

顾涛, 朱晓华, 赵信文, 等. 广州新垦莲藕产区莲藕品质与地球化学条件的关系[J]. 岩矿测试, 2021, 40(6): 833 - 845.

GU Tao, ZHU Xiao-hua, ZHAO Xin-wen, et al. Relationship between Lotus Root Quality and Geochemical Conditions in the Xinken Lotus Root Producing Area of Guangzhou[J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(6): 833 - 845.

【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.202109290136】

## 广州新垦莲藕产区莲藕品质与地球化学条件的关系

顾涛<sup>1,2,3,4</sup>, 朱晓华<sup>1</sup>, 赵信文<sup>4</sup>, 江拓<sup>4</sup>, 邱啸飞<sup>2,4</sup>, 郑小战<sup>5</sup>, 帅琴<sup>3\*</sup>

1. 自然资源部生态地球化学重点实验室, 国家地质实验测试中心, 北京 100037;
2. 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心, 中南地质科技创新中心, 湖北 武汉 430205;
3. 中国地质大学(武汉)材料与化学学院, 湖北 武汉 430074;
4. 中南地质科技创新中心, 湖北 武汉 430205;
5. 广州市地质调查院, 广东 广州 510440)

**摘要:** 名优特农产品品质与产区环地质背景条件密切相关。广州新垦莲藕是国家地理标志产品, 探讨其产区地质背景与莲藕品质的关系对于新垦莲藕的规模化种植有重要意义。本文通过系统采集新垦莲藕产地藕塘底泥、地表水、新鲜莲藕样品, 采用电感耦合等离子体质谱/发射光谱法(ICP-MS/OES)等多种技术进行测试, 开展品质评价研究, 初步揭示了新垦莲藕品质与产区环境地球化学条件之间的相关性。研究表明: 藕塘底泥中营养元素锰、锌、钼、钴、钒、铁均处在一等(丰富)等级, 砷以适量和高砷等级为主, 重金属铬、铜、汞、镍、铅、镉均低于农用地土壤污染风险筛选值; 藕塘地表水中铜、锌、砷、镉、汞、钼、六价铬、铅、镍等指标均满足灌溉水质要求; 产出的新垦莲藕淀粉、可溶性糖、钾、磷、钙、镁、铁、锌、砷的含量较高, 重金属和粗纤维含量较低; 莲藕对底泥中不同元素生物富集系数平均值范围为 0.0484 ~ 65.67, 对磷的富集能力最强, 对锗的富集能力最弱。藕塘底泥中硼与莲藕中淀粉显著正相关( $p \leq 0.05$ ), 钙与蛋白质显著性正相关, 砷与可溶性糖显著负相关。藕塘底泥中硼钴铁镁锰钒钙锗的含量较高, 有利于莲藕营养组分的积累, 产出高品质的莲藕。本文提出在种植过程中重视有机质、钙、氮和锗等养分的补充, 关注镉和砷带来的潜在生态安全风险。

**关键词:** 新垦地区; 底泥; 地表水; 电感耦合等离子体质谱/发射光谱法; 地球化学条件; 莲藕品质

**要点:**

- (1) 系统采集和测试评价了新垦莲藕藕塘底泥、地表水及莲藕中的组分信息特征。
- (2) 新垦莲藕生长的水土环境总体较为清洁, 重金属含量较低; 底泥营养元素丰富, 硼钴铁镁锰钒钙锗含量高, 利于莲藕营养组分的积累。
- (3) 新垦莲藕对营养元素的吸收富集能力大于对重金属的吸收富集能力。

中图分类号: O657.63; O657.31 文献标识码: A

随着国民社会经济增长和物质生活水平不断提高, 人们对高品质农产品需求增加, 名优特农产品备

受消费者青睐。名优特农产品品质的形成与其特定的地质背景息息相关, 根据名优特农产品地质背景

收稿日期: 2021-09-29; 修回日期: 2021-11-05; 接受日期: 2021-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(42107485); 自然资源部生态地球化学重点实验室开放基金项目(ZSDHJJ202005); 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心开放基金课题(PMGR202019); 中国地质调查局地质调查项目“广州多要素城市地质调查”(DD20190291); 广州市“岭南英杰工程”人才培养项目

第一作者: 顾涛, 在读博士研究生, 高级工程师, 主要从事环境地球化学方面的研究工作。E-mail: cugyunngt1@163.com。

通信作者: 帅琴, 教授, 博士生导师, 主要从事色谱分析、原子光谱分析及其联用技术研究。

E-mail: shuaiqin@cug.edu.cn。

与特定的地球化学特征因地制宜、合理规划布局农业,是实现名优特农产品优质高效的前提和关键。

以往研究者针对名优特农产品产地地质环境条件开展了大量调查与评价工作,探究不同地质背景与名特优农作物生长适宜性及农产品品质的关系。例如,Ferretti<sup>[1]</sup>对意大利北部多洛米蒂山琼瑶浆葡萄酒产区葡萄品质、葡萄酒差异与区域地质、沉积物地球化学、矿物组成之间的关系进行了研究,发现葡萄种植区位于硅酸盐岩和碳酸盐岩过渡区,由于成土母质的差异,上层土壤化学组成、矿物组成差异较大。硅酸盐岩分布区所产葡萄酒,酒味浓厚香醇,适合储藏;碳酸盐岩分布区所产葡萄酒口感清淡,易挥发,适合直接饮用。Zhou等<sup>[2]</sup>对西湖龙井茶产地地球化学特征研究表明,石英砂岩分布区发育的土壤富含磷、钾和锌元素,钙、锰、镁、汞、铅、砷、铝和镉元素含量较低,适宜茶树生长,有利于产出高品质的茶。黎旭荣等<sup>[3]</sup>研究表明广东四会优质沙糖桔产区土壤营养元素、有益元素含量适宜,有害重金属含量低,成土母质以砂岩及花岗岩发育而成的赤红壤较适宜优质沙糖桔种植。此外,还有关于巴西皇家嘎拉果<sup>[4]</sup>,埃塞俄比亚多油辣木<sup>[5]</sup>,福建龙海市浮宫杨梅<sup>[6]</sup>,天津盘山磨盘柿子<sup>[7]</sup>,北京妙峰山优质玫瑰<sup>[8]</sup>,福建漳州水仙花<sup>[9]</sup>,河北承德黄芩<sup>[10]</sup>、承德仁用杏<sup>[11]</sup>等陆生名特优农产品的研究,主要集中在产地地质背景、环境地球化学条件与农作物生长适宜性、农产品品质关系的调查研究,相关研究为陆生名优特农产品的地理保护及生产种植提供了基础地质信息数据与技术支撑。而针对水生农产品(如莲藕、菱角、慈姑、荸荠等)产地地质背景条件与其生长适宜性、品质关系的调查研究报道较少。

莲藕是中国栽培面积最大的水生蔬菜<sup>[12-14]</sup>,且具有祛瘀、清热、生津止渴等药用价值。新垦莲藕因出产于广州市南沙区万顷沙镇新垦地区而得名,因其藕香浓郁,藕味纯正地道,风味独特,是广州市南沙区特产,2010年纳入国家地理标志保护产品<sup>[15]</sup>。本文旨在选取深受大众喜爱的水生蔬菜新垦莲藕为研究对象,对莲藕产区生长环境中的底泥、地表水以及莲藕进行系统采样,采用电感耦合等离子体质谱/发射光谱(ICP-MS/OES)等通用测试仪器和标准测试方法对样品中各组分含量进行分析测试,对藕塘底泥养分丰缺程度、重金属污染情况和藕塘地表水水质情况进行评价,分析藕塘底泥无机组分与莲藕营养组分之间的相关性,探究广州新垦莲藕产区地质背景与莲藕品质的关系,为后期新垦莲藕种植

施肥、优化布局 and 提质增产提供参考,助力“新垦莲藕”品牌打造和保护开发,服务大湾区宜居宜业宜游优质生活圈建设。

## 1 实验部分

### 1.1 研究区概况

新垦莲藕主要种植于广州市最南端,南沙区南部,位于珠江入海口,咸、淡水交界处,地势平坦,水源充沛,河网纵横,具有独特的冲积围垦地貌。该区常年光照充足,气候温暖湿润,属于亚热带季风性气候,温暖多雨,年平均气温 22.2℃,年平均降雨量 1646.9mm,雨热同期,大多数农田是典型的“湿地”地貌,地表为第四系松散沉积物所覆盖,成土母质为三角洲沉积物,主要为西北江所带来的物质在河海共同作用下沉积形成。冲积的淤泥土层深厚,适合莲藕生长。近年来,新垦莲藕种植面积稳定在 0.133 万公顷左右,年总产量 2.0~2.5 万吨,年产值 1.28~1.40 亿元,每年出口 0.8~1.0 万吨到东南亚和欧洲等国家和地区<sup>[16]</sup>。

### 1.2 样品采集与处理

参照《局部生态地球化学评价技术要求》(DD 2008-05),项目组于 2019 年 9 月中下旬莲藕成熟季节采集样品,采样点(图 1)位于南沙新垦莲藕主要种植区藕塘。采集藕塘底泥样品共计 45 组,采用荷兰 Eijkelpamp 手动土壤采样器,采集 0.5m 深度的底泥样品,每个样品为同一个藕塘 4 个点底泥样品混合样,每个样品采集 2~3kg,用封口袋密封;采集成熟莲藕样品 15 组,采样点与 15 组底泥样品对应。莲藕为正在采收的成熟莲藕,每一样点采集有 4 节新鲜完整莲藕一根,用封口袋密封,每个样品平行采集两份,一份用于无机元素分析,另一份用于营养品质指标测试;依据《水质 采样技术指导》(HJ 494-2009)、《水质 采样样品的保存和管理技术规定》(HJ 493-2009)采集藕塘水样 15 组,其采集点与莲藕样采集点对应,为藕塘地表水样,藕塘水样采集 1000mL,送至实验室用于后续检测。

将采集的藕塘底泥样品送至实验室风干后将样品压碎,过 2mm 孔径筛,除去砂砾和贝壳碎片生物残体。反复按照四分法缩分,留下缩分后样品磨细,过 160 目筛,混匀、装瓶,测定备用。将采集的莲藕样品用自来水清洗后再用超纯水冲洗多次,除去莲藕表面附着的杂质,去皮和藕节,无污染切割,晾干,称取鲜重质量后,于 80℃ 烘箱烘干、称重并研磨。研磨好的样品装入洁净的聚乙烯塑料袋内,用于后续分析。



图1 研究区采样点位置

Fig. 1 Location of sampling points in the study area

### 1.3 样品测试

#### 1.3.1 藕塘底泥样品指标的测试

参照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016),植物必需的养分指标主要有氮、磷、钾、有机质、钙、镁、铁、钴、钒、锗、硼、钼、锰、硫、铜、锌。综合考虑到富硒(Se)作物对人体健康具有重要意义,锗(Ge)能改变植物体内营养物质及化学物质含量<sup>[11]</sup>,重金属会直接影响土壤的物理和化学性质,阻碍植物营养盐的有效供给,同时还会通过食物链传递给人类,影响人体健康<sup>[17-19]</sup>,滨海区土壤还可能受到咸水影响,本研究确定藕塘底泥样品测试指标为:氮、磷、钾、有机质、钙、镁、铁、硫、硼、锰、铜、锌、钼、钴、钒、硒、锗、砷、镉、铬、汞、镍、铅、氯、pH值。

各指标测试方法列于表1。

#### 1.3.2 藕塘水样品指标的测试

参照《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021),本研究确定藕塘水样测试指标为:pH值、化学需氧量、铅、镉、铬(六价)、汞、砷、铜、锌、镍、硒、硼。考虑到藕塘水可能受海水影响,加测氯。各指标测试方法列于表1。

#### 1.3.3 莲藕样品指标的测试

参考新垦莲藕质量技术要求(国家质量监督检验检疫总局2009年第131号公告)对理化指标的规定,本研究确定莲藕营养品质测试指标为:淀粉、粗纤维、可溶性糖、干物质,加测蛋白质。参照《中国食物成分表(标准版)》(第六版),本研究确定莲藕矿物质营养元素测试指标为钙、磷、钾、镁、铁、锌、硒、铜,加测锗。考虑到重金属对莲藕食用安全性的影响,确定莲藕样品加测铅、镉、镍、铬、砷、汞等重金属指标。各指标测试方法列于表1。

表1 藕塘不同介质样品测试指标及对应测试方法

Table 1 Analysis parameters and methods for various media of the lotus root pond

样品类型	测试指标分类及测试指标	测试仪器	测试方法
藕塘底泥	① 养分指标:氮,磷,钾,有机质,钙,镁,铁,硫,硼,锰,铜,锌,钼,钴,钒,锆,硒。 ② 重金属:砷,镉,铬,汞,镍,铅。 ③ 其他指标:氯,pH值	元素分析仪(EA3000);电感耦合等离子体发射光谱仪(ICPA6300);电感耦合等离子体质谱仪(Thermo X2);原子荧光分光光度计(AFS8220);原子荧光分光光度计(XGY-1011A);一米光栅光谱仪(WP-1);X射线荧光光谱仪(Axios Max);pH计(pHS-3c)	《区域地球化学样品分析方法》(DZ/T 0279—2016); 《区域生态地球化学评价规范》(DZ/T 0289—2015); 《生态地球化学评价样品分析技术要求》(DD2005-03)
藕塘水	农田灌溉水质标准控制指标:pH值,化学需氧量,铅,镉,铬(六价),汞,砷,铜,锌,镍,硒,硼,氯	pH计(pHS-3c);电感耦合等离子体质谱仪(Thermo X2);电感耦合等离子体发射光谱仪(iCAP 7000 Series);原子荧光分光光度计(AFS8220);原子荧光分光光度计(XGY-1011A);离子色谱仪(ICS-900)	《食品安全国家标准 饮用天然矿泉水检验方法》(GB 8538—2016); 《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)
莲藕	① 营养品质指标:淀粉,可溶性糖,粗纤维,干物质,蛋白质。 ② 矿物质营养元素:钙,磷,钾,镁,铁,锌,硒,铜,锆。 ③ 重金属指标:铅,镉,镍,铬,砷,汞	紫外可见分光光度计(Shimadzu UV-1700),电热恒温鼓风干燥箱(WGL-230B);定氮仪(Z20209-F078948);电感耦合等离子体发射光谱仪(iCAP 7000 Series);电感耦合等离子体质谱仪(ICAP RQ);原子荧光分光光度计(AFS8220);原子荧光分光光度计(XGY-1011A)	《生态地球化学评价动植物样品分析方法》(DZ/T 0253—2014); 《食品安全国家标准 样品测定方法》(GB 5009—2016)

送检实验室均已通过国家计量认证,分析方法均为国家或行业标准,并且在检测实验室的资质认定范围内。样品测试时严格按照国家或行业标准进行质量控制,包括插入国家标准物质、样品加标回收、抽取密码重复样和空白试验。质量控制严格按照《多目标区域地球化学调查规范(1:250000)》(DZ/T 0258—2014)和《生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)》(DD 2005-03)关于分析过程准确度、精密度和空白试验的要求进行,所有样品报出率为100%,各指标的加标回收率均在国家标准参考物质的允许范围内,检测结果可靠。

#### 1.4 分析评价方法

在样品分析测试基础上,利用SPSS软件对藕塘底泥样品、藕塘水样、莲藕样品各组分含量特征进行描述性统计分析。参照《土地质量地球化学评价规范》(DZ T 0295—2016),对藕塘底泥养分丰缺程度进行统计评价,参照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),对底泥重金属指标等级进行统计评价。参照《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021),对藕塘地表水样进行统计评价。参照《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017),对莲藕样品进行统计评价。采用生物富集系数(Bioconcentration Factor, BCF)评价底泥-莲藕系统的元素迁移集聚特征。

采用Origin软件统计分析藕塘底泥无机组分与莲藕品质营养组分之间的相关性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 藕塘底泥样品元素含量特征及评价

#### 2.1.1 藕塘底泥样品元素含量特征

采用SPSS软件对采集的藕塘底泥样品各组分含量进行描述性统计分析,并与珠三角表层土壤地球化学背景值进行比较,结果列于表2。

由表2中可以看出,藕塘底泥测试指标的平均值(除有机质和硒外),均高于珠三角表层土壤地球化学背景值。尤其是硫、锰、铜、钴、镉、镍、氯等指标含量较高,是珠三角表层土壤地球化学背景值的4.0倍以上,磷、锌、砷、铬也在2倍以上。藕塘底泥测试指标的平均值(除硫外)与西北江海陆交互沉积物母质土壤背景值含量相当,硫为3.7倍。赵亚楠等<sup>[22]</sup>将反映离散程度的变异系数按大小划分为三种等级:变异系数<10%,为弱变异性;10%<变异系数<100%,为中等变异性;变异系数>100%,为强变异性。从表2中各指标变异系数来看,藕塘底泥中pH值、镍、钒、锌、硼、铬、镁、铁、钾、钴为弱变异性,其余指标为中等变异性,其中硫、汞、氯组分含量变异系数均大于50%,说明这三种组分在藕塘底泥中分布不均匀,可能是由于受到局部微地形、海水入侵、人为活动排放、田间耕作方式不同的影响所致<sup>[23]</sup>。

表2 藕塘底泥各组分含量描述性统计( $N=45$ )Table 2 Descriptive statistics of component contents in sediment of the lotus root pond ( $N=45$ )

分析指标	含量 极小值	含量 极大值	变异系数 (%)	含量平均 均值	土壤风险筛选值, 水田( $6.5 < \text{pH} < 7.5$ )	珠三角表层土壤 地球化学背景值 <sup>[20]</sup>	西北江海陆交互相沉积 物母质土壤背景值 <sup>[21]</sup>
氮(mg/g)	0.7978	2.170	23.01	1.314	-	0.9950	1.219
磷(mg/g)	0.7040	1.405	18.97	0.9639	-	0.4130	0.7740
钾(mg/g)	15.10	21.00	6.530	18.60	-	-	19.09
有机质(mg/g)	7.400	37.90	33.16	16.90	-	28.40	19.14
钙(mg/g)	3.960	11.62	25.97	7.851	-	-	4.071
镁(mg/g)	7.700	10.30	6.830	9.000	-	-	5.280
铁(mg/g)	43.50	63.20	6.730	55.80	-	-	40.39
硫(mg/g)	0.3129	3.496	61.97	1.124	-	0.2330	0.3032
硼(mg/kg)	62.57	88.39	8.440	74.22	-	46.90	63.73
锰(mg/kg)	732.0	1121	10.36	953.6	-	213.0	593.80
铜(mg/kg)	40.15	96.08	14.53	62.56	100.0	12.90	46.22
锌(mg/kg)	108.7	163.9	9.920	128.4	250.0	50.00	122.40
钼(mg/kg)	0.950	1.700	13.41	1.360	-	1.110	1.17
钴(mg/kg)	17.97	24.52	7.080	21.29	-	3.800	14.93
钒(mg/kg)	121.9	193.5	8.440	165.1	-	-	-
锆(mg/kg)	1.220	2.830	21.16	1.640	-	1.510	-
硒( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	260.0	570.0	16.80	380.0	-	510.0	490.0
砷(mg/kg)	14.75	27.97	11.45	23.05	25.00	9.000	16.53
镉( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	390.0	940.0	22.90	610.0	600.0	69.00	383.94
铬(mg/kg)	80.17	123.8	7.460	102.5	300.0	40.00	75.53
汞( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	86.00	514.0	54.65	162.9	600.0	84.00	139.06
镍(mg/kg)	33.14	54.12	8.970	46.28	100.0	9.500	30.40
铅(mg/kg)	34.40	86.37	18.52	45.61	140.0	37.00	43.65
氯(mg/kg)	42.20	1059	63.22	393.9	-	62.00	-
pH	6.630	7.860	3.850	7.400	-	5.280	-

注:“-”表示无相关结果。

### 2.1.2 藕塘底泥养分丰缺评价

参照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)中土壤养分单指标地球化学等级划分标准,以及土壤硒单指标地球化学等级划分标准,对藕塘底泥中铜、有机质、钙、氮、锆、磷、钾、镁、硫、硼、锰、锌、钼、钴、钒、铁、硒等养分指标丰缺等级进行评价统计,结果如图2所示。

新垦莲藕种植区藕塘底泥养分单指标地球化学评价结果表明,绝大部分养分指标以一等(丰富)、二等(较丰富)和三等(中等)为主。仅部分样品有机质、钙、氮和锆指标存在四等(较缺乏)的情况,无缺乏等级,建议在新垦莲藕种植中应关注有机质、钙、氮和锆等营养成分的补充。锰、锌、钼、钴、钒、铁均处在一等(丰富)等级,含量较高;铜含量高,45组底泥样品中有93.33%的样点超出了养分等级上限值。

对藕塘底泥硒单指标地球化学评价结果表明,适量等级占比为62.22%,高硒等级占比为37.78%,无缺乏、边缘和过剩等级。总体来看,新垦莲藕种植区藕塘底泥营养元素较丰富,这也可能是

新垦莲藕品质较好的原因之一。

### 2.1.3 底泥重金属污染风险评价

参照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控

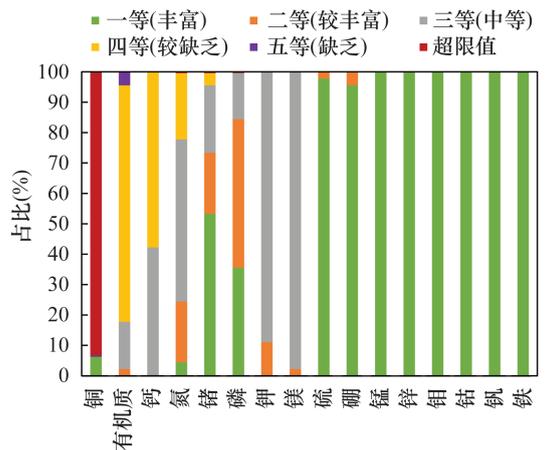


图2 新垦莲藕种植区底泥养分指标分级占比情况( $N=45$ )

Fig. 2 Nutrient abundance and deficiency situation in sediment of Xinken lotus root pond ( $N=45$ )

标准(试行)》(GB 15618—2018)对镉、汞、砷、铜、铅、铬、锌、镍等重金属指标等级进行评价,结果如图3所示。可以看出,藕塘底泥中重金属铬、铜、汞、镍、铅、锌均低于农用地土壤污染风险筛选值,部分样点砷和镉含量高于风险筛选值,但均低于风险管制值,说明藕塘底泥整体较为清洁,这有利于种植高品质的新垦莲藕。铜和锌既是养分元素,又是重金属,从底泥养分丰缺评价结果来看,93.33%的样点铜元素超出了养分等级上限值。从重金属污染风险评价结果来看,新垦莲藕藕塘底泥中铜含量虽高,但生态风险低,较安全。藕塘底泥中镉和砷含量较高,可能主要受控于西江、北江上游富含重金属砷、镉的风化物在下游沉积形成了富集区<sup>[24-25]</sup>。另外,人类工业交通活动,农业生产中使用的农药化肥、污水灌溉,也是底泥中镉和砷输入的重要途径<sup>[26]</sup>。

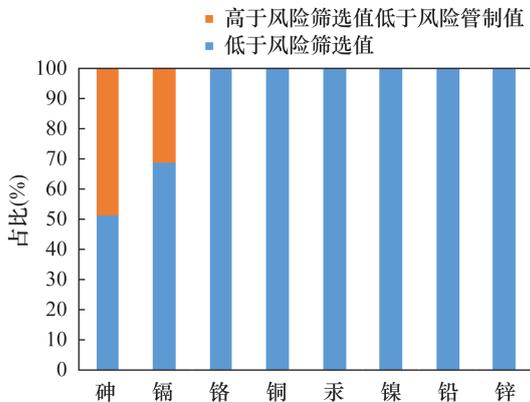


图3 新垦莲藕种植区藕塘底泥重金属指标分级占比情况 (N=45)

Fig. 3 Heavy metal pollution calculation results in sediment of Xinken lotus root pond (N=45)

## 2.2 莲藕样品各组分含量特征及评价

采用SPSS软件对所采集的莲藕样品进行统计分析,各指标含量描述性统计结果及中国其他地区莲藕样品部分组分含量结果列于表3。从莲藕样品各组分含量统计情况来看,各样品蛋白质和粗纤维含量变化较大,含量最大值是最小值的5倍以上,干物质、淀粉和可溶性糖的含量差异不大。铁、铬、铅、镍、砷、镉等含量最大值是最小值的4倍以上,差异较大。从变异系数来看,铅高达140%,为强变异性,粗纤维、铬、铁、砷、蛋白质含量变异系数均大于50%,为中等变异性。这6种组分含量变化明显,可能与所采集莲藕的成熟度、莲藕品种和藕塘的种植

管理方式有关<sup>[27]</sup>。从莲藕重金属含量来看,与雄安新区莲藕<sup>[28]</sup>比较,新垦莲藕中铅、镉、砷含量均较低。与中国几大莲藕主产区莲藕比较<sup>[29]</sup>,新垦莲藕中砷、镉、汞含量均低于山东济南,河南新郑,湖北武汉、洪湖、汉川,广西柳州,浙江金华、余杭等产区莲藕;铅含量高于山东济南,河南新郑,广西柳州,浙江金华、余杭产区莲藕,低于雄安新区,湖北武汉、洪湖、汉川产区莲藕食品中污染物限量。与《食品中污染物限量》(GB 2762—2017)比较,新垦莲藕中铬、铅、砷、镉、汞含量均低于食品中污染物限量值。

从莲藕营养组分与矿物组分含量来看,与程婷婷等<sup>[30]</sup>报道的江苏淮安、山东菏泽、湖北荆州、河南三门峡、广西贵港、安徽蚌埠、陕西富平、四川眉山、云南红河、湖南湘潭莲藕比较,新垦莲藕中粗纤维含量较低,均低于上述各地区莲藕中的含量,淀粉含量高于江苏淮安、山东菏泽、湖北荆州、河南三门峡、广西贵港、安徽蚌埠、陕西富平莲藕,低于其他地区;可溶性糖含量高于江苏淮安、云南红河、河南三门峡、陕西富平莲藕,低于其他地区;钾含量高于江苏淮安、四川眉山、湖北荆州、湖南湘潭、河南三门峡、广西贵港、安徽蚌埠、陕西富平莲藕,低于山东菏泽、云南红河莲藕;磷含量高于江苏淮安、山东菏泽、四川眉山、湖北荆州、云南红河、湖南湘潭、广西贵港、安徽蚌埠、陕西富平莲藕,低于其他地区;铁含量高于四川眉山莲藕,低于其他地区。与中国食物成分表(莲藕)比较<sup>[30]</sup>,新垦莲藕中有益营养组分蛋白质和矿质营养元素钾、磷、钙、镁、铁、锌、硒等组分含量较高,铜含量较低。

综上可以得出,新垦莲藕具有富集淀粉、可溶性糖、钾、磷、钙、镁、铁、锌、硒的特征,重金属和粗纤维含量较低。粗纤维很难被人体消化,大多数粗纤维口感粗糙,这可能是新垦莲藕藕香浓郁、品质较好的原因之一。

## 2.3 藕塘水样各组分含量特征及评价

采用SPSS软件对所采集的藕塘地表水样品进行统计分析,各指标含量描述性统计结果列于表4。从藕塘地表水各组分含量描述性统计来看,各元素含量变化范围较大,除未检出的铅、锌、镉、汞指标外,其余指标含量最大值均是最小值的3倍以上。从变异系数来看,藕塘地表水样中氯、磷、硼、六价铬、砷、铜、镍、硒等指标均为中等变异性。其中磷、氯、六价铬、砷三种组分变异系数均大于50%,说明这三种组分含量变化明显,可能是由于藕塘地表水受到海水、上游淡水以及不同耕作管理方式影响。

表 3 莲藕样品各组分含量描述性统计(鲜重含量, N = 15)

Table 3 Descriptive statistics of components in the lotus root samples (fresh weight, N = 15)

组分	含量 极小值	含量 极大值	变异 系数 (%)	含量 均值	雄安	山东	河南	湖北	湖北	湖北	广西	浙江	浙江	江苏	山东	四川	湖北	云南	湖南	河南	广西	安徽	陕西	中国食物	食品中 污染物 限量	
					新区 莲藕 [28]	济南 莲藕 [29]	新郑 莲藕 [29]	武汉 莲藕 [29]	洪湖 莲藕 [29]	汉川 莲藕 [29]	柳州 莲藕 [29]	金华 莲藕 [29]	余杭 莲藕 [29]	淮安 莲藕 [30]	菏泽 莲藕 [30]	眉山 莲藕 [30]	荆州 莲藕 [30]	红河 莲藕 [30]	湘潭 莲藕 [30]	三门峡 莲藕 [30]	贵港 莲藕 [30]	蚌埠 莲藕 [30]	富平 莲藕 [30]	成分表 - 莲藕 [31]		
干物质	12.60	24.50	18.51	17.63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
淀粉	6.700	13.90	28.61	9.810	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.250	7.425	13.14	3.555	13.69	10.26	7.124	9.319	8.077	4.156	-	-	
可溶性糖	2.190	4.140	17.52	3.200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.170	7.135	4.788	6.016	2.941	4.278	3.175	3.944	6.108	2.874	-	-	
蛋白质	1.450	8.580	64.41	2.630	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.200	-	
粗纤维	0.5000	3.300	83.22	0.8100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.647	6.984	2.343	1.588	2.940	1.383	2.687	2.283	3.247	2.722	-	-	
钾	2259	4673	16.62	3765	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2260	4050	3020	2700	4070	3650	3440	3090	2960	2930	-	-	
磷	384.8	738.1	14.20	585.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	223.0	552.0	494.0	303.0	557.0	539.0	613.0	415.0	454.0	573.0	450.0	-	
钙	193.7	312.5	15.99	251.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	180.0	
镁	148.3	271.6	18.58	211.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	140.0	
铁	9.960	111.9	79.22	30.32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	59.50	50.40	28.40	92.20	507.0	163.0	158.0	47.80	209.0	98.30	3.000	-	
锌	1633	3235	16.66	2430	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2400	
铜	549.8	1217	21.46	810.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	900.0	
铬	37.76	530.1	81.90	167.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	500.0	
铅	18.83	514.0	140.0	86.07	100.0	40.00	50.00	210.0	200.0	230.0	20.00	30.00	10.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	200.0	
镍	37.57	153.6	41.61	81.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
砷	10.77	163.4	77.70	59.96	180.0	220.0	550.0	350.0	320.0	330.0	440.0	580.0	280.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	500.0	
镉	2.200	17.00	44.24	9.660	20.00	50.00	50.00	20.00	20.00	10.00	30.00	30.00	10.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0	
硒	4.280	10.26	26.01	6.210	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.700	
锆	0.5400	1.090	17.67	0.7500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
汞	0.4300	0.7300	17.00	0.3600	-	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.00	

注:“-”表示无相关结果。干物质、淀粉、可溶性糖、蛋白质、粗纤维含量单位为%; 钾、磷、钙、镁、铁含量单位为 mg/kg; 其余指标含量单位为 μg/kg。

表 4 藕塘地表水样各组分含量描述性统计(N = 15)

Table 4 Descriptive statistics of component contents in surface water samples of the lotus pond (N = 15)

组分	含量 极小值 (mg/L)	含量 极大值 (mg/L)	变异 系数 (%)	含量 均值 (mg/L)	《农田灌溉水质标准》
					(GB 5084—2021) 限值
氯	33.50	298.0	67.60	125.7	350.0
磷	40.00	280.0	68.85	100.0	-
硼	10.40	125.0	43.89	67.71	1000
六价铬	10.00	60.00	58.79	30.00	100.0
砷	3.050	20.30	60.47	8.270	50.00
铜	0.6300	4.350	49.93	1.820	500.0
镍	0.7400	3.320	42.88	1.610	-
硒	0.4600	1.700	33.35	0.8500	20.00

注:灌溉水样品中部分样品铅、锌、镉、汞指标含量低于检出限,未参与统计。“-”表示无相关结果。

参照《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021),对铜、锌、硒、硼、汞、镉、砷、六价铬、铅、镍等指标进行评价。结果表明,新垦莲藕种植区藕塘地表水水质较好,参与评价的指标均达到农田灌溉水质标准的要求。

## 2.4 生物富集系数

生物富集系数(BCF)<sup>[9,32-33]</sup>用于探究土壤-作物系统中元素分配规律。BCF = 作物元素浓度(鲜重计)/土壤元素浓度(干重计)×100。BCF 值越大,表明莲藕对这种元素的富集能力越强。按照生物富集系数的大小,通常将作物对土壤的摄取强度分为四个等级:BCF > 100,为强烈摄取;10 < BCF ≤ 100,为中等摄取;1 < BCF ≤ 10,为微弱摄取;BCF < 1,为极弱摄取<sup>[11]</sup>。用莲藕样品与其对应底泥样品中同一元素的含量计算莲藕对特定元素的生物富集系数,新垦莲藕及中国其他地区莲藕相关组分生物富集系数列于表 5。

从表 5 中可以看出,对于藕塘底泥中镉、汞、砷、铅四种重金属,不同地区莲藕的生物富集系数差别较大,浙江金华莲藕对镉的富集能力最强,湖北洪湖莲藕对汞的富集能力最强,湖北汉川莲藕对铅的富集能力最强,湖北洪湖莲藕对砷的富集能力最强,新垦莲藕对镉、汞、砷三种重金属的富集能力均为最小,浙江余杭莲藕对铅的富集能力最小,新垦莲藕对铅的富集能力也较小。仅从新垦莲藕对各元素的富集能力来看,新垦莲藕对底泥中不同元素生物富集

表5 底泥-莲藕部分组分生物富集系数(BCF)

Table 5 Bioconcentration factor (BCF) of some elements in the lotus root and sediment

组分	新垦莲藕 BCF 值			相关产地莲藕 BCF 值							
	极小值	极大值	平均值	山东济南 莲藕 <sup>[29]</sup>	河南新郑 莲藕 <sup>[29]</sup>	湖北武汉 莲藕 <sup>[29]</sup>	湖北洪湖 莲藕 <sup>[29]</sup>	湖北汉川 莲藕 <sup>[29]</sup>	广西柳州 莲藕 <sup>[29]</sup>	浙江金华 莲藕 <sup>[29]</sup>	浙江余杭 莲藕 <sup>[29]</sup>
磷	49.23	89.49	65.67	-	-	-	-	-	-	-	-
钾	12.06	25.15	20.42	-	-	-	-	-	-	-	-
钙	1.746	6.872	3.214	-	-	-	-	-	-	-	-
镁	1.653	2.985	2.330	-	-	-	-	-	-	-	-
锌	1.459	2.477	1.931	-	-	-	-	-	-	-	-
硒	1.012	2.502	1.700	-	-	-	-	-	-	-	-
镉	0.5215	3.189	1.584	20.55	46.67	14.03	8.700	9.260	5.030	23.78	8.210
铜	0.8567	1.942	1.350	-	-	-	-	-	-	-	-
汞	0.1194	0.7337	0.4497	3.440	4.970	4.580	7.200	4.670	2.420	3.230	3.550
砷	0.0522	0.6296	0.2641	1.930	6.680	5.200	3.680	2.890	2.460	4.590	3.050
铅	0.0371	1.1626	0.1928	0.1200	0.2400	0.7700	1.070	1.820	0.030	0.070	0.020
镍	0.0877	0.3470	0.1833	-	-	-	-	-	-	-	-
铬	0.0365	0.5347	0.1711	-	-	-	-	-	-	-	-
铁	0.0193	0.2045	0.0556	-	-	-	-	-	-	-	-
锆	0.0293	0.0652	0.0484	-	-	-	-	-	-	-	-

注：“-”表示无相关结果。

系数差异较大,生物富集系数平均值范围为 0.0484~65.67,对磷的富集能力最强,对锆的富集能力最弱。总体而言,新垦莲藕对藕塘底泥中营养元素(磷、钾、钙、镁、锌、硒)的富集能力大于对重金属(镉、铜、汞、砷、铅、镍、铬)的吸收富集能力。按照作物对土壤的摄取强度划分,磷、钾为中等摄取,钙、镁、锌、硒、镉、铜为微弱摄取,其余元素为极弱摄取,说明新垦莲藕对藕塘底泥中重金属的摄取能力为微弱摄取和极弱摄取,摄取较少,2.1.3节中提到研究区藕塘底泥中砷和镉含量较高,存在高于风险筛选值的样品,但新垦莲藕对镉和砷的生物富集系数较小,处于微弱摄取和极弱摄取等级,摄取不明显,这有利于产出安全且高品质的莲藕。

## 2.5 新垦莲藕品质与底泥元素相关性

土壤是植物生长所需矿物质元素的最主要来源,土壤中的元素一方面制约着农产品产量,另一方面也会影响农产品品质<sup>[11]</sup>。藕塘底泥中元素含量与莲藕中营养组分之间的相关性可以反映二者之间的关系。使用 Origin 软件绘制藕塘底泥元素含量与莲藕营养组分之间相关系数矩阵热图,如图 4 所示,图中的蓝色表示正相关,红色表示负相关。色彩越深,饱和度越高,说明变量相关性越大。从图中可以看出,藕塘底泥中大部分元素之间的相关性以正相关为主,如镉、有机质、锆、氮、磷、锌、硒、铅、钼、铜、铬、砷、铁、镍、钒、锰、钾、镁等元素。

从底泥无机元素与莲藕营养组分(淀粉、可溶性糖、粗纤维、干物质、蛋白质)相关性来看,藕塘底泥中镉与莲藕中的淀粉、粗纤维、可溶性糖正相关,且与淀粉显著性正相关( $p \leq 0.05$ ),镉是植物重要的必需微量营养元素,与植物光合作用、蛋白质和核酸的代谢、植物的繁殖等都有密切的关系<sup>[34-36]</sup>;底泥中的钙与莲藕中的淀粉、粗纤维、干物质、蛋白质正相关,且与蛋白质显著正相关( $p \leq 0.05$ ),钙是植物生长发育的必需营养元素,是细胞壁、细胞膜结构的重要组成部分,对维持细胞膜、细胞壁和膜结合蛋白的稳定性,调节无机离子的运输等方面起着至关重要的作用<sup>[37-38]</sup>;底泥中的锆与莲藕中的可溶性糖、粗纤维正相关,锆能提高抗氧化酶活性,使得植株的抗氧化能力增强,从而有利于植株的生长发育和营养物质的吸收<sup>[36,39-40]</sup>。另外,底泥中钴与莲藕中的粗纤维和干物质正相关;底泥中铁、镁、锰、钒与莲藕中的干物质正相关;底泥中锰与莲藕中的粗纤维和蛋白质正相关,底泥中砷与莲藕中可溶性糖显著负相关( $p \leq 0.05$ )。从 2.1.2 节藕塘底泥养分丰缺评价结果来看,新垦莲藕藕塘底泥中硼、钴、锰、锆均高于珠三角表层土壤地球化学背景值,钴、锰均为一等(丰富)等级,硼绝大部分为一等(丰富)等级,少量为二等(较丰富)等级;锆绝大部分为一等(丰富)至三等(中等)等级;铁、钒均为一等(丰富)等级,镁、钙含量也较高,无五等(缺乏)等级。说明新垦莲藕

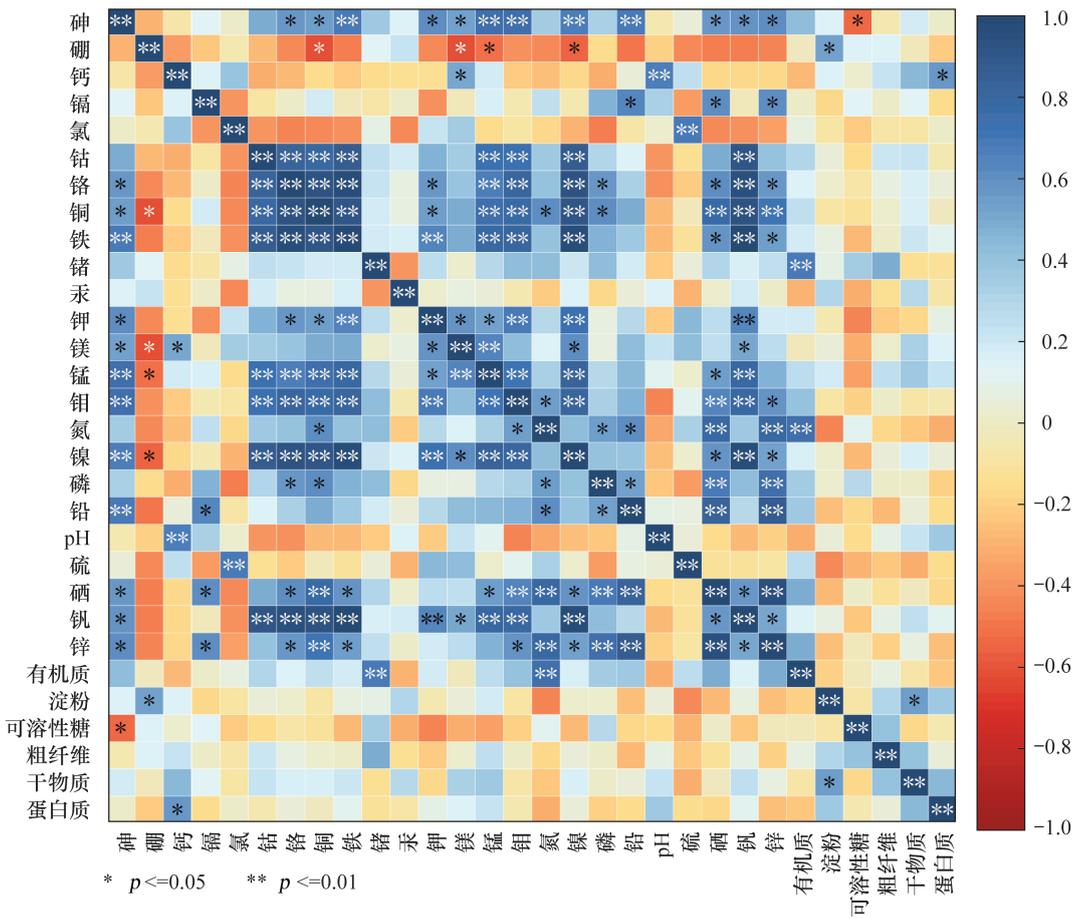


图4 藕塘底泥元素含量与莲藕营养组分之间的相关系数矩阵热图

Fig. 4 Heat map of correlation coefficient matrix between sediment elements of lotus root pond and nutrient components of lotus root

藕塘底泥中硼、钴、铁、镁、锰、钼、钙、锗含量较高,有利于莲藕营养组分的积累,适合莲藕种植。

莲藕的品质与其营养组分含量息息相关,莲藕生长过程中藕塘底泥的部分元素如硼、钴、铁、镁、锰、钼、钙、锗等对莲藕积累营养组分具有促进作用。为此,其他地区种植莲藕过程中,也应该关注藕塘底泥中这几种养分元素的供给情况,对这几种养分元素不足的藕塘及时进行补充,以利于高品质莲藕的产出。

### 3 结论

对广州新垦莲藕产区的底泥、地表水以及莲藕进行了系统采样分析和品质评价,研究表明藕塘底泥重金属含量较低,整体较为清洁,养分元素含量较高,绝大部分为三等(中等)以上等级。藕塘地表水水质较好,达到农田灌溉水质标准要求。产出的新垦莲藕具有富集淀粉、可溶性糖等营养组分以及钾、磷、钙、镁、铁、锌、硒等矿质营养元素的特征,且重金

属、粗纤维含量较低,品质较好。

莲藕对底泥中不同元素生物富集系数差异较大,磷、钾为中等摄取,钙、镁、锌、硒、镉、铜为微弱摄取,其余元素为极弱摄取。藕塘底泥中硼与莲藕中的淀粉显著正相关( $p \leq 0.05$ ),底泥中钙与莲藕中的蛋白质显著正相关( $p \leq 0.05$ ),底泥中砷与莲藕中可溶性糖显著负相关( $p \leq 0.05$ ),藕塘底泥中硼、钴、铁、镁、锰、钼、钙、锗含量较高,有利于莲藕营养组分(淀粉、粗纤维、可溶性糖、干物质、蛋白质)的积累,产出高品质的莲藕。产区藕塘底泥中有有机质、钙、氮和锗等养分指标存在四等(较缺乏)的情况,镉和砷元素存在高于农用地土壤污染风险筛选值的情况,对莲藕生产不利。建议在莲藕种植中,重视藕塘有机质、钙、氮和锗等养分指标的补充,同时关注重金属镉和砷的潜在生态安全风险,镉和砷对新垦莲藕品质的影响及风险防控有必要开展深入研究。

## 4 参考文献

- [1] Ferretti C G. Relationship between the geology, soil assessment, and terroir of Gewürtztraminer vineyards: A case study in the dolomites of northern Italy [J]. CATENA, 2019, 179: 74 – 84.
- [2] Zhou G H, Zhu L X, Ren T X, et al. Geochemical characteristics affecting the cultivation and quality of Longjing Tea [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1995, 55(1–3): 183 – 191.
- [3] 黎旭荣, 朱鑫, 张高强, 等. 广东四会优质沙糖桔产地生态地球化学特征 [J]. 现代地质, 2012, 26(1): 125 – 130.
- Li X R, Zhu X, Zhang G Q, et al. Eco – geochemical characteristics of the high – quality Shatang Citrus producing area in Sihui, Guangdong [J]. Geoscience, 2012, 26(1): 125 – 130.
- [4] Amarante C V T D, de Fátima Ferreira Da Rosa E, Albuquerque J A, et al. Soil attributes and fruit quality in organic and conventional apple production systems in southern Brazil [J]. Artigo Científico, 2015, 46(1): 99 – 109.
- [5] Kumssa D B, Joy E J, Young S D, et al. Variation in the mineral element concentration of *Moringa oleifera* Lam, and *M. stenopetala* (Bak. f.) Cuf.: Role in human nutrition [J]. PLOS ONE, 2017, 12(4): e175503.
- [6] 严洪泽, 周国华, 孙彬彬, 等. 福建龙海杨梅产地元素地球化学特征 [J]. 中国地质, 2018, 45(6): 1155 – 1166.
- Yan H Z, Zhou G H, Sun B B, et al. Geochemical characteristics of the bayberry producing area in Longhai, Fujian [J]. Geology in China, 45(6): 1155 – 1166.
- [7] 王卫星, 曹淑萍, 李攻科. 天津盘山磨盘柿子品质分析及其产地土壤地球化学特征 [J]. 物探与化探, 2019, 43(5): 1131 – 1137.
- Wang W X, Cao S P, Li G K. Chemical composition analysis and soil geochemical characteristics of Mopan persimmon in Panshan, Tianjin [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(5): 1131 – 1137.
- [8] 任娜欧, 王数, 张凤荣, 等. 北京妙峰山优质玫瑰生长的农业地质背景 [J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(7): 107 – 115.
- Ren N O, Wang S, Zhang F R, et al. Study on the agricultural geological background of high quality rose growth in Miaofeng Mountain in Beijing [J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(7): 107 – 115.
- [9] 王金龙, 孙彬彬, 周国华, 等. 漳州水仙花产地生态地球化学特征 [J]. 桂林理工大学学报, 2018, 38(3): 420 – 428.
- Wang J L, Sun B B, Zhou G H, et al. Ecological and geochemical characteristics of Zhangzhou narcissus planting area [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2018, 38(3): 420 – 428.
- [10] 孙厚云, 孙晓明, 贾凤超, 等. 河北承德锗元素生态地球化学特征及其与道地药材黄芩适生关系 [J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1646 – 1667.
- Sun H Y, Sun X M, Jia F C, et al. The eco – geochemical characteristics of germanium and its relationship with the genuine medicinal material *scutellaria baicalensis* in Chengde, Hebei Province [J]. Geology in China, 2020, 47(6): 1646 – 1667.
- [11] 孙厚云, 卫晓锋, 孙晓明, 等. 承德杏仁产区关键带基岩 – 土壤 – 作物果实 BRSPC 系统元素迁移特征 [J]. 地球科学, 2021, 46(7): 2621 – 2645.
- Sun H Y, Wei X F, Sun X M, et al. Element migration and accumulation characteristics of bedrock – regolith – soil – fruit plant continuum of the earth’s critical zone in Chengde almond producing area [J]. Earth Science, 2021, 46(7): 2621 – 2645.
- [12] Zhu F. Structures, properties, and applications of lotus starches [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 63: 332 – 348.
- [13] Zhang Y, Lu X, Zeng S, et al. Nutritional composition, physiological functions and processing of lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) seeds: A review [J]. Phytochemistry Reviews, 2015, 14(3): 321 – 334.
- [14] 罗满, 张灿明, 李有志, 等. 洞庭湖区莲藕重金属污染特征 [J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(6): 554 – 559.
- Luo M, Zhang C M, Li Y Z, et al. Characteristics of heavy metals contamination in lotus root in the Dongting Lake area, China [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2016, 33(6): 554 – 559.
- [15] 张文胜, 吴永中, 龙伟, 等. 广州新垦莲藕品种应用现状、问题与对策 [J]. 长江蔬菜, 2016(3): 13 – 15.
- Zhang W S, Wu Y Z, Long W, et al. Application status, problems and countermeasures of Xinken lotus root varieties in Guangzhou [J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2016(3): 13 – 15.
- [16] 张文胜. 风味独特的新垦莲藕 [J]. 长江蔬菜, 2016(12): 20 – 21.
- Zhang W S. Xinken lotus root with unique flavor [J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2016(12): 20 – 21.
- [17] Rai G K, Bhat B A, Mushtaq M, et al. Insights into decontamination of soils by phytoremediation: A detailed account on heavy metal toxicity and mitigation strategies [J]. Physiologia Plantarum, 2021: 1 – 18.

- [18] Mansoor S, Kour N, Manhas S, et al. Biochar as a tool for effective management of drought and heavy metal toxicity [J]. *Chemosphere*, 2021, 271: 129458.
- [19] Rehman A U, Nazir S, Irshad R, et al. Toxicity of heavy metals in plants and animals and their uptake by magnetic iron oxide nanoparticles [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, 321: 114455.
- [20] 窦磊, 杜海燕, 游远航, 等. 珠江三角洲经济区生态地球化学评价[J]. *现代地质*, 2014, 28(5): 915–927.  
Dou L, Du H Y, You Y H, et al. Eco-geochemical survey and assessment in Pearl River Delta Economic Zone, Guangdong Province, China [J]. *Geoscience*, 2014, 28(5): 915–927.
- [21] 杜海燕, 赖启宏, 周国华, 等. 广东省珠江三角洲经济区区域生态地球化学评价报告[R]. 2011.  
Du H Y, Lai Q H, Zhou G H, et al. Report on eco-geochemical survey and assessment in Pearl River Delta Economic Zone, Guangdong Province [R]. 2011.
- [22] 赵亚楠, 周玉蓉, 王红梅. 宁夏东部荒漠草原灌丛引入下土壤水分空间异质性[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(11): 3577–3586.  
Zhao Y N, Zhou Y R, Wang H M. Spatial heterogeneity of soil water content under introduced shrub (*Caragana korshinskii*) in desert grassland of the eastern Ningxia, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(11): 3577–3586.
- [23] 崔昆, 赵庚星, 王卓然, 等. 黄河三角洲夏季典型田块土壤盐分的多尺度空间变异[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(5): 1451–1458.  
Cui K, Zhao G X, Wang Z R, et al. Multi-scale spatial variability of soil salinity in typical fields of the Yellow River Delta in summer [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(5): 1451–1458.
- [24] 刘子宁, 窦磊, 张伟. 珠江三角洲第四纪沉积物 Cd 元素的分布特征及成因[J]. *地质通报*, 2012, 31(1): 172–180.  
Liu Z N, Dou L, Zhang W. Distribution and origin of cadmium in the Quaternary sediments of the Pearl River Delta Plain, Guangdong Province, southern China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(01): 172–180.
- [25] 陈丹青, 谢志宜, 张雅静, 等. 基于 PCA/APCS 和地统计学的广州市土壤重金属来源解析[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(6): 1014–1022.  
Chen D Q, Xie Z Y, Zhang Y J, et al. Source apportionment of soil heavy metals in Guangzhou based on the PCA/APCS model and geostatistics [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(6): 1014–1022.
- [26] 徐慧秋, 黄银华, 吴志峰, 等. 广州市农业土壤 As 和 Cd 污染及其对景观异质性的多尺度响应[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(10): 3283–3289.  
Xu H Q, Huang Y H, Wu Z F, et al. Agricultural soil contamination from As and Cd and its responses to landscape heterogeneity at multiple scales in Guangzhou, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(10): 3283–3289.
- [27] 涂静. 莲藕品质评价及其冻结特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014.  
Tu J. Study on the quality evaluation and freezing characteristics of lotus root [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
- [28] 高培培, 肖冰, 刘文菊, 等. 莲藕中重金属含量特征及其健康风险评价[J]. *环境化学*, 2020, 39(2): 362–370.  
Gao P P, Xiao B, Liu W J, et al. Analysis and health risk assessment of heavy metal in lotus root [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, 39(2): 362–370.
- [29] Xiong C, Zhang Y, Xu X, et al. Lotus roots accumulate heavy metals independently from soil in main production regions of China [J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 164: 295–302.
- [30] 程婷婷, 惠小涵, 尚欣欣, 等. 10 个产地莲藕营养成分分析与品质综合评价[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(8): 320–325.  
Cheng T T, Hui X H, Shang X X, et al. Nutrient composition analysis and quality comprehensive evaluation of lotus root in 10 producing areas [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(8): 320–325.
- [31] 杨月欣. 中国食物成分表(标准版)[M]. 北京: 北京大学医学出版社, 2018: 1–363.  
Yang Y X. China food composition tables (The Standard Edition) [M]. Beijing: Peking University Medical Press, 2018: 1–363.
- [32] 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 等. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征[J]. *环境科学*, 2020, 41(1): 449–459.  
Ma H H, Peng M, Liu F, et al. Bioavailability, translocation, and accumulation characteristics of heavy metals in a soil-crop system from a typical carbonate rock area in Guangxi, China [J]. *Environment Science*, 2020, 41(1): 449–459.
- [33] Ng C C, Boyce A N, Abas M R, et al. Phytoassessment of vetiver grass enhanced with EDTA soil amendment grown in single and mixed heavy metal-contaminated soil [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191(434): 1–16.
- [34] 阳国运, 唐裴颖, 张洁, 等. 电感耦合等离子体质谱法

- 测定地球化学样品中的硼碘锡锗[J]. 岩矿测试, 2019,38(2):154-159.
- Yang G Y, Tang P Y, Zhang J, et al. Determination of boron iodine tin and germanium in geochemical samples by inductively coupled plasma - mass spectrometry[J]. Rock and Mineral Analysis, 2019,38(2):154-159.
- [35] Al - Mayahi A M W. Effect of calcium and boron on growth and development of callus and shoot regeneration of date palm 'Barhee' [J]. Canadian Journal of Plant Science, 2020,100(4):357-364.
- [36] Wang Q, Zhang W, Xiao H, et al. Involvement of boron transporter BOR1 in growth under low boron and high nitrate conditions in *Arabidopsis thaliana* [J]. Physiologia Plantarum, 2021,171(4):703-713.
- [37] Burger A, Lichtscheidl I. Stable and radioactive cesium: A review about distribution in the environment, uptake and translocation in plants, plant reactions and plants' potential for bioremediation [J]. Science of The Total Environment, 2018,618:1459-1485.
- [38] Tang R, Zhao F, Yang Y, et al. A calcium signalling network activates vacuolar K<sup>+</sup> remobilization to enable plant adaptation to low - K environments [J]. Nature Plants, 2020,6(4):384-393.
- [39] Nakamura T, Shimada Y, Takeda T, et al. Organogermanium compound, Ge - 132, forms complexes with adrenaline, ATP and other physiological *cis* - diol compounds [J]. Future Medicinal Chemistry, 2015,7(10):1233-1246.
- [40] 刘艳, 侯龙鱼, 赵广亮, 等. 锗对植物影响的研究进展 [J]. 中国生态农业学报, 2015,23(8):931-937.
- Liu Y, Hou L Y, Zhao G L, et al. Mechanism and application of germanium in plant growth [J]. Chinese Journal of Eco - Agriculture, 2015,23(8):931-937.

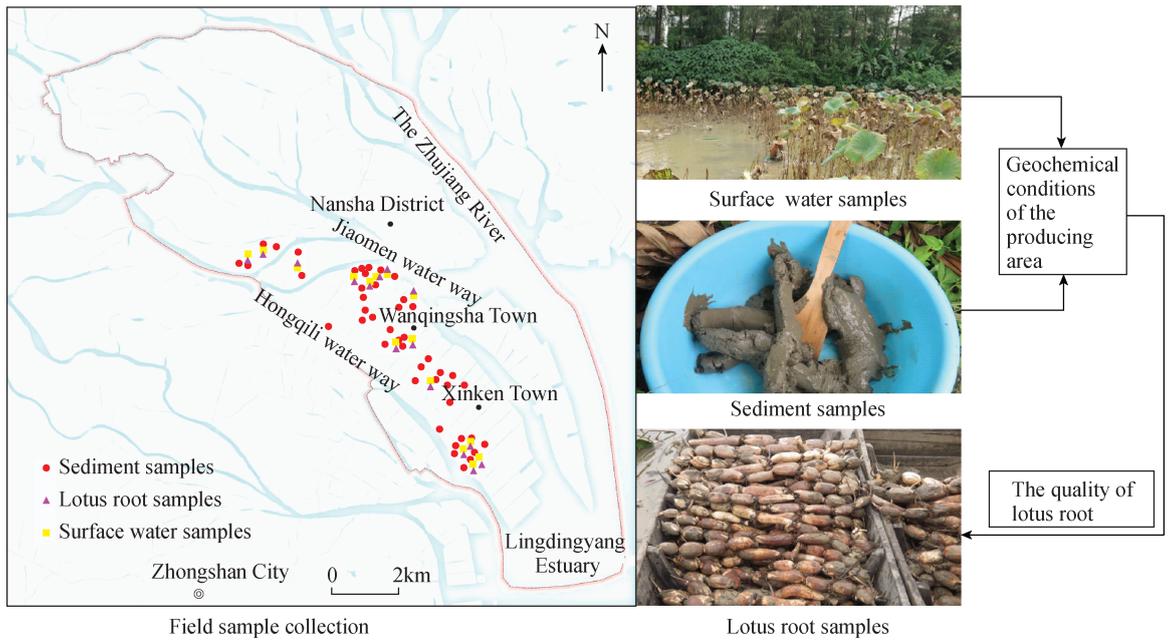
## Relationship between Lotus Root Quality and Geochemical Conditions in the Xinken Lotus Root Producing Area of Guangzhou

GU Tao<sup>1,2,3,4</sup>, ZHU Xiao - hua<sup>1</sup>, ZHAO Xin - wen<sup>4</sup>, JIANG Tuo<sup>4</sup>, QIU Xiao - fei<sup>2,4</sup>, ZHENG Xiao - zhan<sup>5</sup>, SHUAI Qin<sup>3\*</sup>

- (1. Key Laboratory of Eco - Geochemistry, Ministry of Natural Resources; National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China;
2. Research Center for Petrogenesis and Mineralization of Granitoid Rocks, China Geological Survey, Central South China Innovation Center for Geosciences, Wuhan 430205, China;
3. Faculty of Material Science and Chemistry, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;
4. Central South China Innovation Center for Geosciences, Wuhan 430205, China;
5. Geological Survey of Guangzhou, Guangzhou 510440, China)

### HIGHLIGHTS

- (1) Chemical compositions of sediment, surface water and fresh lotus root in the Xinken area were systematically analyzed.
- (2) The sediment and water environment of Xinken lotus root is generally clean, with low heavy metal contents and rich nutrient elements in sediment. The contents of B, Co, Fe, Mg, Mn, V, Ca and Ge in the sediment are high, which is beneficial to the accumulation of nutrients in lotus root.
- (3) The absorption and enrichment capacity of Xinken lotus root for nutrient elements is greater than that for heavy metals.



## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Environmental geochemical conditions affect the quality of famous and special agricultural products. Xinken lotus root is the national product of geographical indication. Exploring the relationship between the geological background of the production area and the quality of lotus root is of great significance to the large-scale planting of Xinken lotus root.

**OBJECTIVES:** To reveal the correlation between the quality of lotus root and the environmental geochemical characteristics in the producing area.

**METHODS:** Sediment, surface water and fresh lotus root in the Xinken area were systematically sampled and analyzed.

**RESULTS:** The concentrations of nutrients, i. e. , Mn, Zn, Mo, Co, V and Fe, in the sediment of the lotus root pond were high, in the first grade (rich) level. Selenium was mainly in proper amounts and high selenium grade. The concentrations of Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn were lower than those of the soil pollution risk threshold of agricultural land. Cu, Zn, Se, B, Hg, Cd, As, Cr(VI), Pb and Ni in surface water of the lotus pond met the requirement for irrigation water quality. The lotus root was rich in starch, soluble sugar, K, P, Ca, Mg, Fe, Zn and Se, and the contents of heavy metals and crude fiber were low. The average bioaccumulation coefficients of lotus root for different elements ranged from 0.0484 to 65.67. The enrichment ability of P was the strongest and that of Ge was the weakest. There was a significant positive correlation between B and starch in lotus root pond sediment ( $p \leq 0.05$ ), between Ca and protein, while a significant negative correlation between As and soluble sugar. The contents of B, Co, Fe, Mg, Mn, V, Ca and Ge in the sediment of the lotus pond were high, which was beneficial to the accumulation of nutrients in lotus root, and thus production of safe and high-quality lotus roots.

**CONCLUSIONS:** Importance should be attached to the supplement of organic matter, Ca, N and Ge in the lotus pond during the planting process and more attention to the potential ecological security risks caused by Cd and As.

**KEY WORDS:** Xinkentown area; sediment; surface water; inductively coupled plasma – mass spectrometry/optical emission spectrometry; geochemical conditions; quality of lotus root