

doi: 10.12029/gc20220826001

汪振立, 张恋, 罗建林, 李福平, 雷天赐, 黄长生, 于东升, 邓通德. 2025. 江西赣州吉埠贡芋品质与生态地质环境关系讨论[J]. 中国地质, 52(3): 849–866.

Wang Zhenli, Zhang Lian, Luo Jianlin, Li Fuping, Lei Tianci, Huang Changsheng, Yu Dongsheng, Deng Tongde. 2025. Discussion on the relationship between taro quality and eco-geological environment in Jibu, Ganzhou, Jiangxi Province[J]. Geology in China, 52(3): 849–866(in Chinese with English abstract).

江西赣州吉埠贡芋品质与生态地质环境关系讨论

汪振立¹, 张恋², 罗建林¹, 李福平¹, 雷天赐³, 黄长生³, 于东升⁴, 邓通德¹

(1. 江西应用技术职业学院, 江西赣州 341000; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北武汉 430205; 4. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏南京 210008)

摘要:【研究目的】研究贡芋品质与生态地质环境的关系, 探究生态地质环境造就贡芋特殊风味的生态地质学作用机理, 可为芋头种植的生态地质环境选择或改良提供科学依据。【研究方法】本研究从地质建造控制、土壤母质溯源以及土壤物理、土壤地球化学和生物地球化学等多角度切入, 在贡芋核心区和对照区岩、土、水、植系统采样, 矿质元素和有机营养物质系统检测; 对农田土壤物理主要指标检测分析; 对检测数据用多种方法处理分析, 综合研究。【研究结果】(1)体现贡芋独特风味的主要指标蛋白质、能量、碳水化合物、维生素 B、淀粉、氨基酸等均高于对照区; (2)植物必需元素 K、P、Zn、S 等对贡芋风味物质的形成、提高起主要作用, 其次为 Fe、Mg、Cl、Ni、Mn、Ca、Cu 和 SOM 等; (3)土壤平均粒径偏小, 土壤容重、紧实度较低; 土壤灼烧减量、pH 值适中, 土壤水分、土壤 Eh 值较高, 土壤具备良好可耕性。【结论】吉埠贡芋的独特风味是独特的生态地质环境造就优良的土壤物理、土壤地球化学与生物地球化学特性叠加效应的产物。

关键词: 贡芋品质; 土壤物理; 土壤地球化学; 生物地球化学; 叠加效应; 生态地质调查工程; 赣州; 江西

创新点: (1)首次用生态地质调查的方法查明吉埠贡芋品质与生态地质环境的关系; (2)尝试以地质学、生态学、土壤学、植物生理学、植物营养学等多学科理论指导、方法应用, 剥茧抽丝, 探寻生态地质环境影响作物品质的生态地质学作用机理。

中图分类号: S632.3 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2025)03–0849–18

Discussion on the relationship between taro quality and eco-geological environment in Jibu, Ganzhou, Jiangxi Province

WANG Zhenli¹, ZHANG Lian², LUO Jianlin¹, LI Fuping¹, LEI Tianci³,
HUANG Changsheng³, YU Dongsheng⁴, DENG Tongde¹

(1. Jiangxi College of Applied Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China; 4. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, Jiangsu, China)

Abstract: This paper is the result of eco-geological survey engineering.

收稿日期: 2022–08–26; 改回日期: 2022–12–08

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190540)与江西应用技术职业学院项目(21022)联合资助。

作者简介: 汪振立, 男, 1954 年生, 教授, 主要从事水文地质、农业地质、生态地质的教学与科研工作; E-mail: wzhl2004@163.com。

[Objective] The research of relationship between the quality of taro and eco-geological environment, and the eco-geological mechanism of the eco-geological environment creating the special flavor of taro, can provide a scientific basis for the selection or improvement of the eco-geological environment for taro planting. **[Methods]** The geological construction control, soil parent material traceability, soil physics, soil geochemistry, biogeochemistry were carried out. Systematic sampling of rocks, soil, water and plants was collected in the core area and the control area of the taro. The mineral elements, organic nutrients and main indexes of physical properties of farmland soil were detected. The test data were analyzed and processed by a variety of methods and studied comprehensively. **[Results]** (1) The main indexes reflecting the unique flavor of taro were higher than those in the control area, such as protein, energy, carbohydrate, vitamin B, starch, amino acid, etc. (2) The essential elements K, P, Zn and S played a major role in the formation and improvement of taro flavor substances, followed by Fe, Mg, Cl, Ni, Mn, Ca, Cu and SOM. (3) The average soil particle size is small, the soil bulk density and soil compactness is low, the soil burning reduction and pH value is moderate, and the soil moisture and soil Eh value is higher, the soil is well cultivable. **[Conclusions]** The unique flavor of Jibu taro is the product of the superposition effect of excellent soil physical, soil geochemical and biogeochemical characteristics caused by a unique eco-geological environment.

Key words: taro quality; soil physics; soil geochemistry; biogeochemistry; superposition effect; eco-geological survey engineering; Ganzhou; Jiangxi Province

Highlights: (1) The method of the eco-geological survey was used to find out the relationship between the quality of taro in Jibu and the eco-geological environment for the first time. (2) The eco-geological mechanism of the effect of the eco-geological environment on crop quality was explored under the guidance and application of multi-disciplinary theories such as geology, ecology, soil science, plant physiology and plant nutrition.

About the first author: WANG Zhenli, male, born in 1954, professor, engaged in teaching and scientific research of hydrogeology, agricultural geology, and ecological geology; E-mail: wzhl2004@163.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20190520) and Jiangxi College of Applied Technology (No.21022).

1 引 言

芋头 (*Colocasia esculenta*) 属天南星科多年生宿根性草本植物, 是一种重要的蔬菜兼粮食作物, 老少皆宜, 营养和药用价值高 (胡士元和田建春, 2002; Rashmi et al., 2018), 芋头淀粉颗粒小至马铃薯淀粉的 1/10, 其消化率可达 98% 以上, 尤其适于婴儿和病人食用 (蒋高松和 Ramsd, 1998)。此外, 芋头还可以用于酿酒 (Rainer et al., 2016)、制醋 (荆琳等, 2015)、提取生物碱 (王教飞等, 2015)、分离蛋白质 (Gao et al., 2022) 等。

业界对芋头的栽培技术 (Deo et al., 2009; Suja et al., 2017; 戴艳丽等, 2018)、肥料使用 (孙倩倩等, 2010)、病虫害防治 (姜东明, 2012; Mohd et al., 2019)、营养成分 (滕葳等, 1992; 魏秋羽等, 2016; 朱苗等, 2018)、加工技术 (韩笑等, 2018) 等研究较多, 成果也较多。对芋头种植环境的研究则较少, 且主要研究几个主量元素和有机质, 涉及其他微量元素

少, 如杨飞 (2011) 研究乐昌土壤条件对香芋品质的影响, 主要是氮、磷、钾分别施肥和混合施肥对香芋品质的影响; Goenaga and Chardon (1995) 研究了山地条件下芋头对土壤中养分的吸收; Osorio et al. (2003) 研究了土壤中氮元素的含量和形态差异对芋头的生长和品质的影响; 高琳等 (2018, 2022) 研究粤北乐昌、乳源香芋种植区的环境条件、土壤剖面特征及其土壤养分含量的变化, 查明了香芋种植区的土壤剖面形态、质地结构和养分特征, 得出“养分元素呈现表层集聚型分布, 土壤氮、磷、钾含量和有机质随着深度的增加呈现下降的趋势”的结论, 为香芋的合理种植和肥料利用提供依据。而对芋头种植的生态地质环境的系统研究, 对地质环境中 16 种植物必需元素与芋头品质关系的系统研究, 尚未见报道。

本文针对不同生态地质环境对芋头品质的影响, 选取江西赣州吉埠贡芋种植核心区及其对照区为解剖对象, 探寻生态地质环境制约芋头有机营养

物质含量的生态地质学影响机理。研究成果可为优质芋头种植的生态地质环境选择或改良改造提供科学依据, 对其他作物种植环境研究和相关学科的研究亦具有参考价值。

2 研究区概况

2.1 吉埠贡芋概况

赣州市赣县区吉埠镇大溪村芋头种植历史悠久, 因其独具个大、肉绵、醇香、口感好等特点, 享誉省内外, 曾为清朝贡品, 被称为“吉埠贡芋”。2004 年被国家标准化委员会(国标委农轻[2004101]号)批准为国家级标准生产基地, 2008 年通过验收, 所产芋头市场上供不应求。真正能种植最优质芋头的农田主要集中在大溪村的罗汾、下村、钟屋 3 个村小组, 核心区在大溪河的下村、罗汾段一级阶地上, 面积不足 13 hm², 加之芋头必须轮

作, 即每年种植面积不足 6.5 hm²。

2.2 吉埠贡芋生态地质背景

研究区地貌类型为低山—丘陵, 海拔 110~800 m; 地形形态为沟谷, 沟谷呈东西走向, 大溪河自东向西流, 最低点位于大溪河与平江交汇处, 地貌单元可划分为低山、丘陵、河谷盆地三种类型。

吉埠贡芋核心区在白垩系碎屑岩范围内, 但芋头种植的稻田土壤并非白垩系碎屑岩的衍生物, 而是大溪河上游变质岩母质、花岗岩母质冲洪积物形成的潮土, 农民俗称潮泥砂土, 白垩系碎屑岩只是主要作为承载这些潮土的基底。吉埠贡芋核心区面积仅 0.475 km²。为查明潮土母质来源, 将调查区从核心区西端外推至大溪河全流域, 即将大溪河汇水面积及其边界的 47.81 km² 设为重点调查区(图 1)。

由大溪村罗汾村小组所在大溪河断面上溯, 上

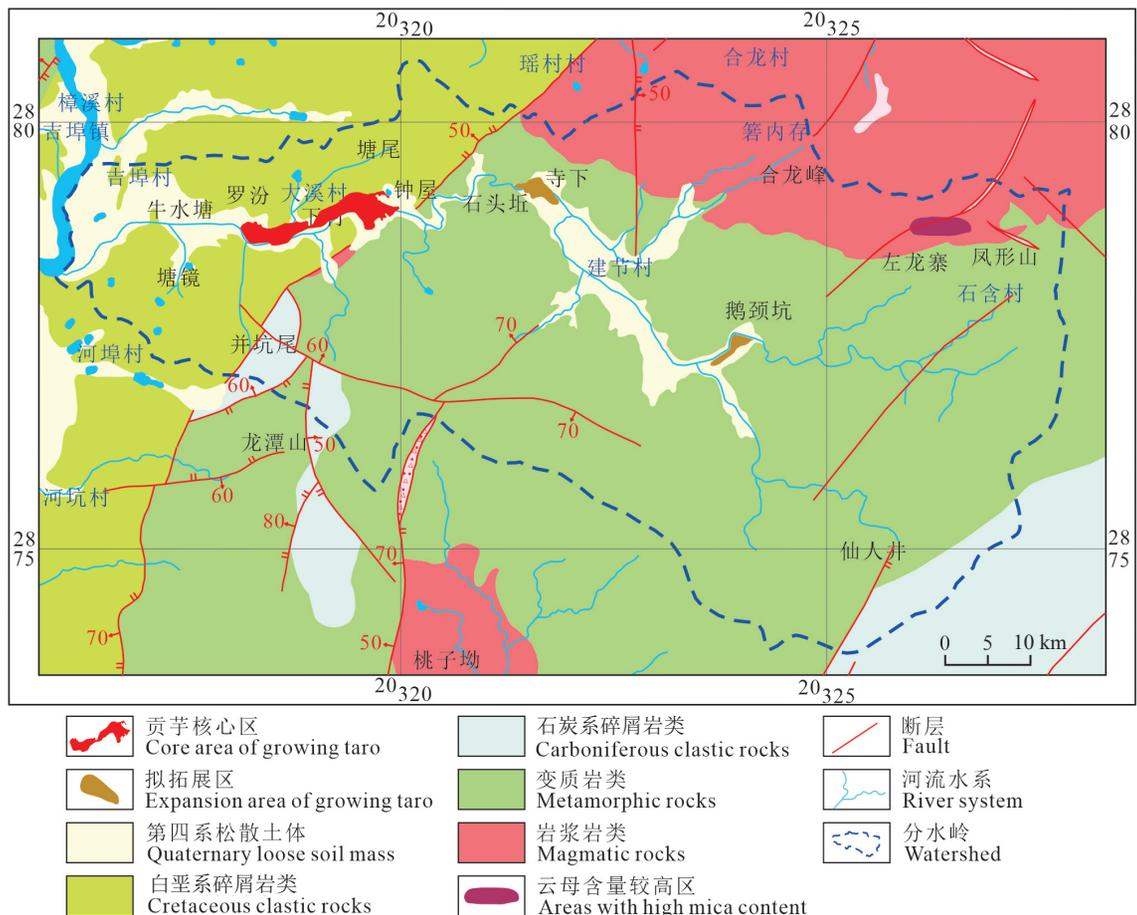


图 1 吉埠贡芋种植区成土母质分布示意图
Fig.1 Distribution diagram of soil parent material in Jibu tribute taro planting area

流域面积 38.16 km², 其中花岗岩区 5.53 km², 占 14.5%, 变质岩区 28.43 km², 占 75.5%, 石炭系碎屑岩区 1.60 km², 占 4.2%, 白垩系碎屑岩区 2.60 km², 占 6.8%。由于白垩系碎屑岩区占比较小, 且主要分布在大溪河下游两侧丘岗, 对大溪河河流阶地上土壤理化性质影响甚微。

侏罗纪花岗岩区表层为砂土, 部分砂壤土; 寒武系变质岩区主要是重壤土, 部分黏土。寒武系变质岩区土壤流失量较小, 其山洪侵蚀进入洪水的泥沙中细砂、粉砂、黏粒较多; 花岗岩区土壤流失量较大, 其山洪侵蚀进入洪水的物质中细砂、中砂、粗砂较多。大溪河两侧阶地土壤发育主要是由花岗岩区的砂土与变质岩区和石炭系碎屑岩区的壤土经过河水的搬运混合形成, 肥力较为均衡, 土壤耕性好。

调查中发现吉埠贡芋核心区的潮土中云母含量较高, 是区别于其他河流阶地土壤的显著特征。云母主要来源于大溪河发源地之一的左龙寨一带。左龙寨有一条北东向断层, 断层长约 3.73 km, 宽 2~40 m, 在左龙寨这一段, 长约 0.72 km、宽约 220 m 的蚀变带都是二云母二长花岗岩, 云母含量达 5%~10%。断层在靠近山脊一带, 由于二云母二长花岗岩表层风化强烈, 顺坡而下的自然土壤及农用地土壤布满了闪闪发光的白云母碎片。在雨水冲刷下, 地表径流连泥带砂裹挟着大量的云母碎片进入大溪河, 沿途水系沉积物含有较多云母。从大溪河沿河阶地看, 三级阶地多为壤土、重壤土, 云母含量低; 二级阶地为壤土或轻壤土, 云母含量稍多; 一级阶地为潮土, 云母含量较高。

3 样品采集与测试

研究区以不同地层岩性成土母岩分为花岗岩区、变质岩区、白垩系碎屑岩区、河流阶地四类种植区; 河流阶地分一、二、三级阶地, 一级阶地主要分贡芋核心区、拟拓展区。按不同分区系统采集岩石、土壤(自然土壤、农田土壤、根系土壤、水系沉积物)、灌溉水、植物(芋艿、芋母)等样品, 藉以分析芋头种植区地质背景及地球化学特征。

3.1 样品采集与制备

岩样的采集: 在不同地层岩性的典型地段, 多点取新鲜基岩, 混合后装袋, 每个样重大于 1.5 kg。

土样的采集: 自然土壤样在不同岩性区坡腰、

坡脚采集残坡积物形成的单源母质类型土壤, 去除腐殖质层后, 取 0~20 cm 的 A 层土; 典型剖面则按 A、B、C 层分层取样; 农田土壤样, 在晚稻收割后未扰动前, 取 0~20 cm 的 A 层土(耕作土); 根系土壤样, 即在采集植物样过程中同时取根系周边的土壤。每一个土样, 都是同一区段内多点取样(农田土壤取样视田块条件在 50~100 m² 范围内梅花坑法取样), 混合后装袋, 每个样重大于 1.5 kg。各类土样的采集, 均在铁锹挖坑或切出剖面后, 用竹铲刮去金属接触过的表层, 再用竹铲垂直取样。

水系沉积物样的采集: 从大溪河上游—下游流经不同地层有代表性的地段、支流汇合后 100~300 m 处选点取样, 大溪河下游视河流阶地情况分段取样。在每个选定的取样点捞取溪河底泥, 去除石砾树枝杂草, 留下淤泥细砂装布袋滤干, 由于水系沉积物样含水率高, 每个样重大于 3 kg。

水样的采集: 分别在吉埠贡芋核心区、土壤母质溯源区、拟拓展区、对照区采集灌溉水样 33 组, 其中少数取样点为山中溪流(当地村民同时用作饮用水)。以洗净的 550 mL 矿泉水瓶取样, 每组样 4 瓶, 其中 1 瓶加入 5 mL 浓度为 8 mol/L 的硝酸, 密封, 集中送检。

植物样的采集: 在吉埠贡芋核心区和各对照区, 选取典型样地, 对长势中等的芋头对角线取样或隔行取样, 在 5~8 株芋头中各取部分芋艿(部分同时取芋母样), 混合后装盒, 每个样重大于 3 kg。

岩样、自然土壤样均在生态地质调查过程中采集; 水样、水系沉积物样集中在晴好天气一周内完成; 植物样按芋头收获季节即寒露前后一周内完成采集; 根系土壤样与芋头样同时采集; 因芋头是轮作作物, 与芋头田相邻的水稻田上一年基本上都是芋头田, 故稍后晚稻收割后即采集农田土壤样。

土样、水系沉积物样经自然风干后, 用木锤捣碎, 过 50 目筛, 混匀, 取 200 g 装袋送检。植物样采集后不清洗, 以利保鲜, 室内敞开盒盖, 表皮晾干后, 3 kg 芋头混匀, 按 1 kg/盒装盒, 有机检测和无机检测各送 1 kg 鲜样。

3.2 样品检测

包括吉埠贡芋核心区、拟拓展区、对照区岩石样(12组)、自然土壤样(24组)、农田土壤样(94组)、根系土壤样(58组)、水系沉积物样

(20 组)、水样(17 组)、植物样(69 组)共 294 组,芋头有机营养物质委托谱尼测试集团上海有限公司检测;土壤全氮(TN)、碱解氮(AN)、有机质(SOM)复测样等送南昌华测检测认证有限公司检测;其他所有样品均由中国地质调查局武汉地质调查中心检测。

岩石、土壤、水系沉积物系列样品,围绕同一生物地球化学流,系统检测植物必需元素 N、P、K、Ca、Mg、S、Si、Cl、Fe、Mn、B、Na、Zn、Cu、Ni、Mo,有益元素 Co、Se、Ge、Sr,有毒有害元素 Cd、Pb、As、Hg、Cr、U、Th,区域内需要关注的其他元素如 F、Al、W、Ba、Tl、Bi、V、Ti、Hf 等;与核心区土壤母质溯源关系紧密的部分区域岩、土样还检测了稀土元素 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y;农田及根系土壤加测 pH 值、有机质(SOM)、碱解氮(AN)、有效磷(AP)、速效钾(AK)、灼烧减量(LOI)等,共 56 个指标。其中,岩样分析分别采用 GB/T 14506—2010、DZG 20.02—1991、GB/T 3286.7—2014、《区域地球化学勘查样品分析方法》等标准检测;土样、水系沉积物样分析分别采用 GB/T 14506—2010、DZG 20.02—1991、DZ/T 0279—2016、NY/T 1121.6—2006、LY/T 1232—2015、NY/T 889—2004 等标准检测。

水样分析参考了全分析指标、专项分析指标和岩样、土样、植物样分析参数,取与作物种植关系较密切的指标进行检测,共 50 项(Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Co、Cd、Mo、As、Bi、Hg、Sr、Ba、V、Ge、Tl、Se、K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cr⁶⁺、NH₄⁺、COD_(Mn)、Cl⁻、F⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、NO₃⁻、NO₂⁻、pH、Si、Al、N、P、Mn、Fe、全 S、I、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y、游离 CO₂、总硬度、可溶性总固体),分别采用 DZ/T 0064—2021、GB/T 7467—1987、HJ 636—2012 等标准检测。

植物样矿质元素检测主要考虑人体必需元素、有益元素、有害元素以及与土样、植物样具有对应关系的检测项目,包括 S、Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Co、Cd、W、Mo、As、Bi、Hg、Sr、Ba、V、B、Ge、Tl、Se、U、Th、Al、Ti、P、K、Mn、Ca、Mg、Na、Fe、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y 等共 46 个元素指标,分别采用

DZ/T 0253.1—2014 电感耦合等离子质谱(ICP-MS)法等标准检测。

同时,对 20 组植物样检测有机营养物质:能量、蛋白质、脂肪、碳水化合物、膳食纤维、维生素 A、维生素 E、维生素 B₁、维生素 B₂、维生素 C、β-胡萝卜素、淀粉、烟酸以及 18 种氨基酸,如天门冬氨酸(Asp)、苏氨酸(Thr)、丝氨酸(Ser)、谷氨酸(Glu)、脯氨酸(Pro)、甘氨酸(Gly)、丙氨酸(Ala)、缬氨酸(Val)、蛋氨酸(Met)、异亮氨酸(Ile)、亮氨酸(Leu)、酪氨酸(Tyr)、苯丙氨酸(Phe)、赖氨酸(Lys)、组氨酸(His)、精氨酸(Arg)、胱氨酸(Cys)、色氨酸(Trp)。分别采用 GB 28050—2011、GB 5009.9—2016、GB 5009.124—2014 等标准检测。

3.3 土壤物理参数测定

分别以原位测定法和采样法测量调查区的土壤含水量、土壤粒度、土壤容重、土壤紧实度、土壤 pH 值、土壤氧化还原电位(Eh)等:一是在面上调查过程中采用“绿地”土壤多参数测定仪测量各调查点自然土壤、农田土壤的土壤容重、pH 值、Eh 值、土壤紧实度、土壤含水量等;二是为更好校正相关参数,在芋头收获季节集中采集土样(采样及前处理方法同前)。其中土壤容重及含水量采用环刀取样,用电子秤即时称重,后用烘箱 105℃ 温度烘干,称重计取;土壤样送武汉地质调查中心,pH 值用离子选择电极法(DZ/T 0279.34—2016)测定,灼烧减量(LOI)采用森林土壤烧减量测定标准(GB 7876—1987)检测。

土壤粒度分析采用筛分法,将采集的土壤样烘干后,用不同孔径的筛子筛分、称重并计算小于某粒径土颗粒质量占总质量百分数,绘制土壤粒径级配累计曲线,在级配曲线上读取小于某粒径土颗粒质量占总质量 50% 所对应的粒径为该土壤样的平均粒径。

4 结果分析与讨论

4.1 土壤安全性分析与矿质营养元素分析

4.1.1 土壤安全性分析

各项检测结果表明:吉埠贡芋核心区、各对照区根系土壤、农田土壤中有毒有害元素均低于农用地土壤污染风险管制值,与农用地土壤污染风险筛

选值(GB 15618—2018)比较见表 1。

表 1 表明, 吉埠贡芋核心区和相关各对照区农田土壤均在“农用地土壤污染风险筛选值”以下, 无重金属污染风险。其他关注的元素(F、Al、W、Ba、Tl、Bi、V、Ti)也都在“江西省 A 层土壤元素背景值基本统计量”(魏复盛, 1990)上下相差不大的范围内。因此, 本文主要关注的是植物必需元素和有益元素。

调查区内农田土壤有益元素 Co、Se、Ge、Sr 含量均低于江西省 A 层土壤元素背景值基本统计量(魏复盛, 1990); 但 15 个稀土元素均高于江西省土壤元素背景值 2~10 倍。据此前的研究, 稀土元素有利于作物生长发育, 有利于农作物有机营养物

质的形成和提高(Hu et al., 2004; 汪振立等, 2009a, b, 2010), 故在芋头优良品质的形成中必有其贡献。

4.1.2 土壤矿质营养元素分析

以“江西省 A 层土壤元素背景值基本统计量”以及学界较为认可的参考值(江泽普等, 1993; 黄运湘等, 2011; 刘占军, 2014; 黄忠财, 2014; 杨帆等, 2017)衡量, 根系土壤 16 个植物必需元素和有机质含量见表 2。

由表 2 可知, 核心区总氮(TN)、Ca、B、Na、Cu、Mo 和碱解氮(AN)、有效磷(AP)、速效钾(AK)、有机质(SOM)均高于相关参考值; P、K、Zn 接近参考值; Mg、Fe、Mn、Ni 低于参考值, 但都能满足植物对矿质营养元素的需要。因此, 核心区

表 1 芋头种植区农用地土壤重金属含量

Table 1 Content of heavy metals in agricultural soil in taro planting area

调查区	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	pH
风险筛选值	0.30	0.50	30.00	80.00	250.00	150.00	60.00	200.00	—
贡芋核心区	0.09	0.08	6.65	27.28	50.00	22.52	14.62	68.92	5.40
拟拓展区	0.17	0.07	9.04	31.65	52.23	24.40	15.80	76.35	5.32
二级阶地	0.10	0.09	11.20	26.00	61.00	23.18	15.56	66.58	5.72
花岗岩区	0.07	0.05	6.41	19.50	13.20	14.20	3.74	65.40	4.93
白垩系碎屑岩区	0.16	0.12	6.89	34.27	57.73	28.60	16.13	82.70	5.28
变质岩地区	0.17	0.09	9.40	34.13	53.27	23.40	19.43	71.10	4.97

注: 元素含量单位为mg/kg, pH无量纲。

表 2 不同成土母质区根系土壤主要营养素含量

Table 2 Contents of main nutrients in root-soil in different soil parent materials

取样位置	参考值	核心区均值	拟拓展区均值	二级阶地均值	花岗岩区均值	白垩系碎屑岩区均值	变质岩区均值
Si	—	37.17	36.29	38.91	29.34	37.02	34.91
Fe	2.88	1.96	1.96	1.80	1.72	2.34	2.07
Mg	0.39	0.27	0.30	0.25	0.21	0.30	0.30
Ca	0.09	0.13	0.12	0.13	0.08	0.17	0.32
K	2.21	2.06	2.22	1.37	4.31	1.63	1.65
Na	0.24	0.24	0.27	0.16	0.64	0.15	0.12
P	0.05	0.08	0.09	0.06	0.10	0.07	0.08
TN	1.52	1.76	1.25	1.66	1.86	1.60	1.01
S	382	313	260	240	360	577	363
Cl	41.7	32.1	33.3	31.5	111	51.8	36.7
Mn	377	232	281	219	348	258	537
B	45.3	88.9	106	73.9	245	47.0	78.7
Zn	69.4	69.0	76.8	71.8	78.4	77.3	71.1
Cu	20.3	22.8	25.1	24.8	15.5	26.8	23.4
Ni	18.9	14.6	16.2	13.9	4.70	15.1	19.4
Mo	0.50	0.85	0.69	0.79	0.54	1.27	0.55
AN	119	167	125	168	179	176	106
AP	17.3	32.9	44.6	6.08	15.5	5.76	53.1
AK	109	328	239	207	369	293	482
SOM	25.8	32.1	21.5	31.1	34.1	29.5	19.1
pH	4.8	5.8	5.6	6.1	4.4	5.6	6.2

注: TN参考刘占军(2014), AN、AP、AK参考黄忠财(2014), SOM参考杨帆等(2017), S参考黄运湘等(2001), Cl参考江泽普等(1993), 其余均参考魏复盛(1990)。TN单位为g/kg, pH、SOM无量纲, Si、Fe、Mg、Ca、K、Na、P元素含量单位为%, 其余元素含量单位均为mg/kg。

农田土壤的主要矿质营养元素偏高,少数略低,属于优良的组合模式。

4.2 不同成土母质区芋头品质比较

吉埠贡芋优良品质,可用《中国食物成分表》所列的 10 个矿质元素指标和 14 个有机营养物质指标(杨月欣, 2018)以及氨基酸含量(总量)、氨基酸分类组成的各类氨基酸含量来衡量。

4.2.1 部分人体必需矿质营养元素含量比较

在植物样分析 36 个元素中,取出《中国食物成分表》所列的 10 个矿质元素指标,按吉埠贡芋核心区与各对照区芋头元素含量比较见表 3。

由表 3 可知,研究区芋头除 Se、Na 含量总体偏低、花岗岩区 Mg 略低于《中国食物成分表》平均值外,其他均较高;核心区芋头与各对照组比较,处于中等略高的状态。人体必需元素、有益元素,都有一定范围的需要量(阈值),过高过低对人体都不利,一般略高于平均值比较合适。表 3 中吉埠贡芋的各项指标,都高于《中国食物成分表》平均值,低于《食品安全国家标准》(GB 2762—2022)限量值;其他有毒有害元素如 Cd、Pb、As、Hg、Cr 等,均远低于《食品安全国家标准》限量值,属于最佳元素含量组合。从营养学角度看,对人体健康有益无害。

4.2.2 部分有机营养物质含量比较

中国食物成分表列出 14 项有机营养物质平均值,是衡量食品品质的重要指标。以吉埠贡芋核心区 and 对照区芋头检测数据,对比核心区、拟拓展区、二级阶地、花岗岩区、变质岩区、白垩系碎屑岩区的芋头检测数据平均值(表 4)。其中胆固醇是植物性食物普遍不检测,维生素 A 低于检出限,但加测了 β -胡萝卜素、淀粉、氨基酸。

由表 4 可知,核心区芋头能量、蛋白质、碳水化合物、维生素 B₁ 含量最高;淀粉、维生素 C 含量较高;其余为中下水平。

4.2.3 氨基酸含量以及分类含量比较

氨基酸是构成动物营养所需蛋白质的基本物质,是维系人体生命活动的重要物质,它不仅具有各种生理功能,而且大多数氨基酸及其盐具有甜味或苦味,少数几种具有鲜味或酸味(武彦文和欧阳杰, 2001)。

氨基酸含量是显示芋头品质的重要指标,检测核心区贡芋与各对照区芋头氨基酸含量,总氨基酸(TAA)和 18 个氨基酸分量有较大的差异(表 5)。

以人体营养需求分类,可分为必需氨基酸(缩写为 EAA,包括赖氨酸、色氨酸、蛋氨酸、缬氨酸、异

表 3 不同成土母质区芋头部分矿质元素含量

Table 3 Contents of some mineral elements in taro in different soil parent materials

分区	Cu	Zn	Se	P	K	Mn	Ca	Mg	Fe	Na
中国食物成分表	0.060	0.190	0.910	50.00	25.00	0.300	11.0	19.000	0.300	5.500
核心区	0.163	0.572	0.661	59.03	39.35	0.584	20.1	26.167	1.858	2.413
拟拓展区	0.164	0.587	0.627	68.75	45.72	0.504	22.0	27.45	1.890	2.398
二级阶地	0.190	0.630	0.482	57.60	35.10	0.407	21.6	28.900	1.550	1.150
花岗岩区	0.131	0.773	0.940	56.30	37.40	1.920	14.8	17.400	1.118	3.30
白垩系碎屑岩区	0.193	0.897	0.845	64.80	47.30	1.121	27.7	29.167	2.973	3.883
变质岩地区	0.135	0.483	0.852	49.533	45.60	0.898	19.5	25.267	1.940	2.410

注:按《中国食物成分表》Se含量单位为 $\mu\text{g}/100\text{g}$,其余元素含量单位为 $\text{mg}/100\text{g}$ 。

表 4 不同成土母质区芋头有机营养物质含量

Table 4 Contents of organic nutrients in taro in different soil parent materials

样区	能量	蛋白质	脂肪	碳水化合物	膳食纤维	维生素E	维生素B ₁	维生素B ₂	维生素C	β -胡萝卜素	淀粉	烟酸	水分
中国食物成分表	56	1.30	0.20	12.70	1.000	—	0.050	0.020	1.50	—	—	0.28	78.6
核心区	262	1.94	0.30	12.43	0.869	0.196	0.046	0.030	5.03	7.853	9.377	0.39	82.5
拟拓展区	244	1.80	0.28	11.55	0.865	0.215	0.044	0.034	4.86	8.692	9.150	0.35	82.6
二级阶地	239	1.37	0.20	11.80	0.925	0.053	0.040	0.026	4.70	5.120	9.210	0.46	81.0
花岗岩区	241	1.94	0.50	10.80	0.770	0.248	0.040	0.030	5.03	9.410	10.100	0.40	87.5
白垩系碎屑岩区	247	1.81	0.33	11.57	0.883	0.080	0.045	0.029	5.14	5.263	9.253	0.37	83.8
变质岩区	254	1.70	0.40	12.00	0.791	0.267	0.034	0.034	5.50	10.223	9.107	0.43	83.2

注:蛋白质、脂肪、碳水化合物、膳食纤维、淀粉、水分单位 $\text{g}/100\text{g}$,维生素B₁、维生素B₂、维生素C、烟酸单位为 $\text{mg}/100\text{g}$, β -胡萝卜素单位为 $\mu\text{g}/100\text{g}$,维生素E单位为 $\text{mg } \alpha\text{-TE}/100\text{g}$,能量单位为 $\text{kJ}/100\text{g}$ 。

表 5 不同成土母质区芋茛氨基酸含量

Table 5 Amino acid contents of taro in different soil parent materials

分区	Asp	Thr	Ser	Glu	Pro	Gly	Ala	Val	Mrt	Ile	Leu	Tyr	Phe	Lys	His	Arg	Cys	Trp	TAA
核心区均值	0.208	0.063	0.076	0.168	0.084	0.073	0.083	0.083	0.017	0.050	0.115	0.060	0.085	0.070	0.033	0.095	0.027	0.074	1.464
拟拓展区	0.200	0.060	0.073	0.153	0.081	0.069	0.081	0.077	0.014	0.046	0.106	0.056	0.080	0.065	0.031	0.089	0.026	0.024	1.328
二级阶地	0.210	0.060	0.077	0.150	0.090	0.066	0.079	0.080	0.013	0.044	0.100	0.050	0.076	0.060	0.028	0.087	0.030	0.035	1.335
花岗岩区	0.190	0.059	0.068	0.150	0.082	0.069	0.083	0.078	0.016	0.046	0.110	0.052	0.076	0.065	0.031	0.083	0.026	0.020	1.304
白垩系碎屑岩区	0.210	0.064	0.079	0.160	0.085	0.072	0.083	0.082	0.016	0.049	0.110	0.057	0.084	0.072	0.032	0.092	0.027	0.025	1.399
变质岩地区	0.197	0.064	0.073	0.160	0.081	0.074	0.089	0.083	0.019	0.052	0.120	0.060	0.084	0.071	0.033	0.094	0.029	0.020	1.402

注：氨基酸含量单位为g/100 g。

亮氨酸、亮氨酸、苏氨酸、苯丙氨酸)、半必需氨基酸(SEAA: 精氨酸、组氨酸)、非必需氨基酸(NAA: 天门冬氨酸、丝氨酸、谷氨酸、甘氨酸、丙氨酸、酪氨酸、脯氨酸、胱氨酸);以人类味觉分类,可分为呈味氨基酸(FAA: 谷氨酸、天门冬氨酸、苯丙氨酸、丙氨酸、甘氨酸、酪氨酸)、芳香族氨基酸(AAAA: 酪氨酸、苯丙氨酸、色氨酸+缬氨酸、亮氨酸、赖氨酸、精氨酸)、苦味氨基酸(BIAA: 缬氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、色氨酸、组氨酸、精氨酸、蛋氨酸)、甜味氨基酸(SWAA: 苏氨酸、赖氨酸、丝氨酸、脯氨酸、甘氨酸、丙氨酸)、酸味氨基酸(SOAA: 天门冬氨酸、谷氨酸、组氨酸)等(蒋滢等, 2002; 曾凡逵等, 2015; 呼德尔朝鲁等, 2016; 罗钦等, 2020; 邓英毅等, 2020)。

吉埠贡芋核心区芋头与各对照区芋头比较,氨基酸总量的差异、各分量的差异和营养分类、味觉分类模式的差异(图 2),是芋头品质差异的重要标志。

吉埠贡芋核心区芋头总氨基酸含量高于所有对照区,氨基酸各分量在各区域芋头中含量有差异(表 5)。总氨基酸含量高,表征吉埠贡芋品质好、营养价值高;其分量的差异,通过组合分类(图 2),体现它区别于对照区芋头的品质,即贡芋的口感、风味。

核心区贡芋总氨基酸含量最高,氨基酸分类中必需氨基酸、半必需氨基酸、呈味氨基酸、芳香族氨基酸、苦味氨基酸、酸味氨基酸以及鲜香总量(呈味氨基酸+芳香族氨基酸)、鲜香甜总量(呈味氨基酸+芳香族氨基酸+甜味氨基酸)、芳香族/总氨基酸比值都最高;甜味氨基酸较高;非必需氨基酸含量最低(图 2)。

营养、安全和感官是评价食品的三大要素,而感官质量最重要的属性之一是滋味(呼德尔朝鲁等, 2016)。从人体营养的角度看,必需氨基酸、半必需氨基酸、苦味氨基酸(组成苦味氨基酸的 8 种氨基酸中有 6 种是必需氨基酸(蒋滢等, 2002))、总氨基

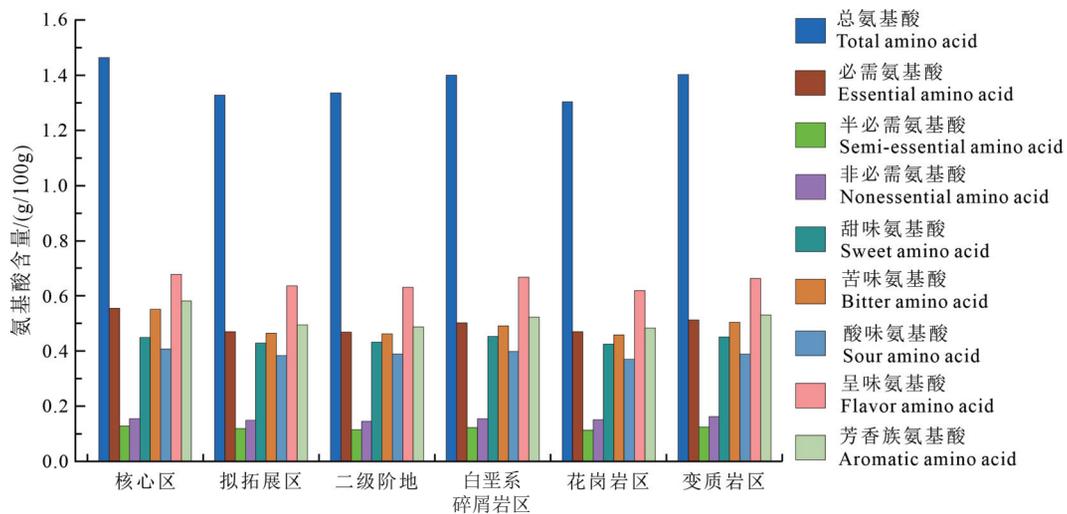


图 2 不同成土母质区芋茛各类氨基酸含量模式

Fig.2 Amino acids content patterns of taro in different soil parent materials

酸高,而非必需氨基酸低,表征吉埠贡芋营养水平高于各对照区芋头;从饮食适口性角度看,呈味氨基酸(能呈现出特殊鲜味的氨基酸)、芳香族氨基酸、鲜香总量、鲜香甜总量高,表征吉埠贡芋适口性好,给进食者的味觉器官予愉悦的鲜爽感。

体现芋头高品质,有些指标以高为好,如显示香味、鲜味的;有些以适中为好,如显示苦味、酸味的;有些指标以略低为好,如膳食纤维、非必需氨基酸;分类指标,以营养价值较高、口感鲜爽、外观柔美为好;总体评判,以综合略高为好。

所谓香、软、嫩、糯、柔、滑、爽、润、绵的口感,即是从吉埠贡芋含量高的蛋白质、碳水化合物、淀粉、维生素和氨基酸得来,是这些有机营养物质最佳含量、最佳组合的理化属性形成最佳的综合效应,使进食者的口腔触觉获得鲜爽美妙的感官享受。

4.3 土壤地球化学与生物地球化学作用机理

吉埠贡芋品质优于普通芋头,贡芋核心区土壤理化性质起着重要作用。植物必需元素 N、P、K、Ca、Mg、S、Si、Cl、Fe、Mn、B、Na、Zn、Cu、Ni、Mo 是植物全生长期最重要的矿质营养元素,土壤有机质(SOM)也非常重要,本文将之合并讨论。

4.3.1 农田土壤中影响芋头品质的主要矿质元素

选取代表性强的根系土壤 PG-22、PG-13、PG-

11、PG-18、PG-8、PG-35、PG-56 样品检测数据与植物样 PZ-29、PZ-20、PZ-18、PZ-30、PZ-15、PZ-35、PZ-65 芋艿检测数据,对根系土壤植物必需元素和有机质含量与芋头有机营养物质(食物成分)含量进行相关性分析,得到它们之间的相关系数。对有一定相关性的元素做主成分分析,利用 Matlab 软件求出各元素的贡献值,标准化处理后,从高到低排序,取累计贡献率≥85% 的元素,就是主要影响芋头有机营养物质的元素,计算结果见表 6。

表 6 中符号“○”代表相关性较好,即视为对芋头有机营养物质(食物成分)含量提高影响较大的植物必需元素和有机质;符号“●”代表植物必需元素和土壤有机质中贡献值较高者,即主成分。如对芋头维生素 C 形成、提高影响较大的植物必需元素和有机质是 N、S、Fe、Ni、Mo、P、K、SOM,而其中贡献度较大的是 N、Mo、SOM,亦即主成分。其余食物成分各指标与植物必需元素和有机质相关系数、主成分依此类推。

4.3.2 对芋艿氨基酸形成与提高起主要作用的矿质营养元素

选取代表性强的根系土壤 PG-22、PG-11、PG-23、PG-8、PG-35、PG-62 样品检测数据与植物样 PZ-29、PZ-18、PZ-30、PZ-15、PZ-35、PZ-82 芋艿检

表 6 根系土壤矿质元素及有机质对芋艿有机营养物质含量贡献值较高的相关系数及主成分一览

Table 6 Correlation coefficients and principal components with high contribution of mineral elements and organic matter in root soil to taro organic nutrient content

元素	能量	蛋白质	脂肪	碳水化合物	膳食纤维	维生素E	维生素B1	维生素B2	维生素C	β-胡萝卜素	淀粉	烟酸	水分
N		○		●●			●		●		○		○
P		●●	●●										
k			○			○				○			
Ca								●●				●●	
Mg						○				○		○	
S	○	○		●●			○		○				
Si		●●					○	○			●●		
Cl				○		●●				●●		○	
Fe	●●			●●			○		○				●●
Mn				○								●●	
B					○	●●				●●			
Na			○										
Zn								●●				●●	
Cu			●●					○				●●	
Ni				○	○			●●	○			○	●●
Mo	●●	○		●●			●●		●●				●●
AN		○					●●		●●		○		○
AP		●●			●●						●●		
AK	○	●●		●●			○		○				●●
SOM		○					●●		●●		○		○

注: ○—相关系数, ●—主成分。

测数据,用上述方法对根系土壤植物必需元素和有机质含量与芋头氨基酸含量进行相关性分析和主成分分析,获得影响芋头氨基酸含量的主要元素,计算结果见表 7。

从营养学角度看,必需氨基酸是较重要的,因为必需氨基酸只能从食物中吸收,非必需氨基酸、半必需氨基酸可在人体内合成。从人类味觉(人类口感)角度看,呈味氨基酸、芳香族氨基酸是较重要的,因为不同种类食物对甜味氨基酸、苦味氨基酸、酸味氨基酸各有偏重,而鲜味、香味则在各种风味中都是重要指标。22 种(本次检测 18 种)氨基酸的不同含量组合,在人类味觉的辨识中代表不同的风味。好比炒菜放盐,咸淡之别,即在食盐添加量的毫厘之间,恰到好处,方显鲜爽。

与对照区相比,贡芋核心区芋头总氨基酸、必需氨基酸、非必需氨基酸、呈味氨基酸、芳香族氨基酸、苦味氨基酸、酸味氨基酸含量均最高;半必需氨基酸、甜味氨基酸含量中上水平。

以人体营养和人类味觉的氨基酸分类,都是氨基酸中多个分量组成,但各有取舍,各分类中的氨基酸分量又有重叠(如苦味氨基酸的 8 种氨基酸中有 6 种是必需氨基酸、4 种是芳香族氨基酸)。根据表 8 的相关系数和主成分数据对各类氨基酸组合做总体分析,结果表明:必需氨基酸由 8 种氨基酸组成,植物必需元素和有机质与各氨基酸分量较高相关系数中出现 5 次以上的有 Zn、K、Cl、Ni、Mg、S、Fe、P;主成分中出现 3 次以上的有 Zn、Fe、S、K、P,即显示在必需氨基酸的形成与提高中,相关性较强的是 Zn、K、Cl、Ni、Mg、S、Fe、P,而贡献度较高的为 Zn、Fe、S、K、P。依此计算,植物必需元素和有机质在其他各类氨基酸的形成与提高中贡献度较高的分别为:半必需氨基酸是 S、Zn;非必需氨基酸是 Ca、K、Fe、S、Zn、P;呈味氨基酸是 K、S、P、Zn、Ca、Fe;芳香族氨基酸是 Zn、S、K、Fe、P;苦味氨基酸是 Zn、S、Fe、K、P、Cu;甜味氨基酸是 Ca、Fe、Zn、K、Mn;酸味氨基酸是 K、S、P。

表 7 芋头氨基酸含量与植物必需元素和有机质相关系数及贡献度较大的主成分一览

Table 7 The correlation coefficient and principal components with a larger contribution within amino acid content of taro and essential elements and organic matter

元素	Asp	Thr	Ser	Glu	Pro	Gly	Ala	Val	Mrt	Ile	Leu	Tyr	Phe	Lys	His	Arg	Cys	Trp	TAA
N					○												○	○	
P		●		○		○					○	○	○	○	○	○		○	○
k		○		○		○				○	○	○	○	○	○	○		○	○
Ca		○		○	○	○	○										○		
Mg		○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				○
S	○	○		○		○				○	○	○	○	○	○	○			○
Si																		○	
Cl		○		○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				○
Fe	○			○		○	○	○	○	○	○			○		○			○
Mn		○		○	○		○	○									○		
B			○																
Na												○		○	○	○			
Zn		○		○		○		○	○	○	○	○	○	○	○	○			○
Cu	○					○		○			○	○				○			○
Ni		○	○	○		○		○	○	○	○	○	○	○	○				○
Mo																		○	
AN					○												○	○	
AP																			
AK				○		○					○	○		○	○	○			○
SOM						○													○

注: ○—相关系数, ●—主成分。

表 8 元素相关系数与主成分较高贡献值出现频度统计

Table 8 Frequency of higher contribution values of element correlation coefficient and principal component

元素	K	P	Zn	S	Fe	Mg	Cl	Ni	Ca	Mn	Cu	N	Na	Mo	SOM	Si	B
总频度	101	96	88	85	77	59	59	55	46	43	39	31	29	19	19	14	11

植物必需元素和土壤有机质在贡芋各有机营养物质形成中都在起作用,但贡献值有高有低。表 6 和表 7 显示的相关系数和主成分,即是贡献值较高的元素。其中每一个氨基酸分量、每一个有机营养物质指标都有若干个贡献值较高的元素;18 种氨基酸按人体营养、人类味觉分成 8 类,每一类都由若干种氨基酸组成。对贡献值较高的元素在各处出现频次进行统计,植物必需元素和土壤有机质总频度见表 8。

表 6、表 7 和表 8 分析结果与植物生理学(潘瑞炽, 2008)、植物营养学(陆景陵, 2003)和有关文献(吴振球, 1985; 王伟, 1985; 孙福增, 1985; 董任瑞, 1985; 王富芳等, 1994; 自由路, 2015)关于元素生理功能的基本原理表述基本吻合。植物必需元素 19 种,除 C、H、O 外的 16 种矿质营养元素各有其不可替代的生理功能。在吉埠贡芋风味物质形成中起主要作用的,为总频度排名前 4 的元素 K、P、Zn、S。首先,目前已知有 60 多种酶需要一价阳离子来活化,而其中钾离子是植物体内最有效的活化剂。由于钾(K)是许多酶的活化剂,所以供钾水平明显影响植物体内碳、氮代谢作用。因此,施钾可以改善作物产品的品质,还可提高作物子粒中的胱氨酸、蛋氨酸、酪氨酸和色氨酸等人体必需氨基酸的含量。其次,磷(P)能增加作物绿色部分的粗蛋白质,并且只有氮磷比例恰当才可提高作物蛋白质的含量。同时,作物脂肪合成过程中需要多种含磷化合物,而糖是合成脂肪的原料,糖的合成、糖转化为甘油和脂肪酸的过程中都需要磷。第三,锌(Zn)是对蛋白质合成影响最大的元素,锌还是合成谷氨酸不可缺少的元素,是谷氨酸脱氢酶的成分;而植物体内谷氨酸是形成其他氨基酸的基础。可见,锌与蛋白质代谢的关系十分密切,如参与生长素的合成,参与色氨酸合成吲哚乙酸,促进吲哚和丝氨酸合成生长素的前体色氨酸等。第四,硫(S)是合成含硫氨基酸如胱氨酸、半胱氨酸和甲硫氨酸所必需的元素;也有认为硫就是半胱氨酸和蛋氨酸的组分,因此,也是蛋白质的组分。土壤施硫可增加作物产品的香味,改善其品质。

此外,铁(Fe)为叶绿素合成所必需的元素,是植物光合作用、生物固氮和呼吸作用中的细胞色素和非血红素铁蛋白的组成。镁(Mg)的一个重要生理

功能是作为核糖体亚单位联结的桥梁元素,能保证核糖体稳定的结构,为蛋白质的合成提供场所;叶片细胞中有大约 75% 的镁是通过上述作用直接或间接参与蛋白质合成的。等等,限于篇幅,在此不一一赘述。

4.4 优越生态地质环境的形成及其叠加效应

苏联土壤学家道库恰耶夫总结出影响土壤形成发展的自然因素有成土母质、气候、生物、地形及时间等五个要素,其中最重要的是母质。母质是构成土壤矿物质部分的基本材料,母质本身不同的矿物和化学组成直接影响土壤的理化性质。

研究区生态地质环境主要分四种类型:早侏罗世花岗岩区和寒武系八村群变质岩区、白垩系赣州组白垩系碎屑岩区和第四系全新世亚砂土及亚黏土层区。

4.4.1 优越生态地球化学场的形成

鉴于不同成土母质区中大量元素、微量元素含量数值差异较大,且表达量纲不一致,难于用绝对值衡量。为便于比较,将岩石元素含量与中国大陆岩石圈的化学元素丰度(黎彤和倪守斌, 1997)的比值、土壤元素含量与江西省 A 层土壤元素背景值(魏复盛, 1990)的比值、水系沉积物元素含量与中国南方地区水系沉积物中元素丰度(程志中等, 2011)的比值进行对比;在公认背景值之外的少数几个元素,如 N、P、S、Cl 及 AN、AP、AK、SOM 等,则采用公开的文献中学术界较为认可的研究结果(黄运湘等, 2001; 刘占军, 2014; 黄忠财, 2014; 杨帆等, 2017)作为引用参数,以便较直观地衡量其含量高低,并揭示岩石→自然土壤→水系沉积物→农田土壤→根系土壤的演化关系。

分别以研究区大量元素 K、微量元素 Ni 在岩石-自然土壤-水系沉积物-农田土壤-根系土壤系统中的演化关系为例,以其与相关参数的比值作成土过程不同阶段演化关系柱状图(图 3)。

图 3 显示:(1)岩石中的 K 含量,花岗岩最高,变质岩第二,白垩系碎屑岩最低;Ni 元素在变质岩最高,白垩系碎屑岩第二,花岗岩最低;其后风化产物形成的自然土壤、水系沉积物、农田土壤、根系土壤都具有同样排序;(2)不同母岩区单源母质类型土壤,凡岩石中含量较高的,经过不同阶段演化的农田土壤、根系土壤中的含量依然较高,反之亦然;

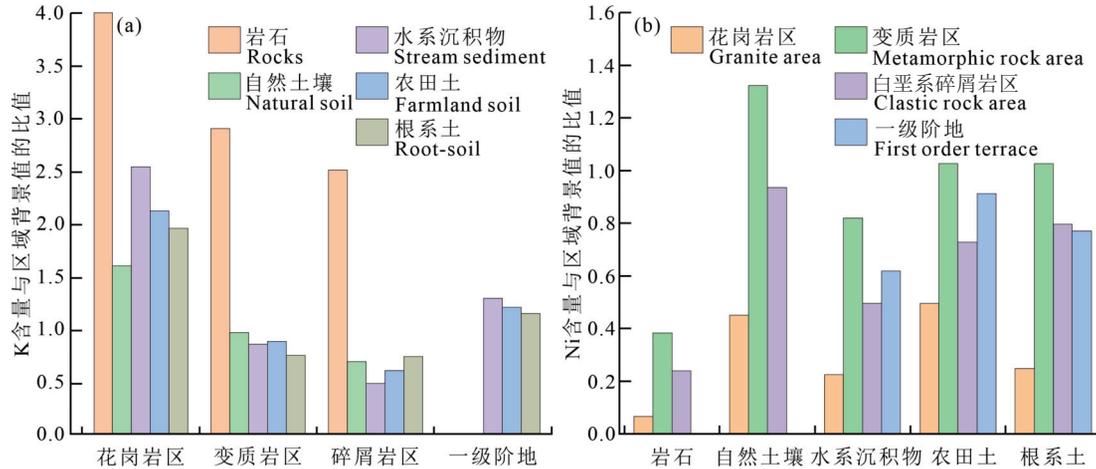


图3 K(a)、Ni(b)在岩石-自然土壤-水系沉积物-农田土壤-根系土壤系统中的演化关系
Fig.3 Evolution of K (a) and Ni (b) in the system of rock-natural soil-river sediment-farmland soil-root-soil

(3)一级阶地的农田土壤、根系土壤 K 含量低于花岗岩区,高于变质岩区、白垩系碎屑岩区;Ni 含量低于变质岩区,高于花岗岩区、白垩系碎屑岩区(个别略有差异,当与施肥水平有关)。

取岩石、土壤检测数据与上述参数的比值,并以其比值高低排序,部分元素在岩石-自然土壤-水系沉积物-农田土壤-根系土壤系统中的演化关系见表9。

表9较好地显示了 Ni、P、K、B、Cu、Mn、Cl

表9 部分必需元素在不同成土母质区岩-土系统含量排序
Table 9 Content ordering of some essential elements in rock-soil systems in different soil parent materials

元素	母岩	岩石	自然土壤	水系沉积物	农田土壤	根系土壤
P	花岗岩区	1	1	1	1	1
	碎屑岩区	3	3	2	3	3
	变质岩区	2	2	3	2	2
K	花岗岩区	1	1	1	1	1
	碎屑岩区	3	3	2	3	3
	变质岩区	2	2	3	2	2
Cl	花岗岩区	3	3	3	3	3
	碎屑岩区	1	2	1	2	1
	变质岩区	2	1	2	1	2
Mn	花岗岩区	1	2	1	1	1
	碎屑岩区	3	3	3	3	3
	变质岩区	2	1	2	2	2
B	花岗岩区	1	1	1	1	1
	碎屑岩区	2	2	2	3	3
	变质岩区	3	3	3	2	2
Cu	花岗岩区	3	3	3	3	3
	碎屑岩区	2	2	2	2	1
	变质岩区	1	1	1	1	2
Ni	花岗岩区	3	3	3	3	3
	碎屑岩区	2	2	2	2	2
	变质岩区	1	1	1	1	1

从岩石-稻田土壤的演化轨迹;图3和表9直观地反映了植物所必需的矿质营养元素从岩石-耕作土壤演化过程的向量关系,这与之前的研究结果甚为吻合(汪振立等,2009a)。

由图3和表9可以看出,花岗岩区、变质岩区、白垩系碎屑岩区岩石中 K、P 元素含量为花岗岩区>变质岩区>白垩系碎屑岩区,Ni、Cu 元素含量为变质岩区>白垩系碎屑岩区>花岗岩区,其后自然土壤、根系土壤含量具有相同的规律(水系沉积物元素含量在上游单一岩性区略有差异,但到下游体现出与一级阶地农田土壤、根系土壤含量模式基本一致,表明大溪河现代水系沉积物代表着一级阶地的土壤母质的继承性);大溪河一级阶地贡芋核心区根系土壤 K、P 元素含量则介于高值的花岗岩与低值的变质岩区、碎屑岩区之间,Ni、Cu 元素含量则介于高值的变质岩区与低值的花岗岩、碎屑岩区之间。表9中 Cl、Mn、B、Fe 以及未列入表中的其他必需元素含量,也都处在近于花岗岩区、变质岩区、碎屑岩区三者的中值状态。表明花岗岩区、变质岩区、碎屑岩区的单源母质类型土壤不同元素含量各有丰缺,组合各有优劣;三大不同土壤母质区的地表泥砂在雨季随山洪经大溪河一路混合搬运到下游河流阶地,形成多源母质类型土壤,在大溪村的下村、罗汾段较开阔的一级阶地,各种土壤母质在这里形成最优组合。

植物必需元素,各有其生理功能;植物对这些矿质营养元素的需要量也各有其阈值,少了不足以

维持植物生理需求,多了又产生毒害;同时元素之间还存在协同作用、拮抗作用。一般地说,岩石、土壤元素含量,以学术界认可的全球(岩石圈、陆壳)、全国或区域性(省、市)背景值衡量,接近于平均值被认为比较合适。以此为衡量依据,研究区内三个单源母质类型土壤区植物矿质营养元素各有丰缺,对芋头的生长繁衍各有不同的正、负面影响。大溪河一级阶地,特别是贡芋核心区,各种植物矿质营养元素比较均衡,其中 N、P、Ca、B、Na、Cu、Mo 略高于相关背景值,特别是 AN、AP、AK 均高于稻田土壤平均值;K、Mg、S、Cl、Fe、Mn、Zn、Ni 略低于相关背景值(但速效钾是稻田土壤参考值的 3.3 倍)。与对照区单源母质类型土壤某些植物矿质营养元素畸高畸低相比,贡芋核心区只是略高略低。由此推断,核心区各种植物矿质营养元素比较均衡,形成最适合于芋头生长、最适合于芋头有机营养物质生成和提高的生态地球化学场。

4.4.2 土壤物理性质的制约因素

土壤物理性质现场原位测定数据和部分采样送权威检测单位检测数据校正后,按不同岩性、不同母质土壤划分,计算平均值(表 10)。由表可知,表征土壤耕性的几项指标中,吉埠贡芋核心区所处的大溪村一级阶地都体现出明显优势:

利用土壤平均粒径、土壤容重、土壤紧实度可预测土壤承载量、耕性和根系伸展的阻力。土壤粒径和土壤紧实度的大小可影响作物根系的穿孔和生长,紧实土壤可阻止水分的入渗,降低化肥的利用率,影响植物根系生长,导致作物减产。变质岩区多为重壤土、黏土,土壤平均粒径较小,土壤容重、紧实度较大,对芋头块根生长较为不利;花岗岩区土壤平均粒径较大,土壤容重较小,土壤含水量低,保水保肥性能较差,也影响芋头产量。贡芋核心区农田土壤容重略高于花岗岩区,也低于其他对

照区,土壤紧实度低于各对照区,对芋头块根的发

育膨大和形成令人舒适的市场表现最为有利。旱地土壤的正常 Eh 为 200~750 mV,若大于 750 mV,则土壤完全处于氧化状态,有机质消耗过快,有些土壤养分由此丧失有效性;若小于 200 mV,则表明土壤水分过多,通气不良。稻田土壤适宜的 Eh 值在 200~400 mV,若 Eh 经常在 180 mV 以下或低于 100 mV,则水稻分蘖或生长发育受阻。若长期处于-100 mV 以下,水稻会严重受害甚至死亡;同理,芋头分生组织发育也会受阻,故此时应及时排水晒田以提高其 Eh 值。芋头种植的整个生长期,有时需要漫灌,有时需要晒田,即干湿交替,前期漫灌多,后期晒田多。贡芋核心区 Eh 值较高,通气性较好,即处于较好的氧化状态,有利于作物对养分的吸收。

与核心区罗汾紧邻的大溪河下游牛水塘,有大片的一级阶地农田,土壤母质与核心区较接近,但基本不种芋头。偶尔种植,所产芋头煮不烂,口感不好,原因在于地势低,排水不良,Eh 经常在 180 mV 以下甚至低于 100 mV,一些矿质营养元素长期处于还原状态,好氧菌减少,厌氧菌增多,不利于芋头生长发育。这也与前人的研究相吻合,如 Abd El-Aal et al.(2019)研究认为土壤水分含量是限制芋头产量的重要因素,土壤水分太高会导致芋头叶中光合色素(叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素)含量降低;Vieira et al.(2018)和 Hiroki et al.(2022)研究认为控制土壤水量的栽培技术可以提高芋头的多酚水平、抗氧化活性和产量。

4.4.3 优越的灌溉条件

贡芋核心区优越灌排条件首先体现在地势优越,灌排方便,因芋头生长期需要干湿交替,要水时能快速漫灌;要晒田时又能快速排干;其次是水源水量充足,贡芋核心区主要依靠大溪河陂渠引水灌

表 10 不同成土母质区农田土壤物理性质差异

Table 10 Differences of physical properties of farmland soil within different soil parent materials

土壤分区	土壤平均粒径 D_{50}/mm	土壤容重 (g/cm^3)	土壤紧实度 (kg/cm^2)	土壤水分/%	Eh/mV	pH	LOI/%
一级阶地	0.18	1.12	13.18	52.36	495.56	5.36	4.96
二级阶地	0.19	1.21	13.95	46.97	453.52	5.39	4.76
花岗岩区	0.45	1.08	20.47	35.40	429.80	4.85	7.34
白垩系碎屑岩区	0.31	1.27	20.49	42.49	421.26	5.16	3.84
变质岩区	0.13	1.40	23.77	41.87	413.18	4.65	4.83

注:贡芋核心区在一级阶地。

溉,遇上干旱,还有小水库可补充,灌溉水常年基本有保障;第三是水质好,上游无矿山、无工厂,经水质检测,上游大多可达二类水质标准,中下游灌溉水全部符合灌溉水标准,水中矿物质含量模式与土壤元素含量模式近似,在芋头生长发育中的生物作用也相似。

由于研究区水样检测结果未见有对贡芋品质起特别作用的物质,本文不做深入的讨论。

4.4.4 生态地质环境理化性质的综合效应

研究区的地质分区主要分变质岩区、白垩系碎屑岩区、花岗岩区、河流阶地四大部分(图 1),变质岩区、白垩系碎屑岩区、花岗岩区农田土壤均为单源母质类型土壤母质,大溪河中下游河流阶地为多源母质类型土壤母质,土壤物理性质和土壤地球化学性质各有其特征。

变质岩区多为重壤土,部分为黏土,土壤平均粒径最小(表 10),通气性、透水性较差,保水保肥能力较好;土壤矿质营养元素中, Ca、P、Mn、Zn、Cu、Ni、Mo、AP、AK、均高于参考值, TN、K、Mg、Cl、Na、AN 及 SOM 均低于参考值,其中 TN、AN 分别为参考值的 0.61、0.79 倍, Na 仅为参考值的 0.48 倍,不能满足芋头生长需要,而 Ca、AK 分别为参考值的 3.61、4.81 倍,又显多余。

白垩系碎屑岩区多为砂土,部分为砂壤土,土壤平均粒径较大,通气性、透水性好,保水保肥能力稍差;土壤矿质营养元素中, P、Ca、S、Cl、Fe、B、Zn、Cu、Mo、AN、AK 及 SOM 均高于参考值, N、K、Mg、Mn、Na、Ni、AP 均低于参考值,其中 K、Mn、Na 分别为参考值的 0.736、0.685、0.646 倍, AP 仅为参考值的 0.29 倍(增施石灰可使磷成为不可给态,分析可能与该区域农民施用过石灰有关)。

花岗岩区多为砂土,部分为砂壤土,土壤平均粒径最大,通气性、透水性好,保水保肥能力较差;土壤矿质营养元素中, N、P、K、Cl、B、Na、Zn、Mo、AN、AK 及 SOM 均高于参考值, Ca、Mg、S、Fe、Mn、Cu、Ni、AP 均低于参考值。其中 Mg、Fe 分别为参考值的 0.544、0.598 倍,因作物能强烈吸收,基本够用; Ni 仅为参考值的 0.249 倍,不能满足芋头生长需要,而 B、AK 分别为参考值的 5.408、3.69 倍,又显多余。同时, B 过高,有可能引

起植物 B 中毒;此外,元素间有拮抗作用,多 B 影响 Fe 的吸收和降低植物体中 Fe 的含量(表 11)。

表 11 硼过高影响植物对铁的吸收 (mg/kg)
Table 11 Excessive B affects the absorption of Fe by plants

取样位置	根系土壤B	根系土壤Fe	芋头Fe
核心区	88.88	19594.86	18.58
花岗岩区	245	17228.55	11.18
白垩系碎屑岩区	46.93	23453.21	29.73
变质岩区	78.7	20678.93	19.40
罗汾	94.2	20632.3	32.6
左龙寨	465	13498.42	6.78
塘尾	37.5	18324.28	41.3
孟坑	51.7	16016.26	18.2

注:罗汾(核心区)、左龙寨(花岗岩区)、塘尾(白垩系碎屑岩区)、孟坑(变质岩区)。

样点罗汾(核心区)、左龙寨(花岗岩区)、塘尾(白垩系碎屑岩区)、孟坑(变质岩区)检测结果。由表 2、表 11 可知,花岗岩区根系土壤 B 含量为江西省土壤 A 层元素背景值的 5.41 倍,最高的左龙寨为 10.26 倍,其他各区为 1.04~1.96 倍;花岗岩区根系土壤 Fe 含量为江西省土壤元素背景值的 0.598 倍,其他各区为 0.997~1.062 倍,差距不大。花岗岩区尤其是左龙寨芋头 Fe 含量低,是芋头对 Fe 的吸收、积累受 B 的抑制。芋头对 Fe 的吸收、积累少,一方面在芋头生长发育期可能产生某些障碍;另一方面则表明芋头作为食品的营养价值较低,即存在营养素不均衡的缺陷。

贡芋核心区为潮土,通气性、透水性好,保水性能较差,但此地灌溉条件好,易灌易排;土壤矿质营养元素中, TN、P、Ca、B、Na、Cu、Mo、AN、AP、AK 及 SOM 均高于参考值, K、Mg、S、Cl、Fe、Mn、Zn、Ni 均低于参考值,其中 K、S、Zn 分别为参考值的 0.933、0.821、0.994 倍,与参考值很接近; Mg、Cl、Mn、Ni 分别为参考值的 0.701、0.77、0.616、0.771 倍,都能满足芋头生长需要,除 AK 达参考值的 3 倍,其他都在 1.96 倍以内,即没有元素毒害问题。与其他河流阶地潮土相比,此处潮土中云母含量较高。细小的云母碎片,既有利于土壤疏松,又作为 K、Al 元素的潜在资源库之一,可源源不断地补充到农田土壤中,是贡芋核心区 AK 含量高的物质基础之一。

与各对照区比较,贡芋核心区土壤物理性质各项指标体现土壤耕性优势,土壤粒径、土壤容重、土

壤紧实度等都对块根类作物最为有利;保水性能虽然较差,但芋头需要干湿交替,良好的灌溉条件可弥补其不足。

三大对照区土壤物理特性、土壤地球化学特性各有缺陷,均由地质建造所决定。贡芋核心区混合了三大地质建造的成土母质,扬长避短,自然天成。贡芋的独特风味,是独特的生态地质环境造就优良的土壤物理特性、土壤地球化学特性与生物地球化学特性综合作用、叠加效应的产物。

由贡芋核心区和各对照区芋头品质与生态地质环境关系剖析,结合以往研究成果(汪庆华, 2004; 汪振立等, 2009a, 2010)分析可得出结论:作物种植土壤环境中各植物必需元素及其他非必需元素含量,与区域(市域、省域或全国)土壤背景值或相关参考值基本相当为好。某些元素含量畸高畸低,容易造成作物某种生理障碍,影响作物品质、产量;某些元素含量略高略低,不妨碍作物正常生长繁衍;依元素生物功能不同和作物生理需求不同,部分略高部分略低,则正好形成某种最优土壤地球化学组合;优良的营养素(矿质、有机质)组合,需要有优良的土壤物理条件配合,方能发挥优良的生物效应;当土壤理化性状某种优化组合达到稳态时,便造就了某些作物特殊风味形成的条件。这一规律性认识对其他植物的生态地质环境研究亦当有借鉴意义。

4.5 保持优质品牌的种植建议

(1)核心区的科学利用与保护。减少化肥、农药的使用,尤其要禁用除草剂。多用农家肥,传统的草皮(地表青草连根带泥铲出)加麸饼堆沤培肥、大粪、牛粪等是最佳的有机肥料。坚持传统种植、管理方式方法,才能保持贡芋的风味不变。

(2)优质芋头种植区的适当拓展。吉埠贡芋核心区均在大溪河下游一级阶地;大溪河中、上游如建节村寺下、石头丘、鹅颈坑的一级阶地农田(共约近 6.5 hm²),与大溪村核心区农田土壤母质基本同源,其土体结构、土壤质地非常近似,对土壤适当改良,提高种植技术、改进管理方式方法,有望产出与贡芋品质相当的芋头,可作为贡芋拓展区(图 1)。大溪村、建节村二级阶地农田面积较大(共约 50 hm²),如参照一级阶地土壤理化性质做一些改造,并实施核心区种植管理标准,也可提高芋头品质。

(3)地质环境的理化性质影响作物产量、质量的生态地质学作用机理非常复杂,尚须做更深入的研究。

5 结论

(1)吉埠贡芋品质优良主要体现在:能量、蛋白质、碳水化合物、维生素 B₁、淀粉、氨基酸等含量较高,而膳食纤维、脂肪较低;总氨基酸含量高,同时,按人体营养和人类味觉分类,必需氨基酸、半必需氨基酸、苦味氨基酸、呈味氨基酸、芳香族氨基酸以及鲜香总量、鲜香甜总量、芳香氨基酸/总氨基酸比值均比各对照区高;但非必需氨基酸较低。这是吉埠贡芋具有“香、软、嫩、糯、柔、滑、爽、润、绵”特征,营养丰富,口感鲜爽的物质基础。

(2)以《中国食物成分表》所列 10 个矿质营养元素计,高于营养元素平均值、低于食品卫生限量值的元素主要有: Cu、Zn、P、K、Mn、Ca、Mg、Fe 等,表明有利人体健康的无机营养元素含量也较高。

(3)影响吉埠贡芋有机营养物质形成、提高并形成独特风味的主要矿质元素是 K、P、Zn、S,其次为 Fe、Mg、Cl、Ni、Mn、Ca、Cu、Mo 和 SOM 等。

(4)含量略高于土壤背景值或相关参考值的 N、P、K、B、Zn、Cu、Mo、TR、AN、AP、AK、SOM 与含量略低于土壤背景值或相关参考值的 Mg、S、Cl、Fe、Na、Ni 组合,形成核心区最有利于芋头生长繁衍的生态地球化学场。

(5)土壤物理性状对吉埠贡芋产量、品质的主要影响体现在:土壤平均粒径偏小,土壤容重、土壤紧实度较低;土壤灼烧减量、pH 值适中;土壤水分、土壤 Eh 值较高,由此形成良好的土壤耕性。

(6)芋头种植土壤环境中各植物必需元素及其他非必需元素含量,与区域(市域、省域或全国)土壤背景值或相关参考值基本相当为好。某些元素含量畸高畸低,容易造成芋头某种生理障碍,影响芋头品质;某些元素含量略高略低,不妨碍芋头正常生长繁衍;依元素生物功能不同且与贡芋生理需求契合,部分略高部分略低,则正好形成一种最优土壤地球化学组合;优良的矿质营养组合,需要有优良的土壤物理条件配合,方能发挥优良的生物效应;当土壤理化性状一种优化组合达到稳态时,便

造就了芋头特殊风味形成的条件。这一规律性认识可为其他作物种植环境的研究提供参考,对其他植物的生态地质环境研究亦当有借鉴意义。

致谢: 研究工作中得到中国地质调查局武汉地质调查中心生态地质调查项目组、赣县自然资源和吉埠镇政府、大溪村和对照区有关村干部群众的支持;江西应用技术职业学院数学建模协会师生协助做部分数据处理工作,在此一并致谢!

References

- Abd El-Aal M, El-Anany A, Rizk S M. 2019. Rationalization of water consumption for taro plant through the rationing of irrigation and expand the plant ability to resist stress conditions[J]. *International Journal of Plant & Soil Science*, 29(4): 1–23.
- Bai Youlu. 2015. Review on research in plant nutrition and fertilizers[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 48(17): 3477–3492 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Zhizhong, Xie Xuejin, Pan Hanjiang, Yang Rong, Shang Yuntao. 2011. Abundance of elements in stream sediment in South China[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(5): 289–295 (in Chinese with English abstract).
- Dai Yanli, Wu Hulong, Yang Xianghong, Liu Lecheng. 2018. Research progress of taro cultivation techniques in China[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 15(22): 9–12 (in Chinese).
- Deng Yingyi, He Jianan, Hu Guorui, Wu Yu, Peng Jiechun, Huang Junhao, Qu Xiao, Liu Tiao, Zhao Rongmei, Huang Xuan, Jiang Sisi. 2020. Comparison of fruit quality and amino acid composition of different red pitaya varieties[J]. *South China Fruits*, 49(2): 61–70 (in Chinese).
- Deo P C, Tyagi A P, Taylor M, Becker D K, Harding R M. 2009. Improving taro (*Colocasia esculenta* var. *esculenta*) production using biotechnological approaches[J]. *The South Pacific Journal of Natural Science*, 27(1): 6–13.
- Dong Renrui. 1985. Present situation and development of plant mineral nutrition (V): Interaction of elements in plant mineral nutrition[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, (5): 38–42 (in Chinese).
- Gao Lin, Chen Xiaoyuan, Lin Changhua, Wang Wei, Zhang Yupeng. 2018. Characteristics of soil profile and nutrient change of fragrant taro typical region in Shaoguan[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 31(9): 1864–1869 (in Chinese with English abstract).
- Gao Lin, Lu Wenting, Lin Changhua, Feng Huimin. 2022. Development characteristics of typical soil profile of fragrant taro region in northern Guangdong[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 38(10): 85–91 (in Chinese with English abstract).
- Gao W, Wang Y, Wang R, Wang Y, Xu J, He X. 2022. Antiproliferative piperidine alkaloids from giant taro (*Alocasia macrorrhiza*) [J]. *Chinese Journal of Natural Medicines*, 20(7): 541–550.
- Goenaga R, Chardon U. 1995. Growth, yield and nutrient uptake of taro grown under upland conditions[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 18(5): 1037–1048.
- Han Xiao, Zhang Dongxu, Wang Lei, Li Qi. 2018. Research progress on the nutrition components and processing and utilization[J]. *China Fruit & Vegetable*, 38(3): 9–13 (in Chinese with English abstract).
- Hudeer Chaonu, Yang Limin, Lu Sha. 2016. Analysis and evaluation of amino acids in potato from three different producing areas[J]. *World Latest Medicine Information*, 16(93): 112–113 (in Chinese).
- Hu Shiyuan, Tian Jianchun. 2002. Ginger taro paste for arthritis[J]. *Chinese Community Doctors*, (16): 36 (in Chinese).
- Hu Z Y, Herfried R, Gerd S, Ewald S. 2004. Physiological and biochemical effects of rare earth elements on plants and their agricultural significance: A review[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 27(1): 183–220.
- Huang Yunxiang, Zhang Yangzhu, Liu Peng, Ma Yuehua, Zhou Qing. 2001. Effects of rice-based cropping system, organic manure and ground water level on Sulphur status in paddy soil[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 27(3): 205–208 (in Chinese with English abstract).
- Huang Zhongcai. 2014. Preliminary study on abundance and deficiency index of nitrogen, phosphorus and potassium in rice soil in Taining County[J]. *South China Agriculture*, 8(24): 146–148 (in Chinese).
- Hiroki Y, Kanae T, Nobuyuki M, Kazuhiro I, Michio O, Yuji M, Katsuko K. 2022. Effects of flooding cultivation on the composition and quality of taro (*Colocasia esculenta* cv. *Daikichi*) [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(4): 1372–1380.
- Jiang Dongming. 2012. Occurrence cause and control measures of taro blight in 2012[J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, (12): 50–51 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Gaosong, Ramsd L. 1998. Application of taro in food processing[J]. *China Food Industry*, (12): 14 (in Chinese).
- Jiang Yin, Xu Ying, Zhu Gengbo. 2002. Human taste and amino acid taste[J]. *Biotic Resources*, 24(4): 1–3 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Zepu, Huang Yuyi, Lei Yibao, Deng Jun. 1993. Analysis and evaluation of soil chlorine content in cultivated land in Guangxi[J]. *Journal of Southern Agriculture*, (6): 269–272 (in Chinese).
- Jing Lin, Guan Yunna, Wang Chengrong. 2015. Optimization of composite enzymatic processing technology on taro (*Colocasia esculenta*) wine[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 6(6): 2100–2108 (in Chinese with English abstract).
- Li Tong, Ni Shoubin. 1997. Element abundances of the continental lithosphere in China[J]. *Geology and Exploration*, 33(1): 31–37 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhanjun. 2014. *Nutrient Characteristics and Quality Assessment of Low-yield Paddy Soil in South China* [D]. Beijing: China

- Agricultural University, 1–95 (in Chinese).
- Lu Jingling. 2003. *Plant Nutrition (Second Edition)*[M]. Beijing: China Agricultural University Press (in Chinese).
- Luo Qin, Li Dongmei, Zhong Maosheng, Zhu Pingling, Huang Minmin, Rao Qiuhua, Liu Yang, Pan Wei, Luo Tuyan. 2020. Nutritional compositions of female and male murray cod filets[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 35(1): 51–58 (in Chinese with English abstract).
- Mohd S, Mohd F, Noraini T, Syarul N, Hamidun B. 2019. A review on viruses infecting taro (*Colocasia esculenta* (L.) Schott)[J]. *Pathogens*, 8(56): 1–13.
- Osorio N W, Shuai X, Miyasaka S, Wang B, Shirey R L, Wigmore W J. 2003. Nitrogen level and form affect taro growth and nutrition[J]. *HortScience*, 38(1): 36–40.
- Pan Ruizhi. 2008. *Plant Physiology (Sixth Edition)*[M]. Beijing: Higher Education Press (in Chinese).
- Rainer R F, Aimee C, Chavez C. 2016. Development and physicochemical evaluation of wine from taro corms (*Colocasia esculenta*)[J]. *International Journal of Science and Research*, 5(9): 146–151.
- Rashmi D, Raghu N, Gopenath T, Pradeep P, Pugazhandhi B, Murugesan K, Ashok G, Ranjith M, Chandrashekrappa G, Kanthesh M. 2018. Taro (*Colocasia esculenta*): An overview[J]. *Journal of Medicinal Plants Studies*, 6(4): 156–161.
- Suja G, Byju G, Jyothi A N. 2017. Yield quality and soil health under organic vs conventional farming in taro[J]. *Scientia Horticulturae*, 218: 334–343.
- Sun Fuzeng. 1985. Present situation and development of plant mineral nutrition (IV): Mechanism of mineral absorption by plants[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, (8): 38–43 (in Chinese).
- Sun Qianqian, Zhao Huan, Lü Huifeng, Wang Zhengyin, Cai Guoxue, Han Zhunan, Wang Yang. 2010. Effect of balanced fertilization on yield, quality and economic benefit in taro[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, (2): 55–60 (in Chinese with English abstract).
- Teng Wei, Liu Qi, Li Jian, Lu Shaochun. 1992. Analysis of amino acid content in taro[J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, (3): 336–338 (in Chinese).
- Vieira G, Peterle G, Loss J, Peterle G, Magno P. 2018. Strategies for taro (*Colocasia esculenta*) irrigation[J]. *Journal of Experimental Agriculture International*, 24(1): 1–9.
- Wang Fufang, Li Lu, Liu Shangyi, Gao Zhi, Wang Dinghui. 1994. Essential trace elements for crops and their physiological functions[J]. *Crops*, (4): 34–36 (in Chinese).
- Wang Jiaofei, Huang Youru, Qian Yaping, Zhao Lin, Chen Yin. 2015. Rheological properties of taro protein isolate[J]. *Food Science*, 36(9): 17–21 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wei. 1985. Present situation and development of plant mineral nutrition (III): Physiological functions of trace elements and rational application of trace fertilizers[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, (6): 40–42 (in Chinese).
- Wang Qinghua. 2004. An overview of agrogeological environmental surveys in Zhejiang[J]. *Geology in China*, 31(S1): 30–39 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhenli, Deng Tongde, Wang Ruimin, Shao Wenjun, Xu Ming, Liao Wanqi. 2009a. Characteristics of migration and accumulation of rare earth elements in the rock–soil–navel orange system[J]. *Geology in China*, 36(6): 1382–1394 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhenli, Xu Ming, Deng Tongde, He Xiaoxiong, Chen Shuimu, Ouyang Jinsheng, Xing Qingming. 2009b. Accumulation features of rare elements in navel orange plant and nature soil environment[J]. *Journal of The Chinese Rare Earth Society*, 27(5): 704–710 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhenli, Deng Tongde, Hu Zhengyi, Xu Ming, Hu Kandong, Xing Qingming. 2010. Correlation analysis between navel orange quality and REE in natural soil[J]. *Soils*, 42(3): 459–466 (in Chinese with English abstract).
- Wei Fusheng. 1990. *Background Values of Soil Elements in China*[M]. Beijing: China Environmental Publishing (in Chinese).
- Wei Qiuyu, Zhang Zhongyuan, Li Dajing, Jiang Ning, Jin Bangquan, Liu Chuanqiu. 2016. Quality changes in different varieties of taro treated by microwave vacuum drying[J]. *Modern Food Science and Technology*, 32(1): 235–241 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yanwen, Ouyang Jie. 2001. Taste–producing effect of amino acid and peptides in food[J]. *China Condiment*, (1): 21–24 (in Chinese).
- Wu Zhenqiu. 1985. Present situation and development of plant mineral nutrition (II): Physiological and biochemical functions of essential mineral elements in plants[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, (5): 41–45 (in Chinese).
- Yang Fan, Xu Yang, Cui Yong, Meng Yuanduo, Dong Yan, Li Rong, Ma Yibing. 2017. Variation of soil organic matter content in croplands of China over the last three decades[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 54(5): 1047–1056 (in Chinese with English abstract).
- Yang Fei. 2017. The Study of Soil Conditions on the Quality of *Stuednera Henryana*[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 1–41 (in Chinese).
- Yang Yuexin. 2018. *China Food Composition Tables (Standard Edition)*[M]. Beijing: Peking University Medical Press (in Chinese).
- Zeng Fankui, Xu Dan, Liu Gang. 2015. Potato nutrition: A critical review[J]. *Chinese Potato Journal*, 29(4): 233–243 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Miao, Li Gangfeng, Zhan Lufei, Liu Qingqing. 2018. Determination and analysis of nutrient composition of edible parts from *Colocasia esculenta* (L.). Schott[J]. *Journal of Tongren University*, 20(3): 20–23 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 自由路. 2015. 植物营养与肥料研究的回顾与展望[J]. *中国农业科学*, 48(17): 3477–3492.

- 程志中, 谢学锦, 潘含江, 杨榕, 商云涛. 2011. 中国南方地区水系沉积物中元素丰度[J]. 地学前缘, 18(5): 289-295.
- 戴艳丽, 吴湖龙, 杨柳依, 杨湘虹, 刘乐承. 2018. 我国芋头栽培技术研究进展[J]. 长江大学学报(自科版), 15(22): 9-12.
- 邓英毅, 何嘉楠, 胡国瑞, 吴玉, 彭杰椿, 黄俊豪, 屈啸, 刘涛, 赵蓉梅, 黄萱, 蒋丝丝. 2020. 不同红肉火龙果品种的果实品质和氨基酸组成比较[J]. 中国南方果树, 49(2): 61-70.
- 董任瑞. 1985. 植物矿质营养的现状与发展(五)——植物矿质营养中元素间的相互作用[J]. 湖南农业科学, (5): 38-42.
- 高琳, 陈晓远, 林昌华, 王卫, 张宇鹏. 2018. 韶关市典型香芋产区土壤剖面特征及其养分变化研究[J]. 西南农业学报, 31(9): 1864-1869.
- 高琳, 卢文婷, 林昌华, 冯慧敏. 2022. 粤北香芋种植区典型土壤剖面发育特征[J]. 中国农学通报, 38(10): 85-91.
- 韩笑, 张东旭, 王磊, 李琪. 2018. 芋头的营养成分及加工利用研究进展[J]. 中国果菜, 38(3): 9-13.
- 呼德尔朝鲁, 杨丽敏, 卢莎. 2016. 三种不同产地马铃薯氨基酸分析与评价[J]. 世界最新医学信息文摘, 16(93): 112-113.
- 胡士元, 田建春. 2002. 姜汁芋头糊治疗关节炎[J]. 中国社区医师, (16): 36.
- 黄运湘, 张杨珠, 刘鹏, 冯跃华, 周清. 2001. 稻作制与有机肥及地下水对水稻土硫素状况的影响 I. 全硫和有效硫含量[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 27(3): 205-208.
- 黄忠财. 2014. 泰宁县水稻土壤氮、磷、钾丰缺指标初步研究[J]. 南方农业, 8(24): 146-148.
- 姜东明. 2012. 2012年芋头疫病大发生原因分析及防治对策[J]. 福建农业科技, (12): 50-51.
- 蒋高松, Ramsd L. 1998. 芋头在加工食品中的应用[J]. 中国食品工业, (12): 14.
- 蒋滢, 徐颖, 朱庚伯. 2002. 人类味觉与氨基酸味道[J]. 氨基酸和生物资源, 24(4): 1-3.
- 江泽普, 黄玉溢, 雷一宝, 邓军. 1993. 广西耕地土壤氯含量分析与评价[J]. 广西农业科学, (6): 269-272.
- 荆琳, 贯云娜, 王成荣. 2015. 复合酶法生产芋头酒工艺条件优化[J]. 食品安全质量检测学报, 6(6): 2100-2108.
- 黎彤, 倪守斌. 1997. 中国大陆岩石圈的化学元素丰度[J]. 地质与勘探, 33(1): 31-37.
- 刘占军. 2014. 我国南方低产水稻土养分特征与质量评价[D]. 北京: 中国农业大学, 1-95.
- 陆景陵. 2003. 植物营养学(第二版)[M]. 北京: 中国农业大学出版社.
- 罗钦, 李冬梅, 钟茂生, 朱品玲, 黄敏敏, 饶秋华, 刘洋, 潘葳, 罗士炎. 2020. 澳洲龙纹斑雌、雄亲鱼营养组成比较分析[J]. 福建农业学报, 35(1): 51-58.
- 潘瑞焯. 2008. 植物生理学(第六版)[M]. 北京: 高等教育出版社.
- 孙福增. 1985. 植物矿质营养的现状与发展(四)——植物对矿质吸收的机理[J]. 湖南农业科学, (8): 38-43.
- 孙倩倩, 赵欢, 吕慧峰, 王正银, 蔡国学, 韩淮安, 王洋. 2010. 平衡施肥对芋头产量、品质和经济效益的影响[J]. 长江蔬菜(学术版), (2): 55-60.
- 滕葳, 柳琪, 李坚, 陆绍椿. 1992. 芋头中氨基酸含量的分析[J]. 营养学报, (3): 336-338.
- 王富芳, 李路, 刘尚义, 高质, 汪定淮. 1994. 作物必需微量元素及其生理功能[J]. 作物杂志, (4): 34-36.
- 王教飞, 黄友如, 钱雅萍, 赵琳, 陈茵. 2015. 芋艿分离蛋白质的流变特性[J]. 食品科学, 36(9): 17-21.
- 王纬. 1985. 植物矿质营养的现状与发展(三)——微量元素的生理作用及微肥的合理应用[J]. 湖南农业科学, (6): 40-42.
- 汪庆华. 2004. 浙江省农业地质环境调查项目工作进展综述[J]. 中国地质, 31(S1): 30-39.
- 汪振立, 邓通德, 王瑞敏, 邵文军, 徐明, 廖万琪. 2009a. 岩石-土壤-脐橙系统中稀土元素迁聚特征[J]. 中国地质, 36(6): 1382-1394.
- 汪振立, 徐明, 邓通德, 贺小雄, 陈水木, 欧阳锦盛, 幸清明. 2009b. 自然土壤环境下脐橙植物体稀土累积特征[J]. 中国稀土学报, 27(5): 704-710.
- 汪振立, 邓通德, 胡正义, 徐明, 胡堪东, 幸清明. 2010. 脐橙品质与自然土壤中稀土元素相关性分析[J]. 土壤, 42(3): 459-466.
- 魏复盛. 1990. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 魏秋羽, 张钟元, 李大婧, 江宁, 金邦荃, 刘春泉. 2016. 不同芋头品种真空微波干燥品质变化的比较[J]. 现代食品科技, 32(1): 235-241.
- 武彦文, 欧阳杰. 2001. 氨基酸和肽在食品中的呈味作用[J]. 中国调味品, (1): 21-24.
- 吴振球. 1985. 植物矿质营养的现状与发展(二)——植物必需的矿质元素的生理生化作用[J]. 湖南农业科学, (5): 41-45.
- 杨帆, 徐洋, 崔勇, 孟远夺, 董燕, 李荣, 马义兵. 2017. 近30年中国农田耕层土壤有机质含量变化[J]. 土壤学报, 54(5): 1047-1056.
- 杨飞. 2011. 土壤条件对香芋品质影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 1-41.
- 杨月欣. 2018. 中国食物成分表(标准版)[M]. 北京: 北京大学医学出版社.
- 曾凡逵, 许丹, 刘刚. 2015. 马铃薯营养综述[J]. 中国马铃薯, 29(4): 233-243.
- 朱苗, 李刚凤, 詹露菲, 刘庆庆. 2018. 铜仁芋食用部位营养成分测定与分析[J]. 铜仁学院学报, 20(3): 20-23.