

滨海沙地不同树种人工林叶片和土壤表层稳定碳氮同位素及水分利用效率研究

葛露露¹, 孟庆权¹, 林 宇², 何宗明^{1*}, 邱岭军¹, 胡欢甜¹, 王柯远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防护林为研究对象,测定不同年龄(新叶、老叶)叶片、表层土壤(0~10 cm)天然稳定碳、氮同位素丰度值($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$),研究稳定碳、氮同位素丰度值与水分利用效率和土壤氮饱和程度的相互关系,以揭示不同树种水分利用效率、氮饱和程度和碳氮循环速率差异的机理。结果表明:(1)滨海沙地不同树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围为 $-31.682\text{‰} \sim -29.323\text{‰}$, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 大小为:湿地松>肯氏相思>木麻黄>纹荚相思>尾巨桉,除尾巨桉外各树种 $\delta^{13}\text{C}$ 均表现为新叶>老叶;各树种叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 变化范围为 $-5.548\text{‰} \sim -2.167\text{‰}$, 其 $\delta^{15}\text{N}$ 大小为:肯氏相思>纹荚相思>木麻黄>湿地松>尾巨桉,且各树种均表现为新叶>老叶。(2)不同树种表层土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 变化范围为 $-4.675\text{‰} \sim -2.975\text{‰}$, 表层土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 大小为:纹荚相思>肯氏相思>木麻黄>尾巨桉>湿地松,但不同树种表层土壤 C 含量无显著差异。(3)滨海沙地湿地松、木麻黄、肯氏相思和纹荚相思的水分利用效率随叶龄增加均呈显著递减趋势;不同树种新叶的水分利用效率变化范围为 $39.09 \sim 76.57 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 其大小依次为:湿地松>肯氏相思>木麻黄>纹荚相思>尾巨桉;老叶的水分利用效率变化范围为 $38.56 \sim 62.59 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 其大小依次为:湿地松>木麻黄>肯氏相思>尾巨桉>纹荚相思。(4)不同树种人工林水分利用效率与其新叶水分利用效率呈显著正相关关系,说明林分水分利用效率主要体现在新叶的水分利用效率上,同时林分水分利用效率受林分类型的影响。

关键词:人工林;叶龄;稳定碳、氮同位素;水分利用效率;滨海沙地

中图分类号: Q948.11; Q945.1

文献标志码: A

Study on Stable Carbon and Nitrogen Isotope and Water Use Efficiency in Leaves and Topsoils of Different Tree Species in Southeast Coastal Area

GE Lulu¹, MENG Qingquan¹, LIN Yu², HE Zongming^{1*},
QIU Lingjun¹, HU Huantian¹, WANG Keyuan¹

(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, and determined stable carbon and nitrogen isotope abundance values ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) in uneven-aged leaves (new and old-year leaves) and topsoils (0–10 cm). we studied the relationship between stable carbon and nitrogen isotope

收稿日期: 2017-11-27; 修改稿收到日期: 2018-01-12

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

abundance, water use efficiency and soil nitrogen saturation in order to reveal the mechanism of water use efficiency, nitrogen saturation and the difference of carbon and nitrogen cycle rate of different species. The results showed that: (1) the $\delta^{13}\text{C}$ values in leaves of different tree species ranged from -31.682‰ to -29.323‰ in the sequence as *P. elliotii* > *A. cunninghamia* > *C. equisetifolia* > *A. aulacocarpa* > *E. urophylla* $\times$ *E. grandis*. The $\delta^{13}\text{C}$ values in new-year leaves were higher compared with those in old-year leaves for most species, except for *E. urophylla* $\times$ *E. grandis*. The variation range of $\delta^{15}\text{N}$ in leaves of each tree species was from -5.548‰ to -2.167‰ with the highest value in *A. cunninghamia*, followed by, *A. aulacocarpa*, *C. equisetifolia*, *P. elliotii*, and *E. urophylla* $\times$ *E. grandis*. The $\delta^{15}\text{N}$ values in new-year leaves were higher compared with those in old-year leaves. (2) The variation range of $\delta^{15}\text{N}$ in the topsoils of different tree species was from -4.675‰ to -2.975‰ with the highest value in *A. aulacocarpa*, followed by, *A. cunninghamia*, *C. equisetifolia*, *E. urophylla* $\times$ *E. grandis*, and *P. elliotii*. However, there was no significant difference in the C content in the topsoils of different tree species. (3) The water use efficiency of *P. elliotii*, *C. equisetifolia*, *A. cunninghamia* and *A. aulacocarpa* decreased with the aging of leaves. The water use efficiency of new-year leaves of different tree species varied from $39.09 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ to $76.57 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, with *P. elliotii* > *A. cunninghamia* > *C. equisetifolia* > *A. aulacocarpa* > *E. urophylla* $\times$ *E. grandis*. The water use efficiency of old-year leaves varied from $38.56 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ to $62.59 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, with *P. elliotii* > *C. equisetifolia* > *A. cunninghamia* > *E. urophylla* $\times$ *E. grandis* > *A. aulacocarpa*. (4) The water use efficiency of different tree species was significantly positively correlated with that of new leaves, indicating that the water use efficiency of new-year leaves plays a more significant role. The water use efficiency of stand was also affected by stand type.

Key words: plantation; foliar age; stable carbon and nitrogen isotopes; water use efficiency; southeast coastal area

近年来,随着全球气候变暖和人类活动加剧,沿海防护林经历着结构和功能等多方面的退化。滨海沙地人工林是中国东南沿海一种重要的防护林,目前福州滨海沙地防护林树种仍以木麻黄(*C. equisetifolia*)为主,其次为湿地松(*P. elliotii*)、尾巨桉(*E. urophylla* $\times$ *E. grandis*)及一些相思树种,季节性干旱是限制该地区林木生长的关键因子之一,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^[1],也就是水分利用效率(WUE)。

植物的水分利用效率对于揭示大气-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^[2-3]。植物具备较高的WUE已经成为能够在干旱和半干旱环境里良好生长和生产的一个重要特征^[4]。目前国内外对植物WUE的研究较多涉及叶片尺度的WUE。叶片尺度的WUE又称蒸腾效率,是植物净光合作用积累的干物质与蒸腾消耗水量之比^[5],是深入了解生态系统碳水循环间相互耦合关系的重要指标。在叶片尺度上,目前国际上比较流行的测定植物WUE的方法是稳定碳同位素法^[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 浓度与大气 CO_2 浓度比值

(C_i/C_a)呈负相关^[7],正是由于植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 同 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,不受取样时间和空间的限制,结果更准确,还能较好地反映植物的水分状况,在诸多研究中已被证明是有效的,尤其是对于生长在干旱环境的植物^[9]。近年来利用稳定碳同位素测定植物水分利用效率受到国内外专家的一致认可^[10-12],且这方面的研究较多,如苏培玺等^[13]通过对荒漠植物叶片或同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 的测定来研究植物水分利用效率;樊廷录等^[14]认为冬小麦灌浆期旗叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值在旱作条件下和在补灌条件下均可较好地评价水分利用效率;陈平等^[15]利用稳定碳同位素测定决明子的水分利用效率;刘莹等^[16]采用稳定碳同位素法分析白羊草在不同干旱胁迫下的水分利用效率。然而,目前针对滨海沙地沿海防护林的水分利用效率的研究却特别少。

稳定氮同位素法常被应用在陆地生态系统氮循环的研究中,植物和土壤的碳氮同位素组成记录了植物新陈代谢和氮循环影响因子的综合作用。土壤的氮同位素丰度值($\delta^{15}\text{N}$)提供了氮输入、转化和输出的信息,作为氮循环转化的综合结果,它间接反映了陆地生态系统氮循环的特征^[17]; $\delta^{15}\text{N}$ 还可用来评

估生态系统的氮通量,并且已被部分学者^[18-21]用作生态系统氮饱和状态的指示指标。

本研究通过分析比较滨海沙地 5 种不同人工防护林叶片和表层土壤中天然存在的稳定碳、氮同位素丰度值($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$)的差异,揭示不同树种水分利用效率、氮饱和程度和碳氮循环速率差异的机理,研究结果将为科学选择沿海沙地造林树种,制定适宜的防护林栽培管理技术措施,改善沿海防护林的树种和林分结构,增强系统的抗逆性和稳定性,保证防护效能的稳定持续发挥等方面起到重要作用。

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°40′43″E,25°57′59″N),属于沿海防护基干林区域。林场经营面积 345.9 hm²,属南亚热带海洋性季风气候,年日照 2 000~2 300 h,年均无霜期 326 d,年平均温度 19.2 ℃,平均湿度 80%,全年温和多雨,平均降水量 1 382 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 6~10 m 厚的滨海风积沙土,保水性和肥力都很差,天然植被稀少,林下常见零星植被有马樱丹(*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、木麻黄、尾巨桉、肯氏相思和纹荚相思人工林为研究对象。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 m²(20 m×20 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。林分基本情况见表 1。

1.3 研究方法

1.3.1 叶片样品的采集 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叶片样品,采用“节

点法”和“主干法”将各人工林叶片按龄级分为当年生新叶、老叶^[22]。同一小区的 4 棵标准木上采集的同一年龄叶片样品进行混合,不同叶龄样品中各随机取出适量样品混合(作为标准木叶片样品),做好标记,于 105 ℃干燥箱中高温杀青 15 min 后转入 60 ℃恒温箱烘干至恒重,粉碎后过 100 目筛。

1.3.2 土壤样品的采集 在每个小区完全随机地设置 3 个 2 m×2 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 0~10 cm 土层土样,去除杂质混合均匀后自然风干,过 100 目筛。

1.3.3 叶片碳氮含量和稳定碳、氮同位素丰度值测定 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碳、氮含量(mg·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($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$,‰),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 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 或 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, 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 $R_{\text{PDB}} = 0.011\,237\,2$;N 同位素相对丰度标准物质为标准大气中氮气,其 $R_{\text{air}} = 0.003\,676\,5$ 。

1.3.4 土壤样品碳氮含量和稳定碳、氮同位素丰度值测定 采用全自动碳氮分析仪(Elemental Analyzer Vario ELIII,德国)测定土壤样品的碳、氮含量(mg·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($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$,‰)。

1.3.5 水分利用效率的计算

$$WUE = C_a / 1.6(\delta^{13}\text{C}_p - \delta^{13}\text{C}_a + b) / (b - a) \quad (2)$$

式中, C_a 为大气 CO₂ 浓度(约为 0.038‰); $\delta^{13}\text{C}_p$ 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(‰); a 为扩散作用所产生的

表 1 滨海沙地人工防护林林分基本概况
Table 1 Basic survey of artificial shelterbelt in coastal sandy land

林分类型 Stand type	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>
平均树高/m Average tree height	12.54	12.71	19.14	8.03	10.96
平均胸径/cm Mean DBH	16.11	11.83	14.52	8.36	11.07

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‰)。

$$\delta^{13}C_a = -6.429 - 0.006\exp[0.0217(t-1740)]$$

(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:δ¹³C_a = -8.721 869 7。

1.4 数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS17.0 软件对数据进行统计分析,用 Origin8.5 软件制图。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)法、Duncan 法和 Tamhane 法进行方差分析(*a* = 0.05),采用 Pearson 法进行相关性分析。表中数据为平均值±标准误。

2 结果与分析

2.1 不同树种叶片稳定碳、氮同位素丰度值

2.1.1 叶片稳定碳同位素丰度值 由表 2 可知,在相同树种内,湿地松、木麻黄、肯氏相思和纹荚相思新叶 δ¹³C 均显著高于相应的老叶(*P* < 0.05),而尾巨桉新老叶片间 δ¹³C 差异不显著(*P* > 0.05)。在树种间相比较,新叶 δ¹³C 以湿地松最高,并显著高于除肯氏相思外的其他树种,肯氏相思、木麻黄和纹荚相思居中,且三者间无显著差异,但均显著高于尾巨桉;老叶 δ¹³C 仍以湿地松最高,并显著高于除木麻

黄外的其他树种,木麻黄、肯氏相思和尾巨桉居中,且三者间无显著差异,纹荚相思最低。总体而言,滨海沙地 5 种主要人工防护林叶片 δ¹³C 处于 -31.682‰~-29.323‰之间,并表现为湿地松 > 肯氏相思 > 木麻黄 > 纹荚相思 > 尾巨桉;湿地松和肯氏相思叶片 δ¹³C 与尾巨桉均有显著差异,但湿地松与肯氏相思叶片 δ¹³C 无显著差异,木麻黄、纹荚相思与尾巨桉间也均无显著差异。

2.1.2 叶片稳定氮同位素丰度值 表 3 显示,在同一树种内,木麻黄、肯氏相思和纹荚相思新叶 δ¹⁵N 均显著高于相应老叶(*P* < 0.05),而湿地松和尾巨桉新老叶片间 δ¹⁵N 差异不显著(*P* > 0.05)。树种内相比较而言,新叶 δ¹⁵N 以肯氏相思和纹荚相思较高,并显著高于其余树种(*P* > 0.05),木麻黄次之,尾巨桉最低,并与除湿地松外的其他树种均有显著差异;各树种老叶 δ¹⁵N 的表现与新叶相似,肯氏相思和纹荚相思仍处于较高水平,湿地松和木麻黄居中等水平,而尾巨桉处于最低水平,且高、中、低水平树种间均存在显著差异。总体而言,各树种叶片 δ¹⁵N 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、木麻黄和尾巨桉叶片 δ¹⁵N 显著低于肯氏相思和纹荚相思,而湿地松、木麻黄、尾巨桉之间以及肯氏相思和纹荚相思之间叶片 δ¹⁵N 均无显著

表 2 滨海沙地人工林不同树种新、老叶 δ¹³C
Table 2 δ¹³C of new and old leaves of different plantations in coastal sandy land/‰

林分类型 Stand type	新叶 New leaf	老叶 Old leaf	平均 Mean
湿地松 <i>P.elliottii</i>	-28.436±0.227Aa	-29.766±0.250Ba	-29.323±0.259a
木麻黄 <i>C.equisetifolia</i>	-29.922±0.408Ab	-31.073±0.403Bab	-30.497±0.331ab
尾巨桉 <i>E.urophylla</i> × <i>E.grandis</i>	-32.003±0.180Ac	-31.362±0.218Abc	-31.682±0.178b
肯氏相思 <i>A.cunninghamia</i>	-29.094±0.218Aab	-31.226±0.080Bb	-30.160±0.340a
纹荚相思 <i>A.aulacocarpa</i>	-30.004±0.657Ab	-32.052±0.139Bc	-31.028±0.496ab

注:同行(列)不同大写(小写)字母表示新老叶间(树种间)δ¹³C 在 0.05 水平存在显著差异。下同
Note:The different capital (normal) letters within the same line (column) indicate significant difference between new leaves and old leaves (among different plantations) at 0.05 level. The same as below

表 3 滨海沙地人工林不同树种新、老叶 δ¹⁵N
Table 2 δ¹⁵N of new and old leaves of different plantations in coastal sandy land/‰

林分类型 Stand type	新叶 New leaf	老叶 Old leaf	平均 Mean
湿地松 <i>P.elliottii</i>	-4.517±0.184Abc	-4.869±0.131Ab	-4.752±0.113b
木麻黄 <i>C.equisetifolia</i>	-3.133±0.233Ab	-4.596±0.189Bb	-3.864±0.282b
尾巨桉 <i>E.urophylla</i> × <i>E.grandis</i>	-5.445±0.814Ac	-5.651±0.802Ac	-5.548±0.530b
肯氏相思 <i>A.cunninghamia</i>	-1.071±0.083Aa	-3.263±0.165Ba	-2.167±0.342a
纹荚相思 <i>A.aulacocarpa</i>	-1.396±0.181Aa	-2.680±0.088Ba	-2.182±0.311a

差异。

滨海沙地 5 种主要人工防护林平均叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围为 $-31.682\text{‰} \sim -29.323\text{‰}$, 且湿地松 $>$ 肯氏相思 $>$ 木麻黄 $>$ 纹荚相思 $>$ 尾巨桉; $\delta^{15}\text{N}$ 变化范围为 $-5.548\text{‰} \sim -2.167\text{‰}$, 且肯氏相思 $>$ 纹荚相思 $>$ 木麻黄 $>$ 湿地松 $>$ 尾巨桉。湿地松叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 最大, 肯氏相思叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 最大, 尾巨桉叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 均最小。尾巨桉与湿地松和肯氏相思叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 均有显著差异, 但湿地松和肯氏相思叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 无显著差异。湿地松、木麻黄和尾巨桉间叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 无显著差异, 肯氏相思和纹荚相思叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 也无显著差异, 但湿地松、木麻黄、尾巨桉和肯氏相思、纹荚相思有显著差异。

2.2 不同树种土壤稳定氮同位素丰度值及叶片 ^{15}N 富集指数

2.2.1 不同树种土壤碳氮含量及稳定氮同位素丰度值 由表 4 可知, 滨海沙地 5 种主要人工防护林表层土壤 C、N 含量变化范围分别为 $3.406 \sim 4.415 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.327 \sim 0.462 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 木麻黄表层土壤的 C、N 含量均最高; 不同树种表层土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 变化范围为 $-4.675\text{‰} \sim -2.975\text{‰}$, 且纹荚相思 $>$ 肯氏相思 $>$ 木麻黄 $>$ 尾巨桉 $>$ 湿地松。不同树种表层土壤 C 含量无显著差异, N 含量只在湿地松和木麻黄之间存在显著差异; 不同树种表层土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 的差异主要表现在湿地松、尾巨桉和其他 3 个树种之间。

2.2.2 不同树种叶片 ^{15}N 富集指数 叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 和土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 可以用来指示土壤的氮饱和程度^[23-24], 也有研究提出利用叶片 ^{15}N 富集指数(叶片 ^{15}N 与土壤 ^{15}N 的差值)指示林分氮饱和程度^[25], 叶片 ^{15}N 富集指数越接近 0, 则对应林分的氮饱和程度越高。由表 4 可知, 本研究中不同树种叶片 ^{15}N 富集指数差异显著, 从高到低依次为: 肯氏相思、纹荚相思、湿地

松、木麻黄、尾巨桉。

2.3 土壤理化性质与叶片稳定碳、氮同位素丰度值、土壤氮同位素丰度值的关系

由表 5 可知, 土壤 pH 与土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 极显著负相关, MBN 与土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 显著负相关, DON、硝态氮与土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 极显著正相关, STN 与土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 显著正相关; 土壤 pH、MBN 与叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 极显著负相关, DON、硝态氮、土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 与叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 极显著正相关; 土壤 pH、MBN 与叶片 ^{15}N 富集指数极显著负相关, 叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 与叶片 ^{15}N 富集指数极显著正相关, DON、硝态氮与叶片 ^{15}N 富集指数显著正相关; 土壤各理化性质与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 相关性不显著。

2.4 不同树种水分利用效率比较

2.4.1 相同树种不同叶龄水分利用效率 依据公式(2)可计算各树种水分利用效率。由表 6 可知, 滨海沙地 5 种主要人工防护林(除尾巨桉外)不同叶龄之间水分利用效率均差异显著($P < 0.05$), 且新叶的水分利用效率显著高于老叶。

2.4.2 不同树种相同叶龄水分利用效率 如表 6 所示, 不同树种新叶的水分利用效率变化范围为 $39.09 \sim 76.57 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 大小排序为湿地松 $>$ 肯氏相思 $>$ 木麻黄 $>$ 纹荚相思 $>$ 尾巨桉; 老叶的水分利用效率变化范围为 $38.56 \sim 62.59 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 大小排序为湿地松 $>$ 木麻黄 $>$ 肯氏相思 $>$ 尾巨桉 $>$ 纹荚相思。可见, 湿地松新叶和老叶的水分利用效率均最高。湿地松新叶水分利用效率与其他树种(除肯氏相思外)新叶的水分利用效率存在显著差异, 肯氏相思、木麻黄、纹荚相思与尾巨桉在新叶水分利用效率上也存在显著差异。湿地松老叶的水分利用效率与尾巨桉、肯氏相思、纹荚相思相比有极显著差异($P < 0.01$), 木麻黄老叶的水分利用效率与除纹荚相思外其他树种相比均无显著差异($P >$

表 4 滨海沙地人工林不同树种表层土壤碳氮含量、 $\delta^{15}\text{N}$ 以及叶片 ^{15}N 富集指数

Table 4 Carbon and nitrogen contents and $\delta^{15}\text{N}$ of topsoils, and ^{15}N enrichment index of leaves of different plantations in coastal sandy land

树种 Tree species	表层土壤 Topsoil			叶片 ^{15}N 富集指数 ^{15}N enrichment index of leaves/ ‰
	C 含量 C content/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	N 含量 N content/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	
湿地松 <i>P. elliottii</i>	$3.652 \pm 0.703\text{a}$	$0.327 \pm 0.020\text{b}$	$-4.675 \pm 0.359\text{b}$	$-0.077 \pm 0.176\text{b}$
木麻黄 <i>C. equiseti folia</i>	$4.415 \pm 0.385\text{a}$	$0.462 \pm 0.015\text{a}$	$-3.277 \pm 0.124\text{a}$	$-0.539 \pm 0.316\text{bc}$
尾巨桉 <i>E. urophylla</i> $\times$ <i>E. grandis</i>	$3.650 \pm 0.426\text{a}$	$0.358 \pm 0.048\text{ab}$	$-4.323 \pm 0.247\text{b}$	$-1.226 \pm 0.402\text{c}$
肯氏相思 <i>A. cunninghamia</i>	$3.406 \pm 0.190\text{a}$	$0.380 \pm 0.029\text{ab}$	$-3.125 \pm 0.212\text{a}$	$0.958 \pm 0.223\text{a}$
纹荚相思 <i>A. aulacocarpa</i>	$4.132 \pm 0.444\text{a}$	$0.397 \pm 0.040\text{ab}$	$-2.975 \pm 0.151\text{a}$	$0.793 \pm 0.333\text{a}$

表 5 滨海沙地人工林土壤理化性质与碳氮同位素之间 Pearson 相关性
Table 5 Pearson correlation between soil physical and chemical properties and carbon and nitrogen isotopes of plantations in coastal sandy land

	pH	SOC	STN	SOC;STN	DOC	DON	MBC	MBN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	Mineral N	Soil δ ¹⁵ N	Leaf δ ¹⁵ N	Leaf δ ¹³ C	¹⁵ N enrichment indexpH
pH	1														
土壤有机碳 SOC	-0.248	1													
土壤全氮 STN	-0.400	0.626**	1												
SOC;STN	0.096	0.567**	-0.279	1											
土壤可溶性有机碳 DOC	-0.204	0.328	0.407	0.012	1										
土壤可溶性有机氮 DON	-0.843**	0.115	0.383	-0.234	0.125	1									
土壤微生物量碳 MBC	0.279	-0.228	-0.217	-0.038	0.424	-0.157	1								
土壤微生物量氮 MBN	0.675**	-0.314	-0.332	-0.013	-0.048	-0.500*	0.413	1							
铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	-0.264	-0.139	-0.175	0.001	-0.28	0.172	-0.159	0.220	1						
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	-0.689**	-0.123	0.075	-0.219	-0.142	0.690**	-0.298	-0.177	0.753**	1					
矿物质 Mineral N	-0.482*	-0.141	-0.069	-0.103	-0.234	0.428	-0.236	0.047	0.950**	0.920**	1				
土壤 δ ¹⁵ N Soil δ ¹⁵ N	-0.818**	0.372	0.596*	-0.127	0.401	0.829**	-0.155	-0.525*	-0.458	0.677**	0.188	1			
叶片 δ ¹⁵ N Leaf δ ¹⁵ N	-0.895**	0.316	0.476	-0.097	0.054	0.769**	-0.414	-0.862**	-0.408	0.747**	0.296	0.787**	1		
叶片 δ ¹³ C Leaf δ ¹³ C	0.018	0.136	-0.043	0.142	-0.268	-0.297	-0.028	-0.305	0.204	-0.357	-0.133	-0.275	0.031	1	
¹⁵ N 富集指数 ¹⁵ N enrichment index	-0.731**	0.201	0.279	-0.053	-0.198	0.542*	-0.493	-0.886**	-0.275	0.615*	0.298	0.450	0.905**	0.235	1

注: ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关, * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关
Note: ** indicates significant correlation at 0.01 level, * indicates significant correlation at 0.05 level

表 6 滨海沙地人工林各树种不同叶龄水分利用效率

Table 6 Water use efficiency of different foliar ages of different plantations in coastal sandy land /($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)

树种 Tree species	新叶 New leaf	老叶 Old leaf
湿地松 <i>P. elliottii</i>	76.57±2.38Aa	62.59±4.00Ba
木麻黄 <i>C. equisetifolia</i>	60.95±4.29Ab	48.86±4.23Bab
尾巨桉 <i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	39.09±1.89Ac	45.82±2.29Abc
肯氏相思 <i>A. cunninghamia</i>	69.65±2.29Aab	47.25±0.84Bb
纹荚相思 <i>A. aulacocarpa</i>	60.09±6.90Ab	38.56±1.46Bc

注:同一行(列)数值后面有相同大写(小写)字母者差异不显著($P>0.05$)
Note: Within the same line (column) followed by the same capital (small) letter means no significant difference ($P>0.05$)

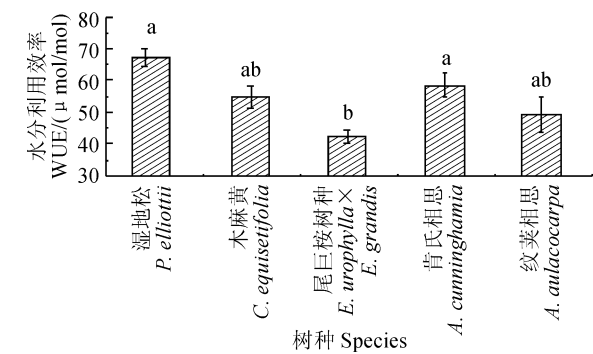


图 1 滨海沙地人工防护林不同树种水分利用效率

Fig. 1 Water use efficiency of different artificial shelterbelts in coastal sandy land

0.05);尾巨桉老叶的水分利用效率与除湿地松外的其他树种相比无显著差异;肯氏相思老叶的水分利用效率与纹荚相思相比有显著差异($P<0.05$)。

2.4.3 不同树种水分利用效率 如图 1 所示,湿地松的水分利用效率与除尾巨桉外的其他树种的水分利用效率相比无显著差异。不同树种人工林水分利用效率大小排序为湿地松>肯氏相思>木麻黄>纹荚相思>尾巨桉,这与 5 种主要人工防护林新叶水分利用效率的大小排序相同。对林分水分利用效率与不同叶龄水分利用效率做相关性分析可知,新叶水分利用效率与林分水分利用效率显著正相关,即新叶水分利用效率越高林分水分利用效率越高,说明林分的水分利用效率主要体现在新叶的水分利用效率上,同时林分水分利用效率也受林分类型的影响。

3 讨论

滨海沙地不同树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 均存在显著差异。湿地松、木麻黄、肯氏相思和纹荚相思 $\delta^{13}\text{C}$ 呈现出随叶龄增大而减小的趋势,即表现为新叶>老叶。这是因为新、老叶的呼吸特征具有很大差异,叶片在呼吸时优先利用 ^{12}C ,从而使 ^{13}C 在组织中富

集^[16],新叶比老叶呼吸速率快, ^{13}C 在新叶中比在老叶中富集得更多;5 种防护林 $\delta^{15}\text{N}$ 也均呈现出随叶龄增大而减小的趋势。本研究中的 5 种主要防护林树种 $\delta^{13}\text{C}$ 的分布区间位于 O’Leary 所报道的 C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ ($-34\text{‰} \sim -22\text{‰}$)范围内。

不同树种表层土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 存在显著差异,不同树种叶片 ^{15}N 富集指数也存在显著差异。叶片 ^{15}N 富集指数越接近 0,可能说明菌根真菌对氮素的分馏作用越弱,则对应林分的氮饱和度越高^[26]。本研究中华地松叶片 ^{15}N 富集指数最接近 0,所以湿地松氮饱和度最高。在沿海沙地条件下,林分土壤中可利用性的氮素越低,菌根在供应植物氮素时表现出越突出的作用,进而导致土壤氮素被植物吸收利用的过程中伴有更强烈的氮同位素分馏现象^[27-28]。本研究中的尾巨桉处于速生期,与其他林分相比,氮素可利用性较低,氮素可能是限制其生长的因素之一。

本研究发现,滨海沙地湿地松、木麻黄、肯氏相思和纹荚相思水分利用效率随叶龄变化呈显著递减趋势。孔令仑等^[29] 也认为不同叶龄水分利用效率差异显著,且水分利用效率随叶龄变化也呈递减趋势,不同林龄杉木人工林当年生叶片($77.4 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)显著高于 2 年生($73.4 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)和 3 年生叶($73.1 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$),而林龄对水分利用效率影响不显著。相比本研究中滨海沙地的 5 种人工林不同叶龄水分利用效率,不同叶龄杉木人工林具有更高的水分利用效率。她还通过研究叶片养分浓度与水分利用效率之间的差异及其相互关系得出亚热带森林植物磷含量是影响水分利用效率的重要因子,水分利用效率与叶片磷浓度呈显著正相关^[30],与黄志群等^[31] 研究结果一致。本研究中并未分析影响滨海沙地 5 种主要人工防护林水分利用效率的因子,有待之后的研究。

不同树种人工林水分利用效率大小排序为湿地

松>肯氏相思>木麻黄>纹莢相思>尾巨桉,与不同树种人工林 $\delta^{13}\text{C}$ 的大小顺序一致,这也说明了水分利用效率和 $\delta^{13}\text{C}$ 存在某种联系,同时也印证了公式(2)的可行性。5 种防护林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,树干最长,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,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。因为水分利用效率受光合速率和气孔导度影响,故尾巨桉的水分利用效率最低。此外,新叶水分利用效率与林分水分利用效率显著正相关,这在一定程度上说明林分水分利用效率主要体现在新叶水分利用效率上。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] 孙双峰,黄建辉,林光辉,等. 稳定同位素技术在植物水分利用研究中的应用[J]. 生态学报, 2005, **25**(9): 2 362-2 371.
SUN S F, HUANG J H, LIN G H, *et al.* Application of stable isotope technique in the study of plant water use[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(9): 2 362-2 371.

[4] 曹生奎,冯 起,司建华,等. 植物叶片水分利用效率研究综述[J]. 生态学报, 2009, **29**(7): 3 882-3 892.
CAO S K, FENG Q, SI J H, *et al.* Summary on the plant water use efficiency at leaf level[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(7): 3 882-3 892.

[5] ULLI S, ABAZAR R, HOWARD G, *et al.* Carbon isotopes and water use efficiency: sense and sensitivity[J]. *Oecologia*, 2008, **155**: 441-454.

[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 Phyto-*

ecologica Sinica, 2002, **26**(5): 549-560.

[8] FARQUHAR, GD, RICHARDS, RA. 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, EHLERINGER 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] HU J, MOORE DJP, RIVEROSIREGUI DA, *et al.* Modeling whole-tree carbon assimilation rate using observed transpiration rates and needle sugar carbon isotope ratios[J]. *New Phytologist*, 2010, **185**: 1 000-1 015.

[11] 罗亚勇,赵学勇,黄迎新,等. 植物水分利用效率及其测定方法研究进展[J]. 中国沙漠, 2009, **29**(4): 648-655.
LUO Y Y, ZHAO X Y, HUANG Y X, *et al.* Research progress in plants water use efficiency and its measuring method [J]. *Journal of Desert Research*, 2009, **29**(4): 648-655.

[12] BOGELEIN R, HASSDENTEUFEL M, THOMAS FM, *et al.* Comparison of leaf gas exchange and stable isotope signature of water-soluble compounds along canopy gradients of co-occurring Douglas-fir and European beech[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2012, **35**: 1 245-1 257.

[13] 苏培玺,严巧嫡,陈怀顺. 荒漠植物叶片或同化枝 $\delta^{13}\text{C}$ 值及水分利用效率研究[J]. 西北植物学报, 2005, **25**(4): 727-732.
SU P X, YAN Q D, CHEN H S. $\delta^{13}\text{C}$ values and water use efficiency of the leaves and assimilating shoots of desert plants [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, **25**(4): 727-732.

[14] 樊廷录,马明生,王淑英,等. 不同基因型冬小麦旗叶的稳定碳同位素比值及其与产量和水分利用效率的关系[J]. 植物生态学报, 2011, **35**(2): 203-213.
FAN T L, MA M S, WANG S Y, *et al.* Stable carbon isotope ratio ($\delta^{13}\text{C}$) in flag leaves of different genotypes of win-

ter wheat and its relation to yield and water use efficiency[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, **35**(2): 203-213.

[15] 陈 平, 张劲松, 孟 平, 等. 稳定碳同位素测定水分利用效率——以决明子为例[J]. *生态学报*, 2014, **34**(19): 5 453-5 459.

CHEN P, ZHANG J S, MENG P, *et al.* Feasibility analysis on the determination of WUE by stable carbon isotope; *Cas-sia obtusifolia* L. as an example[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(19): 5 453-5 459.

[16] 刘 莹, 李 鹏, 沈 冰, 等. 采用稳定碳同位素法分析白羊草在不同干旱胁迫下的水分利用效率[J]. *生态学报*, 2017, **37**(9): 3 055-3 064.

LIU Y, LI P, SHEN B, *et al.* Effects of drought stress on *Bothriochloa ischaemum* water-use efficiency based on stable carbon isotope[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(9): 3 055-3 064.

[17] 姚凡云, 朱 彪, 杜恩在.¹⁵N 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.

YAO F Y, ZHU B, DU E Z. Use of ¹⁵N natural abundance in nitrogen cycling of terrestrial ecosystems[J]. *Acta Phyto-ecologica Sinica*, 2012, **36**(4): 346-352.

[18] NADELHOFFER K, FRY B, NADELHOFFER K, *et al.* Nitrogen isotope studies in forest ecosystems[J]. *Stable Iso-topes in Ecology & Environmental Science*, 1994.

[19] PARDO L H, HEMOND H F, MONTOYA J P, *et al.* Long-term patterns in forest-floor ¹⁵N natural abundance at hubbard brook, nh[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, **65**(4): 1 279-1 283.

[20] KAHMEN A, WANEK W, BUCHMANN N. Foliar δ^{15} N values characterize soil N cycling and reflect nitrate or ammo-nium preference of plants along a temperate grassland gradi-ent[J]. *Oecologia*, 2008, **156**(4): 861-870.

[21] XU Y Q, HE J C, CHENG W X, *et al.* Natural ¹⁵N abun-dance in soils and plants in relation to N cycling in a rangeland in Inner Mongolia[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2010, **3**(3): 201-207.

[22] KIKUZAWA K, LECHOWICZ M J. Quantifying Leaf Lon-gevity[J]. *Ecological Research Monographs*, 2011: 23-39.

[23] GARTEN C T. Variation in foliar ¹⁵N abundance and the availability of soil nitrogen on walker branch watershed[J]. *Ecology*, 1993, **74**(7): 2 098-2 113.

[24] PARDO L H, TEMPLER P H, GOODALE C L, *et al.* Re-gional assessment of N saturation using foliar and root delta δ^{15} N [J]. *Biogeochemistry*, 2006, **80**(2): 143-171.

[25] MICHENER R, LAJTHA K. *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science* [M]. USA: John Wiley & Sons, 2008.

[26] 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.

[27] HOEGBERG P. ¹⁵N natural abundance in soil-plant systems [J]. *New Phytologist*, 1997, **189**: 515-525.

[28] HOBBIE E A, OUIMETTE A P. Controls of nitrogen iso-tope patterns in soil profiles[J]. *Biogeochemistry*, 2009, **95**(2/3): 355-371.

[29] 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 *Cun-ninghamia lanceolata* plantations at different ages[J]. *Chi-nese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(4): 1 069-1 076.

[30] 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 differ-ent altitudes of Wuyi Mountains, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(7): 2 102-2 110.

[31] 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*, 2016, **210**(2): 431-442.

(编辑:潘新社)