



# 不同生态烟区烤烟 $\delta^{13}\text{C}$ 值与生理及品质特征的比较研究

杨 湑<sup>1,2</sup>, 王 毅<sup>3</sup>, 陈宗瑜<sup>1\*</sup>, 宋鹏飞<sup>3</sup>, 谭淑文<sup>1,4</sup>, 王 娟<sup>1</sup>, 吴潇潇<sup>1,4</sup>

(1 云南农业大学 农学与生物技术学院, 昆明 650201; 2 云南省热带作物科学研究所, 云南景洪 666100; 3 云南中烟工业有限责任公司技术中心, 昆明 650202; 4 云南农业职业技术学院, 昆明 650212)

**摘 要:**以烤烟品种 K326 为试验材料, 在云南、福建和河南三个生态烟区大田种植, 自烟叶生理成熟期起至工艺成熟期, 分 4 次采集中部(第 11 叶位)烟样, 对烟叶的  $\delta^{13}\text{C}$  值、总碳、全氮、光合色素等进行测定, 比较不同生态烟区烤烟  $\delta^{13}\text{C}$  值的分布、生理生态适应性及品质特征。结果表明: (1) 三个生态烟区烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  值、总碳、碳氮比、比叶重、叶绿素 a、总叶绿素含量均表现为云南>福建>河南, 全氮含量则为河南>云南>福建, 叶绿素 b 含量为云南>河南>福建, 类胡萝卜素含量为河南>福建>云南, 其中的  $\delta^{13}\text{C}$  值、总碳、碳氮比、类胡萝卜素含量在福建和云南烟区间较为接近。(2) 烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  值与总碳含量在云南呈正相关, 在福建、河南呈负相关关系; 三个生态烟区烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  值与全氮含量均呈负相关关系;  $\delta^{13}\text{C}$  值与光合色素含量在云南、河南烟区均呈正相关关系, 在福建烟区均呈负相关关系;  $\delta^{13}\text{C}$  值与烟碱、氮、钾、氯呈负相关关系, 与总糖、还原糖呈正相关关系。(3) 云南烤烟香韵丰富, 刺激性中等, 化学成分协调性最好; 河南烤烟香气量较高, 刺激性较大; 福建烤烟在香气量和化学成分协调性方面表现较差。研究发现, 烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  值与烟叶的生理特征、品质特征存在紧密联系, 用烟叶的  $\delta^{13}\text{C}$  值、生理指标、化学品质可区分不同生态烟区烤烟香气风格和品质特征。

**关键词:**烤烟;  $\delta^{13}\text{C}$  值; 生理特征; 品质评价

**中图分类号:** Q945. 79; S572 **文献标志码:** A

## Comparison of $\delta^{13}\text{C}$ Value and the Physiological and Quality Characteristics of Tobacco in Different Ecological Areas

YANG Tian<sup>1, 2</sup>, WANG Yi<sup>3</sup>, CHEN Zongyu<sup>1\*</sup>, SONG Pengfei<sup>3</sup>,  
TAN Shuwen<sup>1, 4</sup>, WANG Juan<sup>1</sup>, WU Xiaoxiao<sup>1, 4</sup>

(1 College of Agronomy and Bio-technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2 Yunnan Institute of tropical Crop, Jinghong Yunnan 666100, China; 3 China tobacco Yunnan industrial Co. Ltd, Kunming, 650202, China; 4 Yunnan Vocational and Technical College of Agriculture, Kunming 650212, China)

**Abstract:** The K326 variety of flue-cured tobacco was selected as experimental material, which was field planted in Yunnan Province, Fujian province and Henan province of China. The middle leaves (leaf 11) of tobacco were collected four times during the mature leaf stage. The  $\delta^{13}\text{C}$ , total organic carbon, total nitrogen, LMA, photosynthetic pigment were investigated to compare different ecologic area flue-cured tobacco smokes and the  $\delta^{13}\text{C}$  value distribution with the physiological and ecological adaptation. Important find-

收稿日期: 2015-12-04; 修改稿收到日期: 2016-07-15  
基金项目: 国家烟草专卖局项目(110201101003TS-03)  
作者简介: 杨湑(1988—), 女, 硕士研究生, 研究实习员, 主要从事高原气候生态与植物生理研究。E-mail: yangtian8811@163.com  
\* 通信作者: 陈宗瑜, 教授, 主要从事气候与环境生态领域研究。E-mail: zchen191@vip.sohu.com

ings: (1) three ecology tobacco area  $\delta^{13}\text{C}$  value, total carbon, C/N, LMA, Chlorophyll a, Chlorophyll results showed Yunnan > Fujian > Henan; total nitrogen results showed Henan > Yunnan > Fujian; Chlorophyll b results showed Yunnan > Henan > Fujian; Content of carotenoid results showed Henan > Fujian > Yunnan. Among them  $\delta^{13}\text{C}$  value, total carbon, C/N, Carotenoids were similar in Yunnan and Fujian. (2) The correlation analysis suggested that  $\delta^{13}\text{C}$  value with total carbon were positive correlated of Yunnan, negative correlated of Fujian and Henan. In the three ecological areas,  $\delta^{13}\text{C}$  value and total nitrogen were negatively correlated;  $\delta^{13}\text{C}$  value with photosynthetic pigment was positive correlated in Yunnan and Henan, was negatively correlated in Fujian. That  $\delta^{13}\text{C}$  value and the smoke alkali, the nitrogen, the potassium, the chlorine assumes the negative correlation, with total sugar and reducing sugar have positive correlation. (3) Yunnan flue-cured tobacco had good fragrance, medium irritation, moderate strength and the best chemical constituents' coordination; Henan flue-cured tobacco had a higher amount of aroma with heavier irritation, while Fujian flue-cured tobacco showed a worse characteristic in amount of aroma and chemical constituents' coordination. In conclusion the  $\delta^{13}\text{C}$  value was associated in physiological features and quality evaluation of tobacco. The study found using  $\delta^{13}\text{C}$  value, physiological features and quality evaluation could be used to identify flue-cured tobacco aroma type and quality characteristics from different ecological tobacco areas.

**Key words:** tobacco;  $\delta^{13}\text{C}$ ; physiological feature; quality evaluation

植物稳定碳同位素组成( $\delta^{13}\text{C}$ )可反映不同植物 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值的差异,测定植物体内的 $\delta^{13}\text{C}$ 含量及生理指标,可以揭示与植物生理生态过程相联系的环境信息和有代表性的生理特征<sup>[1]</sup>,植物水分利用效率(WUE)、矿质元素含量、光合氮利用效率(PNUE)、C/N比值、脯氨酸含量、比叶重、光合色素含量等生理指标与 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在复杂的联系。稳定碳同位素除了受植物自身生理状态的制约外,同时受到其他环境因子如温度、湿度、光照、 $\text{CO}_2$ 浓度等的影响<sup>[2]</sup>。通过对烟叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值的测定,可以间接获得烤烟对不同环境条件的适应特征<sup>[3]</sup>。当烤烟处于不同地域生态烟区,由于受到气候带内众多不同气候要素的影响,导致其 $\delta^{13}\text{C}$ 值对气候要素的响应不同。

近年来,有研究利用稳定碳同位素的特性来分析或指示植物种内和种间生理生态特性的差异,不同生态环境下植物WUE的变化以及树木年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 与气候的关系<sup>[4]</sup>,植物 $\delta^{13}\text{C}$ 对气候环境因子的响应等已成为植物生理生态学研究的热点之一<sup>[5-6]</sup>。然而,迄今利用稳定碳同位素技术进行烟草种植生理生态适应研究的报道并不多,因此本试验选择河南省襄城县、福建省上杭县和云南省红塔区所在国内三大生态烟区,探讨烤烟中部叶片(11叶位)的碳氮代谢、比叶重、光合色素、化学成分及感官呼吸等对其 $\delta^{13}\text{C}$ 值的响应特征及与烤烟香型风格形成的关系,为烤烟种植评价指标体系的优化完善提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

在最新完成的《中国烟草种植区划(2009)》<sup>[7]</sup>中,对选用指标设定不同的权重,以土壤有机质等5项指标作为土壤适宜性评价指标,以成熟期气温等4项指标评价烤烟气候适应性,按生态类型区划一般原则,将烤烟生态适应性划分为最适宜、适宜、次适宜和不适宜4个区。本研究所选的3个试验点,襄城县所在的河南省许昌市、上杭县所在的福建省龙岩市、红塔区所在的云南省玉溪市均被划入最适宜区。按香型划分,襄城县属典型的浓香型烟区,其余两地则属典型的清香型烟区。从气候特点来看,河南属于北亚热带与暖温带过渡型气候,趋于大陆性气候特点;福建属于亚热带湿润季风气候,水热条件和垂直分带较明显,趋于海洋性气候特点;云南则兼具低纬高原季风气候特点。

### 1.2 材料及处理

选用烤烟品种K326为试验材料,在云南省玉溪市红塔区赵桅试验基地( $24^{\circ}18'\text{N}$ ,  $102^{\circ}29'\text{E}$ , 1645ma. s. l.)、福建省龙岩市上杭县白砂镇塘丰村( $25^{\circ}05'\text{N}$ ,  $116^{\circ}35'\text{E}$ , 428ma. s. l.)和河南省许昌市襄城县郝庄后大路李村( $33^{\circ}56'\text{N}$ ,  $113^{\circ}34'\text{E}$ , 88ma. s. l.)进行大田种植试验。云南、福建和河南的移栽期分别为2012年4月25日、2月23日和4月28日。大田种植株行距均为50 cm $\times$ 120 cm。试验地土壤物理化学性质见表1。

选取100株长势基本一致的烤烟,于打顶前对

表 1 各试验点土壤物理化学特征  
Table 1 Basic chemical characters of soil

地点 Location	pH	有机质 Organic matter /(g · kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N/%	全磷 Total P/%	全钾 Total K/%	水解性氮 Hydrolysable N/(mg · kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available P/(mg · kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K/(mg · kg <sup>-1</sup> )
河南 Henan	6.21	24.4	0.128	0.075	1.19	112.8	94.9	263
福建 Fujian	5.6	27.8	0.148	0.075	1.88	189.9	61.1	92
云南 Yunnan	5.77	27.8	0.207	0.097	1.81	130.6	81.4	344

表 2 生态区烤烟大田生长期气候要素  
Table 2 Meteorological factors of each testing site during tobacco field growth period

地点 Location	平均气温 Average temperature/℃	平均相对湿度 Average relative humidity/%	降水总量 Total precipitation/mm	总日照时数 Total sunshine duration/h	平均气温日较差 Temperature difference/℃
河南 Henan	25.7	75.4	250.1	707.8	10.4
福建 Fujian	22.8	81	821.6	—	9
云南 Yunnan	20.8	70.7	364.9	610	10

注：表中河南和云南数据为 2012 年 5~8 月，福建数据为 2012 年 3~6 月  
Note: The meteorological data for Henan and Yunnan in 5—8 month 2012; the meteorological data for Fujian in 3—6 month 2012

第 11 叶位烟叶进行标记。待烟叶进入生理成熟时，采集标记的烟叶进行相关指标的测定分析。为了保证采集到的烟叶都达到生理成熟，依据 K326 的生育期及叶龄进行推算以确定取样时间。各地移栽后 70 d 开始对标记叶片进行第一次采集分析，此后每间隔 12 d 采集 1 次。为保证每个测定指标都有 3 次重复，每次取样时分别取 3 株标记叶片进行各项指标的测定。各生态区烤烟大田生长期气候要素见表 2。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 稳定碳位素组成(δ<sup>13</sup>C) 将叶片洗净后，杀青烘干，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测定。

1.3.2 烟叶总碳和全氮含量 将叶片杀青烘干，粉碎过筛制成样品后，送云南省农业科学院云南同川农业分析测试技术有限公司联合实验室测定。

1.3.3 比叶重 用打孔器避开主脉打取一定数量的圆片，将圆片放于 105℃烘箱中杀青后用 60℃烘干至恒重，称取干重后计算比叶重<sup>[8]</sup>。

1.3.4 光合色素含量 采用丙酮：无水乙醇(1：1，V：V)浸提—比色法。通过测定 663 nm、646 nm 和 470 nm 处的吸光值来计算叶绿素 a、b(mg · dm<sup>-2</sup>)和类胡萝卜素(mg · L<sup>-1</sup>)的单位面积(体积)含量<sup>[9]</sup>。

1.3.5 化学成分 由红塔集团技术中心采用(SKALAR San<sup>++</sup>)全自动连续流动分析仪测定，主要包括烟碱、总糖、还原糖、氮、钾、氯等含量。

1.3.6 感官评吸 烟叶感官品质由红塔集团技术

中心感官评吸室评定。

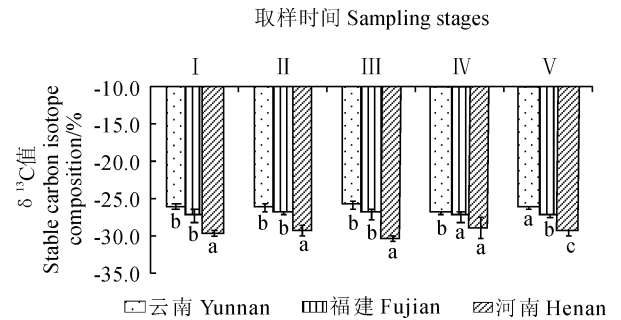
1.4 数据处理

运用 SPSS17.0 对数据进行统计分析，绘图在 Microsoft Excel 2010 中完成。

2 结果与分析

2.1 各生态烟区烟叶 δ<sup>13</sup>C 值比较

3 个生态烟区第 11 叶位烟叶 δ<sup>13</sup>C 含量存在明显差异，均表现为云南>福建>河南(图 1)。其中，第 I、Ⅱ、Ⅲ次取样烟叶的 δ<sup>13</sup>C 值均表现为河南显著低于云南、福建(P<0.05)，而后两者间无显著差



I~Ⅳ 分别代表第 1~4 次取样，V 代表 4 次取样的平均值；同期不同字母表示生态区间差异达到 0.05 显著水平(P<0.05)；下同

图 1 不同生态烟区烟叶 δ<sup>13</sup>C 值

I—Ⅳ stand for the first, second, third and fourth sample, while V stand for average value. The different letters within the same time indicate significant difference among eco-regions;

The same as below

Fig. 1 The leaf δ<sup>13</sup>C values in different ecoregions

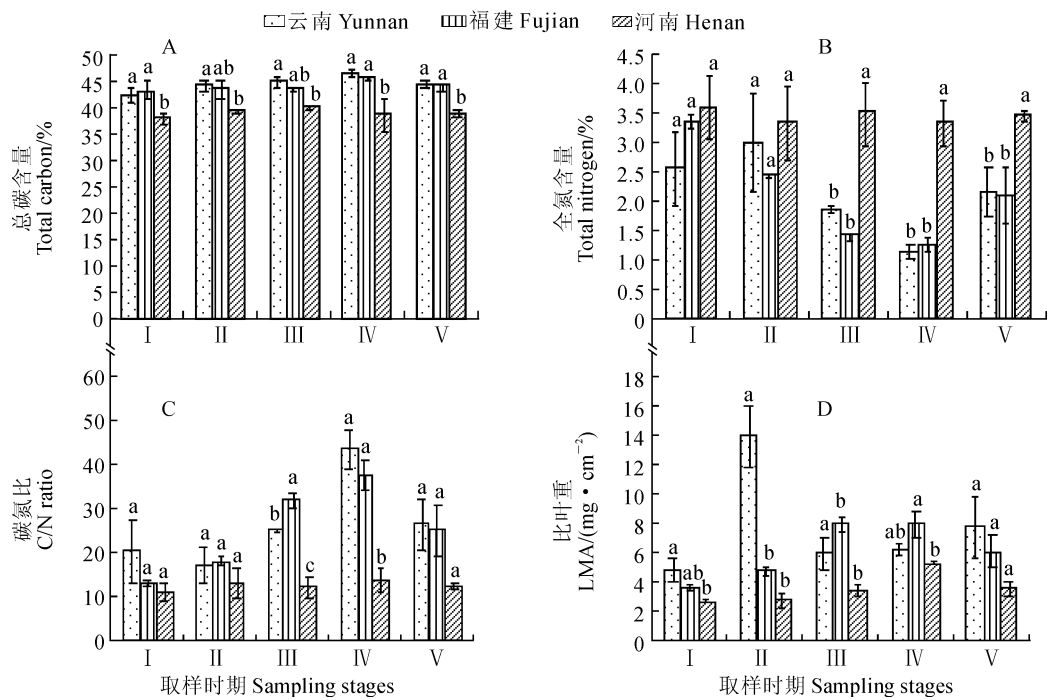


图 2 不同生态烟区烟叶生理指标的差异

Fig. 2 The physiological characteristics of tobacco in different ecoregions

异;第Ⅳ次取样烟叶的 $\delta^{13}\text{C}$ 值则表现为福建、河南显著低于云南,而前两者间无显著差异。4次取样烟叶 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值在云南、福建、河南三地之间差异显著,其 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值分别为 $-26.31\text{‰}$ 、 $-27.22\text{‰}$ 和 $-29.54\text{‰}$ ,即烟叶 $\delta^{13}\text{C}$ 含量能较好反映3个生态烟区间环境因子的差异。

## 2.2 各生态烟区烟叶生理指标的比较

**2.2.1 总碳含量** 图2,A显示,河南烟区4次取样烟叶总碳含量均显著低于云南烟区( $P<0.05$ ),河南烟区虽也不同程度低于福建烟区,但仅第Ⅰ、Ⅳ次取样的差异达到显著水平。4次取样烟叶总碳平均值表现为河南烟区(39.10%)显著低于云南烟区(44.70%)、福建烟区(44.33%)( $P<0.05$ ),而云南和福建烟区间无显著差异。

**2.2.2 全氮含量** 图2,B显示,第Ⅰ、Ⅱ次取样烟叶全氮含量在3个生态烟区间均差异不显著( $P>0.05$ ),第Ⅲ、Ⅳ次取样烟叶全氮含量表现为河南烟区显著高于云南、福建烟区( $P<0.05$ ),而后两者间无显著差异;4次取样烟叶全氮平均值表现为河南烟区(3.41%)显著高于云南(2.10%)、福建(2.07%)烟区( $P<0.05$ )。即全氮平均值为河南>云南>福建。

**2.2.3 碳氮比** 从图2,C可知,第Ⅰ、Ⅱ次取样烟叶碳氮比在3个生态烟区间差异均不显著( $P>0.05$ );第Ⅲ次取样烟叶碳氮比在3个生态烟区间差

异均显著( $P<0.05$ ),表现为福建>云南>河南;第Ⅳ次取样碳氮比表现为云南、福建显著高于河南( $P<0.05$ )。4次取样烟叶碳氮比平均值虽表现为云南(26.59)>福建(25.28)>河南(12.68),但3生态烟区之间差异不显著( $P>0.05$ )。

**2.2.4 比叶重** 从图2,D来看,第Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ次取样烟叶的比叶重均表现为河南烟区与福建烟区差异不显著( $P>0.05$ ),但显著低于云南烟区( $P<0.05$ );第Ⅳ次取样比叶重仅河南烟区与福建烟区差异显著( $P<0.05$ ),其余烟区间差异均不显著( $P>0.05$ )。4次取样烟叶比叶重的平均值表现为云南( $7.72\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ )>福建( $6.03\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ )>河南( $3.46\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ),但其间差异均不显著。

以上结果说明,烟叶的碳、氮、比叶重与烤烟的生长过程紧密联系,能较好地反映3个生态烟区烟叶碳氮代谢的特征、比叶重的差异及与之相联系的烤烟 $\delta^{13}\text{C}$ 值、水分利用效率等指标的评定状况。

## 2.3 各生态烟区烟叶光合色素含量的比较

**2.3.1 叶绿素a** 图3,A显示,第Ⅰ次取样烟叶叶绿素a含量河南与福建差异显著( $P<0.05$ ),其余两者差异不显著( $P>0.05$ );第Ⅱ、Ⅲ次取样烟叶叶绿素a含量河南与云南和福建差异显著( $P<0.05$ );第Ⅳ次取样烟叶叶绿素a含量表现为福建与云南差异显著( $P<0.05$ ),其余两者差异不显著( $P>0.05$ )。4次取样烟叶叶绿素a平均值虽表现为云南

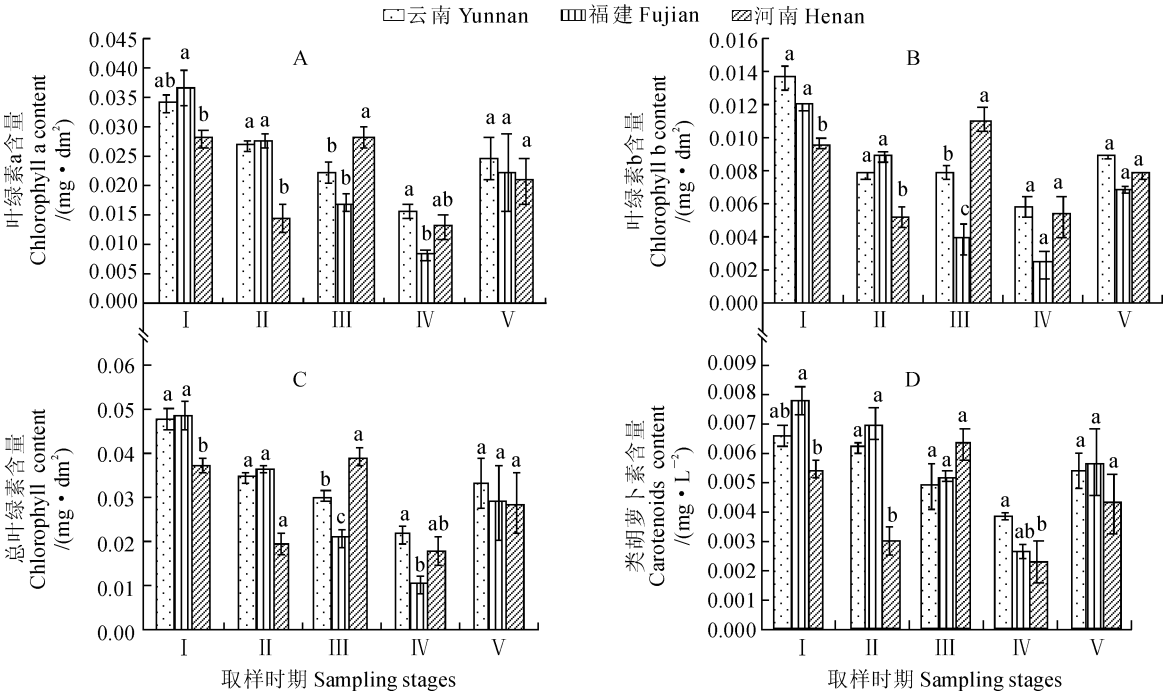


图3 不同生态烟区烟叶光合色素含量的差异

Fig. 3 The content of tobacco photosynthetic pigment in different ecoregions

( $0.0249 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-2}$ ) > 福建( $0.0225 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-2}$ ) > 河南( $0.0211 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-2}$ ), 但云南、福建、河南烟区之间均差异不显著。

**2.3.2 叶绿素 b** 从图 3, B 来看, 第 I、II 次取样烟叶叶绿素 b 含量表现为河南烟区显著低于云南、福建烟区 ( $P < 0.05$ ), 而云南、福建烟区无显著差异; 第 III 次取样烟叶叶绿素 b 含量表现为云南、福建、河南烟区间差异均显著, 并以福建烟区显著较低; 第 IV 次取样烟叶叶绿素 b 含量表现为 3 个烟区间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。4 次取样烟叶叶绿素 b 平均值表现为云南 ( $0.0087 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-2}$ ) > 河南 ( $0.0077 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-2}$ ) > 福建 ( $0.0066 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-2}$ ), 但三者之间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

**2.3.3 总叶绿素** 3 个生态区烟叶总叶绿素含量的表现与其叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量的表现相似 (图 3, C)。其中, 总叶绿素含量在第 I、II 次取样时表现为云南、福建烟区高于河南烟区; 第 I 次取样河南与云南、福建差异显著 ( $P < 0.05$ ); 第 II 次取样 3 个烟区差异不显著 ( $P > 0.05$ )。在第 III、IV 次取样时表现为云南、河南烟区高于福建烟区 ( $P < 0.05$ ); 第 III 次取样 3 个烟区差异显著; 第 IV 次取样云南与福建差异显著。4 次取样总叶绿素含量表现为云南 ( $0.0337 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-2}$ ) > 福建 ( $0.0292 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-2}$ ) > 河南 ( $0.0288 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-2}$ ), 但云南、福建、河南之间也无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

**2.3.4 类胡萝卜素** 3 个生态区烟叶类胡萝卜素含量的表现与叶绿素含量有较大差异 (图 3, D)。其中, 烟叶类胡萝卜素含量于第 I 次取样时河南与福建差异显著 ( $P < 0.05$ ); 第 II 次取样时表现为河南与云南、福建差异显著 ( $P < 0.05$ ); 第 III 次取样 3 个烟区差异显著; 第 IV 次取样时河南与云南差异显著。4 次取样烟叶类胡萝卜素含量平均值表现为福建 ( $0.0057 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) > 云南 ( $0.0054 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) > 河南 ( $0.0043 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 但云南、福建、河南烟区之间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

以上结果说明, 烟叶光合色素的表现不仅能反映 3 个生态烟区不同的光合作用和生理特征, 而且与烟叶的外观质量和香味也有密切的关系。

## 2.4 各生态区烟叶化学成分的比较和感官质量评价

由表 3 可知, 云南烟区烟叶烟碱含量处于适宜值范围; 总糖、还原糖含量偏高; 总氮含量处于适宜值范围, 钾含量偏低, 氯含量偏高; 糖/碱偏高, 氮/碱接近适宜值范围, 钾/氯偏低。福建烟叶烟碱含量偏高, 总糖和还原糖处于适宜值范围; 总氮和钾含量偏低, 氯含量偏高; 糖/碱处于适宜值范围, 氮/碱和钾/氯比值偏低。河南烟叶的烟碱含量偏高, 总糖和还原糖含量偏低; 总氮含量处于适宜值范围, 钾含量偏低, 氯含量偏高; 糖/碱偏低, 氮/碱接近适宜值, 钾/氯比偏低。总体来看, 各烟区烟叶烟碱含量表现为

表 3 不同生态烟区烟叶化学成分

Table 3 Contrast of chemical ingredients in different ecoregions

地点 Location	烟碱 Nicotinamide/%	总糖 Total sugar/%	还原糖 Reducing sugar/%	总氮 Total nitrogen/%	钾 Kalium/%	氯 Chlorine/%	糖/碱 Sugar/ Alkali	氮/碱 Nitrogen/ Alkali	钾/氯 Kalium/ Chlorine	评分 Score
云南 Yunnan	2.22	34.06	28.28	1.72	0.96	1.57	15.36	0.78	0.61	65.93
福建 Fujian	3.59	24.62	19.3	1.37	1.28	1.1	6.85	0.38	1.17	64.36
河南 Henan	3.46	10.98	9.21	2.56	1.68	2.4	3.18	0.74	0.7	53.94
适宜值范围 Range of values	1.5—2.5	20—25	18—24	1.5—3.0	>2	0.4—0.8	6.0—9.0	0.8—1.2	4.0—10	

表 4 不同生态烟区感官质量评价

Table 4 Estimate to sensory quality in different ecoregions

地点 Location	香韵 Fragrance	香气量 Aroma	香气质 Aroma quality	浓度 Density	刺激性 Irritation	劲头 Energy	杂气 Offensive odor	干净度 Turbidity test	湿润 Humidify	回味 Aftertaste	合计 Total
云南 Yunnan	7.5	12.5	12.5	8	13	5	8	7.5	3.5	3.5	81
福建 Fujian	7.5	12.5	12.5	8	12.5	5	8	7.5	3.5	3.5	80.5
河南 Henan	7.5	13	12.5	8	12.5	5	8	7.5	3.5	3.5	81

云南小于福建和河南,总糖和还原糖含量均为云南高于福建和河南,烟叶总糖为河南小于云南和福建,钾含量则表现为云南<福建<河南。综合比较,云南烟叶化学成分总体协调性最好,其次是福建,河南则较差。

进一步从 3 个生态烟区烟叶感官质量(表 4)来看,云南烟叶香韵丰富性好,刺激性中等,劲头适中,稍有杂气,口腔干净度、湿润度和回味较好;河南烟叶香气量较高,刺激性较大;福建烟叶则在香气量和刺激性方面表现都略差。

2.5 各生态区烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  与其生理指标相关性分析

表 5 显示,云南烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  值与其总碳含量呈正相关且相关性最强,福建、河南烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  值与总碳含量呈负相关且相关性较弱;云南、福建、河南三地烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  值与全氮含量均呈负相关,且河南负相关性最强;云南、福建烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  值与其碳氮比均呈正相关,并以福建烟区相关性更强,河南烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  值与其碳氮比却呈较强的负相关。各烟区烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  值与其比叶重的相关性均较弱。云南、河南  $\delta^{13}\text{C}$  值与叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素、类胡萝卜素含量均呈正相关,而福建烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  值与以上各光合色素含量均呈负相关,并以云南烟区的相关性最强。

3 讨 论

3.1 不同生态烟区气候环境对烟叶稳定碳同位素组成的影响

植物稳定性碳同位素( $\delta^{13}\text{C}$ )的组成受众多环境

表 5 烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  值与生理指标的相关系数

Table 5 The correlation coefficient between  $\delta^{13}\text{C}$  and the physiological indexes

生理指标 Physiological index	相关系数 Correlation coefficient		
	云南 Yunnan	福建 Fujian	河南 Henan
总碳 Total carbon	0.753	−0.283	−0.336
全氮 Total nitrogen	−0.202	−0.433	−0.892
碳氮比 C/N ratio	0.308	0.870	−0.682
比叶重 LMA	0.364	0.342	−0.037
叶绿素 a Chlorophyll a	0.705	−0.227	0.273
叶绿素 b Chlorophyll b	0.600	−0.312	0.272
总叶绿素 Chlorophyll	0.686	−0.250	0.273
类胡萝卜素 Carotenoids	0.679	−0.010	0.270

注:表中烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  值与生理指标的相关性均不显著  
Note:No significant correlation between coefficient between  $\delta^{13}\text{C}$  and the physiological indexes

因子的影响,如温度、湿度、光照、 $\text{CO}_2$  浓度等<sup>[10]</sup>。其中,降水、温度、光照条件和土壤盐分通过改变叶片气孔导度(开闭大小)改变  $P_i/P_a$ (植物叶片内外  $\text{CO}_2$  的浓度比),从而影响植物的  $\delta^{13}\text{C}$ ,尤以降水因素影响最明显,温度的变化对  $\delta^{13}\text{C}$  的影响复杂<sup>[11]</sup>。本试验对不同气候条件下 3 个生态烟区的烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  进行比较研究,结果表现为云南>福建>河南,且云南和福建  $\delta^{13}\text{C}$  值相近,云南和福建两地与河南的差异达到显著水平( $P<0.05$ )。本试验研究获得的不同生态烟区第 11 叶位烟样  $\delta^{13}\text{C}$  值的分布与颜侃等<sup>[12]</sup>同步研究的云南、福建、河南三个生态烟区纵

向取样(依次取 7、10、13、16 叶位)稳定碳同位素的动态变化特征结果表现一致。据报道,烟株不同部位烟叶间由于环境条件等的差异,造成化学成分和香气物质间存在较大的差异,茄酮和新植二烯含量均以中部叶位最高,而茄酮是腺毛分泌物西柏烷类的主要降解产物,新植二烯是叶绿素降解产物<sup>[13]</sup>。这说明用中部叶位的第 11 叶位就可以研究整株烤烟成熟期内对环境适应的生理生态动态变化过程,对烤烟质量的评价更准确且代表性更强。李志宏等<sup>[14]</sup>以云南、河南等气象站点 1980~2010 年 30 年平均气温、降水总量和日照时数等气候资料,应用多元统计的逐步判别分析方法分析获知,平均气温对烤烟香型判别贡献最大,其次为日照时数。本研究中,对 3 个典型香型烟叶产区生育期平均温度等气候要素的分析表明,由浓香型、中间香型、清香型转变过程中烤烟生育期平均温度逐渐降低,降雨量差异不大,日照时数逐渐减少。云南、福建和河南烤烟主要大田生长期平均气温分别为 20.8 °C、22.8 °C、25.7 °C,降水总量分别为 364.9 mm、821.6 mm、250.1 mm,日照时数仅以河南 707.8 h、云南 610.0 h 相比较,可以看出三项气候要素的分布符合此规律。而  $\delta^{13}\text{C}$  平均值则分别为 -26.31‰、-27.22‰、-29.54‰,即气温与烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  之间呈明显的负相关关系,这与何春霞<sup>[15]</sup>、宁有丰等<sup>[16]</sup>、刘贤赵等<sup>[17]</sup>的结论类似;降水与烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  之间的关系符合张瑞波等<sup>[18]</sup>降水对稳定碳同位素影响不大的结论。从气候特点来看,云南气候兼具低纬高原季风气候的特点;福建属于亚热带湿润季风气候,水热条件和垂直分带较明显,趋于海洋性气候特点;河南属于北亚热带与暖温带过渡型气候,趋于大陆性气候特点。可见,河南烤烟大田生长期气温高降水少,其烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  值较小,而福建和云南烤烟大田生长期气候条件有一定相似性,两地雨水充足气温较低,其烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  值较高且相近。说明三个不同生态烟区气候条件的差异或趋同及与烤烟自身生理特征的耦合关系是影响烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  值的重要因素。

### 3.2 不同生态区烟叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值与碳氮代谢、比叶重的关系

碳、氮是烤烟生长发育必须的营养元素,在烤烟组织构成和生理代谢方面发挥着重要作用。碳氮代谢是烤烟最基本的代谢过程,与烟叶品质形成密切相关。在烟叶生长成熟过程中,只有碳氮代谢平衡协调,才能生产出优质烟叶<sup>[19]</sup>。因此,研究碳氮代谢对烟叶品质形成的作用机理有重要意义。烤烟

$\delta^{13}\text{C}$  值与矿质元素的吸收、碳氮代谢等生理过程有密切的关系,它既能反映烤烟碳氮代谢的实际状况,也能反映出环境条件对烤烟光合生理的综合影响<sup>[12]</sup>。本试验中 3 个不同生态区烟叶的  $\delta^{13}\text{C}$  值、总碳、碳氮比平均值均表现为云南>福建>河南,且福建和云南值相近,但三地间差异均不显著( $P>0.05$ )。

植物叶片的氮含量在一定程度上反映了叶片吸收和固定大气  $\text{CO}_2$  的能力,进而影响其  $\delta^{13}\text{C}$  值<sup>[20]</sup>。氮素营养对烟叶品质形成的影响最大,含氮化合物较多时香气量增加,调制后香气浓度较高<sup>[13]</sup>。本试验中烟叶全氮含量平均值表现为河南>云南>福建,且云南和福建的值相近。河南烟叶全氮含量最高,这与河南烤烟为浓香型烤烟相符,而河南烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  平均值则表现最小;云南和福建烟叶的全氮值相近,与云南、福建烤烟为清香型烤烟相符,而云南、福建  $\delta^{13}\text{C}$  平均值相近。说明烤烟香型与全氮含量存在密切关系,而  $\delta^{13}\text{C}$  值与烟叶碳氮代谢存在密切关系,即  $\delta^{13}\text{C}$  值可能一定程度上与烤烟品质和香味特征相联系。

比叶重(LMA)能反映植物对生长光环境的适应能力,以及不同生育期光合作用制造有机物质及其分配趋势,同时也反映出植物养分利用和贮藏方式的差异,是衡量植物相对生长速率的重要参数<sup>[21]</sup>。比叶重较大通常表明叶片厚度更大,或是叶脉密集、组织密度更大,而许多研究均表明碳同位素与水分利用效率呈正相关<sup>[22-23]</sup>。本试验中不同气候条件下三个生态烟区植株比叶重表现为云南>福建>河南,云南、福建烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  值与比叶重呈正相关,而河南烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  值与比叶重呈负相关。由此可知,云南烟叶的叶片厚度、光合能力、水分利用效率等优于福建烟叶,更明显好于河南烟叶。

### 3.3 不同生态区烟叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值与其光合色素含量的关系

色素是植物光合作用的物质基础,烟叶中的色素一般不具有香味特征,但通过分解、转化可形成致香成分的物质<sup>[24]</sup>。因此,烟叶中的色素不仅影响烤烟的光合作用和生理特征,同时与烟叶的外观质量和香味也有密切的关系。本试验对不同气候条件下三个生态烟区的光合色素含量进行分析比较,试验结果表明三个生态烟区烟叶叶绿素 a、总叶绿素均表现为云南>福建>河南;云南、河南烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  值与其光合色素含量均呈正相关,而福建烟叶  $\delta^{13}\text{C}$  值与光合色素含量均呈负相关。植物的  $\delta^{13}\text{C}$  值与  $P_n$  和  $P_a$  有密切的联系<sup>[25]</sup>,在郝兴宇等<sup>[26]</sup>研究中叶绿

素含量较高,表明在一定程度上有较高的光合速率,但高光合速率能够降低  $P_i$ ,因此会使  $\delta^{13}\text{C}$  值增加。本试验研究结果与此一致,说明叶绿素含量与  $\delta^{13}\text{C}$  值存在密切关系。类胡萝卜素是烟草中一类重要的香味物质,它与其他类型香味物质(如美拉德反应产物等)的相互关系也可能对烟叶的感官质量存在重要影响。但并不是类胡萝卜素含量越高,烟叶的感官质量就越好,而应分区域(香型)加以分析评价<sup>[27]</sup>。本试验类胡萝卜素含量测定分析结果为福建( $0.0057\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )>云南( $0.0054\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )>河南( $0.0043\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),云南和福建类胡萝卜素含量相近;同时,通过感官质量评定得出的云南、福建、河南烟叶香气量分别为 12.5、12.5 和 13.0,同样表现为云南、福建相近。说明烟叶中的类胡萝卜素及其降解产物与烟叶的香气量及品质存在密切关系,且在不同香型典型产区间存在差异。因此,烤烟的  $\delta^{13}\text{C}$  值、光合色素含量与烟叶香气品质存在紧密的联系,可以把  $\delta^{13}\text{C}$  值用作划分不同香型典型产区的参考值。

### 3.4 三个生态区烟叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值与其化学成分及品质的联系

烤烟化学成分主要包括烟碱、糖类、氮类、氯、钾等,不同生态类型下烟叶各种化学成分含量存在差异,其含量高低及配伍直接影响到卷烟的香气与吃味,并直接影响烟叶品质的优劣<sup>[28]</sup>。烟叶中的糖是

衡量烟草优良品质的指标,一方面能平衡烟气的酸碱度,降低刺激性产生令人满意的吃味;另一方面能形成香气物质<sup>[13]</sup>。本试验结果表明云南烟叶总糖和还原糖含量均高于福建和河南烟叶,即云南的烟叶品质优于福建和河南烟叶。烟叶中的烟碱含量对烟支的香气、吃味及吸食者的生理强度有重要影响,含量过低则劲头小吸食淡而无味,若烟碱含量高则劲头大,刺激性增强,产生辛辣味。云南烟叶中烟碱含量处于适宜值范围,而河南和福建烟叶烟碱含量均偏高,说明云南烟叶劲头适中,产生的刺激性小。钾含量较高可提高烟支的持火力和燃烧效率,降低烟气中的焦油和一氧化碳含量,提高卷烟的安全性。钾/氯主要用于判定烟叶的燃烧性,比值越大,烟叶的燃烧性越好<sup>[29-30]</sup>。本试验结果表明烟叶中的钾含量为云南<福建<河南,而三个生态烟区烟叶钾/氯均偏低,说明河南烟叶的持火力、燃烧性最好,福建次之,云南最差。由感官质量评价得出,云南烟叶香韵丰富,刺激性中等,劲头适中, $\delta^{13}\text{C}$  值最大,化学成分协调性最好;与同一清香型的云南相比,福建烟叶在香气量和刺激性方面略差, $\delta^{13}\text{C}$  值较小,化学成分协调性较差。河南烟叶,因香气量较高,刺激性较大,虽  $\delta^{13}\text{C}$  值最小,但化学成分协调性次之。此结果表明,烤烟品质不但与  $\delta^{13}\text{C}$  值存在紧密联系,还与烤烟生理存在密切关系。

### 参考文献:

- [1] 蒋高明. 植物生理生态学研究中的稳定碳同位素技术及其应用[J]. 生态学杂志, 1996, **15**(2): 49-54.  
JIANG G M, Application of stable carbon isotope technique in plant physiological ecology research[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1996, **15**(2): 49-54.
- [2] DAWSONTE, MAMBELLI S, PLAMBOECK A H. Stable isotopes in plant ecology [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, **33**: 507-559.
- [3] 颜 佩, 宋鹏飞, 等. 低纬高原两个亚生态区烤烟种植生态适应性[J]. 生态学杂志, 2012, **31**(4): 870-876.  
YAN K, SONG P F, *et al.* Ecological adaptability of flue-cured tobacco planted in two ecological sub-regions at different altitudes in low latitude plateau of Yunnan Province, Southwest China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(4): 870-876.
- [4] 商志远, 王 建, 崔明星, 等. 樟子松树轮  $\delta^{13}\text{C}$  的年内变化特征及其对气候要素的响应[J]. 植物生态学报, 2012, **36**(12): 1 256-1 267.  
SHANG Z Y, WANG J, CUI M X, *et al.* Intra-annual variation in  $\delta^{13}\text{C}$  from tree rings of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and its response to climatic factors [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, **36**(12): 1 256-1 267.
- [5] 孙柏年, 闫德飞, 解三平. 化石植物气孔与碳同位素的分析及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 34-46.
- [6] 李善家, 张有福, 陈 拓. 西北地区油松叶片稳定碳同位素特征与生理指标的关系[J]. 应用与环境生物学报. 2010, **16**(5): 603-608.  
LI J S, ZHANG Y F, CHEN T. Correlations between foliar stable carbon isotope composition and physiological parameters of *Pinus tabulae formis* in northwestern China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*. 2010, **16**(5): 603-608.
- [7] 中国烟草总公司郑州烟草研究院、中国农业科学院农业资源与农业区划研究所. 中国烟草种植区划. (单行本) 2009.
- [8] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002: 124.
- [9] 邹 琦. 植物生理生化实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 36-39.
- [10] DAWSON T E, MAMBELLI S, PLAMBOECK A H. Stable



isotopes in plant ecology[J], *Annual Review of Ecology and Systematics*. 2002, 33: 507-559.

[11] 殷树鹏, 张成君, 郭方琴, 等. 植物碳同位素组成的环境影响因素及在水分利用效率中的应用[J]. 同位素, 2008, 21(1): 48-53.

YIN S P, ZHANG C J, GUO F Q. Effect of environmental factors on stable carbon isotopic composition of plants and application in water use efficiency[J]. *Journal of Isotopes*, 2008, 21(1): 48-53.

[12] 颜 侃, 陈宗瑜, 王 娟, 等. 不同生态区烤烟叶片稳定碳同位素组成特征[J]. 生态学报, 2015, 35(11): 3 846-3 853.

YAN K, CHEN Z Y, WANG J, *et al.* Stable carbon isotope composition of tobacco leaves in different ecological regions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(11): 3 846-3 853.

[13] 史宏志, 刘国顺, 等. 烟草香味学[M]. 北京: 中国农业出版社 2011: 73.

[14] 李志宏, 等. 著. 烤烟清香型风格形成的生态基础. [M]. 北京: 科学出版社. 2015: 260.

[15] 何春霞, 李吉跃, 孟 平, 等. 树木叶片稳定碳同位素分馏对环境梯度的响应[J]. 生态学报, 2010, 30(14): 3 828-3 838.

HE C X, LI J Y, MENG P, *et al.* Changes in leaf stable carbon isotope fractionation of trees across climatic gradients [J]. *Acta Ecologica Sinica*. 2010, 30(14): 3 828-3 838.

[16] 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, 2(3): 105-108.

NING Y F, LIU W G, CAO Y N. How does the carbon isotope composition response to the climate during the plant growing[J]. *Marine Ecology & Quaternary Ecology*. 2002, 2(3): 105-108.

[17] 刘贤赵, 宿 庆, 等. 控温条件下 C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub> 草本植物碳同位素组成对温度的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(10): 3 278-3 287.

LIU X Z, SU Q, *et al.* Responses of carbon isotopic composition of C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> herbaceous plants to temperature under controlled temperature conditions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(10): 3 278-3 287.

[18] 张瑞波, 袁玉江, 魏文寿, 等. 西伯利亚落叶松树轮稳定碳同位素对气候的响应[J]. 干旱区研究, 2012, 29(2): 328-334.

ZHANG R B, YUAN Y J, WEI W S, *et al.* Response of stable carbon isotope of *Larix sibirica* Ledeb. Tree-rings to climate change [J]. *Arid Zone Research*, 2012, 29(2): 328-334.

[19] 刘国顺, 彭智良, 黄元炯, 等. N、P 互作对烤烟碳氮代谢关键酶活性的影响[J]. 中国烟草学报, 2009, 15(5): 33-37.

LIU G S, PENG Z L, HUANG Y J, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus interaction on enzyme activity in carbon and nitrogen metabolism[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2009, 15(5), 33-37.

[20] EVANS J. Photosynthesis and nitrogen relationship in leaves of C<sub>3</sub> plants [J]. *Oecologia*, 1989, 8: 1-19.

[21] 范 晶, 赵惠勋, 李 敏. 比叶重及其与光合能力的关系[J]. 东北林业大学学报, 2003, 31(5): 37-39.

FAN J, ZHAO H X, LI M. The specific leaf weight and its relationship with photosynthetic capacity [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2003, 31(5): 37-39.

[22] 刘海燕, 李吉跃. 稳定碳同位素在植物水分利用效率研究中的应用[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(1): 54-58.

LIU H Y, LI J Y. Application of stable isotopic carbon in studies of plant water use efficiency [J]. *Journal of Northwest Forestry University*. 2008, 23(1): 54-58.

[23] 陈 平, 张劲松, 孟 平, 等. 稳定碳同位素测定水分利用效率-以决明子为例[J]. 生态学报, 2014, 34(19): 5 453-5 458.

CHEN P, ZHANG J S, MENG P, *et al.* Feasibility analysis on the determination of WUE by stable carbon isotope: *Cassia obtusifolia* L. as an example[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(19): 5 453-5 459.

[24] 史宏志, 顾少龙, 段卫东, 等. 不同基因型烤烟质体色素降解及与烤后烟叶挥发性降解物含量关系[J]. 中国农业科学, 2012, 45(16): 3 346-3 356.

SHI Z H, GU S L, DUAN W D, *et al.* Degradation of plastid pigment and its relationship with volatile catabolite content in cured leaves of different genotypes of flue-cured tobacco [J]. *Scientia Agricultura Sinica*. 2012, 45(16): 3 346-3 356.

[25] 马 晔, 刘锦春. δ<sup>13</sup>C 在植物生态学研究中的应用[J]. 西北植物学报, 2013, 33(7): 1 492-1 500.

MA Y, LIU J C. Applications of δ<sup>13</sup>C in plant ecological research[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.* 2013, 33(7): 1 492-1 500.

[26] 郝兴宇, 李 萍, 等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对谷子生长发育与光合生理的影响[J]. 核农学报, 2010, 24(3): 589-593.

HAO X Y, LI P, *et al.* Effects of air CO<sub>2</sub> enrichment on growth and photosynthetic physiology of millet[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*. 2010, 24(3): 589-593.

[27] 詹 军, 刘 冲, 等. 不同香型烤烟类胡萝卜素降解香气物质与评吸质量分析[J]. 西南农业学报, 2011, 24(6): 2 167-2 142.

ZHAN J, LIU C, *et al.* Analysis of carotenoid degraded aroma components and smoking quality of flue-cured tobacco leaves with different flavor types[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*. 2011, 24(6): 2 142-2 167.

[28] 王瑞新. 烟草化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 42-78.

[29] 黄中艳, 朱 勇, 邓云龙, 等. 云南烤烟大田期气候对烟叶品质的影响[J]. 中国农业气象, 2008, 29(4): 440-449.

HUANG Z Y, ZHU Y, DENG Y L, *et al.* Influence of climate during field growing season on quality of tobacco leaf in Yunnan Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*. 2008, 29(4): 440-449.

[30] 杜咏梅, 张建平, 王树声, 等. 主导烤烟香型风格及感官质量差异的主要化学指标分析[J]. 中国烟草科学, 2010, 10(5): 7-12.

DU Y M, ZHANG J P, WANG S S, *et al.* Major chemical indices leading the difference among different flavor types and sensory quality grades of flue-cured tobacco[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2010, 10(5): 7-12.

(编辑: 裴阿卫)