

大连市黑松树木水分利用效率的环境响应

阮亚男¹ 萧英男² 杨立新² 周永斌² 陈振举^{2,3*}

(¹辽宁大学生命科学学院, 沈阳 110036; ²沈阳农业大学林学院 沈阳 110866; ³中国科学院清原森林生态系统观测研究站, 沈阳 110164)

摘要 以生长于大连城区的黑松为研究对象,建立了1951—2010年间的树木径向生长、树轮稳定碳同位素比率($\delta^{13}\text{C}$)和水分利用效率的时间序列,研究了三者的变化特点及其与主要气候因子的关系.结果表明:1980年以来,黑松树木径向生长有减缓趋势, $\delta^{13}\text{C}$ 值降低,但是水分利用效率显著增加($P<0.05$).年轮宽度、稳定同位素比率和水分利用效率的变化均受气候因素的影响,并随季节波动:夏季温度与树木径向生长呈负相关,而冬季则呈正相关;6月降水和相对湿度的波动与年轮宽度变化基本呈正相关;3—9月各月温度与 $\delta^{13}\text{C}$ 和水分利用效率呈弱正相关,其他月份基本呈弱负相关;全年降水和相对湿度分别与 $\delta^{13}\text{C}$ 和水分利用效率基本呈负相关.快速暖干化的城市气候环境促进了树木水分利用效率的提高.

关键词 黑松; 树木年轮; 稳定碳同位素; 水分利用效率; 气候变化

Environmental response of intrinsic water use efficiency of *Pinus thunbergii* in Dalian City, China. RUAN Ya-nan¹, XIAO Ying-nan², YANG Li-xin², ZHOU Yong-bin², CHEN Zhen-ju^{2,3*}
(¹College of Life Sciences, Liaoning University, Shenyang 110036, China; ²College of Forestry, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; ³Qingyuan Forest Chinese Ecosystem Research Network, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110164, China).

Abstract: Based on *Pinus thunbergii* growing in Dalian City, we developed the time series of tree radial growth, tree-ring stable carbon isotope ratio ($\delta^{13}\text{C}$) and intrinsic water use efficiency (WUE_i) in the period of 1951–2010, and studied their variation and the climate related significance. Radial growth of the pines showed a decrease trend, tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ decreased slightly, but WUE_i increased significantly ($P<0.05$) after 1980. Climate factors affected tree-ring width, $\delta^{13}\text{C}$ and WUE_i of the pines, and the effects showed seasonal variation. Temperatures respectively showed positive and negative correlations with radial growth of the pines in summer and winter, while monthly precipitation and relative humidity in June had positive correlations with tree-ring width in general. Monthly temperature had weakly positive correlations with $\delta^{13}\text{C}$ and WUE_i in March–September, and slightly negative correlation during the rest months of a year. Precipitation and relative humidity respectively had negative correlations with $\delta^{13}\text{C}$ and WUE_i in general. The rapid warming environment in the city contributed to the WUE_i increase of urban trees.

Key words: *Pinus thunbergii*; tree ring; stable carbon isotope ratio; intrinsic water use efficiency; climate change.

作为陆地上重要的生态系统组成,城市生态系统中的树木对城市环境质量具有改善作用^[1-2],并可直接或者间接地维持大气中的碳氧平衡,有效缓

解全球变化所带来的压力.城市树木在生长过程中会记录下错综复杂的城市环境变化^[1,3],城市树木的年轮也可以作为代用资料研究环境变化^[3].树木年轮同位素研究作为树木年轮学的重要内容,同样被用于研究多种自然现象和事件^[4-6],并且已形成通用的研究标准和方法^[6-7].树木年轮碳同位素(比率)的变化在国外研究比较频繁,既可用于重建过去气候和环境变迁,也能用来研究树木对过去环境

本文由国家自然科学基金项目(31370601,31670700,31570632,41601045,41571094,41271066)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31370601,31670700,31570632,41601045,41571094,41271066).

2017-03-29 Received, 2017-05-27 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhenju@hotmail.com

改变的生理生态响应^[4-8].我国当前的树木年轮稳定碳同位素研究也取得了可喜进展,如利用树木年轮稳定碳同位素序列重建过去的气候变化、工业革命以来大气 CO₂浓度变化、年轮稳定碳同位素分布对环境的响应等^[9-13].虽然近年来我国此领域的研究有所突破,但是研究密度还不够.McCarroll 等^[6]统计结果表明,1954—2002 年间,针对树木年轮稳定同位素的报道中我国大陆地区科技人员的研究成果仅占 3.03%,说明我们的研究密度与所拥有的资源极不相称,急需加大在此领域的研究.

基于树木年轮稳定同位素的水分利用效率 (water use efficiency, WUE) 研究是依据植物代谢所需水分与蒸腾损失水分的比率^[8],了解树木生长与环境变化的关系,对于理解植被对全球变化的适应对策、调控有限的水资源、探寻生态效益或经济效益最大化起着关键作用.该领域研究已在国际上取得重要进展^[6].

大连市作为我国重要的港口、工业和旅游城市,在近百年的开发过程中城市人口剧增、城市规模过度膨胀、环境质量迅速下降,错综复杂的城市环境问题急需追根溯源研究解决.而生长在城市及附近的树木,为相关研究提供了难得的代用资料.因此,本文利用现有城区的树木资源,研究大连城区黑松 (*Pinus thunbergii*) 年轮稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 变化,构建树木水分利用 (效率) 年表,并阐明其对气候的响应特性及程度,以揭示城市中树木水分亏缺的机制,为保护城市树木、缓解城市生态环境恶化提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究地点位于辽东半岛南端的辽宁省大连市 (39°01′—39°04′ N, 121°44′—121°49′ E).该地区属暖温带半湿润的季风气候,并兼有海洋性的气候特点,温和湿润,是我国东北地区最温暖的地区.年平均气温为 8~11 °C,年降水量 550~1000 mm,60%~70%的降水集中在夏季.地带性土壤为棕壤,占土壤总面积的 81.5%.植物区系属于华北地区植物区系.市区的东部、东北部、北部为丘陵和山地.

黑松为常绿乔木,原产于日本及朝鲜半岛东部沿海地区,大连地区目前有大面积分布.其喜光,为强阳性树种,抗海潮风,耐盐碱、干旱瘠薄,不耐水涝,不耐寒,为暖温带喜光树种.适生于温暖湿润的海洋性气候区域.在每一年能够形成清晰的年轮,而且在研究区黑松的年轮中,伪轮和缺轮的现象特别

少,是用于树木年代学研究的理想树种.

1.2 样本采集和定年

根据国际树木年轮数据库 (International Tree-Ring Data Bank, ITRDB) 的标准,在大连城郊成片黑松林地定点取样.采样点分别距市中心区 5 km (38°51′56″ N, 121°30′40″ E, 海拔 48 m) 和 10 km (38°53′35″ N, 121°41′52″ E, 海拔 56 m).森林立地为石质山体,土层较瘠薄,坡度较大.在这两处采集受人类影响较小并且没有受到明显病虫害和火灾疤痕等其他干扰影响的 24 株树 (其中,10 株树取轮盘,另外 14 株立木每株钻取 2~3 个树芯) 的 47 个样本序列,采集的树木为优势木.

于 2011 年 5—7 月在实验室完成所有样本的预处理和交叉定年工作^[14],并建立年轮宽度年表:双筒显微镜下目视交叉定年,年轮宽度由 LINTAB5 年轮测量和分析系统测量,精确到 0.01 mm;最终的交叉定年检验由 COFECHA 程序^[15]完成;用 ARSTAN 程序^[16]标准化,主要是用负指数 (negative exponential) 或线性 (linear regression) 拟合的方法^[17]剔除大部分低频变化,以加权平均法将去生长趋势序列合并成树轮宽度指数序列.对于个别无法用负指数函数和线性函数拟合的序列,采用样条函数进行去趋势.样条函数使用的步长大于该序列长度的三分之二以保留更多的低频信号.最终,建立年轮宽度主年表,包括 3 种年表:标准化年表 (STD)、RES-差值年表 (RES)、自回归年表 (ARS),年表各项指标均达到可靠的要求 (表 1).

1.3 碳同位素测定和水分利用效率计算

选择树龄 > 50 a 的 4 株黑松用于碳同位素测

表 1 标准化年表的各项统计量
Table 1 Statistics of STD

统计量 Statistical item	数值 Value
平均敏感度 Mean sensitivity	0.223
标准差 Standard deviation	0.261
一阶自相关系数 First order autocorrelation	0.481
信噪比 Signal to noise ratio (SNR)	12.407
样本总体代表性 Expressed population signal (EPS)	0.924
树间相关系数 Correlation between trees	0.301
第一主分量解释方差 Variance in first eigenvector (%)	69.6
子样本信号强度大于 0.80 的年份 Starting year of subsample signal strength (SSS) > 0.80	1954

定、分析: 样本树易于剥取年轮且轮宽与主系列相关性好。一般情况下, 树木木材的化学组成是纤维素 50%、木质素 30%、半纤维素 15%、树脂和树蜡 5%。松树树脂含量相对较高, 可导致全木的 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏移。虽然树脂和树蜡具有一定的流动性, 会干扰同位素的测定, 但提取纤维素时有机溶剂会影响试样中同位素测定。繁杂的脱脂和提取纤维素的过程也会大大增加由于试验操作带来的误差, 所以, 本研究省去提取树木 α -纤维素的繁杂和耗时过程^[18]: 将定年后的样品用木锉逐年剥离破碎(40~60目), 纸袋分装, 烘干; 过 100 目筛使样品均一化, 取破碎好的样品约 200 mg, 在烘箱(45℃)中烘干至恒量; $\delta^{13}\text{C}$ 值测定在中国科学院沈阳应用生态研究所用稳定同位素比例质谱仪(DELTA plus XP)测定, 测量精度为 0.01‰, 试验误差小于 0.2‰。

年轮碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)以下式换算为国际通用标准来表达: $\delta^{13}\text{C} = (R_{\text{sam}}/R_{\text{sta}} - 1) \times 1000$ 。式中: R_{sam} 是标样中 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 的比值; R_{sta} 是标样中 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 的比值。标样为国际标准物质 Urea, $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}} = (-45.38 \pm 0.17) \text{‰}$ 。主要测试过程为: 用百万分之一电子天平称取 0.15~0.2 mg 处理好的样品, 密封于直径为 4.5 mm、高 6 mm 的锡杯内; 将装有样品的锡杯放入进样器内, 测定各样本的稳定碳同位素丰度值 $\delta^{13}\text{C}$ 。基于年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值计算水分利用效率(intrinsic water use efficiency, WUE_i), 公式如下:

$$\Delta = (\delta^{13}\text{C}_a - \delta^{13}\text{C}_p) / (1 + \delta^{13}\text{C}_p / 1000) \quad (1)$$

$$C_i / C_a = (\Delta - a) / (b - a) \quad (2)$$

$$\text{WUE}_i = A/g = C_i / C_a \times 0.625 \quad (3)$$

式中: $\delta^{13}\text{C}_a$ 是大气 CO_2 中碳同位素值; $\delta^{13}\text{C}_p$ 是样品中碳同位素值; a 为 CO_2 通过气孔扩散时的同位素分馏系数, 取值为 4‰; b 为酶的碳固定引起的分馏系数, 取值为 27‰; C_i 和 C_a 为植物叶片气孔内、外的 CO_2 浓度; A 为植物叶片对 CO_2 的同化速率; g 为植物叶片气孔导度^[6]。

1.4 气候资料和统计方法

气象资料选用中国气象数据网(<http://data.cma.cn>) 大连气象台 1950—2010 年的气温、降水记录等; 大气 $\delta^{13}\text{C}$ 年记录数据为南极冰芯测量值^[6,19], 其中 2004—2010 年的 $\delta^{13}\text{C}_a$ 值根据 1951—2003 年数据拟合的方程计算; 大气 CO_2 浓度数据源自 Earth Policy Institute(<http://www.earthpolicy.org/index>)。

潜在蒸发量的计算公式如下:

$$E = \sum_{i=1}^{i=12} 0.0018 \times (25 + T)^2 \times (100 - H)$$

式中: T 为月均温; H 为相对湿度。

伊万诺夫湿度指数(K)^[20]的计算公式如下:

$$K = P/E$$

K 已经被用于中国的生物地理的植被分区。 $K < 0.13$ 、 $0.13 < K < 0.3$ 、 $0.3 < K < 0.6$ 、 $0.6 < K < 1.0$ 和 $1.0 < K$ 分别代表极端干旱(沙漠)、干旱(半沙漠)、半干旱(草原)、半湿润(森林和草原)和湿润(森林)的气候(环境)条件。

由于本研究选择上年 11 月至当年 10 月为树木的一个生长年份, 树木年轮宽度年表子样本信号强度(subsample signal strength, SSS, 一般为 0.80~0.85) 大于 0.80 的年份为 1954 年(表 1)。所以, 本文中 1954—2010 年为轮宽年表主要对比分析时间段, 树木年轮稳定同位素以 1951—2010 年作为气候对比分析时间段。

受树木自然生长的影响, 所测年轮宽度和 $\delta^{13}\text{C}$ 数据存在自相关^[17], 在统计单个树木的年轮宽度、 $\delta^{13}\text{C}$ 和水分利用效率与气象因子的关系时, 选用一阶差的方法统计它们之间的相关关系。

2 结果与分析

2.1 树木年轮宽度及年表特征

样本量满足复本原理^[17], 样本的平均敏感度和平均相关系数均较高。去趋势拟合的必然结果是各种年表的平均值和中位数均接近于 1.3 种年表中 STD 年表的一阶自相关系数与标准差较大, ARS 年表平均敏感度较小, 而 RES 年表恰好相反, 定量说明 STD 保留了较多的低频振荡信息^[21], RES 年表保留了较多的高频振荡信息。ARS 年表的各种统计量接近于 STD 年表。样本的总体代表性(expressed population signal, EPS) 是度量是否有足够样本量的一个指标。一般将 EPS 的阈值定为 0.85^[22]。本研究 EPS>0.8 和 SSS>0.8 的起始年份分别为 1958 和 1954 年。共同区间分析中, 所有样本间的平均相关系数、不同树木之间的平均相关系数、同一棵树不同样本之间的平均相关系数、信噪比、样本量总体代表性、第一主分量所占总方差量的百分比等统计量的值越大, 表示序列的共性越强。说明在去趋势序列中较多的低频变化是非同步的, 样本群体的同步变化主要由气候要素年际间的高频变化造成。

2.2 区域气候变化及其对树木径向生长的影响

本区 1951—2010 年间的年平均气温为 10.7℃, 年降水量 618.7 mm(主要集中于 6—9 月), 期间的年平均气温呈增长趋势, 平均每 10 年升高 0.207

℃ ($P < 0.01$) ,年降水量变化总体呈下降趋势 (年) 潜在蒸发量增加显著,但近年有所下降.大连地区 1951—2010 年间的平均相对湿度为 65.8% ,期间的相对湿度呈显著下降趋势 ($P < 0.05$) ,但最近几年有些回升.研究期间的区域平均伊万诺夫湿度指数 (K) 在 0.24~1.40 ,平均为 0.72 ,显示区域气候为半湿润气候类型并呈显著下降趋势 ($P < 0.05$) . K 指数变化趋势在近几年已低于 0.60 ,表明当地气候已转入半干旱气候类型 地区的干旱化趋势显著.综合结果显示 ,该地区降水适中 ,升温显著 ,暖干化趋势明显 (图 1) .

温度与年轮宽度相关不显著,但春夏季高温 (6—7 月) 与树木生长呈负相关,冬春季,尤其是 1—2 月温度与树木生长呈正相关.各月降水 (除 1 月和 10 月外) 与年轮宽度变化呈正相关,并在 5 月达显著水平 ($P < 0.05$) ,而且 2—5 月降水与年轮的相关性达到极显著水平 ($P < 0.01$) .虽然 8、9 月降水与年轮变化的正相关不显著,但 8—9 月的总降水量与年轮变化呈显著相关 ($P < 0.05$) . 1954—2010 年 (上年 11 月至当年 10 月) 月均温度、月降水和月均温度+月降水分别可以解释 21.3%、30.1% 和 46.1% 的树木径向生长变化.研究区 1—5 月相对湿度与年轮宽度变化的关系不明显,6—12 月各月相对湿度

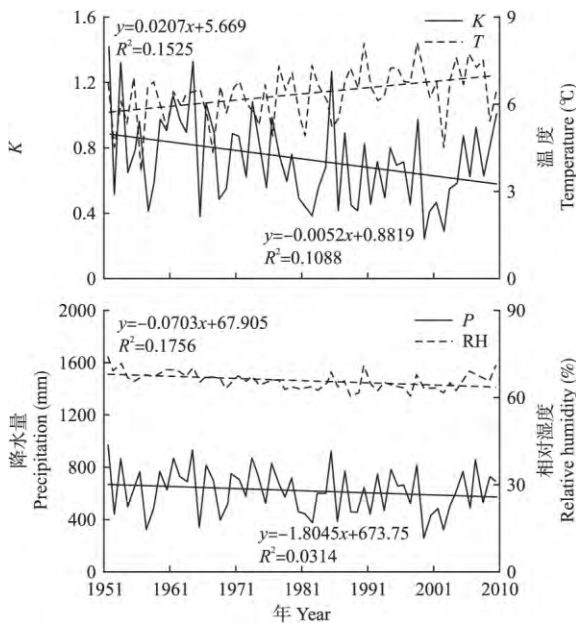


图 1 大连 1951—2010 年温度 (T)、伊万诺夫湿润度指数 (K)、降水量 (P)、相对湿度 (RH) 的变化 (折线) 及趋势 (直线)

Fig.1 Variation (curves) and their trends (lines) of temperature (T), K moisture index, precipitation (P) and relative humidity (RH) during 1951—2010 in Dalian.

与年轮宽度呈正相关,且 6 月达到显著水平 ($P < 0.05$) ,6—11 月,两者之间的正相关逐渐减弱. K 值与所测黑松年轮宽度相关不明显 ($r_{\text{阶段}} = -0.161$, $P > 0.05$) .

2.3 黑松年轮 $\delta^{13}C$ 及其与气候的关系

本研究中树轮 $\delta^{13}C$ 序列没有因幼龄效应和 CO_2 浓度升高而表现出明显的趋势变化 (图 2) $\delta^{13}C$ 值在 $-25\text{‰} \sim -29\text{‰}$. 所测 4 条同位素序列 (图略) 均呈不显著递减变化.本研究 4 棵树的原木同位素变化一致 ($P < 0.01$) ,其第一、第二主成分分别可以解释 58.3% 和 21.0% 的变化,表明数据的稳定性和可靠性.年轮宽度与年轮 $\delta^{13}C$ 之间的负相关不显著.

温度与黑松年轮 $\delta^{13}C$ 的相关性仅在 6、8 月达到显著水平 ($P < 0.05$) .不显著相关系数呈明显的季节变化 (图 3): 3—9 月的月温度、平均温度与树木年轮 $\delta^{13}C$ 呈正相关; 生长季前期,尤其 12 月至次年 2 月,与树木年轮 $\delta^{13}C$ 呈负相关,10—11 月的温度也与树木年轮 $\delta^{13}C$ 变化呈负相关,说明生长后期温

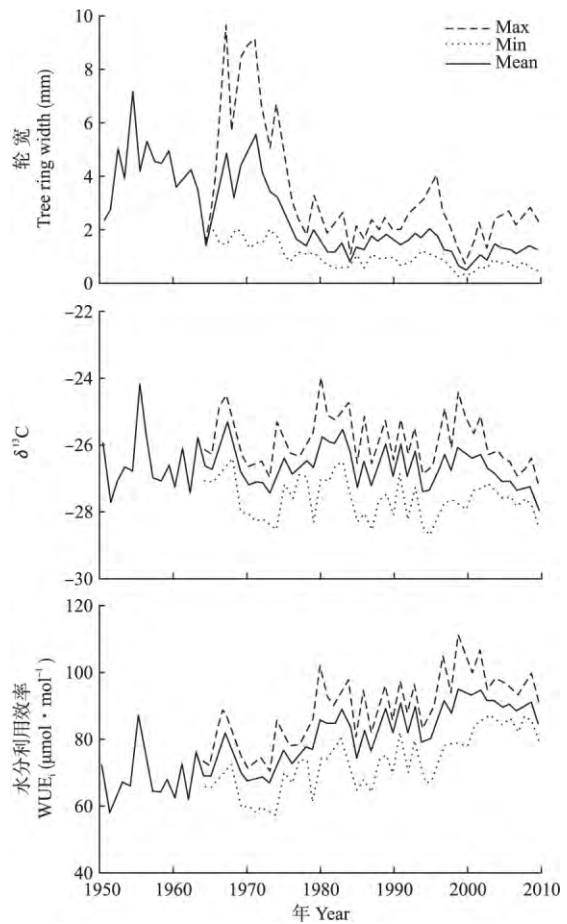


图 2 树木年轮宽度、年轮稳定碳同位素比率 ($\delta^{13}C$) 和水分利用效率 (WUE_i) 的变化

Fig.2 Variation of tree ring width, $\delta^{13}C$ and WUE_i .

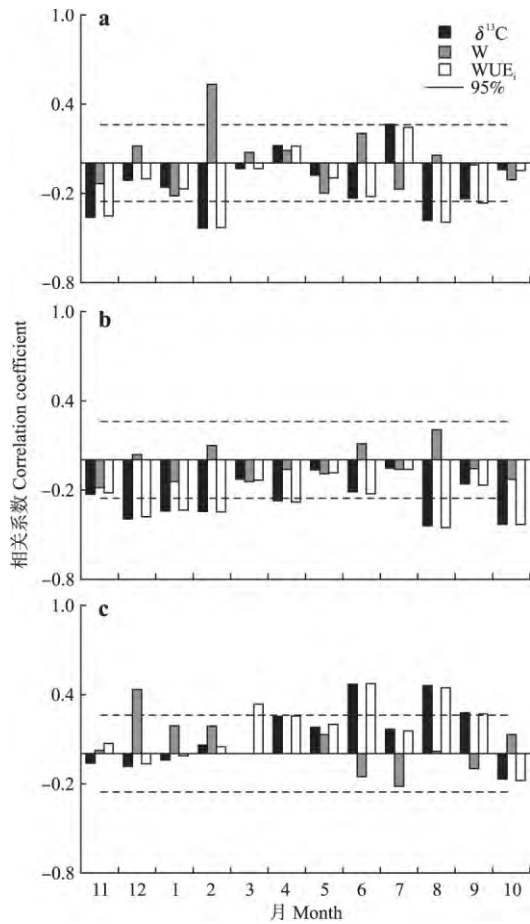


图3 1951—2010年的降水(a)、相对湿度(b)和温度(c)与树木年轮宽度(W)、年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 和水分利用效率(WUE_i)一阶差间的相关关系

Fig.3 Correlations between the first difference variables of precipitation (a), relative humidity (b), and temperature (c) from 1951–2010, and the first difference variables of tree ring width (W), tree ring $\delta^{13}\text{C}$ and WUE_i , respectively.

度至冬季高温对树木稳定碳同位素分馏不利。除7、11月外,其余各月降水与黑松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 变化基本呈负相关,并在5、8和10月达显著水平($P < 0.05$);相对湿度与黑松树木年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 基本呈负相关(11月除外)其中,12、1、8、10月的相对湿度与年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 显著相关($P < 0.05$)。各月温度、降水、相对湿度和温度+降水分别可以解释36.0%、42.2%、54.3%和61.7%的黑松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 变化。 K 与所测黑松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 呈显著负相关($r_{\text{一阶差}} = -0.280$, $P < 0.05$)。

2.4 树木水分利用效率的变化

研究区黑松的水分利用效率(图2)在58~111 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,均呈极显著上升趋势($P < 0.01$)。1950—2010年黑松水分利用效率平均增加了28.12 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,年均增加率为0.461 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。所有样本树所反映的黑松水分利用效率变化极

其一致(图1),第一主成分可以解释98.7%的共同变化。近半个世纪以来,随着树龄的增加,黑松水分利用效率呈增加趋势。这种增加受 CO_2 浓度增加影响并与干旱化有关,如 K 值与所测黑松水分利用效率显著负相关($r_{\text{一阶差}} = -0.304$, $P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 树木生长和稳定同位素分馏的水热调控

大连地区冬季高温有利于黑松树木越冬,而且生长季后期(10—11月)温度影响树木生长季的长短:高温生长季延长,反之缩短。本研究结果显示,全球性的气温升高(冬季表现尤为显著)有益于黑松生长。降水对黑松的径向生长在全年均呈积极效应,可促进生长:冬季降水(雪)可以起到覆被作用,减少低温对幼细根的伤害,也可减少土壤蒸散,保持和增加土壤水分,以利于生长季初期的水分供给。这与辽宁地区油松、樟子松的研究结果^[23-24]类似。在降水丰沛的7、8月,降水的正效应减弱。相对湿度可综合反映环境的温度和降水情况,本研究区生长季及其后期空气湿度与黑松树木生长存在至关重要的联系。

在良好而稳定的生长环境中,树木年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的变动较小。 $\delta^{13}\text{C}$ 值微小的差别也可反映树木的生理活动及所在生长环境的差异^[25]。区域气候变化和水热循环影响黑松树木年轮中的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化。温度与黑松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的关系在有些月份不显著,但是相关关系存在明显的季节变化。随降水量增加,我国东北地区大部分植物的水分利用效率有不同程度的降低^[26]。这种梯度变化与本研究结果一致。相对湿度与树木年轮稳定碳同位素变化的关系密切。2000年以前 $\delta^{13}\text{C}$ 没有随年龄而明显变化的趋势。

3.2 水分利用效率增加的环境效应

基于树木年轮稳定碳同位素的水分利用效率(WUE_i)可反映树木内部调节碳吸收和水分散失的长期趋势,体现树木对生境的一种适应策略。因此,生境不同,水分利用效率也有所不同。

温度对水分利用效率的影响非常复杂,主要体现在植物的光合作用和蒸腾作用两个方面,不同类型植物有所差别^[27-28]:气温通过影响光合速率进而影响干物质的累积;也会通过影响植物叶片气孔导度和土壤蒸发速率,从而影响植物群体水平的蒸发蒸腾过程^[29-32]。一定范围内温度升高,叶片气孔导度增加,净光合速率的增幅大于蒸腾速率的增幅,造成水分利用效率提高;反之,温度过高可增加水分蒸

散,导致水分利用效率降低^[33]。

黑松自身的水分利用效率提高,不仅是由于CO₂含量提高,而且水分利用效率与冷暖、干湿变化关系密切(图3)。结果显示,随着温度升高,气候暖干化加剧,植物的水分利用效率也升高。一般认为,在温度较低时,光合速率随温度的升高而增大^[34]。这是植物应对变暖和CO₂浓度升高的一种初期响应;但当升温超过适宜温度后,高温会使酶失去活性,光合速率反而会减小^[34]。本研究中,年轮宽度变化并没有显示其生长明显增加。有研究认为,长期高温环境会增强植物对温度升高的适应性,从而导致温度升高对光合作用的作用并不明显^[35],暗示虽然变暖使区域主要树种的水分利用效率提高,但这种提高在部分树种的生长过程中,并不能体现出生物量的增加和生长的加快。

降水增加可使空气湿度、土壤含水量增加,植物叶片气孔导度增大、蒸腾速率增强,从而降低水分利用效率^[25]。干旱可使植物保持较高的水分利用效率,以降低水分亏缺的影响,增强干旱条件下对水分的竞争能力^[36-39]。这也是本研究中随着气候暖干化加剧,黑松的水分利用效率逐渐升高的原因。但是,由于树木水分利用效率对应环境的干旱程度上存在特定的阈值,干旱环境下水分利用效率升至一定水平后必然下降^[24,37,40]。再加上温度、干旱、养分限制因素等的增加,植物适应变化环境的缺欠会减缓或抑制生长^[5],使干旱导致的水分利用效率提高本身并不足以增加树木的生长。而是迫使树木在对水分长期的适应过程中形成相对稳定的生理特征和群落结构特征发生改变,并调整相应的水分利用策略。所以在暖干化的气候环境背景下,迫使我们从宏观生态学的角度,不断根据干湿变化调控环境与森林之间的响应和适应^[26],尤其针对“城市热岛”胁迫下的城市环境。

致谢 感谢李涛、彭俊杰在树木年轮宽度测量和稳定同位素测试中的工作。

参考文献

- [1] McPherson EG, Simpson JR, Xiao Q, et al. Million trees Los Angeles canopy cover and benefit assessment. *Landscape & Urban Planning*, 2011, **99**: 40-50
- [2] Roy S, Byrne J, Pickering C. A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2012, **11**: 351-363
- [3] Chen Z, He X, Cui M, et al. The effect of anthropogenic activities on the reduction of urban tree sensitivity to climatic change: Dendrochronological evidence from Chinese pine in Shenyang City. *Trees: Structure and Function*, 2011, **25**: 393-405
- [4] Leavitt SW, Wright WE, Long A. Spatial expression of ENSO, drought, and summer monsoon in seasonal $\delta^{13}\text{C}$ of ponderosa pine tree rings in southern Arizona and New Mexico. *Journal of Geophysical Research*, 2002, **107**: 43-49
- [5] Peñuelas J, Canadell JG, Ogaya R. Increased water-use efficiency during the 20th century did not translate into enhanced tree growth. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, **20**: 597-608
- [6] McCarroll D, Loader NJ. Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews*, 2004, **23**: 771-801
- [7] Farquhar GD, Ehleringer JR, Hubick KT. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1989, **40**: 503-537
- [8] Bacon M. *Water Use Efficiency in Plant Biology*. Oxford: Blackwell, 2004
- [9] Chen T (陈拓), Qin D-H (秦大河), He Y-Q (何元庆), et al. The pattern of stable carbon isotope ratios in *Sabina przewalskii*. *Journal of Glaciology and Geocryology* (冰川冻土), 2002, **24**(5): 571-573 (in Chinese)
- [10] Qian J, Lv J, Tu Q, et al. Reconstruction of the climate in the Tianmu Mountain area, Zhejiang Province, in the last 160 years by $\delta^{13}\text{C}$ sequence of tree ring α -cellulose. *Science China Earth Sciences*, 2002, **45**: 409-419
- [11] Xu H (徐海), Hong Y-T (洪业汤), Zhu Y-X (朱咏焯), et al. Information on climate change recorded in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ series of *Pinus koraiensis* tree ring cellulose in Anto area. *Geology Geochemistry* (地质地球化学), 2002, **30**(2): 59-65 (in Chinese)
- [12] Deng Z-W (邓自旺), Qian J-L (钱君龙), Tu Q-P (屠其璞), et al. Effects of environmental factors on $\delta^{13}\text{C}$ azimuth distribution in *Cryptomeria fortunei* tree ring in Tianmu mountain regions. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2003, **27**(1): 93-98 (in Chinese)
- [13] Liu X-H (刘晓宏), Qin D-H (秦大河), Shao X-M (邵雪梅), et al. Stable carbon isotope of *Abies spectabilis* from Nyingchi County of Tibet Autonomous Region and its response to climate change. *Journal of Glaciology and Geocryology* (冰川冻土), 2002, **24**(5): 574-578 (in Chinese)
- [14] Stokes MA, Smiley TL. *An Introduction to Tree Ring Dating*. Chicago, IL: The University of Chicago Press, 1968
- [15] Holmes RL. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, **43**: 69-78
- [16] Cook ER. *A Time-series Analysis Approach to Tree-ring Standardization*. Tucson: PhD Thesis. Tucson, AZ: University of Arizona, 1985
- [17] Fritts HC. *Tree Rings and Climate*. London: Academic Press, 1976
- [18] Loader NJ, Robertson I, McCarroll D. Comparison of stable carbon isotope ratios in the whole wood, cellulose and lignin of oak tree-rings. *Palaeogeography, Palaeo-*

- climatology, Palaeoecology*, 2003, **196**: 395–407
- [19] Francey RJ, Allison CE, Etheridge DM, et al. A 1000-year high precision record of $\delta^{13}\text{C}$ in atmospheric CO_2 . *Tellus*, 1999, **51**: 170–193
- [20] Zhang X-L (张先亮), He X-Y (何兴元), Chen Z-J (陈振举), et al. Responses of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* radial growth to climate warming in Great Xing'an Mountains: A case study in Mangui. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2011, **22** (12): 3101–3108 (in Chinese)
- [21] Cook ER, Kairiukstis LA. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Dordrecht: Kluwer Academic, 1990
- [22] Wigley T, Briffa KR, Jones PD. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1984, **23**: 201–213
- [23] Chen Z, Sun Y, He X, et al. Chinese pine tree ring width chronology and its relation to climate conditions in the Qianshan Mountains. *Frontiers of Forestry in China*, 2008, **3**: 381–392
- [24] Song L, Zhu J, Li M, et al. Intrinsic water use efficiency in wet and dry years at young and old plantations of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in semiarid China. *Journal of Forest Research*, 2015, **20**: 263–271
- [25] Farquhar GD, O'Leary MH, Berry JA. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1982, **9**: 121–137
- [26] Su B (苏波), Han X-G (韩兴国), Li L-H (李凌浩), et al. Response of $\delta^{13}\text{C}$ value and water use efficiency of plant species to environment gradient along the grassland zone of Northeast China transect. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, 2000, **24**(6): 648–655 (in Chinese)
- [27] Ben-Asher J, Garcia AGY, Hoogenboom G. Effect of high temperature on photosynthesis and transpiration of sweet corn (*Zea mays* L. var. *rugosa*). *Photosynthetica*, 2008, **46**: 595–603
- [28] Liu Y-J (刘玉洁), Tao F-L (陶福祿). Response of crop water use efficiency to elevated temperature and CO_2 concentration: A review. *Progress in Geography (地球科学进展)*, 2013, **32**(3): 416–424 (in Chinese)
- [29] Avola G, Cavallaro V, Patane C, et al. Gas exchange and photosynthetic water use efficiency in response to light, CO_2 concentration and temperature in *Vicia faba*. *Journal of Plant Physiology*, 2008, **165**: 796–804
- [30] Collino DJ, Dardanelli JL, De Luca MJ, et al. Temperature and water availability effects on radiation and water use efficiencies in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 2005, **45**: 383–390
- [31] Gratani L, Varone L, Crescente MF. Photosynthetic activity and water use efficiency of dune species: The influence of air temperature on functioning. *Photosynthetica*, 2009, **47**: 575–585.
- [32] Zhou X, Ge ZM, Kellomaki S, et al. Effects of elevated CO_2 and temperature on leaf characteristics, photosynthesis and carbon storage in aboveground biomass of a boreal bioenergy crop (*Phalaris arundinacea* L.) under varying water regimes. *Global Change Biology Bioenergy*, 2011, **3**: 223–234
- [33] Schleser GH. Investigations of the $\delta^{13}\text{C}$ pattern in leaves of *Fagus sylvatica* L. *Journal of Experimental Botany*, 1990, **41**: 565–572
- [34] Erice G, Sanz-Saez A, Aranjuelo I, et al. Photosynthesis, N_2 fixation and taproot reserves during the cutting regrowth cycle of alfalfa under elevated CO_2 and temperature. *Journal of Plant Physiology*, 2011, **168**: 2007–2014
- [35] Sarieva GE, Kenzhebaeva SS, Lichtenthaler HK. Adaptation potential of photosynthesis in wheat cultivars with a capability of leaf rolling under high temperature conditions. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2010, **57**: 28–36
- [36] Ogaya R, Peuelas J. Comparative field study of *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia*: Photosynthetic response to experimental drought conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, **50**: 137–148
- [37] Gao Y, Zhu X, Yu G, et al. Water use efficiency threshold for terrestrial ecosystem carbon sequestration in China under afforestation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, **195/196**: 32–37
- [38] Picotte J, Rosenthal D, Rhode J, et al. Plastic responses to temporal variation in moisture variability: Consequences for water use efficiency and plant performance. *Oecologia*, 2007, **153**: 821–832
- [39] Raschke K, Resemann A. The midday depression of CO_2 assimilation in leaves of *Arbutus unedo* L.: Diurnal changes in photosynthetic capacity related to changes in temperature and humidity. *Planta*, 1986, **168**: 546–558
- [40] Leavitt SW. Seasonal $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ changes in tree rings: Species and site coherence, and a possible drought influence. *Canadian Journal Forest Research*, 1993, **23**: 210–218

作者简介 阮亚男,女,1975年生,博士,副教授,主要从事植物生态学领域的研究和教学工作。E-mail: ruanyanan@163.com

责任编辑 杨弘

阮亚男,萧英男,杨立新,等. 大连市黑松树木水分利用效率的环境响应. *应用生态学报*, 2017, **28**(9): 2849–2855

Ruan Y-N, Xiao Y-N, Yang L-X, et al. Environmental response of intrinsic water use efficiency of *Pinus thunbergii* in Dalian City, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(9): 2849–2855 (in Chinese)