

# 青海云杉叶片稳定性碳同位素组成 对水分温度变化的响应

胡启武<sup>1,2,3</sup>, 吴琴<sup>1,3</sup>, 郑林<sup>1,3</sup>, 张锋<sup>2</sup>, 宋明华<sup>2</sup>, 欧阳华<sup>2</sup>

(1 江西师范大学地理与环境学院, 江西 南昌 330022; 2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

3 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西 南昌 330022)

**摘要:** 于 2005—07 在祁连山北坡海拔梯度进行了青海云杉 (*Picea crassifolia*) 叶片稳定性碳同位素组成 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) 的分析测定, 以探讨青海云杉叶片  $\delta^{13}\text{C}$  随海拔变化特征及对水分、温度变化的响应。结果表明: 不同海拔青海云杉叶片  $\delta^{13}\text{C}$  存在显著差异 ( $F=3.94$   $p<0.01$ ),  $\delta^{13}\text{C}$  平均值  $-24.69\%$ ; 随着水分、温度的变化, 在海拔 2 550~3 100 m 青海云杉叶片  $\delta^{13}\text{C}$  随海拔增加呈现降低趋势, 在海拔 3 100~3 350 m  $\delta^{13}\text{C}$  值随海拔增加呈现升高趋势。青海云杉叶片  $\delta^{13}\text{C}$  与土壤水分在低海拔 (2 550~3 100 m) 呈显著负相关, 在高海拔没有关系; 与土壤温度之间则存在一种非线性关系。青海云杉叶片  $\delta^{13}\text{C}$  随海拔变化在低海拔主要受土壤水分、温度的控制, 在高海拔则主要受温度的控制。

**关键词:** 青海云杉;  $\delta^{13}\text{C}$ ; 海拔; 土壤水分; 土壤温度

**中图分类号:** Q948.5791

**文献标识码:** A

研究表明植物叶片稳定性碳同位素组成 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) 与水分之间呈现显著负相关关系, 降水越多的地区, 叶片  $\delta^{13}\text{C}$  值越低<sup>[1-6]</sup>。因此,  $\delta^{13}\text{C}$  值通常被视为物种甚至景观尺度上水分有效性的指标<sup>[7-9]</sup>。但是利用  $\delta^{13}\text{C}$  值反映水分有效性只适用于干旱或水分条件较差的地区<sup>[8]</sup>, Schulte 等在澳大利亚南部的研究结果即表明, 植物叶片  $\delta^{13}\text{C}$  对降雨量的强烈响应仅局限于 200~450 mm 降雨量范围内, 当降雨量超过 450 mm 时, 即使降雨量进一步增加, 叶片  $\delta^{13}\text{C}$  值变化很小<sup>[9]</sup>。温度与  $\delta^{13}\text{C}$  之间的关系, 不同研究得出的结论不一致, Troughton 的研究表明温度的变化对  $\delta^{13}\text{C}$  没有显著影响<sup>[10]</sup>, Panek 与 Waring 则认为低温会造成高的  $\delta^{13}\text{C}$  值<sup>[11]</sup>。

在山地地区, 随着海拔上升, 水分和温度发生变化, 植物叶片  $\delta^{13}\text{C}$  也发生相应的变化。研究表明在湿润地区,  $\delta^{13}\text{C}$  随着海拔的增加而增加<sup>[12-17]</sup>, 而在

干旱地区,  $\delta^{13}\text{C}$  则随着海拔的增加而降低<sup>[18]</sup>。青海云杉 (*Picea crassifolia*) 是青藏高原东北部祁连山山地森林的建群种, 大致分布于海拔 2 500~3 300 m 地带, 其分布区属高寒干旱、半干旱气候区<sup>[19]</sup>。在低海拔地带, 水分是青海云杉生长的主要限制因子, 在高海拔地带低温则成为青海云杉生长的主要限制因子<sup>[20]</sup>。在这种随海拔上升水、热交替成为青海云杉生长限制因子的环境下, 青海云杉叶片稳定性碳同位素组成对水分、温度的变化具有怎样的响应是我们十分关注的问题。本研究通过在不同海拔进行取样, 分析青海云杉叶片稳定性碳同位素组成, 探讨以下两个问题: 1. 青海云杉叶片  $\delta^{13}\text{C}$  随海拔变化特征; 2. 青海云杉叶片  $\delta^{13}\text{C}$  与水分、温度等环境因子的关系。以期为进一步揭示青海云杉对于干旱、低温环境的适应机制提供科学依据。

**收稿日期 (Received date):** 2010-04-01; **改回日期 (Accepted):** 2010-08-20.

**基金项目 (Foundation item):** 国家科技支撑项目 (2007BAB23C03); 国家重点基础研究发展计划项目“青藏高原环境变化及其对全球变化的响应与适应对策” (2005CB422005)。[Supported by National Science and Technology Ministry and National Key Basic Research Program (2007BAB23C03; 2005CB422005).]

**作者简介 (Biography):** 胡启武 (1979—), 男, 博士, 主要从事陆地生态系统格局与过程研究。[Hu Qiwu (1979—), male, Ph.D. specialized in pattern and process of terrestrial ecosystem.] E-mail: huqiwu1979@gmail.com

1 材料与方法

1.1 研究区概况

祁连山地理位置为 93°30′~103°E 36°30′~39°30′N 属大陆性高寒半干旱、半湿润的森林草原气候。山脉由西北走向东南,起伏绵延千余公里,相对高差悬殊,主峰祁连山素珠链峰高 5 564 m 导致气候在水平、垂直方向都有明显的差异<sup>[19]</sup>。研究区设在祁连山中段西水林区排露沟流域,地理位置为 100°17′E, 38°24′N 海拔 2 100~3 800 m 年均气温 1.5℃, 7 月平均气温 10~14℃; 年降水在 290.2~467.8 mm 之间变化<sup>[21]</sup>。祁连山北坡垂直带植被分布主要有干性灌丛草原植被带(2 100~2 500 m), 森林草原植被带(2 500~3 300 m), 亚高山灌丛草甸植被带(3 300~3 800 m)<sup>[19-23]</sup>。

1.2 植物样品采集与分析

本实验于 2005—07 在研究区内沿青海云杉分布的海拔梯度设置了 7 个采样点,其海拔分别为 2 550 m、2 750 m、2 950 m、3 100 m、3 200 m、3 280 m 和 3 350 m。其中海拔 2 550 m 是研究区青海云杉的分布下限,海拔 3 280 m 是青海云杉的树线,在 3 350 m 海拔青海云杉只有零星分布。在每个采样点,选择 3~5 棵代表该海拔梯度的青海云杉平均生长状况的云杉进行采样。所采叶片均来自于中部偏上冠层,且无受光限制的阳部枝条的当年叶片,叶片完全展开。在每个海拔梯度上的叶片样品采集都尽可能确保采样部位及其他采样条件的一致。

所取叶片样品带回实验室 70℃ 下烘干 48 h 用自动球磨机磨成粉末状待测叶片  $\delta^{13}\text{C}$ 。叶片稳定性碳同位素组成在中国科学院地理科学与资源研究所环境同位素实验室利用质谱仪测定(Finnegan MAT 253)。其中,  $\delta^{13}\text{C}$  用下式表示:  $\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = (\text{R}_{\text{sam}} -$

$\text{R}_{\text{standard}} - 1) \times 1000\text{‰}$ , 其中, R 表示标准样品和测试样品中  $^{13}\text{C}$  与  $^{12}\text{C}$  的比率,标准样品是由 IAEA(International Atomic Energy Agency)提供的 PDB(Pee Dee Belemnite)。

1.3 土壤温度、水分测定

本研究水分、温度数据均采用实测的土壤水分、土壤温度数据。其中,土壤温度的观测,在青海云杉的每个采样点布设自动温度记录仪,进行土壤表层 10 cm 深度温度的观测(HOBO 8 Pro 美国 ONSET 公司,温度测量范围: -30~50℃;测量分辨率 0.02℃),连续观测 1 a 所用数据取年平均值;土壤水分则是在青海云杉生长季节 6~9 月,每月在青海云杉采样点挖取土壤剖面(3 个重复),按 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 采样后,在 105℃ 下烘干 10 h 称重获取的质量水分含量,最终使用的数据为生长季 0~30 cm 的土壤水分含量平均值。不同海拔青海云杉采样点的信息见表 1。

1.4 数据处理与分析

不同海拔间  $\delta^{13}\text{C}$  的平均值差异比较,采用 One-way ANOVA 方法,  $\delta^{13}\text{C}$  与环境因子的关系利用线性和非线性回归方法进行分析。所有统计分析采用 SPSS 10.0 软件。数据制图采用 Sigma Plot 9.0 软件。

2 结果与分析

2.1 叶片稳定性碳同位素组成随海拔的变化

不同海拔青海云杉叶片  $\delta^{13}\text{C}$  存在显著差异( $F=3.94$   $p<0.01$ )。整个海拔分布带青海云杉叶片  $\delta^{13}\text{C}$  平均值为 -24.69‰,  $\delta^{13}\text{C}$  最大值 -23.87‰,出现在青海云杉分布的最下限 2 550 m 海拔;  $\delta^{13}\text{C}$  最小值 -25.23‰,出现在 3 100 m 海拔(图 1)。青海云杉在整个海拔分布带内其叶片  $\delta^{13}\text{C}$  随海拔表现

表 1 不同海拔青海云杉采样点信息  
Table 1 The location and characteristics of *Pinus qianshiensis* sampling sites along the altitude gradient

海拔(m)	N	E	土壤温度(℃)	土壤水分(%)	树高(m)	胸径(cm)
2 550	38°35'27"	100°18'19"	1.45	19.9	8.2	16.6
2 750	38°33'12"	100°17'8"	0.67	26.6	12.7	19.5
2 950	38°32'35"	100°17'58"	-0.47	30.7	12.8	18.4
3 100	38°32'20"	100°18'6"	-0.70	49.1	8.6	14.9
3 200	38°32'15"	100°18'7"	-1.27	46.6	9.3	18.9
3 280	38°32'9"	100°18'15"	-1.43	50.9	7.2	18.7
3 350	38°32'7"	100°18'6"	-1.67	49.9	6.3	21.6

出不同的变化趋势: 在 2 550~3 100 m 海拔范围内,  $\delta^{13}\text{C}$  值随海拔增加而降低 ( $R^2=0.42$   $p<0.01$ ) 降低速率为海拔每上升 1 km  $\delta^{13}\text{C}$  降低 2.47‰。在 3 100~3 350 m 海拔范围内,  $\delta^{13}\text{C}$  值随海拔增加而增加 ( $R^2=0.29$   $p<0.05$ ) 平均增加速率为海拔每增加 1 km  $\delta^{13}\text{C}$  增加 3.59‰。  $\delta^{13}\text{C}$  在高海拔地带的增加速率是低海拔地带降低速率的 1.45 倍。考虑整个海拔梯度,  $\delta^{13}\text{C}$  与海拔之间可以很好的拟合成一条非线性的二次曲线:  $Y=7E-06X^2-0.0412X+36.233$  ( $R^2=0.93$   $p<0.01$ )。

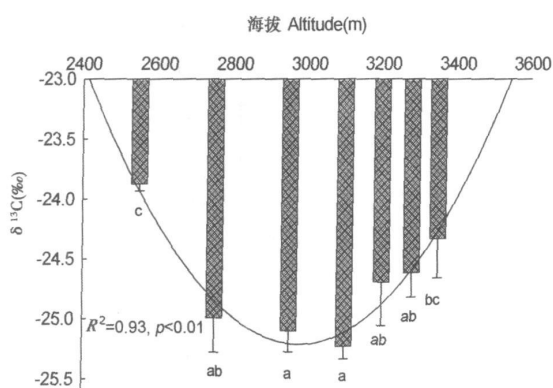


图 1 青海云杉叶片稳定性碳同位素随海拔梯度的变化

Fig 1 Variation in leaf  $\delta^{13}\text{C}$  of *Picea crassifolia* along altitude gradient

(图中不同小写字母表示在  $P<0.05$  的水平上差异显著)

在海拔变化模式上, 大多数研究结果表明叶片  $\delta^{13}\text{C}$  随海拔的增加而增加<sup>[12~17]</sup>。但是, 正如 Van de Water 所言, 绝大多数沿海拔梯度所进行的碳同位素研究集中在湿润地区, 这些地区土壤水分有效性对植物生长不起决定作用<sup>[18]</sup>。Van de Water 等在美国西南部半干旱地区沿海拔梯度所进行的叶片稳定性碳同位素研究结果显示,  $\delta^{13}\text{C}$  随海拔增加而降低, 与湿润地区相反<sup>[18]</sup>。青海云杉沿海拔变化模式不同于以往在湿润地区和干旱地区所发现的模式, 而是这两种模式的一种综合。我们从文献 [7, 17, 18, 23~27] 收集了全球其他地区不同针叶树种叶片  $\delta^{13}\text{C}$  其变化范围大致为  $-28.50\text{‰} \sim -21.00\text{‰}$ , 与年降水之间存在显著负相关关系。同其他地区针叶树种相比较, 青海云杉叶片  $\delta^{13}\text{C}$  的平均值 ( $-24.69\text{‰}$ ) 处于中间水平, 与降水较少地区的  $\delta^{13}\text{C}$  较为一致 (图 2)。

## 2.2 叶片稳定性碳同位素组成与土壤水分之间的关系

叶片  $\delta^{13}\text{C}$  在整个海拔梯度带内与土壤水分关

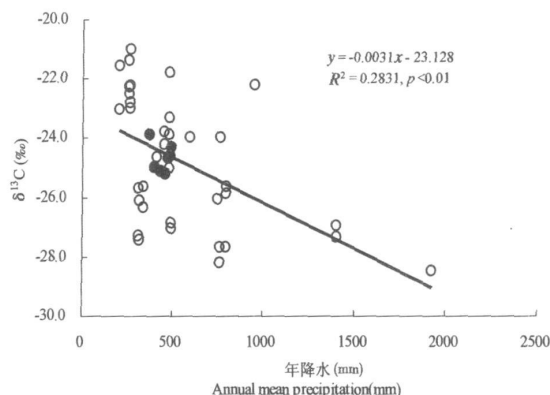
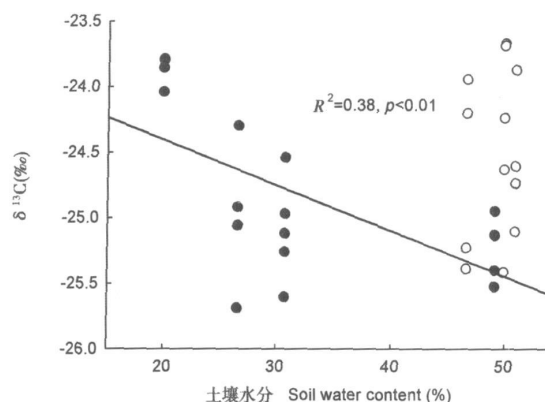


图 2 不同地区针叶树种叶片  $\delta^{13}\text{C}$  与年降水之间的关系

Fig 2 Relationship between leaf  $\delta^{13}\text{C}$  of various coniferous tree species and annual mean precipitation

(图中实心圆圈表示青海云杉, 空心圆圈表示其他地区的针叶树种)

系不显著。但在 2 550~3 100 m 海拔范围内,  $\delta^{13}\text{C}$  与土壤水分呈现显著线性关系 ( $R^2=0.38$   $p<0.01$ ), 在 3 100~3 350 m 海拔范围内叶片  $\delta^{13}\text{C}$  与土壤水分之间的关系不显著 (图 3)。



(图中实心圆圈表示 2 550~3 100 m 海拔之间的叶片稳定性碳同位素及土壤水分含量, 空心圆圈表示 3 100 m 以上海拔叶片稳定性碳同位素及土壤水分含量)

图 3 土壤水分与青海云杉叶片  $\delta^{13}\text{C}$  之间的关系

Fig 3 Relationship between soil water content and leaf  $\delta^{13}\text{C}$  of *Picea crassifolia*

在低海拔地带, 特别是在青海云杉分布的下限地带, 由于降水少, 蒸发量大, 土壤水分有效性较差。我们的土壤水分监测结果显示, 在云杉分布下限地带生长季节土壤水分低于 20%。在 2 550~3 100 m 海拔范围内, 土壤水分含量与叶片  $\delta^{13}\text{C}$  呈现显著负相关, 表明了在这个海拔范围内, 土壤水分是叶片  $\delta^{13}\text{C}$  变化的主要控制因子。在 3 100~3 350 m 海拔

范围内,由于降水增加,蒸发量减少;同时,在这个海拔地带内,7月季节性冻土的融化也是土壤水分的一个重要来源。因此,土壤水分含量比低海拔地区有显著增加,水分不再成为云杉生长的限制因子,土壤水分与叶片  $\delta^{13}\text{C}$  的关系不显著。

叶片  $\delta^{13}\text{C}$  与水分之间关系研究大多数是基于大尺度上叶片  $\delta^{13}\text{C}$  与降水之间的关系研究,其结果多数表明叶片  $\delta^{13}\text{C}$  与降水之间呈现显著负相关关系<sup>[1-9]</sup>,也有学者研究发现叶片  $\delta^{13}\text{C}$  与降水之间呈现正相关<sup>[30-31]</sup>,或者没有关系<sup>[32-33]</sup>。Leffler和 Enquist认为降水对  $\delta^{13}\text{C}$  的影响存在一个阈值,超过这个阈值,降水对  $\delta^{13}\text{C}$  的影响就微乎其微<sup>[6]</sup>。同样,这种降水与  $\delta^{13}\text{C}$  之间存在某种阈值关系的结果在其他地区也有发现,当降水量下降到某个水平时,  $\delta^{13}\text{C}$  值开始显著增加<sup>[4-5, 9-18]</sup>。在大尺度上,降水可以表征水分状况,而小尺度上土壤水分则更能代表水分条件,青海云杉叶片  $\delta^{13}\text{C}$  在整个海拔分布带中与土壤水分的关系和前人的研究结果一致,从局域尺度上说明了水分对于叶片稳定性碳同位素的影响局限于较低的水分状况。

### 2.3 叶片稳定性碳同位素组成与土壤温度之间的关系

叶片  $\delta^{13}\text{C}$  在整个海拔区域与土壤温度之间存在一种非线性关系,与土壤温度之间可以拟合成曲线  $Y = 0.4651X^2 + 0.2254X - 25.2262$  ( $p < 0.01$ )。在海拔 2 550 ~ 3 100 m 范围内,  $\delta^{13}\text{C}$  随土壤温度降低而降低;在海拔 3 100 ~ 3 350 m 范围内,  $\delta^{13}\text{C}$  随土壤温度降低而增加(图 4)。在低海拔,较高的温度进一步加剧水分的亏缺,从而影响到叶片稳定性碳同位素组成。在高海拔地带,水分不再成为植物生长的限制因子,但在这个海拔范围,低温成为植物生长的重要限制因子。我们布设在青海云杉树线地带(海拔 3 280 m)的自动温度观测仪器的监测结果表明,树线地带土壤 10 cm 深度年均温为  $-1.43^\circ\text{C}$ ,即使在 7 月,其月均温也只有  $6.1^\circ\text{C}$ ,比 Kömer 与 Paulsen 报道的全球树线生长季节平均温度 ( $6.7^\circ\text{C}$ ) 还要低<sup>[34]</sup>。青海云杉林高海拔地带的土壤低温与青海云杉分布在阴坡有关。另外,高海拔地带的冻土可能也是土壤温度偏低的一个重要原因。因此,低温成为高海拔地带叶片  $\delta^{13}\text{C}$  变化的主要控制因子。一方面低温会限制叶片气孔导度<sup>[11]</sup>,另一方面,低温使得叶片形态结构发生变化,如高海拔地带的叶片比低海拔地带的叶片明显变厚,通过叶片形

态结构的改变也会对叶片  $\delta^{13}\text{C}$  产生影响<sup>[3-14]</sup>,从而使得高海拔地区的青海云杉叶片  $\delta^{13}\text{C}$  值增加。

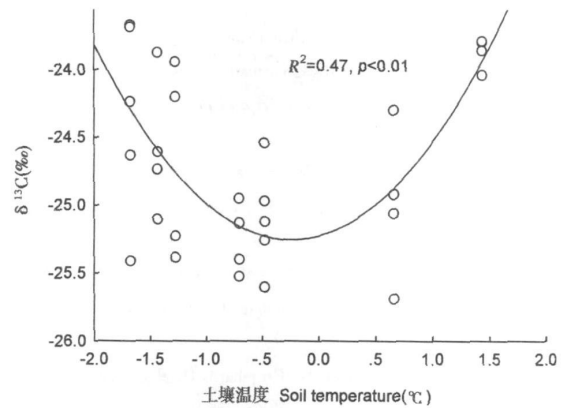


图 4 土壤温度与叶片  $\delta^{13}\text{C}$  之间的关系  
Fig 4 Relationship between soil temperature and leaf  $\delta^{13}\text{C}$  of *Pinus crassifolia*

## 3 结论

1. 青海云杉叶片稳定性碳同位素组成 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) 在不同海拔存在显著差异 ( $F = 3.94$ ,  $p < 0.01$ )。在海拔 2 550 ~ 3 100 m 内,  $\delta^{13}\text{C}$  随海拔增加呈现降低趋势;在海拔 3 100 ~ 3 350 m 内,  $\delta^{13}\text{C}$  随海拔增加呈现升高趋势,其海拔变化模式有别于湿润地区和干旱地区的树种。

2. 青海云杉叶片  $\delta^{13}\text{C}$  随海拔变化在低海拔主要受土壤水分、温度的控制,在高海拔则主要受温度的控制。

## 参考文献 (References)

- [1] Stewart G R, Turnbull M H, Schmidt S, et al.  $^{13}\text{C}$  natural abundance in plant communities along a rainfall gradient: a biological integrator of water availability [J]. *Australian Journal of Plant Physiology* 1995, 22: 51~55
- [2] Anderson J E, Williams J, Kriedemann P E, et al. Correlations between carbon isotope discrimination and climate of native habitats for diverse eucalypt taxa growing in a common garden [J]. *Australian Journal of Plant Physiology* 1996, 23: 311~320
- [3] Cordell S, Goldstein G, Mueller-Dombois D, et al. Physiological and morphological variation in *Metrosideros polymorpha*, a dominant Hawaiian tree species, along an altitudinal gradient: role of phenotypic plasticity [J]. *Oecologia* 1998, 113: 188~196
- [4] Leffler A J, Evans A S. Variation in carbon isotope composition among years in the riparian tree *Populus fremontii* [J]. *Oecologia* 1999, 119: 311~319

- [ 5 ] Miller J M Williams R J Farquhar G D Carbon isotope discrimination by a sequence of Eucalyptus species along a subcontinental rainfall gradient in Australia[ J ]. Functional Ecology 2001, 15: 222 ~ 232
- [ 6 ] Leffler A J Enquist B J Carbon isotope composition of tree leaves from Guanacaste Costa Rica: comparison across tropical forests and tree life history[ J ]. Journal of Tropical Ecology 2002, 18: 151 ~ 159
- [ 7 ] Warren C R Adams S M A Water availability and branch length determine  $\delta^{13}\text{C}$  in foliage of Pinus pinaster[ J ]. Tree Physiology 2000, 20: 637 ~ 643
- [ 8 ] Warren C R McGrath J F Adams S M A Water availability and carbon isotope discrimination in conifers[ J ]. Oecologia 2001, 127: 476 ~ 486
- [ 9 ] Schulze E-D Williams G D Farquhar G D et al Carbon and nitrogen isotope discrimination and nitrogen nutrition of trees along a rainfall gradient in northern Australia[ J ]. Australian Journal of Plant Physiology 1998, 25: 413 ~ 425
- [ 10 ] Troughton J H Card K A Temperature effects on the carbon-isotope ratio of C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> and crassulacean-acid metabolism (CAM) plants[ J ]. Planta 1975, 123: 185 ~ 190
- [ 11 ] Panek J A Waring R H Stable carbon isotopes as indicators of limitations to forest growth imposed by climate stress[ J ]. Ecological Applications 1995, 7: 854 ~ 863
- [ 12 ] Körner G Farquhar G D Roksandic Z A global survey of carbon isotope discrimination in plants from high altitude[ J ]. Oecologia 1988, 74: 623 ~ 632
- [ 13 ] Körner G Farquhar G D Wong S C Carbon isotope discrimination by plants follows latitudinal and altitudinal trends[ J ]. Oecologia 1991, 88: 30 ~ 40
- [ 14 ] Vitousek P M Field C B Matson P A Variation in foliar  $\delta^{13}\text{C}$  in Hawaiian Metrosideros polymorpha: a case of internal resistance[ J ]. Oecologia 1990, 84: 362 ~ 370
- [ 15 ] Marshall J D Zhang J Carbon isotope discrimination and water-use efficiency in native plants of the north-central Rockies[ J ]. Ecology 1994, 75: 1887 ~ 1895
- [ 16 ] Sparks J P Ehleringer J R Leaf carbon isotope discrimination and nitrogen content for riparian trees along elevational transects[ J ]. Oecologia 1997, 109: 362 ~ 367
- [ 17 ] Hultine K R Marshall J D Altitude trends in conifer leaf morphology and stable carbon isotope composition[ J ]. Oecologia 2000, 123: 32 ~ 40
- [ 18 ] Van de Water P K Leavitt S W Betancourt J L Leaf  $\delta^{13}\text{C}$  variability with elevation, slope aspect, and precipitation in the south-west United States[ J ]. Oecologia 2002, 132: 332 ~ 343
- [ 19 ] Wang J Y, Chang X X, Ge S L et al Vertical distribution of the vegetation and water and heat conditions of Qilian Mountains[ J ]. Journal of Northwest Forestry University 2001, 16(Suppl.): 1 ~ 3[ 王金叶, 常学向, 葛双兰, 等. 祁连山(北坡)水热状况与植被垂直分布[ J ]. 西北林学院学报, 2001, 16(增): 1 ~ 3]
- [ 20 ] Liu X C Qinghai Spruce[ M ]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1991[ 刘兴聪. 青海云杉[ M ]. 兰州: 兰州大学出版社, 1991]
- [ 21 ] Wang J Y, Wang Y H, Li X et al Water situation and runoff production in the Pailugu Basin of Qilian Mountains[ J ]. Journal of Glaciology and Geocryology 2006, 28(1): 62 ~ 69[ 王金叶, 王彦辉, 李新, 等. 祁连山排露沟流域水分状况与径流形成[ J ]. 冰川冻土, 2006, 28(1): 62 ~ 69]
- [ 22 ] Zhang H, Wen Y L, Ma L et al The climate features and regionalization of vertical climatic zones in the northern slope of Qilian Mountains[ J ]. Journal of Mountain Science 2001, 19(6): 497 ~ 502[ 张虎, 温娅丽, 马力, 等. 祁连山北坡中部气候特征及垂直气候带的划分[ J ]. 山地学报, 2001, 19(6): 497 ~ 502]
- [ 23 ] Ehleringer J R Field C B Lin Z F et al Leaf carbon isotope and mineral composition in subtropical plants along an irradiance cline[ J ]. Oecologia 1986, 70: 520 ~ 526
- [ 24 ] DeLucia E H Schlesinger W H Resource-use efficiency and drought tolerance in adjacent Great Basin and Sierran plants[ J ]. Ecology 1991, 72: 51 ~ 58
- [ 25 ] Lajtha K Getz J Photosynthesis and water-use efficiency in piñon-juniper communities along an elevation gradient in northern New Mexico[ J ]. Oecologia 1993, 94: 95 ~ 101
- [ 26 ] Zhang J W, Cregg B M Variation in stable carbon isotope discrimination among and within exotic conifer species grown in eastern Nebraska, USA[ J ]. Forest Ecology and Management 1996, 83: 181 ~ 187
- [ 27 ] Kieppel B Gower S Treichel W et al Foliar carbon isotope discrimination in Larix species and sympatric evergreen conifers: a global comparison[ J ]. Oecologia 1998, 114: 153 ~ 159
- [ 28 ] Sah S P Brumme R Altitudinal gradients of natural abundance of stable isotopes of nitrogen and carbon in the needles and soil of a pine forest in Nepal[ J ]. Journal of Forest Science 2003, 49(1): 19 ~ 26
- [ 29 ] Chevillat V S Siegwolf R T W, Pepina S et al Tissue-specific variation of  $\delta^{13}\text{C}$  in mature canopy trees in a temperate forest in central Europe[ J ]. Basic and Applied Ecology 2005, 6: 519 ~ 534
- [ 30 ] Read J Farquhar G D Comparative studies in Nothofagus (Gagaceae). I. Leaf carbon isotope discrimination[ J ]. Functional Ecology 1991, 5: 684 ~ 695
- [ 31 ] Guo G M, Xie G D The relationship between plant stable carbon isotope composition, precipitation and satellite data, Tibet Plateau, China[ J ]. Quaternary International 2006, 144: 68 ~ 71
- [ 32 ] Schulze E-D Ellis R Schulze W et al Diversity metabolic types and  $\delta^{13}\text{C}$  carbon isotope ratios in the grass flora of Namibia in relation to growth form, precipitation and habitat conditions[ J ]. Oecologia 1996a, 106: 352 ~ 369
- [ 33 ] Schulze E-D Mooney H A Sala O E et al Water availability, rooting depth, and vegetation zones along an aridity gradient in Patagonia[ J ]. Oecologia 1996b, 108: 503 ~ 512
- [ 34 ] Körner G Paulsen J A world-wide study of high altitude treeline temperatures[ J ]. Journal of Biogeography 2004, 31: 713 ~ 732

# Responses of Leaf $\delta^{13}\text{C}$ of *Picea crassifolia* to Moisture and Temperature Variations

HU Qiwu<sup>1, 2, 3</sup>, WU Qin<sup>1, 3</sup>, ZHENG Lin<sup>1, 3</sup>, ZHANG Feng<sup>2</sup>, SONG Minghua<sup>2</sup>, Ouyang Hua<sup>2</sup>

(1. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, Jiangxi, China;

2. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. Key Laboratory of Poyang

Lake Wetland and Watershed Research (Ministry of Education), Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, Jiangxi, China)

**Abstract:** Variation pattern of *Picea crassifolia* leaf  $\delta^{13}\text{C}$  along the altitude gradient were investigated in the northern slope of Qilian Mountains in July 2005. Results showed that *Picea crassifolia* leaf  $\delta^{13}\text{C}$  differed significantly among elevations ( $F=3.94$ ,  $p<0.01$ ), averaged by  $-24.69\%$ . Moreover, with water and temperature variation, leaf  $\delta^{13}\text{C}$  declined with increasing altitude at lower elevation of 2 550 m to 3 100 m, whereas increased with altitude at higher elevation of 3 100 m to 3 350 m. Leaf  $\delta^{13}\text{C}$  was negatively related to soil water content at lower elevation of 2 550 m to 3 100 m, but not at higher elevation of 3 100 m to 3 350 m. Additionally, a nonlinear relation was observed between leaf  $\delta^{13}\text{C}$  and soil temperature. Shift pattern of *Picea crassifolia* leaf  $\delta^{13}\text{C}$  along the altitude gradient was linked to the local semiarid and cold climate. At lower elevations, soil water availability and temperature were most responsible for the pattern, while at higher elevations, low temperature accounted for the results.

**Key words:** *Picea crassifolia*,  $\delta^{13}\text{C}$ , altitude, soil water, soil temperature