



贾丽欣, 双睿辰, 邵金良, 孟凡乔, 吴迪. 基于稳定同位素特征与土壤性质的有机茶身份辨识研究[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(6): 77-85.
JIA Lixin, SHUANG Ruichen, SHAO Jinliang, MENG Fanqiao, WU Di. Identification of organic tea based on stable isotope characteristics and soil properties [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(6): 77-85.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.06.09

基于稳定同位素特征与土壤性质的有机茶身份辨识研究

贾丽欣¹ 双睿辰¹ 邵金良² 孟凡乔¹ 吴迪^{1*}

(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193;

2. 云南省农业科学院 质量标准与检测技术研究所, 昆明 650205)

摘要 为探究云南普洱地区有机茶身份辨识特征, 完善高原有机茶身份辨识技术, 选取云南省普洱市的5个代表性有机种植认证茶园(ZX、LS、CYT、YS、HL)和相邻的5个常规茶园(C-1、C-2、C-3、C-4、C-5), 采集300余份茶叶和土壤样本, 结合稳定同位素比例质谱仪、元素分析仪等测定茶叶和土壤的 $\delta^{15}\text{N}$ 丰度、 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度、全氮、全碳、有机碳、碱解氮等指标, 通过因子分析和判别分析的方法构建了有机茶叶同位素-土壤性质判别模型, 并使用 Holdout 法进行验证。结果表明: 不同茶园有机茶叶与相邻常规茶叶相比未表现出一致的 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异规律, 因此, 使用单一稳定同位素因子难以鉴别有机茶。通过进一步对茶叶和土壤性质进行因子分析, 筛选出6个适合判别的特征向量, 构建了基于同位素特征和土壤性质的多元有机判别模型, 其判别函数方程为: $y = -0.081(\text{茶叶 } \delta^{15}\text{N}) + 0.819(\text{茶叶 } \delta^{13}\text{C}) + 0.093(\text{土壤全氮}) + 2.117(\text{土壤全碳}) - 0.155(\text{土壤有机碳}) + 2.870(\text{土壤 pH}) + 4.232$, $y < 0.5$ 为常规茶, 判别准确度为 92.3%。综上, 基于同位素特征值和土壤性质参数指标构建的多元有机判别模型可实现云南省普洱市高原有机茶身份的准确判别。

关键词 有机茶; $\delta^{15}\text{N}$; $\delta^{13}\text{C}$; 土壤性质; 判别模型

中图分类号 S-3

文章编号 1007-4333(2024)06-0077-09

文献标志码 A

Identification of organic tea based on stable isotope characteristics and soil properties

JIA Lixin¹, SHUANG Ruichen¹, SHAO Jinliang², MENG Fanqiao¹, WU Di^{1*}

(1. College of Resources and Environment Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Quality Standards and Testing Technology Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China)

Abstract In order to explore the identity identification characteristics of organic tea in Pu'er area of Yunnan Province and improve the identity identification technology of organic tea on the plateau, 5 representative organic planting certified tea gardens (ZX, LS, CYT, YS, HL) and adjacent conventional tea gardens (C-1, C-2, C-3, C-4, C-5) in Pu'er City of Yunnan Province were selected, and more than 300 tea and soil samples were collected. $\delta^{15}\text{N}$ abundance, $\delta^{13}\text{C}$ abundance, total nitrogen, total carbon, organic carbon, alkali hydrolyzable nitrogen and other indexes of tea and soil were determined by stable isotope mass spectrometer and element analyzer. The isotope-soil property discrimination model of organic tea was constructed by factor analysis and discriminant analysis, and verified by Holdout method. The results show that there is no consistent difference in $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values between organic tea and adjacent conventional

收稿日期: 2023-12-26

基金项目: 云南省重大科技专项计划项目(202202AE090029)

第一作者: 贾丽欣(ORCID: 0009-0005-3899-1350), 博士研究生, E-mail: jlx-cau@outlook.com

通讯作者: 吴迪(ORCID: 0000-0002-8005-2569), 副教授, 主要从事土壤生态学研究, E-mail: d.wu@cau.edu.cn

tea in different tea gardens, so it is difficult to identify organic tea by using a single stable isotope factor. Through further factor analysis of tea and soil properties, six feature vectors suitable for discrimination were selected, and a multivariate organic discrimination model based on isotope characteristics and soil properties was constructed, and the function is as follows: $y = -0.081 \text{ tea } \delta^{15}\text{N} + 0.819 \text{ tea } \delta^{13}\text{C} + 0.093 \text{ soil total nitrogen} + 2.117 \text{ soil total carbon} - 0.155 \text{ soil organic carbon} + 2.870 \text{ soil pH} + 4.232$, $y < 0.5$ is convention tea. The model achieves an impressive accuracy rate of 92.3%. In summary, the multivariate organic discrimination model constructed based on isotopic characteristic values and soil property parameter indicators can accurately discriminate the identity of organic tea from the Pu'er plateau in Yunnan.

Keywords organic tea; $\delta^{15}\text{N}$; $\delta^{13}\text{C}$; soil properties; discriminant model

茶叶一直是中国传统的饮品之一,也是中国的重要农产品之一。近年来,随着消费者对健康和环境问题的关注日益增加,有机茶的生产和销售已经成为全球茶叶市场的一个重要组成部分^[1]。考虑到健康和环保理念,有机茶叶越来越受到消费者的青睐^[2]。但有机茶叶的高产品溢价诱发的欺诈行为使人们开始忧虑有机产品的真实性。随着稳定同位素技术的发展和成熟,稳定同位素已被广泛应用于区分有机和常规产品。 ^{15}N 是氮的一种稳定性同位素,它可以作为示踪原子追踪氮素或含氮化合物的代谢和变化规律^[3]。 ^{15}N 的应用始于描述动植物样本 ^{15}N 自然丰度的差异^[4]。20世纪80年代后, $\delta^{15}\text{N}$ 被广泛应用于植物-土壤系统以指示养分来源^[5]。植物体内 ^{15}N 同位素的含量,可作为植物对不同氮源吸收利用的指示标志,通过分析植物 $\delta^{15}\text{N}$,有助于判断植物主要汲取的肥料种类。已有研究表明,来自哈伯工艺制造的合成氮肥料的 $\delta^{15}\text{N}$ 约为 $-2\text{‰} \sim 2\text{‰}$,而来自动物粪便分解的 $\delta^{15}\text{N}$ 通常 $>8\text{‰}$ ^[6],这些同位素 $\delta^{15}\text{N}$ 的显著差异在有机农作物与常规农作物区分上发挥了重要作用。 ^{13}C 也被广泛应用于追溯成分的来源,其原理是植物C3和C4循环产物的 $\delta^{13}\text{C}$ 不同。张遯等^[7]研究表明,使用 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以有效区分糖分的来源是甜菜($\delta^{13}\text{C}$ 约为 -25.5‰)还是蔗糖($\delta^{13}\text{C}$ 约为 -11.5‰)。目前研究利用 $\delta^{13}\text{C}$ 值区分有机产品和常规产品的报道较少。但是,已有研究发现,相比于施用化肥的常规作物,有机作物往往具有更负的 $\delta^{13}\text{C}$ ^[8-9]。然而,要实现有机农产品的精准鉴定,还需综合考虑多种因素。

在农产品溯源方面的研究中,单一指标往往难以实现产品身份的有效区分,基于多组分的判别分析被广泛应用于确定作物的产地或证明其有机属性^[10]。迄今为止,已有很多研究采用稳定同位素与

其他元素相结合的判别分析模型,成功实现了茶叶产地溯源。Peng等^[11]运用稳定同位素特征对祁门红茶展开深入研究,发现借助k-NN预测模型,能够更精准地界定其地理源头。Pilgrim等^[12]将其他地区的茶叶样本插入到同位素比值-矿质浓度判别分析模型中作为未分类样本进行测试,结果显示,这些样本与数据库中的亚洲茶样本分离率达97.6%。

多元判别分析模型在茶叶产地溯源方面取得了显著进展,但在茶叶有机鉴定方面的研究尚不充分。然而,已有研究表明土壤性质可能成为其中一个重要的鉴别因素^[13]。云南省在茶叶种植方面有着深厚的文化和经济根基,截至2021年云南省茶叶种植面积超过50万 hm^2 ,年产量达50.21万t,其中有机茶叶生产面积为4.61万 hm^2 ,占全国有机茶叶生产总面积的36.9%^[14]。云南省独特的自然条件、生物资源和农产品生产管理措施,使得云南省有机产品的品质指标、元素含量、同位素特性等具有一定的独特性。但是,国内尚缺乏基于有机氮肥鉴定有机农产品身份真实性的研究报道。本研究在云南省普洱市的5个有机种植认证茶园和相邻的5个常规茶园中采集了300份茶叶和土壤样本,通过比较有机茶园和常规茶园的同位素及其土壤性质间的差异,构建判别模型,旨在探索准确判别有机茶叶的方法,以期为实现云南有机茶产品的准确判别提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集及制备

本研究采样开展于2022年7月中旬,茶叶和土壤样本采自中国云南省普洱市思茅区的5个长期有机茶园(ZX、LS、CYT、YS、HL)和5个位于各有机茶园1 km内相邻的常规茶园(C-1、C-2、C-3、C-4、C-5)。所有茶园的茶树品种均为本地区栽培的主

要山茶变种品种‘云康 10 号’。试验将每个茶园分为 5 个独立的地块,每个地块由 10~15 行茶树组成,除 HL、C-5 外每个地块随机取 3 个样本,即 ZX、LS、CYT、YS、C-1、C-2、C-3、C-4 茶园的样本量均为 15。HL、C-5 茶园由于在采样时已将每个地块随机取的 3 个样本混合,混合样视其为 1 个样本,则 HL、C-5 茶园的样本量都为 5。茶叶样本采自芽和第一、第二叶,每块地采集到的茶叶鲜重约为 2 kg,自然风干后用粉碎机磨成细粉,过 60 目筛。土壤样本采集

自所采茶叶样本的土壤表层,利用土壤螺旋钻在 0—20 cm 土层采集,风干后在陶瓷粉碎机中粉碎,过 100 目筛。有机茶园在 11—12 月施基肥,同时在来年的雨季来临前进行 1~2 次追肥,常规基地在 11—12 月施有机肥或化肥为基肥,部分在雨季来临前施基肥,同时根据生产需求适当追肥。另外,施肥方式均为开沟施肥即在靠近茶树根部位位置开 30~40 cm 深的沟施肥。茶园施肥、管理措施和产量(2022 年平均)的详细情况见表 1。

表 1 有机茶园和常规茶园的种植年份、肥料氮投入、秸秆施用以及有机肥情况

Table 1 The summary date of planting year, fertilizer nitrogen input, straw application and the specific information on organic fertilizers in organic and conventional tea gardens

茶园 Tea plantation	年份 Year	氮输入量/ (kg/hm ²) Nitrogen input	秸秆施用量/ (t/hm ²) Application of straw	茶产量/ (t/hm ²) Tea yield	有机肥全氮/% Total N of organic Fertilizer	有机肥 δ ¹⁵ N/‰ δ ¹⁵ N of organic Fertilizer
ZX	1998	300	15.00	1.48	1.97	7.28
C-1	2002	495	11.50	3.50		
LS	1998	113	8.25	1.06	2.15	6.95
C-2	1998	810	15.00	4.50		
CYT	2022	143	5.25	0.80	1.58	5.60
C-3	1980	134	6.74	3.00		
YS	1999	63	12.00	1.69	2.23	8.52
C-4	2002	336	15.00	1.80		
HL	2008	309	12.00	2.53		
C-5	1957	437	7.00	1.69		

注:ZX、LS、CYT、YS、HL 分别为 5 个有机茶园,C-1、C-2、C-3、C-4、C-5 分别为 5 个有机茶园相邻的常规茶园,下同。

Note: ZX, LS, CYT, YS and HL are 5 organic tea gardens, respectively, while C-1, C-2, C-3, C-4, C-5 are adjacent conventional tea gardens, respectively. The same below.

1.2 茶叶、土壤理化性质测定

茶叶、土壤和肥料样品的全氮和全碳含量用元素分析仪(Model CN, Elementar Vario isotope cube Isoprime Ltd., 英国)测定^[15]。土壤有机碳(SOC)去除碳酸盐后,采用碳氮分析仪(Vario Max CN, Elementar, 德国)进行测定^[16]。土壤碱解氮使用扩散皿滴定法^[17]测定。土壤 pH 使用 pH 计(ORION 3 STAR, 美国)测定。

1.3 同位素测定

茶叶和土壤样品的同位素¹⁵N、¹³C 值采用 IRMS 测定(Model CN, EA-IRMS, Elementar Vario isotope cube with VisION, Isoprime Ltd., 英国)。将 5 mg 茶叶、22 mg 土壤和 10 mg 有机肥晾干制成粉末,一式三份,储存在锡胶囊中待测。每个

样品的氮、碳同位素组成计算公式如下:

$$X_{\text{sample}} = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000\%$$

式中: X 为 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$; R 为 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 、 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 对应的同位素比值。参考气体为 N_2 (-1.3 ± 0.2)‰、 CO_2 (-27.92 ± 0.15)‰。参照标准样品 $\delta^{15}\text{N} = (5.83 \pm 0.08)$ ‰, $\delta^{13}\text{C} = (-26.98 \pm 0.13)$ ‰, 进行质量控制。

1.4 统计分析

数据分析、箱型图和因子分析图的绘制采用 R 4.3.1 软件完成。因子分析(factor analysis, FA)作为一种统计模型,是主成分分析(principal component analysis, PCA)的拓展,它与主成分分析最大的不同在于降维得到的各因子具有可解释性^[18]。FA 可将样本数据内部不能直接观察而又实际存在的共同影响

因素提取出来,并命名为公共因子,分析得到的公共因子和连接因子的因子载荷矩阵,通过公共因子、载荷矩阵的线性组合对样本进行重新表征^[19]。

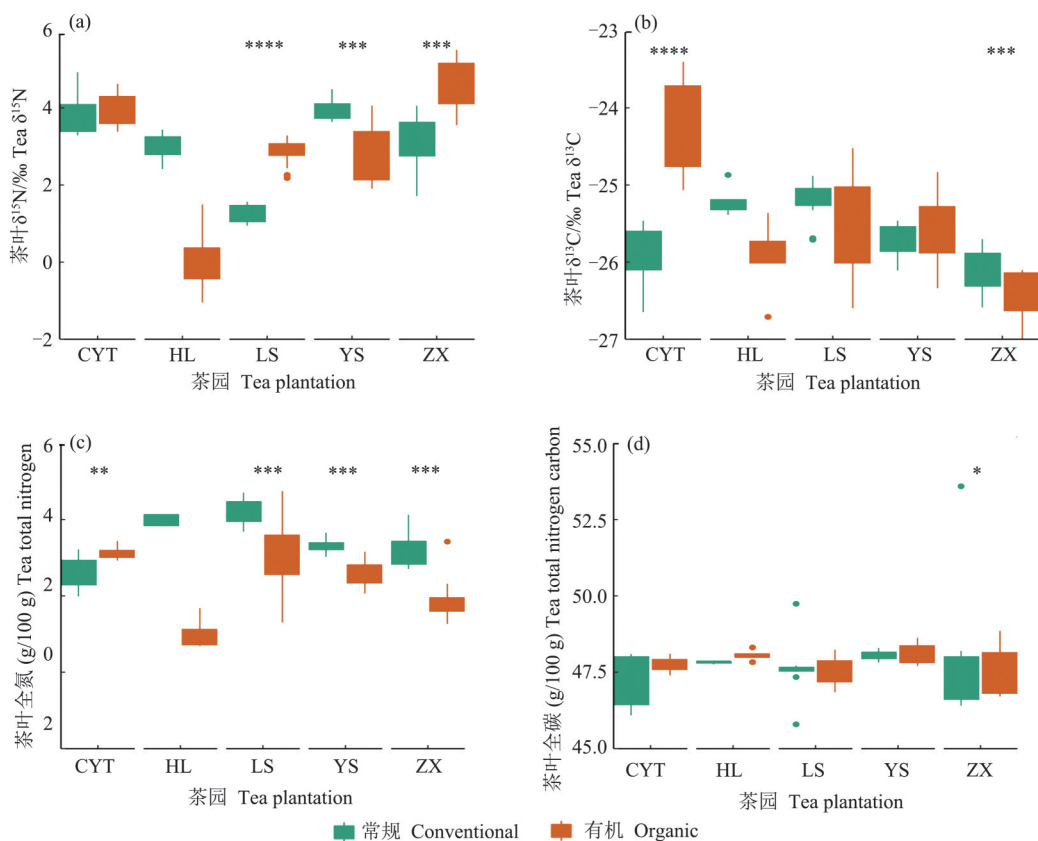
混合矩阵图采用 Python 3.9.12 软件完成。采用 SPSS 22.0 软件对茶叶和土壤样品进行 Fisher 判别分析,并建立判别模型;使用 Holdout 法进行验证,确定模型预测能力。

2 结果与分析

2.1 不同茶园有机茶叶及常规茶叶的差异

由图 1 可知,ZX、LS 茶园有机茶叶 $\delta^{15}\text{N}$ 均

显著高于常规茶园 ($P < 0.001$),YS 茶园的有机茶叶的 $\delta^{15}\text{N}$ 显著低于常规茶园 ($P < 0.001$),有机茶园的茶叶并不总是表现出比常规茶叶更高的 $\delta^{15}\text{N}$ 。在 CYT 茶园中,有机茶叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著高于常规茶叶 ($P < 0.0001$),ZX 茶园有机茶叶的 $\delta^{13}\text{C}$ 显著低于常规茶叶 ($P < 0.001$)。有机茶叶中的总氮含量显著高于常规茶叶 ($P < 0.01$);相反,有机茶叶的平均总氮含量显著低于常规茶叶 ($P < 0.01$);有机茶叶的平均总碳含量略低于常规茶叶,但差异不显著。



HL 样本量 $n=5$, 其余茶园样本量 $n=15$ 。* ($P < 0.1$)、** ($P < 0.05$)、*** ($P < 0.01$) 和 **** ($P < 0.001$)。下同。

HL $n=5$, other tea plantations $n=15$. * $P < 0.1$, ** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$ and **** $P < 0.001$. The same below.

图 1 不同茶园的有机和常规茶叶 $\delta^{15}\text{N}$ (a)、 $\delta^{13}\text{C}$ (b)、全氮 (c)、全碳 (d) 的 t-检验比较分析

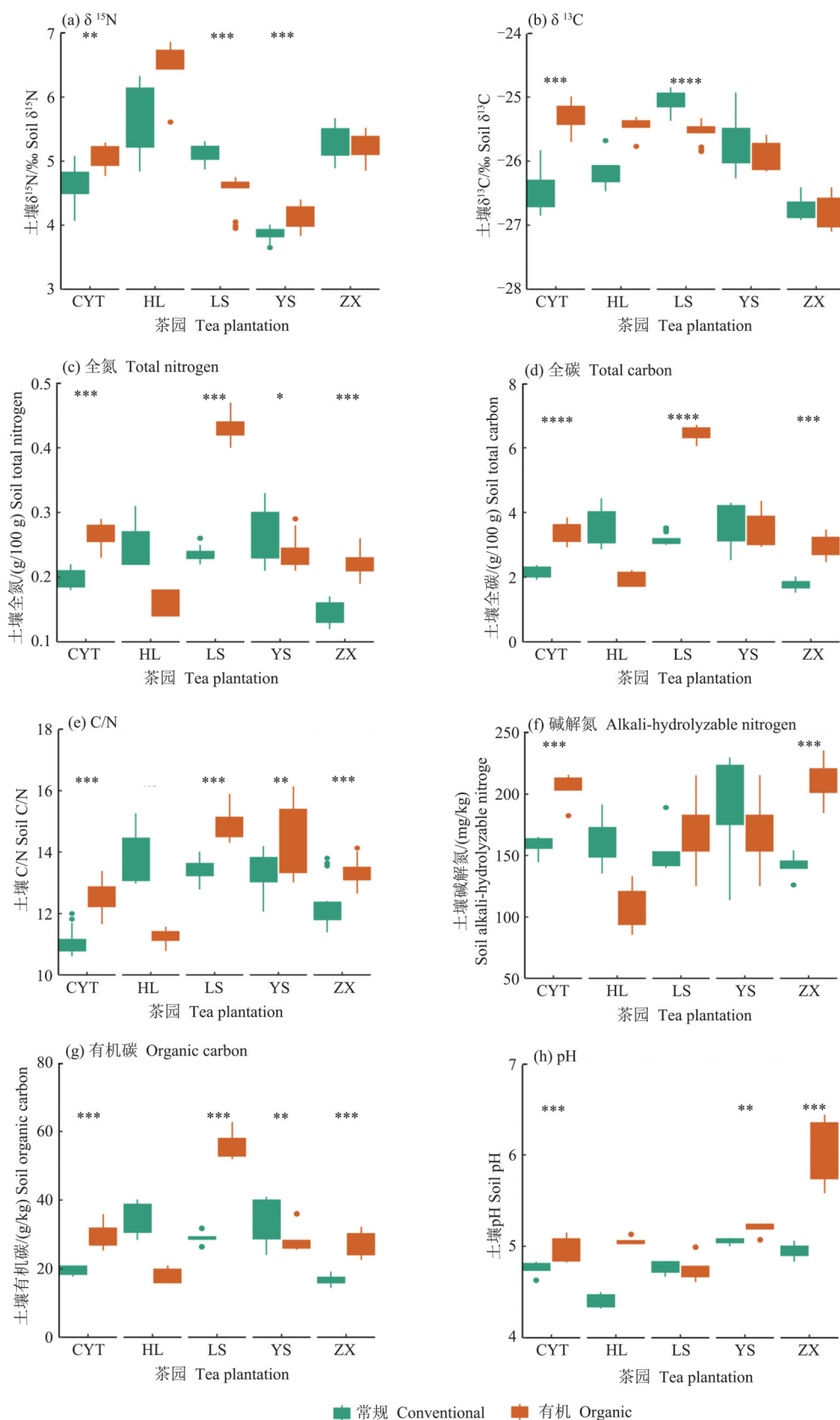
Fig. 1 Comparative analysis of T-test for $\delta^{15}\text{N}$ (a), $\delta^{13}\text{C}$ (b), total nitrogen (c) and total carbon (d) in organic and conventional tea plantations

由图 2 可知,CYT 和 YS 茶园的有机茶叶土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 较高,而 LS 茶园的 $\delta^{15}\text{N}$ 较低,差异达到极显著水平 ($P < 0.01$)。有机茶园和常规茶园的土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 也存在显著差异 ($P < 0.01$),但 CYT 和 LS 茶园显示出相反的趋势,CYT 有机茶园显著高于常规茶园 ($P < 0.001$)、LS 有机茶园显著低于常规茶园 ($P < 0.001$)。

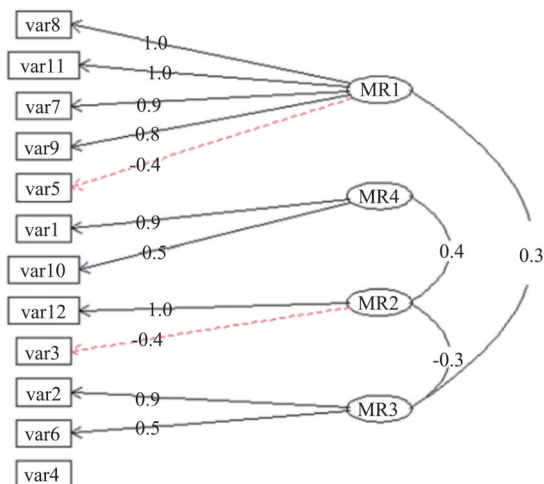
与 CYT、LS 和 ZX 茶园的常规土壤相比,有机茶园土壤的全氮、全碳、碱解氮、pH 和 C/N 均显著高于常规茶园 ($P < 0.01$)。

2.2 判别特征因子筛选

由图 3 可知,土壤因子和茶叶因子存在共同影响因素和潜在的相互作用关系,反推 var8、var11、

图 2 有机与常规茶园土壤性质的 T 检验比较分析Fig. 2 Comparative analysis of soil properties in organic and conventional tea plantations by T -test

var7、var1、var12、var2是能够表征总体样本的主要构建因子。因此,筛选出的特征向量为:茶叶 $\delta^{15}\text{N}$ 、茶叶 $\delta^{13}\text{C}$ 、土壤全氮、土壤全碳、土壤有机碳、土壤pH。



var1, 茶叶 $\delta^{15}\text{N}$; var2, 茶叶 $\delta^{13}\text{C}$; var3, 茶叶全氮; var4, 茶叶全碳; var5, 土壤 $\delta^{15}\text{N}$; var6, 土壤 $\delta^{13}\text{C}$; var7, 土壤全氮; var8, 土壤全碳; var9, 土壤碳氮比; var10, 土壤碱解氮; var11, 土壤有机氮; var12, 土壤pH。红色的虚线表示相互作用关系小。

var1, tea $\delta^{15}\text{N}$; var2, tea $\delta^{13}\text{C}$; var3, tea total nitrogen; var4, tea total carbon; var5, soil $\delta^{15}\text{N}$; var6, soil $\delta^{13}\text{C}$; var7, soil total nitrogen; var8, soil total carbon; var9, soil C/N; var10, soil alkaline nitrogen; var11, soil organic nitrogen; var12, soil pH. The red dotted line indicates that the interaction is small.

图3 特征向量因子分析

Fig. 3 Eigenvector factor analysis

2.3 土壤-茶叶同位素判别分析

基于上述 t 检验假设和因子分析发现,多元参数组合已经显示出了较好的区分茶叶群体来源能力的潜力。因此,进一步构建了基于同位素和土壤性质的多元有机判别模型,以确定有机茶叶和常规茶叶之间的分离。

数据随机分成两部分,训练集和测试集,比例分别为70%和30%。通过先验组别概率可以看出,在该数据集中,有机组和常规组的样本数量相等,各占50%。这意味着数据集中对两类茶叶的观测样本数是均衡的,可以提高判别分析的可靠性。其次,采用Logistic Regression法用筛选出的特征向量茶叶 $\delta^{15}\text{N}$ 、茶叶 $\delta^{13}\text{C}$ 、土壤全氮、土壤全碳、土壤有机碳、土壤pH构建判别模型。判别函数为: $y = -0.081(\text{茶叶 } \delta^{15}\text{N}) + 0.819(\text{茶叶 } \delta^{13}\text{C}) + 0.093(\text{土壤全氮}) + 2.117(\text{土壤全碳}) - 0.155(\text{土壤有机$

碳) $+ 2.870(\text{土壤pH}) + 4.232$ 。

该模型对测试分组样品有机性状的鉴定率为92.3%(图4和图5),说明土壤-植物同位素多元判别分析模型能够比较准确地区分有机和常规茶叶。而且,该模型的精确度和召回率 ≈ 1.0 ,说明土壤-植物同位素多元判别分析模型具有较好的分类性能。

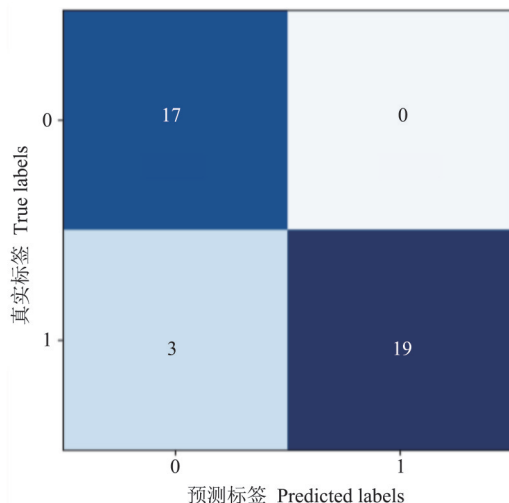


图4 茶叶预测结果混合矩阵

Fig. 4 Tea prediction results mixed matrix

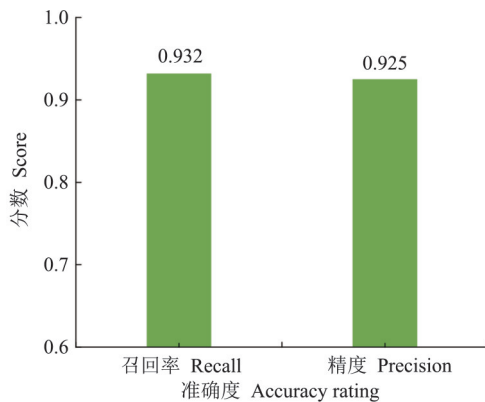


图5 茶叶预测的精度和召回率

Fig. 5 Prediction accuracy and recall rate of tea

3 讨论

本研究结果表明,仅使用单一稳定同位素因子难以鉴别有机茶,原因是来自不同氮源的植物 $\delta^{15}\text{N}$ 阈值存在明显重叠。已有研究表明,有机蔬菜和常规蔬菜间的 $\delta^{15}\text{N}$ 存在显著差异,但这一差异在生长周期较短的蔬菜中更为显著^[6,20]。Choi等^[21]研究发

现,合成肥料的 $\delta^{15}\text{N}$ 成分对作物 $\delta^{15}\text{N}$ 的影响比有机肥料更强,因其氮利用率比有机肥料更高。而且,植物 $\delta^{15}\text{N}$ 可能更接近于土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 或任何其他氮源,例如基质或牛粪,而不是合成氮肥的 $\delta^{15}\text{N}$ ^[22]。Hayashi等^[23]研究表明,有机栽培与常规栽培的 $\delta^{15}\text{N}$ 差异基本在开始有机栽培3年后出现,且差异取决于肥料的 $\delta^{15}\text{N}$ 。然而,来自不同氮源的植物 $\delta^{15}\text{N}$ 阈值会产生一定程度的重叠,这一现象产生的主要原因可能是合成肥料通过 NH_3 挥发和反硝化作用产生氮损失进而导致土壤中 ^{15}N 富集,并在植物中体现出来^[24]。随着氮肥使用时间延长,土壤原有的氮素向作物输入和土壤氮转化过程中同位素分馏的影响也可能是驱动作物 $\delta^{15}\text{N}$ 重叠的因素之一^[19]。此外,Šturm等^[25]研究表明,施入土壤的有机和合成氮肥之间的 $\delta^{15}\text{N}$ 差异必须 $>9.1\text{‰}$,才能实现有机生菜和常规生菜之间 $\delta^{15}\text{N}$ 的统计学显著差异。总之,尽管合成肥料对作物 $\delta^{15}\text{N}$ 的影响比有机肥料更为显著,但必须确保两者之间的 $\delta^{15}\text{N}$ 差异足够大,才能显著提升有机作物与常规作物之间的 $\delta^{15}\text{N}$ 的差异显著性。

除 ^{15}N 外, ^{13}C 稳定同位素也常用于鉴别农产品的身份和来源。有研究认为,由于有机土壤中呼吸 CH_4 的土壤细菌从C同位素分馏过程中吸收了富集的 ^{13}C ,致使有机种植的水稻 $\delta^{13}\text{C}$ 比常规种植水稻和绿色水稻的 $\delta^{13}\text{C}$ 更负^[9]。结合 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素的分析方法可以区分羊草及其土壤中的有机肥料和化学合成肥料,从而提高了单个同位素区分有机和常规来源的准确性^[26]。也有研究认为, ^{13}C 同位素不能作为区分有机和常规辣椒的附加信息,因其叶片和果实的 $\delta^{13}\text{C}$ 与施肥无相关性^[27]。这与本研究结果相似,虽然有机茶叶与常规茶叶的 $\delta^{13}\text{C}$ 没有表现出显著差异,但因其与土壤性质存在潜在相互作用, $\delta^{13}\text{C}$ 可以作为区分茶叶有机和常规特征指标之一。

有机农业和传统农业使用的肥料和农业管理方法不同,因此土壤中的养分含量和质量也会产生差异。一般情况下有机肥含氮量略低于特定的化肥^[15],但本研究发现,来自有机茶园的土壤全氮、土壤全碳、土壤碱解氮、土壤有机碳和土壤pH的均值都显著高于常规茶园。其原因可能是茶园采取了一些特殊的管理措施,如深施肥料,这可能有助于氮的深层积累^[28]。与此同时,这些土壤指标的显著

差异也成为准确判别作物有机来源的因素。目前,利用 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 与土壤性质相结合的方法来检测农产品是否施用了化肥还在探索阶段。已有研究表明,北京地区有机蔬菜 $\delta^{15}\text{N}$ 与蔬菜全氮、与土壤 $\delta^{15}\text{N}$,土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 与土壤全氮之间可以用直线回归方程拟合,且极显著相关^[29]。本研究通过因子分析表明,土壤因子和茶叶因子存在共同影响因素和潜在的相互作用关系。因此,定量分析土壤和植物系统中的氮素含量有助于利用植物 ^{15}N 准确判断产品的来源。本研究以此为基础,构建了基于同位素和土壤性质的多元有机判别模型,通过茶叶 $\delta^{15}\text{N}$ 、茶叶 $\delta^{13}\text{C}$ 、土壤全氮、土壤全碳、土壤有机碳、土壤pH等多个指标拟合判定茶叶来自有机茶园还是来自常规茶园。结果显示,该模型判别茶叶的来源是否为有机的精度高达92.3%。但由于本研究的样本数量较小,各地区在土壤类型和施肥种类上存在较大差异,所以该模型在更大尺度上的适用性还有待进一步探索和优化。目前云南地区有机认证茶园多连成片,土壤肥力也有每年测定记录^[30]。未来可以将这些数据与茶园土壤和同位素数据结合起来,建立一个完整的数据库,优化判别模型,进一步完善有机产品的辨识。

4 结 论

云南省普洱市思茅区取样的5个有机茶园的茶叶并不总是表现出比相邻常规茶园茶叶更高的 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$,因此,使用单一稳定同位素因子难以鉴别有机茶。基于同位素特征和土壤性质参数指标构建的多元有机判别模型,其判别函数方程为: $y = -0.081(\text{茶叶 } \delta^{15}\text{N}) + 0.819(\text{茶叶 } \delta^{13}\text{C}) + 0.093(\text{土壤全氮}) + 2.117(\text{土壤全碳}) - 0.155(\text{土壤有机碳}) + 2.870(\text{土壤pH}) + 4.232$,判别准确度为92.3%,可用于有机茶叶的准确鉴定。

参考文献 Reference

- [1] 杨旭林,胡强,陈富桥. 国有有机茶产业发展现状、趋势和对策建议[J]. 中国茶叶, 2023, 45(10): 9-13
Yang X L, Hu Q, Chen F Q. Current status, trends, and countermeasures for the development of organic tea industry in China[J]. *Chinese Teas*, 2023, 45(10): 9-13(in Chinese)
- [2] Gomiero T, Pimentel D, Paoletti M G. Environmental impact of different agricultural management practices: Conventional vs organic agriculture [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2011, 30 (1-2): 95-124

- [3] 苏波, 韩兴国, 黄建辉. ^{15}N 自然丰度法在生态系统氮素循环研究中的应用[J]. 生态学报, 1999, 19(3): 408-416
Su B, Han X G, Huang J H. Application of ^{15}N natural abundance method in the study of nitrogen cycle in ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(3): 408-416 (in Chinese)
- [4] Cheng H H, Bremner J M, Edwards A P. Variations of nitrogen-15 abundance in soils[J]. *Science*, 1964, 146(3651): 1574-1575
- [5] Chalk P M, Inácio C T, Chen D L. An overview of contemporary advances in the usage of ^{15}N natural abundance ($\delta^{15}\text{N}$) as a tracer of agro-ecosystem N cycle processes that impact the environment [J/OL]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, (2019-11-01). DOI: 10.1016/j.agee.2019.106570
- [6] Rogers K M. Nitrogen isotopes as a screening tool to determine the growing regimen of some organic and nonorganic supermarket produce from New Zealand[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(11): 4078-4083
- [7] 张遴, 蔡砚, 乐爱山, 吴双民. 稳定同位素比质谱法鉴别蔗糖和甜菜糖[J]. 食品科学, 2010, 31(2): 124-126
Zhang L, Cai Y, Le A S, Wu S M. Element analysis stable isotope ratio mass spectrometric differentiation of cane sugar and beet sugar[J]. *Food Science*, 2010, 31(2): 124-126 (in Chinese)
- [8] Li C L, Kang X M, Nie J, Li A, Farag M A, Liu C L, Rogers K M, Xiao J B, Yuan Y W. Recent advances in Chinese food authentication and origin verification using isotope ratio mass spectrometry [J/OL]. *Food Chemistry*, (2023-01-01). DOI:10.1016/j.foodchem.2022.133896
- [9] Yuan Y W, Zhang W X, Zhang Y Z, Liu Z, Shao S Z, Zhou L, Rogers K M. Differentiating organically farmed rice from conventional and green rice harvested from an experimental field trial using stable isotopes and multi-element chemometrics [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(11): 2607-2615
- [10] Cengiz M F, Turan O, Ozdemir D, Albayrak Y, Perincek F, Kocabas H. Geographical origin of imported and domestic teas (*Camellia sinensis*) from Turkey as determined by stable isotope signatures[J]. *International Journal of Food Properties*, 2017, 20(12): 3234-3243
- [11] Peng C Y, Zhang Y L, Song W, Lv Y N, Xu Q, Zheng P, Zhang Z Z, Wan X C, Hou R Y, Cai H M. Using stable isotope signatures to delineate the geographic point-of-origin of Keemun black tea[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(5): 2596-2601
- [12] Pilgrim T S, Watling R J, Grice K. Application of trace element and stable isotope signatures to determine the provenance of tea (*Camellia sinensis*) samples[J]. *Food Chemistry*, 2010, 118(4): 921-926
- [13] 冯海强, 潘志强, 于翠平, 王校常. 利用 ^{15}N 自然丰度法鉴别有机茶的可行性分析[J]. 核农学报, 2011, 25(2): 308-312
Feng H Q, Pan Z Q, Yu C P, Wang X C. Feasibility analysis of organic tea authentication using ^{15}N natural abundance method [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2011, 25(2): 308-312 (in Chinese)
- [14] 国家市场监督管理总局, 中国农业大学. 中国有机产品认证与有机产业发展2021[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2021
State Administration for Market Regulation, China Agricultural University. *The Development of Organic Industry and Organic Product Certification in China* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2021 (in Chinese)
- [15] 王巧环, 任玉芬, 孟龄, 李虹, 傅慧敏, 王华锋. 元素分析仪同时测定土壤中全氮和有机碳[J]. 分析试验室, 2013, 32(10): 41-45
Wang Q H, Ren Y F, Meng L, Li H, Fu H M, Wang H F. Simultaneous determination of total nitrogen and organic carbon in soil with an elemental analyzer[J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2013, 32(10): 41-45 (in Chinese)
- [16] 盛浩, 宋迪思, 王翠红, 周萍, 张杨珠. 土壤溶解性有机碳四种测定方法的对比和转换[J]. 土壤, 2015, 47(6): 1049-1053
Sheng H, Song D S, Wang C H, Zhou P, Zhang Y Z. Comparison and transform of soil dissolved organic carbon measured by four methods[J]. *Soils*, 2015, 47(6): 1049-1053 (in Chinese)
- [17] Khan S A, Mulvaney R L, Hoeft R G. A simple soil test for detecting sites that are nonresponsive to nitrogen fertilization [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(6): 1751-1760
- [18] 唐孝银. 基于因子分析和机器学习算法的通货膨胀预测[D]. 重庆: 西南大学, 2022
Tang X Y. Inflation forecasting based on factor analysis and machine learning algorithms [D]. Chongqing: Southwest University, 2022. (in Chinese)
- [19] 易亚文, 江传宾, 龚世玉, 秦小元, 赵静朴, 李振兴. 基于因子分析与统计学技术的保护测量回路误差评估[J]. 中国电力, 2023, 56(12): 183-190
Yi Y W, Jiang C B, Gong S Y, Qin X Y, Zhao J P, Li Z X. Protection loop error measurement based on factor analysis and statistics technology [J]. *Electric Power*, 2023, 56(12): 183-190 (in Chinese)
- [20] Camin F, Perini M, Bontempo L, Fabroni S, Faedi W, Magnani S, Baruzzi G, Bonoli M, Tabilio M R, Musmeci S, Rossmann A, Kelly S D, Rapisarda P. Potential isotopic and chemical markers for characterising organic fruits[J]. *Food Chemistry*, 2011, 125(3): 1072-1082
- [21] Choi W J, Kwak J H, Lim S S, Park H J, Chang S X, Lee S M, Arshad M A, Yun S I, Kim H Y. Synthetic fertilizer and livestock manure differently affect $\delta^{15}\text{N}$ in the agricultural landscape: A review [J/OL]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, (2016-12-23). DOI: doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.020
- [22] de Teves Inácio C, Nunes J C, Andriolo J L, Chalk P M, Giacomini S J, De Conti L, Krug A V, de Paula B V, Brunetto G. Organic, conventional and hydroponic vegetables: Can ^{15}N natural abundance of farm N inputs differentiate mode of production? [J/OL]. *Scientia Horticulturae*, (2020-01-27). DOI: 10.1016/j.scienta.2020.109219
- [23] Hayashi N, Ujihara T, Tanaka E, Kishi Y, Ogawa H, Matsuo H. Annual variation of natural ^{15}N abundance in tea leaves and its practicality as an organic tea indicator [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(18): 10317-10321
- [24] 孟凡乔, 诸葛玉平, 吴文良, 苏志慧, 王会. 利用 ^{15}N 自然丰度法区分有机和常规生产的作物[J]. 核农学报, 2011, 25(6): 1300-1305
Meng F Q, Zhuge Y P, Wu W L, Su Z H, Wang H. Identification of organically and conventionally produced crops by natural ^{15}N abundance method [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2011, 25(6): 1300-1305 (in Chinese)
- [25] Šturm M, Kacjan-Marsić N, Lojen S. Can $\delta^{15}\text{N}$ in lettuce tissues reveal the use of synthetic nitrogen fertiliser in organic production? [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(2): 262-267
- [26] Yuan Y W, Hu G X, Chen T J, Zhao M, Zhang Y Z, Li Y, Xu X H, Shao S Z, Zhu J H, Wang Q, Rogers K M. Improved discrimination for Brassica vegetables treated with agricultural fertilizers using a combined chemometric approach[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(28): 5633-5643
- [27] Flores P, Fenoll J, Hellin P. The feasibility of using $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values for discriminating between conventionally and organically fertilized pepper (*Capsicum annuum* L.) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(14): 5740-5745

- [28] 姚志生, 王燕, 王睿, 刘春岩, 郑循华. 中国茶园 N_2O 排放及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 715-725
Yao Z S, Wang Y, Wang R, Liu C Y, Zheng X H. Nitrous oxide emissions and controlling factors of tea plantations in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 715-725 (in Chinese)
- [29] 李光德, 秦凤琴, 诸葛玉平, 李雪倩, 孟凡乔, 吴文良, 郭岩彬. 应用稳定性氮同位素分析北京地区有机蔬菜和土壤氮素特征[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1602-1608
Li G D, Qin F Q, Zhuge Y P, Li X Q, Meng F Q, Wu W L, Guo Y B. Identification of nitrogen isotope for organic vegetables and soils in Beijing, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8): 1602-1608 (in Chinese)
- [30] Jahan I, Shopan J, Rahman M M, Sarkar A, Baset M A, Zhang Z, Li X, Ahammed G J, Hasan M K. Long-term traditional fertilization alters tea garden soil properties and tea leaf quality in Bangladesh [J/OL]. *Agronomy*, (2022-09-07). DOI:doi.org/10.3390/agronomy12092128
- 责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 贾丽欣, 中国农业大学资源环境学院生态学专业博士研究生, 曾获2018年国家奖学金、内蒙古自治区优秀三好学生、优秀毕业生等荣誉称号, 在《生态学报》《中国草地学报》等中文核心期刊发表文章28篇。



通讯作者简介: 吴迪, 博士, 中国农业大学资源环境学院副教授, 博士生导师。主要从事生态农业与可持续农业、全球气候变化与温室气体减排、土壤碳氮生物地球化学循环等领域的研究。主持国家自然科学基金面上项目(42077037)和国家自然科学基金青年科学基金项目(41907024)。在 *Global Change Biology*, *Soil Biology & Biochemistry* 等期刊发表论文30余篇。