

北京城市绿化树种叶片碳同位素组成的季节变化 及与土壤温湿度和气象因子的关系

王玉涛¹, 李吉跃^{2,1,*}, 程 炜³, 陈 崇¹, 耿 欣³

(1. 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;

2. 华南农业大学林学院, 广州 510642; 3. 北京植物园, 北京 100093)

摘要:城市绿化树种是城市生态系统的重要组成部分,为了探讨城市绿化树种水分利用效率的季节变化及其影响因素,本文对北京 24 个城市绿化树种(包括 6 个常绿针叶和 18 个落叶阔叶树种)叶片碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)的季节变化以及与土壤温湿度和气象因子的相关性进行了研究。结果表明:常绿树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 季节间差异不显著,春、夏和秋季的平均值都接近 -25.9‰ ,在 $-27.0\text{‰} \sim -24.5\text{‰}$ 间变化;落叶树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 季节间差异极显著($p = 1.97 \times 10^{-7} < p = 0.01$),除国槐外夏季各树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 最低,平均为 -27.095‰ ,而春季最高,为 -25.638‰ ,秋季居中,为 -26.291‰ ,且种间差异极显著($p = 5.05 \times 10^{-6} < p = 0.01$),最大为 -23.396‰ (白腊春季),最小为 -28.360‰ (臭椿夏季),变幅达 5‰ ;落叶树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与土壤温湿度和气象因子的相关性明显高于常绿树种,达到显著水平,表明落叶树种的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 更易受环境的影响,而常绿树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 主要受自身的生物学特性决定。叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值春季 $>$ 秋季 $>$ 夏季,表明绿化树种水分利用效率(WUE)也为春季 $>$ 秋季 $>$ 夏季。研究发现:叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与比叶面积(SLA)呈显著的负相关(落叶 $p = 6.195 \times 10^{-8} < p = 0.01$;常绿 $p = 0.002 < p = 0.01$),因此,SLA 可以在生产作为叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 简易代替指标来估计 WUE。

关键词:绿化树种;叶片 $\delta^{13}\text{C}$;土壤温湿度;气象因子;比叶面积;水分利用效率

文章编号:1000-0933(2008)07-3143-09 中图分类号:Q143 文献标识码:A

Study on seasonal variation in carbon isotope composition correspond with soil temperature and humidity and weather factors for main greening tree species in Beijing

WANG Yu-Tao¹, LI Ji-Yue^{2,1,*}, CHENG Wei³, CHEN Chong¹, GENG Xin³

1 Key Laboratory for Silviculture and Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

3 Beijing Botanical Garden, Beijing 100093, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3143 ~ 3451.

Abstract: Greening tree species in urban is vital part of urban ecosystem. To study effects of seasonal variation and other variables on water use efficiency the tree species, 24 trees species (6 evergreen conifer and 18 deciduous broadleaf trees) were used to examined seasonal change in the foliar $\delta^{13}\text{C}$ and relationships of the $\delta^{13}\text{C}$ with soil temperature, humidity and the other weather variables in Beijing Botanical Garden in 2006, The results showed that the foliar $\delta^{13}\text{C}$ of evergreen species

基金项目:北京市科技计划资助项目(D0605001040191),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课题(JD100220535)

收稿日期:2007-12-11; **修订日期:**2008-04-02

作者简介:王玉涛(1978~),女,博士生,主要从事城市林业研究. E-mail: ytw730@sina.com.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ljyymy@vip.sina.com

Foundation item: The project was financially supported by Beijing science and technology project (No. D0605001040191) and the project of key laboratory for silviculture and conservation of Beijing Forestry University (No. JD100220535)

Received date: 2007-12-11; **Accepted date:** 2008-04-02

Biography: WANG YU-Tao, Ph. D. candidate, mainly engaged in water ecophysiology in trees. E-mail: ytw730@sina.com

had insignificant difference, and the seasonal change was from -27.0‰ to -24.5‰ , however, the foliar $\delta^{13}\text{C}$ of these deciduous species and the seasonal change were insignificantly different ($p = 5.05 \times 10^{-6} < p = 0.01$, $p = 1.97 \times 10^{-7} < p = 0.01$). The largest values of the foliar $\delta^{13}\text{C}$ (-23.396‰) was found in *Fraxinus Chinese* in spring and the smallest values was 28.360‰ (*Ailanthus altissima*) in summer, the difference was 5‰ . The foliar $\delta^{13}\text{C}$ of deciduous species was significantly correlated with soil temperature, humidity and weather factors, however, the correlation was insignificant for the evergreen trees. That suggests that deciduous species is more sensitive to environmental change, but the foliar $\delta^{13}\text{C}$ of evergreen species is affected by their physiological traits. The foliar $\delta^{13}\text{C}$ was greater in spring than that in autumn, followed by summer. The results indicate WUE was greater in spring than that in autumn, followed by summer. The study also found the foliar $\delta^{13}\text{C}$ had a significantly negative relationship with specific leaf area (SLA). Therefore, SLA may replace foliar $\delta^{13}\text{C}$ to represent WUE in practice.

Key Words: greening tree species; foliar carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$); soil temperature and humidity; weather factors; specific leaf area; water use efficiency

自然条件下,碳有两种稳定碳同位素,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^[1,2]。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^[3]。Farquhar 等认为,植物组织的稳定碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}$ 和稳定碳同位素分辨力 $\Delta^{13}\text{C}$ 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^[4~8],并在小麦的研究上得到证实^[9]。目前,国内外学者,在草本植物如小麦^[10]、花生^[11]、棉花^[12]、大麦^[13]、甜菜^[14],木本植物如白云杉^[15]、桉树^[16,17] 和黑杨无性系^[18] 以及藤本植物葡萄^[19] 等方面进行了 $\delta^{13}\text{C}$ 或 $\Delta^{13}\text{C}$ 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。

影响植物气体交换代谢过程的环境因子对许多植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值也产生影响,包括降雨量^[8,20,21]、土壤水分含量^[4,5,22]、湿度^[23]、温度^[24,25]、氮素有效性^[26~29] 和大气 CO_2 浓度^[30~32] 等。总体而言,在高资源可利用的条件下植物具有较小的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,即较低的 WUE^[5,33]。植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值不仅代表了其 WUE 水平而且还表明其在水分胁迫下的生存策略,如植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值与年降雨量、年平均土壤含水量表现出显著的正相关,表明来自更干旱生境的植物种或种群的水分利用方式更保守, $\delta^{13}\text{C}$ 值随水分可利用性的降低而增加。从草本和木本植物、不同功能群植物^[34],以及山地垂直分布的植物^[35] 等方面研究叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 和水分利用效率关系的报道较多,但是对于城市绿化树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 和水分利用效率与土壤温湿度和气象因子的研究却较少,本文主要研究北京常见的常绿针叶和落叶阔叶绿化树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的季节变化,并分析不同季节土壤温湿度、气象因子对其的影响,利用碳同位素组成探讨北京城市绿化树种在城市条件下,水分利用效率季节变化及其与土壤温湿度和气象因子关系,为筛选适合北京城市绿化的抗旱节水树种和制定不同季节的灌溉方式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

北京植物园坐落于西山脚下。位于 $116^{\circ}28'\text{E}$, 40°N , 海拔 $61.6 \sim 584.6 \text{ m}$, 土壤 pH 值为 $7 \sim 7.5$; 年平均温度为 12.8°C , 年降雨量为 526 mm , 1 月份均温为 -3.3°C , 7 月份均温为 26.8°C , 1 月份极端最低温度为 -13.8°C , 7 月份极端高温为 37.7°C , 相对湿度为 61% 。园内栽培露天木本植物 15 万余株、500 余种; 露天草本植物 200 余种; 温室植物 200 余种。

1.2 植物材料

选取生长在北京植物园的 6 种常绿针叶乔木 (油松、白皮松和华山松分别取当年和两年生常绿) 和 18 种落叶阔叶乔木树种进行叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 测定 (表 1), 样木长势良好, 取树冠 $4 \sim 5 \text{ m}$ 高处向阳面成熟, 无病虫害的枝

条中部叶片,每个树种选3~5株分别测定。春季、夏季和秋季的取样时间分别是2006年5月14日~18日,7月23日~27日和9月30日~10月4日。

表1 采样树种的基本情况表
Table 1 General condition of the study trees

树种 Species	编号 No. *	拉丁名 Latin scientific name	树高 Height(m)	胸径 DBH(cm)
油松当年和两年生	ys(n)/(1)	<i>Pinus tabulaeformis</i> Carr.	9.7	27.5
白皮松当年和两年生	bps(n)/(1)	<i>Pinus bungeana</i> Zucc ex Endl	10.1	20.8
侧柏	cb	<i>Platycladus orientalis</i> Franco	15.0	23.5
华山松当年和两年生	hss(n)/(1)	<i>Pinus armandi</i> Franch	7.9	16.0
桧柏	kb	<i>Sabina chinensis</i> (L.) Ant.	11.1	
雪松	xs	<i>Cedrus deodara</i> (Roxb.) G. Don.	13.6	28.3
玉兰	yl	<i>Magnolia denudata</i> Desr.	13.4	26.0
栎树	lsh	<i>Koelreuteria paniculata</i> Laxm	10.8	24.0
刺槐	ch	<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	14.1	36.8
银杏	yx	<i>Ginkgo biloba</i> Linn.	12.0	21.2
火炬树	hj	<i>Rhus typhina</i> Torner	6.0	
白蜡	bl	<i>Fraxinus chinensis</i> Roxb.	14.1	31.3
槐树	gh	<i>Sophra japonica</i> Linn.	10.3	20.7
馒头柳	mtl	<i>Salix matsudana</i> f. <i>Umbraculifera</i> Rehd	10.7	24.9
毛白杨	mby	<i>Populus tomentosa</i> Carr.	20.6	43.3
杜仲	dz	<i>Eucommia ulmoides</i> Oliv.	11.5	36.2
杂种马褂木	mgm	<i>Liriodendron chinense</i> × <i>L. tulipifera</i>	12.1	20.4
楸树	qs	<i>Catalpa bungei</i> C. A. Mey	13.6	29.8
辽椴	ds	<i>Tilia mandshurica</i> Rupr. et Maxim	7.1	14.8
柿树	ss	<i>Diospyros kaki</i> Thunb	11.5	34.5
臭椿	cc	<i>Ailanthus altissima</i> Swingle	15.3	36.2
元宝枫	ybf	<i>Acer truncatum</i> Bunge	9.5	35.6
绦柳	tl	<i>Salix matsudana</i> f. <i>pendula</i> Schneid.	13.7	25.1
山楂	sz	<i>Crataegus pinatifida</i> Bunge	7.1	17.0

* 下同 the same below

1.3 观测内容及方法

比叶面积(Specific leaf area, SLA) 将采集的叶片迅速用 EPSON TWAIN PRO 扫描仪(加拿大)扫描叶面积,然后将样品置于70℃恒温烘箱内烘干至恒重,称其干重,计算比叶面积。

碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)测定 将上述烘干的样品研磨过0.1mm筛,用 DELTA^{plus}XP 质谱仪和 FLASH EA 固体分析仪(Thermo Finniga 公司, Germany)测定,精确度 $\pm 0.5\text{‰}$ 。

气象因子和土壤温湿度测定 在植物园内试验树种集中分布的两处各安装 DL2 环境监测系统一套,分别进行气象因子监测。综合环境监测系统 DL2e 数据采集器(Delta-T 公司, England)每隔 10min 对气象因子测定 1 次,然后把 30min 内采集的数据平均,自动记录平均值为该时段的监测数据。采集的数据包括林下层、林中和林冠层气温和相对湿度(RHT2nl-02 传感器,精度: $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 和 $\pm 2\%$)、风速(AN1-422 风速传感器,精度 $1\% \pm 0.1\text{m/s}$,灵敏度:0.8Hz per m/s)和光合有效辐射(QS2-05 光合有效辐射传感器,精度: $\pm 5\%$,灵敏度:10mV/ $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$),5、30、50cm 和 80cm 土层处的土壤温度(ST1-05 土壤温度传感器,精度: $\pm 0.1^\circ\text{C}$),5、30cm 和 80cm 土层处的土壤湿度(ML2X 土壤湿度传感器,精度: $\pm 1\%$);另外,在试验树种分布区安装了 6 个 TRIME-ITH 管式探头,定期采集土壤含水量数据,辅助监测土壤湿度。

1.4 数据分析

所有统计都采用 EXCEL 和 SPSS 统计软件分析。

2 结果与分析

2.1 绿化树种叶片碳同位素组成季节的变化

北京城市绿化树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的季节变化,落叶树种大于常绿树种(图 1)。常绿树种当年生和 2 年生叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的季节变化均不显著(图 1A),当年生叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值略大于 2 年生的。落叶树种存在明显的季节变化(图 1B),规律基本一致,除国槐外,叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现为夏季 < 秋季 < 春季的趋势。

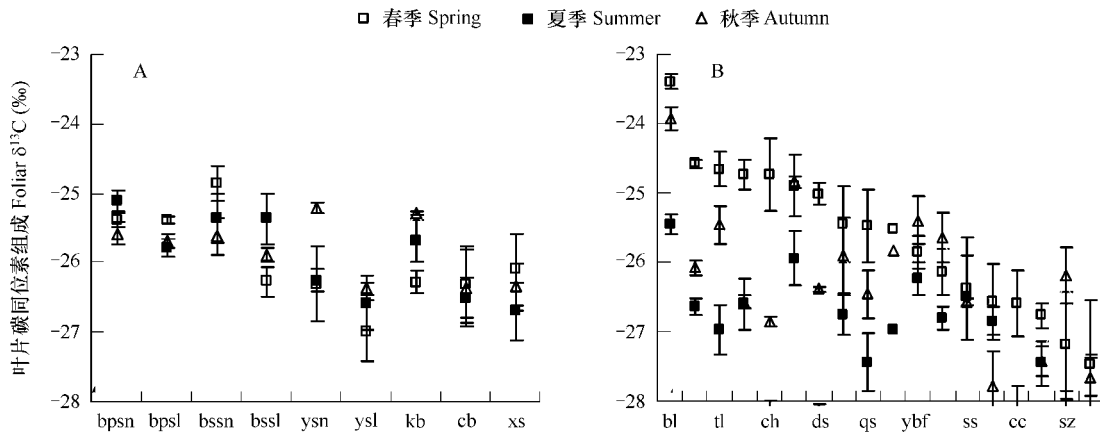


图 1 常绿树种(A)和落叶树种(B)叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的季节的变化

Fig. 1 Seasonal variation of stable carbon isotopes composition in evergreen trees (A) and deciduous trees (B)

常绿树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -27.0‰ ~ -24.5‰ 之间变化,春季、夏季和秋季的平均值都接近 -25.9‰ 。油松当年叶季节变化最大,变幅为 1.1‰ ,侧柏变化最小为 0.19‰ ;6 个常绿树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 在春季差异为 2.14‰ ,夏季为 1.61‰ ,秋季为 1.17‰ ,经方差分析,春夏秋三季 6 个常绿树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异均达到极显著水平($p = 0.005 < p = 0.01$),而同种在 3 个季节间的差异未达到显著水平($p = 0.343 > p = 0.01$)。落叶树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值(图 1B)存在明显的季节变化,在 -28.4‰ ~ -23.4‰ 之间变化。椴树叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值季节变化最大为 3.3‰ ,落叶树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值在春夏秋三季,种间变化分别为 4.08‰ 、 2.91‰ 和 4.32‰ ,春季平均为 -25.638‰ ,与常绿树种接近,夏季平均为 -27.095‰ ,低于常绿树种 1.17‰ ,秋季平均为 -26.291‰ ,低于常绿树种 0.83‰ ,经方差分析,落叶树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值种间($p = 5.05 \times 10^{-6} < p = 0.01$)和季节间($p = 1.97 \times 10^{-7} < p = 0.01$)差异均达到极显著水平。Farquhar 等的研究^[3,36]表明植物组织的稳定碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}$ 与 C_3 植物的长期 WUE 具有很强的正相关性,可以作为植物长期 WUE 的间接测定指标。依据此结论,可以得出北京大部分绿化树种的水分利用效率为夏季 < 秋季 < 春季。这可能是因为北京雨水主要集中在夏季 6、7 月份和 8 月份,树种可利用的水资源相对较充分,Ehleringer 和 Schuster 研究发现高资源可利用的条件下,植物具有较小的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,较低的 WUE^[5,33]。相反春季的土壤含水量小,叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值较大,表明城市绿化树种春季的水分利用效率升高。Ernst-Detlef 等对生长在不同地区的桉树 $\delta^{13}\text{C}$ 研究中也发现当降雨量大于 300mm 时, $\delta^{13}\text{C}$ 值会随降雨量的增加而减少,即桉树 WUE 随降雨量的增加而下降^[16]。另外, Claudia 等在葡萄上的研究也得出相同的结果^[19]。本文所研究的 6 个常绿树种夏季叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值(-25.929‰)明显大于 18 个落叶树种(-27.095‰),表明常绿树种夏季在同等水分条件下,水分利用效率大于落叶树种。

2.2 叶片碳同位素组成和比叶面积

常绿树种比叶面积(specific leaf area, SLA)在 $2 \sim 8 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ 之间变化,落叶树种 SLA 在 $7 \sim 27 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ 之间变化,常绿树种 SLA 通常小于落叶树种。Gulias 等也发现从常绿植物、半常绿植物到落叶植物,SLA 具有由小变大的趋势^[37]。无论是常绿还是落叶树种的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 都随 SLA 增加而降低,并都达到极显著水平(图 2),平均 SLA 增加 1 个单位,常绿树种 $\delta^{13}\text{C}$ 值降低 0.36‰ ,落叶树种降低 0.27‰ 。目前碳稳定同位素技术普及上还受到一定限制,并且费用比较高,可以根据 SLA 与碳同位素比率显著负相关的关系,在实际应用中,使用

比叶面积代替碳同位素比率(或碳同位素分辨率)来估测水分利用效率,比使用质谱仪测定碳同位素简单快速。在以前的研究中也发现可以利用比叶重 SLW(SLA 的倒数)来作为碳同位素分辨率 Δ 替代指标^[38]。

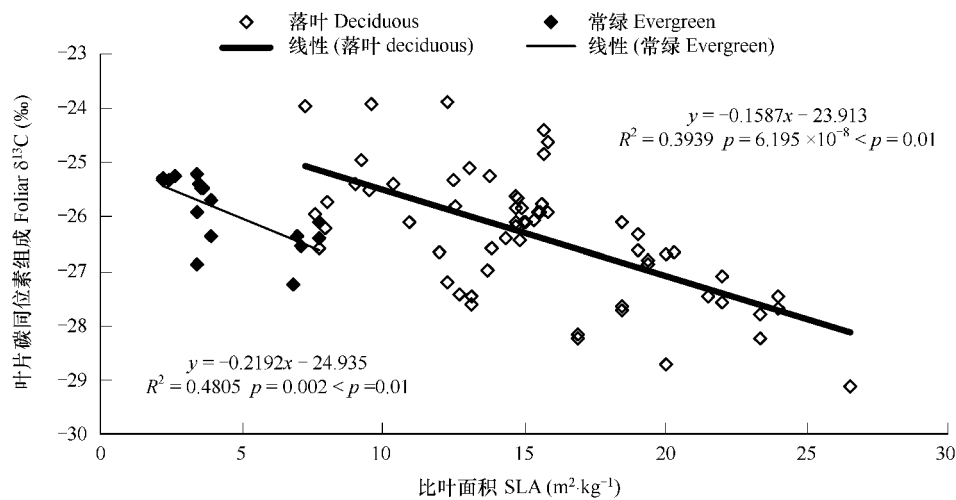


图2 比叶面积和叶片碳同位素组成的关系
Fig.2 Relationship between specific leaf area and $\delta^{13}\text{C}$

2.3 碳同位素组成与土壤温湿度和气象因子的关系

2.3.1 碳同位素组成与土壤温度和湿度的关系

所选试验树种集中分布在植物园的两处,在这两处各安装一台气象站,两台气象站所采集的土壤温湿度和气象因子数据差异不显著,基本可以反映所有试验树种的微环境,在表2中以平均数加标准误 $\pm$ 表示。

春季和夏季土壤温度随土层深度增加而降低,秋季各土层温度差异不大,各土层温度夏季最高,其次是秋季和春季;土壤湿度在80cm土层深度为最高,并且表面高于30cm处(表2),原因可能是根系主要集中30cm处,该处的水分大部分被植物利用,导致土壤湿度较小。

表2 土壤温度和湿度季节变化统计表
Table 2 Season variation of soil temperature and humidity

季节 Season	ST80 $^{\circ}\text{C}$	ST50 $^{\circ}\text{C}$	ST30 $^{\circ}\text{C}$	ST5 $^{\circ}\text{C}$	SWC80 %	SWC30 %	SWC5 %
春季 Spring	18.2 $\pm$ 0.03	19.7 $\pm$ 0.04	19.9 $\pm$ 0.08	22.4 $\pm$ 0.16	16.80 $\pm$ 0.01	4.11 $\pm$ 0.01	9.54 $\pm$ 0.03
夏季 Summer	26.1 $\pm$ 0.03	27.5 $\pm$ 0.03	27.6 $\pm$ 0.08	28.5 $\pm$ 0.10	34.78 $\pm$ 0.02	14.25 $\pm$ 0.01	26.08 $\pm$ 0.01
秋季 Autumn	25.5 $\pm$ 0.04	25.8 $\pm$ 0.04	24.5 $\pm$ 0.08	25.7 $\pm$ 0.07	30.26 $\pm$ 0.01	19.44 $\pm$ 0.01	15.84 $\pm$ 0.01

ST80、ST50、ST30 和 ST5 分别代表土壤 80cm、50cm、30cm 和 5cm 深处的土壤温度,SWC80、SWC50 和 SWC5 分别代表土壤 80cm、30cm 和 5cm 深处的土壤含水量,下表同;土壤温度和湿度的春季、夏季和秋季取值分别是 2006 年 4 月 24 日~5 月 31、6 月 20 日~7 月 31 日和 8 月 20 日~9 月 31 日的平均值($\pm$ 标准误),平均值 $\pm$ 标准误

ST80、ST50、ST30 和 ST5 is respectively the temperature of soil 80cm、30cm and 5cm, SWC80、SWC50 and SWC5 is respectively the soil water content of soil 80cm、30cm and 5cm, table 3 is the same; Soil temperature and humidity in spring、summer and autumn is respectively mean values($\pm$ SE) from Apr 20, 2006 to May 31, 2006、from Jun 20 to Jul 31 and from Aug 20 to Sep 31

从树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与不同土壤层的温度和湿度相关性分析表(表3)可见,常绿树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与土壤 80、50、30cm 和 5cm 处的温度以及土壤 80、30cm 和 5cm 处湿度相关性不显著;落叶树种与土壤温度和湿度呈显著或极显著负相关。从这角度可以看出土壤的温度和湿度都会影响到落叶树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$, 是否是共同作用的结果或是某一因素起主作用还需要进一步研究。而土壤温度和湿度对常绿树种影响较小或基本不影响。植物 $\delta^{13}\text{C}$ 是环境和生物因子共同作用的综合结果^[39]。一些研究表明常绿针叶 $\delta^{13}\text{C}$ 变化主要受光合能力^[29,35]、叶形态^[40]和 N 含量^[29]等生物因子影响,从本文中也可以发现常绿树种叶片叶 $\delta^{13}\text{C}$ 不易受环境影

响,而可能主要受内在碳同化速度或者碳素的再分配影响。

表 3 绿化树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与土壤温度和湿度的相关性分析

Table 3 Correlation of stable carbon isotopes composition of greening trees and soil temperature and humidity

树种 Tree	温度 Temperature(℃)				湿度 Humidity(%)		
	ST80	ST50	ST30	ST5	SWC80	SWC30	SWC5
常绿 Evergreen	0.0150	0.0238	0.0346	0.0385	0.0256	-0.0105	0.0469
落叶 Deciduous	-0.4589 **	-0.4878 **	-0.5102 **	-0.5138 **	-0.4927 **	-0.3293 *	-0.5108 **

* 表示相关达到显著水平, ** 表示相关达到极显著 * significant, ** remarkably significant

2.3.2 碳同位素组成与气象因子的关系

从不同季节的气象因子可见,风速和白天的光合有效辐射是从春季到秋季逐渐变小,空气温湿度无论在林下,还是在林中层或林冠层均为夏季 > 秋季 > 春季。3 个季节空气相对湿度均为林下的最大,空气温度则是冠层相对较高(表 4)。但是由于试验树种为城市绿化树种,其配置均为稀疏乔灌木型或乔草型,空气温湿度在林中不同层次差异不显著。

表 4 气象因子的季节变化

Table 4 Season variation of weather factors WS

季节 Season	WS (m/s)	GCRH (%)	GCT (℃)	LZRH (%)	LZT (℃)	LXRH (%)	LXT (℃)	PAR ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
春季 Spring	0.28 ± 0.01	52.29 ± 0.70	20.30 ± 0.17	51.72 ± 0.68	18.48 ± 0.14	55.59 ± 0.83	19.90 ± 0.19	0.245 ± 0.01
夏季 Summer	0.22 ± 0.01	68.49 ± 0.58	25.56 ± 0.12	70.45 ± 0.60	25.37 ± 0.12	70.67 ± 0.56	25.06 ± 0.12	0.212 ± 0.01
秋季 Autumn	0.15 ± 0.01	67.70 ± 0.43	22.98 ± 0.10	69.14 ± 0.44	22.82 ± 0.11	70.18 ± 0.42	22.49 ± 0.11	0.134 ± 0.01

WS、GCRH、GCT、LZRH、LZT、LXRH、LXT 和 PAR 分别代表风速、冠层空气相对湿度、冠层空气温度、林中空气相对湿度、林中空气温度、林下空气相对湿度、林下温度和光合有效辐射,下表同;春季、夏季和秋季气象因子取值时间与土壤温湿度的时间一致

WS、GCRH、GCT、LZRH、LZT、LXRH、LXT 和 PAR is respectively wind speed, relative humid in top crown, temperature in top crown, relative humid in middle forest, temperature in middle forest, relative humid under forest, temperature under forest and photosynthesis active radiation, table 5 is the same; Range of weather factor in spring, summer and autumn is identical with one of soil temperature and humidity

分别对常绿针叶树种和落叶树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与气象因子进行相关性分析(表 5)。结果表明:常绿树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与气象因子的相关性不显著,落叶树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与气象因子的相关性较强,与空气温度和相对湿度呈显著负相关,而与风速和白天光合有效辐射呈不显著正相关。落叶树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值夏季 < 秋季 < 春季,与林中的空气温湿度大小顺序正好相反。可能是由于植物气孔导度受湿度影响,当空气湿度降低时,气孔导度和胞间 CO_2 浓度降低^[41],因而导致植物对 ^{13}C 分辨率下降,即叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值增加。并且空气温度降低也会使叶片蒸腾减小,气孔导度下降,胞间 CO_2 浓度下降,叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值升高,但夏季正午可能会存在短暂的气孔关闭,对叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 是否存在影响需要进一步研究。

表 5 绿化树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与气象因子的相关性分析

Table 5 Correlation of stable carbon isotopes composition of greening trees and weather factors

树种 Tree	WS (m/s)	GCRH (%)	GCT (℃)	LZRH (%)	LZT (℃)	LXRH (%)	LXT (℃)	PAR ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
常绿 Evergreen	0.0227	0.0136	0.0401	0.0147	0.0329	0.0127	0.0405	0.0346
落叶 Deciduous	0.2446	-0.4532 **	-0.5145 **	-0.4577 **	-0.5078 **	-0.4496 **	-0.5146 **	0.1446

** 表示相关达到极显著 remarkably significant

3 结论与讨论

常绿树种与落叶树种相比,有较高的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值。Marshall 和 Zhang 研究发现在各海拔高度,常绿植物

叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值都大于落叶植物(即常绿植物叶片 Δ 小于落叶植物)^[35]。常绿树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 无显著的季节差异,而落叶树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值为夏季 < 秋季 < 春季(图 1),这可能是不同叶形在利用 CO_2 方式不同的结果。Marshall 和 Zhang (1994) 研究表明落叶树种对 CO_2 的识别能力强,导致较低的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ ^[35]。李明财等人对青藏高原 10 科 28 种植物的叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 进行研究,也发现叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 夏季(8 月) < 春季(6 月)的现象,并认为与大气压、光照、降水和温度等环境因素密切相关^[42]。笔者认为常绿树种 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化较小,可能与常绿树种前一年的积累以及树干木质部的营养物质再分配有关,仍需进一步研究。由于 $\delta^{13}\text{C}$ 与长期水分利用效率呈反比,可见城市绿化树种不同季节的水分利用效率在常绿树种和落叶树种间存在一定差异。常绿树种在 3 个季节均维持较高的水分利用效率,而落叶树种水分利用效率为春季 > 秋季 > 夏季。落叶树种夏季水分利用效率低,可能与北京雨水主要集中在夏季 6、7 月和 8 月份,土壤含水量高于春秋两季,树种可利用的水资源相对较充分,导致水分利用效率下降。相似的研究也表明在高资源可利用的条件下的植物具有较小的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,即较低的 WUE^[5,33]。高的降雨量会产生低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,这一结论在桉树^[16]、葡萄^[19]、10 科 28 种高山植物^[42] 等多个研究中得到证实。但有些研究表明植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值随土壤含水量的升高而升高^[43],这与本文结果相矛盾,所以,在进行植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与环境因子的相关性研究时,要考虑到植物对环境适应的特异性,多选择群落组成中的优势种。

常绿树种当年生叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值大于 2 年生叶,是由于 2 年生叶光合能力降低,对 CO_2 的辨别力增加的结果。多个研究表明针叶植物光合能力随叶龄增加而下降^[35,42,45],降低了对 ^{13}C 的同化的能力。

落叶树种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与土壤温湿度和气象因子的相关性达到显著水平,而常绿树种的相关性未达到显著水平。植物 $\delta^{13}\text{C}$ 是环境和生物因子共同作用的综合结果^[38]。许多研究表明常绿树种 $\delta^{13}\text{C}$ 变化主要与光合能力^[29,35,46]和叶形态^[40],以及能直接导致光合能力下降的生物因子,如叶片 N 含量^[29,44]、叶龄^[44]、气孔导度^[44,46]、SLA^[35,46]等因子有关。而落叶树种 $\delta^{13}\text{C}$ 除了受自身因素影响外,土壤温度和气象等环境因子的影响也较显著。植物对环境变化的响应应该重视植物的多样性变化,Ernst-Detlef 研究表明在干旱地区区间 $\delta^{13}\text{C}$ 变化较大,单个种的研究要得出一个普遍的结论是不可能的,一定要注意生物的多样性和群落的整体响应^[16]。

所选择的北京城市绿化树种 SLA 的变化范围在 $2 \sim 27\text{m}^2\text{kg}^{-1}$ 之间,与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈极显著负相关。Ernst-Detlef 研究桉树属植物 SLA 变化范围在 $2 \sim 6\text{m}^2\text{kg}^{-1}$ 之间,且也与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈负相关^[16]。另外,一些研究还表明比叶重 SLW(SLA 的倒数)与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈正相关^[38,40]。可见用 SLA(或 SLW)代替碳同位素组成(或碳同位素辨别力)来估计 WUE 是可靠的,在实际应用中具有简便易行的特征。

城市绿化树种是人为管理下的城市生态系统的一部分,受土壤因素、气象因素和人为因素三重影响。落叶树种叶片碳同位素组成的季节性变化,反应了绿化树种水分利用效率的季节性变化。北京是一个严重缺水的城市,在绿化上应该选择各个季节水分利用效率都比较高的树种,同时也应该注重树种的生态效益及美观效果,由于夏季蒸发大的树种可以降低城市温度,增加湿度,所以在进行绿化时,也应适当配置此类树种,不仅考虑树种的节水性,还应力求其能发挥最大的生态、经济和社会价值。并根据不同树种不同季节的水分利用效率制定不同时期的灌溉强度,以及根据降雨量适当调整灌溉的频率和强度,并且对不同树种采用不同的灌溉量,这样不仅能够充分发挥树种最佳的水分利用效率,而且极大地节水城市绿化用水。

References:

- [1] Dawson T E, Mambelli S, Plamboeck A H, *et al.* Stable isotopes in plant ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, 33: 507—559.
- [2] Warren C R, McGrath J F, Adam M A. Water availability and carbon isotope discrimination in conifers. *Oecologia*, 2001, 127(4): 426—486.
- [3] Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 1989, 40(6): 503—537.
- [4] Ehleringer J R, and Cooper T A. Correlations between carbon isotope ratio and microhabitat in desert plants. *Oecologia*, 1988, 76(4): 562—566.

- [5] Ehleringer J R, Hall A E, Farquhar G D, *et al.* Stable isotopes and plant carbon water relations. San Diego: Academic Press. 1993, 155 — 172.
- [6] Ebdon J S, Petrovic A M, Dawson T E. Relationship between carbon isotope discrimination, water use efficiency and evapotranspiration in Kentucky blue grass. *Crop Science*, 1998, 38(1): 157 — 162.
- [7] Arslan A F, Zapata and Kumarasinghe K S. Carbon isotope discrimination as indicator of water use efficiency of spring wheat as affected by salinity and gypsum additions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1999, 30(17/18): 2681 — 2693.
- [8] Su B, Han X G, Li L H, *et al.* Responses of $\delta^{13}\text{C}$ value and water use efficiency of plant species to environmental gradients along the grassland zone of northeast China transect. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(6): 648 — 655.
- [9] Farquhar G D, Richards R A. Isotopic composition of plant carbon correlates with water use efficiency of wheat genotypes. *Aust J Plant Physiol*, 1984, 11(5): 539 — 552.
- [10] Malse J, Farquhar G D. Effects of soil strength on the relation of water use efficiency and growth to carbon isotope discrimination in wheat seedlings. *Plant Physiol*, 1988, 86(1): 32 — 38.
- [11] Hubock K T, Shorter R and Farquhar G D. Heritability and genotype environmental interaction of carbon isotope discrimination and transpiration efficiency in peanut (*Arachis hypogaea*). *Aust J of Plant Physiol*, 1988, 15(6): 799 — 813.
- [12] Hubock K T and Farquhar G D. Carbon isotope discrimination selecting for water use efficiency. *Aust Cotton Grower*, 1987, 8(1): 66 — 68.
- [13] Hubock K T, Farquhar G D. Genetic variation of transpiration efficiency among barley genotypes is negatively correlated with carbon isotope discrimination. *Plant Cell Environ*, 1989, 24(1): 92 — 99.
- [14] 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.). *Journal of Experimental Botany*, 2006, 57(6): 1253 — 1262.
- [15] 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. *Plant Cell and Environment*, 1996, 19(7): 887 — 894.
- [16] Schulze E D, Turner N C, Nicolle D, *et al.* Leaf and wood carbon isotope ratios, specific leaf areas and wood growth of Eucalyptus species across a rain fall gradient in Australia. *Tree Physiol*, 2006, 26(4): 479 — 492.
- [17] Osorio J, Pereira J S. Genotypic differences in water use efficiency and ^{13}C discrimination in Eucalyptus globules. *Tree Physiol*, 1994, 14(8): 871 — 882.
- [18] Zhao F J, Shen Y B, Gao R F, *et al.* Relationship between foliar carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) and long-term water use efficiency (WUE). *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(6): 40 — 45.
- [19] Claudia R S, João P, Maroco, *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. *Journal of Experimental Botany*, 2005, 56(12): 2163 — 2172.
- [20] Anderson J E, Kriedemann P E, Austin M P, *et al.* Eucalypts forming a canopy functional type in dry sclerophyll forests respond differentially to environment. *Aust J Bot*, 2000, 48(6): 759 — 775.
- [21] Roden J S and Ehleringer J R. Summer precipitation influences the stable oxygen and carbon isotopic composition of tree-ring cellulose in *Pinus ponderosa*. *Tree Physiol*, 2007, 27(4): 491 — 501.
- [22] Korol RL, Kirschbaum MUF, Farquhar G D, *et al.* Effects of water status and soil fertility on the C-isotope signature in *Pinus radiata*. *Tree Physiol* 1999, 19(4): 551 — 562.
- [23] Madhavan D, Treichel I, O'Leary M H. Effects of relative humidity on carbon isotope fractionation in plants. *Bot Acta*, 1991, 104(2): 292 — 294.
- [24] Welker J M, Wookey P A, Parsons A N, *et al.* Leaf carbon isotope discrimination and vegetative responses of *Dryas octopetala* to temperature and water manipulations in a High Arctic polar semi-desert, Svalbard. *Oecologia*, 1993, 95(3): 463 — 469.
- [25] Panek J A, blaring R H. Stable carbon isotopes as indicators of limitations to forest growth imposed by climate stress. *Ecol Appl*, 1997, 7(4): 854 — 863.
- [26] Condon A G, Richards R A, Farquhar G D. The effect of variation in soil water availability, vapor pressure deficit and nitrogen nutrition on carbon isotope discrimination in wheat. *Aust J Agr Res*, 1992, 43(9): 935 — 947.
- [27] Högberg P, Johansson C, Hallgren J E. Studies of $\delta^{13}\text{C}$ in the foliage reveal interactions between nutrients and water in forest fertilization experiments. *Plant and Soil*, 1993, 152(2): 207 — 214.
- [28] Guehl J M, Fort C, Ferhi A. Differential response of leaf conductance, carbon isotope water-use efficiency to nitrogen deficiency in maritime pine and pedunculate oak plants. *New Phytol*, 1995, 131(1): 149 — 157.
- [29] Duursma R A & Marshall J D. Vertical canopy gradients in correspond with leaf nitrogen content in a mixed-species conifer forest. *Trees*, 2006, 20(5): 496 — 506.
- [30] Bettarini I, Calderoni M and Raschi A, *et al.* Isotopic carbon discrimination and leaf nitrogen content of *Erica arborea* L. along a CO_2 concentration gradient in a CO_2 spring in Italy. *Tree Physiol*, 1995, 15(3): 327 — 332.

- [31] Ehleringer J R, Ceding T E. Atmospheric CO₂ and the ratio of intercellular to ambient CO₂ concentrations in plants. *Tree Physiol*, 1995, 15(1): 105 – 111.
- [32] Williams D G, Gempko V, Fravolini A, *et al.* Carbon isotope discrimination by *Sorghum bicolor* under CO₂ enrichment and drought. *New Phytol*, 2001, 150(1): 285 – 293.
- [33] Schuster WSF, Sandquist D R, Phillips S L, Ehleringer J R. Comparisons of carbon isotope discrimination in populations of arid land plant species differing in lifespan. *Oecologia*, 1992, 91(3): 332 – 337.
- [34] Chen S P, Bai Y F, Han X Guo. Variations in composition and water use efficiency of plant Functional Groups based on their water ecological groups in the Xilin River basin. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(10): 1251 – 1260.
- [35] Marshall J D, Zhang J W. Carbon isotope discrimination and water use efficiency in native plants of the north-central Rockies. *Ecology*, 1994, 75(7): 1887 – 1895.
- [36] 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. *Aust J Plant Physiol*, 1982, 9(1): 121 – 137.
- [37] Gulias J, Flexas J, Maurici M U S, *et al.* Relationship between maximum leaf photosynthesis, nitrogen content and specific leaf area in Balearic endemic and non-endemic Mediterranean. *Annals of Botany*, 2003, 92(2): 215 – 222.
- [38] Xue H Q, Gan X M, Sun M H *et al.* Study on the relationship between water use efficiency and carbon isotope discrimination in drought condition. *Chinese Journal of Oil Crop Science*, 1999, 21(1): 27 – 34.
- [39] Shi Z M, Cheng R M, Liu S R. Response of leaf ¹³C to altitudinal gradients and its mechanism. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2901 – 2906.
- [40] Hultine K R and Marshall J D. Altitude trends in conifer leaf morphology and stable carbon isotope composition. *Oecologia*, 2000, 123(1): 32 – 40.
- [41] Chen T, Qin D H, Kang X C, *et al.* Progress and prospect in tree-ring carbon isotope research. *Exploration of Nature*, 1999, 18(1): 59 – 65.
- [42] Li M C, Yi X F, Li L X, *et al.* Seasonal Variations of ¹³C Values in Leaves of Typical Alpine Plants Grown in the East of Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin*, 2005, 25(1): 77 – 81.
- [43] Chen T, Yang M X, Feng H Y, *et al.* Spatial Distribution of Stable Carbon Isotope Compositions of Plant Leaves in the North of the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(1): 83 – 87.
- [44] Warren C R. Why does photosynthesis decrease with needle age in *Pinus pinaster*? *Trees*, 2006, 20(2): 157 – 164.
- [45] Warren C R, Dreyer E, Adams M A. Photosynthesis-Rubisco relationships in foliage of *Pinus sylvestris* in response to nitrogen supply and the proposed role of Rubisco and amino acids as nitrogen stores. *Trees*, 2003, 17(3): 359 – 366.
- [46] Bonal D, Born C, Brechet C, *et al.* The successional status of tropical rainforest tree species is associated with differences in leaf carbon isotope discrimination and function traits. *Ann. For. Sci.*, 2007, 64(2): 169 – 176.

参考文献:

- [8] 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. *植物生态学报*, 2000, 24(6): 648 ~ 655.
- [18] 赵凤君, 沈应柏, 高荣孚. 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与长期水分利用效率的关系. *北京林业大学学报*, 2006, 28(6): 40 ~ 45.
- [38] 薛慧勤, 甘信民, 孙明辉, 等. 干旱条件下花生水分利用效率与叶片碳同位素辨别力的相关性研究. *中国油料作物学报*, 1999, 21(1): 27 ~ 34.
- [39] 史作民, 程瑞梅, 刘世荣. 高山植物叶片 ¹³C 的海拔响应及其机理. *生态学报*, 2004, 24(12): 2901 ~ 2906.
- [41] 陈拓, 秦大河, 康兴成, 等. 稳定碳同位素的研究现状及前景. *大自然探索*, 1999, 18(1): 59 ~ 65.
- [42] 李明财, 易现峰, 李来兴, 等. 青藏高原东部典型高山植物叶片 ¹³C 的季节变化. *西北植物学报*, 2005, 25(1): 77 ~ 81.
- [43] 陈拓, 杨梅学, 冯虎元, 等. 青藏高原北部植物叶片碳同位素组成的空间特征. *冰川冻土*, 2003, 25(1): 83 ~ 87.