

不同林龄杨梅叶片与土壤的碳、氮、磷生态化学计量特征

叶柳欣¹, 张勇², 蒋仲龙², 吕爱华², 王增², 周本智³, 王晓晓⁴, 吴家森^{1*}

(1. 浙江农林大学环境与资源学院, 杭州 311300; 2. 浙江省林业生态工程管理中心, 杭州 310020;

3. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 杭州 311400; 4. 台州市万丰林业有限公司, 仙居 317300)

摘要: 为了解不同林龄杨梅 (*Myrica rubra*) 叶片和土壤的碳 (C)、氮 (N)、磷 (P) 生态化学计量特征, 以浙江省仙居县 3、9、14 和 21 年生的杨梅人工林为对象, 研究了杨梅叶片和土壤的碳 (C)、氮 (N)、磷 (P) 含量及化学计量比。结果表明, 杨梅叶片碳、氮含量在不同林龄间无差异, 3 年生叶片磷含量显著高于 14 年和 21 年生 ($P<0.05$), 21 年生叶片 C:P 显著高于 3 年和 9 年生 ($P<0.05$)。土壤有机碳、全氮和全磷含量均随着林龄的增大表现为先降低而后升高。3 年生杨梅林土壤有机碳含量显著高于其他年龄 ($P<0.05$), 土壤全氮、全磷含量显著高于 9 年生 ($P<0.05$)。土壤 C:N、C:P 及 N:P 在不同林龄间没有差异。同一林龄杨梅土壤碳氮磷含量及其化学计量比总体表现为随土层深度增加而降低。叶片氮含量与土壤全氮具有显著正相关 ($P<0.05$)。杨梅生长的限制元素是磷, 在生产经营过程中, 可适当增施磷肥。

关键词: 森林生态学; 生态化学计量; 叶片; 土壤; 杨梅; 林龄

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2019)03-0454-06

The stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in soil and leaves of different ages of *Myrica rubra*

YE Liuxin¹, ZHANG Yong², JIANG Zhonglong², LYU Aihua²,
WANG Zeng², ZHOU Benzhi³, WANG Xiaoxiao⁴, WU Jiasen¹

(1. School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300;

2. Zhejiang Forestry Ecological Engineering Management Center, Hangzhou 310020;

3. Research Institute of Subtropical Forestry Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400;

4. Taizhou Wanfeng Forestry Co., Ltd., Xianju 317300)

Abstract: *Myrica rubra* is a unique and ever-green fruit-tree in China. To explore the ecological stoichiometry of carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) in leaves and soil of *Myrica rubra* under different forest ages, this paper studied the content and stoichiometry of C, N and P in leaves and soil, based on the different age groups of *Myrica rubra* (3 a, 9 a, 14 a and 21a) in Xianju County, Zhejiang Province. The results indicated that: (1) there was no significant difference in the C and N contents of *Myrica rubra* in leaves between different forest ages, while the P content in 3-year-old leaves was significantly higher than that in 14- and 21-year-old ones ($P<0.05$), and the C:P in leaves of 21-year-old of *Myrica rubra* was significantly higher than that of 3- and 9-year-old groups ($P<0.05$); (2) with the increase of cultivation ages, the contents of soil organic C, N and P decreased firstly and then increased, the soil organic C content in the treatment group of 3-year-old of *Myrica rubra* was significantly higher than groups of other ages ($P<0.05$), and the N and P contents in the soil of 3-year-old group were significantly higher than that of 9-year-old group ($P<0.05$); (3) there were no significant differences in the ration values of soil C:N, C:P and N:P between different forest age groups, and the nitrogen contents in leaves were positively correlated with the nitrogen content in soil ($P<0.05$). In conclusion, the limiting element affecting the growth of *Myrica rubra* is P, so in the process of production, P fertilizer should be properly added.

收稿日期: 2018-08-24

基金项目: 浙江省省院合作林业科技项目 (2017SY13) 资助。

作者简介: 叶柳欣, 硕士研究生。E-mail: 1527114112@qq.com

* 通信作者: 吴家森, 博士, 教授级高级工程师。E-mail: jsww@zafu.edu.cn

Key words: forest ecology; ecological stoichiometry; leaf; soil; *Myrica rubra*; forest age

碳 (C)、氮 (N)、磷 (P) 含量反映了植物器官的内稳性及元素间的相互关系, 同时他们之间的计量比又可以判断限制性元素和养分利用效率的高低^[1-2]。国内外学者从不同尺度研究了植物营养元素与环境的关系^[3-4]及植物化学计量特征对土壤管理、经营措施的响应^[5-6]。植物的生态化学计量特征在不同年龄、不同季节、不同海拔间均具有一定的差异^[7]。叶片中养分含量状况能够较好地反映土壤养分供给的能力^[8], 植物叶片的 N:P 可以用来判断土壤环境对植物生长的养分供应状况^[9], 而土壤是植物生长所需养分的主要来源, 对调节植物生长具有重要作用。

杨梅 *Myrica rubra* 是杨梅科 Myricaceae 杨梅属 *Myrica* 常绿果树, 具有较高的经济效益, 同时又是优良的水土保持树种, 在我国南方得到了迅速的发展, 主产于浙江、福建, 仅浙江省的杨梅栽培面积就达 $9.07 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 主要品种有东魁 *M. rubra* cv. Dongkui、荸荠 *M. rubra* cv. Biqi、丁岙 *M. rubra* cv. Dingao 和晚稻 *M. rubra* cv. Wandao。养分在杨梅植株体内的分布、年间吸收量及对生长和品质的影响

等已有部分报道^[10-13], 而未见杨梅叶片与土壤 C、N、P 化学计量比的研究及其关系。本研究以 3、9、14 和 21 年生杨梅林为对象, 采集和分析叶片和土壤中 C、N、P 含量及其化学计量比的变化特征, 有助于系统地揭示杨梅人工林在不同生长阶段的植物-土壤养分的分配特征, 以为杨梅林的土壤养分管理提供理论基础, 同时也能为生态化学计量学理论研究提供新思路。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于浙江省仙居县福应街道, 2001 年被国家林业局命名为“中国杨梅之乡”, 地理位置 (N28°25'~28°52', E120°23'~120°42'), 海拔 140~230 m, 属中亚热带季风气候, 年均气温为 18.3℃, 最热的 7 月平均气温 28.5℃, 最冷的 1 月平均气温为 5.6℃, 无霜期 240 d 左右, 历年平均降水量为 2 000 mm, 年日照时数为 1 786.2 h, 土壤为红壤土类^[15]。不同年龄杨梅林地 0~10 cm 土壤理化性质的现状如表 1 所示。

表 1 不同年龄杨梅林土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil under different ages of *Myrica rubra*

林龄/a Stand age	pH 值 pH value	碱解氮/mg·kg ⁻¹ Alkaline hydrolysis nitrogen	有效磷/mg·kg ⁻¹ Available phosphorus	速效钾/mg·kg ⁻¹ Vailable potassium
3	5.29	117.15	4.57	106.20
9	5.37	112.00	4.82	112.49
14	5.17	101.52	8.86	133.70
21	5.18	106.98	9.48	121.77

表 2 不同年龄杨梅林样地基地情况

Table 2 Basic information of sampling plots under different age of *Myrica rubra*

林龄/a Stand age	地径/cm Ground diameter	树高/m Mean height	冠幅/m ² Crown breadth	密度/株·hm ⁻² Density	生物量/kg·株 ⁻¹ Biomass			
					叶片 Leaf	枝条 Branch	主干 Stem	全株 Total plant
3	2.0±0.2	0.6±0.1	0.09±0.01	600±30	0.02±0.01	0.07±0.01	0.03±0.01	0.12±0.01
9	7.3±0.8	2.0±0.3	6.2±0.5	525±30	1.12±0.14	1.16±0.16	0.78±0.08	3.06±0.38
14	10.3±1.2	2.7±0.3	20.2±2.2	375±15	7.37±0.76	4.78±0.51	2.89±0.32	15.04±1.59
21	13.9±1.5	3.5±0.4	30.5±3.3	300±15	7.54±0.78	6.37±0.69	7.62±0.68	21.53±2.15

1.2 试验设计与采样

2017 年 8 月, 根据森林经营档案和全面踏查的基础上, 在同一小流域内选取 3、9、14 和 21 年生的杨梅人工林 (中心位置 N 28°46'9", E 120°31'18"), 分别建立 20 m×10 m 的标准地各 4 个, 共 16 个。均由马尾松改造而来, 成土母岩为花岗岩, 海

拔 140~230 m, 西北坡。马尾松林分 0~10 cm 土壤全碳、全氮、全磷含量分别 20.43、1.87 和 0.46 g·kg⁻¹。杨梅人工林的施肥量基本一致 (腐熟厩肥 20 250 kg·hm⁻²·a⁻¹, 尿素 750 kg·hm⁻²·a⁻¹, 氯化钾 1 050 kg·hm⁻²·a⁻¹)。

对标准地内的杨梅地径、株高进行全面调查,

计算平均地径、株高(表2),而后选取标准株(地径和株高均为平均值)各3株。在标准木树冠的东、西、南、北各取枝条1根,包含当年生和多年生枝条,长度为 (50 ± 5) cm,枝径 (0.5 ± 0.1) cm。摘取所有叶片混合成一个样品,共计16个叶片样品。在每个标准地中按五点采样法挖掘土壤剖面,按0~10 cm、10~30 cm采集土壤样品,然后采用四分法分取样品1 kg左右,带回实验室风干后,过0.149 mm筛,待用^[14]。

1.3 样品处理与测定

采回的植株样品在实验室中用去离子水清洗后于105℃杀青30 min,而后在80℃烘干至恒重,用高速粉碎机将样品粉碎过0.149 mm后备用。土壤和叶片全碳(C)、全氮(N)含量采用Elementar Vario MAX 碳氮元素分析仪(德国Elementar公司)测定;叶片和土壤分别采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 、 $HClO_4-H_2SO_4$ 消煮,钼蓝比色-分光光度法测定全磷(P)含量^[15]。

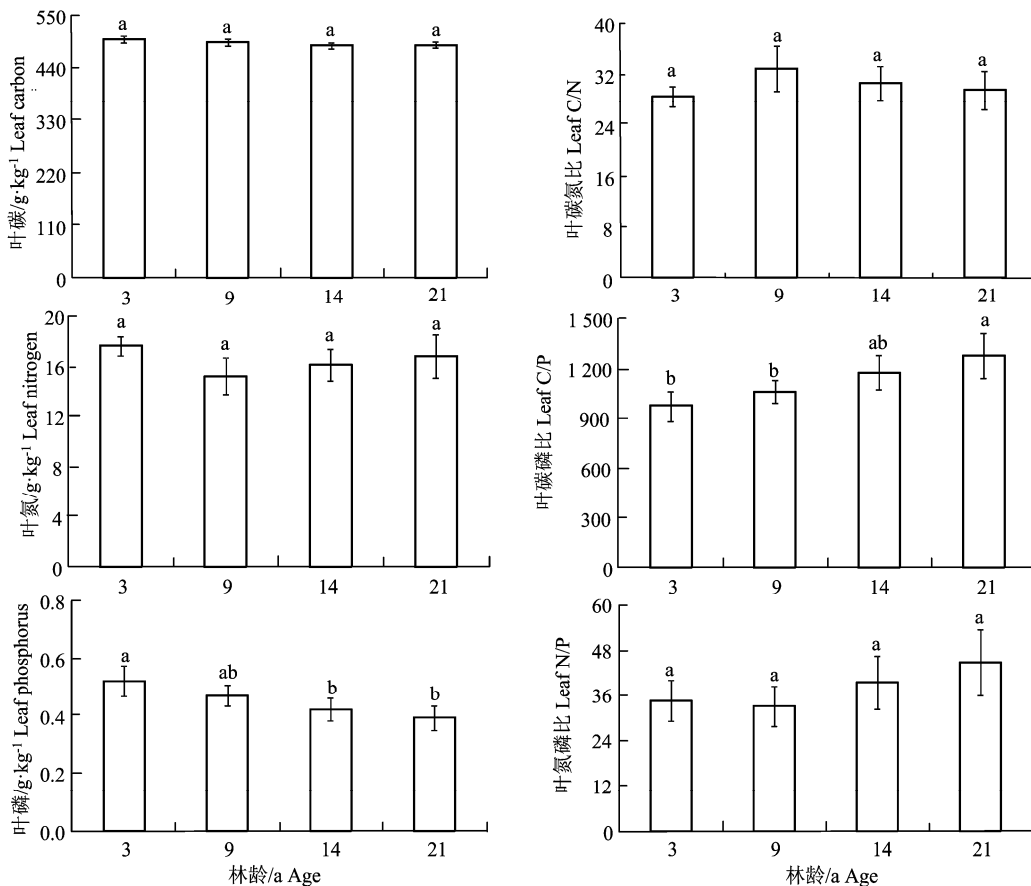
1.4 数据整理与分析

实验数据均在Excel 2003进行整理,采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)的最小显著差异(LSD)进行差异显著性检验及相关性分析,显著性水平设为0.05。

2 结果与分析

2.1 不同林龄杨梅叶片C、N、P含量及化学计量比

如图1所示,杨梅人工林叶片C、N含量介于486.0~499.0, 15.2~17.6 $g\ kg^{-1}$,不同林龄间没有显著性差异。叶片P含量随着年龄的增大而下降,其中3年的显著高于14年和21年生的($P<0.05$)。杨梅人工林叶的C:N随着林龄的增大呈现先升高再降低的趋势,不同林龄间的没有显著性差异;叶片C:P和N:P随着林龄的增加总体表现为增大,其中21年生叶片C:P显著高于3年生和9年生的($P<0.05$),叶片N:P在不同年龄间没有显著性差异,其值介于33.05~44.64。



不同小写字母代表不同林龄间的差异显著($P<0.05$)。下同

Different small letters represent significant differences at the 0.05 level. The same below

图1 不同林龄杨梅叶片C、N、P化学计量特征

Figure 1 C, N and P stoichiometric characteristics in different ages of leaves of *Myrica rubra*

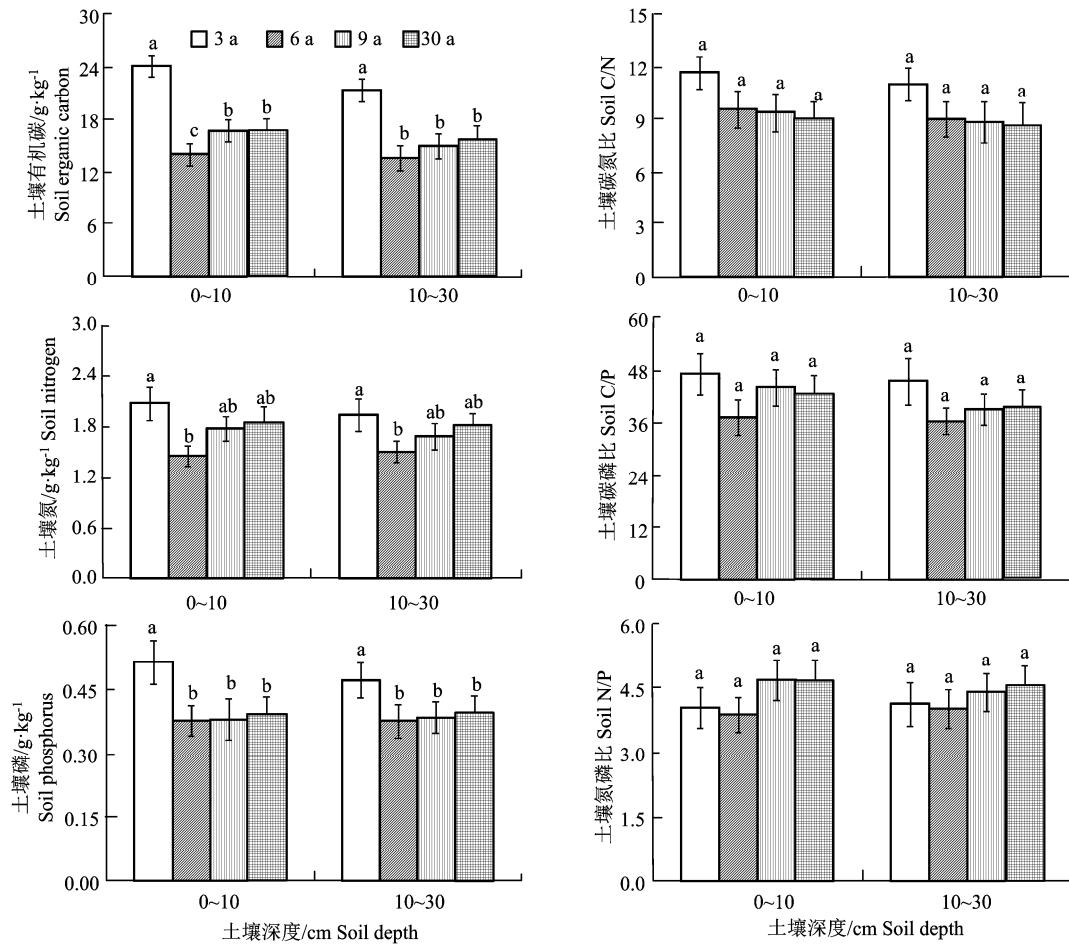


图 2 不同林龄杨梅土壤 C、N、P 化学计量特征

Figure 2 C, N and P stoichiometric characteristics in soil of different ages of *Myrica rubra*

表 3 叶片和土壤 C、N、P 及计量比的相关系数

Table 3 Relationships between leaf and soil C, N, P and mass ratios

土壤 Soil		叶片 Leaf					
		碳 Carbon	氮 Nitrogen	磷 Phosphorus	碳氮比 C/N	碳磷比 C/P	氮磷比 N/P
0~10 cm	有机碳 Carbon	0.389 6	0.335 9	0.351 3	0.519 9	0.264 2	-0.421 5
	氮 Nitrogen	0.508 0	0.582 0*	0.597 8*	0.347 2	0.503 5	0.172 5
	磷 Phosphorus	0.324 7	0.236 1	0.205 7	0.505 5	0.233 4	-0.441 8
	碳氮比 C/N	-0.407 4	-0.579 2*	-0.586 4*	-0.469 0	-0.511 3	-0.393 1
	碳磷比 C/P	-0.258 1	-0.157 3	-0.115 2	-0.565 6	-0.175 1	0.456 3
	氮磷比 N/P	-0.158 6	0.268 1	0.314 6	-0.373 7	0.219 2	0.519 9
10~30 cm	有机碳 Carbon	0.330 1	0.351 3	0.378 3	0.514 6	0.429 7	-0.357 3
	氮 Nitrogen	0.511 3	0.597 8*	0.486 3	0.384 5	0.549 9	0.263 3
	磷 Phosphorus	0.340 8	0.205 7	0.384 2	0.485 5	0.341 1	-0.454 6
	碳氮比 C/N	-0.499 8	-0.586 4*	-0.360 3	-0.310 1	-0.466 9	-0.471 9
	碳磷比 C/P	-0.268 4	-0.115 2	-0.612 1	-0.540 0	-0.366 7	0.492 3
	氮磷比 N/P	-0.168 2	0.314 6	-0.222 5	-0.332 7	-0.051 0	0.591 8*

注: “*”表示相关性达显著水平 ($P < 0.05$)。Note: * means significant difference at the 0.05 level.

2.2 不同林龄杨梅土壤 C、N、P 含量及化学计量比

从图 2 可知, 随着林龄的增长, 土壤有机碳含量先下降而后略有增加, 其中 3 年生土壤 C 含量显著高于其他年龄 ($P < 0.05$)。土壤 N、P 含量则随

着林龄的增大先降低而后升高的趋势, 3 年生土壤 N 含量显著高于 9 年生的 ($P < 0.05$), 土壤 P 含量则表现为 3 年生显著高于其他年龄段 ($P < 0.05$)。土壤 C : N、C : P、N : P 在不同年龄间没有差异

($P>0.05$)。

2.3 杨梅叶片与土壤 C、N、P 及计量比的相关分析

由表 3 可知, 杨梅人工林叶片氮含量与土层为 0~10 cm、10~30 cm 的土壤氮含量具有显著正相关 ($P<0.05$), 叶片磷含量与土层为 0~10 cm 土壤碳氮比之间则有显著性负相关关系 ($P<0.05$); 叶片氮磷比与土层为 10~30 cm 的土壤氮磷比之间有显著性正相关关系 ($P<0.05$)。

3 讨论与结论

3.1 杨梅叶片 C、N、P 含量及化学计量特征

本研究中, 杨梅叶片 C 含量在不同林龄间没有显著差异, 与 492 种陆生植物叶片平均碳含量 (464 ± 32.1) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 相似, 这也说明了叶片碳含量在不同植物间具有相对稳定性。本研究结果表明不同年龄杨梅叶片 N、P 含量平均值为 16.43 和 0.45 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 叶片 N 含量与‘东魅’杨梅^[10]和‘丁岙’杨梅^[12]相似, P 含量则低于‘丁岙’杨梅^[12], 而与‘东魅’杨梅相近^[10]; 叶片 N、P 含量与同科同属的云南杨梅灌丛相似^[14]。

随着杨梅年龄的增大, N 含量在叶中先下降而后上升, P 含量则逐渐降低 (图 1), 这与‘东魅’杨梅相似^[10]。叶片磷含量以 3 年生杨梅为最高, 显著高于 14 年和 21 年生杨梅叶片, 这主要是该时期杨梅生长速度较快, 在蛋白质合成过程中需要大量的磷素^[15]。叶片 C:P 在一定程度上反映了植物对磷素的利用效率^[16]。由图 1 可知, 随着年龄增大, 叶片 C:P 则逐渐升高, 其中以 3 年生杨梅人工林为最低, 这符合生长率假说规律, 即生长速率与体内 C:P 呈负相关^[17]。这与杉木人工林叶片 C:P 随着林龄增大而增高的研究结果相似^[18]。

植物叶片 N:P 可作为森林植物营养元素限制的判断性指标。当 $N:P < 14$ 时, 植物生长主要受 N 的限制; 当 $N:P > 16$ 时, 植物生长主要受 P 的限制^[19]。杨梅叶片 N:P 介于 33.05~44.64, 远远高于 16, 说明杨梅人工林生长受到 P 的严重限制。叶片 N:P 随着林龄的增加总体表现为增大, 说明杨梅林生长受 P 限制的情况随着林龄的增长而更加明显。综合以上, 影响杨梅生长的限制因素是 P, 因此在土壤管理过程中, 可适当增施磷肥, 从而促进杨梅植株的生长。

3.2 杨梅土壤 C、N、P 含量及化学计量特征

不同林龄杨梅人工林土壤有机碳、全氮和全磷含量均随土层深度的增加而减小, 与土层为 0~10 cm 相比, 土层为 10~30 cm 的杨梅人工林土壤有机

碳、全氮和全磷含量平均下降了 8.3%、2.8% 和 2.1%。随着林龄的增加, 土壤碳、氮、磷含量均表现为先降低而后升高的特点, 其中以 3 年生杨梅林为最高。土壤碳氮磷主要来自地上枯枝落叶和根系周转产生的碎屑, 凋落物量及外界环境共同决定了土壤有机碳氮磷的含量^[20]。而杨梅人工林是在马尾松采伐迹地上进行新造林而成的, 大量采伐剩余物仍保留在杨梅人工林中, 因此造林初期 (3 年) 土壤碳氮磷含量相对较高。这与杉木造林后 2~4 年土壤碳氮含量均为较高的研究相似^[21]。当杨梅生长进入到速生阶段后, 杨梅生长需要消耗大量的养分, 原有有机质分解大于新形成有机质的输入, 使土壤有机碳氮磷含量有所下降, 另外幼龄林实施精耕细作, 同时林分没有郁闭, 造成了一定的水土流失, 从而使 9 年生的杨梅林土壤碳氮磷含量下降到最低。当林分进入中龄林之后, 林木对养分吸收减少, 加之凋落物、植物根系分解产生的碳素进入土壤, 使得土壤碳氮磷含量又有回升的趋势, 这与不同林龄杉木人工林的土壤有机碳的变化规律一致^[9]。

土壤碳氮比可以衡量土壤氮素矿化能力, 与土壤有机碳分解速率成反比。当 $C:N > 25$ 时, 土壤有机碳的积累速率大于分解速率^[22]。本研究中土层为 0~10 cm、10~30 cm 的杨梅人工林 C:N 的变化范围分别为 9.03~11.65 和 8.70~10.99, 不同林龄杨梅人工林土壤碳氮比均低于中国和世界土壤碳氮比的平均值 (11.90 和 13.33)^[23], 表明杨梅人工林土壤受到人为的强烈干扰, 不利于土壤有机碳的积累。土壤碳磷比表示磷有效性的高低, 碳磷比越小土壤中磷的有效性越高。土壤碳磷比 < 200 时, 表示养分的净矿化, 土壤碳磷比 > 300 时, 表示养分的净固定, 而当土壤碳磷比介于 200~300 时, 表示土壤中可溶性磷浓度变化不大^[22]。本研究中土层为 0~10 cm、10~30 cm 的杨梅人工林 C:P 的变化范围分别为 37.18~47.07 和 36.29~45.36, 说明杨梅人工林土壤磷的有效性较高, 表现为磷的净矿化。杨梅人工林土壤碳磷均低于中国的平均水平 (136)^[24], 也远低于全世界的平均值 (186)^[25]。土壤氮磷比可以作为氮饱和的诊断指标^[20]。本研究中土层为 0~10 cm、10~30 cm 的杨梅人工林 N:P 的变化范围分别为 3.88~4.06 和 4.03~4.57, 均低于中国土壤氮磷比的平均值 (8.2)^[26]。随着林龄的增长, 各土层土壤氮磷比呈增加趋势, 说明土壤可利用性 P 素下降, 这主要是由于大气氮沉降导致土壤 N 含量增加和经营过程中偏施氮钾肥。

参考文献:

- [1] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. *J Appl Ecol*, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [2] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 2-6.
- [3] ASHTON I W, HYATT L A, HOWE K M, et al. Invasive species accelerate decomposition and litter nitrogen loss in a mixed deciduous forest[J]. *Ecol Appl*, 2005, 15(4): 1263-1272.
- [4] 于海玲, 李愈哲, 樊江文, 等. 中国草地样带不同功能群植物叶片氮磷含量随水热因子的变化规律[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(11): 2867-2874.
- [5] 顾鸿昊, 翁俊, 孔佳杰, 等. 粗放和集约经营毛竹林叶片的生态化学计量特征[J]. *浙江农林大学学报*, 2015, 32(5): 661-667.
- [6] 卢宏典, 靳冰洁, 钟全林, 等. 中国南方 5 个地区木本植物根及叶片 N、P 生态化学计量学特征[J]. *安徽农业大学学报*, 2016, 43(3): 481-488.
- [7] SARDANS J, PEÑUELAS J. Trees increase their P: N ratio with size[J]. *Global Ecol Biogeogr*, 2015, 24(2): 147-156.
- [8] 陈婵, 王光军, 赵月, 等. 会同杉木器官间 C、N、P 化学计量比的季节动态与异速生长关系[J]. *生态学报*, 2016, 36(23): 7614-7623.
- [9] 曹娟, 闫文德, 项文化, 等. 湖南会同 3 个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. *林业科学*, 2015, 51(7): 1-8.
- [10] 张跃建. 东魁杨梅对主要矿质养分的年间吸收量[J]. *浙江农业学报*, 1999, 11(4): 208-211.
- [11] 周林军, 曾明, 王秀琪, 等. 我国杨梅矿质营养特性研究进展[J]. *中国南方果树*, 2013, 42(2): 35-38, 43.
- [12] 郭秀珠, 陈巍, 梁森苗, 等. ‘丁岙’杨梅生长期矿质元素含量变化研究[J]. *福建农业学报*, 2015, 30(8): 762-767.
- [13] 梁森苗, 郭秀珠, 郑锡良, 等. 杨梅结果树各器官的矿质营养特性[J]. *浙江农业学报*, 2017, 29(10): 1669-1677.
- [14] 苏凯文, 陈路红, 郑伟, 等. 云南杨梅碳、氮、磷化学计量特征[J]. *植物生态学报*, 2017, 41(1): 136-146.
- [15] 姜沛沛, 曹扬, 陈云明, 等. 不同林龄油松(*Pinus tabulaeformis*)人工林植物、凋落物与土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. *生态学报*, 2016, 36(19): 6188-6197.
- [16] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 等. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. *生态学报*, 2010, 30(23): 6581-6590.
- [17] MAKINO W, COTNER J B, STERNER R W, et al. Are bacteria more like plants or animals? Growth rate and resource dependence of bacterial C: N: P stoichiometry[J]. *Funct Ecol*, 2003, 17(1): 121-130.
- [18] 李明军, 喻理飞, 杜明凤, 等. 不同林龄杉木人工林植物-凋落叶-土壤 C、N、P 化学计量特征及互作关系[J]. *生态学报*, 2018, 38(21): 7772-7781.
- [19] 皮发剑, 袁丛军, 喻理飞, 等. 黔中天然次生林主要优势树种叶片生态化学计量特征[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(5): 801-807.
- [20] RAICH J W, TUFEKCI OGUL A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 71-90.
- [21] 胡振宏, 何宗明, 范少辉, 等. 采伐剩余物管理措施对二代杉木人工林土壤全碳、全氮含量的长期效应[J]. *生态学报*, 2013, 33(13): 4205-4213.
- [22] DON A, SCHUMACHER J, SCHERER-LORENZEN M, et al. Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites: Implications for measuring soil carbon stocks[J]. *Geoderma*, 2007, 141(3/4): 272-282.
- [23] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的化学生态化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [24] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/2/3): 139-151.
- [25] CLEVELAND C C, LIPTZIN D. C: N: P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass?[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235-252.
- [26] 王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 等. 河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2011, 31(23): 7119-7124.