

大兴安岭北部樟子松树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的高向变化及其与树轮宽度的关系*

商志远^{1**} 王建¹ 张文^{1,2} 李彦彦¹ 崔明星^{3,4} 陈振举⁴ 赵兴云^{5,6}

(¹南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; ²山西农业大学信息学院, 山西太谷 030800; ³中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; ⁴中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; ⁵山东省水土保持与环境保育重点实验室, 山东临沂 276000; ⁶临沂大学资源环境学院, 山东临沂 276000)

摘要 通过对大兴安岭北部樟子松树轮样品高向的年轮宽度和稳定碳同位素比率($\delta^{13}\text{C}$)进行测定, 分析了高向上 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化特征及其与年轮宽度的关系。结果表明: 在木质部全轮、早材和树皮内皮3种成分中, 样品高向 $\delta^{13}\text{C}$ 均呈现由顶部至基部先显著增加, 在冠层底部达到最大值, 再向下迅速减少至谷值的变化趋势。早晚材平均宽度比由基部至顶部增大。高向上 $\delta^{13}\text{C}$ 年均值序列与轮宽年均值序列呈现较为明显的反向对应关系, 与早晚材宽度比年均值序列呈现在冠层以上较为一致的变化趋势。样本高向上年轮宽度序列及 $\delta^{13}\text{C}$ 序列均存在不同程度的显著差异, $\delta^{13}\text{C}$ 值的高向变化与年际变化基本处于同一量级。树体高向 $\delta^{13}\text{C}$ 序列逐年变化趋势基本一致, 同一高度层的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列与年轮宽度序列基本呈负相关, 但不同高度的显著性有所差异。

关键词 树轮 碳同位素比率 年轮宽度 樟子松

文章编号 1001-9332(2013)01-0001-09 **中图分类号** S718.45 **文献标识码** A

Vertical variability of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* tree ring $\delta^{13}\text{C}$ and its relationship with tree ring width in northern Daxing'an Mountains of Northeast China. SHANG Zhi-yuan¹, WANG Jian¹, ZHANG Wen^{1,2}, LI Yan-yan¹, CUI Ming-xing^{3,4}, CHEN Zhen-ju⁴, ZHAO Xing-yun^{5,6} (¹College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; ²College of Information, Shanxi Agricultural University, Taigu 030800, Shanxi, China; ³Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; ⁴Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; ⁵Shandong Province Key Laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection, Linyi 276000, Shandong, China; ⁶College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi 276000, Shandong, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(1): 1-9.

Abstract: A measurement was made on the vertical direction tree ring stable carbon isotope ratio ($\delta^{13}\text{C}$) and tree ring width of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in northern Daxing'an Mountains of Northeast China, with the relationship between the vertical direction variations of the tree ring $\delta^{13}\text{C}$ and tree ring width analyzed. In the whole ring of xylem, earlywood (EW) and bark endodermis, the $\delta^{13}\text{C}$ all exhibited an increasing trend from the top to the base at first, with the maximum at the bottom of tree crown, and then, decreased rapidly to the minimum downward. The EW and latewood (LW) had an increasing ratio of average tree ring width from the base to the top. The average annual sequence of the $\delta^{13}\text{C}$ in vertical direction had an obvious reverse correspondence with the average annual sequence of tree ring width, and had a trend comparatively in line with the average annual sequence of the tree ring width ratio of EW to LW above tree crown. The variance analysis showed that there existed significant differences in the sequences of tree ring $\delta^{13}\text{C}$ and ring width in vertical direction, and the magnitude of vertical $\delta^{13}\text{C}$ variability was basically the same as that of the inter-annual $\delta^{13}\text{C}$ variability. The year-to-year variation trend of the vertical $\delta^{13}\text{C}$ sequence was

* 国家自然科学基金项目(41271204, 41072139)和江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CX09B-298Z)资助。

** 通讯作者. E-mail: szy268@163.com

2012-05-01 收稿, 2012-11-01 接受.

approximately identical. For each sample, the $\delta^{13}\text{C}$ sequence at the same heights was negatively correlated with the ring width sequence, but the statistical significance differed with tree height.

Key words: tree ring; $\delta^{13}\text{C}$; ring width; *Pinus sylvestris* var. *mongolica*.

树轮稳定碳同位素年表具有定年准确、分辨率高等优势。与年轮宽度或密度指标相比,其为获取研究点代表性的稳定同位素信号所需的树轮样本量要少得多^[1],尤其在树木生长受多种限制因子影响的地区,更适于利用树轮稳定碳同位素比率($\delta^{13}\text{C}$)的年际序列进行气候重建^[2-3]。因而,树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 指标在古气候重建、同位素水文学、植物生理生态及环境污染等领域的研究中得到日益广泛的应用^[4]。目前在规范的树轮稳定同位素研究中,通常在树体距离地面0.5~1.5 m高度处取样,但有学者质疑年龄效应是否会影响树轮 $\delta^{13}\text{C}$,并认为其同时也可能与同位素幼龄效应密切相关。在利用树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 重建某区域气候或环境要素时,同一树种同一个体的不同取样高度的 $\delta^{13}\text{C}$ 存在差异,将对气候或环境重建所得到的结果造成不同程度的不确定性^[1]。一些树轮高向 $\delta^{13}\text{C}$ 的研究表明,随着树高的增长,树轮碳同位素分馏出现不同程度的线性下降,其中半数研究达到极显著水平^[5-9]。在过去的30年中,已有很多文献探讨了树木高度与稳定碳同位素分馏的关系,但由于控制高向生长因素的复杂性,树木高度与碳同位素分馏特征之间的关系仍不十分清楚^[10-13],而且径向和高向生长序列的综合对比分析,以及高向生长对环境变化的响应等方面的研究相对薄弱^[14]。此外,树木单轮内存在显著的稳定碳同位素比率($\delta^{13}\text{C}$)变化^[15-16],这与树木不同材质的形成时段所处的环境条件密切相关。目前,从树轮早、晚材宽度比例在高向上变化的角度来分析树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值高向变化的研究仍然缺乏。本研究通过分析樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)同一个体不同树高处 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化特征,比较早、晚材材质比例与 $\delta^{13}\text{C}$ 的关系在高向上的变化,以便今后对树轮稳定碳同位素的高向迁移机理进行深入探讨。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

采样点地处大兴安岭林区伊勒呼里山北坡的黑龙江省大兴安岭地区新林林业局,平均海拔670 m,在森林立地类型划分上属于伊勒呼里山北坡立地亚区^[17],北界为黑龙江支流呼玛河上游,南界为伊勒

呼里山山脊,山岭坡缓谷宽,丘陵连绵起伏,河流纵横密布。该区属寒温带大陆性季风气候,有明显的山地气候特点。据新林气象站(51°42' N, 124°20' E, 海拔494.6 m)1972年1月建站以来的气象数据统计,该区年均温-2.54 °C,1月均温-25.5 °C,7月均温18.1 °C,年均降水量519.4 mm,降水多集中在6月下旬至9月中旬,年平均日照时数2383.6 h,无霜期90~100 d。年总辐射量4200 MJ·m⁻²,年均蒸发量952.7 mm,≥10 °C积温1430 °C,年平均风速2~3 m·s⁻¹。土壤主要为山地棕色针叶林土和沼泽土。森林树种组成有兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、樟子松、云杉(*Picea* spp.)和桦树(*Betula* spp.)等,其中,樟子松多分布在海拔600 m以下的低山上部,为小块纯林或零星散生,并伴有少量落叶松混生^[17-18]。

1.2 样品采集与处理

本研究所用样本为两株樟子松(编号BZ4-09和BZ4-10),于2008年7月在新林林业局碧洲林场后山采集。两株样树所处的郁闭度在0.4~0.5,每株树均从距地面0.2 m处开始截取第1个树盘,然后向上每隔2 m横向截取1个树盘,直到树冠顶部(距地面高度分别为2.2 m,4.2 m,6.2 m,…,编号分别为BZ4-09a,BZ4-09b,…,BZ4-09g,共7个盘,以及BZ4-10a,BZ4-10b,…,BZ4-10h,共8个盘,均剔除最顶端2~3 m的部分)。此外,分别在两株树距地面1.2 m左右单独横向截取一个树盘作为胸径高度的样本(编号分别为BZ4-09A和BZ4-10A),样本采集前做好方位标识。在林场后山采集31株樟子松的71根树芯用于交叉定年。将树盘和树芯样本运回实验室,置于阴凉通风处晾干,用干砂纸打磨样本表面至早晚材界限清晰。利用AcuRite年轮宽度仪的MeasureJ2X测量系统(VoorTech咨询公司,美国)对树盘(芯)的逐年生长轮按北(N)、东(E)、南(S)和西(W)4个方位进行宽度测量(南北两方位分早、晚材进行宽度测量),测量精度0.001 mm,并利用COFECHA程序对宽度序列进行交叉定年检验,样树的基本信息见表1。

1.3 研究方法

1.3.1 样本剥取 在体式显微镜下,以光滑的玻璃垫板为衬垫,用手术刀对已做好标识的各高向树盘

表 1 样树的基本信息

Table 1 Basic information of the tree samples

树盘编号 Sample No.	地理位置 Location	海拔 (m) Altitude (m)	树龄 (a) Tree age (a)	坡向 Aspect (°) Slope (°)	坡度 Slope (°) Tree height (m)	树高 Tree height (m)	胸径 DBH (cm)	树冠高度 Crown height (m)
BZ4-09	51°57' N, 124°36' E	497	120	195	8	17	43.6	9
BZ4-10	51°56' N, 124°36' E	494	122	213	11	18	51.9	7

均逐年剥取南(S)方向的6年(2003—2008年)样品(按照5°~10°的范围,即以北方向为0°,剥取范围限定在180°±5°内,其中2003—2007年为全年材质,2008年为早材材质),在电子天平上称量,确保每年的样品不少于0.2 g.对两株树1.2 m以外的其余高向树盘南向靠近形成层部位的树皮内皮组织进行剥离,确保质量不少于0.2 g.所有剥离的样品装入牛皮纸袋并标识,50~60 °C烘干,研磨,过60目筛.剥取称量及干燥过程严格规范操作步骤,防止样品间的混淆及外来杂质的混入.

1.3.2 纤维素提取及检验 采用索式抽提法^[19]对样品进行综纤维素提取.为保证试验的精度,抽样选取所提取的纤维素样品在傅里叶变换红外光谱仪(FTIR NEXUS670型,Nicolet公司,美国)上进行红外光谱扫描分析,以检验利用此流程提取的综纤维素纯度是否符合标准.参考文献[20],比较波长在1736和1372 cm⁻¹等综纤维素特征吸收峰处的透射率波形,结果显示波形过渡平滑无尖峰,表明此流程提取的纤维素样品纯度符合标准,可满足本研究的要求.

1.3.3 样品 $\delta^{13}\text{C}$ 测定 将提取好的综纤维素样品送入同位素比例质谱仪(Thermo Finnigan-Deltaplus XP,Finnigan MAT公司,美国)自动进样器,以测定样品的碳同位素 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 值,采用尿素标准样(URE-A, $\delta^{13}\text{C}=-49.1\text{\textperthousand}$)进行校验,测定结果相对于PDB标准表示为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (简写为 $\delta^{13}\text{C}$),计算公式^[21]:

$$\delta^{13}\text{C} = [({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{sample}})/({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{standard}}) - 1] \times 1000\text{\textperthousand}$$

整个流程分析误差≤0.15‰.

1.4 数据处理

对两树轮各高度盘2003—2008年的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列进行方差分析.BZ4-09的计算公式为:

$$\begin{aligned} SS_e &= \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^6 (y_{ij} - \bar{y})^2 \\ SS_t &= 6 \times \sum_{j=1}^8 (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \\ SS_T &= \sum_{j=1}^{48} (y_{ij} - \bar{y})^2 \end{aligned}$$

$$F_{\text{BZ4-09}} = (SS_t/7)/(SS_e/40)$$

BZ4-10的计算公式为:

$$SS_e = \sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^6 (y_{ij} - \bar{y})^2$$

$$SS_t = 6 \times \sum_{j=1}^9 (\bar{y}_i - \bar{y})^2$$

$$SS_T = \sum_{j=1}^{54} (y_{ij} - \bar{y})^2$$

$$F_{\text{BZ4-10}} = (SS_t/8)/(SS_e/45)$$

式中: y_{ij} 为各高度的历年 $\delta^{13}\text{C}$ 值; \bar{y}_i 为各高度2003—2008年的平均值; \bar{y} 为总体平均值; i 为高度序号(BZ4-09为*i*=a,A,b,…,g; BZ4-10为*i*=a,A,b,…,h); j 代表年序号($j=1,2,\dots,6$,分别对应2003,2004,…,2008年); SS_e 代表个体内 $\delta^{13}\text{C}$ 高向之间的离差平方和(即年际变异); SS_t 代表 $\delta^{13}\text{C}$ 各高向的平均值对总体平均值的离差平方和(即高向之间的变异); SS_T 代表年际内部的离差平方和(即总变异).

所有数据采用Excel 2003和SPSS 17.0软件进行统计分析,采用Origin 8.0作图.

2 结果与分析

2.1 樟子松树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的统计结果

由表2可以看出,两株样树不同高度的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列极值及平均值均有所不同,而各自的标准差指标在e号盘部位(对应8.2 m)相对较低,而靠近根部的BZ4-09a和A盘,以及BZ4-10A和b盘相对较高.

2.2 樟子松树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的高向变化

由图1可以看出,2003—2008年连续6年间,无论是全年材质的多年值、早材材质,还是树皮内皮成分,两株樟子松样本的树轮高向 $\delta^{13}\text{C}$ 均大致呈现如下变化趋势:由顶部至基部先显著增加,在冠层底部附近达到最大值(BZ4-09e,BZ4-10f),再向下迅速减少至极小值(BZ4-09d,BZ4-10e).

2.3 樟子松树轮的高向宽度序列及 $\delta^{13}\text{C}$ 序列比较

为综合比较年轮宽度及 $\delta^{13}\text{C}$ 两指标序列在高向和年际上的差别,将两样本不同高度盘2003—2007年的年轮宽度序列及 $\delta^{13}\text{C}$ 序列进行单因素方

表 2 2003—2008 年樟子松高向树盘 $\delta^{13}\text{C}$ 的统计结果Table 2 Statistical results of the $\delta^{13}\text{C}$ sequences at different heights of the tree-ring samples (2003–2008)

盘号 Sample No.	全距 Range (‰)	极小值 Minimum (‰)	极大值 Maximum (‰)	平均值 Mean (‰)	标准差 SD (‰)	偏度 Deviation	峰度 Kurtosis
BZ4-09a	3.141	-27.598	-24.457	-26.175	1.065	0.503	0.816
BZ4-09A	3.505	-27.856	-24.351	-25.854	1.306	-0.402	-0.484
BZ4-09b	1.888	-26.117	-24.229	-24.932	0.662	-1.316	1.927
BZ4-09c	1.715	-25.483	-23.768	-24.689	0.695	0.043	-1.907
BZ4-09d	1.763	-26.379	-24.616	-25.758	0.657	1.125	1.073
BZ4-09e	0.843	-24.610	-23.767	-24.226	0.330	0.227	-1.766
BZ4-09f	2.294	-25.930	-23.636	-24.768	0.759	-0.047	1.139
BZ4-09g	1.538	-26.069	-24.531	-25.637	0.657	1.289	0.056
BZ4-10a	1.956	-25.500	-23.544	-24.376	0.696	-0.580	0.379
BZ4-10A	1.955	-25.987	-24.032	-25.096	0.718	0.181	-0.550
BZ4-10b	3.353	-26.366	-23.013	-24.532	1.249	-0.394	-0.839
BZ4-10c	1.861	-26.018	-24.157	-24.953	0.680	-0.411	-0.046
BZ4-10d	2.129	-26.183	-24.054	-25.122	0.857	-0.272	-1.611
BZ4-10e	1.667	-26.713	-25.046	-25.986	0.584	0.546	0.448
BZ4-10f	1.538	-25.643	-24.105	-24.817	0.592	-0.245	-1.627
BZ4-10g	1.730	-25.744	-24.014	-25.105	0.641	1.046	0.672
BZ4-10h	0.809	-26.379	-25.570	-25.953	0.301	0.040	-0.805

表 3 2003—2007 年樟子松不同高度盘的年轮宽度序列及 $\delta^{13}\text{C}$ 序列方差分析Table 3 ANOVA of ring width sequences and $\delta^{13}\text{C}$ sequences at different tree heights (2003–2007)

变异来源 Source of variation			平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F	P
年轮宽度	BZ4-09	I	1990889.90	7	284412.843	7.06	<0.001
Tree-ring width		II	357279.85	4	89319.963	1.07	0.386
	BZ4-10	I	1865561.11	8	233195.139	6.50	<0.001
		II	911469.83	4	227867.456	4.06	0.007
年轮 $\delta^{13}\text{C}$	BZ4-09	I	21.18	7	3.025	6.42	<0.001
Tree-ring $\delta^{13}\text{C}$		II	6.33	4	1.582	1.85	0.141
	BZ4-10	I	9.28	8	1.159	2.51	0.028
		II	4.54	4	1.134	1.89	0.134

I : 高向 Vertical; II : 年际 Interannual.

差分析。结果表明, 樟子松样本 2003—2007 年的年轮宽度和 $\delta^{13}\text{C}$ 序列在不同高度之间均存在差异, 且其差异显著程度都大于相应的年际序列(表 3)。

从两样本树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的高向与年际变化对比来看, 无论是变化幅度还是平均值的最大差值, 二者基本处于同一量级(表 4), 这也说明树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的高向变化的差异不容忽视。

表 4 不同高度盘 $\delta^{13}\text{C}$ 的高向变化与年际变化的对比Table 4 Comparison between height and interannual variations of different height $\delta^{13}\text{C}$ sequences (‰)

项目 Item	变化幅度 Amplitude of variation		均值的最大差值 Maximum difference of mean	
	BZ4-09	BZ4-10	BZ4-09	BZ4-10
高向 Height	0.980 ~ 3.441	1.038 ~ 3.348	1.815	1.610
年际 Interannual	0.843 ~ 3.505	0.809 ~ 3.353	1.696	1.353

2.4 樟子松树轮高向 $\delta^{13}\text{C}$ 序列的相关性

由表 5 可以看出, 除内皮层的高向序列之外, 樟子松树轮所有年份序列之间均呈正相关, 个别年份之间达到显著性水平, 表明树体高向上的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列逐年变化趋势基本一致。而各年份与树皮内皮层的高向序列之间的相关性较弱, 甚至出现负相关, 这可能与内皮层的组织结构和木质部不同有关。

对两样树的同高度树盘 6 年 $\delta^{13}\text{C}$ 序列(2003—2007 年为全年, 2008 年为早材)求相关(表 6), 结果表明, 同一高度两样本的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列均呈正相关, 个别高度上达到显著性水平。这说明两样本在同高度上 $\delta^{13}\text{C}$ 的年际变化趋势基本相同, 反映了共同的外界环境变化, 也意味着在同一生长环境内, 不同个体在同一树高处获取的年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 序列具有较明显的共性特征。

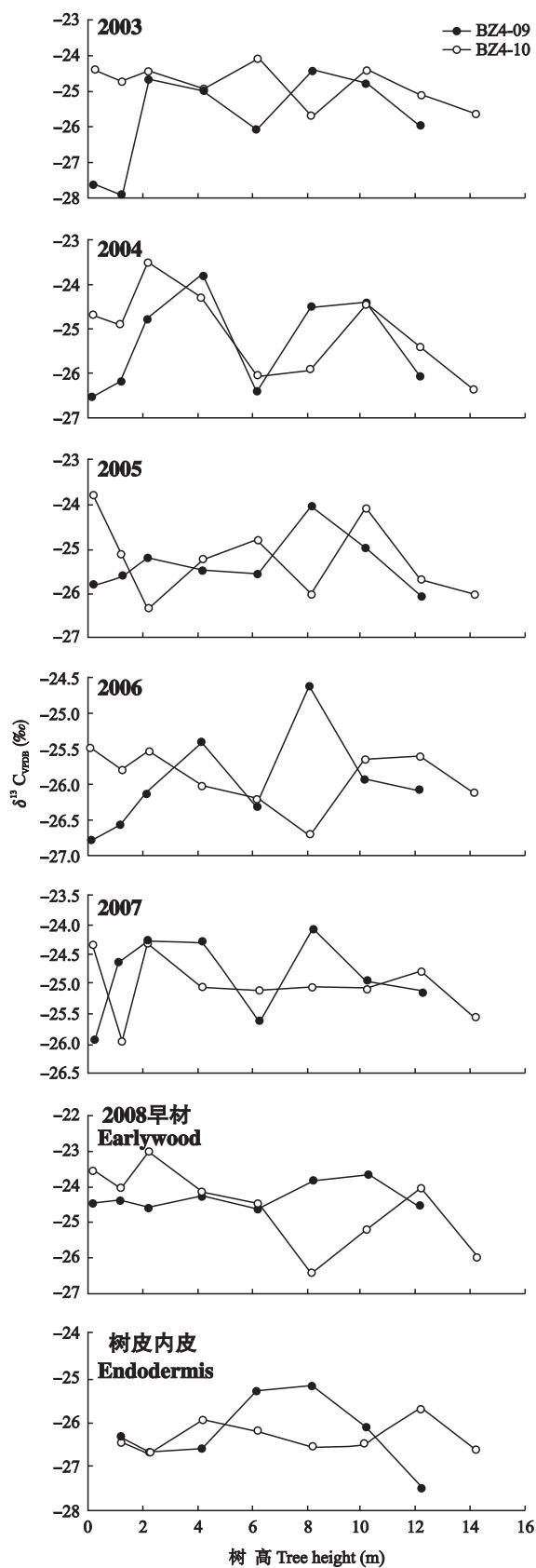


图 1 不同树高樟子松树轮的全轮、早材和树皮内皮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化

Fig. 1 Variation of tree ring $\delta^{13}\text{C}$ values of whole ring, early wood and endodermis at different tree heights.

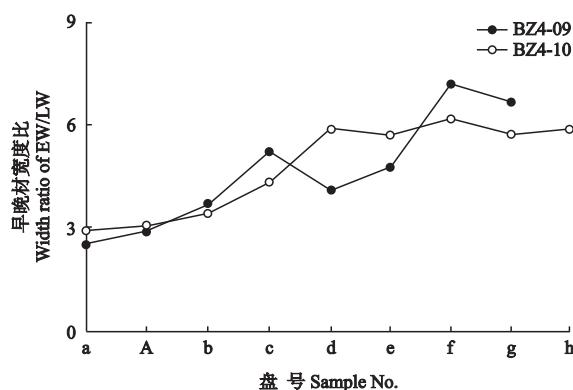


图 2 不同高向盘的早晚材宽度比(南北, 1972—2007 平均值)

Fig. 2 Width ratio of earlywood (EW) to latewood (LW) from 1972 to 2007 in different tree heights (mean value of south radius and north radius).

将两株样树 2003—2007 年全年 $\delta^{13}\text{C}$ 及 2008 年早材 $\delta^{13}\text{C}$ 组成 6 年年际序列, 计算每棵树各自高向树盘年际序列之间的相关系数(表 7). 结果表明, 虽然序列长度仅 6 年, 但两株样树的高向盘之间绝大多数呈正相关, 个别年份之间达到显著性水平. 这说明树体在不同高度上对环境要素的响应基本同步变化. 树木叶片中有机物的碳同位素包含的环境信息在树干中得以保存, 但不同高度的响应程度有所差异.

由图 2 可以看出, 随着树高的增加, 两样本不同高度盘在 1972—2007 年间南北两方向早晚材平均宽度比值增大, 早材所占比例由顶部到基部逐渐减小. 而且两样本均在树干中段(BZ4-09d, BZ4-10e)出现一个极小值, 对应于各自 $\delta^{13}\text{C}$ 的极小值区域, 表明早材占全年轮宽比例和年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值在冠层底部出现谷值.

2.5 樟子松树轮高向宽度序列及 $\delta^{13}\text{C}$ 序列的变化

为了便于比较两样本的高向 $\delta^{13}\text{C}$ 序列、年轮宽度和早晚材宽度比序列, 对两株样树不同高向树盘(A 号盘除外)2003—2007 年的南向宽度取平均值, 组成高向宽度变化序列, 2003—2007 年的南向每年早晚材宽度比取平均值组成高向早晚材宽度比序列, 与 2003—2007 年的高向 $\delta^{13}\text{C}$ 序列对比. 由图 3 可以看出, 随树高增加, 两样本 5 年的宽度平均值基本呈减小—增大—减小—增大, 总体呈上升趋势; $\delta^{13}\text{C}$ 序列随树高增加呈增大—减小—增大—减小, 总体呈下降趋势; 而早晚材宽度比序列与 $\delta^{13}\text{C}$ 序列在树干上半部的变化趋势相吻合, 基本对应各自树冠的底端部位, 树干下半部略有不同, 但未呈现出明

表 5 两样本 2003—2008 年及树皮内皮的 $\delta^{13}\text{C}$ 高向序列的相关系数Table 5 Correlation coefficients of the $\delta^{13}\text{C}$ sequences between years from 2003 to 2008 and endodermis for the two samples

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	树皮内皮 Endodermis
2003		0.468	0.610	0.570	0.302	0.662	0.061
2004	0.836 **		0.144	0.658	0.477	0.702 *	-0.055
2005	0.631	0.586		0.369	0.084	0.180	0.190
2006	0.779 *	0.738 *	0.781 *		0.383	0.776 *	0.168
2007	0.617	0.756 *	0.607	0.712 *		0.470	0.132
2008	0.489	0.619	0.744 *	0.614	0.395		0.294
树皮内皮 Endodermis	0.166	0.034	0.682	0.366	-0.018	0.391	

左下部分为 BZ4-09 号树,右上部分为 BZ4-10 号树 The bottom left and top right represented BZ4-09 and BZ4-10, respectively. * $P<0.05$; ** $P<0.01$. 下同 The same below.

表 6 2003—2008 两样本同一高度盘 $\delta^{13}\text{C}$ 年际序列的相关系数Table 6 Correlation coefficients of the annual $\delta^{13}\text{C}$ sequences between two samples for the same height (2003—2008)

盘号 Sample No.	相关系数 Correlation coefficient
g-g	0.942 **
f-f	0.228
e-e	0.175
d-d	0.567
c-c	0.815 *
b-b	0.630
A-A	0.031
a-a	0.684

显的对应变化趋势。

2.6 樟子松树轮高向宽度序列及 $\delta^{13}\text{C}$ 序列的相关性

为尽可能排除树木自身不同生长阶段特性对气候重建因素的影响,根据两样本的原始宽度测量结果,选取的树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 测定阶段均处于树木生长的稳定期或衰老期。测定结果表明,两样树各自顶端盘的年龄已达到成熟期(BZ4-09g 为 58 a, BZ4-10h 为 67

a),因此 2003—2007 年为树木生长曲线的稳定期,对样本的年轮宽度和 $\delta^{13}\text{C}$ 序列进行高低频分离的去趋势操作的必要性已不大,采用上述两指标的原始序列进行相关分析能够满足研究要求。由表 8 可以看出,绝大多数 $\delta^{13}\text{C}$ 序列与宽度序列呈负相关,个别高度上达到显著性水平,但不同高度的显著性有所不同。说明树木生长的宽度越宽,其对应的树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值越低。树轮宽度和稳定同位素指标能够对外界气候变化做出一致的响应。尤其是 BZ4-09d 盘和 BZ4-10e 盘的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列与年轮宽度序列之间的负相关系数较高,恰好对应各自年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的极小值。

3 讨 论

3.1 树干不同高度的早晚材比例

在每一生长季,树体的不同部位的发育时间不同,高向生长始于树木顶端并逐步向基部扩展^[22]。每年生长季初期,叶芽膨大和伸长后,形成层开始由顶部向基部方向发育,因而树木基部的形成层最后开始分化^[23~25];而生长季结束时,树木基部最老的形成层组织首先休眠,由基部向顶部结束发育^[26]。

表 7 两样本不同高度的 $\delta^{13}\text{C}$ 年际序列的相关系数Table 7 Correlation coefficients of the annual $\delta^{13}\text{C}$ sequences of the two samples for different heights

盘号 Sample No.	g	f	e	d	c	b	A	a
h	0.351	-0.035	0.624	0.670	-0.162	-0.057	-0.207	0.221
g		-0.359	0.112	0.485	0.633	0.779	0.515	0.536
f	0.635		0.370	0.361	0.298	-0.206	0.264	0.421
e	0.807	0.622		0.276	0.189	0.119	-0.343	0.195
d	0.874 *	0.640	0.954 **		0.307	0.106	0.532	0.718
c	0.448	0.692	0.172	0.138		0.823 *	0.729	0.622
b	0.570	0.726	0.565	0.434	0.703		0.525	0.223
A	0.783	0.427	0.800	0.753	0.368	0.390		0.619
a	0.785	0.582	0.856 *	0.883 *	0.265	0.282	0.913 *	

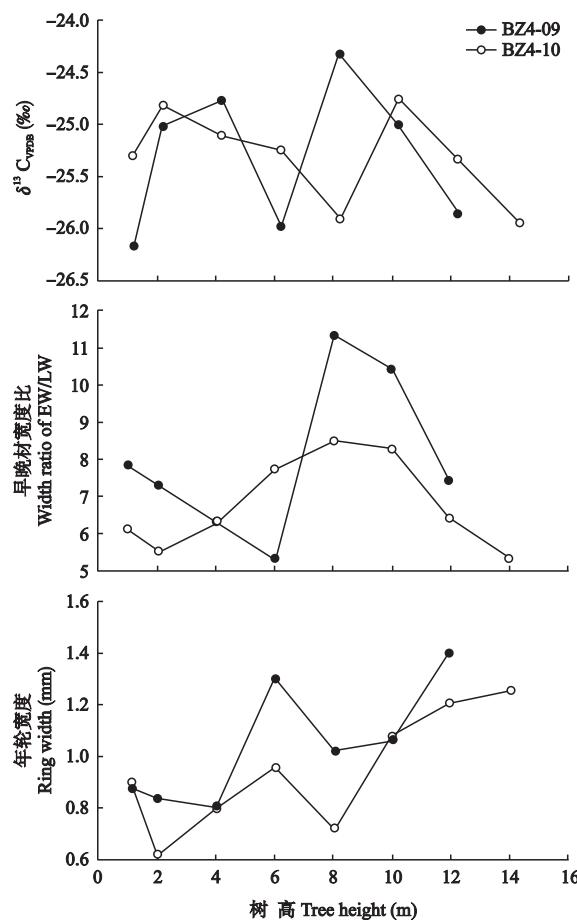


图3 樟子松不同高向盘的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列、年轮宽度序列和早晚材宽度比序列对比(南向, 2003—2007年平均值)

Fig. 3 Sequences of $\delta^{13}\text{C}$ values and ring widths and the width ratios of earlywood (EW) to latewood (LW) at different tree heights (mean values of 2003–2007, south radius).

表8 2003—2007两样本同一高度的 $\delta^{13}\text{C}$ 年际序列与对应树轮宽度序列的相关系数

Table 8 Correlation coefficients between the annual $\delta^{13}\text{C}$ sequences and homologous ring width sequences for the two samples (2003–2007)

盘号 Sample No.	相关系数 Correlation coefficient	
	BZ4-09	BZ4-10
h		-0.722
g	-0.344	-0.966 **
f	-0.445	0.007
e	-0.537	-0.729
d	-0.591	-0.494
c	0.166	-0.247
b	-0.208	-0.786
A	-0.862	-0.087
a	-0.630	-0.125

也就是说,树木基部较顶部的生长活动时期短。结合樟子松高向生长和径向生长之间的差异,表明樟子松的高向生长过程中,早材为高向生长的主要部分,而晚材为径向生长的主要部分。本研究两样本高向

上早晚材平均宽度比值(图2)为南北两方向分别测量后取平均的36年均值,在一定程度上消除了方位因素和年际因素造成的差异,可以视为样本周向的早晚材材质比例在高向上的多年平均变化趋势。两样本在树干中段出现的早晚材宽度比例极小值(BZ4-09为d处,BZ4-10为e处),意味着晚材率的极大值。一般来说,早材 $\delta^{13}\text{C}$ 主要反映了前一年的环境条件及内在水分利用率的变化,而晚材 $\delta^{13}\text{C}$ 主要反映当年的环境条件变化^[27–28]。本研究的两样本在各自树干中部晚材比例增加,同时该部位年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 与年轮宽度之间的负相关性显著提高,很可能指示此两指标对外界气候或环境要素的响应程度在该部位相对明显。同时也表明相对于早材,晚材对气候要素响应程度更为敏感,进而从高向角度支持了该论点。

有研究发现,相对于叶片和茎部,叶芽中的淀粉一般含有较高的 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[28–30],而成年针叶树年内 $\delta^{13}\text{C}$ 值通常是早期时段(早材—早晚材过渡段)高于晚期时段(早晚材过渡段—晚材)^[31]。本研究的两棵树各自顶端盘(BZ4-09g和BZ4-10h)的年龄已达到成熟期,1972年已分别处于各顶端盘形成层年轮形成之后的第22年(BZ4-09g)和第31年(BZ4-10h),早晚材宽度分析所采用的1972—2007年已位于幼龄之后的阶段,年龄差异对高向上早晚材比例的差异影响已不再显著(图2)。可以认为,在高向上,早材比例较高的部位的 $\delta^{13}\text{C}$ 值一般比早材比例较低的部位高,而在冠层底部早材比例达到极小值的区域,相应的 $\delta^{13}\text{C}$ 值也相对较低(图1)。

3.2 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 与材质在高向上的变化

Nguyen-Queyrens等^[14]研究发现,法国沙地海岸松(*Pinus pinaster*)树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的高向变化幅度均在1‰左右,标准差为0.22‰。本研究中,两棵树的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均高向变化幅度分别为2.09‰和1.89‰,而标准差平均都超过了0.7‰。李明财等^[32]发现,林线地区急尖长苞冷杉(*Abies georgei*)光合作用后存在明显的碳同位素分馏,且光合产物在运输过程中也发生了分馏。另有研究表明,水力导度较低的长枝条的 $\delta^{13}\text{C}$ 相对较低,反过来又对气孔导度产生更大的限制,而长枝条一般位于树冠底部^[22,33]。本研究中,由顶部至基部的 $\delta^{13}\text{C}$ 先显著增加,在冠层底部达到最大值,再向下迅速减少至极小值。有研究表明,树木冠层内部的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化与太阳辐射强度密切相关,但太阳辐射对 $\delta^{13}\text{C}$ 变化是否有直接或间接的影响尚不明确^[34–36]。木质部或韧皮部的 $\delta^{13}\text{C}$ 显示了与叶片

沿冠层的垂直变化类似的趋势^[7,14,37-38],也有研究认为,这可能反映了植被在既定气候条件下不同的碳同位素分馏机理^[6-7,32].通常,树木的冠层在光合作用的有机物质合成和稳定碳同位素分馏过程中发挥了重要作用,非光合作用器官 $\delta^{13}\text{C}$ 值从嫩枝到树干逐渐富集^[32].本研究表明,在树木叶片进行光合作用合成的有机物向分支及树干传输过程中,在树冠内部中心处,叶片合成的有机物质汇聚达到峰值,生长季早期材质所占比例相对较高,有利于形成较高的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,使得树干冠层及以上部位的 $\delta^{13}\text{C}$ 值随高度出现一定规律的变化;而由此向下传输的过程中,树体内部产生了营养物质周向的均衡,导致冠层下部的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化无明显规律.

本研究的两棵样本均为成年树,树龄大致相同,所处立地环境类似,但年轮高向的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化却存在明显的树间差异,尤其是两棵树在林冠上部 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化相对一致,而下部差异较大,这可能与根系土壤条件等因素有关.或者说,在树龄、冠型和冠高等因素基本相同的情况下,树木冠层部分的 $\delta^{13}\text{C}$ 受环境温度、降水及光照等因素的影响较为显著,而树干下部受根系中的土壤水力条件等因素的影响更为重要.同时也说明,目前以少量样本非连续性高度的 $\delta^{13}\text{C}$ 值来单纯判定树木高向上是否存在同位素的分馏效应,或者整体判定树木高向上 $\delta^{13}\text{C}$ 是否存在规律性的变化趋势有嫌主观和粗略.另外,由表6可以看出,两样本同一树高处 $\delta^{13}\text{C}$ 年序列的相关性在不同高度之间差异较大,冠层底部附近(e-e)和胸高处(A-A)均处于极小值.由于本文分析的序列长度较短,这一结果有待进一步验证.

树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的高向差异可能是树木在合成木质时利用了不同高度的叶片合成的有机物质的结果^[12].这与树种、树龄、树冠高度和类型,以及树木所处环境条件等多种因素密切相关^[6-7,14,23,32,38-39].本文侧重分析了两棵樟子松样本年轮的高向 $\delta^{13}\text{C}$ 在冠层上下的差异,以及年轮宽度和早晚材宽度比例,对进一步研究树轮高向 $\delta^{13}\text{C}$ 变化特征具有指导意义.限于客观因素,本文仅对两棵样本6年的高向 $\delta^{13}\text{C}$ 序列进行了研究,今后还需要通过扩大样本量,结合树木其他器官(如叶片)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值、生理指标以及环境参数等对同位素分馏效应做进一步探讨.

致谢 野外采样得到碧洲林场刘丰副场长及闫俊岭等的帮助, Thiebes B. 博士对英文摘要进行了修订和润色.

参考文献

- [1] Leavitt SW. Tree-ring C-H-O isotope variability and sampling. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**: 5244-5253
- [2] Robertson I, Rolfe J, Switsur VR, et al. Signal strength and climate relationships in $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of tree ring cellulose from oak in southwest Finland. *Geophysical Research Letters*, 1997, **24**: 1487-1490
- [3] Gagen M, McCarroll D, Edouard JL. Latewood width, maximum density, and stable carbon isotope ratios of pine as climate indicators in a dry subalpine environment, French Alps. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2004, **36**: 166-171
- [4] McCarroll D, Loader NJ. Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews*, 2004, **23**: 771-801
- [5] Li MC, Zhu JJ. Variation of $\delta^{13}\text{C}$ of wood and foliage with canopy height differs between evergreen and deciduous species in a temperate forest. *Plant Ecology*, 2011, **212**: 543-551
- [6] Schleser GH. $\delta^{13}\text{C}$ pattern in a forest tree as an indicator of carbon transfer in trees. *Ecology*, 1992, **73**: 1922-1925
- [7] Martinelli LA, Almeida S, Brown IF, et al. Stable carbon isotope ratio of tree leaves, boles and fine litter in a tropical forest in Rondônia, Brazil. *Oecologia*, 1998, **114**: 170-179
- [8] Monserud RA, Marshall JD. Time-series analysis of $\delta^{13}\text{C}$ from tree rings. I. Time trends and autocorrelation. *Tree Physiology*, 2001, **21**: 1087-1102
- [9] Delzon S, Sartore M, Burlett R, et al. Hydraulic responses to height growth in maritime pine trees. *Plant, Cell and Environment*, 2004, **27**: 1077-1087
- [10] Leavitt SW, Long A. Evidence for $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ fractionation between tree leaves and wood. *Nature*, 1982, **298**: 742-744
- [11] Heaton THE. Spatial, species, and temporal variations in the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of C_3 plants: Implications for palaeodiet studies. *Journal of Archaeological Science*, 1999, **26**: 637-649
- [12] 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)
- [13] McDowell NG, Bond BJ, Dickman LT, et al. Relationships between tree height and carbon isotope discrimination// Meinzer FC, Dawson TE, Lachenbruch B, eds. *Size- and Age-related Changes in Tree Structure and Function*. New York: Springer, 2011: 255-286
- [14] Nguyen-Quyrens A, Ferhi A, Loustau D, et al. Within-ring $\delta^{13}\text{C}$ spatial variability and inter annual variations in wood cellulose of two contrasting provenances of *Pinus pinaster*. *Canadian Journal Forest Research*, 1998, **28**: 766-773
- [15] Kress A, Young GHF, Saurer M, et al. Stable isotope coherence in the earlywood and latewood of tree-line conifers. *Chemical Geology*, 2009, **268**: 52-57
- [16] Palacio S, Paterson E, Sim A, et al. Browsing affects intra-ring carbon allocation in species with contrasting wood anatomy. *Tree Physiology*, 2011, **31**: 150-159
- [17] Li C-S (李传生), Zhang C-L (张春雷). *Annals of Local History for Xinlin Prefecture (1965-1988)*. Beijing: China Literature and History Publishing House,

- 1990 (in Chinese)
- [18] Local History Editorial Committee of Xinlin Prefecture (新林区地方志编委会). *Annals of Local History of Xinlin Prefecture (1988–2005)*. Harbin: Heilongjiang People's Press, 2008 (in Chinese)
- [19] Brendel O, Iannetta PPM, Stewart D. A rapid and simple method to isolate pure alpha-cellulose. *Phytochemical Analysis*, 2000, **11**: 7–10
- [20] Blackwell J. Infrared spectrum and Raman spectrum of cellulose// Arthur JC Jr, ed. *Cellulose Chemistry and Technology*. Trans. Chen D-J (陈德峻), et al. Beijing: China Light Industry Press, 1983: 135–149 (in Chinese)
- [21] Saurer M, Borella S, Schweingruber F, et al. Stable carbon isotopes in tree rings of beech: Climatic versus site related influences. *Trees*, 1997, **11**: 291–297
- [22] Walcroft AS, Silvester WB, Grace JC, et al. Effects of branch length on carbon isotope discrimination in *Pinus radiata*. *Tree Physiology*, 1996, **16**: 281–286
- [23] Zimmermann MH, Brown CL. *Trees: Structure and Function*. Berlin: Springer-Verlag, 1971
- [24] Kramer PJ, Kozlowski TT. Trans. Wang Z-R (汪振儒), et al. *The Physiology of Trees*. Beijing: China Forestry Press, 1983 (in Chinese)
- [25] Kozlowski TT, Pallardy SG. *Growth Control in Woody Plants*. San Diego: Academic Press, 1997
- [26] Vaganov EA, Hughes MK, Shashkin AV. *Growth Dynamics of Conifer Tree Rings: Images of Past and Future Environments*. Berlin: Springer, 2006
- [27] Porté A, Loustau D. Seasonal and interannual variations in carbon isotope discrimination in a maritime pine (*Pinus pinaster*) stand assessed from the isotopic composition of cellulose in annual rings. *Tree Physiology*, 2001, **21**: 861–868
- [28] Jäaggi M, Saurer M, Fuhrer J, et al. The relationship between the stable carbon isotope composition of needle bulk material, starch, and tree rings in *Picea abies*. *Oecologia*, 2002, **131**: 325–332
- [29] Duranceau M, Ghashghaei J, Badeck J, et al. $\delta^{13}\text{C}$ of CO_2 respired in the dark in relation to $\delta^{13}\text{C}$ of leaf carbohydrates in *Phaseolus vulgaris* L. under progressive drought. *Plant, Cell and Environment*, 1999, **22**: 515–523
- [30] Damesin C, Lelarge C. Carbon isotope composition of current-year shoots from *Fagus sylvatica* in relation to growth, respiration and use of reserves. *Plant, Cell and Environment*, 2003, **26**: 207–219
- [31] Michelot A, Eglin T, Dufrêne E, et al. Comparison of seasonal variations in water-use efficiency calculated from the carbon isotope composition of tree rings and flux data in a temperate forest. *Plant, Cell and Environment*, 2011, **34**: 230–244
- [32] Li M-C (李明财), Luo T-X (罗天祥), Liu X-S (刘新圣), et al. Distribution characteristics of $\delta^{13}\text{C}$ values in different organs of *Abies georgei* growing at alpine timberline. *Chinese Journal Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(12): 2654–2660 (in Chinese)
- [33] Waring RH, Silvester WB. Variation in foliar $\delta^{13}\text{C}$ values within the crowns of *Pinus radiata* trees. *Tree Physiology*, 1994, **14**: 1203–1213
- [34] Berry SC, Varney GT, Flanagan LB. Leaf $\delta^{13}\text{C}$ in *Pinus resinosa* trees and understory plants: Variation associated with light and CO_2 gradients. *Oecologia*, 1997, **109**: 499–506
- [35] Le Roux X, Bariac T, Sinoquet H, et al. Spatial distribution of leaf water-use efficiency and carbon isotope discrimination within an isolated tree crown. *Plant, Cell and Environment*, 2001, **24**: 1021–1032
- [36] Zimmerman JK, Ehleringer JR. Carbon isotope ratios are correlated with irradiance levels in the Panamanian orchid *Catasetum viridiflavum*. *Oecologia*, 1990, **83**: 247–249
- [37] Pate J, Arthur D. $\delta^{13}\text{C}$ analysis of phloem sap carbon: Novel means of evaluating seasonal water stress and interpreting carbon isotope signatures of foliage and trunk wood of *Eucalyptus globulus*. *Oecologia*, 1998, **117**: 301–311
- [38] Chevillat VS, Siegwolf RTW, Pepin S, et al. Tissue-specific variation of $\delta^{13}\text{C}$ in mature canopy trees in a temperate forest in central Europe. *Basic and Applied Ecology*, 2005, **6**: 519–534
- [39] Buchmann N, Kao WY, Ehleringer J. Influence of stand structure on carbon-13 of vegetation, soils, and canopy air within deciduous and evergreen forests in Utah, United States. *Oecologia*, 1997, **110**: 109–119

作者简介 商志远,男,1976年生,博士,讲师。主要从事地貌过程与环境演变研究。E-mail: szy268@163.com

责任编辑 李凤琴