源时空分配不均造成雨季暴雨成涝、旱季干旱成灾等极端气候事件频发^[12],同时伴随着大规模的林分改造(针叶林向阔叶林转型),极有可能改变人工林的养分循环模式。然而,当前对极端气候和林分改造双重干扰下中亚热带人工林生态系统稳定碳、氮同位素的变化特征知之甚少,特别是该生态系统中叶片及林下凋落叶和土壤的C、N含量以及 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 分布特征及其耦合关系如何指示生态系统碳、氮循环的关键过程。

基于此,以闽北地区森林“三改”中5种常见的人工林树种——壳菜果(*Mytilaria laosensis* Lecomte)、木荷(*Schima superba* Gardner et Champ.)、黧蒴锥[*Castanopsis fissa* (Champ. ex Benth.) Rehder et E. H. Wilson]、南酸枣[*Choerospondias axillaris* (Roxb.) B. L. Burtt et A. W. Hill]、杉木[*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.]为研究对象,利用稳定同位素技术,对不同叶习性树种的碳、氮分配策略及碳、氮同位素分布特征进行比较和分析,以期明确不同人工林生态系统内叶片、凋落叶和土壤的碳、氮分配与稳定碳、氮同位素的分异规律以及C、N含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 的耦合关系,为探究中亚热带人工林生态系统碳、氮循环的关键过程及耦合关系提供科学依据和理论支持。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

研究地位于福建省南平市建阳区水吉镇黄家店村,地处武夷山脉南麓与闽北山区盆地构造带的过渡区,具体位置为北纬 $27^{\circ}06' \sim 27^{\circ}43'$ 、东经 $117^{\circ}31' \sim 118^{\circ}38'$,区内地貌类型以低山丘陵为主。该区域属

中亚热带季风湿润气候区,冬短、夏长,雨量充沛,年均温 18.1°C ,年均降水量 $1\,742\text{ mm}$,且全年降水主要集中在夏季;区内土壤主要为黄红壤。

供试林分前身为低产、低效的针叶次生林,为恢复地力选择闽北地区常见的常绿阔叶树种壳菜果、木荷、黧蒴锥,落叶阔叶树种南酸枣以及针叶树种杉木分别营造人工生态纯林,造林面积 $1.3 \sim 1.5\text{ hm}^2$,造林密度 $2\,500\text{ hm}^{-2}$,林龄23 a,且均采用近自然的经营模式^[13]。林下灌木层优势种以杜荃山[*Maesa japonica* (Thunb.) Moritzi]、合欢(*Albizia julibrissin* Durazz.)和山莓(*Rubus corchorifolius* Linn. f.)为主;草本层优势种以芒萁[*Dicranopteris pedata* (Houtt.) Nakaike]、五节芒[*Miscanthus floridulus* (Labill.) Warburg ex K. Schumann]、稀羽鳞毛蕨[*Dryopteris sparsa* (Buch.-Ham. ex D. Don) Kuntze]、淡竹叶(*Lophatherum gracile* Brongn.)为主。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置及样品采集 于2022年7月,在黄家店村油岭人工林内选择北坡上立地条件相近的壳菜果林、木荷林、黧蒴锥林、南酸枣林和杉木林设置样地,样地基本信息见表1。

在每个样地内随机设置3个面积 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的样方。在每个样方内随机选取5株标准木,剪取树冠中上部东、南、西、北4个方位的当年生枝条,分别采集10~15枚无病虫害且健康的成熟叶片,将同一样方的叶片充分混匀。在距离标准木树干基部 $0 \sim 150\text{ cm}$ 范围内收集相应林分树种的凋落叶,将同一样方的凋落叶充分混匀。在每个样方内采用“S”取样法设置5~7个取样点,去除地面凋落物,采集 $0 \sim 20\text{ cm}$ 土层土壤,将同一样方的土壤混合均匀。

表1 闽北5种供试人工林的样地基本信息

Table 1 Plot basic information of five test plantations in northern Fujian Province

林分 Stand	海拔/m Altitude	坡度/($^{\circ}$) Slope	树高/m Height ($\bar{X} \pm SD$)	胸径/cm Diameter at breast height ($\bar{X} \pm SD$)	郁闭度 Canopy density
壳菜果林 <i>Mytilaria laosensis</i> forest	320	18	18.47 \pm 5.36	27.89 \pm 19.55	0.65
木荷林 <i>Schima superba</i> forest	310	19	17.72 \pm 4.23	22.54 \pm 3.76	0.70
黧蒴锥林 <i>Castanopsis fissa</i> forest	335	22	16.50 \pm 1.50	20.85 \pm 3.95	0.70
南酸枣林 <i>Choerospondias axillaris</i> forest	350	26	21.17 \pm 5.45	24.18 \pm 15.81	0.65
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	295	21	14.72 \pm 4.23	17.54 \pm 3.76	0.60

1.2.2 样品处理及指标测定 用蒸馏水清洗叶片和凋落叶,于 105°C 杀青15 min后,置于 80°C 烘干至

恒质量,粉碎、过100目筛,备用。剔除土壤中的根系、动植物残体及石砾,自然风干后,研磨并过筛(孔

径 0.15 mm), 备用。

叶片、凋落叶和土壤的 C、N 含量 (w_C 和 w_N) 及 $\delta^{13}C$ 、 $\delta^{15}N$ 均采用 Vario ISOTOPE cube 元素分析仪 - Isoprime 100 稳定同位素比例质谱仪 (德国 Elementar 公司) 测定。碳同位素以国际标准物质 PDB (pee dee belemnite) 为标准, 氮同位素以标准大气中的氮气为标准^[14]。供试 5 种林分叶片、凋落叶和土壤的 w_C 、 w_N 、 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 均重复取样测定 6 次, 结果取平均值。

1.3 数据处理与分析

运用 SPSS 27.0 统计分析软件, 采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和最小显著性差数 (LSD) 法比较不同林分叶片、凋落叶和土壤的 C、N 含量及 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 的差异显著性。采用普通最小二乘回归分析 (OLS) 建立不同林分叶片、凋落叶和土壤的 $\delta^{13}C$ 与 $\ln w_C$ 及 $\delta^{15}N$ 与 $\ln w_N$ 的一元线性回归方程^[15]。通过叶片与土壤 $\delta^{13}C$ 的差值 ($\Delta\delta^{13}C$) 以及叶片与土壤 $\delta^{15}N$ 的差值 ($\Delta\delta^{15}N$), 分析土壤 C、N 稳定性的动态变化。采用 Pearson 相关性分析法检验各指标之间的相关性。

2 结果和分析

2.1 不同林分叶片间的比较和分析

统计结果 (表 2) 显示: 5 种林分的叶片 C 含量为 465.65 ~ 504.42 $g \cdot kg^{-1}$, N 含量为 15.23 ~ 25.31 $g \cdot kg^{-1}$ 。叶片 C 含量以黧蒴锥林最高, 且显著 ($P < 0.05$) 高于杉木林和南酸枣林; 叶片 N 含量以南酸枣林最高, 且显著高于其他 4 种林分, 而叶片 N 含量以木荷林最低, 杉木林也较低。5 种林分的叶片 $\delta^{13}C$ 为 $-33.20\% \sim -31.64\%$, $\delta^{15}N$ 为 $-2.15\% \sim -0.82\%$ 。5 种林分中, 叶片 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 均以杉木林最高, 并且, 杉木林叶片 $\delta^{13}C$ 显著高于壳菜果林、木荷林、黧蒴锥林, 其叶片 $\delta^{15}N$ 仅显著高于壳菜果林。

普通最小二乘回归分析结果 (表 3) 显示: 5 种林分的叶片 $\delta^{13}C$ 与 $\ln w_C$ 在 0.001 水平呈显著正相关, 其中黧蒴锥林的相关系数最高, 木荷林的相关系数最低; 5 种林分回归方程的斜率由大到小依次为黧蒴锥林、南酸枣林、壳菜果林、杉木林、木荷林。5 种林分的叶片 $\delta^{15}N$ 与 $\ln w_N$ 也在 0.001 水平呈显著正相关,

表 2 闽北不同林分叶片碳 (C)、氮 (N) 含量及 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 的比较 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 2 Comparison on carbon (C) and nitrogen (N) contents and $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ in leaves of different stands in northern Fujian Province ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

林分 Stand	C 含量 / ($g \cdot kg^{-1}$) C content	N 含量 / ($g \cdot kg^{-1}$) N content	$\delta^{13}C / \%$	$\delta^{15}N / \%$
壳菜果林 <i>Mytilaria laosensis</i> forest	488.12 ± 8.64ab	21.27 ± 1.68b	-33.20 ± 0.94b	-2.15 ± 1.24b
木荷林 <i>Schima superba</i> forest	479.55 ± 31.47ab	15.23 ± 2.30d	-32.95 ± 0.98b	-1.49 ± 0.56ab
黧蒴锥林 <i>Castanopsis fissa</i> forest	504.42 ± 7.30a	20.45 ± 2.18bc	-33.05 ± 0.56b	-1.74 ± 0.66ab
南酸枣林 <i>Choerospondias axillaris</i> forest	470.30 ± 32.97b	25.31 ± 6.02a	-31.98 ± 0.64ab	-1.92 ± 0.96ab
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	465.65 ± 21.22b	16.66 ± 1.84cd	-31.64 ± 1.20a	-0.82 ± 0.69a

¹⁾ $\delta^{13}C$: 稳定碳同位素比值 Stable carbon isotope ratio; $\delta^{15}N$: 稳定氮同位素比值 Stable nitrogen isotope ratio. 同列中不同小写字母表示在不同林分间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$) between different stands.

表 3 闽北不同林分叶片 $\delta^{13}C$ 与 $\ln w_C$ 以及 $\delta^{15}N$ 与 $\ln w_N$ 的普通最小二乘回归分析¹⁾

Table 3 Ordinary least squares regression analyses between $\delta^{13}C$ and $\ln w_C$, $\delta^{15}N$ and $\ln w_N$ in leaves of different stands in northern Fujian Province¹⁾

林分 Stand	$\delta^{13}C$ (Y) 与 $\ln w_C$ (X) 的分析结果				$\delta^{15}N$ (Y) 与 $\ln w_N$ (X) 的分析结果			
	Analysis result of $\delta^{13}C$ (Y) and $\ln w_C$ (X)				Analysis result of $\delta^{15}N$ (Y) and $\ln w_N$ (X)			
	方程 Equation	R^2	F	P	方程 Equation	R^2	F	P
壳菜果林 <i>Mytilaria laosensis</i> forest	$Y = -344.57 + 0.94X$	0.89	92.43	<0.001	$Y = -42.12 + 0.86X$	0.74	33.57	<0.001
木荷林 <i>Schima superba</i> forest	$Y = -102.57 + 0.77X$	0.60	17.67	0.001	$Y = -10.86 + 0.92X$	0.85	67.75	<0.001
黧蒴锥林 <i>Castanopsis fissa</i> forest	$Y = -260.80 + 0.98X$	0.96	293.14	<0.001	$Y = -19.98 + 0.98X$	0.96	286.60	<0.001
南酸枣林 <i>Choerospondias axillaris</i> forest	$Y = -86.34 + 0.95X$	0.90	103.00	<0.001	$Y = -15.51 + 0.98X$	0.96	276.67	<0.001
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	$Y = -157.29 + 0.85X$	0.72	30.94	<0.001	$Y = -15.11 + 0.84X$	0.71	28.77	<0.001

¹⁾ $\delta^{13}C$: 稳定碳同位素比值 Stable carbon isotope ratio; $\delta^{15}N$: 稳定氮同位素比值 Stable nitrogen isotope ratio; $\ln w_C$: 碳含量的自然对数 Natural logarithm of carbon content; $\ln w_N$: 氮含量的自然对数 Natural logarithm of nitrogen content. R^2 : 相关系数 Correlation coefficient; F: F 值 F value; P: P 值 P value.

其中藜蒴锥林和南酸枣林的相关系数相等且最高,杉木林的相关系数最低;5种林分的斜率由大到小依次为藜蒴锥林和南酸枣林、木荷林、壳菜果林、杉木林。

2.2 不同林分凋落叶间的比较和分析

统计结果(表4)显示:壳菜果林的凋落叶C、N含量相对较高,其凋落叶C含量($484.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)显著($P < 0.05$)高于杉木林和南酸枣林;其凋落叶N含量与藜蒴锥林和南酸枣林的凋落叶N含量差异不显著,但3种林分的凋落叶N含量均显著高于杉木林和木荷林。并且,5种林分的凋落叶C、N含量差异规律与叶片C、N含量较为一致,即杉木林和南酸枣林的凋落叶C含量均较低,杉木林和木荷林的凋落叶N

含量也较低。5种林分的凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 分别为 $-33.39\text{‰} \sim -32.12\text{‰}$ 和 $-2.20\text{‰} \sim -1.09\text{‰}$,其中,杉木林的凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 显著高于其余4种林分,而其凋落叶 $\delta^{15}\text{N}$ 仅显著高于壳菜果林。

普通最小二乘回归分析结果(表5)显示:5种林分的凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\ln w_C$ 在0.001水平呈显著正相关,其中木荷林的相关系数最高,藜蒴锥林的相关系数最低;5种林分回归方程的斜率由大到小依次为木荷林、杉木林、壳菜果林和南酸枣林、藜蒴锥林。5种林分的凋落叶 $\delta^{15}\text{N}$ 与 $\ln w_N$ 也在0.001水平呈显著正相关,其中藜蒴锥林的相关系数最高,杉木林的相关系数最低;5种林分的斜率由大到小依次为藜蒴锥林、壳菜果林、木荷林、南酸枣林、杉木林。

表4 闽北不同林分凋落叶碳(C)、氮(N)含量及 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的比较($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 4 Comparison on carbon (C) and nitrogen (N) contents and $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in litters of different stands in northern Fujian Province ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

林分 Stand	C 含量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$ C content	N 含量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$ N content	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$
壳菜果林 <i>Mytilaria laosensis</i> forest	484.63±44.82a	19.40±4.60a	-33.39±1.03b	-2.20±1.16b
木荷林 <i>Schima superba</i> forest	472.64±3.50ab	11.86±1.07b	-33.29±0.79b	-1.30±0.43ab
藜蒴锥林 <i>Castanopsis fissa</i> forest	470.67±6.63ab	17.96±1.85a	-33.31±0.86b	-1.47±0.71ab
南酸枣林 <i>Choerospondias axillaris</i> forest	425.49±40.80c	19.66±3.60a	-33.28±0.52b	-1.86±0.93ab
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	439.27±26.76bc	13.43±1.19b	-32.12±1.15a	-1.09±0.51a

¹⁾ $\delta^{13}\text{C}$: 稳定碳同位素比值 Stable carbon isotope ratio; $\delta^{15}\text{N}$: 稳定氮同位素比值 Stable nitrogen isotope ratio. 同列中不同小写字母表示在不同林分间差异显著($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$) between different stands.

表5 闽北不同林分凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\ln w_C$ 以及 $\delta^{15}\text{N}$ 与 $\ln w_N$ 的普通最小二乘回归分析¹⁾

Table 5 Ordinary least squares regression analyses between $\delta^{13}\text{C}$ and $\ln w_C$, $\delta^{15}\text{N}$ and $\ln w_N$ in litters of different stands in northern Fujian Province¹⁾

林分 Stand	$\delta^{13}\text{C}$ (Y) 与 $\ln w_C$ (X) 的分析结果				$\delta^{15}\text{N}$ (Y) 与 $\ln w_N$ (X) 的分析结果			
	Analysis result of $\delta^{13}\text{C}$ (Y) and $\ln w_C$ (X)				Analysis result of $\delta^{15}\text{N}$ (Y) and $\ln w_N$ (X)			
	方程 Equation	R^2	F	P	方程 Equation	R^2	F	P
壳菜果林 <i>Mytilaria laosensis</i> forest	$Y = -104.21 + 0.88X$	0.78	41.27	<0.001	$Y = -16.81 + 0.94X$	0.88	84.90	<0.001
木荷林 <i>Schima superba</i> forest	$Y = -624.85 + 0.94X$	0.88	85.26	<0.001	$Y = -12.01 + 0.93X$	0.87	77.12	<0.001
藜蒴锥林 <i>Castanopsis fissa</i> forest	$Y = -342.21 + 0.78X$	0.62	19.18	<0.001	$Y = -21.27 + 0.99X$	0.97	406.98	<0.001
南酸枣林 <i>Choerospondias axillaris</i> forest	$Y = -63.68 + 0.88X$	0.77	39.72	<0.001	$Y = -13.57 + 0.84X$	0.70	28.57	<0.001
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	$Y = -140.93 + 0.92X$	0.85	68.54	<0.001	$Y = -14.87 + 0.83X$	0.68	25.84	<0.001

¹⁾ $\delta^{13}\text{C}$: 稳定碳同位素比值 Stable carbon isotope ratio; $\delta^{15}\text{N}$: 稳定氮同位素比值 Stable nitrogen isotope ratio; $\ln w_C$: 碳含量的自然对数 Natural logarithm of carbon content; $\ln w_N$: 氮含量的自然对数 Natural logarithm of nitrogen content. R^2 : 相关系数 Correlation coefficient; F: F值 F value; P: P值 P value.

2.3 不同林分土壤间的比较和分析

统计结果(表6)显示:5种林分的土壤C、N含量的差异规律相似,均表现为杉木林最高、藜蒴锥林最低,并且,杉木林和木荷林的土壤C含量显著($P < 0.05$)高于壳菜果林和藜蒴锥林,2种林分的土壤N含量显著高于壳菜果林、藜蒴锥林和南酸枣林。5种林分的土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 分别为 $-26.92\text{‰} \sim -25.06\text{‰}$

和 $1.62\text{‰} \sim 3.01\text{‰}$,杉木林的土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 均最高,其中,杉木林的土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 显著高于壳菜果林和木荷林,其土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 显著高于壳菜果林、藜蒴锥林和南酸枣林。

普通最小二乘回归分析结果(表7)显示:南酸枣林的土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\ln w_C$ 在0.05水平呈显著正相关,其余4种林分的土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\ln w_C$ 均在0.01水平呈

显著正相关,其中壳菜果林的相关系数最高,南酸枣林的相关系数最低;5 种林分回归方程的斜率由大到小依次为壳菜果林、黧蒴锥林、木荷林、杉木林、南酸枣林。壳菜果林的土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 与 $\ln w_{\text{N}}$ 在 0.05 水平呈显著正相关,杉木林的土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 与 $\ln w_{\text{N}}$ 在 0.001 水

平呈显著正相关,其余 3 种林分的土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 与 $\ln w_{\text{N}}$ 均在 0.01 水平呈显著正相关,其中黧蒴锥林的相关系数最高,壳菜果林的相关系数最低;5 种林分回归方程的斜率由大到小依次为黧蒴锥林、杉木林、木荷林和南酸枣林、壳菜果林。

表 6 闽北不同林分土壤碳(C)、氮(N)含量及 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的比较 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 6 Comparison on carbon (C) and nitrogen (N) contents and $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in soils of different stands in northern Fujian Province ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

林分 Stand	C 含量/(g · kg ⁻¹) C content	N 含量/(g · kg ⁻¹) N content	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$
壳菜果林 <i>Mytilaria laosensis</i> forest	26.96±2.52c	2.20±0.20b	-26.92±0.31b	1.86±0.23b
木荷林 <i>Schima superba</i> forest	29.88±1.95ab	2.41±0.20a	-26.45±0.73b	2.33±0.54ab
黧蒴锥林 <i>Castanopsis fissa</i> forest	23.70±1.19d	1.84±0.13c	-25.91±0.64ab	1.62±0.19b
南酸枣林 <i>Choerospondias axillaris</i> forest	28.18±1.39bc	2.00±0.09c	-26.01±0.22ab	1.65±0.51b
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	31.15±1.97a	2.53±0.12a	-25.06±1.08a	3.01±0.98a

¹⁾ $\delta^{13}\text{C}$: 稳定碳同位素比值 Stable carbon isotope ratio; $\delta^{15}\text{N}$: 稳定氮同位素比值 Stable nitrogen isotope ratio. 同列中不同小写字母表示在不同林分间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P<0.05$) between different stands.

表 7 闽北不同林分土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\ln w_{\text{C}}$ 以及 $\delta^{15}\text{N}$ 与 $\ln w_{\text{N}}$ 的普通最小二乘回归分析¹⁾

Table 7 Ordinary least squares regression analyses between $\delta^{13}\text{C}$ and $\ln w_{\text{C}}$, $\delta^{15}\text{N}$ and $\ln w_{\text{N}}$ in soils of different stands in northern Fujian Province¹⁾

林分 Stand	$\delta^{13}\text{C}$ (Y) 与 $\ln w_{\text{C}}$ (X) 的分析结果 Analysis result of $\delta^{13}\text{C}$ (Y) and $\ln w_{\text{C}}$ (X)					$\delta^{15}\text{N}$ (Y) 与 $\ln w_{\text{N}}$ (X) 的分析结果 Analysis result of $\delta^{15}\text{N}$ (Y) and $\ln w_{\text{N}}$ (X)			
	方程 Equation	R^2	F	P	方程 Equation	R^2	F	P	
	壳菜果林 <i>Mytilaria laosensis</i> forest	$Y = -31.97 + 0.86X$	0.74	17.32	0.006	$Y = -1.50 + 0.63X$	0.40	6.03	0.036
木荷林 <i>Schima superba</i> forest	$Y = -35.19 + 0.81X$	0.66	15.55	0.004	$Y = 0.37 + 0.83X$	0.69	17.41	0.003	
黧蒴锥林 <i>Castanopsis fissa</i> forest	$Y = -36.43 + 0.83X$	0.70	13.68	0.010	$Y = 0.89 + 0.91X$	0.83	28.70	0.002	
南酸枣林 <i>Choerospondias axillaris</i> forest	$Y = -30.81 + 0.77X$	0.59	10.08	0.016	$Y = -0.62 + 0.83X$	0.69	15.20	0.006	
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	$Y = -36.85 + 0.80X$	0.64	15.92	0.003	$Y = 0.45 + 0.88X$	0.77	29.76	<0.001	

¹⁾ $\delta^{13}\text{C}$: 稳定碳同位素比值 Stable carbon isotope ratio; $\delta^{15}\text{N}$: 稳定氮同位素比值 Stable nitrogen isotope ratio; $\ln w_{\text{C}}$: 碳含量的自然对数 Natural logarithm of carbon content; $\ln w_{\text{N}}$: 氮含量的自然对数 Natural logarithm of nitrogen content. R^2 : 相关系数 Correlation coefficient; F : F 值 F value; P : P 值 P value.

2.4 不同林分叶片与土壤间 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的差值比较

统计结果(表 8)显示:5 种林分叶片与土壤间 $\delta^{13}\text{C}$ 的差值($\Delta\delta^{13}\text{C}$)为 $-7.14\text{‰} \sim -5.98\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 的差值($\Delta\delta^{15}\text{N}$)为 $-4.01\text{‰} \sim -3.36\text{‰}$, 其中, $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 以南酸枣林最高、黧蒴锥林最低; $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 以黧蒴锥林最高、壳菜果林最低。值得注意的是,5 种林分间 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 和 $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 的差异均不显著。

2.5 Pearson 相关性分析

对闽北 5 种林分叶片、凋落叶和土壤的 C、N 含量及 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 进行 Pearson 相关性分析,结果(表 9)显示:共有 34 对指标间的相关性达到显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$) 水平。

叶片 4 个指标中,C 含量与 N 含量呈显著负相关, $\delta^{15}\text{N}$ 与 C 含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 呈极显著负相关;凋落叶

4 个指标中, $\delta^{13}\text{C}$ 与 N 含量以及 $\delta^{15}\text{N}$ 与 C 含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 均呈极显著负相关;土壤 4 个指标中, $\delta^{13}\text{C}$ 与 C

表 8 闽北不同林分叶片与土壤间 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的差值 ($\Delta\delta^{13}\text{C}$ 和 $\Delta\delta^{15}\text{N}$) 比较 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 8 Comparison on differences in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ between leaves and soils ($\Delta\delta^{13}\text{C}$ and $\Delta\delta^{15}\text{N}$) in different stands in northern Fujian Province ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

林分 Stand	$\Delta\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\Delta\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$
壳菜果林 <i>Mytilaria laosensis</i> forest	-6.29±1.05a	-4.01±1.22a
木荷林 <i>Schima superba</i> forest	-6.50±1.41a	-3.82±0.50a
黧蒴锥林 <i>Castanopsis fissa</i> forest	-7.14±0.74a	-3.36±0.62a
南酸枣林 <i>Choerospondias axillaris</i> forest	-5.98±0.84a	-3.56±1.13a
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	-6.57±2.27a	-3.83±1.05a

¹⁾ $\delta^{13}\text{C}$: 稳定碳同位素比值 Stable carbon isotope ratio; $\delta^{15}\text{N}$: 稳定氮同位素比值 Stable nitrogen isotope ratio. 同列中不同小写字母表示在不同林分间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P<0.05$) between different stands.

表9 闽北供试林分叶片、凋落叶和土壤的C、N含量及 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 间的Pearson相关性分析¹⁾Table 9 Pearson correlation analysis between C and N contents and $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in leaves, litters, and soils of the test stands in northern Fujian Province¹⁾

指标 Index	相关系数 Correlation coefficient											
	$w_{\text{C,le}}$	$w_{\text{N,le}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{le}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{le}}$	$w_{\text{C,li}}$	$w_{\text{N,li}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{li}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{li}}$	$w_{\text{C,s}}$	$w_{\text{N,s}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{s}}$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{s}}$
$w_{\text{C,le}}$	1.000											
$w_{\text{N,le}}$	-0.386 *	1.000										
$\delta^{13}\text{C}_{\text{le}}$	0.310	-0.325	1.000									
$\delta^{15}\text{N}_{\text{le}}$	-0.665 **	0.167	-0.488 **	1.000								
$w_{\text{C,li}}$	0.680 **	-0.534 **	0.148	-0.683 **	1.000							
$w_{\text{N,li}}$	-0.195	0.825 **	-0.470 **	0.180	-0.356	1.000						
$\delta^{13}\text{C}_{\text{li}}$	0.389 *	-0.529 **	0.844 **	-0.485 **	0.356	-0.574 **	1.000					
$\delta^{15}\text{N}_{\text{li}}$	-0.580 **	0.151	-0.485 **	0.924 **	-0.651 **	0.180	-0.527 **	1.000				
$w_{\text{C,s}}$	0.369 *	-0.639 **	0.655 **	-0.229	0.248	-0.716 **	0.772 **	-0.233	1.000			
$w_{\text{N,s}}$	-0.261	-0.315	-0.366 *	0.664 **	-0.130	-0.207	-0.307	0.695 **	0.030	1.000		
$\delta^{13}\text{C}_{\text{s}}$	0.325	-0.303	0.831 **	-0.257	0.031	-0.337	0.786 **	-0.212	0.717 **	-0.174	1.000	
$\delta^{15}\text{N}_{\text{s}}$	-0.413 *	-0.224	-0.192	0.596 **	-0.370 *	-0.257	-0.145	0.471 **	0.047	0.547 **	-0.267	1.000

¹⁾ $w_{\text{C,le}}$: 叶片碳含量 Leaf carbon content; $w_{\text{N,le}}$: 叶片氮含量 Leaf nitrogen content; $\delta^{13}\text{C}_{\text{le}}$: 叶片稳定碳同位素比值 Stable carbon isotope ratio of leaves; $\delta^{15}\text{N}_{\text{le}}$: 叶片稳定氮同位素比值 Stable nitrogen isotope ratio of leaves; $w_{\text{C,li}}$: 凋落叶碳含量 Litter carbon content; $w_{\text{N,li}}$: 凋落叶氮含量 Litter nitrogen content; $\delta^{13}\text{C}_{\text{li}}$: 凋落叶稳定碳同位素比值 Stable carbon isotope ratio of litters; $\delta^{15}\text{N}_{\text{li}}$: 凋落叶稳定氮同位素比值 Stable nitrogen isotope ratio of litters; $w_{\text{C,s}}$: 土壤碳含量 Soil carbon content; $w_{\text{N,s}}$: 土壤氮含量 Soil nitrogen content; $\delta^{13}\text{C}_{\text{s}}$: 土壤稳定碳同位素比值 Stable carbon isotope ratio of soils; $\delta^{15}\text{N}_{\text{s}}$: 土壤稳定氮同位素比值 Stable nitrogen isotope ratio of soils. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

含量以及 $\delta^{15}\text{N}$ 与N含量均呈极显著正相关。

叶片C含量与凋落叶的C含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 分别呈极显著和显著正相关,与凋落叶 $\delta^{15}\text{N}$ 呈极显著负相关;叶片N含量与凋落叶的C含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 呈极显著负相关,与凋落叶N含量呈极显著正相关;叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与凋落叶的N含量和 $\delta^{15}\text{N}$ 呈极显著负相关,与凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 呈极显著正相关;叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 与凋落叶的C含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 呈极显著负相关,与凋落叶 $\delta^{15}\text{N}$ 呈极显著正相关。

叶片C含量与土壤C含量呈显著正相关,与土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 呈显著负相关;叶片N含量与土壤C含量呈极显著负相关;叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与土壤的C含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 呈极显著正相关,与土壤N含量呈显著负相关;叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 与土壤的N含量和 $\delta^{15}\text{N}$ 呈极显著正相关。

凋落叶C含量与土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 以及凋落叶N含量与土壤C含量分别呈显著和极显著负相关,而凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 与土壤的C含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 以及凋落叶 $\delta^{15}\text{N}$ 与土壤的N含量和 $\delta^{15}\text{N}$ 呈极显著正相关。

3 讨 论

3.1 不同林分叶片、凋落叶、土壤的C、N分布格局

统计结果显示:壳菜果林、木荷林和黧蒴锥林的叶片C含量均高于南酸枣林和杉木林,尤其是黧蒴

锥林,其叶片C含量显著($P < 0.05$)高于南酸枣林和杉木林,推测此结果可能与常绿树种、落叶树种和速生针叶树种的光合碳分配策略不同有关。通常情况下,常绿树种倾向于将体内固定的C优先分配给叶片^[16];落叶树种则在叶片成熟后将C主要分配给枝干和根系,导致叶片C含量相对较低^[17];植物叶片C含量通常与其防御能力呈显著正相关^[3],而速生针叶树种的C分配策略更侧重于支持植株快速生长。南酸枣叶片N含量显著高于其余4种林分,可能是因为落叶树种需要在有限的生长季内实现快速的养分周转与积累,维持较高的叶片N含量有助于植株在生长季实现资源获取效率和生长速率最大化^[18]。

凋落物是植物与土壤之间养分循环和物质交换的重要载体,其营养元素的分布特征可在一定程度上表征植物的资源利用效率及土壤的养分供给水平^[19]。南酸枣林的凋落叶C含量显著低于壳菜果林、木荷林和黧蒴锥林,可能归因于不同叶习性树种在资源储备与分配策略上的差异。常绿树种的叶片持续存在且具有渐进式换叶特性,在叶片更替过程中通过韧皮部直接将老叶的部分养分转移至新叶^[20],而落叶树种为了能够顺利越冬会在非生长季节来临前将叶片中的养分转移到根系或茎干中^[17]。5种林分的凋落叶C和N含量均较叶片明显下降,说明这些树种对营养元素具有重吸收能力,并且,凋落叶养

分含量越低,植物对养分的重吸收能力越强,养分利用效率越高^[21]。5种林分中,南酸枣林凋落叶C和N含量较叶片的降幅均最大,由此推测南酸枣对C和N的重吸收能力最强,可以通过提高自身碳、氮循环利用效率降低植株对土壤碳、氮的依赖。

张雨鉴等^[22]对滇中亚高山5种林型土壤碳、氮、磷生态化学计量特征进行了研究,结果显示:受林下凋落物数量、组成成分及分解速率等因子的影响,针叶林的土壤养分含量通常低于阔叶林。然而,在供试的5种林分中,杉木林土壤的C、N含量均最高。推测造成这一结果的原因可能是供试样地的杉木自然整枝能力良好,地表透光度较好,而且,杉木林内分布着合欢、杜荃山、稀羽鳞毛蕨、淡竹叶等灌草种类;多样化的凋落物种类为土壤提供了丰富的碳源和氮源^[23],在凋落物的混合分解过程中产生正向的非加和效应,从而促进凋落物的共同分解和养分回归^[24]。此外,伍丽华等^[25]发现,西北坡杉木林的土壤酚酸含量高于西南坡,坡度更缓的山凹地土壤较山洼地土壤富集更多的酚酸物质,而高浓度酚酸物质能够促进细菌的生长和繁殖;费裕翀等^[26]发现,土壤中变形菌门(Proteobacteria)、浮霉菌门(Planctomycetes)和厚壁菌门(Firmicutes)等细菌对杉木凋落叶中鞣质、树脂、木质素等顽拗化合物的分解能力较强,并能显著促进土壤氮代谢和有机碳矿化。供试杉木林位于北面海拔较低的缓坡区域,推测其土壤酚酸物质含量可能较高,进而促进了细菌丰度提升。综上所述,杉木林的土壤C、N含量高可能是凋落物混合分解效应与微地形异质性驱动的酚酸物质积累及微生物活动综合作用的结果,然而,关于这些因子如何直接或间接影响杉木林土壤养分的空间分异仍需深入研究。

3.2 不同林分叶片、凋落叶、土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 分布特征

3.2.1 $\delta^{13}\text{C}$ 分布特征 目前,关于不同叶习性树种的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 差异存在较大分歧,部分学者认为常绿树种的 $\delta^{13}\text{C}$ 显著高于落叶树种^[27],也有学者得出完全相反的研究结论^[28]。落叶树种南酸枣林的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与4种常绿树种间无显著差异,这可能与研究区年均降水量(1742 mm)较为充足有关。充足的水分供应能够保障叶片气孔功能稳定运行,促使落叶树种和常绿树种均能够维持较高的气孔导度和胞间 CO_2 浓度^[14]。由于叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 本质上反映的是碳同位素的分馏程度,其数值大小主要取决于胞间 CO_2 浓度

与大气 CO_2 浓度的比值高低^[29]。当水分不是限制因子时,落叶树种和常绿树种因气孔限制弱化导致胞间 CO_2 浓度趋同,进而削弱叶片光合作用对 ^{13}C 分馏的影响^[30],最终表现为落叶树种和常绿树种间的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 无显著差异。

研究结果显示:5种林分的凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 从大到小依次为杉木林、南酸枣林、木荷林、黧蒴锥林、壳菜果林,与这些林分的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 大小顺序一致。一般情况下,植物叶片凋落时会发生 ^{13}C 分馏现象,但在环境温度处于适宜生长区间时,植物的光合作用、呼吸作用等关键生理过程可维持稳态,碳代谢途径相对稳定,致使这些林分的叶片 ^{13}C 分馏不明显^[31]。

供试5种林分土壤中,杉木林的土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 最高,这可能是多因子综合作用的结果。首先,土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 主要源于地表植物对碳元素的分馏以及微生物对植物残体的分解作用^[3],且土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 与C含量呈极显著($P<0.01$)正相关。其次,斜率(β)可反映土壤有机碳分解和周转的速率^[15],其数值越小,表示土壤有机碳的分解与周转速率越大^[32]。5种林分土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\ln w_c$ 的普通最小二乘回归分析结果显示:杉木林的 β 值相对较小,表明杉木林土壤具有较高的有机碳分解与周转速率。结合有机质周转速率与表层土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 呈正相关^[3],认为有机质周转速率大也是导致杉木林土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 较高的原因之一。凋落叶为土壤有机碳的主要来源,其 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化趋势通常情况下与土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 一致^[33]。然而,供试5种林分凋落叶和土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化趋势并不完全一致。分析认为,土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 既包含凋落叶的 $\delta^{13}\text{C}$ 特征,又包含土壤有机碳的代谢信息,其数值大小由同位素混合效应决定^[14];不同林分类型凋落物的组成、物理属性和化学质量性状等均会影响同位素的变化,从而造成5种林分的土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 与凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化趋势出现差异。

3.2.2 $\delta^{15}\text{N}$ 分布特征 供试5种林分中,杉木林的叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 显著高于壳菜果林,该结果可能源于不同林分的共生菌根真菌在氮素获取途径上的分异。已有研究证实,不同类型菌根宿主植物的叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 存在显著差异,其中丛枝菌根真菌宿主植物的叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 通常高于外生菌根真菌宿主植物^[34]。杉木为丛枝菌根真菌的典型宿主^[35],而壳菜果是具有混合菌根(同时含有外生菌根真菌和丛枝菌根真菌)的树种,且能与外生菌根真菌形成良好的共生关系^[36]。外生菌根真菌通过产生胞外酶直接分解土壤中的复杂有机质,

并将获取的有机氮转运给宿主植物^[37],此过程中氮同位素分馏效应显著,加上外生菌根真菌会优先将含¹⁴N的有机氮化合物转运给宿主植物,导致宿主植物获取的有机氮化合物 $\delta^{15}\text{N}$ 显著降低^[38]。丛枝菌根真菌则主要由根外菌丝直接吸收土壤中的铵态氮和硝态氮等无机氮,通过根内菌丝将氮素以精氨酸的形式转移到宿主植物体内,此过程中氮同位素分馏效应极其微弱^[39],致使丛枝菌根真菌的宿主植物获得的 $\delta^{15}\text{N}$ 更接近土壤无机氮源的 $\delta^{15}\text{N}$,因此,丛枝菌根真菌宿主植物的 $\delta^{15}\text{N}$ 高于外生菌根真菌宿主植物。此外,在亚热带酸性土壤中,多数树种偏好吸收铵态氮^[40],且土壤表层铵态氮含量通常高于硝态氮^[41]。由于铵态氮的 $\delta^{15}\text{N}$ 通常高于硝态氮^[42],浅根系树种杉木大量吸收土壤表层中富集¹⁵N的铵态氮并向上运输,促使其叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 较高。5种林分凋落叶 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化趋势与叶片一致,说明凋落叶的 $\delta^{15}\text{N}$ 能较好地反映叶片的 $\delta^{15}\text{N}$ 特征,二者具有同源性。土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 表现出与叶片和凋落叶差异性的变化规律。主要原因如下:叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 主要反映植物近期吸收的氮源的同位素组成及氮吸收过程中的分馏效应,是氮吸收策略的瞬时信号;凋落叶 $\delta^{15}\text{N}$ 取决于初始叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 和分解初期的分馏效应,是氮分解动态的短期信号;而土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 则代表生态系统氮循环的长期动态,其数值大小由持续的氮输入、输出以及内部转化过程中的氮同位素分馏效应共同决定^[43]。由此认为,土壤与叶片和凋落叶间的 $\delta^{15}\text{N}$ 动态差异受生态系统氮循环中氮同位素分馏过程的长期耦合作用与累积效应驱动。

3.2.3 植物与土壤间的碳、氮迁移特征 由于每种碳库具有不同的周转速率,植物体中的碳向土壤的迁移过程存在明显的时滞效应, $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 能够综合反映植物碳同化及土壤碳动态过程^[7]。 $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 可归一化土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 的空间异质性,减少 $\delta^{15}\text{N}$ 不同来源的差异,能够更准确地揭示植物和土壤之间的氮循环模式^[43]。研究结果显示供试5种林分的 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 变化范围较小(-7.14‰~-5.98‰),由此推断5种林分的土壤有机碳普遍富集¹³C,且这些林分的植物与土壤之间的碳迁移过程受到相似机制的调控。土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 较植物 $\delta^{13}\text{C}$ 更高是休斯效应、微生物分馏-富集效应和土壤本底含量累积效应共同作用的结果^[44]。工业革命以来,化石燃料的使用导致大气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 持续下降,而土壤有机碳包含不同时期形成的碳组分,部

分有机碳形成于大气 $\delta^{13}\text{C}$ 较高的时期,使得土壤有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 高于现代低 $\delta^{13}\text{C}$ 大气背景下的植被^[45]。此外,在有机碳分解过程中,土壤微生物会优先利用含¹²C的化合物,导致土壤中的¹³C不断积累,并且微生物体内的 $\delta^{13}\text{C}$ 较高,微生物残体分解使土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 进一步提高^[46]。

从全球来看,植物的 $\delta^{15}\text{N}$ 总体上低于土壤^[42]。供试5种林分的 $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 为-4.01‰~-3.36‰,与上述结果相符。究其原因:生长在温暖湿润的亚热带地区的植物主要通过吸收土壤中的速效氮来合成本生长所需有机物,植物根系在吸收和同化无机氮的过程中会发生氮同位素分馏,通常表现为优先吸收含¹⁴N的化合物,导致植物体内的有机氮 $\delta^{15}\text{N}$ 低于其吸收的土壤无机氮 $\delta^{15}\text{N}$ ^[34]。另外,菌根真菌会优先将含¹⁴N的化合物转移到植物中,导致富含¹⁵N的菌根真菌残体在土壤中不断积累,使得土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 相较于植物更高^[43]。

3.3 叶片、凋落叶、土壤的C、N含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的内在联系

相关性分析结果显示:土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 与C含量呈极显著正相关,表明土壤的碳积累过程伴随着¹³C富集,这一结果不仅印证了土壤有机质长期分解过程中微生物分馏效应与稳定碳库累积的协同机制,也揭示了有机质稳定性与微生物分馏过程的内在耦合关系。土壤微生物在代谢过程中优先利用富含¹²C的易分解组分,而残留的难分解物质则因分馏作用富集¹³C,这些物质因其化学结构复杂或受物理保护作用而很难被进一步矿化,从而逐渐形成稳定的有机碳库^[47],最终表现为土壤的C含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 同步上升。本研究中,土壤的 $\delta^{15}\text{N}$ 与N含量也呈极显著正相关。在中亚热带,大气氮沉降为土壤提供了充足的外源氮,并且,湿热的气候促进了矿化、硝化和反硝化等氮循环过程^[48]。微生物优先利用土壤中含¹⁴N的有机质,促使土壤的有机氮库相对富集¹⁵N^[38]。在氮沉降主导的富氮环境下,土壤中长期积累的稳定有机氮库经历频繁的微生物转化与分馏过程,导致土壤中的 $\delta^{15}\text{N}$ 持续升高^[49]。综上,土壤碳、氮储量的增加意味着有机质平均周转时间延长,经历多次微生物转化与同位素分馏,促使土壤中残留的有机质库中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 不断富集,说明土壤有机质稳定性、分解过程和元素循环之间存在明显的内在联系。

相关性分析结果显示:叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 与土壤N含量

呈极显著正相关。究其原因:随着土壤中铵态氮和硝态氮等无机氮的增加,土壤的反硝化作用随之增强,此过程会损失大量富集 ^{14}N 的 N_2 和 N_2O 等气态氮产物,剩余无机氮中的 $\delta^{15}\text{N}$ 相对升高,植物在吸收了这些相对富集 ^{15}N 的无机氮后,叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 必然升高^[50]。土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 与叶片和凋落叶N含量的相关性不显著是因为植物在生长过程中存在着氮素的内部循环和再利用机制,衰老叶片中的氮素会被部分回收并转运到新生组织中,供植物体继续利用^[21]。这种内部的氮素循环过程相对独立于土壤氮素供应,使得叶片和凋落叶N含量更多地受到植物自身内部调控的影响,从而表现为与土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 的相关性较弱。此外,氨化、硝化、反硝化等多种氮素转化过程导致土壤中氮素的形态和同位素组成不断变化,而且,土壤微生物群落在氮素转化过程中受到土壤温度、湿度、通气性等多种环境因子的影响^[51]。这些因子的综合作用使得土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化较为复杂,难以与叶片和凋落叶N含量形成稳定的对应关系。

供试林分的叶片、凋落叶和土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 两两之间呈极显著正相关,表明植物源碳同位素在生态系统各组分间具有继承性,其核心机制为:叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 作为初始信号,其数值大小由光合碳同位素分馏程度的高低决定^[52];叶片在凋落过程中无显著的碳同位素分馏效应,因此,凋落叶中的有机碳主要源于叶片的光合产物,其 $\delta^{13}\text{C}$ 高度继承了叶片的 $\delta^{13}\text{C}$;土壤中的有机碳主要源于凋落叶,虽然土壤中的微生物分解优先利用 ^{12}C ,但其代谢产物仍显著继承植物凋落叶的 $\delta^{13}\text{C}$ 特征^[53]。叶片、凋落叶和土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 两两之间也呈极显著正相关,其本质是微生物驱动的土壤氮分馏信号沿植物叶片、凋落叶和土壤的连续传递与循环^[54]。土壤微生物在分解有机质的过程中优先利用土壤中的 ^{14}N ,导致其代谢产物中 ^{15}N 降低,而土壤中残留的有机质中 ^{15}N 富集^[38];植物吸收土壤中富集 ^{15}N 的有机质,故叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 与土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 呈极显著正相关^[34];凋落叶为植物的衰老组织,可直接继承叶片 $\delta^{15}\text{N}$,微生物在分解凋落叶时优先利用 ^{14}N 组分,致使凋落叶中的 ^{15}N 进一步富集并保存在土壤中,供植物吸收利用^[38]。综上所述, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 在叶片、凋落叶和土壤之间关系紧密,且稳定碳、氮同位素的动态平衡对维持生态系统功能具有重要作用。

4 结 论

比较来看,供试5种林分叶片、凋落叶、土壤的C和N含量均呈现依次递减的规律;常绿树种林分的叶片与凋落叶C含量高于落叶树种,而N含量却恰恰相反;各林分土壤C、N含量变化规律相似,均表现为在杉木林土壤中最高,在黧蒴锥林土壤中最低。5种林分叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 大小顺序一致,从大到小均依次为杉木林、南酸枣林、木荷林、黧蒴锥林、壳菜果林;土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 较叶片和凋落叶表现出明显的富集效应,且杉木林叶片、凋落叶、土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 最高。叶片、凋落叶和土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 两两之间均存在紧密关联。研究结果显示:不同叶习性树种的碳、氮分配策略存在显著差异。供试5种林分中,杉木林土壤的碳、氮富集效应最显著,且该林分土壤中有有机碳的周转和分解速率较高。稳定碳、氮同位素信号在森林生态系统养分循环过程中表现出较强的继承性和耦合性。

参考文献:

- [1] 张雨鉴,王克勤,宋娅丽,等.滇中亚高山森林植物叶-凋落叶-土壤生态化学计量特征[J].生态学报,2020,40(21):7648-7658.
- [2] 周丽丽,李树斌,吴亚岚,等.不同相思林叶片-凋落叶-土壤的生态化学计量特征[J].植物资源与环境学报,2022,31(2):64-72.
- [3] 喻阳华,李一彤,王俊贤,等.贵州白云岩地区植物群落叶片-凋落叶-土壤化学计量与碳氮同位素特征[J].生态学报,2022,42(8):3356-3365.
- [4] 杨阳,章妮,蒋莉莉,等.青海湖高寒草地土壤理化性质及微生物群落特征对模拟降水的响应[J].草地学报,2021,29(5):1043-1052.
- [5] 陈森,刘顺,许格希,等.土壤剖面碳氮稳定同位素自然丰度的垂直分布模式及其影响机制[J].应用生态学报,2021,32(6):1919-1927.
- [6] 周咏春,张文博,程希雷,等.植物及土壤碳同位素组成对环境变化响应研究进展[J].环境科学研究,2019,32(4):565-572.
- [7] 刘丽贞,庞丹波,王新云,等.稳定碳同位素技术在土壤有机碳研究中的应用进展[J].干旱区研究,2021,38(1):123-132.
- [8] KIRKELS F M S A, DE BOER H J, HERNÁNDEZ P C, et al. Carbon isotopic ratios of modern C_3 and C_4 vegetation on the Indian peninsula and changes along the plant-soil-river continuum-implications for vegetation reconstructions [J]. Biogeosciences, 2022, 19(17): 4107-4127.

- [9] 姚凡云, 朱彪, 杜恩在. ^{15}N 自然丰度法在陆地生态系统氮循环研究中的应用[J]. 植物生态学报, 2012, 36(4): 346-352.
- [10] 方运霆, 刘冬伟, 朱飞飞, 等. 氮稳定同位素技术在陆地生态系统氮循环研究中的应用[J]. 植物生态学报, 2020, 44(4): 373-383.
- [11] 马锐豪. 林分类型转换后植物-土壤化学计量及碳氮稳定同位素的变化特征[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2022: 39-40.
- [12] 魏凌伟, 兰思仁, 熊慧锦, 等. 1988—2018年武夷山国家自然保护区生境质量评价[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2021, 41(4): 93-102.
- [13] 王琼琳, 王文义, 林莎, 等. 青海东部人工生态公益林近自然经营的林分结构调整[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 5004-5015.
- [14] 熊鑫, 张慧玲, 吴建平, 等. 鼎湖山森林演替序列植物-土壤碳氮同位素特征[J]. 植物生态学报, 2016, 40(6): 533-542.
- [15] ACTON P, FOX J, CAMPBELL E, et al. Carbon isotopes for estimating soil decomposition and physical mixing in well-drained forest soils[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2013, 118: 1532-1545.
- [16] 韩蓉, 田青, 孙一梅, 等. 兰州市42种园林木本植物叶片碳氮磷化学计量特征[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(7): 110-119.
- [17] TOMLINSON K W, VAN LANGEVELDE F, WARD D, et al. Deciduous and evergreen trees differ in juvenile biomass allometries because of differences in allocation to root storage[J]. Annals of Botany, 2013, 112: 575-587.
- [18] SHI Q, HE B, KNAUER J, et al. Leaf nutrient basis for the differentiation of photosynthetic traits between subtropical evergreen and deciduous trees[J]. Plant Physiology, 2025, 197(1): kiae566.
- [19] 余雅尧, 徐雪蕾, 刘超, 等. 宁夏罗山4种典型森林群落植物-凋落物-土壤生态化学计量特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(4): 227-234.
- [20] LI C J, WANG B, CHEN T, et al. Leaf age compared to tree age plays a dominant role in leaf $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of Qinghai spruce (*Picea crassifolia* Kom.) [J]. Forests, 2019, 10: 310.
- [21] 王强, 杨鸿淋, 徐春晖, 等. 涪江中游4种造林树种碳氮磷化学计量及养分重吸收特征[J]. 四川农业大学学报, 2023, 41(3): 437-445.
- [22] 张雨鉴, 王克勤, 宋娅丽, 等. 滇中亚高山5种林型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态环境学报, 2019, 28(1): 73-82.
- [23] 张艳, 袁亚玲, 李勋, 等. 马尾松与3种阔叶树混合凋落叶分解过程中碳循环相关酶活性的变化特征[J]. 植物资源与环境学报, 2022, 31(1): 29-41.
- [24] 余婷, 田野. 森林生态系统凋落物多样性对分解过程和土壤微生物特性影响研究进展[J]. 生态科学, 2020, 39(1): 213-223.
- [25] 伍丽华, 康述海, 陈爱玲, 等. 地形对杉木林土壤酚酸物质含量及微生物群落结构影响[J]. 山地学报, 2022, 40(2): 205-219.
- [26] 费裕翀, 吴庆锥, 路锦, 等. 林下植被管理措施对杉木大径材林土壤细菌群落结构的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 407-416.
- [27] 王玉涛, 李吉跃, 刘平, 等. 不同生活型绿化植物叶片碳同位素组成的季节特征[J]. 植物生态学报, 2010, 34(2): 151-159.
- [28] 谢静, 朱万泽, 周鹏, 等. 贡嘎山木本植物碳同位素海拔梯度的变化[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(6): 33-37.
- [29] VITORIA A P, DE OLIVEIRA VIEIRA T, DE BARBOSA CAMARGO P, et al. Using leaf $\delta^{13}\text{C}$ and photosynthetic parameters to understand acclimation to irradiance and leaf age effects during tropical forest regeneration[J]. Forest Ecology and Management, 2016, 379: 50-60.
- [30] VITÓRIA A P, ÁVILA-LOVERA E, VIEIRA T D O, et al. Isotopic composition of leaf carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) of deciduous and evergreen understorey trees in two tropical Brazilian Atlantic forests [J]. Journal of Tropical Ecology, 2018, 34: 145-156.
- [31] 艾喆, 徐婷婷, 李媛媛, 等. 鬼箭锦鸡儿叶片和土壤碳稳定同位素特征及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2021, 32(5): 1744-1752.
- [32] ZHAO Y F, WANG X, OU Y S, et al. Variations in soil $\delta^{13}\text{C}$ with alpine meadow degradation on the eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Geoderma, 2019, 338: 178-186.
- [33] 喻阳华, 程雯, 杨丹丽, 等. 黔西北次生林优势树种叶片-凋落物-土壤连续体有机质碳稳定同位素特征[J]. 生态学报, 2018, 38(24): 8733-8740.
- [34] ZHOU Y C, LI H B, CHENG X L, et al. Patterns of soil and plant nitrogen isotope composition and their relationships with climate factors in Xilingol League, Inner Mongolia, China [J]. Plant Ecology and Diversity, 2017, 10: 521-528.
- [35] 高李文, 张秋霞, 彭紫薇, 等. 中亚热带不同林龄杉木丛枝菌根真菌群落特征[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2023, 52(2): 185-194.
- [36] 闫彩霞, 姜清彬, 杨锦昌, 等. 不同内外生菌根菌接种对米老排苗期的生长效应[J]. 林业科学研究, 2015, 28(4): 577-581.
- [37] 马嘉楠, 杨颖丽. 外生菌根真菌的氮循环机制的研究进展[J]. 生态科学, 2024, 43(5): 240-248.
- [38] NEL J A, CRAINE J M, CRAMER M D. Correspondence between $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in soils suggests coordinated fractionation processes for soil C and N [J]. Plant and Soil, 2018, 423: 257-271.
- [39] 陈永亮, 陈保冬, 刘蕾, 等. 丛枝菌根真菌在土壤氮素循环中的作用[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 4807-4815.
- [40] 吴鹏飞, 马祥庆. 植物养分高效利用机制研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(1): 427-437.
- [41] 孔德杰, 李娜, 任成杰, 等. 不同施肥水平对长期麦豆轮作体系土壤氮素及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2022, 31

- (6): 729-740.
- [42] CRAINE J M, ELMORE A J, AIDAR M P M, et al. Global patterns of foliar nitrogen isotopes and their relationships with climate, mycorrhizal fungi, foliar nutrient concentrations, and nitrogen availability [J]. *New Phytologist*, 2009, 183 (4): 980-992.
- [43] CRAINE J M, BROOKSHIRE E N J, CRAMER M D, et al. Ecological interpretations of nitrogen isotope ratios of terrestrial plants and soils[J]. *Plant Soil*, 2015, 396: 1-26.
- [44] YANG Y H, JI C J, CHEN L Y, et al. Edaphic rather than climatic controls over ^{13}C enrichment between soil and vegetation in alpine grasslands on the Tibetan plateau[J]. *Functional Ecology*, 2015, 29(6): 839-848.
- [45] WANG C, HOULTON B Z, LIU D W, et al. Stable isotopic constraints on global soil organic carbon turnover [J]. *Biogeosciences*, 2018, 15: 987-995.
- [46] KOHL L, LAGANIÈRE J, EDWARDS K A, et al. Distinct fungal and bacterial $\delta^{13}\text{C}$ signatures as potential drivers of increasing $\delta^{13}\text{C}$ of soil organic matter with depth[J]. *Biogeochemistry*, 2015, 124: 13-26.
- [47] LI H Z, YAN F, TUO D F, et al. The effect of climatic and edaphic factors on soil organic carbon turnover in hummocks based on $\delta^{13}\text{C}$ on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 741: 140-141.
- [48] 王小南,熊德成,张宇辉,等. 增温和氮添加对中亚热带杉木人工林土壤氮矿化和 N_2O 排放的影响[J]. *林业科学研究*, 2023, 36(3): 22-31.
- [49] ZHAO X, XU X L, WANG F, et al. Climatic, edaphic and biotic controls over soil $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in temperate grasslands [J]. *Forests*, 2020, 11: 433.
- [50] 陈森,刘顺,许格希,等. 青藏高原东缘不同植被类型下草本植物叶片碳氮稳定同位素差异及其驱动因素[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(4): 877-885.
- [51] 张全军,于秀波,张广帅. 鄱阳湖湿地3种优势植物枯落物分解过程及碳氮同位素分异特征[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(5): 1694-1704.
- [52] 张蕊,赵钰,何红波,等. 基于稳定碳同位素技术研究大气 CO_2 浓度升高对植物-土壤系统碳循环的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(7): 2379-2388.
- [53] ZHOU Y C, ZHANG W B, CHENG X L, et al. Factors affecting ^{13}C enrichment of vegetation and soil in temperate grasslands in Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19: 2190-2199.
- [54] FUJIYOSHI L, SUGIMOTO A, YAMASHITA Y, et al. Influence of soil N availability on the difference between tree foliage and soil $\delta^{15}\text{N}$ from comparison of Mongolia and northern Japan [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 101: 1086-1093.

(责任编辑:佟金凤)

欢迎订阅 2026 年《植物资源与环境学报》

《植物资源与环境学报》为江苏省中国科学院植物研究所和江苏省植物学会联合主办的学术刊物,国内外公开发行。本刊入选中文核心期刊要目总览、中国科技核心期刊和中国科学引文数据库核心期刊(CSCD 核心),并被 BA(预评)、CAB、BCI、JST、EBSCO、中国科学引文数据库、万方数据——数字化期刊群、中国学术期刊(光盘版)、维普和超星期刊出版平台等国内外著名刊库收录。2013 年荣获“首届江苏省新闻出版政府奖·期刊奖”及江苏省精品科技期刊项目;2015 年荣获“第六届江苏省科技期刊金马奖·精品期刊奖”;2015 年至 2023 年均荣获江苏省精品科技期刊项目;2021 年荣获“第三届江苏省新闻出版政府奖·期刊奖提名奖”;2025 年荣获“江苏期刊明珠奖·优秀期刊”。

本刊围绕植物资源与环境两个中心命题,报道我国植物资源的考察、开发利用和植物物种多样性保护,自然保护区与植物园的建设和管理,植物在保护和美化环境中的作用,环境对植物的影响以及与植物资源和植物环境有关学科领域的原始研究论文、研究简报和综述等。凡从事植物学、生态学、自然地理学以及农、林、园艺、医药、食品、轻化工和环境保护等领域的科研、教学、技术人员及决策者均可以从本刊获得相关

学科领域的研究进展和信息。

本刊为双月刊,大 16 开本,每期 120 页。全国各地邮局均可订阅,邮发代号 28-213,每期定价 30 元,全年定价 180 元。国内统一连续出版物号 CN 32-1339/S,国际标准连续出版物号 ISSN 1674-7895。若错过征订时间或需补齐 1992 年至 2026 年各期,请直接与编辑部联系邮购。1992 年至 1993 年每年 8 元;1994 年至 2000 年每年 16 元;2001 年至 2005 年每年 24 元;2006 年至 2008 年每年 40 元;2009 年至 2011 年每年 60 元;2012 年至 2019 年每年 80 元;2020 年至 2021 年每年 120 元;2022 年至 2023 年每年 156 元;2024 年至 2026 年每年 180 元(快递到付)。

编辑部地址:江苏省南京市中山门外 江苏省中国科学院植物研究所内(邮编 210014);电话:025-84347014;QQ:2219161478;E-mail:zwzybjb@163.com。本刊目前只接收在线投稿,投稿网址:https://zwzy.jib.ac.cn。

欢迎扫码关注本刊微信公众号。

