

滨海沙地人工林树种水分利用效率和叶片养分浓度比较及其关系分析

葛露露¹, 林 宇², 孟庆权¹, 何宗明^{1*}

(1 福建农林大学 林学院, 福州 350002; 2 福建省长乐大鹤国有防护林场, 福建长乐 350212)

摘 要:以福建省福州市滨海后沿沙地人工营造的湿地松、木麻黄、尾巨桉、肯氏相思和纹荚相思人工林为研究对象,运用稳定碳同位素法测定植物水分利用效率,探索叶片氮、磷养分状况与水分利用效率之间的差异及相互关系。结果表明:(1)湿地松和肯氏相思的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 均与尾巨桉差异显著($P < 0.05$),但湿地松、木麻黄、肯氏相思、纹荚相思之间的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 均无显著差异;肯氏相思、纹荚相思的叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 均显著高于湿地松、木麻黄和尾巨桉。(2)不同树种水分利用效率大小依次为:湿地松>肯氏相思>木麻黄>纹荚相思>尾巨桉,且湿地松叶片的 WUE 显著高于尾巨桉 36.87%,而与其他树种的水分利用效率均无显著差异。(3)各树种叶片氮浓度大小依次为:肯氏相思>纹荚相思>尾巨桉>木麻黄>湿地松,但仅肯氏相思和纹荚相思与湿地松之间差异达到显著水平;各树种叶片磷浓度大小依次为:尾巨桉>肯氏相思>纹荚相思>湿地松>木麻黄,其中尾巨桉与湿地松、木麻黄、纹荚相思之间差异显著;木麻黄和纹荚相思人工林叶片的 N/P 显著高于尾巨桉人工林,其余树种之间的叶片 N/P 均无显著差异。(4)叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与叶片 N 浓度呈显著二次曲线相关关系,叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 与叶片 N 浓度呈极显著线性正相关关系($P < 0.01$)。研究发现,滨海沙地不同树种人工林间水分利用效率、叶片氮浓度、磷浓度、N/P 均存在显著差异,水分利用效率与叶片氮浓度、磷浓度均呈显著负相关关系,氮、磷含量是影响滨海沙地沿海防护林树种水分利用效率的重要因子。

关键词:滨海沙地;人工林;稳定碳同位素;水分利用效率;养分状况

中图分类号: Q948.112⁺.3

文献标志码: A

Comparison and Relationship Analysis of Water Use Efficiency and Foliar Nutrient Concentrations in Different Tree Species of Southeast Coastal Area

GE Lulu¹, LIN Yu², MENG Qingquan¹, HE Zongming^{1*}

(1 College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2 Changle Dahe State-owned Protection Forest Farm of Fujian Province, Changle, Fujian 350212, China)

Abstract: We studied *Pinus elliottii*, *Casuarina equisetifolia*, *Eucalyptus urophylla* $\times$ *E. grandis*, *Acacia cunninghamia* and *A. aulacocarpa* plantations in the coastal sandy land of Fuzhou City, measured their water use efficiency by stable carbon isotope method, and explored water use efficiency (WUE), nitrogen (N) and phosphorus (P) status of foliar as well as their relationships. The results showed that: (1) There were significant differences in foliar $\delta^{13}\text{C}$ between *P. elliottii* and *E. urophylla* $\times$ *E. grandis*, *A. cunninghamia* and

收稿日期: 2018-03-19; 修改稿收到日期: 2018-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(31570604, 41371269); 福建省林业科技项目(闽林科[2014]2号); 福建农林大学部级创新平台

作者简介: 葛露露(1992—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事恢复生态与生态工程研究。E-mail: 1293447419@qq.com

* 通信作者: 何宗明, 研究员, 硕士生导师, 主要从事水土保持与森林培育研究。E-mail: hezm2@126.com

E. urophylla $\times$ *E. grandis* ($P < 0.05$). However, there was no significant difference in foliar $\delta^{13}\text{C}$ among *P. elliotii*, *C. equisetifolia*, *A. cunninghamia* and *A. aulacocarpa*. The foliar $\delta^{15}\text{N}$ of *A. cunninghamia* and *A. aulacocarpa* were significantly higher than those of *P. elliotii*, *C. equisetifolia* and *E. urophylla* $\times$ *E. grandis*. (2) *WUE* varied with different tree species in the order of *P. elliotii* $>$ *A. cunninghamia* $>$ *C. equisetifolia* $>$ *A. aulacocarpa* $>$ *E. urophylla* $\times$ *E. grandis*. The *WUE* of foliar of *P. elliotii* was significantly higher than that of *E. urophylla* $\times$ *E. grandis* 36.87%, but there was no significant difference in water use efficiency between *P. elliotii* and other species. (3) The foliar N concentration of each species in turn was *A. cunninghamia* $>$ *A. aulacocarpa* $>$ *E. urophylla* $\times$ *E. grandis* $>$ *C. equisetifolia* $>$ *P. elliotii*. There was a significant difference between *A. cunninghamia* and *P. elliotii*, *A. aulacocarpa* and *P. elliotii*. The foliar P concentration of each species in turn was *E. urophylla* $\times$ *E. grandis* $>$ *A. cunninghamia* $>$ *A. aulacocarpa* $>$ *P. elliotii* $>$ *C. equisetifolia*. There was a significant difference between *E. urophylla* $\times$ *E. grandis* and *P. elliotii*, *E. urophylla* $\times$ *E. grandis* and *C. equisetifolia*, *E. urophylla* $\times$ *E. grandis* and *A. aulacocarpa*. The foliar N/P of *C. equisetifolia* and *A. aulacocarpa* was significantly higher than that of *E. urophylla* $\times$ *E. grandis*. There was no significant difference in foliar N/P among the other tree species. (4) The foliar $\delta^{13}\text{C}$ showed a significant second-degree parabola correlation with the foliar N concentration. The foliar $\delta^{15}\text{N}$ was extremely significantly positively correlated with the foliar N concentration ($P < 0.01$). The study found that there was a significant difference among *WUE*, foliar N concentration, foliar P concentration, and N/P. In addition, *WUE* had significantly negative correlation with foliar N concentration and foliar P concentration. The foliar N and foliar P concentration would be key factors affecting *WUE* in coastal shelterbelt tree species in coastal sandy land.

Key words: southeast coastal area; plantation; stable carbon isotopes; water use efficiency; nutrient status

近年来,随着全球气温上升,降水量及其空间格局发生着显著变化,亚热带地区似有变干旱的趋势^[1]。作为东南沿海重要防护林区域的滨海沙地,土壤保肥保水能力差,氮磷养分匮乏,季节性干旱已成为限制该地区林木生长的关键因子之一。为了应对这种干旱胁迫,植物将形成一系列生理适应机制,其中一个重要的方面就是叶片通过气孔调节进行气体交换过程的适应。叶片一方面通过光合作用吸收并同化 CO_2 ,另一方面通过蒸腾作用散失水蒸气^[2]。植物能否适应生活区严峻的水情条件,主要取决于它们能否很好地协调碳同化与水分耗散之间的关系^[3],也就是水分利用效率(*WUE*)。植物的 *WUE* 对于揭示大气-叶片在碳水循环过程中的相互作用及其与环境因子的响应机制具有极其重要的意义^[4]。目前,国内外对植物 *WUE* 的研究较多涉及叶片尺度的 *WUE*。在叶片尺度上,通常利用便携红外气体分析仪测定植物叶片的光合速率和气孔导度,但由于所测值是植物叶片在当时测定条件下的瞬时值,用这些值解释植物长期的生理变化是很困难的^[5],因此,这种方法只适用于短时间和瞬时植物水分利用效率研究。对于长期水分利用效率的研究,稳定碳同位素法是目前的最佳方法^[6]。由于植物叶片稳定碳同位素丰度值($\delta^{13}\text{C}$)不仅能反映大气 CO_2 的碳同位素比值,而且和胞间 CO_2 浓度(C_i)与

大气 CO_2 浓度(C_a)比值(C_i/C_a)呈负相关^[7],正是由于植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与 C_i/C_a 的这种线性关系^[8],叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 可作为评估植物 *WUE* 的间接指示值,而且用这种方法测定时取样少,结果更准确,还能较好地反映植物的水分状况,并在诸多研究中已被证明有效,尤其是对于生长在干旱环境的植物^[9]。目前,关于植物 *WUE* 已有大量的研究,但生态系统中碳-水循环与养分循环过程的关系仍不清楚。

影响植物 *WUE* 的因素很多,包括空气湿度、养分状况和大气 CO_2 浓度等^[10-14]。植物的养分状况可以反映生态系统中养分循环与碳-水循环之间的关系。氮(N)和磷(P)是细胞中许多结构和功能组分的重要组成部分,是陆地生态系统生产力的重要限制因子,是化学计量特征的重要指标,是生物体内含量仅次于 C、H、O 的大量元素^[15-16]。植物中全氮与全磷之比(N/P)是一个评价植物生长是否受到氮、磷限制的指标,可判断环境对植物生长的养分供应状况^[17]。植物的养分状况主要通过作用于光合速率或气孔导度来影响 *WUE*。目前国外关于这方面的研究较多^[18-22],国内的研究还较少^[2,12,23-24],且针对沿海防护林树种水分利用效率与叶片养分浓度之间关系的研究尚处于空缺。

不同树种水分与养分的运转状况有所差异,因此研究一个地区人工林生态系统的水分利用效率与

养分浓度之间的关系应选取该地区主要且具有代表性的树种。本研究通过测定滨海沙地 5 种主要人工防护林树种(湿地松、木麻黄、尾巨桉、肯氏相思和纹荚相思)叶片稳定碳同位素丰度值($\delta^{13}\text{C}$),计算各人工林水分利用效率,揭示叶片氮、磷养分状况与水分利用效率之间的差异及相互关系,以期对科学选择沿海沙地造林树种、改善滨海沙地的林分结构、制定适宜的防护林营造技术措施提供一定的理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省长乐大鹤国有防护林场($119^{\circ}40'43''\text{E}$, $25^{\circ}57'59''\text{N}$),属于沿海防护基干林区域。林场经营面积 345.9 hm^2 ,属南亚热带海洋性季风气候,年日照时数 $2\,000\sim 2\,300\text{ h}$,年均无霜期 326 d ,年平均气温 $19.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均空气相对湿度 80% ,全年温和多雨,平均降水量 $1\,382\text{ mm}$,全年盛行东北风,长达 250 d 左右,台风多发生在每年的 7~8 月之间,平均 4~6 次。研究区平均海拔 10 m ,属低山丘陵区,土壤为 $6\sim 10\text{ m}$ 厚的滨海风积沙土,保水性和肥力都很差,天然植被稀少,林下常见零星植物有马樱丹(*Lantana camara*)、硕苞蔷薇(*Rosa bracteata*)、茅莓(*Rubus parvifolius*)等。

1.2 研究材料

以 2003 年春营造的湿地松(*Pinus elliottii*)、木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)、尾巨桉(*Eucalyptus urophylla* $\times$ *E. grandis*)、肯氏相思(*Acacia cunninghamia*)和纹荚相思(*A. aulacocarpa*)人工林为研究对象。各人工林采用完全随机区组设计设置 4 个重复(小区),每个小区面积 400 m^2 ($20\text{ m}\times 20\text{ m}$),小区的 4 个角均打下水泥桩,并作标记。每个小区选取 4 棵标准木。湿地松、木麻黄、尾巨桉、肯氏相思和纹荚相思平均树高分别为 12.54 、 12.71 、 19.14 、 8.03 和 10.96 m ,平均胸径分别为 16.11 、 11.83 、 14.52 、 8.36 和 11.07 cm 。

1.3 土壤样品的采集和基本指标的测定

在每个小区完全随机地设置 3 个 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 的小样方,在小样方内沿对角线设置 3 个取土点,去除周围地表凋落物后用直径 2.5 cm 的土钻取 $0\sim 10\text{ cm}$ 土层土样,去除杂质混合均匀后自然风干,过 100 目筛。采用全自动碳氮分析仪(Elemental Analyzer Vario ELIII,德国)测定土壤样品的碳、氮浓度($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)。采用同位素质谱仪(Thermo Scientific MAT 253,美国)测定稳定氮同位素丰度值

($\delta^{15}\text{N},\text{‰}$)

1.4 叶片样品的采集和指标测定

1.4.1 样品的采集 2014 年春,在每棵湿地松、木麻黄、尾巨桉、肯氏相思和纹荚相思标准木树冠中部选取朝南方向的活枝采集成熟叶片样品。同一小区的 4 棵标准木上采集的叶片样品进行混合,于 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 干燥箱中高温杀青 15 min 后转入 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温箱烘干至恒重,粉碎后过 100 目筛。

1.4.2 叶片氮磷浓度和稳定碳、氮同位素丰度值($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$)测定 采用全自动碳氮分析仪(Elemental Analyzer Vario ELIII,德国)测定各人工林叶片样品的氮浓度($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)。采用浓硫酸-高氯酸消煮法制取待测液,钼锑抗比色法测定叶片磷浓度($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)。采用同位素质谱仪(Thermo Scientific MAT 253,美国)测定稳定碳、氮同位素丰度值($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N},\text{‰}$),国际标准计算公式如下:

$$\delta(\text{‰}) = [(R_{\text{sam}} - R_{\text{sta}}) / R_{\text{sta}}] \times 1\,000 \quad (1)$$

式中, R 为 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, R_{sam} 为样品的同位素相对丰度; R_{sta} 为国际标准物质同位素相对丰度,其中: C 同位素相对丰度标准物质为美国南卡罗来纳州白垩纪皮狄组层位中的拟箭石化石(Pee Dee Belemnite, PDB),其 $R_{\text{PDB}} = 0.011\,237\,2$ 。

1.4.3 水分利用效率的计算 根据 Farquhar 等^[25]方法计算水分利用效率(WUE)

$$\delta^{13}\text{C}_p = \delta^{13}\text{C}_a - a - (b - a) C_i / C_a \quad (2)$$

式中, C_i 为植物组织细胞内 CO_2 浓度; C_a 为大气 CO_2 浓度(约为 0.038%); a 为扩散作用所产生的稳定碳同位素分馏值(约为 4.4%); b 为羧化反应所产生的稳定碳同位素分馏值(约为 27%); $\delta^{13}\text{C}_p$ 为叶片样品碳同位素丰度(‰); $\delta^{13}\text{C}_a$ 为大气中稳定碳同位素丰度(‰),根据 Feng^[26]计算

$$\delta^{13}\text{C}_a = -6.429 - 0.006\exp[0.021\,7(t - 1\,740)] \quad (3)$$

式中, t 为样品取样时的公元年份。因本研究取样年份为 2014 年,即 $t = 2014$,代入上式,计算得出: $\delta^{13}\text{C}_a = -8.721\,869\,7$ 。

WUE 为光合速率与气孔对水的导度的比值,计算公式^[27]如下:

$$\text{WUE} = (C_a - C_i) / 1.6 \quad (4)$$

最后,将以上公式进行整理后,得出:

$$\text{WUE} = C_a / 1.6 \times (\delta^{13}\text{C}_p - \delta^{13}\text{C}_a + b) / (b - a) \quad (5)$$

1.5 数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS17.0 软件对数据进行

统计分析,并制图。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)法进行方差分析($\alpha=0.05$)。表中数据为平均值±标准误。

2 结果与分析

2.1 不同树种立地土壤碳氮含量与稳定氮同位素丰度值比较

从表1可知,滨海沙地5种主要人工防护林树种立地土壤C、N含量变化范围分别为3.406~4.415 mg·g⁻¹、0.327~0.462 mg·g⁻¹,并以木麻黄立地土壤的C、N含量均最高,但土壤C含量在树种间无显著差异,土壤N含量也只在湿地松与木麻黄之间存在显著差异($P<0.05$)。不同树种立地土壤的C:N不存在显著性差异。同时,不同树种土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 变化范围为-4.675‰~-2.975‰,并表现为纹荚相思>肯氏相思>木麻黄>尾巨桉>湿地松;不同树种土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 的差异主要表现在湿地松、尾巨桉和其他3个树种之间,湿地松、尾巨桉显著低于其余3个树种。

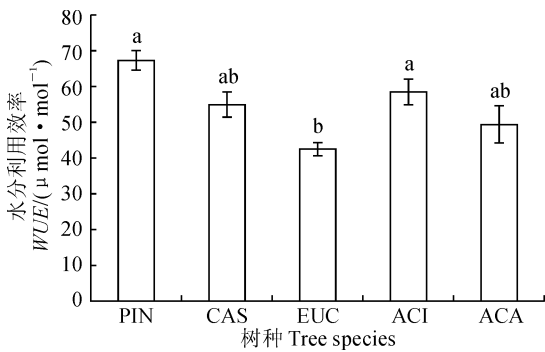
2.2 不同树种叶片稳定碳、氮同位素丰度值的差异

滨海沙地5种主要人工防护林树种叶片稳定碳同位素丰度值($\delta^{13}\text{C}$)变化范围为-31.682‰~-29.323‰,并表现为湿地松>肯氏相思>木麻黄>纹荚相思>尾巨桉(表2)。其中,湿地松和肯氏相思叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与尾巨桉均有显著差异,但湿地松与

肯氏相思间,以及木麻黄、纹荚相思与尾巨桉间叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 均无显著差异。同时,5种主要人工防护林树种叶片稳定氮同位素丰度值($\delta^{15}\text{N}$)变化范围为-5.548‰~-2.167‰,并表现为肯氏相思>纹荚相思>木麻黄>湿地松>尾巨桉。其中,湿地松、木麻黄、尾巨桉之间以及肯氏相思与纹荚相思之间叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 均无显著差异。

2.3 不同树种水分利用效率的差异

图1显示,5个人工林树种水分利用效率(WUE)表现为湿地松(67.250 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)>肯氏



PIN. 湿地松;CAS. 木麻黄;EUC. 尾巨桉;ACI. 肯氏相思;
ACA. 纹荚相思;下同

图1 不同树种的水分利用效率

PIN. *Pinus elliottii*;CAS. *Casuarina equisetifolia*;
EUC. *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*;ACI. *Acacia cunninghamia*;ACA. *A. aulacocarpa*;The same as below

Fig.1 Water use efficiency of different tree species

表1 不同树种土壤碳氮含量与稳定氮同位素丰度值

Table 1 Soil carbon and nitrogen contents and $\delta^{15}\text{N}$ of different tree species

树种 Tree species	C 含量 C content/(mg·g ⁻¹)	N 含量 N content/(mg·g ⁻¹)	C/N 比值 C:N	稳定氮同位素丰度 $\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$
湿地松 <i>P. elliottii</i>	3.652±0.703a	0.327±0.020b	10.984±1.465a	-4.675±0.359b
木麻黄 <i>C. equisetifolia</i>	4.415±0.385a	0.462±0.015a	9.509±0.525a	-3.277±0.124a
尾巨桉 <i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	3.650±0.426a	0.358±0.048ab	10.411±1.187a	-4.323±0.247b
肯氏相思 <i>A. cunninghamia</i>	3.406±0.190a	0.380±0.029ab	9.035±0.470a	-3.125±0.212a
纹荚相思 <i>A. aulacocarpa</i>	4.132±0.444a	0.397±0.040ab	10.627±1.347a	-2.975±0.151a

注:同一列数值后面不同字母表示树种间在0.05水平存在显著性差异($P<0.05$)
Note: Within the same column followed by the different letters are significant difference at 0.05 level ($P<0.05$)

表2 不同树种叶片稳定碳、氮同位素丰度值

Table 2 Leaf $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of different tree species

稳定碳、氮同位素 Stable C,N isotope	湿地松 <i>P. elliottii</i>	木麻黄 <i>C. equisetifolia</i>	尾巨桉 <i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	肯氏相思 <i>A. cunninghamia</i>	纹荚相思 <i>A. aulacocarpa</i>
$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	-29.323±0.259a	-30.497±0.331ab	-31.682±0.178b	-30.160±0.340a	-31.028±0.496ab
$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	-4.752±0.113b	-3.864±0.282b	-5.548±0.530b	-2.167±0.342a	-2.182±0.311a

注:同一行数值后面不同字母表示树种间在0.05水平存在显著性差异($P<0.05$)
Note: Within the same line followed by the different letters are significant difference at 0.05 level ($P<0.05$)

相思 ($58.448\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) > 木麻黄 ($54.906\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) > 纹荚相思 ($49.328\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) > 尾巨桉 ($42.452\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)。其中,湿地松叶片的 WUE 显著高于尾巨桉 36.87%,而与其他树种的水分利用效率均无显著差异,木麻黄和纹荚相思叶片的 WUE 也与尾巨桉无显著差异。

2.4 不同树种叶片氮、磷养分状况的差异

从图 2 可知,5 个人工林树种叶片氮浓度表现为肯氏相思 ($17.23\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) > 纹荚相思 ($16.26\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) > 尾巨桉 ($15.09\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) > 木麻黄 ($13.85\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) > 湿地松 ($11\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$),但仅肯氏相思和纹荚相思与湿地松之间差异达到显著水平,其余各树种间均无显著差异;各树种叶片磷浓度表现为尾巨桉 ($0.87\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) > 肯氏相思 ($0.61\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) > 纹荚相思 ($0.51\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) > 湿地松 ($0.5\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) > 木麻黄 ($0.44\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$),但仅尾巨桉与湿地松、木麻黄、纹荚相思之间存在显著性差

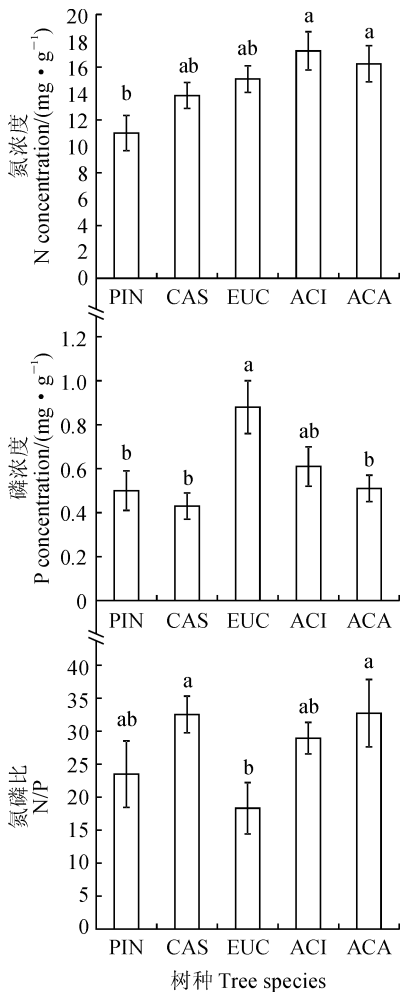


图 2 不同树种之间叶片氮浓度、磷浓度、氮磷比的差异
Fig. 2 Differences of concentrations of N and P as well as N/P in the leaves among different tree species

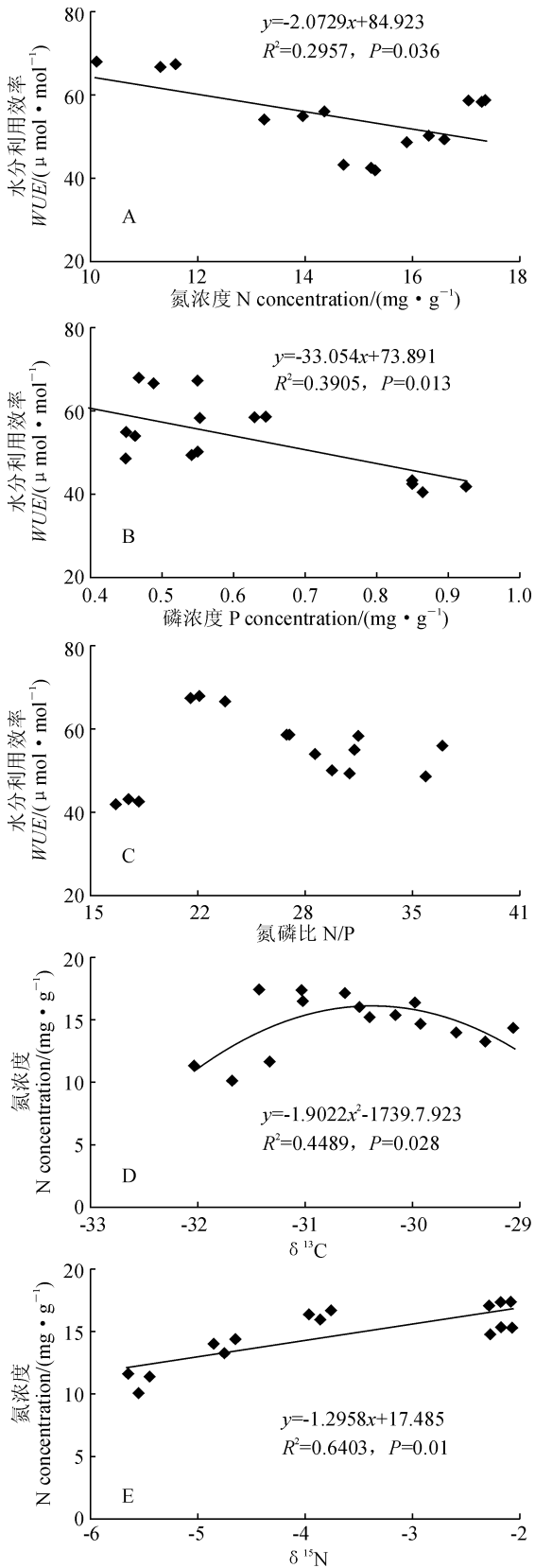


图 3 人工林树种叶片 WUE 、氮浓度、磷浓度、N/P 和 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 之间的关系
Fig. 3 Relationship between WUE , nitrogen concentration, phosphorus concentration, N/P and foliar $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ of different tree species

异,其余树种相互之间无显著性差异。另外,5个人工林树种叶片氮磷比变化范围为17.26~31.97,表现为木麻黄(31.97)>纹荚相思(31.88)>肯氏相思(28.39)>湿地松(21.94)>尾巨桉(17.26),其中木麻黄和纹荚相思人工林叶片N/P显著高于尾巨桉人工林,其余树种之间均无显著差异(图2)。

2.5 不同人工林树种叶片WUE、NP浓度及 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{15}\text{N}$ 之间的关系

图3显示,不同人工林树种叶片WUE与其叶片氮浓度、磷浓度均呈显著线性负相关($P<0.05$),而与叶片N/P相关性不显著;同时,叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与叶片N浓度呈显著的二次曲线的非线性相关($P<0.05$),叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 与叶片N浓度二者呈极显著线性正相关($P<0.01$)。

3 讨 论

3.1 不同人工林树种水分利用效率和养分差异及其关系

本研究中,滨海沙地不同树种水分利用效率存在显著差异,水分利用效率除受光合速率和气孔导度的影响外,还受林分类型的影响。5种防护林树种中水分利用效率最低的是尾巨桉,这是因为尾巨桉树高最高,输水路径长使得其运输水分的能力下降,水分运输进入树木时会受到土壤-根-冠-叶片通道的水力传导系数的限制,这时气孔会产生一定的适应行为来维持叶片内外最小水势的平衡,从而防止水分流失。因此,其气孔导度有所降低,蒸腾速率降低,水分消耗减少,而当叶片的气孔导度降低时,其对 CO_2 的扩散限制使叶片的光合速率也随之降低,从而导致尾巨桉水分利用效率较低。

氮和磷作为细胞结构和功能组分的重要组成部分,在一定程度上限制着陆地生态系统的生产力^[18-19]。叶片中的氮、磷养分浓度能够反映土壤养分的可利用性,且随着土壤发育及工业化程度的加深,氮沉降加剧,土壤和植物的N/P也随之增加,进而导致磷成为一种限制性元素^[28]。Garrish等^[20]认为植物水分利用效率的差异是由氮素可利用性的变化引起的,与磷的可利用性相关性不显著,与叶片N/P的相关性则与N/P的值有关。展小云等^[29]也认为植物叶片的水分利用效率与氮素利用效率显著负相关,而Huang等^[12]、孔令仑等^[23]则都认为植物

水分利用效率与叶片磷浓度呈显著正相关,与叶片氮浓度相关性不显著,与叶片N/P呈显著负相关。本研究中,不同树种之间叶片氮浓度、磷浓度、N/P均达到显著差异水平。水分利用效率与叶片氮浓度、磷浓度均呈显著负相关,而与叶片N/P相关性不显著。可能原因是滨海沙地氮磷养分匮乏,在此背景下,沿海防护林树种氮、磷浓度成为影响水分利用效率的重要因子。这说明滨海沙地沿海防护林的养分状况,特别是不同养分对防护林的限制状况对水分利用效率的影响具有重大意义,仅氮的养分状况变化不足以对水分利用效率有显著影响,随着氮沉降的加剧,磷的作用越来越显著,且氮、磷两种养分共同作用并影响滨海沙地沿海防护林的水分利用效率。

3.2 不同树种人工林叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 与叶片N浓度的关系

Hamerlynck等^[30]认为叶片的氮含量与羧化效率和光合能力之间呈正相关,因此叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与叶片氮含量呈正相关关系,而林晗等^[24]通过研究得出不同千年桐种源叶氮含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 之间呈二次曲线相关关系的结论。本研究中,叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与叶片氮浓度也呈显著的二次曲线的非线性相关,与林晗等研究结果一致。

Vitousek等^[31]、Jung等^[32]和郑璐嘉等^[33]认为叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 与叶片氮含量之间具有显著的相关性。本研究结果与其结果一致。Hobbie等^[34]认为,叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 与叶片氮含量之间的相关关系反映了菌根对叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 的影响,笔者认为若本研究中叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 的差异主要来自菌根的影响,则可能是源于不同树种沿海防护林的菌根吸收氮数量上的差异,即源于不同树种沿海防护林菌根生物量的差异,这还需开展进一步的研究来验证。

综上所述,本研究通过对滨海沙地不同树种人工林水分利用效率的分析表明,不同树种人工林水分利用效率差异显著,不同树种之间叶片氮浓度、磷浓度、N/P均达到显著差异水平。水分利用效率与叶片氮浓度、磷浓度均呈显著负相关,而与叶片N/P相关性不显著。从氮磷养分状况看,在近年来亚热带地区氮沉降加剧的背景下,磷限制的问题更加凸显,氮、磷共同作用成为滨海沙地人工防护林水分利用效率变化的重要影响因子。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 孔令仑, 林捷, 黄志群, 等. 武夷山不同海拔植物水分利用效率的变化及其与养分变化的关系[J]. 应用生态学报, 2017, **28**(7): 2 102-2 110.
KONG L L, LIN J, HUANG Z Q, *et al.* Variations of water use efficiency and its relationship with leaf nutrients of different altitudes of Wuyi Mountains, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(7): 2 102-2 110.
- [3] 曹生奎, 冯起, 司建华, 等. 植物水分利用效率研究方法综述[J]. 中国沙漠, 2009, **29**(5): 853-858.
CAO S K, FENG Q, SI J H, *et al.* Summary on research methods of water use efficiency in plant[J]. *Journal of Desert Research*, 2009, **29**(5): 853-858.
- [4] 李机密, 黄儒珠, 王健, 等. 陆生植物水分利用效率[J]. 生态学杂志, 2009, **28**(8): 1 655-1 663.
LI J M, HUANG R Z, WANG J, *et al.* Water use efficiency of terrestrial plants: a review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, **28**(8): 1 655-1 663.
- [5] MARTIN B, THORSTENSON Y R. Stable carbon isotope composition($\delta^{13}\text{C}$), water use efficiency, and biomass productivity of *Lycopersicon esculentum*, *Lycopersicon pennellii*, and the F1Hybrid[J]. *Plant Physiology*, 1988, **88**(1): 213.
- [6] 王庆伟, 于大炮, 代力民, 等. 全球气候变化下植物水分利用效率研究进展[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(12): 3 255-3 265.
WANG Q W, YU D P, DAI L M, *et al.* Research progress in water use efficiency of plants under global climate change[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(12): 3 255-3 265.
- [7] 陈世苹, 白永飞, 韩兴国. 稳定性碳同位素技术在生态学研究中的应用[J]. 植物生态学报, 2002, **26**(5): 549-560.
CHEN S P, BAI Y F, HAN X G. Applications of stable carbon isotope techniques to ecological research[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, **26**(5): 549-560.
- [8] FARQUHAR G D, RICHARDS R A. Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes[J]. *Functional Plant Biology*, 1984, **11**(6): 539-552.
- [9] WILLIAMS D G, EHLENGER J R. Carbon isotope discrimination and water relations of oak hybrid populations in southwestern Utah[J]. *Western North American Naturalist*, 2000, **60**(2): 121-129.
- [10] CEMUSAK L A, WINTER K, TUMER B L. Leaf nitrogen to phosphorus ratios of tropical trees: experimental assessment of physiological and environmental controls[J]. *New Phytologist*, 2010, **185**: 770-779.
- [11] CRAVEN D, HALL J, ASHTON M, *et al.* Water-use efficiency and whole-plant performance of nine tropical tree species at two sites with contrasting water availability in Panama[J]. *Trees*, 2013, **27**: 639-653.
- [12] HUANG Z Q, LIU B, DAVIS M, *et al.* Long-term nitrogen deposition linked to reduced water use efficiency in forests with low phosphorus availability[J]. *New Phytologist*, 2015, **210**: 431-442.
- [13] WU G, LIU X, CHEN T, *et al.* Elevation-dependent variations of tree growth and intrinsic water-use efficiency in Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) in the western Tianshan Mountains, China[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, **6**: 309.
- [14] YAN W, ZHONG Y, ZHENG S, *et al.* Linking plant leaf nutrients/stoichiometry to water use efficiency on the Loess Plateau in China[J]. *Ecological Engineering*, 2016, **87**: 124-131.
- [15] STERNER R W, ELSER J J. Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere[M]. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2002.
- [16] 任书杰, 于贵瑞, 姜春明, 等. 中国东部南北样带森林生态系统 102 个优势种叶片碳氮磷化学计量学统计特征[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(3): 581-586.
REN S J, YU G R, JIANG C M, *et al.* Stoichiometric characteristics of leaf carbon, nitrogen, and phosphorus of 102 dominant species in forest ecosystems along the North-South Transect of East China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(3): 581-586.
- [17] VENTERINK H O, WASSEN M J, VERKROOST A W M, *et al.* Speciesrichness-productivity patterns differ between N-, P-, and K-limited wetlands[J]. *Ecology*, 2003, **84**(8): 2 191-2 199.
- [18] JACOB J, LAWLOR D. Stomatal and mesophyll limitations of photosynthesis in phosphate deficient sunflower, maize and wheat plants[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1991, **42**: 1 003-1 011.
- [19] LI C, WU C, DUAN B, *et al.* Age-related nutrient content and carbon isotope composition in the leaves and branches of *Quercus aquifolioides* along an altitudinal gradient[J]. *Trees*, 2009, **23**: 1 109-1 121.
- [20] GARRISH V, CERNUSAK L A, WINTER K, *et al.* Nitrogen to phosphorus ratio of plant biomass versus soil solution in a tropical pioneer tree, *Ficus insipida*[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2010, **61**: 3 735-3 748.
- [21] EVANS J R. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C_3 plants[J]. *Oecologia*, 1989, **78**: 9-19.
- [22] TALBI Z O, ABDELLY C, DEBEZ A. Interactive effects of

salinity and phosphorus availability on growth, water relations nutritional status and photosynthetic activity of barley (*Hordeum vulgare* L.)[J]. *Plant Biology*, 2011, **13**: 872-880.

[23] 孔令仑, 黄志群, 何宗明, 等. 不同林龄杉木人工林的水分利用效率与叶片养分浓度[J]. *应用生态学报*, 2017, **28**(4): 1 069-1 076.

KONG L L, HUANG Z Q, HE Z M, *et al.* Variations of water use efficiency and foliar nutrient concentrations in *Cunninghamia lanceolata* plantations at different ages[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(4): 1 069-1 076.

[24] 林 晗, 陈 辉, 吴承祯, 等. 福建千年桐种源叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与环境及叶碳氮含量的关系[J]. *自然资源学报*, 2013, **28**(8): 1 328-1 336.

LIN H, CHEN H, WU C Z, *et al.* Relationship between foliar $\delta^{13}\text{C}$ and environmental factors and foliar C and N contents of in Fujian Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, **28**(8): 1 328-1 336.

[25] FARQUHAR G D, EHLERINGER J R, HUBICK K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 1989, **40**: 503-537.

[26] FENG X. Trends in intrinsic water-use efficiency of natural trees for the past 100-200 years: A response to atmospheric CO_2 concentration [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, **63**: 1 891-1 903.

[27] EHLERINGER J R, HALL A E, FARQUHAR G D. Stable Isotopes and Plant Carbon-water Relations[C]. San Diego, CA: Academic Press, 1993.

[28] WRIGHT I J, REICH P B, WESTOBY M, *et al.* The world-wide leaf economics spectrum [J]. *Nature*, 2004, **428**: 821-827.

[29] 展小云, 于贵瑞, 盛文萍, 等. 中国东部南北样带森林优势植物叶片的水分利用效率和氮素利用效率[J]. *应用生态学报*, 2012, **23**(3): 587-594.

ZHAN X Y, YU G R, SHENG W P, *et al.* Foliar water use efficiency and nitrogen use efficiency of dominant plant species in main forests along the North-South Transect of East China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(3): 587-594.

[30] HAMERLYNCK E P, HUXMAN T E, MCAULIFFE J R, *et al.* Carbon isotope discrimination and foliar nutrient status of Larreatridentate (creosote bush) in contrasting Mojave Desert soils[J]. *Oecologia*, 2004, **138**: 210-215.

[31] VITOUSEK P M, SHEARER G, KOHL D H. Foliar ^{15}N natural abundance in Hawaiian rainforest: patterns and possible mechanisms[J]. *Oecologia*, 1989, **78**(3): 383-388.

[32] JUNG K, GEBAUER G, GEHRE M, *et al.* Anthropogenic impacts on natural nitrogen isotope variations in *Pinus sylvestris* stands in an industrially polluted area[J]. *Environmental Pollution*, 1997, **97**(1): 175-181.

[33] 郑璐嘉, 黄志群, 何宗明, 等. 林龄、叶龄对亚热带杉木人工林碳氮稳定同位素组成的影响[J]. *林业科学*, 2015, **51**(1): 22-28.

ZHENG L J, HUANG Z Q, HE Z M, *et al.* Influence of forest and foliar ages on the composition of stable carbon and nitrogen isotope of *Cunninghamia lanceolata* in Subtropic China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, **51**(1): 22-28.

[34] HOBBIE E A, HOBBIE J E. Natural abundance of ^{15}N in nitrogen-limited forests and tundra can estimate nitrogen cycling through mycorrhizal fungi: a review[J]. *Ecosystems*, 2008, **11**(5): 815-830.

(编辑:裴阿卫)