广东农业科学 2021，48（7）：17–23
Guangdong Agricultural Sciences DOI:10.16768/j.issn.1004–874X.2021.07.003

毛佳琦，郑允允，张二强，王培，付玉洁，王瑶 . 烟叶稳定碳同位素组成受控因素分析［J］. 广东农业科学，2021，48（7）：17–23.

烟叶稳定碳同位素组成受控因素分析

毛佳琦[1]，郑允允[1]，张二强[2]，王　培[1]，付玉洁[1]，王　瑶[2]

（1. 浙江大学中原研究院，河南 郑州　450001；
2. 陕西中烟工业有限责任公司技术中心，陕西 宝鸡　721013）

摘　要：【目的】探讨烟叶稳定碳同位素组成的受控因素，为烟草种植评价指标体系的完善及生态适应性机理研究提供新的理论依据。【方法】选取我国西南、东南、长江中上游和黄淮 4 个主要一级烟草种植区生理成熟期烟叶进行稳定碳同位素组成（$\delta^{13}C$）分析。【结果】供试烟叶样本 $\delta^{13}C$ 值分布在 –27.76‰～–25.39‰，平均值为 –26.46‰。烟叶 $\delta^{13}C$ 值与经度呈显著负相关关系，经度每增加 1°，烟叶 $\delta^{13}C$ 值减小 0.09‰；与纬度呈二次抛物线关系。不同叶位烟叶 $\delta^{13}C$ 值具有显著差异，表现为上部叶片＞中部叶片＞下部叶片。4 个种植区烟叶 $\delta^{13}C$ 值为西南种植区≈黄淮种植区＞长江中上游＞东南种植区。利用碳同位素对不同香型烟叶聚类结果表明，不同产地的清香甜香型和醇甜香型烤烟能够被明确聚类，而对焦甜焦香型、清甜蜜甜香型、焦甜醇甜香型和蜜甜香型 4 种香型烤烟没有明显的聚类效果。【结论】烟叶稳定碳同位素组成与经度呈负相关关系，与纬度呈二次抛物线关系，不同叶位烟叶稳定碳同位素组成不同，利用 $\delta^{13}C$ 值可以对清香甜香型和醇甜香型烤烟进行有效聚类。

关键词：烟叶；叶位；经度；纬度；稳定碳同位素；聚类分析

中图分类号：S572；Q945.79　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1004–874X（2021）07–0017–07

Analysis of Controlled Factors of Stable Carbon Isotope Composition in Tobacco Leaves

MAO Jiaqi[1], ZHENG Yunyun[1], ZHANG Erqiang[2], WANG Pei[1], FU Yujie[1], WANG Yao[2]

（1. *Zhongyuan Instute, Zhejiang University, Zhengzhou* 450001, *China;*
2. *Technology Center, China Tobacco Shanxi Industiral co., ltd*, *Baoji* 721013, *China*）

Abstract：【Objective】The study was conducted to explore the controlled factors of the stable carbon isotope composition in tobacco leaves with a view to provide a new theoretical basis for the improvement of tobacco planting evaluation index system and the study of ecological adaptability mechanism.【Method】The stable carbon isotope composition（$\delta^{13}C$）analysis was carried out on tobacco leaves which were collected during the mature stage from four major first class tobacco growing areas in China, namely, Southwest China, Southeast China, upper and middle reaches of the Yangtze River and Huanghuai area.【Result】The $\delta^{13}C$ values of tobacco leaves ranged from –27.76 ‰ to 25.39 ‰, with an average value of –26.46‰. The $\delta^{13}C$ values decreased with longitude significantly, with a rate of 0.09‰, and the values showed a quadratic parabola relationship with latitude. In addition, there were significant differences in $\delta^{13}C$ values

收稿日期：2021–03–28
基金项目：陕西中烟工业有限责任公司卷烟制丝大数据分析与智能化应用技术研究项目（BA000–ZB19015）
作者简介：毛佳琦（1990—），女，硕士，工程师，研究方向为植物和食品资源开发与利用，E–mail：jiaqimaokk@163.com
通信作者：张二强（1989—），男，硕士，工程师，研究方向为卷烟加工工艺方面的研究，E–mail：erqiang_zhang@163.com

in different leaf positions, and the results showed as upper leaves > middle leaves > lower leaves. In terms of tobacco growing areas, $\delta^{13}C$ value results of four tobacco growing areas showed as: Southwest planting area ≈ Huanghuai planting area > Yangtze River planting area > Southeast planting area. Moreover, the cluster analysis results showed that fragrant sweet tobacco and alcoholic sweet aroma tobacco were clustered clearly based on $\delta^{13}C$ values of tobacco from different origins. However, the other four aroma types (burnt-sweet and burnt-fragrant type, mildly and honey sweet type, burnt-sweet and alcoholic sweet type and honey sweet type) cannot be clustered obviously as the independent variables.【Conclusion】The stable carbon isotope composition of tobacco leaves has a negative correlation with longitude and a quadratic parabolic relationship with latitude. The stable carbon isotope composition of tobacco leaves at different leaf positions is different. The $\delta^{13}C$ value can be used to effectively cluster the fragrant sweet and alcoholic sweet aroma tobacco.

Key words: tobacco; leaf position; longitude; latitude; carbon isotope; cluster analysis

【研究意义】碳的两种稳定性同位素 ^{12}C 和 ^{13}C 因原子质量不同而使其在分解速率、化学键能强度、气相中传导速率等物理化学性质上具有差异性，从而导致植物体生物化学反应前后碳同位素组成（$\delta^{13}C$）的改变，即同位素分馏[1]。C3 植物的 $\delta^{13}C$ 值分布在 –22‰ ~–35‰，该值与植物生理特征、遗传特性、生长环境、光合作用类型等多种因素密切相关[2]。烟叶属 C3 植物，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各种生理状态产生影响，导致不同生态种植区烟叶 $\delta^{13}C$ 值存在差异。【前人研究进展】烟叶 ^{13}C 值受非生物因素如水分、温度、光强和光质、土壤盐分、CO_2 浓度、海拔高度、经度、纬度等和生物因素如烟叶部位、叶片成熟期、叶片结构等多种因素影响，因此，烟叶 $\delta^{13}C$ 值是烟叶种植产地气候环境信息和其内部复杂生理生态过程的综合表征[2-4]。不同生态种植区的烟叶由于气候环境条件影响，导致不同种植区烟叶 $\delta^{13}C$ 值存在差异。自 20 世纪 50 年代发现不同植物间稳定碳同位素组成存在差异以来[5-6]，随着质谱测定技术发展，稳定碳同位素技术在植物水分利用效率、光合作用途径、植物群落水平、树木年轮、土壤 – 植物碳循环、植物对气候变化响应和适应、农产品产地溯源等方面得到广泛应用[7-12]，在生理生态学领域主要用于研究稳定碳同位素组成的小范围变化与作物品种差异的关系及环境因子对植物稳定碳同位素组成的影响[13-14]。而烟叶稳定碳同位素的研究起步相对较晚且相关报道较少，主要集中在烟叶 $\delta^{13}C$ 值与其生理品质特征、化学成分的关系等方面[3,15-16]。【本研究切入点】目前关于烟叶稳定碳同位素组成与叶位和经纬度的关系及不同香型的烤烟碳同位素组成的差异等方面鲜有报道。【拟解决的关键问题】本研究通过探索烟叶稳定碳同位素组成与叶位关系并进行横向、纵向（纬度、经度）对比，探讨分析烟叶稳定碳同位素组成的受控因素，以及碳同位素组成对不同香型烟叶的聚类差异，以期为烟草种植评价指标体系的完善及生态适应性机理研究提供新的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

按《中国烟草种植区划》[17]中划分的一级烟草种植区选取其中 4 个种植区为研究区域，分别为西南烟草种植区（云南、贵州等地）、东南烟草种植区（江西、福建等地）、长江中上游烟草种植区（重庆、湖北、湖南等地）和黄淮烟草种植区（陕西、河南等地）。按照烟叶着生部位不同分别随机选取 384 株不同产地的烟田中达到生理成熟期的烟草植株的上部烟叶（自下而上第 3~5 叶位叶片）、中部烟叶（自下而上第 9~11 叶位叶片）和下部烟叶（自下而上第 15~17 叶位叶片）为试验材料，样品涉及 14 个二级划分区 9 个省 24 个地市，具有分布范围广、类型全、数量多等特点，具有一定的代表性。采集后的样品用蒸馏水洗净后截取每片叶片的中心部位（同一片叶子的中间部位是气孔密度和气孔指数最稳定的区域[18]）于 70℃烘干，粉碎后过 178 μm 筛备检。

1.2 试验方法

稳定碳同位素组成测定：处理后的样品在高纯氧气条件下经高温充分燃烧后生成 CO_2，提取燃烧产物 CO_2，采用 Flash2000–MAT253 同位素分析仪（美国 ThermoFisher 公司）测定稳定碳同位

素比率，分析结果参照国际标准（Pee Dee Belnite 或 PDB），根据如下公式计算：

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

式中，$\delta^{13}C$ 表示烟叶稳定碳同位素组成；$(^{13}C/^{12}C)_{PDB}$表示南卡罗来纳州白碛石中的 $^{13}C/^{12}C$。

检测条件：标准样品 IAEA-600（caffeine，$\delta^{13}C_{V-PDB}$=-27.771‰ ± 0.043‰，δ^{15}Nair=-1.0‰ ± 0.2‰），氧化温度 960 ℃，载气流速 100 mL/min，氧气流速 280 mL/min。

试验数据采用 IBM SPSS 20.0 进行统计分析，图表采用 OriginPro8.5 绘制。

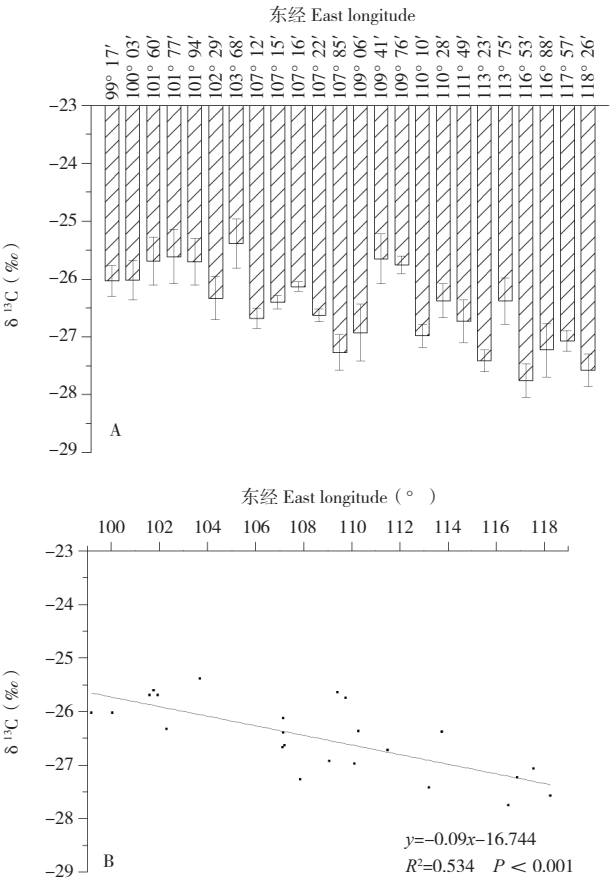
2 结果与分析

2.1 烟叶稳定碳同位素组成随经纬度分布情况

基于全球尺度对植物的生长研究发现，随着经纬度变化，在各种环境因子如温度、降水的影响下，植物形成了对环境变化的不同响应，$\delta^{13}C$ 值与经纬度具有一定相关性[19-20]。本研究所选取的样本种植区覆盖 99° 17′ E~118° 26′ E、23° 88′ N~35° 53′ N，东西跨越 19 个经度，南北跨越 12 个纬度，样本 $\delta^{13}C$ 值分布范围为 -27.76‰ ~-25.39‰，平均值为 -26.46‰。

2.1.1 烟叶 $\delta^{13}C$ 值随经度的变化 如图 1 所示，在 99° 17′ E~118° 26′ E 范围内，烟叶 $\delta^{13}C$ 值呈现随经度增加而逐渐减小的趋势，$\delta^{13}C$ 值与经度之间呈极显著负相关性，从地理位置上自西向东，经度每增加 1°，烟叶 $\delta^{13}C$ 值减小 0.09‰。经度变化本身并不会对植物 $\delta^{13}C$ 值产生影响，而是由于随着地理位置变化而改变的环境因子（如温度、降水等）造成植物 $\delta^{13}C$ 值空间分布的差异性[20-21]。

我国气温和降水量分别呈现自西向东逐渐降低和梯度增加的特点，在 99° 17′ E~118° 26′ E 范围内，气候呈现东面湿润、西面较干燥的特点，东部地区阴雨天时间较多，而西部地区天晴少雨的时间更长。当降水量减少时，水分胁迫加剧，土壤及空气含水量降低，植物往往通过关闭部分气孔来降低气孔传导速率，叶内 CO_2 浓度降低，对 ^{13}C 的辨别力降低，叶片光合作用所固定的 $\delta^{13}C$ 值增加[1]。而温度升高同样也会导致土壤水分蒸发加快从而降低土壤水分可利用量，使 $\delta^{13}C$ 值偏正。而个别经度范围如 109° 41′ E~109° 76′ E，烟叶 $\delta^{13}C$ 值呈现略增大趋势，这可能是该地域范围内其他环境因素协同作用的结果。



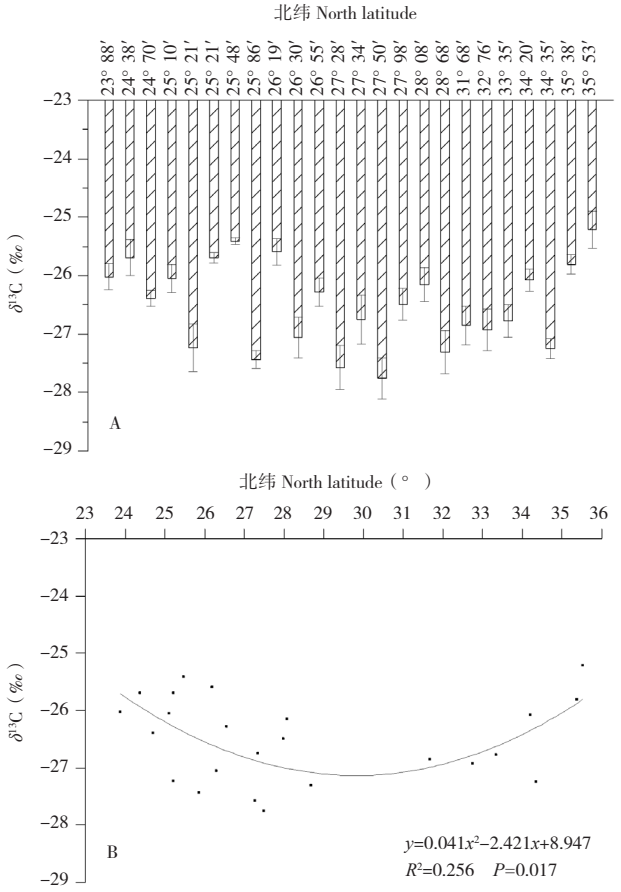
A：不同经度烟叶 $\delta^{13}C$ 值；B：经度变化与烟叶 $\delta^{13}C$ 值的相关关系
A: $\delta^{13}C$ value of tobacco leaves in different longitudes;
B: Correlation between longitude change and $\delta^{13}C$ value of tobacco leaves

图 1 烟叶 $\delta^{13}C$ 值随经度的分布
Fig. 1 Distribution of $\delta^{13}C$ values of tobacco leaves with longitude

2.1.2 烟叶 $\delta^{13}C$ 值随纬度的变化 试验结果显示，在 23° 88′ N~35° 53′ N 地区范围之内，烟叶 $\delta^{13}C$ 值与纬度之间无显著线性相关性（图 2A），与一些 C3 植物如艾蒿、藜、平车前等的 $\delta^{13}C$ 值与纬度呈显著负相关性的研究结果有所不同[14]。进一步分析发现，在 23° 88′ N~27° 50′ N 范围内，由南向北，烟叶 $\delta^{13}C$ 值由重逐渐变轻；在 27° 50′ N~35° 53′ N 范围内，烟叶 $\delta^{13}C$ 值由南向北则呈现由轻逐渐变重的特征，整体呈现以 N27° 50′ 为谷底的“V”字型变化特征，采用二次曲线对结果进行拟合（图 2B）后发现 $\delta^{13}C$ 值与纬度平方的回归方程达到显著水平，总体而言，烟叶 $\delta^{13}C$ 值表现出随纬度增加先降后升的趋势。

2.2 不同叶位稳定碳同位素组成差异

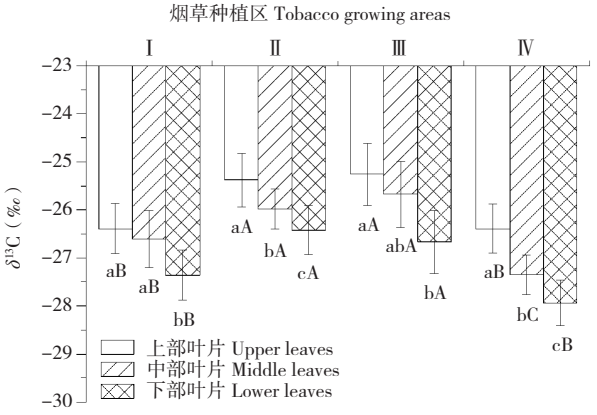
图 3 为 4 个一级种植区不同叶位烟叶稳定碳



A：不同纬度烟叶 $\delta^{13}C$ 值；B：纬度变化与烟叶 $\delta^{13}C$ 值的相关关系
A: $\delta^{13}C$ value of tabacco leaves in different latitudes;
B: Correlation between latitude change and $\delta^{13}C$ value of tabacco leaves

图 2　烟叶 $\delta^{13}C$ 值随纬度的分布
Fig. 2　Distribution of $\delta^{13}C$ values of tobacco leaves with latitude

同位素组成分布。长江中上游种植区烟叶 $\delta^{13}C$ 值在 –28.05‰ ~–25.28‰之间，均值为 –26.74‰；黄淮种植区烟叶 $\delta^{13}C$ 值在 –27.95‰ ~–24.70‰之间，均值为 –25.94‰；东南种植区烟叶 $\delta^{13}C$ 值在 –28.79‰ ~–25.65‰，均值为 –27.19‰；西南种植区烟叶 $\delta^{13}C$ 值在 –27.50‰ ~24.90‰之间，均值为 –25.93‰；西南种植区和黄淮种植区不同叶位的烟叶 $\delta^{13}C$ 值均显著高于其余两地烟叶对应叶位的 $\delta^{13}C$ 值，而西南和黄淮两个种植区相同叶位的 $\delta^{13}C$ 值无显著性差异。东南种植区上部、中部和下部叶片的 $\delta^{13}C$ 值在 4 个种植区中均为最小值。4个种植区的烟叶 $\delta^{13}C$ 值均随叶位的升高而增大，下部叶片的 $\delta^{13}C$ 值较小，且同一地区不同叶位的 $\delta^{13}C$ 值有显著性差异。这可能是由于土壤呼吸所释放的 CO_2 的 $\delta^{13}C$ 的平均值为 –12‰ ~–25‰，而大气中 CO_2 的 $\delta^{13}C$ 平均值为 –7.8‰，两者之间存



Ⅰ–Ⅳ分别代表 4 个烟草种植区：长江中上游种植区、西南种植区、黄淮种植区和东南种植区；小写英文字母不同者表示同一种植区内不同叶位的 $\delta^{13}C$ 值差异显著，大写英文字母不同者表示同一叶位的 $\delta^{13}C$ 值在不同种植区差异显著
Ⅰ–Ⅳ stand for the upper and middle reaches of Yangtze River planting area, Southwest planting area, Huanghuai planting area and Southeast planting area; Different lowercase letters represent that the $\delta^{13}C$ values of different leaf positions in the same planting area are significantly different, while different uppercase letters represent that the $\delta^{13}C$ values of the same leaf position in different planting areas are significantly different

图 3　4 个一级种植区烟叶 $\delta^{13}C$ 值随叶位的分布
Fig. 3　Distribution of $\delta^{13}C$ values of tobacco leaves with leaf position in four first class planting areas

在较大差异，而靠近土壤的叶片较多的吸收更负的 $\delta^{13}C$ 值的 CO_2 源，其 $\delta^{13}C$ 值减小，因此即使生长在同一地区同一环境的烟叶，因 CO_2 来源不同，不同叶位的烟叶内部碳同位素组成也不同[22-23]。$\delta^{13}C$ 值同时也表征了植物叶片在光合作用活跃期的平均光照状况，该值偏低，说明叶片在生长期接收光照较少，由此可以推断烟叶上部叶片获得的光照多于下部叶片，因而其叶片碳同位素组成高于下部叶片[4,24]。

2.3　稳定碳同位素对烟叶的聚类分析

我国烤烟类型按照烟叶香型可以分为清甜香型、蜜甜香型、醇甜香型、焦甜焦香型、焦甜醇甜香型、清甜蜜甜香型、蜜甜焦香型、木香蜜甜香型等八大香型[25]。通过对不同产地不同香型烟叶的 $\delta^{13}C$ 值进行聚类分析（图 4）发现，当聚类距离＜ 5 时，样本可以被分为三类：第一类为高 $\delta^{13}C$ 值，清香甜香型烤烟：临沧烤烟、曲靖烤烟、玉溪烤烟、大理烤烟、昆明烤烟、保山烤烟、楚雄烤烟；第二类为较高 $\delta^{13}C$ 值，焦甜焦香型、清甜蜜甜香型和焦甜醇甜香型：渭南烤烟、铜川烤烟、南平烤烟、三明烤烟、龙岩烤烟和抚州烤烟；第三类为较低 $\delta^{13}C$ 值，焦甜醇甜香型、醇甜香型

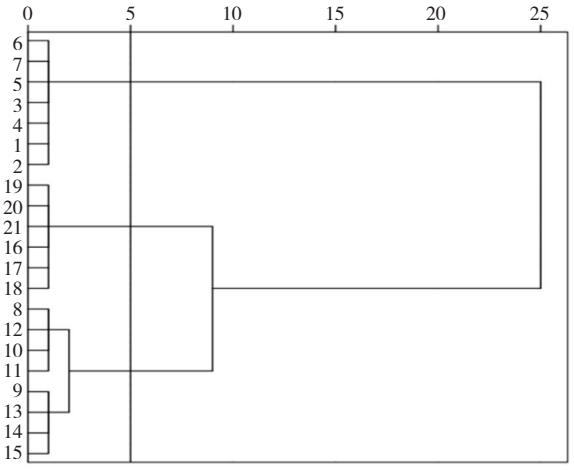


图 4　基于不同产地烟叶的 $\delta^{13}C$ 值聚类结果

Fig. 4　Cluster results of tobacco leaves from different areas based on $\delta^{13}C$ values

1~21 分别为临沧、曲靖、玉溪、大理、昆明、保山、楚雄、韶关、湘西、郴州、贵阳、遵义、安康、商洛、汉中、渭南、铜川、南平、三明、龙岩、抚州

1–21: Lincang, Qujing, Yuxi, Dali, Kunming, Baoshan, Chuxiong, Shaoguan, West Hu’nan, Chenzhou, Guiyang, Zunyi, Ankang, Shangluo, Hanzhong, Weinan, Tongchuan, Nanping, Sanming, Longyan and Fuzhou

和蜜甜香型：韶关烤烟、郴州烤烟、湘西烤烟、安康烤烟、商洛烤烟、汉中烤烟、贵阳烤烟、遵义烤烟。当聚类距离＜2 时，醇甜香型烤烟可单独被分为一类为低 $\delta^{13}C$ 值：湘西烤烟、安康烤烟、商洛烤烟和汉中烤烟。

3　讨论

植物碳同位素组成受多种生物因素和非生物因素的影响[2]，虽然植物组织内的 $\delta^{13}C$ 值最终由生物因素决定，但生物因素受其生长地区环境因子的影响，因而植物的碳同位素组成蕴含其生理生态特征和环境信息[4]。烟草是一种适应性广且对生态环境条件十分敏感的经济作物，生态环境影响烟叶的品质和香型，烟草品质差异，“良由地气使然也”[26-27]。本研究发现，在 99° 17′ E~118° 26′ E 范围内，烟叶 $\delta^{13}C$ 值与经度呈显著负相关关系，经度每增加 1°，烟叶 $\delta^{13}C$ 值减小 0.09‰，这与李嘉竹[14]对陆地 C3、C4 草本植物的研究结果一致；在 23° 88′ N~35° 53′ N 地区范围内，烟叶 $\delta^{13}C$ 值与纬度之间呈一种非线性关系，通过二次曲线进行拟合发现具有二次抛物线特征，即从整体来看烟叶 $\delta^{13}C$ 值表现出随纬度增加先下降后上升趋势。这与李嘉竹[14]研究的植物叶片碳同位素与纬度也呈负相关关系的结果不太相同，可能是由于烟叶 $\delta^{13}C$ 值受局部地区环境条件的影响。然而经度和纬度并非是导致烟叶 $\delta^{13}C$ 差异的根本原因，环境因素如光照、降水、温度、二氧化碳浓度等才是主要原因，不同经、纬度地区的气候条件和地理环境的差异导致烟叶碳稳定同位素组成差异。通过对同一区域内不同叶位烟叶 $\delta^{13}C$ 值研究发现，4 个种植区不同叶位烟叶 $\delta^{13}C$ 值具有显著差异，随叶位升高而增大，表现为上部叶片＞中部叶片＞下部叶片，且同一地区不同叶位的 $\delta^{13}C$ 值有显著性差异。这与王毅等[16]结论一致。西南种植区和黄淮种植区烟叶碳同位素组成较接近，显著高于其他两个种植区，而长江中上游种植区和东南种植区的烟叶碳同位素组成较类似。最后，本研究以 $\delta^{13}C$ 值为变量，对不同产地不同香型烤烟进行聚类分析发现，可以对清香甜香型和醇甜香型烤烟进行有效聚类，而对焦甜焦香型、清甜蜜甜香型、焦甜醇甜香型和蜜甜香型 4 种香型烤烟则没有明显的聚类效果，需要加入其他变量如氮同位素等进行进一步研究。本研究初步探明烟叶碳同位素组成与经纬度、叶片以及烤烟香型的关系，但烟叶 $\delta^{13}C$ 值与烤烟品质、香气成分之间关系及对其生理指标的关系还有待进一步深入研究。

4　结论

本研究分析了烟叶碳同位素组成与地理空间要素之间的关系，并利用碳同位素对不同香型进行烟叶聚类分析，烟叶稳定碳同位素组成与经度呈负相关关系，经度每增加 1°，烟叶 $\delta^{13}C$ 值减小 0.09‰；与纬度整体呈以北纬 27° 50′ 为谷底的“V”字型变化特征，拟合后呈二次抛物线关系，不同叶位烟叶稳定碳同位素组成不同，利用 $\delta^{13}C$ 值可以对清香甜香型和醇甜香型烤烟进行有效聚类。

参考文献（References）：

[1]　FARQUHAR G D.Carbon isotope discrimination and photosynthesis [J].*Ann Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 1989,40(1):503–537. DOI:10.1146/annurev.pp.40.060189.002443.

[2]　GOLUBTSOV V A.Stable carbon isotopic composition of organic matter of the late pleistocene and holocene soils of the baikal region [J].*Eurasian Soil Science*,2020,53(6):724–738. DOI:10.1134/S1064229320060046.

[3]　杨湉, 王毅, 陈宗瑜, 宋鹏飞, 谭淑文, 王娟, 吴潇潇 . 不同生态烟

区烤烟 $\delta^{13}C$ 值与生理及品质特征的比较研究[J]. 西北植物学报, 2016,36(9):1846-1854. DOI:10.7606/j.issn.1000-4025.2016.09.1846.
YANG T,WANG Y,CHEN Z Y,SONG P F,TAN S W,WANG J,WU X X.Comparison of $\delta^{13}C$ value and the physiological and quality characteristics of tobacco in different ecological areas[J].*Acta Botanica Boreali-Occidentalla Sinica*,2016,36(9):1846-1854. DOI:10.7606/j.issn.1000-4025.2016.09.1846.

[4] 王英姿.灵石山不同海拔米槠林优势种叶片 $\delta^{13}C$ 及养分等属性特征的研究[D]. 福州:福建农林大学, 2009.
WANG Y Z.The research on leaf $\delta^{13}C$ and leaf traits of dominant species at different altitude gradients in Castanopsis carlessi forests in Lingshishan National Forest Park[D].Fuzhou:Fujian Agriculture and Forestry University, 2009.

[5] A SÁNCHEZ,R GASCA,SOSA C E,CAMACHO C K.Stable carbon and nitrogen isotopes in Panulirus argus phyllosomas in the Mexican Caribbean[J].*Regional Studies in Marine Science*, 2021,42(2):1-6. DOI: 10.1016/j.rsma.2021.101617.

[6] CRAIG.Carbon 13 in plants and the relationships between carbon 13 and carbon 14 variations in nature[J]. *Journal of Geology*, 1954, 62(2):115-149. DOI:10.2307/30056374.

[7] 雷帅, 何春霞, 张劲松, 孟平, 孙守家. 稳定碳同位素技术在生态系统研究中的应用[J]. 同位素, 2020,33(1): 53-66. DOI:10.7538/tws.2018.youxian.092.
LEI S,HE C X,ZHANG J S,MENG P,SUN S J.A review of the application of stable carbon isotopes to ecosystem research.[J]. *Journal of Isotopes*, 2020,33(1):53-66. DOI:10.7538/tws.2018.youxian.092.

[8] MA W T,TCHERKEZ G,WANG X M,SCHUFELE R,SCHNYDER H,YANG Y,GONG X Y.Accounting for mesophyll conductance substantially improves ^{13}C-based estimates of intrinsic water-use efficiency[J].*New Phytologist*, 2020, 229(3):1326-1338. DOI:10.1111/nph.16958.

[9] LU J,ZHANG P X,YANG M F,SHAO L Y,HILTON J.Continental records of organic carbon isotopic composition ($\delta^{13}Corg$),weathering, paleoclimate and wildfire linked to the End-Permian Mass Extinction[J]. *Chemical Geology*, 2020, 558(30): 2-12. DOI:10.1016/j.chemgeo.2020.119764.

[10] SARANGI V,AGRAWAL S,SANYAL P.The disparity in the abundance of C4 plants estimated using the carbon isotopic composition of paleosol components[J].*Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2020, 561(1):1-13. DOI:10.1016/j.palaeo.2020.110068.

[11] 钟敏.用碳氮稳定同位素对大米产地溯源的研究[D]. 大连:大连海事大学, 2013.
ZHONG M.The characteristics of carbon and nitrogen stable isotope ratio in rice research[D].Dalian: Dalian Maritime University, 2013.

[12] 陈历水, 丁庆波, 苏晓霞, 李清, 林光辉. 碳和氮稳定同位素在黑加仑产地区分中的应用[J]. 食品科学, 2013, 34(24):249-253. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201324052.
CHEN L S,DING Q B,SU X X,LI Q,LIN G H.Stable isotope distribution of carbon and nitrogen in blackcurrant-producing regions[J].*Food Science*, 2013,34(24):249-253. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201324052.

[13] 任书杰, 于贵瑞. 中国区域 478 种 C3 植物叶片碳稳定性同位素组成与水分利用效率[J]. 植物生态学报, 2011, 35(2):119-124. DOI:10.3724/SP.J.1258.2011.00119.
REN S J,YU G R.Carbon isotope composition ($\delta^{13}C$) of C3 plants and water use efficiency in China[J].*Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(2): 119-124. DOI:10.3724/SP.J.1258.2011.00119.

[14] 李嘉竹. 陆地 C3, C4 草本植物稳定碳同位素组成及其对温度变化的响应研究[D]. 烟台:鲁东大学, 2009.
LI J Z.Stable carbon isotope composition in C3,C4 herbaceous plants and their responce to changing temperature[D]. Yantai: Ludong University,2009.

[15] 郭东锋, 祖朝龙, 李田, 姚忠达, 舒俊生. 烤烟烟叶稳定同位素与化学成分关系研究[J]. 中国烟草科学, 2012,33(4): 42-45. DOI:10.3969/j.issn.1007-5119.2012.04.009.
GUO D F, ZU C L, LI T,YAO Z D,SHU J S. Relationship between stable isotope and chemical components in flue-cured tobacco leaves[J].*Chinese Tobacco Science*,2012,33(4):42-45. DOI:10.3969/j.issn.1007-5119.2012.04.009.

[16] 王毅, 颜侃, 谭淑文, 吴潇潇, 宋鹏飞, 陈宗瑜. 烤烟叶片 $\delta^{13}C$ 与生理指标的相关性[J]. 核农学报, 2013, 27(11): 1729-1734. DOI:10.11869/hnxb.2013.11.1729.
WANG Y,YAN K,TAN S W,WU X X,SONG P F,CHEN Z Y.Relationships between Tobacco Leaf $\delta^{13}C$ and Physiological Characteristics[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2013,27(11):1729-1734. DOI: 10.11869/hnxb.2013.11.1729.

[17] 王彦亭, 谢剑平, 李志宏. 中国烟草种植区划[M]. 北京:科学出版社, 2010.
WANG Y T, XIE J P, LI Z H. China Tobacco Planting Zoning[M]. Beijing: Science Press, 2010.

[18] 陈立群. 银杏类植物的叶表皮特征及其气孔频度对大气 CO_2 浓度的指示[D]. 北京:中国科学院植物研究所, 2000.
CHEN L Q.The epidermal characters of ginkgophytes and their stomatal frequencies as an indicator of atmospheric CO_2[D].Beijing: Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, 2000.

[19] WAN Z Z, ALGEO T J, GENSEL P G,STEPHEN E S,STEIN W E, CRESSLER W L,BERRY C M,XU H H, ROWE H D,SAUER P E.Environmental influences on the stable carbon isotopic composition of devonian and early carboniferous land plants[J].*Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*,2019, 531(1):109100. DOI:10.1016/j.palaeo.2019.02.025.

[20] YANG S L, HAO Q,WANG H L,ZWIETEN L V, YU C X, LIU T Z,YANG X M,ZHANG X D,SONG Z L. A review of carbon isotopes of phytoliths: implications for phytolith-occluded carbon sources[J].*Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(2):1811-1823. DOI:10.1007/s11368-019-02548-4.

[21] LI C Y,ZHANG X J,LIU X L,LUUKKANEN O,BERNINGER F.Leaf

morphological and physiological responses of Quercus aquifolioides along an altitudinal gradient[J].*Silva Fennica*,2006,40(1):5–13. DOI: 10.14214/sf.348.

[22] 葛体达, 王东东, 祝贞科, 魏亮, 魏晓梦, 吴金水. 碳同位素示踪技术及其在陆地生态系统碳循环研究中的应用与展望[J]. 植物生态学报, 2020, 44(4):360–372. DOI:10.17521/cjpe.2019.0208.
GE T D, WANG D D,ZHU Z K,WEI L,WEI X M,WU J S.Tracing technology of carbon isotope and its applications to studies of carbon cycling in terrestrial ecosystem[J].*Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(4):360–372. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0208.

[23] MATTHEW R,RYAN B,ANDREW G,SCOTT–MOELDER T,HEINTZ R.Assessment of two feeds on survival, proximate composition, and amino acid carbon isotope discrimination in hatchery–reared Chinook salmon[J]. *Fisheries Research*, 2019, 219:105303–105303. DOI: 10.1016/j.fishres.2019.06.001.

[24] WANG P,ZHU R,JIAO Y,ZHANG W Y, CHE C S, XU H.Carbon dioxide isotopic compositions during tundra ecosystem respiration and photosynthesis in relation to environmental variables in maritime Antarctica[J]. *Polar Biology*, 2021, 44(4):683–700. DOI:10.1007/s00300–021–02829–0.

[25] 罗登山, 王兵, 乔学义.《全国烤烟烟叶香型风格区划》解析[J]. 中国烟草学报, 2019,25(4):1–9. DOI:10.16472/j.chinatobacco.2019.218.
LUO D S, WANG B, QIAO X Y.Explanation of national regionalization of leaves style of flue–cured tobacco[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2019, 25(4):1–9. DOI:10.16472/j.chinatobacco.2019.218.

[26] 高琳, 林昌华, 陈晓远, 王卫. 广东南雄不同香型烟区土壤养分特征比较研究[J]. 广东农业科学, 2019, 46(1): 50–57. DOI:10.16768/j.issn.1004–874X.2019.01.008.
GAO L, LIN C H,CHEN X Y, WANG W. Comparative study on soil nutrient characteristics of regions with tobaccos of different scents in Nanxiong of Guangdong[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2019,46(1):50–57. DOI:10.16768/j.issn.1004–874X.2019.01.008.

[27] 王全贞, 夏贤仁, 夏荣帅, 潘义宏, 杨森, 杨美丽, 王瑛, 张军刚. 不同烤烟品种在宣威西南部多雨烟区的适应性研究[J]. 广东农业科学, 2021,48(3):33–41. DOI:10.16768/j.issn.1004–874X.2021.03.005.
WANG Q Z, XIA X R,XIA R S,PAN Y H,YANG S,YANG M L,WANG Y, ZHANG J G.Study on adaptability of different flue–cured tobacco varieties in the rainy southwest tobacco area of Xuanwei City[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2021,48(3):33–41. DOI:10.16768/j.issn.1004–874X.2021.03.005.

（责任编辑　白雪娜）