

贵州省喀斯特地区 4 种典型人工林叶片化学计量特征

吕文强¹, 周传艳^{1,2}, 闫俊华³, 李世杰⁴

(1. 贵州省科学院 山地资源研究所, 贵州 贵阳 550001; 2. 华南理工大学 环境与能源学院, 广东 广州 510640; 3. 中国科学院 华南植物园, 广东 广州 510650; 4. 贵州省林业调查规划院, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 为评价贵州省人工林生境养分供应状况及养分获取效率, 以贵州省喀斯特地区 4 种典型人工林: 华山松 *Pinus armandii* 林, 杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林, 马尾松 *Pinus massoniana* 林和柏木 *Cupressus funebris* 林为研究对象, 分析了以上 4 种人工林叶片生态化学计量学特征。结果显示: 华山松、杉木、马尾松和柏木等 4 种典型人工林叶片碳(C)质量分数较高, 氮(N)和磷(P)质量分数较低; 各林型之间叶片碳质量分数变异较小, 氮、磷质量分数以及碳氮比(C:N), 氮磷比(N:P), 碳磷比(C:P)变异较大。4 种典型人工林各林型之间叶片生态计量学指标大部分差异不显著($P>0.05$)。4 种典型人工林叶片碳氮比(C:N)和碳磷比(C:P)较大, 表明它们从生境中获取养分的效率较高, 而氮磷比(N:P)则揭示了杉木林和华山松林的生长受氮限制、柏木林受磷限制, 马尾松林受氮和磷的共同限制。

表 2 参 25

关键词: 森林生态学; 叶片; 典型人工林; 贵州省; 生态化学计量学; 喀斯特地区

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2016)06-0984-07

Leaf C, N, and P stoichiometry for four typical artificial forests in the karst region of Guizhou Province

LÜ Wenqiang¹, ZHOU Chuanyan^{1,2}, YAN Junhua³, LI Shijie⁴

(1. Institute of Guizhou Mountain Resources, Guizhou Academy of Sciences, Guiyang 550001, Guizhou, China; 2. College of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 3. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, Guangdong, China; 4. Guizhou Forestry Survey and Planning Institute, Guiyang 550001, Guizhou, China)

Abstract: To evaluate soil nutrient supply and nutrient use efficiency of artificial forests in the karst region of Guizhou Province, four typical artificial forests, namely *Pinus armandii*, *Cunninghamia lanceolata*, *Cupressus funebris*, and *Pinus massoniana*, were selected. Contents of C, N, and P in fresh leaves of the four selected artificial forests were analyzed using a variance analysis (ANOVA). Results showed that C content in leaves across the four artificial forests was relatively high, ranging from 555.453 to 628.125 mg·g⁻¹. However, N content and P content of leaves were much lower than *Toona sinensis* and *Zenia insignis* in Guangxi Province. Furthermore, the variation coefficients of C content were very small variation in the four artificial forest types; whereas, variation coefficients of N and P contents, as well as the ratios of C:N, N:P, and C:P in leaves had greater range of variation. Statistical analysis revealed that most indexes of leaf ecological stoichiometric characteristics were not significantly correlated for each of the four artificial forests ($P > 0.05$). Compared to pub-

收稿日期: 2015-12-10; 修回日期: 2016-01-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31360123); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050205); 中国科学院知识创新工程方向性项目(kzcx2-yw-306); 国家自然科学基金创新群体项目(40721002); 贵州省科技基金资助项目(黔科合 J 字[2008]2014, 黔科合 J 字[2014]2114); 贵州科学院青年基金项目(黔科院 J 合字[2013]03); 2011 西部之光人才资金资助项目

作者简介: 吕文强, 助理研究员, 博士, 从事环境地球化学研究。E-mail: lvbuwei123@126.com。通信作者: 周传艳, 研究员, 博士, 从事森林碳循环和喀斯特生态修复研究。E-mail: chyzhou66@163.com

lished data of natural karst forests, the higher C:N and C:P ratios in this study meant that the four selected artificial forests had higher effective nutrient utilization. Also, N:P ratios of leaves in the four artificial forests revealed that 1) growth of *Pinus armandii* and *Cupressus funebris* was N-limiting, 2) growth of *P. massoniana* was P-limiting, and 3) growth of *Cunninghamia lanceolata* was both N- and P-limiting. Therefore, understanding leaf C, N, and P stoichiometry gleaned from this study would be crucial for developing reliable strategies and management of artificial forests in the karst region of Guizhou Province. [Ch, 2 tab. 25 ref.]

Key words: forest ecology; leaf; typical artificial forests; Guizhou Province; ecological stoichiometry; karst area

中国西南喀斯特地貌面积达 50 万 km², 是全球喀斯特集中分布区面积最大、岩溶发育最强烈、景观类型复杂、生物多样性丰富、生态系统极为脆弱的典型地区, 在全球喀斯特生态系统中占有重要地位^[1]。喀斯特生态系统特殊的地质背景决定了其特别脆弱, 具有环境容量小、承载能力低、抗干扰能力差、弹性小等特点, 而且喀斯特地区土地资源匮乏, 可耕地面积少, 人口众多, 人地矛盾突出, 极易发生石漠化现象, 严重制约了该区生态环境与社会经济的快速健康发展。贵州省地处中国西南喀斯特中心地区, 是中国石漠化分布面积最大、等级最齐、程度最深、危害最重的省份。植被的恢复与重建是人类治理退化生态系统的重要手段和内容^[2-3], 是石漠化治理的重要举措。在植被恢复与重建过程中, 植物一方面从贫瘠的土壤中吸取养分维持其健康生长, 另一方面又以凋落物的形式将大量养分返还给土壤, 改善土壤养分状况。退耕还林是植被恢复与重建的主要途径之一。目前, 针对喀斯特石漠化地区植被恢复与重建的研究主要集中在不同植被恢复模式对土壤性质的影响^[4-6]。华山松 *Pinus armandii*, 杉木 *Cunninghamia lanceolata*, 柏木 *Cupressus funebris* 和马尾松 *Pinus massoniana* 人工林具有耐贫瘠、速生等特点, 在贵州省植被恢复与重建中担任着重要角色, 分布较广。贵州省现有杉木林 142.43 万 hm², 马尾松人工林 176.34 万 hm², 柏木林 27.39 万 hm² 和华山松林 15.96 万 hm², 合计约占全省森林面积的 40% 以上^[7], 因此, 在贵州省森林生态系统中占据着重要地位, 但目前对 4 种代表性人工林的生境养分供应状况及养分获取效率尚不清楚。生态化学计量学(ecological stoichiometry)综合生物学、化学和物理学的基本原理, 利用生态过程中多重元素的平衡关系, 为研究碳(C), 氮(N), 磷(P)等元素在生态系统过程中的耦合关系提供了技术方法^[8]。植物叶片的碳氮比(C:N)和碳磷比(C:P)表征植物吸收营养同化碳的能力, 一定程度上反映了单位养分供应量所能达到的生产力及植物对营养的利用率, 具有重要的生态学意义^[9-10]。植物叶片的氮磷比(N:P)可以作为判断环境因子, 特别是土壤对植物生长的养分供应状况的指标^[11-12]。因此, 本研究以贵州省马尾松、杉木、柏木、华山松人工林为研究对象, 运用生态化学计量学理论, 结合方差分析, 综合研究其叶片生态化学计量学特征, 进而阐明 4 种人工林从生境中获取养分的效率及生境的养分供应状况, 旨在为贵州省植被恢复与重建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贵州省位于中国西南的东南部, 云贵高原东部, 24°37' ~ 29°13'N, 103°36' ~ 109°35'E。属亚热带季风气候, 年平均气温为 15.0 ℃, 降水量 1 100.0 ~ 1 300.0 mm, 全年日照时数 1 300.0 h, 无霜期 270.0 d 左右, 相对湿度 70% 以上。本研究采样区分别位于贵州省毕节地区、黔西南州、黔南州、安顺地区和贵阳市。毕节地区年平均气温为 10.0 ~ 15.0 ℃, 降水量为 849.0 ~ 1 399.0 mm, 无霜期 245.0 ~ 290.0 d, 华山松和杉木人工林在该区分布广泛。黔西南州年平均气温为 13.8 ~ 19.4 ℃, 降水量 1 352.8 mm, 无霜期年平均 317 d, 杉木人工林是该区较为常见的人工林类型。黔南州年平均气温为 13.6 ~ 19.6 ℃, 降水量 1 100.0 ~ 1 400.0 mm, 无霜期 335.0 d; 贵阳市年平均气温为 15.3 ℃, 降水量 1 129.5 mm, 无霜期 270.0 d, 马尾松林是上述 2 个区域主要人工林类型之一。安顺地区年平均气温为 14.0 ℃, 降水量为 1 360.0 mm, 无霜期 280.0 d, 柏木林在该区人工林类型中占有重要地位。

1.2 样地设置及叶片样品的采集

根据 4 种典型人工林在贵州省的分布情况, 确立在毕节设置华山松人工林样地、毕节和黔西南设置杉木人工林样地、黔南和贵阳设置马尾松人工林样地、安顺设置柏木人工林样地; 分布面积较广的杉木

人工林和马尾松人工林在考虑可达性的条件下分别设置了 6 个和 9 个样地，分布面积相对较小的华山松人工林和柏木人工林分别设置了 4 个和 5 个样地。同时根据调查可知：本研究所选取的 4 种人工林各林龄段在省内均有分布，为准确反映贵州省喀斯特地区 4 种典型人工林的生态化学计量学的总体特征，在样地设置时也充分考虑了各人工林林型林龄因素。样地基本情况见表 1。

表 1 研究地点概况

Table 1 General status of the sampling sites

编号	样地所在区	海拔/m	坡向	坡位	坡度/(°)	地理位置	样地大小/m ²	森林类型	郁闭度/%	群落高度/m	林龄/a
1	毕节	1 931.0	全向	上坡	13	27.224°N, 104.990°E	1 000	华山松	70.0		40
2	毕节	1 961.0	全向	山顶	<5	27.237°N, 105.013°E	1 000	华山松	75.0		19
3	毕节	1 794.0	东	中坡	20	27.213°N, 104.952°E	1 000	华山松	65.0		20
4	毕节	2 160.0	北	下坡	25	27.286°N, 104.568°E	1 000	华山松	40.0	5.6	10
5	毕节	2 182.0	东	中坡	25	27.286°N, 104.570°E	1 000	华山松	40.0	6.8	10
6	毕节	1 754.0	北	下坡	10	27.140°N, 104.891°E	1 000	杉木	55.0	20.0	25
7	黔西南	926.0	西坡	上坡	25	24.990°N, 105.841°E	1 000	杉木	80.0		9
8	黔西南	981.0	北坡	中坡	10	24.987°N, 105.843°E	1 000	杉木	80.0	13.0	8
9	黔西南	1 140.0	东坡	山顶	<5	24.943°N, 105.836°E	1 000	杉木	90.0	9.0	12
10	黔西南	1 160.0	南坡	上坡	15	24.872°N, 105.799°E	1 000	杉木	98.0	14.9	18
11	黔西南	777.0	西坡	下坡	16	24.932°N, 105.780°E	1 000	杉木	80.0	12.5	9
12	黔南	1 263.0	西坡	中坡	8	26.586°N, 106.931°E	1 000	马尾松	40.0	14.0	20
13	黔南	1 144.0	东坡	中坡	5	26.455°N, 106.949°E	1 000	马尾松	50.0	30.0	50
14	黔南	1 196.0	西北坡	下坡	5	26.482°N, 106.940°E	1 000	马尾松	25.0	3.8	8
15	黔南	1 232.0	南	中坡	5	26.527°N, 107.251°E	1 000	马尾松	55.0	7.1	8
16	黔南	1 204.0	南	下坡	2	26.524°N, 107.251°E	1 000	马尾松	50.0	7.5	8
17	黔南	1 185.0	西	上坡	8	26.529°N, 107.247°E	1 000	马尾松	50.0	7.0	8
18	贵阳	1 059.0	东	中坡	14	26.336°N, 106.705°E	1 000	马尾松	45.0	13.5	
19	贵阳	1 060.0	东	中坡	10	26.338°N, 106.705°E	1 000	马尾松	45.0	13.0	
20	贵阳	1 101.0	东	下坡	5	26.361°N, 106.734°E	1 000	马尾松	55.0	29.0	42
21	安顺	1 274.0	南	下坡	6	26.293°N, 105.741°E	1 000	柏木	30.0	5.5	10
22	安顺	1 289.0	东	下坡	10	26.281°N, 105.736°E	1 000	柏木	20.0	8.0	10
23	安顺	1 298.0	西	上坡	18	26.302°N, 105.742°E	1 000	柏木	50.0	16.0	36
24	安顺	1 278.0	北	下坡	15	26.298°N, 105.752°E	1 000	柏木		19.8	75

依据样地设置，于 2012 年 10 – 11 月，选取 8 ~ 10 株·样地⁻¹生长良好的树木，取冠层东南西北 4 个方位和上中下各部位完整成熟的叶片，混合后采用四分法取样，装入牛皮纸信封袋内带回实验室处理。叶片经过烘箱 80 ℃恒温干燥 48 h，恒量后称干质量，然后粉碎、过筛以备化学分析。植物叶片全碳、全氮用碳氮元素分析仪测定(PE2400-Ⅱ)；全磷采用浓硫酸-高氯酸消煮-连续流动分析仪测定。

1.3 数据处理

计算 4 种人工林叶片各化学计量指标的算术平均值，养分含量均用干质量表示。数据前期处理、统计分析及绘图分别在 Excel 2013，统计软件 SPSS 18.0 和 Origin 8.6 中完成。所有统计数据以平均值±标准误差表示，采用单因素方差分析分别对各林型间叶片碳、氮、磷质量分数和碳氮比(C:N)，氮磷比(N:P)和碳磷比(C:P)进行差异性检验。

2 结果与分析

2.1 4 种典型人工林叶片生态化学计量比

由表 2 可知：华山松、杉木、马尾松和柏木各林型叶片碳平均质量分数分别为 (555.453±26.698)，(589.833±18.225)，(516.131±66.076)和(628.125±78.516) mg·g⁻¹。方差分析表明：马尾松林碳质量分数显著低于杉木林碳质量分数和柏木林碳质量分数($P<0.05$)，其余各林型之间碳质量分数差异不显著($P>$

0.05)；氮平均质量分数分别为(7.309±3.992)，(10.268±6.420)，(13.211±5.179)和(11.310±6.555) mg·g⁻¹，4 种林型之间氮质量分数差异不显著(*P*>0.05)；磷平均质量分数分别为(1.830±0.593)，(1.590±0.532)，(1.213±0.342)和(0.721±0.328) mg·g⁻¹，各林型之间仅华山松林和杉木林磷质量分数显著大于柏木林(*P*<0.05)。

华山松、杉木、马尾松和柏木各林型叶片碳氮比(C:N)值大小分别为(98.811±56.464)，(80.281±47.537)，(47.822±26.517)和(75.860±48.674)；氮磷比(N:P)值大小分别为(4.295±2.491)，(7.310±5.228)，(11.709±5.597)和(21.583±21.061)。除华山松林和马尾松林之间碳氮比(C:N)和氮磷比(N:P)差异显著(*P*<0.05)外，其余各林型之间碳氮比(C:N)和氮磷比(N:P)差异不显著(*P*>0.05)。碳磷比(C:P)值大小分别为(332.007±110.480)，(406.842±136.134)，(482.076±239.019)和(1 055.648±553.678)，各林型之间碳磷比(C:P)差异均不显著(*P*>0.05)。

2.2 4 种人工林叶片生态化学计量比变异特征

华山松、杉木、马尾松和柏木等 4 种典型人工林林型叶片碳、氮、磷质量分数及化学计量比变异特征见表 2。叶片碳质量分数总体变异较小，变异系数最小的为杉木林，仅为 3.080%，最大的为马尾松(12.800%)。叶片氮质量分数变异系数为 39.200%~62.500%。除马尾松变异系数略低外(39.200%)，其余 3 种人工林叶片氮质量分数变异系数均超过了 50.000%。柏木林叶片磷质量分数变异系数略高(45.500%)，其余 3 种人工林变异系数波动较小(28.200%~33.500%)。4 种人工林叶片碳氮比(C:N)变异系数均高于 50.000%，为 55.100%~64.200%；氮磷比(N:P)变异系数波动较大，最低的为马尾松林，为 47.800%，最高的为柏木林，高达 97.600%；碳磷比(C:P)变异系数华山松和杉木林之间，柏木和马尾松林之间差异均不大。

表 2 4 种人工林叶片碳、氮、磷生态化学计量学总体特征

Table 2 Stoichiometric characteristics of leaf C, N and P for 4 artificial forests

项目	碳/(mg·g ⁻¹)				氮/(mg·g ⁻¹)			
	华山松	杉木	马尾松	柏木	华山松	杉木	马尾松	柏木
平均值	555.453	589.833	516.131	628.125	7.309	10.268	13.211	11.310
标准差	26.698	18.255	66.076	78.516	3.992	6.420	5.179	6.555
最小值	509.470	570.000	362.810	540.000	3.170	4.060	5.710	4.250
最大值	576.000	622.500	577.500	705.000	12.820	19.800	19.800	18.210
极差	66.530	52.500	214.690	214.690	9.640	15.740	14.090	13.960
变异系数/%	4.810	3.080	12.800	12.500	56.700	62.500	39.200	58.900

项目	磷/(mg·g ⁻¹)				碳氮比			
	华山松	杉木	马尾松	柏木	华山松	杉木	马尾松	柏木
平均值	1.830	1.590	1.213	0.721	98.811	80.281	47.822	75.860
标准差	0.593	0.532	0.342	0.328	56.464	47.537	26.517	48.674
最小值	1.250	1.020	0.490	0.300	43.370	28.790	18.330	35.170
最大值	2.480	2.450	1.610	1.010	181.570	143.820	97.190	137.610
极差	1.230	1.430	1.120	0.710	138.200	115.030	78.860	102.440
变异系数/%	32.400	33.500	28.200	45.500	55.100	59.200	55.400	64.200

项目	氮磷比				碳磷比			
	华山松	杉木	马尾松	柏木	华山松	杉木	马尾松	柏木
平均值	4.295	7.310	11.709	21.583	332.007	406.842	482.076	1 055.648
标准差	2.491	5.228	5.596	21.061	110.480	136.134	239.019	553.678
最小值	1.590	1.860	4.380	4.470	205.430	241.840	251.080	615.790
最大值	7.640	15.720	23.830	52.050	456.220	607.320	1 055.500	1 830.510
极差	6.060	13.860	19.450	47.580	250.790	365.480	804.420	1 214.720
变异系数/%	58.000	71.500	47.800	97.600	33.300	33.500	49.600	52.400

3 讨论

研究结果表明:贵州省喀斯特地区华山松、杉木、马尾松和柏木等 4 种典型人工林叶片碳质量分数变异系数较小,氮、磷质量分数以及碳氮比(C:N),氮磷比(N:P)和碳磷比(C:P)变异系数较大,各林型叶片计量指标均表现出不同程度的波动性。其可能的原因:一方面是因为本研究采集了 4 种人工林各林型不同林龄段的叶片,而不同生长阶段的植物叶片碳、氮、磷往往表现出较大的差异性^[13-17];另一方面是因为喀斯特地区小生境类型多样,土壤养分存在明显的空间异质性,而土壤碳、氮、磷元素作为影响植物正常生长发育所必需的养分,在植物生长过程中发挥着重要的作用,其质量分数的多少及成分组合状况,均会受到土壤养分元素状况的影响^[18]。

本研究 4 种典型人工林叶片碳平均质量分数与同处亚热带地区的千烟洲杉木人工林乔木叶片碳平均质量分数($510.65 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$),亚热带马尾松人工林乔木叶片碳平均质量分数($522.59 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[19],广西环江人工林碳平均质量分数($530.25 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[20]差异并不明显。可能的原因在于本研究区位于亚热带季风气候区,光照充足,水热条件良好,4 种典型人工林叶片具有较高的碳储存能力。

与同亚热带地区人工林叶片氮质量分数相比,本研究中 4 种典型人工林叶片氮质量分数均低于广西环江人工林氮平均质量分数($19.35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[20]。而本研究中杉木林、马尾松林叶片氮平均质量分数与千烟洲杉木人工林植物叶片氮平均质量分数($10.88 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[19],马尾松人工林叶片氮平均质量分数($14.77 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[19]差异较小,表明了植物物种之间的差异也可能影响到植物叶片氮质量分数^[21-22]。

4 种典型人工林叶片磷质量分数均低于广西环江人工林磷平均质量分数($3.02 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[20],杉木林、马尾松林叶片磷平均质量分数却分别高于千烟洲杉木人工林叶片磷平均质量分数($0.75 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$),马尾松人工林叶片磷平均质量分数($1.02 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[19]。叶片磷质量分数与土壤磷密切相关^[11,21]。贵州土壤磷平均质量分数为 $0.70 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (未发表数据),低于广西环江土壤磷质量分数($0.94 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[20],高于千烟洲土壤磷质量分数($0.11 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[19],也表明了叶片磷质量分数与土壤磷质量分数具有密切的相关性。

植物叶片的碳氮比(C:N)和碳磷比(C:P)表征植物吸收营养同化碳的能力,一定程度上反映了单位养分供应量所能达到的生产力及植物对营养的利用率,具有重要的生态学意义^[9-10]。已有的研究表明:喀斯特地区原生林作为喀斯特峰丛洼地非地带性顶级群落,植被、土壤和气候达到了较高水平的平衡状态,在单位氮、磷养分条件下,植物叶片有较高的养分利用效率(碳氮比和碳磷比分别为 34.5 和 376.0)^[20]。4 种典型人工林各林型叶片碳氮比和碳磷比值基本上高于喀斯特地区原生林任豆 *Zenia insignis*(碳氮比为 34.1,碳磷比为 239.1),香椿 *Toona sinensis*(碳氮比为 22.7,碳磷比为 137.6)^[20]。表明本研究 4 种典型人工林均有效地利用了环境提供的营养成分,被选为贵州省喀斯特地区植被恢复与重建的主要树种具有科学性。

植物叶片的氮磷比(N:P)可以作为判断环境因子,特别是土壤对植物生长的养分供应状况的指标^[11-12]。GÜSEWELL^[12]指出,当陆地植物氮磷比小于 10 时,增加氮肥可以增加植被的生物量,氮磷比大于 20,增加磷肥可以增加植被的生物量,在两者之间,施肥对生物量的影响效果与氮磷比关系不明显。杉木林和华山松林氮磷比值均小于 10,表明杉木林和华山松林的生长受氮限制;柏木林氮磷比值大于 20,表明柏木林的生长受磷限制;马尾松林氮磷比值为 10~20,表明马尾松林的生长受到氮和磷的共同限制。

不同生活型植物叶片的养分质量分数存在明显差异^[11,22-23]。生活型是生物对外界环境适应的外部表现形式,同一生活型的生物,在结构和功能上具有很多的相似性,反映了对外界环境适应与进化的趋同性^[24]。而由于对生境的适应方式不同,不同功能群植物的资源利用效率表现出一定的差异,该差异可能体现在碳、氮、磷化学计量学特征上^[25]。方差分析表明:不同林型之间植物叶片生态化学计量学指标大部分差异不显著($P > 0.05$),仅马尾松林与杉木林、柏木林之间叶片碳质量分数,华山松、杉木与柏木之间叶片磷质量分数,华山松林和马尾松林之间叶片碳氮比和氮磷比差异显著($P < 0.05$),较大程度上可能是因为华山松属于温性针叶林,其余 3 种人工林属于暖性针叶林,生活型比较接近。

4 结论

华山松、杉木、马尾松和柏木等 4 种典型人工林叶片碳质量分数较高,氮和磷质量分数较低。各林

型之间叶片生态计量学指标大部分差异不显著($P>0.05$)。4 种典型人工林叶片碳氮比和碳磷比较大, 表明了它们从生境中获取养分的效率较高; 氮磷比则揭示了杉木林和华山松林的生长受氮限制, 柏木林受磷限制, 马尾松林受氮和磷的共同限制。

5 参考文献

- [1] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环: 西南喀斯特土壤-植被系统生源要素循环[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] 王国梁, 刘国彬, 刘芳, 等. 黄土沟壑区植被恢复过程中植物群落组成及结构变化[J]. 生态学报, 2003, **23**(12): 2551 – 2557.
WANG Guoliang, LIU Guobin, LIU Fang, *et al.* Changes in composition and structure of plant communities during the course of restoration at loess gully region [J]. *Acta Ecol Sin*, 2003, **23**(12): 2550 – 2557.
- [3] 程积民, 万惠娥, 胡相明. 黄土丘陵区植被恢复重建模式与演替过程研究[J]. 草地学报, 2005, **13**(4): 324 – 327, 333.
CHENG Jimin, WAN Hui'e, HU Xiangming. Study of vegetation restoration and rebuilding pattern and the process of succession in the Loess Hilly Regions [J]. *Acta Agrest Sin*, 2005, **13**(4): 324 – 327, 333.
- [4] 龙健, 李娟, 江新荣, 等. 喀斯特石漠化地区不同恢复和重建措施对土壤质量的影响[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(4): 615 – 619.
LONG Jian, LI Juan, JIANG Xinrong, *et al.* Effects of different recover and restoration measures on soil quality in karst rocky desertification region [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2006, **17**(4): 615 – 619.
- [5] 刘成刚, 薛建辉. 喀斯特石漠化山地不同类型人工林土壤的基本性质和综合评价[J]. 植物生态学报, 2011, **35**(10): 1050 – 1060.
LIU Chenggang, XUE Jianhui. Basic soil properties and comprehensive evaluation in different plantation in rocky desertification sites of the karst region of Guizhou Province, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2011, **35**(10): 1050 – 1060.
- [6] 戎宇, 刘成刚, 薛建辉. 喀斯特山地不同人工林土壤特性差异与综合评价[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2011, **35**(2): 108 – 112.
RONG Yu, LIU Chenggang, XUE Jianhui. Difference and integrated evaluation on soil fertility properties of different plantations in karst area [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2011, **35**(2): 108 – 112.
- [7] 刘晓, 郭颖, 徐海, 等. 贵州省森林生态系统服务功能的价值评估[J]. 贵州农业科学, 2014, **42**(12): 60 – 65.
LIU Xiao, GUO Ying, XU Hai, *et al.* Assessment of forest ecosystem service function value in Guizhou [J]. *Guizhou Agric Sci*, 2014, **42**(12): 60 – 65.
- [8] ELSER J J, DOBBERFUHL D R, MACKAY N A, *et al.* Organism size, life history, and N:P stoichiometry [J]. *Bio-science*, 1996, **46**(9): 674 – 684.
- [9] VITOUSEK P. Nutrient cycling and nutrient use efficiency [J]. *Am Nat*, 1982, **119**(4): 553 – 572.
- [10] WARDLE D A, WALKER L R, BARDGETT R D. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences [J]. *Science*, 2004, **305**(5683): 509 – 513.
- [11] AERTS R, CHAPIN III F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns [J]. *Adv Ecol Res*, 2000, **30**(8): 1 – 67.
- [12] GÜSEWELL S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance [J]. *New Phytol*, 2004, **164**(2): 243 – 266.
- [13] STERNER R W, ELSER J J. *Ecological Stoichiometry Biology of Elements from Molecules to the Biosphere* [M]. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [14] HAN Wenxuan, FANG Jingyun, GUO Dali, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. *New Phytol*, 2005, **168**(2): 377 – 385.
- [15] 吴统贵, 陈步峰, 肖以华, 等. 珠江三角洲 3 种典型森林类型乔木叶片生态化学计量学[J]. 植物生态学报, 2010, **34**(1): 58 – 63.
WU Tonggui, CHEN Bufeng, XIAO Yihua, *et al.* Leaf stoichiometry of trees in three forest types in Pearl River Delta, South China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2010, **34**(1): 58 – 63.
- [16] 李征, 韩琳, 刘玉虹, 等. 滨海盐地碱蓬不同生长阶段叶片 C, N, P 化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2012, **36**

- (10): 1054 – 1061.
- LI Zheng, HAN Lin, LIU Yuhong, *et al.* C, N and P stoichiometric characteristics in leaves of *Suaeda sala* during different growth phase in coastal wetlands of China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2012, **36**(10): 1054 – 1061.
- [17] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 等. 云南普洱季风常绿阔叶林优势物种不同生长阶段叶片碳、氮、磷化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2015, **39**(1): 52 – 62.
- LIU Wande, SU Jianrong, LI Shuaifeng, *et al.* Leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry at different growth stages in dominant tree species of a monsoon broad-leaved evergreen forest in Pu'er, Yunnan Province, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2015, **39**(1): 52 – 62.
- [18] McGRODDY M E, DAUFRESNE T, HEDIN L O. Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial redfield-type ratios [J]. *Ecology*, 2004, **85**(9): 2390 – 2401.
- [19] 王晶苑, 王绍强, 李勿强, 等. 中国 4 种森林类型主要优势植物的 C:N:P 化学计量学特征[J]. 植物生态学报, 2011, **35**(6): 587 – 595.
- WANG Jingyuan, WANG Shaoqiang, LI Renqiang, *et al.* C:N:P stoichiometric characteristics of four forest types' dominant tree species in China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2011, **35**(6): 587 – 595.
- [20] 俞月凤 彭晚霞, 宋同清, 等. 喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C, N, P 化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(4): 947 – 954.
- YU Yuefeng, PENG Wanxia, SONG Tongqing, *et al.* Stoichiometric characteristics of plant and soil C, N and P in different forest types in depressions between karst hills, southwest China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, **25**(4): 947 – 954.
- [21] HEDIN L O. Global organization of terrestrial plant-nutrient interactions [J]. *Proc Natl Acad Sci*, 2004, **101**(101): 10849 – 10850.
- [22] AERTS R. Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: are there general patterns [J]. *J Ecol*, 1996, **84**(4): 597 – 608.
- [23] LIU Chunjiang, BERG B, KUTSCH W, *et al.* Leaf litter nitrogen concentration as related to climatic factors in *Eurasian* forests [J]. *Global Ecol Biogeogr*, 2006, **15**(5): 438 – 444.
- [24] 孙儒泳, 李博, 诸葛阳, 等. 普通生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [25] 张文彦, 樊江文, 钟华平, 等. 中国典型草原优势植物功能群氮磷化学计量学特征研究[J]. 草地学报, 2010, **18**(4): 503 – 509.
- ZHANG Wenyan, FAN Jiangwen, ZHONG Huaping, *et al.* The nitrogen: phosphorus stoichiometry of different plant functional groups for dominant species of typical steppes in China [J]. *Acta Agrest Sin*, 2010, **18**(4): 503 – 509.