

亚热带常绿阔叶林 5 个优势树种的树干碳氮磷质量分数估算及其不确定性分析

周东洋^{1,2}, 王晓雨², 朱向涛², 詹咪莎², 白尚斌²

(1. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 暨阳学院, 浙江 诸暨 311800)

摘要: 【目的】相较于土壤和凋落物, 树干取样破坏性强, 样本获取难度大, 因而通常以小样本取样估算其成分组成。本研究目的在于评估小样本采样引起的不同树种树干碳、氮、磷养分质量分数和储量估算的不确定性。【方法】基于亚热带常绿阔叶林马尾松 *Pinus massoniana*、杉木 *Cunninghamia lanceolata*、木荷 *Schima superba*、青冈 *Quercus glauca*、毛竹 *Phyllostachys edulis* 等 5 个优势树种的树干碳、氮、磷质量分数数据集 (取样量 $n=18\sim 32$), 采用有放回抽样方法 (Bootstrap) 对比一般小样本取样 ($n=3\sim 5$) 与全样本 ($n=18\sim 32$) 之间的估算差异, 通过权衡取样量和变异之间的关系, 给出对应指标的建议取样量以及不同取样量对应的估算误差范围。【结果】马尾松树干碳质量分数变异显著高于其他树种, $n=3\sim 5$ 小样本引起估算误差约 $\pm 10\%$, 而其他树种仅 $\pm 5\%$ 。对马尾松增加取样量 $n=10$, 估算误差为 $-4\%\sim 5\%$ 。【结论】建议在估算和评估马尾松林碳、氮、磷储量时, 适当增加取样量 ($n=5\sim 10$) 以降低估算误差, 或在采用 $n=3\sim 5$ 小样本取样量的同时, 将 $\pm 10\%$ 估算误差范围考虑在内。其他树种碳、氮、磷质量分数估算时, 取样量 $n=4\sim 5$ 时误差在可接受范围内。图 2 表 2 参 27

关键词: 亚热带常绿阔叶林; 取样量; 不确定性分析; 碳储量

中图分类号: S718 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2022)04-0727-07

Estimation and uncertainty analysis of carbon, nitrogen, and phosphorus concentrations in trunks of five dominant tree species in subtropical evergreen broadleaved forests

ZHOU Dongyang^{1,2}, WANG Xiaoyu², ZHU Xiangtao², ZHAN Misha², BAI Shangbin²

(1. College of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Jiyang College, Zhejiang A&F University, Zhuji 311800, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] Tree trunk sampling is destructive and difficult to obtain in comparison with soil and litter sampling. Therefore, small-size sampling is often used to estimate its composition. The purpose of this study is to evaluate the uncertainty in estimating mass fraction and reserve of carbon, nitrogen, and phosphorus (C, N, P) in trunks of different tree species caused by small-size sampling. [Method] Based on the data sets of C, N, and P concentrations of five dominant tree species in subtropical evergreen broad-leaved forests, including *Pinus massoniana*, *Cunninghamia lanceolata*, *Schima superba*, *Quercus glauca*, and *Phyllostachys edulis* (sampling size $n=18\sim 32$), Bootstrap method was used to compare the estimated differences between small-size samples ($n=3\sim 5$) and full samples ($n=18\sim 32$). By weighing the relationship between sampling quantity and variation, the recommended sampling quantity of corresponding index and the estimation error

收稿日期: 2022-02-28; 修回日期: 2022-03-19

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (32171786); 浙江省自然科学基金资助项目 (LQ21C030001); 浙江农林大学暨阳学院青年人才项目 (JY2018RC05); 绍兴“330 英才计划”

作者简介: 周东洋 (ORCID: 0000-0003-1939-3548), 从事森林生态学研究。E-mail: 15945094733@163.com。通信作者: 王晓雨 (ORCID: 0000-0002-7091-9384), 讲师, 博士, 从事全球变化生态学和植物生态学研究。E-mail: xiaoxiao.0408@163.com

range of different sampling quantities are given. [Result] The variation of C concentration of *P. massoniana* was significantly higher than that of other tree species. A small sample size of $n=3-5$ caused an estimation error of about $\pm 10\%$, but only $\pm 5\%$ for other tree species. For *P. massoniana*, the estimation error was -4% to 5% when the sample size was increased to 10. [Conclusion] It is suggested to appropriately increase the sampling quantity ($n=5-10$) to reduce the estimation error when estimating and evaluating C, N and P reserves of *P. massoniana* forest. If a small sample size of $n=3-5$ is used, an estimation error range of $\pm 10\%$ should be taken into account. When estimating C, N and P concentration of other tree species, the estimation error is within the acceptable range when $n=4-5$. [Ch, 2 fig. 2 tab. 27 ref.]

Key words: subtropical evergreen broad-leaved forest; sampling quantity; uncertainty analysis; carbon storage

森林是陆地生态系统中重要的养分储存库之一, 有关森林碳(C)、氮(N)、磷(P)储量和潜力的研究在全球和区域尺度上都十分广泛^[1-4]。地处中国亚热带地区的森林生态系统具有极高的碳密度和养分含量, 准确评估其碳、氮、磷储量具有重要现实和理论意义^[5-6]。植被养分储量评估的准确程度与生物量和养分含量密切相关。以往研究所涉及的平均生物量密度法、平均生物量转换因子法、改善模型连续生物量转换因子法和异速生长方程模型等^[7-9], 都是通过提高生物量估算精度以提升养分储量评估准确性; 针对树木养分含量计算误差和不确定性的研究相对较少^[10-11]。虽有部分研究关注了不同树种、部位、树龄等因素间养分含量的差异^[12-14], 但受取样方法所限, 对树干养分含量的研究仍较匮乏。此外, 林学和生态学领域通常采用的小样本取样法(取样量 $n=3\sim 5$)难以客观代表总体养分含量, 增加样本数可在何种程度上提高估算结果的精度值得开展进一步研究。因此, 本研究以浙江省五洩国家森林公园中5种具有代表性的亚热带常绿阔叶树种为研究对象, 采用有放回抽样方法(Bootstrap)模拟并比较小样本取样($n=3\sim 5$)和完整样本取样($n=18\sim 32$)的估算结果, 评估小样本取样产生的养分质量分数估算误差。权衡取样量和估算精度, 分别提出估算碳、氮、磷储量的最优取样量, 为相关野外研究工作提供取样方法的建议。

1 研究方法

1.1 样地设置与采样

研究样地位于浙江省绍兴市五洩国家森林公园(29°43'19.08"N, 120°03'06.09"E), 在森林公园中部无人干扰的典型亚热带常绿阔叶林区域, 设3个50 m × 50 m的样地作为长期固定监测样地。样地内优势树种为马尾松 *Pinus massoniana*、杉木 *Cunninghamia lanceolata*、木荷 *Schima superba*、青冈 *Quercus glauca* 和毛竹 *Phyllostachys edulis*。2018年11月于样地内随机选取一定数量的5种优势树种, 分别截取1 m长度的树干圆盘, 具体取样数为马尾松32、杉木21、木荷30、青冈30和毛竹18。将取样圆盘于45 °C烘干至恒量, 选取部分组织粉碎待用。采用元素分析仪测定碳和氮质量分数(Elementar Analysen system, Bran & Luebb GmbH, 德国), 采用Auto Analyzer测定磷质量分数(AA3, Bran+Luebb GmbH, 德国)。

1.2 数据分析

采用单因素方差分析检测树种间和树种内部不同圆盘样本之间的碳、氮、磷质量分数差异。在不同树种的碳、氮、磷样本中($n=18\sim 32$), 采用Bootstrap估算随取样量增加各树种养分估算值总平方误差变化情况。预计估算值的总平方误差将随取样量增加而减小, 取样量较小时($n=3\sim 5$)估算误差最大, 可能检测到一个处于中间区间建议取样量(n_i)。利用随机抽样方式, 比较常用的小样本($n=3\sim 5$)、 n_i 与全样本导致的碳、氮、磷质量分数变异情况。所有统计和绘图工作利用R软件完成, 其中利用“segmented”软件包进行阈值点的估算。

2 结果与分析

2.1 不同树种树干碳、氮、磷质量分数变异

由图1和表1可知: 不同树种树干碳、氮、磷质量分数之间具有极显著差异($P<0.001$); 杉木碳质量分数极显著高于其他4个树种($P<0.001$), 木荷和青冈最低; 马尾松氮质量分数最高($P<0.001$), 青

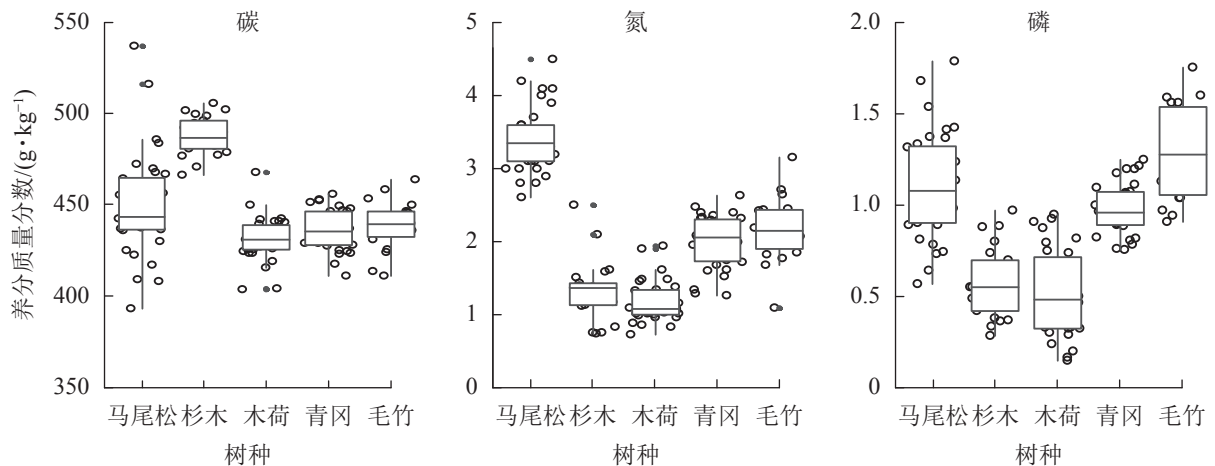


图 1 亚热带常绿阔叶林 5 个优势树种的树干木材碳、氮、磷质量分数差异

Figure 1 Carbon (C), Nitrogen (N), and Phosphorus (P) concentration variation in the tree boles of five tree species in subtropical evergreen broadleaf forest

冈和毛竹次之，杉木和木荷最低，但青冈和毛竹、杉木和木荷之间无显著差异；马尾松和毛竹的磷质量分数极显著高于其他树种 ($P < 0.001$)，杉木和木荷较低，两者之间差异不显著。

由表 1 可知：马尾松树干碳变异系数为 7%，其他树种为 2%~3%；马尾松氮变异系数最低，为 12%，杉木最高，为 31%，其他树种为 20%~25%；青冈的磷变异系数最低，仅为 14%，木荷最高，为 46%，其他树种为 20%~33%。总体上，树种之间的碳、氮、磷变异系数差异较大。马尾松碳变异幅度高于其他树种，氮变异系数低于其他树种；青冈磷变异系数较小，木荷较高，其他树种处于中间水平。

表 1 5 个优势树种的树干碳、氮、磷质量分数和变异系数

Table 1 Mean (standard deviation) and CV of C, N and P concentrations for 5 dominant tree species

树种	样本数/个	碳		氮		磷	
		质量分数/(g·kg ⁻¹)	变异系数/%	质量分数/(g·kg ⁻¹)	变异系数/%	质量分数/(g·kg ⁻¹)	变异系数/%
马尾松	32	449.1±29.4 b	7	3.4±0.4 a	12	1.10±0.29 a	26
杉木	21	487.6±10.7 a	2	1.3±0.4 c	31	5.80±0.19 c	33
木荷	30	431.1±12.5 c	3	1.2±0.3 c	25	0.52±0.24 c	46
青冈	30	435.9±11.5 c	3	2.0±0.4 b	20	0.98±0.14 b	14
毛竹	18	438.6±14.1 bc	3	2.2±0.5 b	23	1.28±0.26 a	20

说明：数值为平均值±标准差。同列不同小写字母表示树种间差异极显著 ($P < 0.001$)

2.2 不同取样量下的树干碳、氮、磷质量分数估算

由图 2 可知：5 个亚热带常绿阔叶林优势树种碳的建议取样量为 5~10。其中马尾松建议取样量最大，为 10，木荷为 8，杉木和青冈为 6，毛竹为 5。亚热带常绿阔叶林优势树种氮的建议取样量为 4~7。其中杉木建议取样数最大，为 7，马尾松为 6，木荷和青冈为 5，毛竹最少，为 4。亚热带常绿阔叶林优势树种磷的建议取样量为 5~9。其中马尾松建议取样量最大，为 9，青冈为 8，杉木和木荷为 7，毛竹最小，为 5。

2.3 比较小样本和建议取样量抽样引起的估算误差

将该领域常用的小取样量 ($n=3\sim5$) 与上述估算的取样量进行比较 (表 2) 发现：对于碳估算变化，马尾松由于树干碳质量分数变异较大， $n=5$ 小样本条件下质量分数估算误差为 6%~7%，采样样本增加至 $n=10$ 后估算误差为 4%~5%；而对于其他树种， $n=3$ 即可保证 5% 的估算误差。对于氮质量分数变化，马尾松 $n=5$ 小样本条件下氮质量分数为 14%~15%，采样样本增加至 $n=10$ 不能显著提高估算精度；其他树种也表现出一致规律，增加取样量不能有效降低估算误差。磷质量分数变异较大，增加样本没有显著降低取样误差， $n=5$ 小样本可以保证马尾松、杉木、木荷估算误差为 30%~50%，而青冈和毛竹估算误差为 15%~20%。

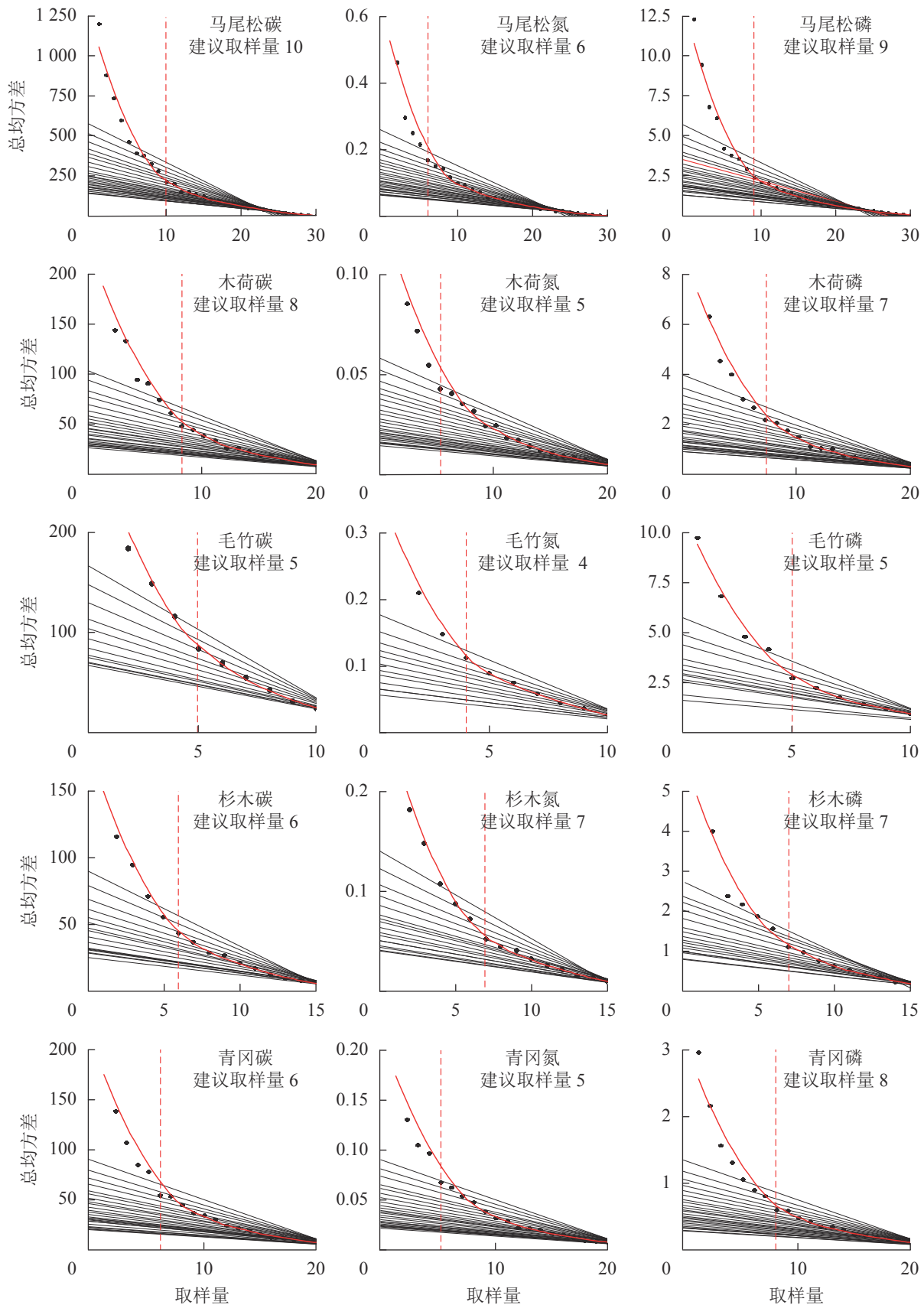


图2 不同取样量下树干碳、氮、磷质量分数估算的总平方误差变化趋势

Figure 2 Trends of total squared error in the estimation of C, N, P concentration of tree boles with different sample sizes

3 讨论

相比于其他树种, 马尾松的碳质量分数变异系数最大, 建议采样样本数为10。马尾松是广泛分布于

表 2 5 个优势树种建议取样量和小样本取样量 ($n=3\sim 5$) 对总体的估算误差比较Table 2 Comparison of the estimated extent of the population for different tree species suggested for n_i and small sample size ($n=3\sim 5$)

养分	树种	总样本/建议取样量	建议取样量估算误差/%	估算误差/%		
				$n=3$	$n=4$	$n=5$
碳	马尾松	32/10	-3.99~5.12	-8.41~11.75	-7.47~9.46	-6.14~7.23
	杉木	21/6	-1.90~2.00	-3.36~2.92	-2.81~2.58	-2.09~1.87
	木荷	30/8	-2.95~2.22	-4.70~5.01	-3.98~4.40	-3.13~3.62
	青冈	30/6	-2.89~2.78	-4.32~3.97	-3.20~3.02	-3.14~2.88
	毛竹	18/5	-3.37~3.30	-5.15~4.48	-3.37~3.76	-3.37~3.30
氮	马尾松	32/6	-12.42~17.11	-19.30~23.01	-16.60~18.83	-14.97~13.96
	杉木	21/7	-26.46~27.03	-41.27~51.44	-31.67~44.95	-29.82~37.00
	木荷	30/5	-22.39~33.72	-31.16~43.34	-20.94~40.85	-22.39~33.72
	青冈	30/5	-21.63~20.36	-31.89~20.93	-23.86~20.70	-21.63~20.36
	毛竹	18/4	-26.04~25.65	-30.48~30.12	-26.04~25.65	-19.74~19.71
磷	马尾松	32/9	-21.94~22.49	-41.23~44.80	-31.65~30.50	-28.66~37.46
	杉木	21/7	-30.70~26.10	-42.85~46.81	-40.42~49.80	-38.35~43.98
	木荷	30/7	-41.40~42.89	-58.95~73.93	-54.89~66.40	-42.95~51.08
	青冈	30/8	-11.79~13.29	-18.32~20.15	-18.76~17.18	-15.07~17.55
	毛竹	18/5	-18.06~22.52	-24.53~26.72	-22.01~24.37	-18.06~22.52

亚热带地区材用和造林树种, 有关其碳含量的报道较多^[15-18]。常绿阔叶林中, 马尾松碳质量分数为 41.78%~51.49%, 平均为 46.38%, 变异系数约 10%^[18]; 而全国范围内, 马尾松树干中碳平均质量分数为 44.83%, 变异系数约 12%^[11]; 全球尺度范围内, 马尾松及同纬度地区陆生植物碳质量分数为 46.4%, 变异幅度约 14%^[19]。而在本研究中, 样地尺度上马尾松树干碳质量分数为 425.4~475.8 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 450.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 整体变异系数为 7%。总体而言, 碳质量分数变异幅度随尺度变大而升高。这些变异幅度指标可以为不同尺度水平下总碳质量分数估算的不确定性提供借鉴, 即在全国范围内, 关于马尾松的碳储量估算可能存在 7%~12% 的不确定性, 而其他树种 $n=3\sim 5$ 小样本的估算误差在 5% 以下。李永进等^[20] 研究杉木等 8 种乡土树种碳质量分数时发现: 树干、树枝、树叶和树根碳质量分数分别为 454.7~500.0、426.0~474.0、448.4~495.8、436.0~490.4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数均在 8% 以上。唐学君等^[21] 研究内蒙古地区油松林碳储量变异情况时发现: 油松人工林平均碳质量分数为 502.49 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最大值为枝 (514.20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 最小值为树干 (485.58 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 变异系数高达 20%。赵瑞等^[22] 研究了东北常见的 10 个阔叶树种的碳质量分数, 每个树种采样 3 个, 各树种碳变异系数均约 7%。以上研究结果与本研究结果相似。

蔡国俊等^[23] 分析了黔南喀斯特峰丛洼地建群树种不同器官氮和磷化学计量特征, 发现取样量为 3 时, 氮和磷平均质量分数分别为 (8.90±7.68) 和 (0.52±0.32) $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 变异系数分别为 86.29% 和 61.54%, 氮和磷质量分数变异较大。周永姣等^[24] 研究了亚热带 59 个常绿与落叶树种细根养分及化学计量特征, 发现取样量为 3 时, 根氮质量分数变异系数为 42.14%~48.87%; 而将采样样本数提高到 4 或 5 时, 亚热带常绿阔叶林 11 个树种细根氮质量分数的总体变异系数可降至 41.29%^[25]。本研究也发现将采样强度由 3 提升至 4 或 5 时, 树干氮质量分数估算误差显著降低。

傅梓奇^[26] 测定了亚热带地区 18 个树种的根系磷质量分数 (取样量为 4 或 5), 总体磷质量分数为 0.3~0.8 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与本研究树干木质部的研究结果一致。刘璐等^[27] 对神农架常绿落叶阔叶混交林植物不同器官磷质量分数的研究发现: 加权不同器官生物量 (取样量为 3) 可知磷在不同整株植物中的总体变异系数为 47.67%, 这与本研究 14%~46% 的变异系数相吻合。另外, 本研究还发现增加采样样本不能显著降低 5 个树种磷的估计误差。

4 结论

总体上, 马尾松树干碳质量分数变异较大, 在估算和评估马尾松林碳储量时, 建议适当增加取样量

($n=5\sim 10$)以降低估算误差,或在仍采用 $n=3\sim 5$ 小样本取样量的同时,将 $\pm 10\%$ 估算误差范围考虑在内。对于其他树种的碳质量分数及所有树种的氮和磷质量分数,增加采样样本对估算误差的降低效果不明显,建议仍使用取样量 $n=4$ 或 $n=5$ 。

5 参考文献

- [1] TANG Xuli, ZHAO Xia, BAI Yongfei, *et al.* Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: new estimates based on an intensive field survey [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2018, **115**(16): 4021 – 4026.
- [2] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报, 2000, **20**(5): 733 – 740.
LIU Guohua, FU Bojie, FANG Jingyun. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance [J]. *Acta Ecol Sin*, 2000, **20**(5): 733 – 740.
- [3] 邓仁菊, 杨万勤, 张健, 等. 川西亚高山森林土壤有机层碳、氮、磷储量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2007, **13**(4): 492 – 496.
DENG Renju, YANG Wanqin, ZHANG Jian, *et al.* Carbon, nitrogen and phosphorus storage in soil organic layer of the subalpine forests in western Sichuan [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2007, **13**(4): 492 – 496.
- [4] 徐丽, 何念鹏. 中国森林生态系统氮储量分配特征及其影响因素[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, **50**(10): 1374 – 1385.
XU Li, HE Nianpeng. Nitrogen storage and allocation in China's forest ecosystems [J]. *Sci Sin Terrae*, 2020, **50**(10): 1374 – 1385.
- [5] GIBBS H K, BROWN S, NILES J O, *et al.* Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality [J]. *Environ Res Lett*, 2007, **2**(4): 1 – 13.
- [6] SAATCHI S S, HARRIS N L, BROWN S, *et al.* Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, **108**(24): 9899 – 9904.
- [7] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学: 地球科学, 2007, **37**(6): 804 – 812.
FANG Jingyun, GUO Zhaodi, PIAO Shilong, *et al.* Estimation of terrestrial vegetation carbon sink in China from 1981 to 2000 [J]. *Sci Sin Terrae*, 2007, **37**(6): 804 – 812.
- [8] 方精云, 陈安平, 赵淑清, 等. 中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 *Science* 一文 (*Science*, 2001, **291**: 2320–2322) 的若干说明[J]. 植物生态学报, 2002, **26**(2): 243 – 249.
FANG Jingyun, CHEN Anping, ZHAO Shuqing, *et al.* Estimation biomass carbon of China's forests: supplementary notes on report published in *Science* (**291**: 2320–2322) by Fang *et al.* (2001) [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2002, **26**(2): 243 – 249.
- [9] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. 植物学报, 2001, **43**(9): 967 – 973.
FANG Jingyun, CHEN Anping. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance [J]. *Acta Bot Sin*, 2001, **43**(9): 967 – 973.
- [10] 邢雪荣, 韩兴国, 陈灵芝. 植物养分利用效率研究综述[J]. 应用生态学报, 2000, **11**(5): 785 – 790.
XING Xuerong, HAN Xingguo, CHEN Lingzhi. A review on research of plant nutrient use efficiency [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2000, **11**(5): 785 – 790.
- [11] TANG Zhiyao, XU Wenting, ZHOU Guoyi, *et al.* Patterns of plant carbon, nitrogen, and phosphorus concentration in relation to productivity in China's terrestrial ecosystems [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2018, **115**(16): 4033 – 4038.
- [12] LAMLOM S H, SAVIDGE R A. A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species [J]. *Biomass Bioenergy*, 2003, **25**(4): 381 – 388.
- [13] MARTIN A R, DORAISAMI M, THOMAS S C, *et al.* Global patterns in wood carbon concentration across the world's trees and forests [J]. *Nat Geosci*, 2018, **11**(12): 915 – 920.
- [14] MARTIN A R, ERICKSON D L, KRESS W J, *et al.* Wood nitrogen concentrations in tropical trees: phylogenetic patterns and ecological correlates [J]. *New Phytol*, 2014, **204**(3): 484 – 495.
- [15] 康冰, 刘世荣, 张广军, 等. 广西大青山南亚热带马尾松、杉木混交林生态系统碳素积累和分配特征[J]. 生态学报, 2006, **26**(5): 1320 – 1329.
KANG Bing, LIU Shirong, ZHANG Guangjun, *et al.* Carbon accumulation and distribution in *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* mixed forest ecosystem in Daqingshan, Guangxi of China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26**(5):

- 1320 – 1329.
- [16] 张治军, 张小全, 王彦辉, 等. 重庆铁山坪马尾松林生态系统碳贮量及其分配特征[J]. 林业科学, 2009, **45**(5): 49 – 53.
ZHANG Zhijun, ZHANG Xiaoquan, WANG Yanhui, *et al.* Carbon storage and distribution of *Pinus massoniana* forest ecosystem in Tieshanping of Chongqing [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, **45**(5): 49 – 53.
- [17] 丁波, 丁贵杰, 张耀荣. 密度调控对马尾松人工林生态系统碳储量的影响[J]. 西北林学院学报, 2016, **31**(3): 197 – 203.
DING Bo, DING Guijie, ZHANG Yaorong. Effects of density regulation on carbon storage of *Pinus massoniana* plantation ecosystem [J]. *J Northwest For Univ*, 2016, **31**(3): 197 – 203.
- [18] 盘金文, 郭其强, 孙学广, 等. 不同林龄马尾松人工林碳、氮、磷、钾养分含量及其生态化学计量特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, **26**(4): 746 – 756.
PAN Jinwen, GUO Qiqiang, SUN Xueguang, *et al.* Contents and stoichiometric characteristics of C, N, P and K under different stand ages of *Pinus massoniana* plantations [J]. *J Plant Nutr Fert*, 2020, **26**(4): 746 – 756.
- [19] ELSER J J, FAGAN W F, DENNO R F, *et al.* Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs [J]. *Nature*, 2000, **408**(6812): 578 – 580.
- [20] 李永进, 汤玉喜, 唐洁, 等. 中亚热带 4 种混交幼龄人工林生态系统碳贮量特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, **39**(5): 56 – 62.
LI Yongjin, TANG Yuxi, TANG Jie, *et al.* Carbon storage characteristics of four kinds of young mixed forest ecosystem in China's mid-subtropical area [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2019, **39**(5): 56 – 62.
- [21] 唐学君, 王伟峰, 肖舜祯, 等. 内蒙古赤峰市油松人工林植物和土壤 C、N、P 生态化学计量特征[J]. 地域研究与开发, 2020, **39**(3): 162 – 167.
TANG Xuejun, WANG Weifeng, XIAO Shunzhen, *et al.* Plants and soil C, N and P ecological stoichiometry of *Pinus tabulaeformis* plantations in Chifeng City, Inner Mongolia [J]. *Areal Res Dev*, 2020, **39**(3): 162 – 167.
- [22] 赵瑞, 王传宽, 全先奎, 等. 黑龙江省帽儿山温带阔叶树种不同器官的生态化学计量特征[J]. 林业科学, 2021, **57**(2): 1 – 11.
ZHAO Rui, WANG Chuankuan, QUAN Xiankui, *et al.* Ecological stoichiometric characteristics of different organs of broad-leaved tree species in a temperate forest in Maershan area, Heilongjiang Province [J]. *Sci Silv Sin*, 2021, **57**(2): 1 – 11.
- [23] 蔡国俊, 锁盆春, 张丽敏, 等. 黔南喀斯特峰丛洼地 3 种建群树种不同器官 C、N、P 化学计量特征[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2021, **39**(5): 36 – 44.
CAI Guojun, SUO Pechun, ZHANG Limin, *et al.* C, N, P stoichiometric characteristics in different organs of three constructive plants in karst peak-cluster depressions in southern Guizhou, Southwest China [J]. *J Guizhou Norm Univ Nat Sci Ed*, 2021, **39**(5): 36 – 44.
- [24] 周永姣, 王满堂, 王钊颖, 等. 亚热带 59 个常绿与落叶树种不同根序细根养分及化学计量特征[J]. 生态学报, 2020, **40**(14): 4975 – 4984.
ZHOU Yongjiao, WANG Mantang, WANG Zhaoying, *et al.* Nutrient and ecological stoichiometry of different root order fine roots of 59 evergreen and deciduous tree species in subtropical zone [J]. *Acta Ecol Sin*, 2020, **40**(14): 4975 – 4984.
- [25] 蔡飞, 邹斌, 郑景明, 等. 亚热带常绿阔叶林 11 个树种的细根形态及碳氮含量研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, **42**(5): 45 – 54.
CAI Fei, ZOU Bing, ZHENG Jingming, *et al.* Fine root morphology and carbon and nitrogen contents of 11 tree species in subtropical ever green forest [J]. *J Northwest A&F Univ Nat Sci Ed*, 2014, **42**(5): 45 – 54.
- [26] 傅梓奇. 亚热带不同树种根系形态及磷分级特征[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.
FU Ziqi. *Root Morphology and Phosphorus Classification Characteristics of Different Tree Species in Subtropical Forests* [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2021.
- [27] 刘璐, 葛结林, 舒化伟, 等. 神农架常绿落叶阔叶混交林碳氮磷化学计量比[J]. 植物生态学报, 2019, **43**(6): 482 – 489.
LIU Lu, GE Jielin, SHU Huawei, *et al.* C, N and P stoichiometric ratios in mixed evergreen and deciduous broadleaved forests in Shennongjia, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2019, **43**(6): 482 – 489.