



陈涵,肖敏,程建峰,等.不同红芽芋地方品种新鲜子芋自然富集元素能力的鉴定与评价[J].江西农业大学学报,2024,46(4):867-883.

CHEN H,XIAO M,CHENG J F,et al.Identification and evaluation of natural enrichment elements ability of fresh cormels from local varieties of red bud taro [*Colocasia esculenta* (L.)Schott][J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2024,46(4):867-883.

不同红芽芋地方品种新鲜子芋自然富集元素能力的鉴定与评价

陈涵¹,肖敏²,程建峰^{1*},邓文峰¹,邓锦明²,胡润雨¹,黄英金¹

(1.江西农业大学 农学院,江西 南昌 330045;2.江西省吉安市万安县农业农村局,江西 吉安 343899)

摘要:【目的】红芽芋为典型的多子芋类型,品质风味居芋类之首,是老幼皆宜和药食兼优的滋补佳品。阐明红芽芋子芋自然富集元素能力的基因型间差异,筛选出高富集有益元素且低富集有害元素的地方品种,为高产优质营养安全红芽芋地方品种的遗传改良和品种选择提供理论依据及实践指导。【方法】以21个在不同原产地广泛种植的红芽芋地方品种为材料,统一种植在同一块大田,采用电感耦合等离子体质谱法分析其新鲜子芋中有益元素[镁(Mg)、铁(Fe)、锌(Zn)、硒(Se)]和有害元素[镉(Cd)、铬(Cr)、铅(Pb)、汞(Hg)和砷(As)]的含量及累积量,并利用模糊隶属函数法、熵权优劣解距离法和模糊综合评判法对其自然富集元素能力进行综合鉴定与评价。【结果】不同红芽芋地方品种的新鲜子芋产量存在巨大差异,最高的HY09(浙江嘉兴)为最低的HY10(云南昆明)的4.5倍。不同红芽芋地方品种新鲜子芋自然富集元素能力(含量及累积量)存在明显差异,无论是同一红芽芋地方品种新鲜子芋的不同有益和有害元素含量及累积量间还是不同红芽芋地方品种新鲜子芋的同一有益和有害元素含量及累积量间均存在显著或极显著差异。有益元素中,以镁含量及累积量最高,其次为铁和锌,硒极低;但品种间的锌含量及累积量的差异最大,铁和硒次之,镁差异最小。有害元素中,以镉含量及累积量最高,汞最低,铬的品种间差异最大,砷的品种间差异最小。红芽芋地方品种对Cd的富集能力较强,对Mg的富集中等,对其他元素的富集能力极小。红芽芋新鲜子芋中的Se与Fe、Cr、Hg和As,Fe与Zn、Cr、Hg和As,Zn与Cr、Hg和As,Mg与Cd,Cr与As和Hg及Hg与As间的含量及累积量间均呈极显著正相关。【结论】综合分析显示,不同红芽芋新鲜子芋天然富集元素能力的可分为高、中和低三类,高富集能力的品种是HY14(湖南永州),中等富集能力的品种是HY04(江苏无锡)和HY20(江西赣州),其他均为低富集能力品种。

关键词:红芽芋;富集;元素;基因型差异;鉴定与评价

中图分类号:S632.3 文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2024)04-0867-17



Identification and evaluation of natural enrichment elements ability of fresh cormels from local varieties of red bud taro [*Colocasia esculenta* (L.)Schott]

CHEN Han¹,XIAO Min²,CHENG Jianfeng^{1*},DENG Wenfeng¹,
DENG Jinming²,HU Runyu¹,HUANG Yingjin¹

收稿日期:2024-01-05 修回日期:2024-03-30

基金项目:江西省农业关键核心技术攻关专项(JXNK202309)和江西省现代农业产业技术体系专项(JXARS-19)

Project supported by the Earmarked Fund for Key Core Technology Research on Jiangxi Agriculture (JXNK202309) and Jiangxi Agriculture Research System (JXARS-19)

作者简介:陈涵,硕士生,orcid.org/0009-0008-4587-5958,1125413885@qq.com;*通信作者:程建峰,教授,博士,主要从事植物生理生态研究,orcid.org/0000-0001-6813-3190,chjfkarl@163.com。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

(1.College of Agronomy,Jiangxi Agricultural University,Nanchang 330045,China;2.Bureau of Agriculture and Rural Affairs of Wan'an County,Ji'an City,Jiangxi Province,Ji'an,Jiangxi 343899,China)

Abstract: [Objective] Red bud taro is a typical multi-seed taro type and its quality and flavor rank first in taro varieties. It is nourishing for both young and old people and excellent as both medicine and food. Clarifying the genotypical differences in the natural enrichment ability of red bud taro and screening out the local varieties with high enrichment of beneficial elements and low enrichment of harmful elements will provide the theoretical basis and practical guidance for the genetic improvement and the variety choice with high-yield, high-quality, good nutrition and safety. [Method] 21 local varieties of red bud taro widely planted in different areas were used as the experimental materials and planted in the same field. The contents and accumulation amounts of beneficial elements including iron (Fe), zinc (Zn), selenium (Se), magnesium (Mg), and harmful elements including cadmium (Cd), chromium (Cr), lead (Pb), mercury (Hg) and arsenic (As) in their fresh cormels were analyzed by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), and their natural enrichment abilities were comprehensively identified and evaluated by fuzzy membership function method, entropy weight technique for order preference by similarity to ideal solution (EW-TOPSIS) and fuzzy comprehensive evaluation method. [Result] The results showed that there were high differences in the fresh cormels yield of red-bud taro local varieties, the yield of HY09 (Jiaxing, Zhejiang) was 4.5 times as that of HY10 (Kunming, Yunnan). The natural enrichment ability (content and accumulation amount) of fresh cormels in local varieties was significantly different. There were significant or extremely significant differences in the contents and accumulation amounts of different beneficial and harmful elements in either the fresh cormels of the same local variety or the same beneficial and harmful elements in the fresh cormels of different local varieties. Among the beneficial elements, the content and accumulation amount of Mg were the highest, followed by Fe and Zn, and those of Se were extremely low. The differences of Zn content and accumulation amount were the largest among varieties, followed by Fe and Se, and those of Mg were the smallest. Among the harmful elements, the content and accumulation amount of Cd and Hg were the highest and the lowest, respectively; the Cd and As differences among varieties was the largest and the smallest, respectively. The enrichment capacity for Cd in fresh cormels of different local varieties was strong, the enrichment capacity for Mg was medium, and the enrichment capacity for other elements was very small. The content and accumulation amount of Se with Fe, Cr, Hg and As, Fe with Zn, Cr, Hg and As, Zn with Cr, Hg and As, Mg with Cd, Cr with As, and Hg with As in fresh cormels were significantly and positively correlated. [Conclusion] The comprehensive analysis showed that the natural enrichment ability of fresh cormels from different local varieties of red bud taro could be divided into three categories (high, medium and low), HY14 (Yongzhou, Hunan) had high enrichment ability, HY4 (Wuxi, Jiangsu) and HY20 (Ganzhou, Jiangxi) were of medium enrichment ability, and the other varieties were of low enrichment ability.

Keywords: red bud taro [*Colocasia esculenta* (L.) Schott]; enrichment; elements; genotypic differences; identification and evaluation

【研究意义】芋头 [*Colocasia esculenta* (L.) Schott] 为天南星科 (Araceae) 芋的地下球茎, 也称芋艿、毛芋, 最早产于中国、马来西亚及印度半岛等炎热潮湿的沼泽地带, 是粮蔬兼用型作物, 全球至少有5亿人以芋为粮食或蔬菜进行食用^[1-3]。芋头含有丰富的淀粉、蛋白质、钙、磷、铁、胡萝卜素、硫胺素、核黄素、尼克素、维生素C、花青甙和甾醇等, 属生理碱性食物, 风味独特且药用价值高, 被推荐为营养丰富的功能性食品^[4-5]; 常作一年生作物在全球各地广为栽培, 尤其是热带亚热带地区, 尼日利亚、喀麦隆和加纳等地栽培最盛, 中国、日本及太平洋等地次之^[1-3]。近些年来, 随着“薯芋类作物主食化”的提出, 芋头在蔬菜中的地位越来越高, 已成为我国出口创汇的主要大宗农副产品, 对促进地方农业发展和农民增收起到重要作用^[1-3]。【前人研究进展】我国是芋属的起源中心之一, 在全世界20种芋属植物中, 我国有6种^[6]。我国芋头

栽培历史悠久,至今已有 2 300 多年,自然生态多样性高,使得我国芋头品种资源特别丰富,种植范围广泛,主要分布在珠江、台湾、长江及淮河流域,目前国内主要种类有魁芋、多子芋、多头芋和魁子兼用芋等,以多子芋和魁芋最为常见^[7-8]。芋头在生产上多采用无性繁殖的生产种苗,与其他蔬菜相比,其育种工作相对落后,各地芋主栽品种大多为通过自然选择而形成的地方品种^[9-10],目前获得国家地理标志保护产品的芋品种有 29 个。芋头按种芽的颜色又分为红芽芋、白荷芋和紫荷芋 3 类^[11];红芽芋为典型的多子芋类型,以食用地下侧球茎(子、孙芋)为主,子芋形似鹅卵,肥大群生,有少量须毛,薄皮红芽白肉,肉质细腻、口感滑糯^[12-13];富含淀粉、多糖、维生素及矿物质等,品质风味居芋类之首,具有宽肠胃、补脾胃、消癆散结、增强免疫和调节免疫等功效,是老幼皆宜和药食兼优的滋补佳品,深受全世界消费者的青睐^[14]。

【本研究切入点】陆生植物依靠根系固定在土壤中,并通过根系吸收土壤中的养分(无机元素和有机物质)来构建自身或为生命活动提供原料。根据自然元素的生理功能一般分为植物必需元素、有益元素和有害元素,它们在植物产品中的累积程度严重影响着动物和人类的生命及健康^[15]。芋收获的器官以地下球茎子芋为主,整个生长期一直埋在土壤中,理应表现出对土壤元素特定的自然富集能力^[16-18],但目前有关芋的研究多集中在种质鉴定、良种繁育和高产栽培等方面^[19-28],尚未对芋自然富集土壤元素的能力进行系统研究,尤其是对不同原产地的红芽芋地方品种在同一地方种植的产量差异及同时富集有益和有害元素能力进行鉴定与评价。【拟解决的关键问题】研究以 21 个在不同原产地上广泛种植的红芽芋地方品种为材料,在同一大田上采用相同的种植技术,运用电感耦合等离子体质谱法联合测定其子芋中的 4 种有益元素[镁(Mg)、铁(Fe)、锌(Zn)、硒(Se)]和 5 种有害元素[镉(Cd)、铬(Cr)、铅(Pb)、汞(Hg)和砷(As)],并利用模糊隶属函数法、熵权优劣解距离法和模糊综合评判法对红芽芋地方品种新鲜芋的自然富集元素能力进行综合评价,从而阐明红芽芋子芋自然富集元素能力的品种间差异,寻求到高富集有益元素且低富集有害元素的红芽芋地方品种,为高产优质营养生态安全红芽芋地方品种的遗传改良和品种选择提供理论依据及实践指导。

1 材料与方

1.1 供试材料

红芽芋地方品种 21 个,分别来自 10 个省 17 个市,均采购于淘宝网店,具体信息见表 1。

表 1 供试材料的基本信息

Tab.1 Basic information of experimental materials

代号 Code	原产地 Original area	网店 Shop name	代号 Code	原产地 Original area	网店 Shop name
HY01	江西宜春	乡下媚娘	HY12	福建晋江	健良农场
HY02	广东韶关	山里人家	HY13	广东清远	阳山番薯干
HY03	云南楚雄	云农乡	HY14	湖南永州	二小姐生鲜
HY04	江苏无锡	农家品品	HY15	四川东山	许娃东山
HY05	福建宁德	福鼎苏买买	HY16	广西南宁	七叔农庄
HY06	福建宁德	福建闽农	HY17	贵州六盘水	贵农味浓
HY07	福建宁德	小良	HY18	福建南平	武夷农场
HY08	广西南宁	才哥果园	HY19	广西南宁	图图果园
HY09	浙江嘉兴	江南农夫	HY20	江西赣州	老百姓农家
HY10	云南昆明	秋韵果品	HY21	江西铅山	农夫苏果园
HY11	浙江金华	浙江农家乐			

1.2 试验地点

试验地位于江西省吉安市万安县枳头镇井丘客家村,选择在适宜红芽芋高产栽培的水稻田(前作为油菜),土层深厚,肥力中上等且较均匀,富含有机质,疏松、通气,保水能力要强,排灌方便、有机质

含量要丰富。于2021年4月20日采用系统随机布点法采集土壤样品测定试验元素的背景值,测定方法按照GB 36600—2018标准执行,结果硒含量0.63 mg/kg,锌含量119.86 mg/kg,铁含量25 173.33 mg/kg,镁含量360.76 mg/kg,镉含量0.11 mg/kg,铬含量61.76 mg/kg,铅含量28.56 mg/kg,汞含量0.25 mg/kg,砷含量9.80 mg/kg。

1.3 试验设计

试验采用机械起畦和随机区组排列。畦长包沟20 m,畦宽包沟2 m,畦高和沟宽0.3 m,3次重复,四周设宽2.0 m的保护区。2021年5月21日人工穴栽,穴深7~8 cm,每畦双行中植,行距0.5~0.55 m,株距0.27~0.33 m,密度30 000株/hm²。栽培管理按当地农户常规管理进行。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 产量

10月1日收获时,在每畦中部连续挖取10株子芋进行称量,折算子芋产量。

1.4.2 元素含量

测产后,按小区编号采集子芋,带回实验室对子芋进行清洗和烘至恒重。先测定含水量,而后研磨成粉,过0.074 mm尼龙筛备用待测。采用电感耦合等离子体质谱法测定(GB 5009.268—2016)样品中的Fe、Zn、Se、Mg、Cd、Cr、Pb、Hg和As含量^[29]。根据含水量折算成新鲜子芋相对应的元素含量。

1.4.3 元素累积量

元素累积量为新鲜子芋产量和子芋元素含量的乘积。

1.4.4 富集系数

富集系数=植物体内的某元素的含量/土壤中某元素含量。

1.5 富集元素能力的综合评价

在进行不同产地红芽芋地方品种新鲜子芋自然富集元素能力的综合评价时,以元素含量和累积量为对象,首先采用模糊隶属函数法获得对应的模糊隶属函数值,接着采用熵权优劣解距离法计算出模糊隶属函数值对应品种的信息权重,然后将每个品种红芽芋每一元素对应的模糊隶属函数值和信息权重的乘积之和为对应的模糊综合评判得分,并根据得分高低进行自然富集元素能力的优劣排序,最后对得分进行聚类分析来将不同品种红芽芋子芋的自然富集元素能力进行归类,具体步骤和方法参见陈涵等^[30]进行。

1.6 数据处理

试验数据的基本统计分析采用Excel 2019完成。方差分析、模糊隶属函数、熵权优劣解距离法、模糊综合评判和聚类分析均采用SPSSPRO统计分析软件进行^[31]。

2 结果与分析

2.1 不同红芽芋地方品种新鲜子芋产量的差异

不同红芽芋地方品种新鲜子芋产量为2 896.5 kg/hm²(HY10)~12 993.0 kg/hm²(HY09),平均为8 636.1 kg/hm²,标准差为2 435.7,最高产量是最低产量的4.5倍,变异系数为28.2%,存在极显著差异(表2)。

2.2 不同红芽芋地方品种新鲜子芋有益元素的富集差异

2.2.1 有益元素含量差异

不同红芽芋地方品种新鲜子芋中有益元素含量均存在巨大差异(表3),Mg含量最高($n \times 10^2$ mg/kg),比Fe含量($n \times 10^1$ mg/kg)和Zn含量($n \times 10^1$ mg/kg)高1个数量级(10倍);Se含量最低($n \times 10^{-3}$ mg/kg),比Mg含量低5个数量级(10^5 倍),比Fe和Zn含量低4个数量级(10^4 倍)。由表3可知,不同红芽芋地方品种新鲜子芋中同一有益元素含量存在巨大的极显著差异,具体表现为:(1)Mg含量在76.58(HY03)~175.18 mg/kg(HY07),最大值/最小值为2.29,平均值为120.30 mg/kg;(2)Fe含量在2.32(HY19)~13.61 mg/kg(HY14),最大值/最小值为5.87,平均值为7.63 mg/kg;(3)Zn含量在2.30(HY03)~57.16 mg/kg(HY14),最大值/最小值为24.85,平均值为8.12 mg/kg;(4)Se含量在5.92(HY04)~20.72 μ g/kg(HY17),最大值/最

表 2 不同红芽芋地方品种的新鲜芋产量
Tab.2 Yield of fresh cormels from different red bud taro local varieties

代号 Code	新鲜芋产量/ (kg·hm ⁻²) Yield of fresh cormels	代号 Code	新鲜芋产量/ (kg·hm ⁻²) Yield of fresh cormels	代号 Code	新鲜芋产量/ (kg·hm ⁻²) Yield of fresh cormels
HY01	8 956.5 e CD	HY09	12 993.0 a A	HY17	4 708.5 k G
HY02	9 247.5 de CD	HY10	2 896.5 L H	HY18	8 947.5 e CD
HY03	7 758.0 h E	HY11	6 748.5 i F	HY19	8 497.5 fg CDE
HY04	9 604.5 d BC	HY12	8 796.0 ef CDE	HY20	12 256.5 ab A
HY05	9 091.5 de CD	HY13	6 094.5 j F	HY21	9 124.5 de CD
HY06	10 674.0 c B	HY14	9 528.0 d BC		
HY07	8 107.5 gh DE	HY15	8 433.0 fg CDE		
HY08	12 514.5 a A	HY16	6 381.0 ij F		

数值后的不同大、小写字母分别表示不同地方品种间差异极显著($P<0.01$)、显著($P<0.05$)。

The different uppercase and lowercase letters after data indicate significant difference at 0.01 and 0.05 levels among different local cultivars ,respectively.

表 3 不同红芽芋地方品种新鲜芋中有益元素含量的差异
Tab.3 Differences in beneficial element content of fresh cormels from different local varieties of red bud taro

代号 Code	含量 Content				富集系数 Enrichment coefficient			
	镁/(mg·kg ⁻¹) Mg	铁/(mg·kg ⁻¹) Fe	锌/(mg·kg ⁻¹) Zn	硒/(μg·kg ⁻¹) Se	镁 Mg	铁 Fe	锌 Zn	硒 Se
HY01	90.76 h FGH	6.20 h GH	2.72 l K	13.65 f EF	0.251 6	0.000 25	0.022 69	0.021 67
HY02	104.82 g EF	5.24 ij I	2.33 m L	16.32 cd BC	0.290 6	0.000 21	0.019 44	0.025 90
HY03	76.58 i I	5.11 j I	2.30 m L	9.28 l H	0.212 3	0.000 20	0.019 19	0.014 73
HY04	83.98 h HI	9.89 c BC	35.75 b B	5.92 j I	0.232 8	0.000 39	0.298 26	0.009 40
HY05	118.43 f DE	6.14 h GH	2.65 l KL	14.28 f DEF	0.328 3	0.000 24	0.022 11	0.022 67
HY06	100.03 g FG	7.46 f EF	3.20 k J	17.08 c B	0.277 3	0.000 30	0.026 70	0.027 11
HY07	175.18 a A	10.54 b B	4.58 g FG	15.07 e CDE	0.485 6	0.000 42	0.038 21	0.023 92
HY08	146.19 c B	6.50 gh FG	4.41 g FG	9.15 l H	0.405 2	0.000 26	0.036 79	0.014 52
HY09	116.21 f DE	7.63 f E	5.64 e E	12.83 g F	0.322 1	0.000 30	0.047 05	0.020 37
HY10	125.63 e CD	10.82 b B	4.99 f EF	18.14 b AB	0.348 2	0.000 43	0.041 63	0.028 79
HY11	137.99 d BC	8.00 ef DE	7.44 d D	11.12 h G	0.382 5	0.000 32	0.062 07	0.017 65
HY12	120.87 ef D	8.43 e DE	3.31 j IJ	19.83 a A	0.335 0	0.000 33	0.027 62	0.031 48
HY13	145.23 c B	10.31 bc BC	3.48 j IJ	10.87 h G	0.402 6	0.000 41	0.029 03	0.017 25
HY14	134.25 d BCD	13.61 a A	57.16 a A	10.78 h G	0.372 1	0.000 54	0.476 89	0.017 11
HY15	169.45 ab A	9.35 d CD	4.09 h GH	14.22 f DEF	0.469 7	0.000 37	0.034 12	0.022 57
HY16	140.42 cd BC	9.49 cd BCD	3.75 i HI	19.99 a A	0.389 2	0.000 38	0.031 29	0.031 73
HY17	88.56 h GH	5.51 i HI	2.37 m KL	20.72 a A	0.245 5	0.000 22	0.019 77	0.032 89
HY18	99.72 g FG	5.32 ij I	2.65 l KL	13.83 f EF	0.276 4	0.000 21	0.022 11	0.021 95
HY19	161.08 b AB	2.32 k J	3.69 i HI	15.97 d BCD	0.446 5	0.000 09	0.030 79	0.025 35
HY20	103.02 g EF	6.80 g FG	11.44 c C	11.33 h FG	0.285 6	0.000 27	0.095 44	0.017 98
HY21	87.92 h GHI	5.48 i HI	2.63 l KL	16.17 cd BCD	0.243 7	0.000 22	0.021 94	0.025 67
平均值 Mean	120.30	7.63	8.1229	14.12	0.333 5	0.000 30	0.067 77	0.022 41
标准差 S.D.	29.05	2.60	13.35	3.90	0.080 5	0.000 10	0.111 40	0.006 20
变异系数 C.V.	24.15	34.05	164.38	27.64	24.15	34.05	164.38	27.64

数值后的不同大、小写字母分别表示不同地方品种间差异极显著($P<0.01$)、显著($P<0.05$)。

The different uppercase and lowercase letters after data indicate significant difference at 0.01 and 0.05 levels among different local cultivars ,respectively.

小值为 3.50, 平均为 14.12 $\mu\text{g/kg}$ 。(5)不同红芽芋地方品种 4 个有益元素含量的变异系数从大到小依次是 Zn(164.38%)、Fe(34.05%)、Se(27.64%)和 Mg(24.14%)。从表 3 还可知,不同红芽芋地方品种新鲜子芋对同一有益元素的富集系数存在巨大差异,与含量的规律一致,品种间差异最大的元素是 Zn,其次为 Fe 和 Se,最小的为 Mg。

2.2.2 有益元素累积量的差异

不同红芽芋地方品种新鲜子芋中有益元素累积量存在极显著差异(表 4),Mg 累积量最高($n\times 10^3\text{ g/hm}^2$),比 Fe 和 Zn 累积量($n\times 10^2\text{ g/hm}^2$)高 1 个数量级(10 倍);Se 累积量最低($n\times 10^2\text{ mg/hm}^2$),比 Mg 累积量低 4 个数量级(10 000 倍),比 Fe 和 Zn 累积量低 3 个数量级(1 000 倍)。表 4 表明,不同红芽芋地方品种新鲜子芋中同一有益元素累积量存在极显著差异,呈如下规律:(1)Mg 累积量在 363.90(HY10)~1 829.55 g/hm^2 (HY08),最大值/最小值为 5.03,平均值为 1 032.26 g/hm^2 ;(2)Fe 累积量在 19.65(HY19)~129.60 g/hm^2 (HY14),最大值/最小值为 6.60,平均值为 64.68 g/hm^2 ;(3)Zn 累积量在 11.10(HY17)~544.65 g/hm^2 (HY14),最大值/最小值为 49.07,平均值为 75.19 g/hm^2 ;(4)Se 累积量在 52.50(HY10)~182.25 mg/hm^2 (HY06),最大值/最小值为 3.47,平均为 118.07 mg/hm^2 。(5)不同红芽芋地方品种 4 个有益元素累积量的变异系数从大到小依次是 Zn(172.42%)、Fe(41.23%)、Mg(35.24%)和 Se(31.71%),即红芽芋新鲜子芋中,地方品种间的 Zn 累积量差异最大,Fe 次之,Se 和 Mg 最小。

表 4 不同红芽芋地方品种新鲜子芋中有益元素的累积量

Tab.4 The beneficial elements accumulation amounts of fresh cormels from different local varieties of red bud taro

代号 Code	镁/($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$) Mg	铁/($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$) Fe	锌/($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$) Zn	硒/($\text{mg}\cdot\text{hm}^{-2}$) Se
HY01	813.00 h F	55.50 g FG	24.30 k K	122.25 f CD
HY02	969.30 f DE	48.45 h H	21.60 l K	150.90 c BC
HY03	594.15 i G	39.60 i I	17.85 m L	72.00 I F
HY04	806.55 h F	94.95 b BC	343.35 b B	56.85 k G
HY05	1 076.70 e D	55.80 g FG	24.00 k K	129.75 e CD
HY06	1 067.70 e D	79.65 d DE	34.20 h FG	182.25 a A
HY07	1 420.20 c BC	85.50 c CD	37.20 g F	122.25 f CD
HY08	1 829.55 a A	81.45 cd DE	55.20 e E	114.45 g DE
HY09	1 509.90 b B	99.15 b B	73.20 d D	166.80 b AB
HY10	363.90 k H	31.35 j J	14.40 n M	52.50 l G
HY11	931.20 fg DE	54.00 g GH	50.25 f E	75.00 I F
HY12	1 063.20 e D	74.10 e E	29.10 j H	174.45 ab A
HY13	885.15 g EF	62.85 f F	21.15 l K	66.30 j F
HY14	1 279.05 d C	129.60 a A	544.65 a A	102.75 h E
HY15	1 429.05 bc BC	78.90 d DE	34.50 h FG	120.00 fg D
HY16	895.95 g EF	60.60 f FG	23.85 k K	127.50 ef CD
HY17	417.00 j H	25.95 k K	11.10 o N	97.50 h E
HY18	892.20 g EF	47.70 h H	23.70 k K	123.75 ef CD
HY19	1 368.75 c BC	19.65 l L	31.35 i GH	135.75 de CD
HY20	1 262.70 d C	83.40 cd CDE	140.10 c C	138.90 d C
HY21	802.20 h F	50.10 h H	24.00 k K	147.60 c BC
平均值 Mean	1 032.26	64.68	75.19	118.07
标准差 S.D.	363.75	26.67	129.69	37.44
变异系数 C.V.	35.24	41.24	172.47	31.71

数值后的不同大、小写字母分别表示不同地方品种间差异极显著($P<0.01$)、显著($P<0.05$)。

The different uppercase and lowercase letters after data indicate significant difference at 0.01 and 0.05 levels among different local cultivars, respectively.

2.3 不同红芽芋地方品种新鲜芋中有害元素的富集差异

2.3.1 有害元素的含量差异

不同红芽芋地方品种新鲜芋中有害元素含量均存在极大的差异(表 5),Cd 和 Pb 含量最高($n \times 10^1 \mu\text{g/kg}$),比 Cr 和 As 含量($n \times 10^0 \mu\text{g/kg}$)高 1 个数量级(10 倍),比 Hg 含量($n \times 10^{-1} \mu\text{g/kg}$)高 2 个数量级(100 倍)。由表 4 可知,不同红芽芋地方品种新鲜芋中同一有害元素含量存在极显著差异,具体表现为:(1)Cd 含量在 31.38(HY17)~161.16 $\mu\text{g/kg}$ (HY14),最大值/最小值为 5.14,平均值为 92.33 $\mu\text{g/kg}$;(2)Cr 含量在 0(HY19)~26.48 $\mu\text{g/kg}$ (HY9),平均值为 3.44 $\mu\text{g/kg}$;(3)Pb 含量在 7.22(HY02)~111.75 $\mu\text{g/kg}$ (HY14),最大值/最小值为 16.31,平均值为 42.75 $\mu\text{g/kg}$;(4)Hg 含量在 0(HY20)~0.84 $\mu\text{g/kg}$ (HY19),平均值为 0.36 $\mu\text{g/kg}$;(5)As 含量在 0.82(HY20)~5.09 $\mu\text{g/kg}$ (HY09),最大值/最小值为 6.21,平均值为 3.44 $\mu\text{g/kg}$;(6)不同红芽芋地方品种有害元素含量的变异系数从大到小依次是 Cr(73.04%)、Pb(60.99%)、Hg(59.94%)、Cd(33.61%)和 As(31.67%),即红芽芋新鲜芋中,地方品种间的 Cr 含量差异最大,Pb 和 Hg 次之,Cd 和 As 最小。从表 5 还可看出,不同红芽芋地方品种对同一有害元素的富集系数存在巨大差异,与含量的规律一致,品种间差异最大的元素是 Cr,其次为 Pb、Hg 和 Cd,As 最小。红芽芋芋的有害元素平均富集系数 Cd 为最高(0.839 4),其次为 Pb(0.001 50)、Hg(0.001 42)和 As(0.000 35),Cr 最小(0.000 15)。

表 5 不同红芽芋地方品种新鲜芋中有害元素含量的差异

Tab.5 Differences in the harmful element contents of fresh cormels from different red bud taro local varieties

代号 Code	含量 Content					富集系数 Enrichment coefficient				
	镉/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)Cd	铬/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)Cr	铅/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)Pb	汞/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)Hg	砷/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)As	镉 Cd	铬 Cr	铅 Pb	汞 Hg	砷 As
HY01	53.72 l I	3.03 l I	24.96 i HI	0.17 l I	3.34 hi EF	0.488 4	0.000 05	0.000 87	0.000 68	0.000 34
HY02	71.70 j H	14.77 d C	7.22 m L	0.14 m J	3.61 fg DE	0.651 8	0.000 24	0.000 25	0.000 56	0.000 37
HY03	64.66 k HI	1.09 n J	12.97 l K	0 n K	1.80 m H	0.587 8	0.000 02	0.000 45	0	0.000 18
HY04	92.38 h FG	9.34 g E	84.44 b B	0.20 k H	2.36 l G	0.839 8	0.000 15	0.002 96	0.000 80	0.000 24
HY05	55.67 l I	4.75 j H	16.05 k J	0.35 h E	3.10 j F	0.506 1	0.000 08	0.000 56	0.001 40	0.000 32
HY06	87.29 hi G	10.57 f E	53.13 d D	0.20 k H	3.13 j F	0.793 5	0.000 17	0.001 86	0.000 80	0.000 32
HY07	107.57 ef CDE	18.59 b B	31.66 h G	0.53 cd C	4.06 e CD	0.977 9	0.000 30	0.001 11	0.002 12	0.000 41
HY08	101.13 gh EF	16.90 c BC	22.53 j I	0.55 c C	3.04 j F	0.919 4	0.000 27	0.000 79	0.002 20	0.000 31
HY09	117.22 cd CD	26.48 a A	53.56 d D	0.17 l I	5.09 a A	1.065 6	0.000 43	0.001 88	0.000 68	0.000 52
HY10	72.16 j H	16.77 c BC	86.73 b B	0.41 g D	4.76 bc AB	0.656 0	0.000 27	0.003 04	0.001 64	0.000 49
HY11	113.84 de CDE	12.55 e D	44.64 e E	0.24 j G	3.13 j F	1.034 9	0.000 20	0.001 56	0.000 96	0.000 32
HY12	92.00 h FG	10.66 f E	34.15 g FG	0.33 h E	3.76 f DE	0.836 4	0.000 17	0.001 20	0.001 32	0.000 38
HY13	101.80 gh DEF	7.64 h F	32.35 h G	0.52 d C	4.90 ab AB	0.925 5	0.000 12	0.001 13	0.002 08	0.000 50
HY14	161.16 a A	5.87 i G	111.75 a A	0.43 fg D	3.18 ij F	1.465 1	0.000 10	0.003 91	0.001 72	0.000 32
HY15	108.10 ef CDE	14.47 d CD	27.46 i H	0.46 e D	4.61 c ABC	0.982 7	0.000 23	0.000 96	0.001 84	0.000 47
HY16	123.43 c BC	7.91 h F	46.81 e DE	0.56 c BC	4.35 d BC	1.122 1	0.000 13	0.001 64	0.002 24	0.000 44
HY17	31.38 m J	7.24 h F	44.02 e E	0.44 ef D	4.66 bc ABC	0.285 3	0.000 12	0.001 54	0.001 76	0.000 48
HY18	84.86 i G	3.37 k I	35.66 fg FG	0.30 i F	2.47 k G	0.771 5	0.000 05	0.001 25	0.001 20	0.000 25
HY19	103.40 fg DEF	0 o K	26.38 i H	0.84 a A	3.52 gh DEF	0.940 0	0.000 00	0.000 92	0.003 36	0.000 36
HY20	139.08 b B	1.17 m J	63.77 c C	0 n K	0.82 n L	1.264 4	0.000 02	0.002 23	0	0.000 08
HY21	56.41 l I	3.47 k I	37.48 f F	0.64 b B	2.55 k G	0.512 8	0.000 06	0.001 31	0.002 56	0.000 26
平均值 Mean	92.33	9.36	42.75	0.36	3.44	0.839 4	0.000 15	0.001 50	0.001 42	0.000 35
标准差 S.D.	31.03	6.84	26.07	0.21	1.09	0.282 1	0.000 11	0.000 913	0.000 85	0.000 11
变异系数 C.V.	33.61	73.04	60.99	59.94	31.67	33.61	73.04	60.99	59.94	31.71

数值后的不同大、小写字母分别表示不同地方品种间差异极显著($P<0.01$)、显著($P<0.05$)。

The different uppercase and lowercase letters after data indicate significant difference at 0.01 and 0.05 levels among different local cultivars, respectively.

2.3.2 有害元素的累积量差异

不同红芽芋地方品种的新鲜芋中有害元素累积量均存在巨大差异(表6),Pb和Cd累积量最高($n \times 10^2$ mg/hm²),比Cr和As累积量($n \times 10^1$ mg/hm²)高1个数量级(10倍)比Hg累积量($n \times 10^0$ mg/hm²)高2个数量级(100倍)。不同红芽芋地方品种新鲜芋中同一有害元素累积量存在较大差异(表6),呈如下表现:(1)Cd累积量在147.75(HY17)~1 704.60 mg/hm²(HY20),最大值/最小值为11.54,平均值为822.78 mg/hm²;(2)Cr累积量在0(HY19)~343.95 mg/hm²(HY09),平均值为82.69 mg/hm²;(3)Pb累积量在66.75(HY02)~1 064.70 mg/hm²(HY14),最大值/最小值为15.95,平均值为365.16 mg/hm²;(4)Hg累积量在0(HY03和HY20)~7.05 mg/hm²(HY19),平均值为82.69 mg/hm²;(5)As累积量在10.05(HY20)~66.15 mg/hm²(HY09),最大值/最小值为6.58,平均值为28.60 mg/hm²;(6)不同红芽芋地方品种有害元素累积量的变异系数从大到小依次是Cr(96.99%)、Pb(71.85%)、Hg(66.06%)、Cd(49.55%)和As(40.48%),即红芽芋新鲜芋中,地方品种间的Cr累积量差异最大,Pb和Hg累积量次之,Cd和As的差异最小。

表6 不同红芽芋地方品种新鲜芋有害元素的累积量

Tab.6 The harmful elements accumulation amounts of fresh cormels from different local varieties of red bud taro

代号 Code	镉 Cd	铬 Cr	铅 Pb	汞 Hg	砷 As
HY01	481.05 k G	27.15 o J	223.50 j HI	1.50 l IJ	30.00 d CD
HY02	663.15 h F	136.65 d CD	66.75 n L	1.35 m J	33.30 c C
HY03	501.60 jk G	8.40 q L	100.65 m K	0 o K	13.95 h F
HY04	887.25 de CDE	89.70 g E	810.90 b B	1.95 j H	22.65 f E
HY05	506.10 j G	43.20 l H	145.95 l J	3.15 f EF	28.20 e D
HY06	931.80 d C	112.80 f D	567.15 d D	2.10 i H	33.45 c C
HY07	872.10 e CDE	150.75 c C	256.65 i GH	4.35 c C	32.85 c C
HY08	1 265.55 c B	211.50 b B	282.00 h FG	6.90 a A	38.10 b BC
HY09	1 523.10 b A	343.95 a A	695.85 c C	2.25 h H	66.15 a A
HY10	208.95 l H	48.60 jk FGH	251.25 i GH	1.20 n J	13.80 h F
HY11	768.30 fg E	84.75 h E	301.20 g EF	1.65 k I	21.15 g E
HY12	809.25 f DE	93.75 g E	300.45 g EF	2.85 g FG	33.00 c C
HY13	620.40 I F	46.50 k GH	197.10 k I	3.15 f EF	29.85 d CD
HY14	1 535.55 b A	55.95 I F	1 064.70 a A	4.05 d CD	30.30 d CD
HY15	911.70 de CD	122.10 e D	231.60 j H	3.90 d CD	38.85 b B
HY16	787.65 fg E	50.55 j FG	298.65 g EF	3.60 e DE	27.75 e D
HY17	147.75 m I	34.05 m I	207.30 k I	2.10 i H	21.90 f E
HY18	759.30 g EF	30.15 n IJ	319.05 f EF	2.70 g G	22.20 f E
HY19	878.55 e CDE	0 r M	224.10 j HI	7.05 a A	29.85 d CD
HY20	1 704.60 a A	14.40 p K	781.65 b BC	0 o K	10.05 i G
HY21	514.65 j G	31.65 n I	342.00 e E	5.85 b B	23.25 f E
平均值 Mean	822.78	82.69	365.16	2.94	28.60
标准差 S.D.	407.68	80.20	262.37	1.94	11.58
变异系数 C.V.	49.55	96.99	71.85	66.06	40.48

数值后的不同大、小写字母分别表示不同地方品种间差异极显著($P < 0.01$)、显著($P < 0.05$)。

The different uppercase and lowercase letters after data indicate significant difference at 0.01 and 0.05 levels among different local cultivars, respectively.

2.4 不同红芽芋地方品种新鲜子芋自然富集元素能力的综合评价

2.4.1 模糊隶属函数分析

表 7 表明,依据模糊隶属函数值大小进行红芽芋地方品种新鲜子芋富集能力评价,综合来看,红芽芋新鲜子芋中高有益元素含量由高到低的品种依次为 HY14、HY07、HY16、HY15、HY10 和 HY12,中有益元素含量由高到低的品种依次为 HY13、HY11、HY19、HY06、HY17、HY09、HY04、HY05、HY08 和 HY02,低有益元素含量由高到低的品种依次为 HY20、HY21、HY18、HY01 和 HY03。由表 8 可知,红芽芋新鲜子芋中高有害元素含量的品种依次为 HY09、HY14、HY10、HY07、HY16、HY15 和 HY13,中有害元素含量由高到低的品种依次为 HY08、HY19、HY11、HY12、HY04、HY17 和 HY06,低有害元素含量由高到低的品种依次为 HY21、HY02、HY18、HY20、HY05、HY01 和 HY03。由表 9 可知,依据模糊隶属函数值大小进行红芽芋地方品种新鲜子芋富集能力评价,红芽芋新鲜子芋中高有益元素累积由高到低的品种依次为 HY14、HY09、HY08、HY20、HY06、HY12、HY07 和 HY15,中有益元素累积由高到低的品种依次为 HY04、HY02、HY05、HY19、HY16、HY21、HY1、HY18、HY11 和 HY13,低有益元素累积由高到低的品种依次为 HY03、HY17 和 HY10。表 10 表明,红芽芋新鲜子芋中高有害元素累积由高到低的品种依次为 HY09、HY08 和 HY14,中有害元素累积由高到低的品种依次为 HY07、HY15、HY06、HY19、HY04、HY20、HY12、HY21 和 HY16,低有益元素累积由高到低的品种依次为 HY13、HY2、HY18、HY11、HY05、HY01、HY17、HY10 和 HY03。

表 7 不同红芽芋地方品种新鲜子芋有益元素含量模糊隶属函数值

Tab.7 Fuzzy membership function values of beneficial element contents in fresh cormels from different red bud taro local varieties

代号 Code	硒 Se	铁 Fe	锌 Zn	镁 Mg	总值 Sum	平均值 Mean	总序 Rank	聚类 Type
HY01	0.52	0.34	0.01	0.14	1.02	0.25	20	低
HY02	0.70	0.26	0	0.29	1.25	0.31	16	中
HY03	0.23	0.25	0	0	0.47	0.12	21	低
HY04	0	0.67	0.61	0.08	1.35	0.34	13	中
HY05	0.56	0.34	0.01	0.42	1.33	0.33	14	中
HY06	0.75	0.46	0.02	0.24	1.46	0.37	10	中
HY07	0.62	0.73	0.04	1.00	2.39	0.60	2	高
HY08	0.22	0.37	0.04	0.71	1.33	0.33	15	中
HY09	0.47	0.47	0.06	0.40	1.40	0.35	12	中
HY10	0.83	0.75	0.05	0.50	2.13	0.53	5	高
HY11	0.35	0.50	0.09	0.62	1.57	0.39	8	中
HY12	0.94	0.54	0.02	0.45	1.95	0.49	6	高
HY13	0.33	0.71	0.02	0.70	1.76	0.44	7	中
HY14	0.33	1.00	1.00	0.58	2.91	0.73	1	高
HY15	0.56	0.62	0.03	0.94	2.16	0.54	4	高
HY16	0.95	0.64	0.03	0.65	2.26	0.56	3	高
HY17	1.00	0.28	0	0.12	1.41	0.35	11	中
HY18	0.53	0.27	0.01	0.23	1.04	0.26	19	低
HY19	0.68	0	0.03	0.86	1.56	0.39	9	中
HY20	0.37	0.40	0.17	0.27	1.20	0.30	17	低
HY21	0.69	0.28	0.01	0.12	1.09	0.27	18	低

2.4.2 评价权重

以元素含量、元素累积量及两者为评价指标,在 SPSSPRO 软件上进行熵值法计算,获得的权重结果于表 11。若以元素含量为评价指标 Zn 含量权重最大(53.065%),其次为 Mg 含量(9.496%)、As 含量(9.485%)、Fe 含量(5.283%)、Se 含量(5.271%)、Cd 含量(4.806%)、Hg 含量(4.68%)和 Cr 含量(4.054%),Pb 含量最低(3.861%)。若以元素累积量为评价指标,Zn 累积量的权重最大(50.171%),其次为 Se 累积量(9.191%)、Fe 累积量(8.858%)、Mg 累积量(7.882%)、Hg 累积量(6.672%)、Cd 累积量(6.345%)、Pb 累积量(4.488%)、Cr 累积量(3.237%)和 As 累积量(3.157%)。若同时以元素含量和累积量为评价指标,Zn 含量

表 8 不同红芽芋地方品种新鲜子芋有害元素含量模糊隶属函数值

Tab.8 Fuzzy membership function values of harmful element contents in fresh cormels from different red bud taro local varieties

代号 Code	镉 Cd	铬 Cr	铅 Pb	汞 Hg	砷 As	总值 Sum	平均值 Mean	总序 Rank	聚类 Type
HY01	0.83	0.89	0.83	0.79	0.41	3.74	0.75	2	低
HY02	0.69	0.44	1.00	0.83	0.35	3.31	0.66	6	低
HY03	0.74	0.96	0.94	1.00	0.77	4.42	0.88	1	低
HY04	0.53	0.65	0.26	0.76	0.64	2.84	0.57	10	中
HY05	0.81	0.82	0.92	0.58	0.47	3.59	0.72	3	低
HY06	0.57	0.60	0.56	0.76	0.46	2.95	0.59	8	中
HY07	0.41	0.30	0.77	0.37	0.24	2.09	0.42	18	高
HY08	0.46	0.36	0.85	0.34	0.48	2.50	0.50	14	中
HY09	0.34	0	0.56	0.80	0	1.69	0.34	21	高
HY10	0.69	0.37	0.24	0.52	0.08	1.89	0.38	19	高
HY11	0.36	0.53	0.64	0.72	0.46	2.71	0.54	12	中
HY12	0.53	0.60	0.74	0.60	0.31	2.79	0.56	11	中
HY13	0.46	0.71	0.76	0.38	0.04	2.35	0.47	15	高
HY14	0	0.78	0	0.48	0.45	1.71	0.34	20	高
HY15	0.41	0.45	0.81	0.45	0.11	2.23	0.45	16	高
HY16	0.29	0.70	0.62	0.33	0.17	2.11	0.42	17	高
HY17	1.00	0.73	0.65	0.47	0.10	2.94	0.59	9	中
HY18	0.59	0.87	0.73	0.64	0.61	3.44	0.69	5	低
HY19	0.45	1.00	0.82	0	0.37	2.63	0.53	13	中
HY20	0.17	0.96	0.46	1.00	1.00	3.58	0.72	4	低
HY21	0.81	0.87	0.71	0.24	0.59	3.22	0.64	7	低

表 9 不同红芽芋新鲜子芋有益元素累积量模糊隶属函数值

Tab.9 The fuzzy membership function values of beneficial element accumulation amounts in fresh cormels from different red bud taro local varieties

代号 Code	硒 Se	铁 Fe	锌 Zn	镁 Mg	总值 Sum	平均值 Mean	总序 Rank	聚类 Type
HY01	0.54	0.33	0.02	0.31	1.20	0.30	15	中
HY02	0.76	0.26	0.02	0.41	1.45	0.36	10	中
HY03	0.15	0.18	0.01	0.16	0.50	0.13	19	低
HY04	0.03	0.68	0.62	0.30	1.64	0.41	9	中
HY05	0.60	0.33	0.02	0.49	1.44	0.36	11	中
HY06	1.00	0.55	0.04	0.48	2.07	0.52	5	高
HY07	0.54	0.60	0.05	0.72	1.91	0.48	7	高
HY08	0.48	0.56	0.08	1.00	2.12	0.53	3	高
HY09	0.88	0.72	0.12	0.78	2.50	0.63	2	高
HY10	0	0.11	0.01	0	0.11	0.03	21	低
HY11	0.17	0.31	0.07	0.39	0.95	0.24	17	中
HY12	0.94	0.50	0.03	0.48	1.95	0.49	6	高
HY13	0.11	0.39	0.02	0.36	0.87	0.22	18	中
HY14	0.39	1.00	1.00	0.62	3.01	0.75	1	高
HY15	0.52	0.54	0.04	0.73	1.83	0.46	8	高
HY16	0.58	0.37	0.02	0.36	1.34	0.33	13	中
HY17	0.35	0.06	0	0.04	0.44	0.11	20	低
HY18	0.55	0.25	0.02	0.36	1.19	0.30	16	中
HY19	0.64	0	0.04	0.69	1.37	0.34	12	中
HY20	0.67	0.58	0.24	0.61	2.10	0.53	4	高
HY21	0.73	0.28	0.02	0.30	1.33	0.33	14	中

表 10 不同红芽芋新鲜芋中有害元素累积量模糊隶属函数值

Tab.10 The fuzzy membership function values of harmful element accumulation amounts in fresh cormels from different red bud taro local varieties

代号 Code	镉 Cd	铬 Cr	铅 Pb	汞 Hg	砷 As	总值 Sum	平均值 Mean	总序 Rank	聚类 Type
HY01	0.79	0.92	0.84	0.78	0.65	3.97	0.79	4	低
HY02	0.67	0.60	1.00	0.81	0.58	3.67	0.73	8	低
HY03	0.77	0.98	0.97	1.00	0.93	4.64	0.93	1	低
HY04	0.52	0.74	0.25	0.73	0.78	3.02	0.60	14	中
HY05	0.77	0.87	0.92	0.54	0.68	3.79	0.76	5	低
HY06	0.50	0.67	0.50	0.70	0.58	2.95	0.59	16	中
HY07	0.53	0.56	0.81	0.39	0.59	2.89	0.58	18	中
HY08	0.28	0.39	0.78	0.02	0.50	1.97	0.39	20	高
HY09	0.12	0	0.37	0.69	0	1.17	0.23	21	高
HY10	0.96	0.86	0.82	0.83	0.93	4.40	0.88	2	低
HY11	0.60	0.75	0.77	0.77	0.80	3.70	0.74	6	低
HY12	0.58	0.73	0.77	0.59	0.59	3.25	0.65	12	中
HY13	0.70	0.86	0.87	0.55	0.65	3.63	0.73	9	低
HY14	0.11	0.84	0	0.42	0.64	2.00	0.40	19	高
HY15	0.51	0.65	0.83	0.45	0.49	2.93	0.59	17	中
HY16	0.59	0.85	0.77	0.49	0.68	3.38	0.68	10	中
HY17	1.00	0.90	0.86	0.70	0.79	4.25	0.85	3	低
HY18	0.61	0.91	0.75	0.62	0.78	3.67	0.73	7	低
HY19	0.53	1.00	0.84	0.0	0.65	3.01	0.60	15	中
HY20	0	0.96	0.28	1.00	1.00	3.24	0.65	13	中
HY21	0.76	0.91	0.72	0.17	0.76	3.33	0.67	11	中

权重最大(28.431%),其余依次为 Zn 累积量(23.291%)、Mg 含量(5.087%)、As 含量(5.082%)、Se 累积量(4.267%)、Fe 累积量(4.112%)、Mg 累积量(3.659%)、Hg 累积量(3.097%)、Cd 累积量(2.945%)、Fe 含量(2.83%)、Se 含量(2.824%)、Cd 含量(2.575%)、Hg 含量(2.507%)、Cr 含量(2.172%)、Pb 累积量(2.084%)、Pb 含量(2.069%)、Cr 累积量(1.503%)和 As 累积量(1.465%)。

表 11 不同红芽芋地方品种新鲜芋中 9 个元素含量和累积量的信息熵、信息效用和信息权重

Tab.11 Information entropy, information utility and information weight of the nine element contents and accumulation amounts in fresh cormels from different red bud taro local varieties

元素 Element	含量信息权重/% Information weight of content	累积量信息权重/% Information weight of accumulation	信息权重/% Information weight	
			含量 Content	累积量 Accumulation amount
硒 Se	5.271	9.191	2.824	4.267
铁 Fe	5.283	8.858	2.83	4.112
锌 Zn	53.065	50.171	28.431	23.291
镁 Mg	9.496	7.882	5.087	3.659
镉 Cd	4.806	6.345	2.575	2.945
铬 Cr	4.054	3.237	2.172	1.503
铅 Pb	3.861	4.488	2.069	2.084
汞 Hg	4.680	6.672	2.507	3.097
砷 As	9.485	3.157	5.082	1.465
合计 Total	100.00	100.00	53.577	46.423

2.4.3 综合评价

根据红芽芋新鲜子芋中9个元素含量和累积量的归一化处理后的模糊隶属函数值(表7~10)及相对应的权重(表11),采用模糊综合评判法对21个红芽芋地方品种新鲜子芋的自然富集元素能力进行综合评价。从表12可以看出,若以元素含量及其权重为评价指标,不同红芽芋新鲜子芋富集元素能力的强弱和类别依次为HY14(高)、HY04(中)、HY20(低)、HY11(低)、HY07(低)、HY15(低)、HY05(低)、HY12(低)、HY19(低)、HY16(低)、HY03(低)、HY08(低)、HY18(低)、HY16(低)、HY01(低)、HY10(低)、HY02(低)、HY13(低)和HY21(低);若以元素累积量及其权重为评价指标,不同红芽芋新鲜子芋富集元素能力的强弱和类别依次为HY14(高)、HY04(中)、HY20(中)、HY06(低)、HY12(低)、HY09(低)、HY07(低)、HY02(低)、HY15(低)、HY05(低)、HY01(低)、HY08(低)、HY11(低)、HY18(低)、HY16(低)、HY21(低)、HY03(低)、HY19(低)、HY13(低)、HY17(低)和HY10(低);若以元素含量和累积量及其权重为评价指标,不同红芽芋新鲜子芋富集元素能力的强弱和类别依次为HY14(高)、HY04(中)、HY20(中)、HY07(低)、HY12(低)、HY06(低)、HY11(低)、HY15(低)、HY05(低)、HY02(低)、HY01(低)、HY08(低)、HY16(低)、HY18(低)、HY03(低)、HY09(低)、HY19(低)、HY21(低)、HY13(低)、HY10(低)和HY17(低)。

表 12 不同红芽芋地方品种新鲜子芋的自然富集元素能力的综合值和排名

Tab.12 Combined values and rankings of naturally enriched element abilities in fresh cormels from different local varieties of red bud taro

代号 Code	含量 Content			累积量 Accumulation amount			含量与累积量 Content and accumulation amount		
	得分	排名	聚类	得分	排名	聚类	得分	排名	聚类
	Score	Rank	Type	Score	Rank	Type	Score	Rank	Type
HY01	0.247 1	15	低	0.304 8	11	低	0.273 9	11	低
HY02	0.239 8	17	低	0.314 9	8	低	0.274 7	10	低
HY03	0.256 0	11	低	0.268 6	17	低	0.261 8	15	低
HY04	0.524 3	2	中	0.541 9	2	中	0.532 5	2	中
HY05	0.270 3	7	低	0.310 7	10	低	0.289 1	9	低
HY06	0.247 8	14	低	0.340 7	4	低	0.291 0	6	低
HY07	0.289 8	5	低	0.317 2	7	低	0.302 5	4	低
HY08	0.249 9	12	低	0.297 2	12	低	0.271 9	12	低
HY09	0.195 1	21	低	0.335 1	6	低	0.260 1	16	低
HY10	0.245 3	16	低	0.223 0	21	低	0.235 0	20	低
HY11	0.294 8	4	低	0.284 8	13	低	0.290 2	7	低
HY12	0.267 1	8	低	0.337 1	5	低	0.299 6	5	低
HY13	0.234 8	18	低	0.250 7	19	低	0.242 2	19	低
HY14	0.753 0	1	高	0.757 3	1	高	0.755 0	1	高
HY15	0.270 3	6	低	0.311 2	9	低	0.289 3	8	低
HY16	0.257 4	10	低	0.280 7	15	低	0.268 2	13	低
HY17	0.214 0	20	低	0.243 0	20	低	0.227 5	21	低
HY18	0.247 9	13	低	0.281 1	14	低	0.263 3	14	低
HY19	0.259 2	9	低	0.256 2	18	低	0.257 8	17	低
HY20	0.360 4	3	低	0.424 1	3	中	0.390 0	3	中
HY21	0.234 4	19	低	0.273 9	16	低	0.252 8	18	低

2.5 红芽芋地方品种新鲜子芋自然富集元素间的关系

由表13可知,红芽芋新鲜子芋Se含量与Fe、Cr、Hg和As的含量呈极显著正相关,相关系数由大到小依次是As(0.644)、Hg(0.567)和Cr(0.534)=Fe(0.534);Fe含量与Zn、Cr、Hg和As含量呈极显著正相关,

与 Pb 含量呈显著相关,相关系数从大到小依次是 As(0.919)=Zn(0.919)、Hg(0.901)、Cr(0.881)和 Pb(0.425);Zn 含量与 Cr、Hg 和 As 含量呈极显著正相关,与 Mg 和 Pb 含量呈显著正相关,相关系数由大到小依次是 Hg(0.930)、As(0.898)、Cr(0.821)、Mg(0.484)和 Pb(0.416);Mg 含量与 Cd 含量呈极显著正相关($R=0.680$),与 Hg 含量显著负相关($R=-0.489$);Cd 含量与 As 和 Hg 含量呈极显著正相关,相关系数为 As(0.929)>Hg(0.897);Hg 含量和 As 含量呈极显著正相关($R=0.983$)。

表 13 不同红芽芋地方品种新鲜芋自然富集元素含量间的相关系数

Tab.13 The correlation coefficient of naturally enriched element contents in fresh cormels from different red bud taro local varieties

	铁 Fe	锌 Zn	镁 Mg	镉 Cd	铬 Cr	铅 Pb	汞 Hg	砷 As
硒 Se	0.534**	0.389	-0.037	-0.239	0.534**	0.038	0.567**	0.644**
铁 Fe		0.919**	-0.264	-0.06	0.881**	0.425*	0.901**	0.919**
锌 Zn			-0.484*	-0.161	0.821**	0.416*	0.930**	0.898**
镁 Mg				0.680**	-0.314	-0.053	-0.489*	-0.389
镉 Cd					-0.226	0.402	-0.340	-0.314
铬 Cr						0.181	0.897**	0.929**
铅 Pb							0.155	0.161
汞 Hg								0.983**

**、*分别代表 1%、5% 的显著性水平。
** and * represent the significance levels of 1% and 5%, respectively.

由表 14 可知,红芽芋新鲜芋 Se 累积量与 Fe、Zn、Cr、Hg 和 As 累积量呈极显著正相关,与 Pb 累积量呈显著正相关,相关性由大到小依次是 As(0.907)、Cr(0.892)=Fe(0.892)、Hg(0.887)、Zn(0.836)和 Pb(0.492);Fe 累积量与 Zn、Cr、Pb、Hg 和 As 累积量呈极显著正相关,相关性由大到小依次是锌(0.982)、砷(0.980)、汞(0.975)、铬(0.969)和铅(0.646);Zn 累积量与 Cr、Pb、Hg 和 As 累积量呈极显著正相关,相关性由大到小依次是 Hg(0.973)、As(0.967)、Cr(0.940)和 Pb(0.662);Mg 累积量与 Cd 累积量呈极显著正相关;Cd 累积量与 Pb 累积量呈极显著正相关,Cr 累积量与 Pb、Hg 和 As 累积量呈极显著正相关,相关性由大到小依次是 As(0.982)、Hg(0.966)和 Pb(0.536);Pb 累积量与 As 累积量呈极显著正相关,与 Hg 累积量呈显著正相关;Hg 与 As 累积量呈极显著正相关。

表 14 不同红芽芋地方品种新鲜芋自然富集元素累积量的相关系数

Tab.14 The correlation coefficient of naturally enriched elements accumulation amounts in fresh cormels from different red bud taro local varieties

	铁 Fe	锌 Zn	镁 Mg	镉 Cd	铬 Cr	铅 Pb	汞 Hg	砷 As
硒 Se	0.892**	0.836**	0.017	0.155	0.892**	0.492*	0.887**	0.907**
铁 Fe		0.982**	-0.117	0.144	0.969**	0.646**	0.975**	0.980**
锌 Zn			-0.222	0.083	0.940**	0.662**	0.973**	0.967**
镁 Mg				0.761**	-0.112	0.098	-0.251	-0.194
镉 Cd					0.083	0.610**	-0.031	0.008
铬 Cr						0.536**	0.966**	0.982**
铅 Pb							0.511*	0.521**
汞 Hg								0.996**

**、*分别代表 1%、5% 的显著性水平。
** and * represent the significance levels of 1% and 5%, respectively.

3 讨 论

3.1 同一红芽芋地方品种对不同元素的富集能力不同

众多研究表明,同一植物品种对不同元素的富集能力是不同的^[32],芋头也同样如此。邹日^[34]研究表

明,山东省不同地方的芋头对Cd富集能力最强(均值为0.06 mg/kg),其次为Pb(均值为0.002 8 mg/kg),As和Hg积累的很少(均值为0.000 05 mg/kg)。宋春风^[35]研究发现,芋头对Fe、Mn、Cu和Zn的吸收动态与植株干物质的积累规律基本一致,幼苗期吸收较少,发棵期和球茎膨大期吸收积累速率迅速增加,球茎膨大后期对Fe和Mn吸收稍有下降;全生育期对Fe、Mn、Cu和Zn的吸收比例为1:0.13:0.12:0.22。陈涵贞等^[36]分析了槟榔芋和白芋子中的10种金属元素含量(干重),样品中 $K(n \times 10^4 \mu\text{g/g}) > \text{Mg}(n \times 10^3 \mu\text{g/g}) > \text{Ca}(n \times 10^2 \mu\text{g/g}) > \text{Zn}(n \times 10^2 \mu\text{g/g}) > \text{Mn}(n \times 10^1 \mu\text{g/g}) > \text{Fe}(n \times 10^1 \mu\text{g/g}) > \text{Cu}(n \times 10^0 \mu\text{g/g}) > \text{Cd}(n \times 10^{-2} \mu\text{g/g})$,Cr和Pd均未被检测出。本研究表明,同一红芽芋地方品种新鲜子芋的不同元素含量差异和同一红芽芋地方品种的不同元素累积量差异均呈指数级,Mg含量($n \times 10^2 \text{ mg/kg}$)和累积量($n \times 10^2 \text{ g/hm}^2$)最高,其次为Fe和Zn的含量($n \times 10^1 \text{ mg/kg}$)和累积量($n \times 10^1 \text{ g/hm}^2$),Cd和Pb的含量($n \times 10^2 \mu\text{g/kg}$)和累积量($n \times 10^2 \text{ mg/hm}^2$),Se、Cr和As的含量($n \times 10^0 \mu\text{g/kg}$)和累积量($n \times 10^1 \text{ mg/hm}^2$),Hg含量($n \times 10^{-1} \mu\text{g/kg}$)和累积量($n \times 10^0 \text{ mg/hm}^2$)为最低;这种指数级差异的存在与土壤中的元素含量及有效性和根系吸收的选择性密切相关,在土壤中一般Mg含量为620~14 000 mg/kg、Fe含量为10 500~44 800 mg/kg、Zn含量为28.1~161.1 mg/kg、Cd含量为0.017~0.33 mg/kg、Cr含量为19.3~150 mg/kg、Pb含量为10.0~56.1 mg/kg、Hg含量为0.06~0.272 mg/kg、As含量为2.5~33.5 mg/kg、Se含量为0.047~0.993 mg/kg^[15];Mg是植物生长发育的必需大量元素,是构成叶绿素的最主要成分,吸收应该最多;Fe和Zn是植物生长发育的必需的微量元素,Fe参与光合作用、固氮反应以及呼吸作用,Zn是乙醇酸脱氢酶和色氨酸合成酶等酶的组成部分;Se被认定为植物生长发育的有益元素,对生长有刺激作用但不是必需的,或只对某些植物种类或在某些特定条件是必需的矿质元素。在所有子芋元素含量中,除Fe含量与以往研究存在差异外,其他结果都与以往研究结果是一致的^[34-36],这可能与试验地为高Fe含量的第四纪红色粘土母质发育而来有关。不同元素在红芽芋新鲜子芋中的差异是巨大的,元素含量由高到低依次为Zn、Cr、Pb、Hg、Fe、Cd、As、Se和Mg,元素累积量由高到低依次为Zn、Cr、Pb、Hg、Cd、As、Fe、Mg和Se,即红芽芋新鲜子芋对不同土壤元素的富集能力存在极明显的差异,这可能是不同地方品种在长期的适应中被驯化成对不同元素的吸收、利用与运转等的差异,具体形成机制需结合原生境的土壤、气候和光照等各种条件进行深入和系统地综合研究。

3.2 不同红芽芋地方品种对同一元素的富集能力不同

富集系数是植物体中某种元素含量除以植物根际土壤中该种元素含量,它反映植物对根际土壤元素的富集能力,富集系数越大,表明植物体对该元素的富集程度越高,同时也说明植物对该种元素从土壤向体内的迁移能力越强^[32-33]。邹日^[34]检测发现,山东33个村84种芋头球茎中的As、Hg、Pb含量极低且差异不大,但Cd含量得差异相对明显,监测值在0.007 8~0.17 mg/kg。陈涵贞等^[36]研究表明,槟榔芋和白芋子中10种元素除Cr和Pb未被检出外,其余各元素含量差异显著,元素含量差异最大的是Zn,槟榔芋中Zn含量是白芋子的3.13倍。熊春晖^[37]揭示,5个芋产区中,Pb和As从土壤向芋迁移的能力较小,Cd较大,富集因子由大到小为Cd、As和Pb。本研究揭示,红芽芋新鲜子芋的有益元素平均富集系数都较小,远低于1.0,有益元素的平均富集系数为Mg(0.333 5)、Zn(0.067 77)、Se(0.022 41)和Fe(0.000 30),有害元素的平均富集系数为Cd(0.839 4)、Pb(0.001 50)、Hg(0.001 42)、As(0.000 35)和Cr(0.000 15),这意味着红芽芋地方品种对Cd的富集能力较强,对Mg的富集中等,对其他元素的吸收和累积较弱;在所有元素中,Cd富集系数最大,且不同红芽芋地方品种对Cd的富集系数存在巨大差异,大于1.0的有HY14(1.465 1)、HY20(1.264 4)、HY16(1.122 1)、HY09(1.065 6)和HY11(1.034 9),这说明这几个红芽芋地方品种达到Cd超富集植物的标准,其含量也超过《GB 2762—2022 食品安全国家标准 食品中污染物限量》中镉限量标准($\leq 0.1 \text{ mg/kg}$ 鲜重),属于不安全农产品,因此这些地方品种可作为Cd污染修复植物,但尽可能不作为蔬菜生产,若想进行大规模生产时,必须选择Cd含量极低的土壤和采取必要的阻Cd栽培技术来保证子芋的食用安全性;但红芽芋子芋中Fe含量并不低,远高于其他的粮食作物(水稻、小麦和玉米等),这可能与土壤中的Fe含量极高而有效性较低有关。在供试的21个红芽芋地方品种中,HY14对Fe和Zn的富集能力最强,HY6对Se的富集能力最强,HY8对Mg的富集能力最强,HY09、HY11、HY14、HY16和HY20最易富集Cd,HY9易富集Cr和As,HY14易富集Pb,HY19易富集Hg;综合有益元素的高积累和有害元素的低积累可知,HY04、HY14和HY20综合表现较好,HY10、HY13和HY17综合表现较差;因此,不同红芽芋地方品种新鲜子芋自然富集元素能力存在极明显的基因型差异,在具体的生产实践中

应根据自身种植需求选择最适宜的品种。

3.3 红芽芋地方品种新鲜子芋元素间的相关性

植物对不同元素的吸收存在选择性、协同性和拮抗性等,这些特性因植物种类、品种差异和生长环境而异^[15]。赵孟良等^[38]试验表明,菊芋中Ca含量与Mg含量呈显著相关、与Fe含量呈极显著正相关,Fe含量与Zn含量呈显著相关、与Ca含量呈极显著正相关,K含量与Mg含量呈极显著正相关。王安等^[39]研究认为,泰兴香荷芋子芋中Fe含量与Ca、Mg含量呈极显著正相关。王思琦等^[40]分析发现,113份木薯种质资源中Ca含量与K和Mn含量,Fe含量与Mg、Na和Zn含量,Mg含量与Na和Zn含量及Zn含量与Mn和Na含量呈极显著正相关,而Ca含量与Mg和Na含量呈极显著负相关。本团队前期研究阐明,甘薯块茎中Fe含量与Cr和As含量、Cd含量与As含量、Fe累积量与Zn、Cd和As的累积量及Zn累积量与Cd和As的累积量均呈极显著相关^[30]。本研究揭示,红芽芋新鲜子芋中的Se与Fe、Cr、Hg和As,Fe与Zn、Cr、Hg和As,Zn与Cr、Hg和As,Mg与Cd,Cr与As和Hg及Hg与As间的含量及累积量间的正相关均达极显著水平,意味着有益元素和有害元素间的吸收、利用与分配存在高度的协同性和伴生性,这就要求在开发富集有益元素(如富硒、富锌、富铁)的红芽芋产品时,必须采取动态监测和相应措施来降低有害元素。本研究还发现,不同地方红芽芋品种的Se、Fe和Zn 3种元素彼此间存在极显著的相关性,暗示着在红芽芋上能同时富集几种对人体有益的元素,可以实现营养元素的聚集和强化,有利于其作为功能性食品的加工与利用。

4 结 论

不同红芽芋地方品种的新鲜子芋产量和同一元素的含量与累积量及同一品种的不同元素含量与累积量间均存在显著或极显著差异,有益元素差异中以Zn最大和Mg最小,有害元素差异中以Cd最大和As最小。部分红芽芋地方品种新鲜子芋对Cd的富集强度达Cd污染土壤的植物修复标准。红芽芋新鲜子芋中的许多有益和有害元素间的吸收、利用与分配存在高度协同性,在开发富集有益元素产品时需密切关注。HY14(湖南永州)为高自然富集元素能力的品种,HY4(江苏无锡)和HY20(江西赣州)为中等自然富集元素能力品种。

致谢:江西省富硒农业研究院重点委托项目(JXFX21-ZD05)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] COATES D J, YEN D E, GAFFEY P M. Chromosome variation in taro, *Colocasia esculenta*: implications for origin in the Pacific[J]. Cytologia, 1988, 53(3): 551-560.
- [2] KAUSHAL P, KUMAR V, SHARMA H K. Utilization of taro (*Colocasia esculenta*): a review[J]. Journal of food science and technology, 2015, 52: 27-40.
- [3] 李柏文, 宗义湘, 吴曼. 世界芋头生产贸易形势分析[J]. 中国蔬菜, 2022, 41(6): 1-6.
LI B W, ZONG Y X, WU M. Situation analysis of world taro production and trade[J]. China vegetables, 2022, 41(6): 1-6.
- [4] MITHARWAL S, KUMAR A, CHAUHAN K, et al. Nutritional, phytochemical composition and potential health benefits of taro (*Colocasia esculenta* L.) leaves: a review[J]. Food chemistry, 2022, 383: 132406.
- [5] SHAH Y A, SAEED F, AFZAAL M, et al. Industrial applications of taro (*Colocasia esculenta*) as a novel food ingredient: a review[J]. Journal of food processing and preservation, 2022, 46(11): e16951.
- [6] IBRAR A, PETER J L, ESPERANZA M G A, et al. Evolutionary origins of taro (*Colocasia esculenta*) in southeast Asia[J]. Ecology and evolution, 2020, 10: 13530-13543.
- [7] 黄新芳, 柯卫东, 叶元英, 等. 中国芋种质资源研究进展[J]. 植物遗传资源学报, 2005, 6(1): 119-123.
HUANG X F, KE W D, YE Y Y, et al. Advances in research on germplasm resources of Chinese taro (*Colocasia esculenta* Schott)[J]. Journal of plant genetic resources, 2005, 6(1): 119-123.
- [8] 郭巨先, 尹艳, 唐康, 等. 芋种质资源研究进展与展望[J]. 广东农业科学, 2021, 48(9): 81-90.
GUO J X, YIN Y, TANG K, et al. Research progress and prospect of *Colocasia esculenta* germplasm resources[J]. Guangdong agricultural sciences, 2021, 48(9): 81-90.
- [9] BANJAW D T. Review of taro (*Colocasia esculenta*) genetics and breeding[J]. Journal of horticulture, 2017, 4(1): 1-4.

- [10] 戴修纯,罗燕羽,黄绍力,等.广东省芋头产业现状与发展对策[J].广东农业科学,2021,48(6):126-135.
DAI X C, LUO Y Y, HUANG S L, et al. Present situation and development countermeasures of taro industry in Guangdong province[J]. Guangdong agricultural sciences, 2021, 48(6): 126-135.
- [11] 黄新芳,柯卫东,叶元英,等.多子芋叶柄及芽色的多样性及芋形观察[J].中国蔬菜,2002,21(6):14-16.
HUANG X F, KE W D, YE Y Y, et al. Diversity of petiole and bud color and observation of taro (*Colocasia esculenta* Schott.) shape of taro germplasm resources with numerous corm[J]. China vegetables, 2002, 21(6): 14-16.
- [12] 姜绍通,程元珍,郑志,等.红芽芋营养成分分析及评价[J].食品科学,2012,33(11):269-272.
JIANG S T, CHENG Y Z, ZHENG Z, et al. Analysis and evaluation of nutritional components of red bud taro (*Colocasia esculenta* L. Schott)[J]. Food science, 33(11): 269-272.
- [13] HONG S R, YIN M H. A simple cryopreservation protocol for in vitro-grown shoot tips of Chinese genuine red bud taro (*Colocasia esculenta* L. Schott Var. *Cormosus* CV. Hongyayu) by encapsulation-dehydration[J]. Scientia horticulturae, 2013, 162: 226-233.
- [14] 李青青,陈晨,曹艳亭,等.红芽芋多糖提取工艺优化及其抗氧化活性的研究[J].江西农业大学学报,2022,44(5):1272-1282.
LI Q Q, CHEN C, CAO Y T, et al. Optimum extraction process for the polysaccharides from red bud taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) and its antioxidative activity in vitro[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(5): 1272-1282.
- [15] 程建峰.植物生理学[M].南昌:江西高校出版社,2019.
CHENG J F. Plant physiology[M]. Nanchang: Jiangxi University Press, 2019.
- [16] HEFFERON K L. Nutritionally enhanced food crops: progress and perspectives[J]. International journal of molecular sciences, 2015, 16(2): 3895-3914.
- [17] WIESNER-REINHOLD M, SCHREINER M, BALDERMANN S, et al. Mechanisms of selenium enrichment and measurement in brassicaceous vegetables, and their application to human health[J]. Frontiers in plant science, 2017, 8: 1365.
- [18] 王晓丽,张泽洲,王张民,等.江西宜春市明月山地区土壤和多种作物中硒的含量及形态分布特征[J].科学通报,2021,67(6):511-519.
WANG X L, ZHANG Z Z, WANG Z M, et al. Content and speciation distribution of selenium in soil and crops in mingyue mountain area of Yichun city, Jiangxi Province[J]. Chinese science bulletin, 2021, 67(6): 511-519.
- [19] GEBRE A, TESFAYE B, KASSAHUN B M. Effect of corm size and plant population density on corm yield of taro (*Colocasia esculenta* L.)[J]. International journal of advanced biological & biomedical research, 2015, 3(3): 309-315.
- [20] SUMINARTI N E, ARIFFIN, GURITNO B, et al. Effect of fertilizer application and plant density on physiological aspect and yield of Taro [*Colocasia esculenta* (L.) Schott var. *Antiquorum*][J]. International journal of agricultural research, 2016, 11(1): 32-39.
- [21] ANAND S, GUINTO D. Dry matter accumulation, nutrient uptake and nutrient use efficiency of two improved cultivars of taro (*Colocasia esculenta*) under screen house conditions in Samoa[J]. Journal of agriculture and ecology research international, 2017, 11(4): 1-11.
- [22] THAKUR P, RAM D, NAIK U. Morphological characterization of taro [*Colocasia esculenta* (L.) Schott] germplasm[J]. Journal of pharmacognosy and phytochemistry, 2021, 10(2): 1264-1268.
- [23] MOMIN M C, MITRA S, JAMIR A R, et al. Evaluation of physicochemical properties in different cultivars of taro [*Colocasia esculenta* (L.) Schott]: a comparative study[J]. The pharma innovation journal 2021, 10(7): 1644-1649.
- [24] MIYAMOTO K, ITAYA A, NAKASHIMA C, et al. Detection of suitable wetlands for paddy field harvesting of Taro (*Colocasia esculenta*) to minimize damage caused by taro beetles (*Papuana uniondis*) on Gau Island, Fiji[J]. Tropical agriculture and development, 2022, 66(2): 64-72.
- [25] 赖永红.不同栽培技术措施对福建龙岩红芽芋产量相关性状的影响[J].中国农学通报,2009,25(8):169-173.
LAI Y H. Effects of different cultivation technique measures on yield-related traits of red sprout *Clocasia esculenta* in Longyan Fujian[J]. Chinese agricultural science bulletin, 2009, 25(8): 169-173.
- [26] 黄新芳,柯卫东,刘义满,等.芋优异种质资源鉴定评价研究[J].长江蔬菜,2013,(18):85-91.
HUAND X F, KE W D, LIU Y M, et al. Evaluation on elite and rare germplasm resources of taro[J]. Journal of changjiang vegetables, 2013, (18): 85-91.
- [27] 周庆红,刘星月,王葡萄,等.脱毒红芽芋不同世代生长特性及产量分析[J].种子,2020,39(2):96-98.

- ZHOU Q H, LIU X Y, WANG P T, et al. Analysis of growth characteristics and yield of virus-free red bud taro in different generations[J]. Seed, 2020, 39(2): 96-98.
- [28] 庄文雅, 林志寅, 黄歆贤, 等. 全生物可降解膜在红芽芋生产中的应用研究及示范[J]. 浙江农业科学, 2022, 63(8): 1778-1781.
- ZHUANG W Y, LIN Z Y, HUANG X X, et al. Application research and demonstration of fully biodegradable mulch film in red bud taro production[J]. Journal of Zhejiang agricultural sciences, 2022, 63(8): 1778-1781.
- [29] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 5009.268—2016 食品安全国家标准 食品中多元素的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, National Food and Medical Products Administration. GB 5009.268—2016 National food safety standard determination of multi-elements in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [30] 陈涵, 胡慧云, 程建峰, 等. 不同基因型甘薯块根自然富集元素能力的差异性[J]. 河南农业科学, 2023, 52(7): 24-39.
- CHEN H, HU H Y, CHENG J F, et al. Differences in natural enrichment abilities of elements in root tubers of different genotypes of sweet potato (*Ipomoea batatas* Lam.) [J]. Journal of henan agricultural sciences, 2023, 52(7): 24-39.
- [31] 张文彤, 董伟. SPSS统计分析高级教程[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2018.
- ZHANG W T, DONG W. Advanced tutorial of SPSS statistical analysis[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2018.
- [32] BUSCAROLI A. An overview of indexes to evaluate terrestrial plants for phytoremediation purposes [J]. Ecological indicators: integrating, monitoring, assessment and management, 2017, 82: 367-380
- [33] WANG S, LUO J, CAI L M, et al. Enrichment characteristics of heavy metals in soil-rice system and determination of the standard range of soil elements[J]. Environmental chemistry, 2018, 37(7): 1508-1514
- [34] 邹日. 芋头对重金属的富集规律及对镉、铅胁迫的响应[D]. 烟台: 鲁东大学, 2012.
- ZOU R. The accumulation of heavy metal in taro and the response to Cd and Pb stress[D]. Yantai: Ludong University, 2012.
- [35] 宋春风. 氮磷钾对芋生长发育及生理特性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2004.
- SONG C F. Effect of N, P, K fertilizer on growth and physiological characteristics of taro [D]. Tai'an: Shangdong Agricultural University, 2004.
- [36] 陈涵贞, 李文福, 姚辛, 等. 火焰原子吸收光谱法测定芋头中10种金属元素[J]. 光谱实验室, 2011, 28(2): 685-688.
- CHEN H Z, LI W F, YAO X, et al. Determination of 10 metal elements in taro by FAAS[J]. Chinese journal of spectroscopy laboratory, 2011, 28(2): 685-688.
- [37] 熊春晖. 芋和茭白重金属累积特性及主产区残留量检测与风险评估[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- XIONG C H. Accumulation of heavy metals in taro [*Colocasia esculenta* (L.) Schoot] and water bamboo [*Zizania latifolia* (Griseb) Stapf] & the risk assessment of their residues in the main production areas [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013.
- [38] 赵孟良, 刘明池, 钟启文, 等. 菊芋种质资源主要矿质营养元素含量特征与分析评价[J]. 河北农业大学学报, 2017, 40(4): 31-36.
- ZHAO M L, LIU M C, ZHONG Q W, et al. Content characteristics and analysis evaluation of main mineral nutrient elements in 29 *Helianthus tuberosus* [J]. Journal of Hebei agricultural university, 2017, 40(4): 31-36.
- [39] 王安, 蒋莹, 罗敏, 等. 叶面喷施铁肥对芋头生长发育、产量及矿质元素的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(8): 139-143.
- WANG A, JIANG Y, LUO M, et al. Effects of foliar application of iron fertilizer on growth, yield and mineral elements of taro [J]. Jiangsu agricultural sciences, 2019, 47(8): 139-143.
- [40] 王思琦, 宋记明, 曹敏, 等. 不同木薯种质资源主要矿物质元素差异性分析[J]. 热带作物学报, 2022, 43(8): 1577-1586.
- WANG S Q, SONG J M, CAO M, et al. Difference analysis of main mineral elements in different *Cassava germplasm* resources [J]. Chinese journal of tropical crops, 2022, 43(8): 1577-1586.