

毛白杨杂种无性系稳定碳同位素值的特征及其水分利用效率

方晓娟^{2,1}, 李吉跃^{3,2*}, 聂立水⁴, 沈应柏¹, 张志毅^{1*}

1. 北京林业大学林木育种国家工程实验室与林木花卉遗传育种教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; 3. 华南农业大学林学院, 广东 广州 510642;

4. 北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083

摘要: 2008年在北京林业大学对9个毛白杨(*Populus tomentosa*)杂种无性系苗木生长不同时期的叶片、小枝、根的碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 和瞬时水分利用效率WUEi的差异进行研究, 分析不同无性系间 $\delta^{13}\text{C}$ 与瞬时水分利用效率WUEi的相互关系, 目的在于探求 $\delta^{13}\text{C}$ 在筛选高水分利用效率毛白杨杂种无性系中的应用价值。结果表明: 不同生长时期叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现为7月<8月<10月<9月, 小枝 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现为8月<9月<10月, 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值、小枝 $\delta^{13}\text{C}$ 值在不同时期和不同无性系间的差异均达显著水平, 无性系间的差异是引起 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的主要因素。不同部位碳同位素比值表现为叶片<小枝<根, 毛白杨杂种无性系 $\delta^{13}\text{C}$ 值在不同部位和无性系间差异均达显著水平, 部位间的差异是引起 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的主要因素。 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高的无性系30、83、BL5的WUEi也较高, $\delta^{13}\text{C}$ 值较低的无性系42、26、BT17的WUEi也较低, 且不同时期 $\delta^{13}\text{C}$ 和WUEi呈较强的正相关, 相关系数分别为0.766、0.872、0.675, 高 $\delta^{13}\text{C}$ 可以作为筛选高WUEi毛白杨的有效指标, 且在苗木生长旺盛时期选育能得到更为可靠的结果。

关键词: 毛白杨; 杂种无性系; 碳同位素; 水分利用效率

中图分类号: Q14

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 06-2267-05

在自然条件下, 碳有两种稳定同位素, 其自然丰度 ^{12}C 占98.89%, ^{13}C 占1.11%。植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 可以用来作为一段时间内水分利用和损失的标准被广泛应用^[1]。这主要是由于光合作用时, 大气 CO_2 经气孔向叶内的扩散过程, CO_2 在叶中的溶解过程, 以及羧化酶对 CO_2 的同化过程, 均存在显著的碳同位素效应^[2]。Farquhar等^[3]认为, 植物组织的稳定碳同位素比率 $\delta^{13}\text{C}$ 和稳定碳同位素分辨力 Δ 与 C_3 植物的水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE)具有很强的相关性, 可以作为植物长期WUE的间接测定指标^[4-6], 并在小麦(*Triticum aestivum* Linn.)的研究上得到证实^[7]。目前, 国内外学者, 在草本植物如花生(*Arachis hypogaea*)^[8]、棉花(*Gossypium* spp.)^[9]、大麦(*Hordeum vulgare* Linn.)^[8]、甜菜(*Beta vulgaris* Linn.)^[10], 木本植物如白云杉(*Picea glauca* Voss.)^[11]、桉树(*Eucalyptus radiata*)^[13]和黑杨(*Populus nigra* Linn.)无性系^[14]以及藤本植物葡萄(*Vitis vinifera* L.)^[13]等方面进行了 $\delta^{13}\text{C}$ 或 Δ 与长期WUE的相关性研究, 大部分研究结果显示 $\delta^{13}\text{C}$ 与长期WUE呈正相关, Δ 与长期WUE呈负相关。

毛白杨(*Populus tomentosa* Carr.)是我国特有多乡土树种, 由于其优良特性已被广泛地作为短期轮伐的造林树种, 在解决木材短缺方面占有重要位

置。在水资源缺乏的现状下, 快速、高效地选育速生且高水分利用效率(WUE)的无性系已成为迫切需求。

本文研究的主要目的是弄清毛白杨杂种无性系稳定碳同位素的组成特点, 并探求 $\delta^{13}\text{C}$ 在筛选高水分利用效率毛白杨杂种无性系中的应用价值。

1 材料与方法

1.1 试验材料及培养

所研究的植物材料为9个 $1_{(2)}-0$ 型毛白杨(*Populus tomentosa* Carr.)杂种无性系, 分别为:S86、1316、BT17、BL5、26、42、30、50、83, 为林木育种国家工程实验室培育保存。2007年3月底将长约15 cm的嫁接苗栽植到33 cm(高) \times 30 cm(内径)的棕色塑料花盆中进行培养, 盆栽土壤为砂壤土, 土壤容重(1.411 ± 0.02) $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 田间持水量(26.02 ± 0.77)%。各无性系嫁接苗的大小和质量尽可能保持一致, 每盆栽一株, 苗木在充分供水条件下培养。2007年年底平茬。2008年4月测得盆栽土壤容重为(1.48 ± 0.04) $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 田间持水量为(15.21 ± 0.64)%。试验地点为北京林业大学。

1.2 研究方法

1.2.1 毛白杨 $\delta^{13}\text{C}$ 组成

分别于2008年7月17日、8月19日、9月16

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划课题(2006BAD24B04)

作者简介: 方晓娟(1984年生), 女, 硕士研究生, 研究方向为人工林培育。

*责任作者: 李吉跃, 教授, 博士生导师, 研究方向为森林培育及栽培生理生态。E-mail: ljyymy@vip.sina.com

张志毅, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为林木遗传改良与生物技术。E-mail: zhangzy@bjfu.edu.cn

收稿日期: 2009-09-14

日、10月15日选每无性系生长中等的苗木三株,每株取一片功能叶(第6~9片),后三次加取小枝,最后一次加取根,将样品放入烘箱中105℃杀青30min,置于70℃恒温烘箱内烘干至恒质量(约72h),称其干重,研磨过100目筛制成备用样品。在中国科学院植物研究所质谱仪分析室进行稳定碳同位素分析(测定精度为0.2‰),具体为取处理好的样品3~5mg封入真空的燃烧管,并加入催化剂和氧化剂,燃烧产生的CO₂经结晶纯化后,用Delta plus XP同位素比例质谱仪(Thermo Finnigan公司,德国)测定碳同位素的比率,以PDB(Pee Dee Bel-
emnite)为标准,根据下面公式进行计算^[3]:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = \left\{ \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{sample}} - (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{standard}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{standard}}} \right\} \times 1000$$

表1 不同时期毛白杨杂种无性系叶片碳同位素比值
Table 1 Leaf $\delta^{13}\text{C}$ of *Populus tomentosa* hybrid clones in different period

无性系	测定时间(月-日)				均值
	07-17	08-19	09-16	10-15	
42	-30.856±0.035	-29.502±0.021	-29.825±0.025	-29.484±0.014	-29.917±0.645bcd
26	-30.802±0.033	-30.080±0.019	-30.201±0.017	-30.238±0.024	-30.330±0.322ab
S86	-30.530±0.032	-30.521±0.054	-28.857±0.061	-29.518±0.049	-29.857±0.818bcd
1316	-30.831±0.048	-29.318±0.018	-29.101±0.033	-29.261±0.030	-29.628±0.807bcd
BT17	-31.359±0.015	-29.902±0.021	-30.489±0.035	-31.275±0.042	-30.756±0.691a
83	-30.020±0.052	-29.317±0.036	-29.161±0.026	-28.549±0.034	-29.262±0.604cd
30	-30.164±0.025	-28.630±0.032	-28.733±0.036	-28.938±0.013	-29.116±0.710d
BL5	-30.726±0.036	-30.238±0.023	-29.305±0.052	-29.846±0.041	-30.029±0.602abc
50	-30.800±0.042	-30.123±0.056	-29.597±0.043	-29.812±0.051	-30.083±0.525abc
均值	-30.676±0.399a	-29.737±0.591b	-29.474±0.601b	-29.658±0.788b	-29.886±0.508

不同无性系的变化来看, BT17、26叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低,分别为(-30.756±0.691‰)和(-30.330±0.322‰),而无性系30、83叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高,分别为(-29.116±0.710‰)和(-29.262±0.604‰)。方差分析显示(表4,见下页),毛白杨杂种无性系叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值在不同时期和无性系间差异均达极显著水平,无性系间 $F=17.074$ 远大于时期间 $F=6.764$,说明无性系间的差异是引起叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的主要因素。

2.2 小枝碳同位素组成

从表2可以看出:9个毛白杨杂种无性系小枝碳同位素比值在-29.768‰~-28.236‰之间变化,就均值来看,小枝 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现为8月<9月<10月;就不同无性系的变化来看,42、26小枝 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低,分别为(-29.555±0.691‰)和(-29.447±0.048‰),而无性系30、83小枝 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高,分别为(-28.088±0.189‰)和(-28.610±0.232‰)。方差分析显示(表4),毛白杨杂种无性系小枝 $\delta^{13}\text{C}$ 值在不同时期差异不显著,无性系间差异达极显著水

1.2.2 瞬时水分利用效率

分别于2008年7月16日、8月18日、9月15日用Lico-6400便携式光合作用分析系统(LICOR公司,美国)进行测定。所有测定均在上午9:30~11:30之间完成。瞬时水分利用效率(WUE_i,由Pn/Tr计算得出),每个无性系3个重复。

1.2.3 数据处理

用EXCEL作图;用SPSS13.0进行双因素方差分析、S-N-K多重比较和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 叶片碳同位素组成

从表1可以看出:9个毛白杨杂种无性系叶片碳同位素比值在-28.549‰~-31.359‰之间变化,就均值来看,叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值7月<8月<10月<9月;就

表2 不同时期毛白杨杂种无性系小枝碳同位素比值
Table 2 Branch $\delta^{13}\text{C}$ of *Populus tomentosa* hybrid clones in different period

无性系	测定时间(月-日)				均值
	08-19	09-16	10-15	均值	
42	-29.768±0.014	-29.468±0.021	-29.428±0.032	-29.555±0.186a	
26	-29.399±0.025	-29.494±0.036	-29.448±0.027	-29.447±0.048a	
S86	-29.373±0.012	-28.494±0.023	-28.616±0.035	-28.828±0.476ab	
1316	-28.236±0.032	-29.287±0.026	-28.395±0.019	-28.639±0.567ab	
BT17	-28.938±0.017	-29.662±0.026	-28.706±0.037	-29.102±0.499ab	
83	-28.709±0.028	-28.775±0.016	-28.345±0.054	-28.610±0.232ab	
30	-28.112±0.035	-28.494±0.043	-27.658±0.062	-28.088±0.419c	
BL5	-29.637±0.046	-28.433±0.053	-28.395±0.023	-28.822±0.706ab	
50	-29.012±0.039	-28.976±0.047	-28.876±0.058	-28.955±0.070ab	
均值	-29.020±0.586a	-29.009±0.483a	-28.652±0.560a	-28.894±0.446	

平,说明无性系间的差异是引起小枝 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的主要因素。

2.3 碳同位素组成的器官差异

从表3可以看出:在10月9个毛白杨杂种无性系不同部位碳同位素比值表现为叶片<小枝<根,

表3 毛白杨杂种无性系 10 月份叶、小枝、根碳同位素比值
Table 3 Different position $\delta^{13}C$ of *Populus tomentosa* hybrid clones in different period ‰

无性系	不同器官				均值
	叶	小枝	根		
42	-29.484±0.014	-29.428±0.032	-28.971±0.025	-29.294±0.281ab	
26	-30.238±0.024	-29.448±0.027	-29.140±0.041	-29.609±0.566a	
S86	-29.518±0.049	-28.616±0.035	-27.593±0.037	-28.576±0.963ab	
1316	-29.261±0.030	-28.395±0.019	-28.114±0.042	-28.590±0.598ab	
BT17	-31.275±0.042	-28.706±0.037	-27.980±0.031	-29.320±1.731ab	
83	-28.549±0.034	-28.345±0.054	-27.659±0.028	-28.184±0.466b	
30	-28.938±0.013	-27.658±0.062	-27.223±0.065	-27.940±0.892b	
BL5	-29.846±0.041	-28.395±0.023	-27.170±0.029	-28.470±1.340ab	
50	-29.812±0.051	-28.876±0.058	-28.383±0.063	-29.024±0.0726ab	
均值	-29.658±0.788a	-28.652±0.560b	-28.026±0.705c	-28.779±0.563	

叶片 $\delta^{13}C$ 值比小枝偏负 1.006‰, 比根偏负 1.632‰; 就各无性系不同部位的平均值来看, 26、BT17 的 $\delta^{13}C$ 值较低, 分别为(-29.609±0.566)‰和(-29.320±1.731)‰, 而无性系 30、83 的 $\delta^{13}C$ 值较高, 分别为(-27.940±0.892)‰和(-28.184±0.466)‰。方差分析显示(表 4), 毛白杨杂种无性系 $\delta^{13}C$ 值在不同部位和无性系间差异均达极显著水平, 部位间 $F=25.489$ 远大于时期间 $F=3.975$, 说明部位间的差异是引起 $\delta^{13}C$ 值变化的主要因素。

表4 双因素方差分析

Table 4 Two-factors variance analysis

碳同位素组成	差异源	平方和	自由度	均方	F 值	
叶片	时期	7.817	3	2.606	6.764**	
	无性系	8.258	8	1.032	17.074**	
	误差	3.663	24	0.153		
	总计	19.738	35			
	小枝	时期	0.791	2	0.395	2.703
小枝	无性系	4.783	8	0.598	4.086**	
	误差	2.341	16	0.146		
	总计	7.914	26			
	不同部位	部位	12.202	2	6.101	25.489**
	无性系	7.612	8	0.951	3.975**	
WUEi	时期	1.523	2	0.761	28.324**	
	无性系	1.485	8	0.186	6.906**	
	误差	0.430	16	0.027		
	总计	3.438	26			

*表示在 0.05 水平上差异显著, **表示在 0.01 水平上差异显著。

2.4 瞬时水分利用效率 WUE

从图 1 可以看出: 9 个毛白杨杂种无性系瞬时水分利用效率在 2.76 ~ 4.41 $\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$ 之间变化, 就均值来看, WUEi 值大小为 7 月 < 8 月 < 9 月; 就不同无性系的变化来看, 26、42 的 WUEi 值较低, 分别为 (3.27±0.42) $\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$ 和 (3.62±0.21)

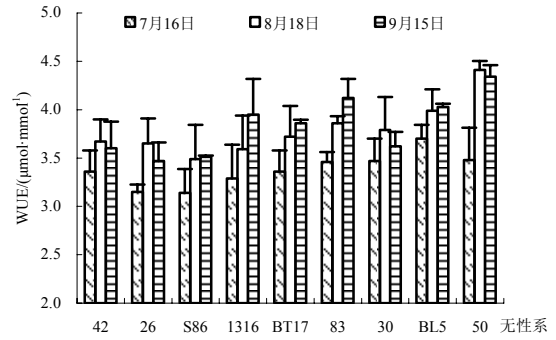


图1 不同时期毛白杨无性系瞬时水分利用效率

Fig.1 WUEi of *Populus tomentosa* clones in different periods

$\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$, 而无性系 30、50 的 WUE 值较高, 分别为 (3.97±0.71) $\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$ 和 (3.83±0.12) $\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$ 。方差分析显示(表 4), 毛白杨杂种无性系瞬时水分利用效率在不同时期和无性系间差异均达极显著水平。

2.5 叶片碳同位素组成与瞬时水分利用效率的相关性分析

植物叶片的稳定碳同位素比($\delta^{13}C$ 值)能够很好地反映与植物光合、蒸腾作用相关联的水分利用效率(WUE), 植物对 $^{13}CO_2$ 判别能力的大小是评价植物水分利用效率的有效指标^[7]。对九个毛白杨杂种无性系叶片的碳同位素组成和瞬时水分利用效率 WUE 进行相关性分析得出二者呈显著正相关关系, 不同时期的相关系数分别为: $r_7=0.766, p=0.016$; $r_8=0.772, p=0.002$; $r_9=0.675, p=0.023$ 。

3 结论与讨论

3.1 毛白杨杂种无性系碳同位素组成特点

9 个毛白杨杂种无性系碳同位素比值在 -31.359‰ ~ -27.170‰ 之间变化, 叶片 $\delta^{13}C$ 值在 -28.549‰ ~ -31.359‰ 之间变化, 表现为: 7 月 < 8 月 < 9 月, 小枝碳同位素比值在 -29.768‰ ~ -28.236‰ 之间变化, 表现为: 8 月 < 9 月 < 10 月, 小枝 $\delta^{13}C$ 值变化范围低于叶片, 方差分析结果显示: 无性系间的差异是引起叶片、小枝 $\delta^{13}C$ 值变化的主要因素。不同部位碳同位素比值变化表现为叶片 < 小枝 < 根, Oliver Brendel 等^[15]对欧洲赤松(*Pinus sylvestris* L.)的研究结果表明针叶的 $\delta^{13}C$ 值约比小枝的 $\delta^{13}C$ 值偏负 1.3‰。刘海燕^[16]对油松(*Pinus Tabulaeformis*)的研究表明小枝和针叶 $\delta^{13}C$ 值的差异要远大于 1.3‰, 达到 2.10‰。祁连圆柏(*Sabina przewalskii* Kom.)树叶 $\delta^{13}C$ 值(-26.24‰)比树木 $\delta^{13}C$ 值(-22.94‰)偏负约 3.30‰^[17]。Carol & Winner^[18]报道小麦(*Triticum aestivum* Linn.)根中 $\delta^{13}C$ 值高于叶片; 冯虎元等^[19]对大豆(*Glycine max* Merr.)10 个品种的 $\delta^{13}C$ 值研究表明 $\delta^{13}C$ 根 > $\delta^{13}C$ 茎 > $\delta^{13}C$ 种子 > $\delta^{13}C$

叶;严昌荣等^[20]的研究结果也显示树干、根、小枝的 $\delta^{13}\text{C}$ 值一般高于叶片。Hall等^[21]对豇豆(*Vigna unguiculata*)的分析发现籽粒的平均 $\Delta^{13}\text{C}$ 值明显低于叶片,且叶片和籽粒的 $\Delta^{13}\text{C}$ 之间高度相关,即籽粒的 $\delta^{13}\text{C}$ 值高于叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。尹伟伦等^[22]对杨树的研究发现 $\delta^{13}\text{C}$ 树干 $>$ $\delta^{13}\text{C}$ 枝 $>$ $\delta^{13}\text{C}$ 叶。可见,多数的研究结果为枝条的 $\delta^{13}\text{C}$ 值要高于叶片,而根茎等其他器官的 $\delta^{13}\text{C}$ 值大小则因研究物种不同而存在差异。

这种差异可能来自两个方面,一是植物不同器官的生物化学成分不同,生理生态特性差距较大。由于合成这些物质的途径不一样会出现不同的碳同位素的二次分馏,使各种化学成分具有各自的稳定碳同位素比率,如树干和根中木质素、粗纤维素占的比重大,叶片中蛋白质含量高,可溶性糖的 $\delta^{13}\text{C}$ 值高于纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 值,从而导致不同植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值器官间差异较大^[23]。二是不同器官的呼吸特性具有很大差异,从理论上讲,植物器官在呼吸时优先利用含 ^{12}C 的物质而使 ^{13}C 在组织中富集^[24]。根据对北京山区几种植物非光合器官呼吸速率的测定,不同种和同一种的不同器官具有不同的呼吸速率,这也从另一个侧面表明不同器官存在不同碳同位素比率的原因^[25]。因而,在对不同植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值进行比较时,应根据具体植物的不同器官进行具体分析。

3.2 毛白杨杂种无性系碳同位素组成与瞬时水分利用效率

水分是树木生长发育所必需的,树木水分散失主要是由叶片蒸腾造成的。叶片光合作用与蒸腾作用是两个同时进行的气体交换过程,气孔作为气体交换的门户,其行为调节和控制光合与蒸腾。蒸腾作用与光合作用同步进行,两者的比值决定了植物叶片水平上水分利用效率的大小^[26-27]。叶片水分利用效率(WUE)作为植物生理活动过程中消耗水分形成有机物质的基本效率,成为确定植物体生长发育所需要的最佳水分供应的重要指标之一^[28]。

叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 能很好地反映与植物光合作用和蒸腾作用相关的WUE_i,可以用来间接指示植物的长期水分利用效率(WUE_L)^[29]。诸多研究认为, $\delta^{13}\text{C}$ 对植物WUE_L有较好的指示作用^[14],但并不能很好地反映WUE_i,因为Pn、Tr、Gs和Ci等多种因子随环境条件变化较大,从而引起WUE_i的变化,而 $\delta^{13}\text{C}$ 具有遗传稳定性。而本研究中,不同时期毛白杨杂种无性系叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值和瞬时水分利用效率WUE_i呈显著正相关,相关系数分别达0.766(7月)、0.872(8月)、0.675(9月),说明利用 $\delta^{13}\text{C}$ 判断毛白杨WUE_i具有一定的可行性,且在苗木生长旺盛时期(8月)选育能得到更为可靠的结果。

参考文献:

- [1] TODD E D, STEFANIA M, AGNETA H P, et al. Stable isotopes in plant ecology[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 2002, 33: 507-559.
- [2] FARQUHAR G D, EHLERINGER J R, HUBICK K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1989, 40: 503-537.
- [3] FARQUHAR G D, O'LEARY M H, BERRY J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1982, 9: 121-137.
- [4] EHLERINGER J R, COOPER T A. Correlations between carbon isotope ratio and microhabitat in desert plants[J]. Oecologia, 1988, 76(4): 562-566.
- [5] EHLERINGER J R, HALL A E, FARQUHAR G D. Stable Isotopes and Plant Carbon Water Relations[M]. San Diego: Academic Press, 1993: 155-172.
- [6] 苏波, 韩兴国, 李凌浩, 等. 中国东北样带草原区植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值及水分利用效率对环境梯度的响应[J]. 植物生态学报, 2000, 24(6): 648-655.
SU Bo, HAN Xingguo, LI Linghao, et al. Responses of $\delta^{13}\text{C}$ value and water use efficiency of plant species to environmental gradients along the grasslandzone of Northeast china transect[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2000, 24(6): 648-655.
- [7] FARQUHAR G D, RICHARDS R A. Isotopic composition of plant carbon correlates with water use efficiency of wheat genotypes[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1984, 11: 539-552.
- [8] HUBOCK K T, FARQUHAR G D. Genetic variation of transpiration efficiency among barley genotypes is negatively correlated with carbon isotope discrimination[J]. Plant Cell and Environment, 1989, 24(1): 92-99.
- [9] HUBOCK K T, FARQUHAR G D. Carbon isotope discrimination selecting for water use efficiency[J]. Australian Cotton Grower, 1987, 8(1): 66-68.
- [10] MONTI A, BRUGNOLI E, SCARTAZZA A, et al. The effect of transient and continuous drought on yield, photosynthesis and carbon isotope discrimination in sugar beet (*Beta vulgaris* L.)[J]. Journal of Experimental Botany, 2006, 57(6): 1253-1262.
- [11] SUN Z J, LIVINGSTON N J, GUY R D, et al. Stable carbon isotopes as indicators of increased water use efficiency and productivity in white spruce *Picea glauca* (Moench) Voss seedlings[J]. Plant Cell and Environment, 1996, 19(7): 887-894.
- [12] ERNST D S, NEIL C T, DEAN N, et al. Leaf and wood carbon isotope ratios, specific leaf areas and wood growth of Eucalyptus species across a rain fall gradient in Australia[J]. Tree Physiology, 2006, 26(4): 479-492.
- [13] CLAUDIA R S, JOÃO P, MAROCO P, et al. Impact of deficit irrigation on water use efficiency and carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) of field-grown grapevines under Mediterranean climate[J]. Journal of Experimental Botany, 2005, 56(12): 2163-2172.
- [14] 赵凤君, 沈应柏, 高荣孚, 等. 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与长期水分利用效率的关系[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(6): 40-45.
ZHAO Fengjun, SHEN Yingbai, GAO Rongfu, et al. Relationship between foliar carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) and long-term water use efficiency (WUE_L) [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(6): 40-45.
- [15] OLIVER B, LINDA H, HOWARD G. The $\delta^{13}\text{C}$ of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles: spatial and temporal variations[J]. Annals of Forest Science, 2003, 60: 97-104.
- [16] 刘海燕. 油松稳定碳同位素遗传稳定性及环境影响的研究[D]. 北京林业大学博士学位论文. 北京: 北京林业大学图书馆, 2008.
LIU Haiyan. Studies on genetic stability and environment influence of stable carbon isotope of *Pinus tabulaeformis* [D]. Doctoral Dissertation of Beijing Forestry University. Beijing: Beijing Forestry University li-

- brary, 2008.
- [17] 陈拓, 陈发虎, 安黎哲, 等. 不同海拔祁连山圆柏树轮和叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化[J]. 冰川冻土, 2004, 26(6): 767-77.
CHEN Tuo, CHEN Fahu, AN Lizhe, et al. Variations of tree ring and foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of sabinia przewalskii with altitude[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(6): 767-77.
- [18] CAROL S G, WINNER W E. Increased in $\delta^{13}\text{C}$ values of radish and soybean plants caused by ozone[J]. New Phytologist, 1988, 108: 489-494
- [19] 冯虎元, 陈拓, 徐世健, 等. UV-B 辐射对大豆生长、产量和稳定碳同位素组成的影响[J]. 植物学报, 2001, 7(43): 52-56.
FENG Huyuan, CHEN Tuo, XU Shijian, et al. Effect of enhanced UV-B radiation on growth, yield and stable carbon isotope composition in glycine max cultivars acta botanica sinica[J]. Acta Botanica Sinica, 2001, 7(43): 52-56.
- [20] 严昌荣, 韩兴国, 陈灵芝, 等. 中国暖温带落叶阔叶林中某些树种的 ^{13}C 自然丰度: ^{13}C 值及其生态学意义[J]. 生态学报, 2002, 22(12): 2163-2166.
YAN Changrong, HAN Xingguo, CHEN Lingzhi, et al. ^{13}C at natural abundance levels in the broad-leaved deciduous forest in the warm-temperate region of China: The $\delta^{13}\text{C}$ values and ecological significance[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(12): 2163-2166.
- [21] HALL A E, MUTTERS R G, HUBICK K T, et al. Genotypic differences in carbon isotope discrimination by cowpea under wet and dry field condition[J]. Crop Science, 1990, 30: 300-305
- [22] 尹伟伦, 万雪琴, 夏新莉. 杨树稳定碳同位素分辨率与水分利用效率和生长的关系[J]. 林业科学, 2007, 43(8): 15-22.
YIN Weilun, WAN Xueqin, XIA Xinli. Relations between stable carbon isotope discrimination and water use efficiency as well as growth for poplar[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(8): 15-22.
- [23] FRANCEY R J, GIFFORD R M, SHARKEY T A, et al. Physiological influences on carbon isotope discrimination in huon pine (*Lagastrobos franklinu*)[J]. Oecologia, 1985, 44: 241-247.
- [24] LEAVITT S W, LONG A. Stable carbon isotope variability in tree foliage and wood[J]. Ecology, 1986, 67: 1002-1010.
- [25] 韩兴国, 严昌荣, 陈灵芝, 等. 暖温带地区几种木本植物碳稳定同位素的特点[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 497-500.
HAN Xingguo, YAN Changrong, CHEN Lingzhi et al. Stable carbon isotope characteristics of some woody plants in warm temperate zone[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(4): 497-500.
- [26] 李俊, 于沪宁, 刘苏峡. 冬小麦水分利用效率及其环境影响因素分析[J]. 地理学报, 1997, 52(6): 551-560.
LI Jun, YU Huning, LIU Suxia. Water use efficiency in winter wheat field and environmental influence on it[J]. Acta Geographica Sinica, 1997, 52(6): 551-560.
- [27] 张岁岐, 山仑. 植物水分利用效率及其研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(4): 1-5.
ZHANG Suiqi, SHAN Lun. Research progress on water use efficiency of plant[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(4): 1-5.
- [28] 王会肖, 刘昌明. 作物光合、蒸腾与水分高效利用的试验研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1632-1636.
WANG Huixiao, LIU Changming. Experimental study on crop photosynthesis, transpiration and high efficient water use[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(10): 1632-1636.
- [29] 刘光琇, 陈拓, 安黎哲, 等. 青藏高原北部植物叶片碳同位素组成特征的环境意义[J]. 地球科学进展, 2004b, 19(5): 749-753
LIU Guangxiu, CHEN Tuo, AN Lizhe, et al. The environmental significance of stable carbon isotope composition of modern plant leaves in the Northern part of the Tibetan Plateau[J]. Advances in Earth Science, 2004b, 19(5): 749-753.

The characteristics of stable carbon isotope and water use efficiency for *Populus tomentosa* hybrid clones

FANG Xiaojuan^{2,1}, LI Jiyue^{3,2*}, NIE Lishui⁴, SHEN Yingbai¹, ZHANG Zhiyi^{1*}

1. National Engineering Laboratory for Tree Breeds and Key Laboratory for Genetics and Breeding in Forest Trees and Ornamental Plants, Ministry of Education, Beijing Forestry University, 100083, China;

2. Key Laboratory for Silviculture and Conservation, Ministry of Education, Beijing Forestry University, 100083, China;

3. College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou, 510642, China;

4. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing Forestry University, 100083, China

Abstract: Our objective was to explore the possibility of stable carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}$) on selection of *Populus tomentosa* hybrid clones with high water use efficiency (WUEi). We measured $\delta^{13}\text{C}$ values and WUEi in leaves, branches, and roots from seedlings of nine different clones, and analyzed the relationship between $\delta^{13}\text{C}$ and WUEi at Beijing Forestry University in 2008. The results showed that $\delta^{13}\text{C}$ values of leaves were significantly different between clones at different times, so were $\delta^{13}\text{C}$ values of branches. $\delta^{13}\text{C}$ values of leaves were highest in September followed by October, August, and July, while $\delta^{13}\text{C}$ values of branches were highest in October followed by September and August, $\delta^{13}\text{C}$ values showed significant differences between different *Populus tomentosa* hybrid clones. It implied that the difference between clones was a major factor to cause the changes of $\delta^{13}\text{C}$ values. Carbon isotope ratios were also significantly different between different parts of clones. Ratios were highest in roots followed by branches and leaves. The differences between parts in the same period caused changes of $\delta^{13}\text{C}$ value as the main factor. The clones 30, 83, and BL5 with higher $\delta^{13}\text{C}$ had higher WUEi, meanwhile, the clones 42, 26, and BT17 with lower $\delta^{13}\text{C}$ had lower WUEi. It showed positive correlation between $\delta^{13}\text{C}$ and WUEi ($r = 0.766, p = 0.016, r = 0.872, p = 0.002, r = 0.675, p = 0.023$). $\delta^{13}\text{C}$ can be used as an effective indicator to select clones of *Populus tomentosa* with high water use efficiency, especially for the selection during vigorous seedling growth.

Key words: *Populus tomentosa*; hybrid clones; carbon isotope; water use efficiency