

DOI: 10.12357/cjea.20240580

CSTR: 32371.14.cjea.20240580

孙秀芬, 黄中艳, 解明恩, 谢新乔, 代快. 云南烤烟化学品质风格特点的种植气候成因[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(7): 1371–1382

SUN X F, HUANG Z Y, XIE M E, XIE X Q, DAI K. Planting climate causes of the style features for the chemical quality of flue-cured tobacco in Yunnan Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(7): 1371–1382

云南烤烟化学品质风格特点的种植气候成因*

孙秀芬¹, 黄中艳^{2**}, 解明恩³, 谢新乔⁴, 代 快⁵

(1. 云南省玉溪市气象局 玉溪 653100; 2. 云南省气象学会 昆明 650034; 3. 云南省气象服务中心 昆明 650034;
4. 云南中烟原料中心 昆明 650034; 5. 云南省烟草公司玉溪市公司 玉溪 653100)

摘 要: 为深入认识烤烟烟叶化学品质与种植气候的内在关系, 基于 10 个县(区)田间试验和气候资料, 采用系统聚类、主成分分析方法, 分析气候因素对云南烤烟多项化学成分含量及化学品质特点的影响。结果表明: 云南烟区大田生长期(4—8月)有 6 种烤烟气候类型, 但大多数类型表现为: 大田生长期平均气温(T)显著偏低(最热月 $<22.5\text{ }^{\circ}\text{C}$), 旺长成熟期(6—8月)平均相对湿度(RH)较高($>78\%$)、降水量(R)较大($>5.5\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$)、日照时数(S)偏小($<5.0\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$), 而移栽伸根期(4月中旬—5月中旬) $T>19.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $R<1.8\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $\text{RH}<66\%$ 、 $S>7.0\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 。烤烟大田生长期(尤其成熟期)相对湿度较高、降水量较大, 有利于烟叶总氮和蛋白质形成和积累; 大田生长期(尤其旺长成熟期)平均温度较低, 有利于烟叶烟碱含量的提高。旺长成熟期温和湿润寡照的气候条件是云南烟叶上述 3 项化学成分含量相对较高的主要原因; 云南低纬度高原大部地区烤烟大田生长季前期(4—5月)相对干燥晴暖、中后期(6—8月)温和湿润寡照的气候特征, 显著影响云南烟叶主要化学成分(总糖、还原糖、烟碱、总氮、蛋白质、钾和石油醚提取物)的积累及其品质风格特点的形成。分析成果可应用于开发特色烟叶, 改善烟叶化学品质的评估和预测, 为烟草业合理调配不同产地原料烟叶提供依据。

关键词: 烤烟种植气候; 烤烟化学品质; 系统聚类; 主成分分析; 云南省

中图分类号: S181; S162; S184

Planting climate causes of the style features for the chemical quality of flue-cured tobacco in Yunnan Province*

SUN Xiufen¹, HUANG Zhongyan^{2**}, XIE Ming'en³, XIE Xinqiao⁴, DAI Kuai⁵

(1. Yuxi Meteorological Bureau in Yunnan, Yuxi 653100, China; 2. Yunnan Provincial Meteorological Society, Kunming 650034, China;
3. Yunnan Center of Meteorological Service, Kunming 650034, China; 4. Raw Material Center of China Tobacco Yunnan Industrial Co., Ltd., Kunming 650034, China; 5. Yunnan Tobacco Company Yuxi Branch, Yuxi 653100, China)

Abstract: Yunnan Province has a complex geographical environment with large altitude differences and significant climate variations. The province has the largest tobacco leaf output in China, with flue-cured tobacco-growing areas distributed at altitudes

* 国家自然科学基金项目(U1902209)、云南省自然科学基金项目(202201AS070069)和云南省气象局基层台站气象科技创新与能力提升计划项目(STIAP202413)资助

** 通信作者: 黄中艳, 主要从事农业气象研究。E-mail: qxhzy@sina.com

孙秀芬, 主要从事农业气象研究。E-mail: 454382016@qq.com

收稿日期: 2024-09-19 接受日期: 2025-01-15

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (U1902209), Yunnan Natural Science Foundation Project (202201AS070069), and Meteorological Science and Technology Innovation and Capacity Improvement Project for the Primary Stations of Yunnan Meteorological Bureau (STIAP202413).

** Corresponding author, E-mail: qxhzy@sina.com

Received Sep. 19, 2024; accepted Jan. 15, 2025

between 1 000–2 000 meters. To understand the relationships between the chemical quality of flue-cured tobacco and planting climates, we analyzed field experiments and climate data from 10 counties (districts) from 2017 to 2020 in Yunnan. Systematic cluster and principal component analyses were used to analyze the effects of the planting climate on the contents of nicotine, total nitrogen, and protein in tobacco leaves. The results showed that the climates of tobacco-growing areas of Yunnan Province during the tobacco field growth period (from mid-April to late August) were divided into six types, indicating climate diversity in planting flue-cured tobacco. Most planting climate types exhibited the main climatic characteristic of Yunnan's low latitude plateau region, which is marked by lower average air temperature during the tobacco field growth period, with the average values of the hottest month being lower than 22.5 °C. Simultaneously, during the vigorous growth and maturation period of flue-cured tobacco (mainly in summer, i.e., from June to August), the region experienced higher average relative humidity (exceeding 78%), increased rainfall (being greater than 5.5 mm per day on average), and reduced sunshine duration (less than 5.0 hours per day on average). In contrast, during the transplanting and root growth period (from mid-April to mid-May), the region experienced lower average relative humidity (below 66%), limited rainfall (less than 1.8 mm per day on average), and increased sunshine duration (more than 7.0 hours per day). In other words, in most tobacco-growing areas of the Yunnan Province, the characteristics of phased climate change during the flue-cured tobacco field growth season were similar. Higher average relative humidity and more rainfall during the tobacco field growth period, especially during the maturation period from July to August, were conducive to increasing the total nitrogen and protein contents in the tobacco leaves. Lower temperature conditions during the field growth period, particularly in the vigorous growth and mature periods, were associated with nicotine accumulation in tobacco leaves. In summary, the temperate, humid climate with inadequate sunlight during the vigorous growth and maturation period of flue-cured tobacco was the main reason for the relatively higher contents of the aforementioned three chemical components inside tobacco leaves in Yunnan. The climatic characteristics of the tobacco field growth season (temperate, humid climate with inadequate sunlight in summer, and relatively dry, sunny, warm climate in spring) had significant influences on the contents of the main chemical components (including total sugar, reducing sugar, potassium, petroleum ether extract, and the three aforementioned components) in tobacco leaves. These characteristics led to the development of distinctive chemical quality traits of tobacco leaves produced in most of the tobacco-growing areas in Yunnan. These results can be applied to the development of characteristic tobacco leaves under different climatic conditions. They would also help predict and evaluate changes in the chemical quality of tobacco leaves under varying climatic conditions, thereby providing a scientific basis for the tobacco industry to rationally allocate raw tobacco leaves from different regions.

Keywords: climate of flue-cured tobacco planting; chemical quality of flue-cured tobacco; systematic cluster; principal component analysis; Yunnan Province of China

烟叶质量是烟草业可持续发展的核心问题, 包括外观质量、感官质量、物理特性、化学品质 and 安全性 5 个方面^[1], 其中化学品质包括烟草多种化学成分含量及其比例的协调^[1], 是直接影响烟草质量优劣的重要指标^[1-2], 尤其是化学成分烟碱、总糖、总氮、蛋白质、还原糖、钾和石油醚提取物的含量及其比例^[1,3-5]。烟碱与吸烟口感和烟草产品的安全性密切相关^[1,6], 糖碱比表示烟草的酸碱平衡性^[1,3,7]; 糖蛋比是衡量吸味的主要指标^[1,3]; 总氮是影响烟草感官质量的主要化学成分之一^[1,5]。

影响烤烟生长发育、产量和品质形成的重要因素包括气候、土壤、品种和栽培措施, 其中气候条件是影响烟叶品质的首要因素^[2,6,8-11], 因此烟草化学品质与气候的关系受到广泛关注^[2,7,12-18]。已有研究表明, 云南烤烟大田生长期气候条件对烟叶品质风格特点有重要影响^[2]; 云南昆明嵩明县烤烟总糖、还原糖、总氮、烟碱、钾和氯含量与 6 月的日照、平均气温、雨量, 以及 7 月的日照、雨量的相关性较强^[13]; 云南主烟区烤烟化学成分含量与 5 月雨量、6

月日照和相对湿度及平均气温、大田期日照时数关联度最大^[14]; 云南烤烟总糖、还原糖和钾含量与烟叶成熟前期降水和成熟中期日照时数关系最密切^[15]; 河南烟叶钾含量与大田中后期平均气温, 烟叶石油醚提取物含量与大田生长期相对湿度和 7—8 月平均温度关联度最大^[16]; 山东烤烟还原糖、总氮、烟碱、蛋白质含量与 5 月日照、平均气温、雨量和 7 月日照、平均相对湿度相关显著^[17]; 湖南三大烟区的烟叶化学成分含量与成熟期昼夜温差和相对湿度相关最显著^[18]。这些研究成果对促进烤烟生产有积极作用, 但绝大多数未经田间试验的验证, 大多停留在统计学相关性和多个生态因子相对重要性分析的层面; 关于气候影响烟叶化学品质的系统性专项研究少有报道, 气候对烟叶化学成分含量的影响机制仍不明确。鉴于此, 本文基于中国第一烟草大省云南的 5 大区域 10 个县(区) 4 年的田间试验, 分析烤烟主要化学成分含量与种植气候的关系, 以期揭示影响云南烤烟化学品质的气候因素及其影响机理, 为当地烟草生产、烤烟气象服务、卷烟质量调控和优化等提供参考。

1 材料与方法

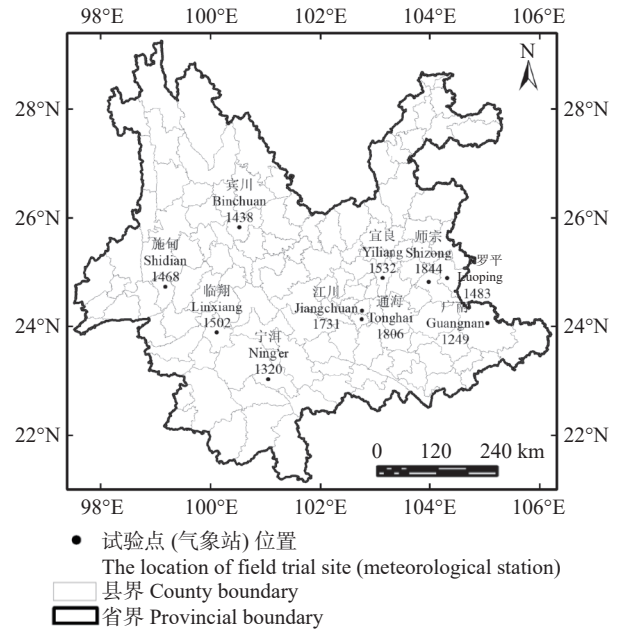
1.1 研究区域概况

地处中国西南部的云南省地理环境复杂, 区域气候差异显著^[19-20], 是全国最典型的立体气候区, 也是烤烟种植面积和总产量最大的地区^[3]。全省约 90% 的县(市) 种植烤烟, 70% 的烟叶产于传统植烟区滇中及以东和以北地区^[3], 绝大部分烟区分布于海拔 1 000~2 000 m 区域。云南烤烟生长季为 3 月—9 月上旬, 育苗期在育苗棚小气候环境下进行, 4 月中旬移栽大田, 9 月上旬为烟叶采收末期, 故烤烟大田生长期为 4 月中旬至 8 月末。

2017—2020 年在有地域代表性的 10 个县(区) 布点田间试验(图 1), 主要分布在滇中、滇西、滇东和滇西南, 各试验地点距离其所属县(区) 国家气象站 <5 km 且与气象站海拔之差 <100 m。10 个相关气象站点地理参数跨度为: 23.03°~25.82°N、99.18°~105.05°E、海拔 1 249~1 844 m。

1.2 试验设计

2017—2020 年在云南开展气候影响烤烟化学品质的烟叶田间试验, 试验点的选择侧重考虑云南烟区的区域性气候差异和海拔差异, 分布于云南 5 大区域 10 个县(区), 详见表 1。每个试验点均选择红壤、土壤肥力中等的 2 块旱地农田作为试验田, 以满足烤烟种植对单双年(大田) 轮作的要求; 2 田块间距离 <50 m, 每块面积都 >620 m²。土壤肥力按照试验首年烤烟移栽前实测的土壤肥力指标判定, 土壤有机质含量为 20~30 g·kg⁻¹, 全氮含量 1~2 g·kg⁻¹, 速效氮含量 6.75~9.00 mg·kg⁻¹, 速效磷含量 0.75~1.50 mg·kg⁻¹, 速效钾含量 7.50~11.25 mg·kg⁻¹。烤烟栽培品种统一



地理底图来自云南省基础地理信息中心, 审图号为云 S(2023)016 号, 无修改。图中数字为气象站点海拔(m)。The geographical base map data come from Yunnan Basic Geographic Information Center, with the reviewed number of Yun S(2023)016. The base map had not been modified. The number in the map represents the altitude of meteorological station (m).

图 1 2017—2020 年云南烤烟田间试验点(气象站)分布图

Fig. 1 Distribution of flue-cured tobacco field trial sites (weather stations) in Yunnan during 2017–2020

为‘K326’, 种植密度为 15 000 株·hm⁻²。

试验期间 10 个试验点采用相同的烤烟栽培技术和田间管理措施。鉴于云南烤烟移栽期(4 月中下旬)正值气象干旱偏重的干季后期^[19], 各试验点试验年在烟苗长到“4 叶 1 心”时, 按单位面积相同用水量做抗旱移栽, 即打塘移栽后浇定根水, 每株统一用水

表 1 云南 10 个烟叶试验点试验年份和烤烟主要生育期的平均时段(月-日)

Table 1 The years of trial for 10 experimental locations and their time frame of the growth and development stages for flue-cured tobacco (month-day)

生育期 Growth period	2017—2019					2017—2020				
	宾川 Binchuan	江川 Jiangchuan	通海 Tonghai	临翔 Linxiang	宁洱 Ning'er	施甸 Shidian	宜良 Yiliang	罗平 Luoping	师宗 Shizong	广南 Guangnan
移栽伸根期 Transplanting and root growth period	04-01— 04-30	04-21— 05-20	04-21— 05-20	04-11— 05-10	04-11— 05-10	04-11— 05-10	04-11— 05-10	04-21— 05-20	05-01— 05-30	04-11— 05-10
旺长期 Vigorous growth period	05-01— 06-10	05-21— 06-30	05-21— 06-30	05-11— 06-20	05-11— 06-20	05-11— 06-20	05-11— 06-20	05-21— 06-30	06-01— 07-10	05-11— 06-20
成熟期 Mature stage	06-11— 08-10	07-01— 08-30	07-01— 08-30	06-21— 08-20	06-21— 08-20	06-21— 08-20	06-21— 08-20	07-01— 08-30	07-11— 09-05	06-21— 08-20
旺长成熟期 Vigorous growth and mature stage	05-01— 08-10	05-21— 08-30	05-21— 08-30	05-11— 08-20	05-11— 08-20	05-11— 08-20	05-11— 08-20	05-21— 08-30	06-01— 09-05	05-11— 08-20
大田生长期 Field growth period	04-01— 08-10	04-21— 08-30	04-21— 08-30	04-11— 08-20	04-11— 08-20	04-11— 08-20	04-11— 08-20	04-21— 08-30	05-01— 09-05	04-11— 08-20

量 600 mL, 不使用地膜覆盖。烤烟伸根生长期(6 月前)仅在烟株干旱缺水时少量灌溉, 即当烟田中超过 60% 烟株连续 3 d 下午叶片出现明显凋萎时, 于第 3 个凋萎日 17:00 在烟株根部浇水一次, 每株统一用水量 100 mL, 以防止干旱导致死苗缺苗。旺长期和成熟期阶段正值云南雨季主汛期, 不进行人工灌溉; 出现强降水或连续多天降水造成烟田洪涝时, 在 2 d 内完成排水处理至烟田无积水。大田生长期的施肥量和其他田间管理措施, 都在烤烟相同发育期的相同天数后采用同一标准实施, 试验期间不施用任何农药防治病虫害。

试验年 10 个试验点都按时记录烤烟主要发育期, 包括移栽期、团棵期、开花期、上部烟叶成熟期的普遍期和中部烟叶成熟末期的出现日期。在中部烟叶成熟末期对中部 C3F 等级烟叶取样、测试分析烟样化学成分烟碱、总氮和蛋白质的含量。使用相邻试验点的国家气象站点试验期逐日气象观测数据做气候条件的相关分析。

10 个试验点中, 有 5 个为 4 年试验, 5 个为 3 年试验(表 1)。因云南各地海拔高度和区域气候差异较大^[19-20], 因此 10 个试验点烤烟主要生育阶段的具体时间有差别(表 1)。

1.3 数据来源和测定项目

2017—2020 年 10 个试验点烤烟大田生长期逐日气象数据来源于云南省气象信息中心。选取 13 个气候要素做气候数据分析, 其中, 温热因子^[21]包括平均气温(T)、最高气温(T_m)、最低气温(T_n)、最高地面温度(T_{dm})、最低地面温度(T_{dn})、地面温度日较差(T_{sr})、平均 5 cm 地温(T_{ds})、平均 20 cm 地温(T_{d20}); 水湿因子包括平均水汽压(P_a)、平均相对湿度(RH)、降水量(R)、降水日数(R_d , 按日降水量 ≥ 0.1 mm 计), 光照因子^[21]考虑日照时数(S)。

针对 13 个气候要素, 使用逐日气象观测值分别统计各试验点在试验年大田生长期 5 个阶段的气候要素值; 按照烤烟生育阶段名+气象要素名+试验点序号+试验年序的统一顺序, 整理得到各生育阶段 13 个气候变量(自变量)的样本序列, 样本数都为 35。

2017—2020 年 10 个试验点在烟田 80% 烟株的中部烟叶成熟时, 对中部 C3F 等级烟叶取样。每个取样烟田设 4 个取样区; 每个取样区选取 1 个样点随机选 5 株烤烟, 各取中部 C3F 等级烟叶 1 片, 合并为 1 份样品; 最终 1 个试验点 1 个试验年有 4 份烟叶样品。

各试验点试验年在中部成熟烟叶取样的次日, 采用烟草化学成分测试分析的标准方法^[22], 对取回的

中部 C3F 等级烟叶样品逐份测定其烟碱、总氮、蛋白质重量分别占烟叶干重的百分比含量。其中, 烟叶的每个成分含量(因变量)按 1 个试验点 1 个试验年 4 份烟叶样品的算术平均值记为 1 个样本, 10 个试验地点全部试验年共取得样本数为 35。按照烟叶成分名+试验点序号+试验年序的统一顺序, 整理得到烟叶 3 个成分含量即总氮(TN)、蛋白质(PT)、烟碱(NT) 3 个因变量的样本序列。

1.4 研究方法

使用系统聚类法^[23-24], 选择温度要素(T 、 T_{d20})、水分要素(RH、 R)和光照要素(S)共 5 项气候变量指标, 基于 3 个生育阶段(移栽伸根期、旺长期、成熟期)共 15 个气候变量的样本序列, 采用欧氏距离平方系数聚类划分出烤烟大田生长期气候类型(样本分类)。在此基础上, 分析气候类型的差异对烟叶各化学成分含量的影响。

使用主成分分析(PCA)方法^[23-24], 分析因变量指标场(由烟叶 3 个化学成分含量构成)、各生育阶段气候变量场(由 13 个气候要素构成)随样本序列变化的少数主成分。再使用 Pearson 相关分析法分析两类变量场主成分之间的相关性。结合作物生态学和气象学知识, 解释气候因子对烟叶各化学成分含量的影响。

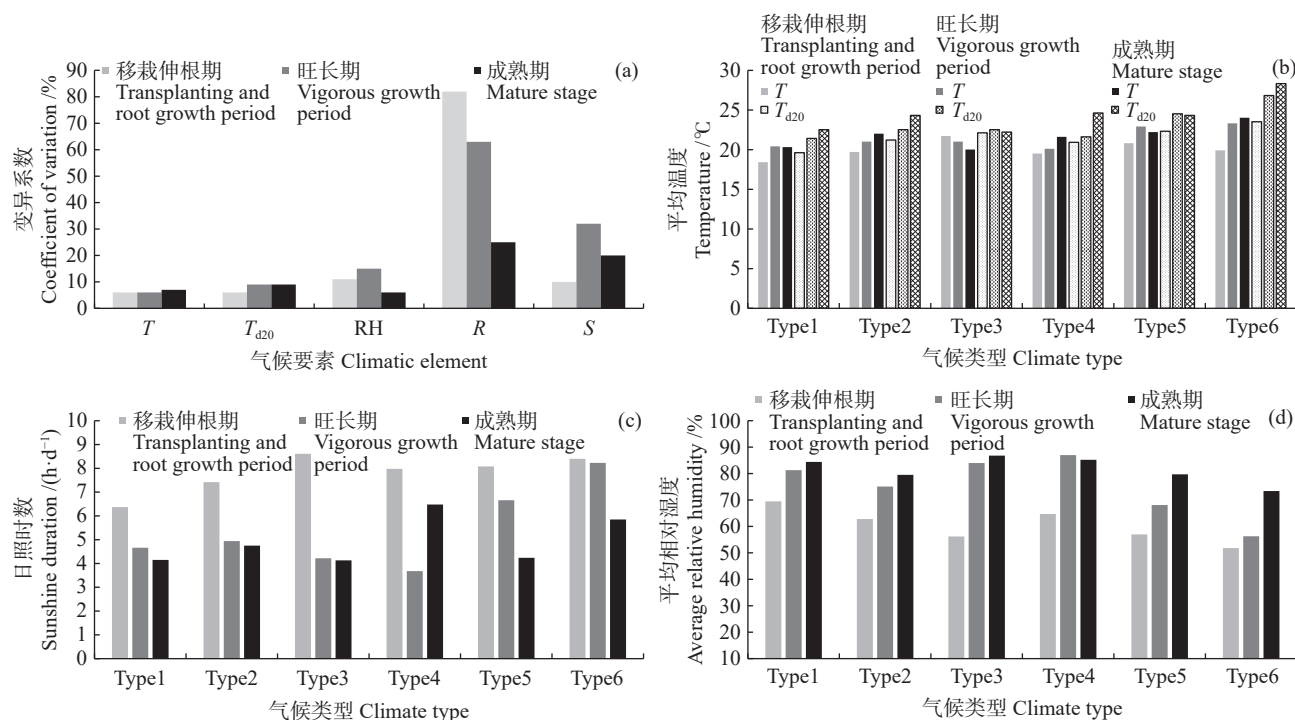
2 结果与分析

2.1 烤烟大田生长期气候类型划分

系统聚类分析得到云南烤烟大田生长期 6 个气候类型, 分别包含 6、11、5、3、8 和 2 个样本。烤烟主要生育阶段气候要素的气候类型间变异系数和各气候类型的气候要素平均值, 如图 2 所示。

按照相同生育阶段同一个气候要素比较 6 个气候类型的要素值大小, 并划分为低(少)、较低(较少)、中等、较高(较多)、高(多) 5 个等级, 可描述 6 种气候类型的特点。比如, Type1 为热量少+日照较少+湿度较高型, Type2 为热量中等+日照较少+湿度前期较低后期中等型等; 其中前、中、后期分别为移栽伸根期、旺长期、成熟期。

如图 2a 所示, 3 个生育阶段平均气温的气候类型间变异系数 CV 值为 6%~7% (对应标准差 SD 值为 1.13~1.45 °C), 平均 20 cm 地温的 CV 值为 6%~9% (对应 SD 值为 1.34~2.18 °C), 平均相对湿度的 CV 值为 6%~15%, 日照时数的 CV 值为 10%~32%, 降水量的 CV 值为 25%~82%; 并且 3 个生育阶段 5 个气候变量, 都是类内样本间 CV 值小于气候类型间 CV 值,



T : 平均气温; T_{d20} : 平均 20 cm 地温; RH: 平均相对湿度; R : 降雨量; S : 日照时数; Type1-Type6 分别为聚类分析得到的大田生长期 6 种烤烟气候类型。本图是基于 2017—2020 年云南 10 地点田间试验数据的聚类分析结果。 T : average air temperature; T_{d20} : average ground temperature of 20 cm depth; RH: average relative humidity; R : rainfall; S : sunshine duration. Type1-Type6 represent the six climatic types of tobacco planting in tobacco field growth period, as identified through cluster analysis. This figure is obtained by cluster analysis based on the climate data from 10 field trial spots from 2017 to 2020 in Yunnan.

图 2 云南烤烟 6 种气候类型大田生长期各阶段的气候要素值及其类型间的变异系数

Fig. 2 Climate element values of growth stages in tobacco field growth period for 6 climate types and their differences among climate types in Yunnan

表明聚类分析得到的 6 个烤烟气候类型总体差异显著, 其中温度 (含 T 和 T_{d20}) 在 3 类气候因素中气候类型间差异最小, 降水量差异最大。

2.2 大田生长期气候的阶段变化

气候要素的时段分配和要素匹配对烟叶品质形成有重要影响^[3,8]。为此, 分析 6 种烤烟气候类型的主要气候要素在烤烟大田生长期内的阶段性变化。由图 2b 可知, 6 种气候类型下烤烟大田生长期平均温度的时间变化都较平缓, 与相关文献关于云南烟区大田生长季平均气温逐月变化平缓^[3,7,25]的观点相一致; 除 Type3 和 Type6 以外的 4 个气候类型 (累计样本数占全样本的 80%), 移栽伸根期平均气温低于旺长期、成熟期的平均气温为 20.0~23.0 °C 且两个生育阶段平均气温的差值小于 1.0 °C。平均 20 cm 地温除 Type3 和 Type5 以外的 4 个气候类型 (累计样本数占全样本的 63%), 都是生长季内呈阶段性升高的变化趋势, 但总体上相邻阶段的值差别较小。

由图 2c 可见, 总体上烟叶成熟期平均每天日照时数最少, 其中气候类型 Type1、Type3、Type5 为

4.13~4.24 h·d⁻¹, Type2 为 4.75 h·d⁻¹ (此 4 个类型累计样本数占全样本的 85%), 均小于同期国内大多数烟区 0.8~2.0 h·d⁻¹^[3,11]; 旺长期日照时数 (全样本平均 5.40 h·d⁻¹) 稍多于成熟期 (全样本平均 4.93 h·d⁻¹); 移栽伸根期日照时数最多 (除 Type1 以外的 5 个类型均 ≥ 7.40 h·d⁻¹)。这体现了云南烤烟大田生长季前期日照多、中后期日照少的气候特征, 与相关文献的分析结论^[3,7]相一致。

由图 2d 可见, 移栽伸根期平均相对湿度较低, 全部气候类型都处于 52.0%~69.5%; 旺长期平均相对湿度较高, 前 4 个气候类型 (累计样本数占全样本的 71%) 为 75.0%~87.0%; 成熟期平均相对湿度最高, 前 5 个气候类型 (累计样本数占全样本的 94%) 为 80.0%~87.0%。除 Type4 以外的其他 5 个气候类型 (累计样本数占全样本的 91%), 生长季内平均相对湿度都呈阶段性增大的变化趋势。

根据上述分析, 移栽伸根期平均相对湿度较低、日照时数较多、其平均气温仅略低于旺长期。与移栽伸根期气候特点不同的是, 旺长期日照时数显著偏少、平均相对湿度较高、平均气温 < 22 °C (比

国内东部烟区显著偏低^[3,7,25]; 烟叶成熟期, 平均气温显著也偏低, 平均相对湿度增高至>78%, 日照时数也偏少。由此可见, 云南大部分烟区有移栽伸根期相对干燥晴暖、旺长成熟期“温和湿润寡照”的气候特征。

2.3 气候类型间烟叶化学成分含量的差异

各气候类型烟样中部分化学成分含量统计结果如表 2 所示, 6 种气候类型烟样中烟碱含量为 1.97%~2.60%, 总氮含量为 1.76%~2.15%, 蛋白质含量为 8.61%~10.77%。计算烤烟大田期 6 个气候类型对

应的烟叶化学成分含量的类内样本间标准差 (SD) 和类间标准差 (表 2)。结果表明, 烟碱含量的类内样本间 SD 值为 0.22%~0.72%、类间 SD 值仅为 0.23%; 总氮含量的类内样本间 SD 值为 0.20%~0.36%、类间 SD 值仅为 0.13%; 蛋白质含量的类内样本间 SD 值为 1.29%~2.86%、类间 SD 值仅为 0.77%。烟叶 3 项化学成分含量均为类内样本间标准差大于类间标准差, 表明气候类型间烟叶化学成分含量的差异不显著, 即气候条件对烟叶化学成分含量的影响不能用气候类型的差异来解释。

表 2 云南烤烟生长期各烤烟气候类型烟样化学成分含量及其类内/类间标准差

Table 2 Chemical composition contents of flue-cured tobacco samples and their intra-/inter-class standard deviation across climatic types during field growth period in Yunnan

气候类型 Climate type	总氮 Total nitrogen /%		烟碱 Nicotine tobacco /%		蛋白质 Protein /%	
	平均值 Mean value	类内标准差 Intra-class SD	平均值 Mean value	类内标准差 Intra-class SD	平均值 Mean value	类内标准差 Intra-class SD
Type1	2.15	0.34	2.60	0.53	10.77	2.45
Type2	1.98	0.33	2.42	0.48	9.23	2.86
Type3	1.98	0.20	1.97	0.22	10.25	1.47
Type4	1.98	0.23	2.44	0.28	9.74	1.31
Type5	1.76	0.36	2.21	0.29	8.61	2.36
Type6	1.99	0.32	2.53	0.72	9.44	1.29
类间标准差 Interclass SD	0.13		0.23		0.77	

本表是2017—2020年云南10地点田间试验的分析结果, 其中类间标准差根据各类样本平均值计算得到。This table is the results based on the 10 field trial spots from 2017 to 2020 in Yunnan. The inter-class SD value was obtained according to the sample mean of each climatic type.

2.4 气候变量场的主成分分析 (PCA)

2.4.1 PCA 主成分对气候变量场原始变量时空变化总方差的解释度

针对各生育阶段 13 个气候变量构成的指标场的样本序列进行 PCA 分析, 得到各主成分对总方差的解释度如表 3 所示。各生育阶段提取 2 或 3 个主成分能解释原始变量时空变化总方差的 83.21%~89.46%; 5 个生育阶段全部 13 个主成分的大多数 (占比为 85%) 对其总方差的解释度均>25%, 只有 2 个

第 3 主成分对其原始变量总方差的解释度<20%, 分别为 13.32%、18.73%。

2.4.2 各气候因子对其主成分的影响大小

根据主成分分析法原理和各阶段气候变量场主成分的因子得分系数 (表 4), 可分析得出各气候变量因子对相应主成分影响的大小^[23]。对于大田生长期第 1 主成分 (F1), 最高地面温度、地面温度日较差、最高气温、平均气温、日照时数和 2 个浅层地温共 7 个因子得分均较高, 它们共同反映热量条件^[26], 对

表 3 烤烟各生育阶段气候变量场主成分对其原始变量时空变化总方差的解释度

Table 3 The degree for principal components of climatic variables fields of tobacco growth stages to explain the total variance of original variable fields

	移栽伸根期 Transplanting and root growth period			旺长期 Vigorous growth period		成熟期 Mature stage			旺长成熟期 Vigorous growth and mature period		大田生长期 Field growth period		
	F1	F2	F3	F1	F2	F1	F2	F3	F1	F2	F1	F2	F3
特征根值 Value of characteristic root	4.21	3.59	3.26	7.24	3.98	6.06	3.84	1.73	5.72	5.10	5.08	4.11	2.44
解释度 Degree of explanation /%	32.39	27.65	25.11	55.70	30.58	46.62	29.52	13.32	44.01	39.21	39.06	31.60	18.73
累计解释度 Cumulative degree of explanation /%	85.14			86.28		89.46			83.21		89.39		

F1、F2、F3 分别代表相应生育阶段变量场第 1、第 2、第 3 主成分; 特征根值为无量纲。本表根据 2017—2020 年云南 10 地点田间试验气候数据做主成分分析得到。F1, F2 and F3 respectively represent the first, second and third principal components of variable fields in the corresponding growth stages of flue-cured tobacco. The values of characteristic root are dimensionless. This table is obtained by principal component analysis based on the climate data from 10 field trial spots from 2017 to 2020 in Yunnan.

表 4 烤烟各生育阶段气候变量场各主成分的因子得分系数 (无量纲)

Table 4 The factor score coefficients of the principal components of climatic variable fields for tobacco growth stages in Yunnan (being dimensionless)

生育阶段 Growth and development stage	主成分 Principal component	热量因子 Factor of heat condition								水分因子 Factor of water condition				光照因子 Factor of light condition
		T	T_m	T_n	T_{dm}	T_{dn}	T_{ds}	T_{d20}	T_{sr}	P_v	RH	R	R_d	S
移栽生根期 Transplanting and root growth period	$F1$	-0.050	0.253	-0.102	0.059	0.022	0.003	0.044	0.048	0.339	0.319	0.184	0.154	-0.237
	$F2$	0.045	0.366	-0.149	0.298	-0.046	0.207	0.247	0.286	0.217	0.174	0.048	-0.027	-0.098
	$F3$	0.214	0.051	0.309	-0.157	0.308	0.034	0.021	-0.224	0.097	-0.050	-0.099	0.002	0.046
旺长期 Vigorous growth period	$F1$	0.094	0.096	-0.029	0.107	-0.040	0.111	0.108	0.105	-0.092	-0.115	-0.096	-0.110	0.108
	$F2$	0.206	0.149	0.301	-0.048	0.306	0.120	0.134	-0.096	0.172	-0.005	0.086	0.059	0.043
成熟期 Mature stage	$F1$	0.153	0.154	0.114	0.074	0.117	0.154	0.153	0.038	0.104	-0.103	-0.035	-0.036	0.071
	$F2$	0.049	0.009	0.153	-0.192	0.153	-0.020	-0.021	-0.216	0.130	0.068	0.181	0.188	-0.125
	$F3$	-0.067	-0.039	-0.127	0.154	-0.093	0.073	0.090	0.167	0.406	0.590	0.366	0.003	0.428
旺长成熟期 Vigorous growth and mature stage	$F1$	0.019	0.039	-0.112	0.164	-0.111	0.072	0.068	0.174	-0.136	-0.110	-0.149	-0.159	0.115
	$F2$	0.179	0.160	0.193	-0.022	0.205	0.137	0.139	-0.061	0.142	-0.068	0.035	0.029	0.042
大田生长期 Field growth period	$F1$	0.518	0.637	-0.227	0.909	-0.157	0.775	0.784	0.872	-0.067	-0.373	-0.466	-0.762	0.765
	$F2$	0.832	0.704	0.912	-0.136	0.962	0.576	0.572	-0.314	0.531	-0.294	-0.008	0.065	0.123
	$F3$	-0.158	-0.022	0.054	-0.243	0.145	-0.206	-0.166	-0.253	0.810	0.852	0.747	0.441	-0.239

T : 平均气温; T_m : 最高气温; T_n : 最低气温; T_{dm} : 最高地面温度; T_{dn} : 最低地面温度; T_{ds} : 平均 5 cm 地温; T_{d20} : 平均 20 cm 地温; T_{sr} : 地面温度日较差; P_v : 平均水汽压; RH: 平均相对湿度; R : 降水量; R_d : 降雨日数; S : 日照时数。 $F1$ 、 $F2$ 、 $F3$ 分别为对应生长发育阶段气象变量场的第 1、第 2、第 3 主成分。本表根据 2017—2020 年云南 10 地点田间试验气候数据做主成分分析得到。 T : average temperature; T_m : maximum temperature; T_n : minimum temperature; T_{dm} : maximum surface temperature; T_{dn} : minimum surface temperature; T_{ds} : average ground temperature of 5 cm depth; T_{d20} : average ground temperature of 20 cm depth; T_{sr} : diurnal surface temperature range; P_v : average vapour pressure; RH: average relative humidity; R : rainfalls; R_d : rainy days; S : sunshine duration. $F1$, $F2$ and $F3$ respectively represent the first, second and third principal components of relevant meteorological variable indexes fields for tobacco growth stages. This table is obtained by principal component analysis based on the climate data from 10 field trial spots from 2017 to 2020 in Yunnan.

$F1$ 大小起正效应; 而降水日数、降水量和相对湿度共 3 个因子得分为负值, 且绝对值明显偏小, 对 $F1$ 大小起负效应, 且作用力较小; 其他变量因子得分绝对值太小, 可忽略不计 (表 4)。表 4 中其他主成分主要反映气候因子的影响, 可做类似分析。

2.5 烟叶化学成分变量场主成分分析

针对 3 项化学成分含量构成的因变量场的样本序列进行 PCA 分析, 可提取 3 个主成分 (表 5)。其中, 前 2 个主成分特征根对总方差的解释度分别为 42.11%、39.84%, 累计解释度为 81.95%。

根据 PCA 分析原理和表 5 得知, 烟叶化学成分

第 1 主成分因子可简化表达为:

$$ZF1 \approx 0.517ZTN+0.524ZPT \tag{1}$$

式中: 变量首字母 Z 表示相应变量为标准变量, 其中 TN 为总氮含量, PT 为蛋白质含量, 都对第 1 主成分 $F1$ 产生正效应, 即 TN 、 PT 越大, 第 1 主成分因子 $F1$ 得分越高。

同理, 表 5 中第 2 主成分因子 $F2$ 主要取决于烟碱含量, 其余 2 个烟叶成分含量得分绝对值太小, 故 NT 越大, $F2$ 因子得分越高。第 2 主成分因子可简化表达为:

表 5 烟叶化学成分含量变量场主成分对原始变量时空变化总方差的解释度及其因子得分系数

Table 5 The degree for principal components of the contents variables field made up of three tobacco chemical components to explain the total variance of original variables field and their factor score coefficients

主成分 Principal component	主成分的特征根 Characteristic root of principal component			因子得分系数 Factor score coefficient		
	特征根值 Value of characteristic root	解释度 Degree of explanation /%	累计解释度 Cumulative degree of explanation /%	总氮 Total nitrogen	蛋白质 Protein	烟碱 Nicotine
$F1$	2.264	42.11	42.11	0.517	0.524	-0.021
$F2$	2.127	39.84	81.95	0.209	-0.142	0.898
$F3$	0.986	18.10	99.99	-0.034	0.063	-0.169

$F1$ 、 $F2$ 、 $F3$ 分别表示烟叶化学成分变量场的第 1、第 2、第 3 主成分因子。本表根据 2017—2020 年 10 地点田间试验数据做主成分分析得到。 $F1$, $F2$ and $F3$ respectively represent the first, second and third principal components of content variables field for tobacco chemical components. This table is obtained by principal component analysis based on the data from 10 field trial sites from 2017 to 2020.

$$ZF2 \approx 0.898ZNT \quad (2)$$

式中: ZNT 为烟碱含量的标准变量, ZF2 为第 2 主成分的标准变量。

2.6 两类变量场主成分(主要变量)之间的相关性

分析了烟叶化学成分含量变量场与各生育阶段气候变量场的主成分之间的 Pearson 相关性; 根据前述公式 (1)、公式 (2) 和各主成分反映的气候因子, 使用全部 35 个样本的数据, 对烤烟 3 个化学成分含量各自与 5 个生育阶段的 13 个气候因子作相关性检验普查(表 6)。结果表明, 5 个生育阶段气候变量场与烟叶化学成分含量变量场之间共有 7 对主成分有显著相关性 ($P<0.05$ 或 $P<0.01$); 与总氮和蛋白质含量相关显著性水平为 $P<0.10$ 的气候因子, 在烤烟成熟期分别为平均相对湿度、平均水汽压、降水量、日照时数 ($P<0.05$); 在整个大田生长期为平均相对湿度、水汽压、降水量、降水日数; 在移栽伸根期为最低气温、最低地面温度、平均气温、地面温度日

较差 ($P<0.01$)。与烟碱含量相关显著性水平达到 $P<0.10$ 的气候因子, 在大田生长期和旺长成熟期都是最低地面温度、最低气温、平均气温、最高气温、平均 5 cm 地温和平均 20 cm 地温, 在旺长期为最低地面温度、最低气温、平均气温。其中, 仅有 1 个气候因子与烤烟 1 个化学成分含量的相关显著性水平 $P<0.05$; 其他气候因子与对应因变量的相关显著性水平均低于其所属变量场主成分之间的相关显著性; 比如, 烤烟成熟期各气候因子中, 平均相对湿度与烟草总氮、蛋白质含量的相关性最好, 但其显著性水平仅为 $P<0.10$ 。

表 6 中, R6 涉及 6 个气候要素, 它们共同表达的是: 旺长成熟期温度(含气温和地温)较高(即总热量条件较好), 不利于烟叶烟碱的积累; R2 涉及 4 个气候要素, 它们共同表达的是: 烤烟大田生长期湿度较大、水分充足, 有利于烟叶总氮、蛋白质含量的提高。同理, 可以分析表 6 中 R1 等其他相关性的含义。

表 6 烤烟化学成分含量变量场与各生育阶段气候变量场的主成分之间的相关性

Table 6 The correlations between the principal components of contents variables field for tobacco chemical components and the principal components of climatic variables fields for tobacco growth stages

相关性编号 Number of correlation	因变量场(烟草化学成分含量) Dependent variables field (chemical compositions content of tobacco)		自变量场(各阶段气候变量) Independent variables fields (climatic elements variables of growth stages)			主成分间相关系数 Correlation coefficient between principal components
	主成分 Principal component	主成分反映的主要变量 Main variables contained in principal components	主成分 Principal components	主成分反映的主要变量 Main variables contained in principal components	主成分反映的气候条件 Reflected climatic conditions	
R1	F1	TN, PT	成熟期F3 F3 of mature period	RH, P_v , R, S	水分条件 Water conditions	0.335 [*]
R2	F1	TN, PT	大田生长期F3 F3 of field growth period	RH, P_v , R, R_d	水分条件 Water conditions	0.431 ^{**}
R3	F1	TN, PT	移栽伸根期F3 F3 of transplanting and root growth period	T_n , T_{dn} , T, T_{sr}	最低温度和平均气温 with its daily range	-0.408 ^{**}
R4	F1	TN, PT	移栽伸根期F2 F2 of transplanting and root growth period	T_m , T_{dm} , T_{sr} , T_{d5} , T_{d20}	白天温度和浅层地温 Daytime temperature and shallow ground temperature	0.376 [*]
R5	F2	NT	大田生长期F2 F2 of field growth period	T_{dn} , T_n , T, T_m , T_{d5} , T_{d20}	温度水平或总热量条件 Temperature level or quantity of heat	-0.349 [*]
R6	F2	NT	旺长成熟期F2 F2 of vigorous growth and mature stage	T_{dn} , T_n , T, T_m , T_{d5} , T_{d20}	温度水平或总热量条件 Temperature level or quantity of heat	-0.334 [*]
R7	F2	NT	旺长期F2 F2 of vigorous growth period	T_{dn} , T_n , T	最低温度和平均气温 Lowest and average temperature	-0.531 ^{***}

F1、F2、F3分别表示相应变量场的第一、第二、第三主成分; TN、PT、NT分别为烟叶总氮、蛋白质、烟碱含量; T: 平均气温; T_m : 最高气温; T_n : 最低气温; T_{sr} : 气温日较差; T_{dn} : 最低地面温度; T_{dm} : 最高地面温度; T_{d5} : 平均5 cm地温; T_{d20} : 平均20 cm地温; RH: 平均相对湿度; P_v : 平均水汽压; R: 降水量; R_d : 降水日数; S: 日照时数; R1、R2、R3、R4、R5、R6、R7分别为因变量指标场与多个时段自变量指标场之间7对主成分显著线性相关的编号。*: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.005$ 。F1、F2 and F3 respectively represent the first, second and third principal components of relevant variable indexes fields. TN, PT, NT severally represent the content variables of total nitrogen, protein, nicotine inside tobacco leaves. T: average temperature; T_m : maximum temperature; T_n : minimum temperature; T_{sr} : diurnal surface temperature range; T_{dn} : minimum surface temperature; T_{dm} : maximum surface temperature; T_{d5} : average ground temperature of 5 cm depth; T_{d20} : average ground temperature of 20 cm depth; RH: average relative humidity; P_v : average vapour pressure; R: rainfalls; R_d : rainy days; S: sunshine duration. R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7 are respectively the numbers of the seven pairs of principal components which showed significant linear correlations between the dependent variable indexes field and the independent variable indexes fields of several growth stages for flue-cured tobacco.

2.7 相关性分析结果的验证

表6中有5对主成分的相关性具有重要生物学意义, 得到相关文献的佐证。

1) R1、R2的相关性表明, 烤烟大田生长期相对湿度较大、降水较多(7—8月烟叶成熟期为全年雨量峰值期), 有利于烟叶总氮和蛋白质含量的积累, 与黄中艳等^[8]的分析结果一致; 王海涛^[16]认为, 河南烟叶总氮含量与成熟期8月降雨量和平均相对湿度呈正相关。R1、R2的相关性含义, 得到彭清^[27]使用相同5年(2013—2017年)3省相关数据分析结果的支持: 云南烟叶总氮和蛋白质含量均显著大于河南、贵州烟叶^[27](云南和贵州两省的样本数均大于500, 河南为144); 此3省植烟区中, 云南烤烟旺长成熟期平均气温显著偏低、日照时数明显偏少、降水量较多, 故平均相对湿度较大^[3,7], 而这是属于低纬高原地区^[20]的云南烟区夏季6—8月的主要气候特征^[2-3,7]。

2) R5、R6、R7的相关性。根据烟草行业认定理想优质烟叶的评判指标^[1-2,28-29], 云南传统烟区出产的多数烟叶烟碱含量为偏高或略偏高^[27,30], 并高于国内东部中部多数地区^[27,29-31]; 与此相对应的是, 云南烤烟大田生长期特别是旺长成熟期, 平均气温低于我国东部中部低海拔烤烟主产区同期气温^[2-3,7]。易建华等^[32]研究证实, 与湖南烟叶烟碱含量关联度最高的气候因素是旺长期和成熟期的平均气温, 其烟碱含量较高者与旺长成熟期气温较低相对应; 陈伟等^[33]布点于海拔高、中、低3地的田间试验研究表明, 贵州烤烟烟碱含量与成熟期平均气温和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温呈显著负相关。因此, R5、R6、R7相关性的物理意义为: 大田生长期平均温度(含气温和地温)较低, 有利于烟叶烟碱的形成和积累, 其中6—8月尤其6月旺长期^[19]影响更大。

3) 气候对烟叶烟碱、总氮和蛋白质含量的影响机理。一是旺长成熟期相对湿度大、气温偏低, 会造成烟株蒸腾作用和烟田蒸散的强度下降^[2,21]、光合强度减弱、烤烟生长发育速度减缓和生育期延长^[21]; 云南传统烟区烤烟大田生长期比国内东部中部多数烟区长15~20 d, 并且主要是旺长成熟期显著延长^[3], 从而有利于烤烟某些化学成分的积累^[2-3,7,21]。二是夏季气温显著偏低, 可避免出现白天因长时段温度过高($>28\text{ }^{\circ}\text{C}$)而引发的光合作用“午休”现象^[2,21]; 同时, 因云南高原地区气温日较差大于低海拔区^[26], 加之高原夏季温度较低, 致使烤烟呼吸作用强度降低, 而日间温湿度适合光合作用时段较长, 从而提高温度的有效性^[2,3,21], 利于烟叶某些化学成分的积累和形成^[2]。

三是云南低纬度高原夏季气温偏低, 烟株生理代谢强度较弱^[21], 可能导致烟叶中的部分化学成分转移或分解受到抑制; 而夏季日照时数偏少^[3,7](图2c), 会降低烟株叶面温度并增大空气相对湿度^[2,7,21], 有助于烟叶烟碱、总氮和蛋白质的积累。

3 讨论

1) 云南烟区多数烤烟气候类型有共同气候特征。虽然统计学分析出云南烤烟种植气候有多样性^[31,34], 但大多数气候类型(累计样本数占比 $>71\%$)大田生长季内气候的阶段变化趋势一致, 移栽伸根期(4—5月)气候相对干燥晴暖(平均相对湿度 $<66\%$ 、平均气温 $>19.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、日照时数 $>7.0\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$), 旺长成熟期(夏季6—8月)温和湿润寡照特征鲜明(平均气温 $<22.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且气候类型间标准差 $<0.44\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、平均相对湿度 $>78\%$ 、日照时数 $<5.0\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$)。意味着云南大多数烟区多数年份烤烟种植气候趋于类同, 而造成气候类型间烟叶部分化学成分含量差异较小; 其中, 气候地域差异最小的夏季正值旺长成熟期, 是烟叶内含物形成和积累的主要阶段^[2-3], 平均气温相对较低的气候类型烤烟生育期会延长^[3,21](致使光合作用和物质积累时段得到加长)。

2) 云南烟叶化学品质特点的气候成因。烟叶主要常规化学成分包括总糖、还原糖、总氮、烟碱、蛋白质、钾和石油醚提取物^[3-4]。根据相关文献, 大田生长中后期平均温度较低, 有利于提高烟叶总糖、还原糖含量^[8,16], 故在海拔较高的烟区较低气温造成烟叶含糖量明显较高^[35-36]。直接影响卷烟可燃性的烟叶钾含量与大田生长期降水量、中后期平均气温均呈显著正相关, 因此云南多数烟区烟叶钾含量不高^[37-39]。反映烟叶香型风格的重要指标——烟叶石油醚提取物含量, 与大田生长中后期平均温度呈极显著正相关^[7,16,37], 与烟叶成熟期日照时数呈显著正相关^[7,13,37]; 具有较低石油醚提取物含量的清香型典型植烟区, 主要分布于云南、福建和重庆3省(直辖市), 均为大田生长中后期有较少的日照时数、较多的雨量和相对较低的日均温。结合相关文献的研究结果表明, 云南出产的多数烟叶总糖和还原糖含量显著偏高, 烟碱、总氮和蛋白质含量相对较高, 钾含量相对较低, 石油醚提取物含量显著偏低, 这与云南低纬度高原烤烟大田生长前期(4—5月)、中后期(6—8月)两个阶段光温水三要素匹配的差异密切相关, 其中大田中后期“温和湿润寡照”的气候特征是最重要成因。

3) 分析成果的应用价值和普适性。鉴于云南立体气候鲜明且区域气候差异显著^[2-3,20], 分析成果有助于因地制宜发展特色烟叶生产和合理利用烟草气候资源。在国内南方低海拔地区种植烤烟, 夏季较高气温易造成烤烟总糖和烟碱含量严重偏低, 故难出产优质烟叶。另一方面, 气候条件是烤烟种植年际变化最大的环境因素^[8,15,25,40], 这意味着本结果可应用于烤烟气象服务, 在烟叶成熟后期, 可根据前期气候条件评估/预测当年不同烟区烟叶化学成分含量及其变化, 为卷烟企业及时调配不同产地的烟叶原料提供重要依据。

4) 根据表 6 中 R3、R4 的相关性, 移栽伸根期最低温度较低、白天温度和浅层地温较高(造成地面温度日较差较大^[26]), 有利于提高烟叶总氮和蛋白质含量。但鉴于移栽伸根期烟株叶片数少、叶面积小, 并非烟叶品质形成期, 此相关性关于气候对烟叶总氮和蛋白质含量的影响尚需深入研究验证。

4 结论

1) 云南烤烟大田生长季气候有多样性, 但大部分地区 4—5 月、6—8 月两阶段气候差异大, 表现为移栽伸根期(4—5 月)平均相对湿度偏低(<66%)、日照时数较大(>7.0 h·d⁻¹)、平均气温>19.5℃, 旺长成熟期(6—8 月)平均气温偏低(<22.0℃)、日照时数偏小(<5.0 h·d⁻¹)、雨量较多(>5.5 mm·d⁻¹)、平均相对湿度较高(>78%)。

2) 烤烟大田生长期, 尤其烟叶成熟期, 平均相对湿度较高、雨量较多, 有利于提高烟叶总氮和蛋白质含量; 大田生长期, 尤其旺长成熟期, 平均气温和浅层地温较低, 有提高烟叶烟碱含量的功效。云南烤烟旺长成熟期 6—8 月气温显著偏低、日照时数偏小、平均相对湿度较高、雨量较多的气候条件, 造成其出产的大多数烟叶总氮、蛋白质和烟碱含量相对较高。

3) 云南低纬度高原大部分地区烤烟大田生长季前期(4—5 月)相对干燥晴暖, 中后期(旺长成熟期 6—8 月)平均温度偏低、温和湿润寡照的气候特征, 对烟叶主要常规化学成分(总糖、还原糖、烟碱、总氮、蛋白质、钾和石油醚提取物)的积累和含量影响显著, 是云南烤烟化学品质风格特点的主要成因。

参考文献 References

- [1] 刘国顺. 烟草栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017: 28–35
LIU G S. Tobacco Cultivation[M]. Beijing: Agriculture Press of China, 2017: 28–35

- [2] 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): 440–445
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): 440–445
- [3] 贺升华, 任伟. 烤烟气象[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2001: 36, 48, 72, 98
HE S H, REN W. Meteorology of Flue-Cured Tobacco[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2001: 36, 48, 72, 98
- [4] 冯玉麟, 徐治波. 烟草工业与人类健康[M]. 成都: 四川大学出版社, 2013: 27, 35, 66
FENG Y L, XU Z B. Tobacco Industry and Human Health[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2013: 27, 35, 66
- [5] 沈晗, 杨凯, 任伟, 等. 影响上部烟叶感官质量的主要化学成分分析[J]. 中国烟草学报, 2019, 25(6): 18–26
SHEN H, YANG K, REN W, et al. Analysis of the main chemical components affecting sensory quality of upper flue-cured tobacco leaves[J]. Chinese Journal of Tobacco, 2019, 25(6): 18–26
- [6] 鞠英芹, 陈正洪, 马德栗, 等. 我国中北亚热带优质烤烟烟区气候相似性分析[J]. 应用气象学报, 2022, 33(6): 736–747
JU Y Q, CHEN Z H, MA D L, et al. Climate similarity analysis of the planting areas of high quality flue-cured tobacco in central and north subtropical zones of China[J]. Journal of Applied Meteorology Science, 2022, 33(6): 736–747
- [7] 黄中艳, 朱勇, 王树会, 等. 云南烤烟内在品质与气候的关系[J]. 资源科学, 2007, 29(2): 83–90
HUANG Z Y, ZHU Y, WANG S H, et al. Relations between the intrinsic quality of flue-cured tobacco and climates in Yunnan[J]. Resources Science, 2007, 29(2): 83–90
- [8] 黄中艳, 王树会, 朱勇, 等. 云南烤烟 5 项化学成分含量与其环境生态要素的关系[J]. 中国农业气象, 2007, 28(3): 312–317
HUANG Z Y, WANG S H, ZHU Y, et al. Relationships between the content of several chemical components of tobacco leaves and ecological factors in Yunnan Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2007, 28(3): 312–317
- [9] 杨超. 重庆烟区主要生态因子特征及其对烤烟产质量的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2015: 18–20
YANG C. Characteristic of main ecological factors and its impacts on quantity and quality of flue-cured tobacco in Chongqing[D]. Chongqing: Southwest University, 2015: 18–20
- [10] 刘涛, 李祎君, 赵晓凤, 等. 2023 年春季气象条件对农业生产的影响[J]. 中国农业气象, 2023, 44(8): 750–752
LIU T, LI Y J, ZHAO X F, et al. Impacts report of spring weather condition on agricultural production in 2023[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2023, 44(8): 750–752
- [11] 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
PENG X H, YI J H, ZHOU Q M. Advance in effects of climatic conditions on internal quality of flue-cured tobacco[J]. Chinese Tobacco Science, 2009, 30(1): 68–72
- [12] 李强. 曲靖烤烟品质特征及主要生态因素对其影响的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2011: 36–39

- LI Q. Study on characteristic of tobacco quality and effect of main ecological factors on tobacco quality in Qujing[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2011: 36–39
- [13] 卢志伟. 主要生态因子对烟叶化学成分以及感官质量的影响研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2011: 27–30
- LU Z W. Studies on the effects of the main ecological factor on chemical composition and smoking quality of flue-cured tobacco leaf[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2011: 27–30
- [14] 古战朝. 烤烟主产区生态因子与烟叶品质的关系[D]. 郑州: 河南农业大学, 2012: 43–45
- GU Z C. Relationship between ecological factors and tobacco leaf's quality in main tobacco-growing regions[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2012: 43–45
- [15] 常乃杰. 生态因素对云南烤烟品质影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016: 41–43
- CHANG N J. Effects of ecological factors on the quality of flue-cured tobacco leaves in Yunnan[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016: 41–43
- [16] 王海涛. 河南烟区气候因素特征及对烟叶化学成分的影响与调控[D]. 郑州: 河南农业大学, 2013: 31–33
- WANG H T. The climatic characteristics and its influence on the tobacco chemical components as well as regulation methods in Henan tobacco-growing areas[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2013: 31–33
- [17] 周翔. 山东烟区生态因子与烟叶品质的关系[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008: 47–49
- ZHOU X. The relationship between ecological factors and quality of flue-cured tobacco leaves in Shandong tobacco growing regions[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008: 47–49
- [18] 彭新辉. 土壤和气候及其互作对湖南优质烟区烤烟品质的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2009: 44–47
- PENG X H. Effects of soil and climate and its interaction on quality of flue-cured tobacco in Hunan high-quality tobacco regions[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2009: 44–47
- [19] 王宇. 云南省农业气候资源及区划[M]. 北京: 气象出版社, 1990
- WANG Y. Agroclimatic Resources and Their Regionalization in Yunnan Province[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990
- [20] 王宇. 云南山地气候[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2006
- WANG Y. Yunnan Mountainous Climate[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2006
- [21] 韩湘玲. 作物生态学[M]. 北京: 气象出版社, 1991
- HAN X L. Ecology of Crops[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991
- [22] 国家烟草质量监督检验中心. YC/T161—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022
- National Tobacco Quality Supervision and Inspection Center. YC/T161—2002[S]. Beijing: China Standard Press, 2022
- [23] 张文彤. SPSS11 统计分析教程[M]. 北京: 北京希望电子出版社, 2002
- ZHANG W T. SPSS11 Statistical Analysis Course[M]. Beijing: Beijing Hope Electronic Publishing House, 2002
- [24] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 2000
- HUANG J Y. Statistic Analysis and Forecast Methods in Meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2000
- [25] 黄中艳, 张明达. 云南烤烟种植气候变化及其影响研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2013, 38(7): 107–112
- HUANG Z Y, ZHANG M D. Study on climate change and its influence on flue-cured tobacco planting in Yunnan[J]. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition, 2013, 38(7): 107–112
- [26] 周淑贞, 张如一, 张超. 气象学与气候学[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 1997
- ZHOU S Z, ZHANG R Y, ZHANG C. Meteorology and Climatology[M]. 3rd. Beijing: Higher Education Press, 1997
- [27] 彭清. 我国烤烟烟叶化学成分特征分析及香型空间分布格局研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013: 32–36
- PENG Q. Analysis of the chemical compositions of tobacco leaves and spatial distribution pattern of flue-cured tobacco aroma types in China[D]. Chongqing: Southwest University, 2013: 32–36
- [28] 彭新辉, 蒲文宣, 易建华, 等. 湖南不同烟区烤烟烟碱含量差异的生态原因[J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2599–2604
- PENG X H, PU W X, YI J H, et al. Ecological reasons for the difference in nicotine content of flue-cured tobacco planted in different regions of Hunan Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(10): 2599–2604
- [29] 胡国松, 赵元宽, 曹志洪, 等. 我国主要产烟省烤烟元素组成和化学品质评价[J]. 中国烟草学报, 1997, 3(1): 36–44
- HU G S, ZHAO Y K, CAO Z H, et al. The evaluation of the chemical elements and some organic components in flue-cured leaf tobacco from the main tobacco production provinces of China[J]. Chinese Journal of Tobacco, 1997, 3(1): 36–44
- [30] 陈伟, 王三根, 王玉明, 等. 不同生态区烤烟烟碱含量的变异分析[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(2): 285–290
- CHEN W, WANG S G, WANG Y M, et al. Variation analysis of nicotine content in flue-cured tobacco in different ecotopes[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(2): 285–290
- [31] 黄中艳, 范立张, 朱勇, 等. 基于 GIS 和烟叶品质的云南烤烟种植气候分区[J]. 中国农业气象, 2009, 30(3): 370–374
- HUANG Z Y, FAN L Z, ZHU Y, et al. Climatic division for flue-cured tobacco planting in Yunnan based on GIS and quality of tobacco-leaf[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(3): 370–374
- [32] 易建华, 彭新辉, 邓小华, 等. 气候和土壤及其互作对湖南烤烟还原糖、烟碱和总氮含量的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(16): 4467–4475
- YI J H, PENG X H, DENG X H, et al. The impact of climate, soil and their interactions on reducing-sugar, nicotine and total nitrogen contents of flue-cured tobacco in Hunan high-quality tobacco region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(16): 4467–4475
- [33] 陈伟, 陈懿, 黄磊, 等. 土壤与气候对烤后烟叶烟碱和钾含量的影响[J]. 土壤, 2013, 45(4): 713–717

- CHEN W, CHEN Y, HUANG L, et al. Effects of soil and climate on nicotine and potassium content of cured tobacco leaves[J]. *Soils*, 2013, 45(4): 713–717
- [34] 胡雪琼, 黄中艳, 朱勇, 等. 云南烤烟气候类型及其适宜性研究[J]. *南京气象学院学报*, 2006, 29(4): 563–568
- HU X Q, HUANG Z Y, ZHU Y, et al. Climatic divisions and suitability for tobacco cultivation in Yunnan[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2006, 29(4): 563–568
- [35] WANG N, ZHAO Z X, BAI Y X, et al. Research on the correlation between meteorological factors and flue-cured tobacco chemical components in different altitudes of Lincang region[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2015, 16(3): 593–599
- [36] 简永兴, 杨磊, 谢龙杰, 等. 种植海拔对烤烟石油醚提取物及常规化学成分的影响[J]. *烟草科技*, 2005, 38(7): 3–6
- JIAN Y X, YANG L, XIE L J, et al. Effects of altitude on petroleum ether extract and routine chemical compositions in flue-cured tobacco[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2005, 38(7): 3–6
- [37] 黄中艳, 王树会, 朱勇, 等. 气象条件对云南烤烟 4 项化学成分含量的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2009, 35(1): 48–52
- HUANG Z Y, WANG S H, ZHU Y, et al. Influence of leading meteorological factors on 4 chemical components for flue-cured tobacco in Yunnan Province[J]. *Journal of Hunan Agricultural University: Natural Science Edition*, 2009, 35(1): 48–52
- [38] 吴兴富, 邓建华, 宋春满, 等. 云南烟区四个品种烤烟钾含量的研究[J]. *甘肃农业大学学报*, 2010, 45(2): 105–109
- WU X F, DENG J H, SONG C M, et al. Study on potassium content in four cultivars of flue-cured tobacco in Yunnan tobacco area[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2010, 45(2): 105–109
- [39] 吴玉萍, 陈萍, 师君丽, 等. 云南省不同品种和产区烤烟中钾含量的差异分析[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2010, 32(S1): 42–46
- WU Y P, CHEN P, SHI J L, et al. Study on the potassium of flue-cured tobacco among different variety and locations of Yunnan[J]. *Journal of Yunnan University: Natural Science Edition*, 2010, 32(S1): 42–46
- [40] 黄中艳. 基于 GIS 的云南烤烟种植气候动态分区评估[J]. *地理研究*, 2011, 30(8): 1439–1448
- HUANG Z Y. Dynamic area-partition evaluation of flue-cured tobacco planting climates in Yunnan based on GIS[J]. *Geographical Research*, 2011, 30(8): 1439–1448