

低纬高原气候带分布差异对不同烤烟品种 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响

王 毅¹, 田先娇^{2,3}, 宋鹏飞¹, 倪 霞⁴, 王 娟³,
谭淑文³, 吴潇潇³, 黄 韡⁴, 陈宗瑜^{3*}

(1.红塔集团技术中心, 云南 玉溪 653100; 2.德宏师范高等专科学校生命科学系, 云南 德宏 678400; 3.云南农业大学农学与生物技术学院, 昆明 650201; 4.云南省烟草公司昭通市公司, 云南 昭通 657000)

摘 要 选具有近 4 个纬度差异, 地处 2 个不同气候带的玉溪市通海县和昭通市鲁甸县 2 个生态烟区, 研究了 K326、红花大金元和 KRK26 烤烟品种在旺长和成熟期的稳定碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}$) 分布值对气候环境的响应。结果表明, 3 个品种烟叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围为 -26.56‰ ~ -24.36‰, 旺长期烟叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现为通海大于鲁甸, 成熟期除 KRK26 外, $\delta^{13}\text{C}$ 值表现为鲁甸大于通海。对比旺长期和成熟期, 两地各品种的 $\delta^{13}\text{C}$ 值都表现为成熟期大于旺长期, 即随着烟叶成熟度增加, 分布在 2 个气候带烤烟的水分利用效率都在逐渐提高。品种间比较表明, 无论是旺长期还是成熟期, 通海都表现为 KRK26 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最大, 鲁甸则表现为红花大金元的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最大。而 3 个品种下部叶和中部叶 $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值都表现为通海大于鲁甸, 且均与旺长期表现出一致的规律, 支持温度较高, 日照时数较长, 降水量较少, $\delta^{13}\text{C}$ 值越大的结论。

关键词: 气候带; 烤烟; 品种; $\delta^{13}\text{C}$ 值

中图分类号: S572.01

文章编号: 1007-5119 (2013) 06-0024-06

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5119.2013.06.006

Effects of Distribution Difference in Climatic Zones of Low Altitude Plateau on Carbon Isotope Ratio in Different Tobacco Cultivars

WANG Yi¹, TIAN Xianjiao^{2,3}, SONG Pengfei¹, NI Xia⁴, WANG Juan³, TAN Shuwen³,
WU Xiaoxiao³, HUANG Wei⁴, CHEN Zongyu^{3*}

(1. Technological Center of Hongta Group, Yuxi 653100, Yunnan, China; 2. Dehong Normal College, Dehong, Yunnan 678400, China; 3. Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 4. Zhaotong Tobacco Company of Yunnan Province, Zhaotong, Yunnan 657000, China)

Abstract: The response of stable carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}$) distribution of tobacco cultivars K326, Hongda and KRK26 to climate and environment were studied at rapid growth stage and physiological maturity stage by selecting two ecological tobacco growing areas with nearly four latitude difference, located at Tonghai of Yuxi and Ludian of Zhaotong prefecture in two different climatic zones. The results showed that $\delta^{13}\text{C}$ value of tobacco leaves ranged from -26.56‰ to -24.36‰. The $\delta^{13}\text{C}$ values for all of the tobacco varieties at Tonghai were greater than Ludian, except for KRK26. The $\delta^{13}\text{C}$ value at Ludian was greater than those at Tonghai in maturity stage. In contrast to the rapid growth and maturity stage, the $\delta^{13}\text{C}$ value at maturity stage was greater in all varieties for all locations. With the increasing of maturity of tobacco leaves, water use efficiency of the tobacco gradually increased in two climatic zones. Comparison between varieties, for both growth stages, the $\delta^{13}\text{C}$ value of KRK26 was the largest in Tonghai, the $\delta^{13}\text{C}$ value of Hongda was the largest in Ludian. The average value of $\delta^{13}\text{C}$ in tobacco of the lower leaves and cutters in Tonghai was greater than Ludian, which support the conclusion that the higher temperature, the longer sunshine hours, the less precipitation, the value of $\delta^{13}\text{C}$ was larger. The results indicate that temperature, sunlight, precipitation, and variety have significant effect on tobacco $\delta^{13}\text{C}$ value.

Keywords: climatic zone; flue-cured tobacco; variety; carbon isotope ratio

地球表面气候带的形成与某一区域所处的纬度和海拔有关, 纬度除制约太阳辐射到达量外, 主要影响地区的光照和温度; 而海拔是气候形成的地理要素, 除与温度变化有关外, 还影响降水的分布,

基金项目: 国家烟草专卖局项目 (110200801034)、(110201101003TS-03); 云南省烟草公司项目 (2013YN31)

作者简介: 王 毅, 男, 高级农艺师, 主要从事生态环境与烤烟品质形成关系的研究。E-mail: mnh@hongta.com

*通信作者, E-mail: zchen191@vip.sohu.com

收稿日期: 2012-04-30

修回日期: 2013-07-31

因此纬度和海拔成为影响生态环境的主要地理因子。烤烟是一种对生态环境较为敏感的经济作物，在烤烟种植过程中生态环境的差异会对叶片的光合速率、水分利用效率和气孔开闭等烤烟各种生理状态产生影响，而植物稳定碳同位素的组成则承载了众多环境信息的变化^[1]。近年来，碳同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}$) 在植物生理生态研究领域有广泛的应用^[2]，在以往研究中植物稳定碳同位素被更多地应用于气候学在全球变化、区域环境差异等研究领域^[3-5]，而把碳稳定同位素应用于经济作物烤烟中的研究却少有报道。本研究选取在辐射环境、气温、降水量、湿度等气候要素存在一定差异的滇南中亚热带的通海县和滇东南温带的鲁甸县的不同烤烟品种。在其主要大田生长期同步观测获取 UV-B 辐射强度和光照强度，从当地气象站获取气温、降水量等气候要素值，并分别在烤烟旺长期和成熟期采样用于测定叶片的稳定碳同位素分布值，初步分析了气候带的分布差异对不同烤烟品种 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料及处理

以烤烟品种 K326、红花大金元（红大）和 KRK26 为试验材料，选择云南省境内中高海拔的主产烟区进行大田种植，试验点位于玉溪市通海县四街镇（24°7' N, 102°45' E；海拔 1806 m）和昭通市鲁甸县（27°11' N, 103°33' E，海拔 1950 m）。两处试验地种植面积均为 667 m²，在整个烤烟生长期根据当地烟草公司制定的田间栽培措施统一管理。

1.2 UV-B 辐射和光照强度的测定

在烤烟大田主要生育期内，于 2010 年 5 月 17 日开始在两地室外同步进行逐日观测 11:30—12:30 时自然环境中的太阳 UV-B 辐射强度和光照强度，至 8 月 31 日结束，每一轮测定 3 组值，取其平均值作为最后测定值。

1.3 烤烟叶片稳定碳同位素组成的测定

两地分别在烤烟旺长期和成熟期选取烤烟下部（第 8 叶位）和中部（第 13 叶位）烟叶处理进

行稳定碳同位素测定。每一叶位分别选择 4~5 株作为一个混合样品，将叶片洗净后，在 105 °C 下杀青，然后置于恒温干燥箱中烘干（60 °C，连续烘干 48 h），粉碎过 80 目筛制成备用样品，送中国科学院南京土壤研究所进行稳定碳同位素分析，其测定精度为 0.1‰。样品在高温 800 °C 左右的高纯氧气条件下充分燃烧，提取燃烧产物 CO₂，用质谱仪测定碳同位素的比率。分析结果参照国际 PDB（Belemnite from the Pee Dee Formation）标准，根据下面公式进行计算：

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{样品}} - (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{PDB}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{PDB}}} \times 1000$$

其中， $\delta^{13}\text{C}$ 表示烟叶样品碳同位素组成， $(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{PDB}}$ 表示南卡罗来那州白碇石（Pee Dee Belemnite）中的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 。

2 结果

2.1 光照强度和 UV-B 辐射强度的差异

图 1a 表示通海和鲁甸两个不同生态区 2010 年 5 月中旬至 8 月下旬光照强度旬平均值随时间的变化趋势。可以看出，除 8 月下旬外，通海和鲁甸两地的光照强度旬平均值变化趋势基本相似。通海光照强度旬平均值的变化范围为 2.60~6.66 ($\times 10^4 \text{Lx}$)。鲁甸光照强度旬平均值的变化范围为 2.92~5.90 ($\times 10^4 \text{Lx}$)。图 1b 表示 UV-B 辐射强度旬平均值随时间的变化趋势。5 月中旬至 7 月上旬及 8 月上旬通海和鲁甸 UV-B 辐射强度的旬平均值接近，除 8 月下旬外，两地的变化趋势也较一致。通海 UV-B 辐射强度旬平均值的变化范围为 0.26~0.63 mw/cm^2 。鲁甸 UV-B 辐射强度旬平均值的变化范围为 0.30~0.69 mw/cm^2 ，5 月中旬至 8 月中旬，通海和鲁甸两个生态区的光照强度和 UV-B 辐射强度的旬平均值随时间变化表现出相似的变化趋势。

2.2 气候要素的差异

表 1 反映的是通海和鲁甸两个不同气候带生态烟区的日平均气温、日平均相对湿度、旬降水总量

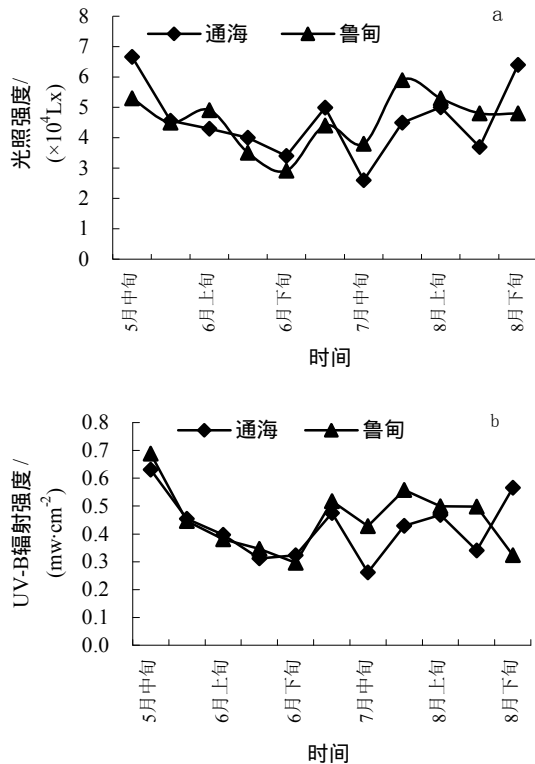


图1 烤烟主要大田生长期两地光照强度和 UV-B 辐射强度变化

Fig. 1 The changes of solar illumination and UV-B radiation during tobacco field growth period

和甸总日照时数的统计值。可以看出,5—8月通海的平均气温值总体上高于鲁甸,除7月下旬至8月中旬外,通海的旬平均气温明显高于鲁甸。

在降水量方面,鲁甸的降水量总体上多于通海,通海的降水量集中在5月下旬、7月中旬和7月下旬,鲁甸的降水量除5月下旬和7月下旬较少外,其余时段降水都较多。5—8月通海和鲁甸的降水总量分别为306.6 mm和611.8 mm。

通海5—6月的月平均相对湿度总体上小于鲁甸,7—8月总体上大于鲁甸。

除7月下旬和8月中旬外通海的总日照时数都大于鲁甸。

2.3 两地不同品种烤烟叶片稳定碳同位素组成的差异

由图2可知,在旺长期通海K326、红大和KRK26的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为-25.47‰、-25.04‰和-25.0‰,鲁甸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为-26.05‰、-25.58‰和-26.56‰。旺长期通海和鲁甸对应品种间的比较,通海K326、红大和KRK26的 $\delta^{13}\text{C}$ 大于鲁甸对应的3个品种,分别比鲁甸3个品种的 $\delta^{13}\text{C}$ 值大0.58‰,0.54‰,1.56‰。在成熟期通海K326、红大和KRK26的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为-25.05‰、-25.06‰和-24.7‰,鲁甸K326、红大和KRK26的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为-24.58‰、-24.54‰和-25.15‰。成熟期通海和鲁甸对应品种间的比较,通海K326和红大的 $\delta^{13}\text{C}$ 值小于鲁甸,KRK26的 $\delta^{13}\text{C}$ 大于鲁甸。对比旺长期和成熟期,可知通海成熟期K326和KRK26的 $\delta^{13}\text{C}$ 值大于旺长期,且鲁甸3个品种成熟期的 $\delta^{13}\text{C}$ 值大于对应品种旺长期的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。

图3反映的是通海和鲁甸烤烟下部叶和中部叶稳定碳同位素的平均值,由图可知,3个品种的 $\delta^{13}\text{C}$ 值都为通海大于鲁甸,且无论是品种间还是两个烟区间的比较结果,都与图2中旺长期表现出一致的规律。

3 讨论

在农业生产中,农业结构、种植制度、品种布局 and 产量形成的差异,气候要素的作用占了相当大的权重。中亚热带的总体气候特点是日照充足,热

表1 烤烟主要大田生长期气候资料

Table 1 Climatic data during tobacco field growth period

气候要素	试验地	5月上旬	5月中旬	5月下旬	6月上旬	6月中旬	6月下旬	7月上旬	7月中旬	7月下旬	8月上旬	8月中旬	8月下旬
气温/ $^{\circ}\text{C}$	通海	21.9	21.8	20.8	19.5	22.0	20.6	21.7	21.3	20.0	20.2	20.7	19.5
	鲁甸	17.2	17.9	18.0	15.3	17.0	18.5	21.3	20.2	21.0	20.6	22.2	17.4
降水量/mm	通海	2.0	-1	75.9	18.2	25.8	28.9	0.3	46.8	73.2	27.0	4.9	3.6
	鲁甸	14.7	1.1	29.9	60.0	64.7	103.7	68.9	103.5	40.5	60.0	11.8	53.0
相对湿度/%	通海	47.0	48.8	71.0	75.6	71.1	78.5	75.0	77.1	84.4	81.5	81.6	76.1
	鲁甸	65.1	60.8	65.5	76.5	79.3	79.5	72.5	75.3	73.1	72.6	66.4	75.2
日照时数/h	通海	108	107	70	64	84	41	64	57	40	61	53	71
	鲁甸	59	71	42	16	15	11	48	19	49	49	65	27

注:-1表示降水量不足0.1 mm。

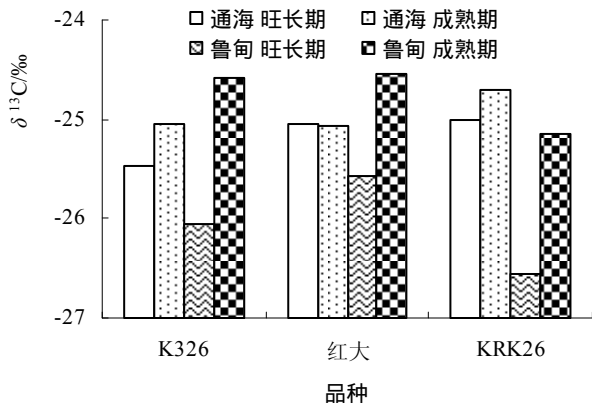


图 2 两地不同生长期烤烟叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值

Fig. 2 Stable carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) in tobacco leaves of different periods of the two locations

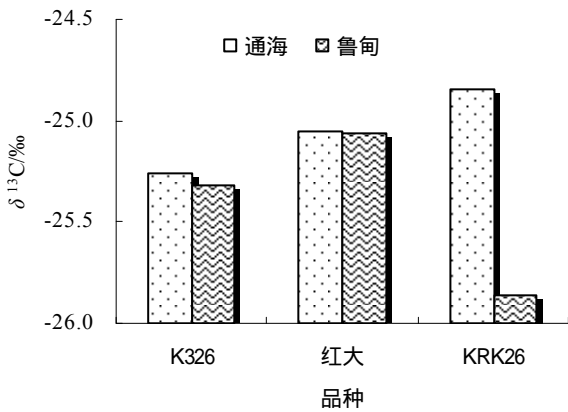


图 3 两地烤烟叶片下部叶和中部叶 $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值

Fig. 3 The average value of $\delta^{13}\text{C}$ in tobacco of the lower leaves and cutters at the two locations

量条件好，水分条件稍有亏缺；南温带则表现为日照时数较少，气温偏低，降水较充足^[6]。而通海和鲁甸所具有的气候特点符合两个气候带所具有的特征，而气候环境的不同必然会对植物稳定碳同位素组成产生影响。

辐射环境的差异对植物叶片的光合速率和气孔开闭等造成影响，导致植物稳定碳同位素的组成发生变化^[1]。从旬平均值的变幅看，5月中旬至7月上旬，总体上通海的总日照时数都大于鲁甸，与之对应旺长期通海3个品种的 $\delta^{13}\text{C}$ 都大于鲁甸。鲁甸的UV-B辐射强度旬平均值总体上大于通海。有人用 $\delta^{13}\text{C}$ 研究过不同大豆品种对UV-B辐射的敏感性，发现UV-B增强情况下，对UV-B辐射敏感的品种其 $\delta^{13}\text{C}$ 会减少^[7]。烤烟成熟期鲁甸K326和红

大的 $\delta^{13}\text{C}$ 都大于通海，但KRK26的 $\delta^{13}\text{C}$ 却小于通海相同品种的 $\delta^{13}\text{C}$ ，是否可认为烤烟品种KRK26比K326和红大对UV-B辐射更敏感，其间关系还有待深入研究。

温度与植物 $\delta^{13}\text{C}$ 之间的关系比较复杂，一些研究指出温度和植物 $\delta^{13}\text{C}$ 之间存在负相关关系^[8-9]，较多研究则认为二者间存在正相关关系^[10-11]。本试验中，通海的日平均气温为20.8℃，日均气温20.0℃的天气有91d。鲁甸日平均气温为18.5℃，日均气温20.0℃及以上的天气仅有49d。根据彭新辉等^[12]的结论，烤烟大田生长最适宜的温度是22.0~28.0℃，要求日平均温度高于20.0℃的天数超过70d，即通海的气温比鲁甸更适于烤烟生长，这也可能是玉溪烟区的烤烟质量优于昭通烟区的原因之一。5月1日至7月10日通海的日平均气温明显高于鲁甸，而旺长期通海3个品种烤烟的 $\delta^{13}\text{C}$ 值都大于鲁甸，说明在烤烟旺长期气温是影响烤烟 $\delta^{13}\text{C}$ 的主要原因之一，且表现出温度较高地区烤烟的 $\delta^{13}\text{C}$ 较大。降水量对不同植物 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响有不同的结论，但多数研究认为， $\delta^{13}\text{C}$ 值及水分利用效率随降水量增加而显著变轻，随降水量的减少而变重^[13-14]。本试验得出鲁甸的降水量总体上多于通海，通海的降水量集中在5—7月，鲁甸的降水量集中在6—8月。5—6月通海和鲁甸的降水总量分别为150.8mm和274.1mm，而旺长期3个烤烟品种的 $\delta^{13}\text{C}$ 都表现为通海大于鲁甸，符合随降水量减少 $\delta^{13}\text{C}$ 变重的结论。由于 $\delta^{13}\text{C}$ 与水分利用效率(WUE)存在正相关关系^[1]，可推之旺长期通海烤烟的水分利用效率高于鲁甸，而成熟期K326和红大两个品种的 $\delta^{13}\text{C}$ 却表现为鲁甸大于通海，KRK26表现为通海大于鲁甸，说明对不同烤烟品种而言，降水量和 $\delta^{13}\text{C}$ 不是简单的正负相关关系。

空气湿度也是影响植物稳定碳同位素分馏的重要环境因子之一^[15]。本试验中，5—6月通海的月平均相对湿度小于鲁甸，通海3个品种旺长期的 $\delta^{13}\text{C}$ 都大于鲁甸，7—8月通海的月平均相对湿度大于鲁甸，且通海K326和红大成熟期的 $\delta^{13}\text{C}$ 小于鲁甸。

甸。按照多数研究结果,叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与水分利用效率存在正相关关系,5—6月通海烤烟叶片的水分利用效率大于鲁甸,7—8月鲁甸大于通海。该结果支持空气相对湿度与烤烟 $\delta^{13}\text{C}$ 呈负相关的研究结论。

$\delta^{13}\text{C}$ 值同烤烟自身的生理特征密切相关,从 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以间接获得烤烟对不同生态条件的适应特征。烤烟在进行光合作用时,从 CO_2 吸收、固定到有机物的合成都伴随着碳同位素的分馏。本试验中,旺长期通海 3 个品种 $\delta^{13}\text{C}$ 值的比较,大小为 $\text{KRK26} > \text{红大} > \text{K326}$,说明在通海 KRK26 的水分利用效率最高。旺长期鲁甸 3 个品种 $\delta^{13}\text{C}$ 值的比较,大小为 $\text{红大} > \text{K326} > \text{KRK26}$,说明在鲁甸 红大 的水分利用效率最高。对通海和鲁甸对应品种的比较,通海 K326 、 红大 和 KRK26 的 $\delta^{13}\text{C}$ 大于鲁甸对应的 3 个品种,分别比鲁甸 3 个品种的 $\delta^{13}\text{C}$ 值大 0.58‰, 0.54‰, 1.56‰,说明通海烤烟的水分利用效率大于鲁甸。成熟期通海 3 个品种 $\delta^{13}\text{C}$ 值的比较,顺序为 $\text{KRK26} > \text{K326} > \text{红大}$,说明在成熟期通海 KRK26 的水分利用效率最高。在成熟期鲁甸 3 个品种 $\delta^{13}\text{C}$ 值的大小顺序不变,和旺长期相同,仍然是 红大 的水分利用效率最高。在成熟期通海和鲁甸之间对应品种的比较,通海 K326 和 红大 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值小于鲁甸, KRK26 的 $\delta^{13}\text{C}$ 大于鲁甸由此可知,烤烟叶片碳同位素的分馏能力不仅受环境条件的制约,还与其自身的遗传特性有关。

4 结 论

处于不同地域的生态烟区,由于受到所处气候带内众多气象要素分布差异的个别或耦合影响,使得不同品种在同一烟区,同一品种在不同烟区,烤烟 $\delta^{13}\text{C}$ 值对气象要素的响应在不同生长时期内存在一定的差异。可以看出,无论是在旺长期还是成熟期,通海的 $\delta^{13}\text{C}$ 值是 KRK26 最大,鲁甸是 红大 最大,说明在通海 KRK26 的水分利用效率最高,在鲁甸 红大 的水分利用效率最高。对比旺长期和成熟期,通海和鲁甸两个生态区的不同烤烟品种叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 都表现为成熟期大于旺长期,说明随着烟叶的成熟,烤烟叶片碳同位素分馏能力逐渐减弱,水

分利用效率逐渐增强。分布在两个气候带的烤烟在光合能力上随着烤烟的成熟,都表现出相同的趋势。而对烟叶下部叶和中部叶 $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值比较,3 个品种都表现为通海大于鲁甸,5—8月通海的日照时数总数大于鲁甸,日平均气温高于鲁甸,总降水量少于鲁甸。此结果支持温度较高,日照时数较长,降水量较少, $\delta^{13}\text{C}$ 值越大的结论。品种间 K326 和 红大 的差异较小, KRK26 的差异较大,通海的 KRK26 比鲁甸高 1.01‰,说明相比于 K326 和 红大 ,环境变化对 KRK26 的影响更大。

初步研究表明,3 个品种下部叶和中部叶 $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值,都表现为通海大于鲁甸,且无论是品种间还是两个烟区间的比较结果,都与旺长期表现出一致的规律。烤烟叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值并未简单地表现为随海拔和纬度增加而逐渐增大的趋势,而表现为不同的品种,在不同的生长时期存在一定的差异。这些差异表明烤烟 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化,不仅与烤烟本身的生物学特性决定,也是不同环境因子综合作用的结果。即在低纬高原地区受纬度和海拔影响导致的气候带分布差异,对不同品种烤烟的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和主要生理特征有明显影响,但其间的复杂关系尚需作进一步的研究。

参考文献

- [1] 何春霞,李吉跃,张燕香,等. 5 种绿化树种叶片比叶重、光合色素含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 的开度与方位差异[J]. 植物生态学报, 2010, 34(2): 134-143.
- [2] 刘微,吕豪豪,陈英旭,等. 稳定碳同位素技术在土壤-植物系统碳循环中的应用[J]. 应用生态学报, 2008, 19(3): 674-680.
- [3] Mccarroll D, Loader N J. Stable isotopes in tree rings [J]. Quaternary Science Reviews, 2004, 23: 771-801.
- [4] Dawson T E, Mambelli S, Plamboeck A H, et al. Stable isotopes in plant ecology [J]. Annual Review Ecology and Systematics, 2002, 33: 507-559.
- [5] Barbour M M, Walcroft A S, Farquhar G D. Seasonal variation in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of cellulose from growth rings of *Pinus radiata* [J]. Plant Cell and Environment, 2002, 25: 1483-1499.
- [6] 陈宗瑜. 云南气候总论[M]. 北京: 气象出版社, 2001. 165-166.
- [7] 冯虎元,安黎哲,陈拓,等. 大豆作物响应增强 UV-B 辐射的品种差异[J]. 西北植物学报, 2002, 22(4):

- 845-850 .
- [8] 李嘉竹, 王国安, 刘贤赵. 贡嘎山东坡 C3 植物碳同位素组成及 C4 植物沿海拔高度的变化[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39 (10) : 1387-1396 .
- [9] 宁有丰, 刘卫国, 曹蕴宁. 植物生长过程中碳同位素分馏对气候的响应[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22 (3) : 105-108 .
- [10] 林清. 温度和无机碳浓度对龙须眼子菜 (*Potamogeton pectinatus*) 碳同位素分馏的影响[J]. 生态学报, 2008, 28 (2) : 570-576 .
- [11] 刘晓宏, 赵良菊, Gasaw M. 东非大裂谷埃塞俄比亚段内 C3 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 及其环境指示意义[J]. 科学通报, 2007, 52 (2) : 199-206 .
- [12] 彭新辉, 易建华, 周清明. 气候对烤烟内在质量的影响研究进展[J]. 中国烟草科学, 2009, 30 (1) : 68-72 .
- [13] Morecroft M D, Woodward F I. Experimental investigations on the environmental determination of $\delta^{13}\text{C}$ at different altitudes [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1990, 41: 1303-1308.
- [14] Devitt D A, Smith S D, Neuman D S. Leaf carbon isotope ratios in three landscape species growing in an arid environment [J]. *Journal of Arid Environments*, 1997, 2: 249-257.
- [15] 王玉涛, 李吉跃, 程炜, 等. 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[J]. 生态学报, 2008, 28 (7) : 3143-3151 .