

膨大期甜瓜果实不同部位5种重金属富集变化的差异性比较

勿吉斯古冷^{1,2}, 沈琦², 马磊³, 盘菊秀^{1,2}, 何伟忠^{2*}, 王成^{4*}

(1. 新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆乌鲁木齐 830052) (2. 新疆农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 农村农业部农产品质量安全风险评估实验室, 农村农业部荒漠绿洲生态区特色农产品功能营养与健康重点实验室(部省共建), 新疆乌鲁木齐 830091) (3. 新疆农业大学农学院, 新疆乌鲁木齐 830052) (4. 新疆农业科学院, 新疆乌鲁木齐 830091)

摘要:明确膨大期甜瓜果实不同部位5种重金属富集变化的差异。以7月10日至7月24日采集的甜瓜果实不同部位及果实对应根际土壤为研究对象, 根据对应国家标准方法开展了样品中Cd、Cu、As、Ni、Cr5种重金属的定量分析, 并根据定量分析结果, 探讨了膨大期甜瓜果实不同部位5种重金属富集系数变化的差异。膨大期内甜瓜果皮Cd、Cu、As富集系数呈降低、升高后降低的变化趋势, Cr富集系数呈先升高后降低的趋势, Ni富集系数呈现出较强的波动性; 临近末次采样时间, 果肉Cd富集系数整体呈降低趋势(E、F、G部位富集系数分别达0.0059、0.0049、0.0048), Cu、As、Ni、Cr富集系数有升高趋势; A部位和F部位Cd、Cu、Ni、Cr富集变化的差异性相对较高, A部位和E部位As富集变化的差异性相对较强。综上: 甜瓜果皮果肉5种重金属的富集变化存在差异, 可根据该差异, 通过适时延后采摘或提前采收的方式, 降低目标调控重金属果实富集水平, 为甜瓜果实重金属富集调减技术的研究构建奠定前期基础。

关键词:甜瓜; 重金属; 富集

文章编号: 1673-9078(2025)04-326-332

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.4.0192

Differential Accumulation Patterns of Five Heavy Metals in Different Parts of the Melon Fruit during the Expansion Phase

Wujisiguleng^{1,2}, SHEN Qi², MA Lei³, PAN Juxiu^{1,2}, HE Weizhong^{2*}, WANG Cheng^{4*}

(1. Xinjiang Agricultural University, College of Food Science and Pharmacy, Urumqi 830052, China) (2. Institute of Agricultural Quality Standards and Testing Technology, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Laboratory of Agricultural Product Quality and Safety Risk Assessment, Ministry of Rural Agriculture, Key Laboratory of

引文格式:

勿吉斯古冷, 沈琦, 马磊, 等. 膨大期甜瓜果实不同部位5种重金属富集变化的差异性比较[J]. 现代食品科技, 2025, 41(4): 326-332.

Wujisiguleng, SHEN Qi, MA Lei, et al. Differential accumulation patterns of five heavy metals in different parts of the melon fruit during the expansion phase [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(4): 326-332.

收稿日期: 2024-02-18

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家农业现代产业技术体系资助(CARS-25); 新疆维吾尔自治区重大科技专项(2022A02006); 新疆甜瓜产业技术体系(XJARS-06)

作者简介: 勿吉斯古冷(1998-), 女, 在读研究生, 研究方向: 农产品质量安全, E-mail: w2653607358@163.com

通讯作者: 何伟忠(1981-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 农产品品质及其质量安全控制技术研究, E-mail: hewei198112@126.com; 共同

通讯作者: 王成(1971-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品质量安全及其功能营养特性研究, E-mail: wangcheng321@sina.com

Functional Nutrition and Health of Characteristic Agricultural Products in Desert Oasis Ecological Zone (Jointly Built by Ministry of Agriculture and Rural Affairs), Urumqi 830091, China) (3.College of Agriculture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)(4.Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China)

Abstract: The aim of this research was to clarify the differences in the accumulation patterns of five heavy metals in different parts of the melon fruit during the expansion phase. The research samples were collected from melon fruits and the corresponding rhizosphere soils from July 10 to 24. The contents of five heavy metals, namely, cadmium (Cd), copper (Cu), arsenic (As), nickel (Ni), and chromium (Cr), in the samples were determined using national standard methods. The results suggest that, during the expansion phase, the accumulation coefficients of Cd, Cu, and As in the melon rind first decreased, then increased, and then decreased again. However, the accumulation coefficient of Cr first increased and then decreased, while the Ni accumulation coefficient showed relatively significant fluctuations. Toward the end of the expansion phase, the accumulation coefficient of Cd in the pulp generally showed a decreasing trend (the accumulation coefficients for parts E, F, and G reached 0.005 9, 0.004 9, and 0.004 8, respectively), and the accumulation coefficients of Cu, As, Ni, and Cr increased. The accumulation patterns of Cd, Cu, Ni, and Cr in parts A and F were considerably different, with significant differences are also noted in the accumulation patterns of As in parts A and E. In conclusion, differences were seen in heavy metal accumulation in the melon rind and pulp. Based on these results, the harvest time can be adjusted to reduce the accumulation levels of heavy metals of concern in the fruits. These findings provide a preliminary foundation for future research.

Key words: melon; heavy metal; accumulation

受工业污染、极端开采、不当人为活动等的影响,耕地土壤重金属污染问题已经愈发引起全球人们的关注^[1-5],我国也存在耕地土壤重金属污染的现象,污染重金属主要是Cu、Cd、As、Pb、Cr、Ni等^[6],解析这些重金属在作物果实中的富集变化及其差异性,利于支撑相应风险调减技术的研究构建,促进食用农产品质量安全水平的不断提升。在上述大背景下,国内外领域学者已经开展了多种农产品重金属富集变化及分布的研究与探讨,如相关报道显示:油菜富集Zn、Cd和Cu的能力呈先减弱后增强再减弱趋势,花期富集能力最强^[7];与之不同,小麦Cd含量呈先降低后升高趋势^[8]。水稻As、Cd含量分布符合根部>茎部>叶部>糙米的规律^[9];萝卜不同部位重金属含量由高至低依次是头部、中部和根部^[10]。上述报道表明:不同重金属在不同作物中的富集变化及富集分布有所差异,但目前关于甜瓜重金属的研究报道多集中于甜瓜植株重金属分布^[11]、果实重金属含量^[12,13]等,鲜见甜瓜果实不同部位重金属富集变化的系统研究报道。围绕此不足,团队在前期发现成熟甜瓜果实不同部位重金属含量不同,整个生育期中,膨大期甜瓜果实重金属富集系数差异幅度相对突出^[14,15]的基础上,以膨大期不

同部位甜瓜果皮、果肉和果实对应根际土壤为研究对象,根据GB5009.268-2016,分析了研究对象中Cd、Cu、As、Ni、Cr5种重金属的含量,进而深入探讨了膨大期甜瓜果实不同部位5种重金属富集变化的差异,以期甜瓜果实重金属富集调减技术的研究构建奠定前期基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

在国家现代农业产业技术体系(西甜瓜)质量安全与营养品质评价岗安宁渠试验点布设田间实验,种植甜瓜品种为“黄梦脆”,种植时间为2022年5月1日,参照NY/T 2342-2013《植物新品种特异性、一致性和稳定性测试指南 甜瓜》进行种植和田间管理。实验地土壤5种重金属含量如表1所示。

于果实膨大期7月10日至7月24日间,每隔一天采集甜瓜果实及对应土壤样品。每次采集3~5个甜瓜果实,采集的甜瓜果实按照图1所示,分别采集果皮不同部位和果肉不同部位样品,样品经混合、匀浆、标记后装入样品盒,置于-18℃冰柜中冷冻备用。

表 1 土壤中5种重金属含量 (mg/kg)					
Table 1 Content of 5 heavy metals in soil (mg/kg)					
重金属含量	Cr	Ni	Cu	As	Cd
土壤	51.687	30.305	36.736	13.025	0.287

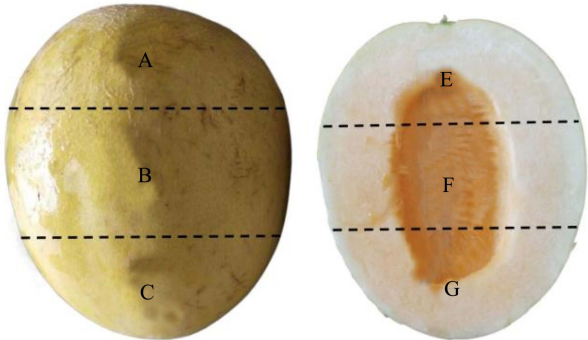


图 1 甜瓜果实不同部位示意图

Fig.1 Diagram of the different parts of the melon fruit

采集的对应根际土壤，经阴干、筛分（过 80 目筛）、标记后，装入自封袋中常温储存备用。

1.2 试验试剂

优级纯硝酸、优级氢氟酸，德国 Merck 公司；GBW10022（蒜粉）、GBW10048（芹菜）、GBW07426（新疆北部土）、GBW08302（西藏土），地球物理地球化学勘察研究所；金元素（Au）溶液（1 000 mg/L）、内标溶液（锆）、内标元素贮备液（1 000 mg/L），国家有色金属及电子材料分析测试中心。

1.3 仪器与设备

Mars5 型微波消解仪，美国 CEM 公司公司；BHW-09C 型赶酸仪，上海博通有限公司；BAS223S 型电子天平，德国赛多利斯公司；lipore Mill-Q 型超纯水机，美国 Millipore 公司；ICP-MS 电感耦合等离子体质谱，美国 Thermo Sciemtific 公司。

1.4 实验方法

采用 GB5009.268-2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》方法检测甜瓜果实中 Cr、Ni、Cu、As、Cd 含量。参照 DB 65T3974-2017《土壤重金属测定 电感耦合等离子体质谱法》方法分析土壤中 Cr、Ni、Cu、As、Cd 元素含量。

1.5 计算方法

$$X=\frac{(\rho-\rho_0)\times V\times f}{m\times 1000}$$

(1)

$$B=\frac{Cp}{Cs}$$

(2)

式中：
X——试样中待测元素含量，mg/kg 或 mg/L；
ρ——试样溶液中被测元素质量浓度，μg/L；
ρ₀——试样空白液中被测元素质量浓度，μg/L；
V——试样消化液定容体积，mL；
f——试样稀释倍数；
m——试样称取质量或移取体积，g 或 mL；
B——生物富集系数（BCF）；
Cp——植物地上部分重金属含量；
Cs——沉积物中重金属含量，计算结果保留 3 位有效数字。

1.6 统计分析

采用 Excel 2019 进行数据的初步整理与计算，并用 Origin 2021 绘制重金属富集系数变化柱状图。

2 结果与分析

2.1 随时间延长甜瓜果实不同部位Cd富集系数的变化

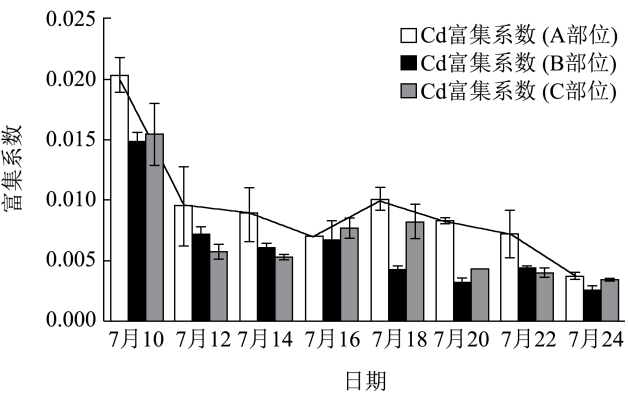


图 2 甜瓜果皮 Cd 富集系数变化

Fig.2 Variation of Cd enrichment factor of melon rind

随时间延长甜瓜果皮和果肉不同部位 Cd 富集系数的变化如图 2 和图 3 所示。由图 2 知：随着时间延长，甜瓜果皮 Cd 富集系数呈降低、升高后降低的变化趋势，升高的时间节点为 7 月 18 日，富集系数分别达 0.010 9、0.004 3、0.008 2，而晚稻籽粒中 Cd 含量^[16]则呈现升高趋势，黄麻各部位 Cd 含量随生育期延长呈先下降后上升的趋势^[17]，均与本文研究不符，原因可能在于种植地点的不同^[18]。3 个部位中，7 月 16 日，A 部位 Cd 富集系数低于 C 部位，其他时间节点 A 部位 Cd 富集系数高于其他

部位。不同部位 Cd 富集系数变化幅度有所不同,其中 A 部位的变化幅度最高,变幅达 84.16%,其次是 B 部位,变幅为 83.11%,C 部位变幅最低,仅为 78.06%。

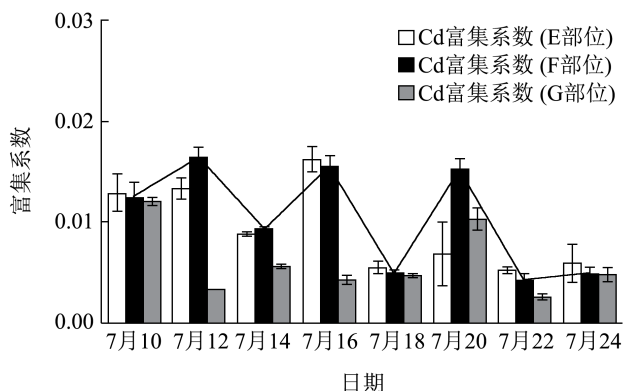


图3 甜瓜果肉 Cd 富集系数变化

Fig.3 Variation of Cd enrichment factor in melon pulp

与果皮 Cd 富集系数的变化不同,随时间延长,果肉 Cd 富集系数整体呈波动降低趋势,其中 7 月 12 日、7 月 16 日、7 月 20 日、7 月 24 日果肉 3 个部位 Cd 富集系数均高于前一天。3 个果肉不同部位中,7 月 20 日 E 部位 Cd 富集系数低于 F 部位和 G 部位,富集系数达 0.006 7,其他时间点 E 部位和 F 部位 Cd 富集系数均高于 G 部位, F 部位 Cd 富集系数的波动幅度最大,极大值、极小值分别为 0.016 5、0.004 2,极大值为极小值的 3.93 倍。沈琦等^[14]的研究结果显示:甜瓜果皮各部位中 Cu 和 Cd 在 E 处含量较高,As 在 B 处含量较高,C 处各元素含量均较低;瓜肉各部位中,Cu 在 G 处含量较高,Ni 在 F 处含量较高等,本文研究结果与之相近。另外也见甜瓜果实不同部位细胞壁组分砷含量的研究报告^[19]。这进一步说明:甜瓜果实不同部位重金属富集水平确有所差异。

以上结果表明:延后采收期利于降低甜瓜果皮和果肉 Cd 富集水平,A 部位和 F 部位兼具富集系数高和变幅大的特点,适合分别作为甜瓜果皮和果肉 Cd 富集变化的表征部位。

2.2 随时间延长甜瓜果实不同部位 Cu 富集系数的变化

与 Cd 富集系数变化不同,随时间延长,甜瓜果皮不同部位 Cu 富集系数整体呈下降、升高后降低的趋势,3 个果皮部位 Cu 富集系数极小值出现时间为 7 月 14 日(极小值分别为 0.002 8、0.002 5、0.002 3),A 部位和 C 部位极大值出现时间为 7 月

18 日(极大值分别为 0.008 7、0.006 1),B 部位极大值出现时间为 7 月 10 日(极大值为 0.005 2)。随时间延长,甜瓜果肉不同部位 Cu 富集系数整体呈先小幅降低后大幅升高趋势,3 个果肉部位 Cu 富集系数极小值出现时间也为 7 月 14 日(极小值分别为 0.001 7、0.001 5、0.001 6),极大值出现时间为 7 月 24 日(极大值分别为 0.003 7、0.005 2、0.004)。而九叶青花椒树^[20,21]中 N、P、K、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn、B 等 10 种元素含量等均呈升高趋势,与本文研究结果有所差异。该结果提示:适时提前采收利于降低果实 Cu 富集水平。

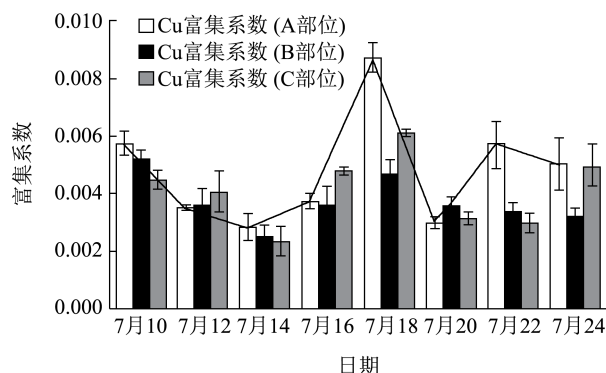


图4 甜瓜果皮 Cu 富集系数变化

Fig.4 Variation of Cu enrichment factor of melon rind

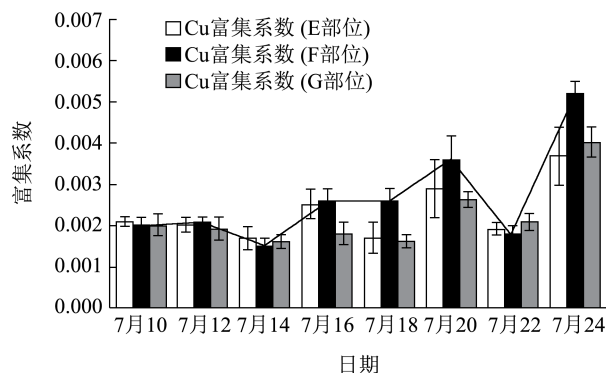


图5 甜瓜果肉 Cu 富集系数变化

Fig.5 Variation of Cu enrichment factor in melon pulp

7 月 10 日、7 月 14 日、7 月 18 日、7 月 22 日和 7 月 24 日,果皮 A 部位 Cu 富集系数高于其他 2 个部位,7 月 20 日果皮 B 部位 Cu 富集系数高于其他 2 个部位,7 月 12 日、7 月 16 日果皮 C 部位 Cu 富集系数高于其他 2 个部位,A、B、C 3 个部位 Cu 富集系数变幅由高至低依次为 A>C>B(图 4);7 月 10 日至 7 月 14 日,果肉 E、F、G 3 个部位 Cu 富集系数接近,7 月 22 日果肉 G 部位 Cu 富集系数高于其他 2 个部位,7 月 16 日至 7 月 24 日其他时间点果肉 F 部位 Cu 富集系数高于

其他2个部位,果肉E、F、G3个部位变幅由高至低依次为 $F>G>E$ (图5),这说明:A部位和F部位分别是甜瓜果皮及果肉Cu富集变化的表征部位。

2.3 随时间延长甜瓜果实不同部位As富集系数的变化

随时间延长,甜瓜果皮不同部位As富集系数整体呈下降、升高后降低的趋势(图6),升高时间节点为7月18日,富集系数分别达0.0008、0.0003、0.0007。甜瓜果肉不同部位As富集系数整体呈波动升高趋势,其中7月20日和7月24日波动升高幅度较大。与之不同,水稻富集Cd、As的主要时期是分蘖期和成熟期^[22,23],根系Cd含量分蘖期最高^[24]。该变化趋势说明:延后采收期不利于降低果肉As富集水平(图7)。

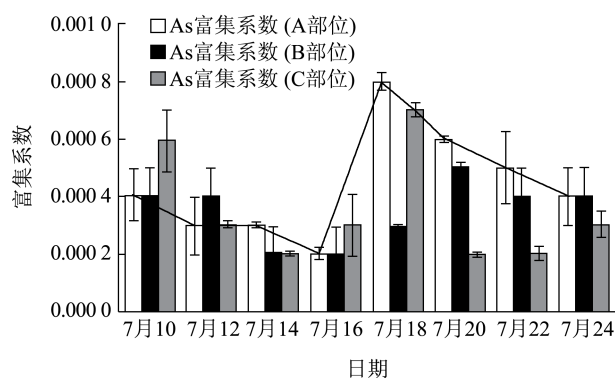


图6 甜瓜果皮As富集系数变化

Fig.6 Variation of As enrichment factor of melon rind

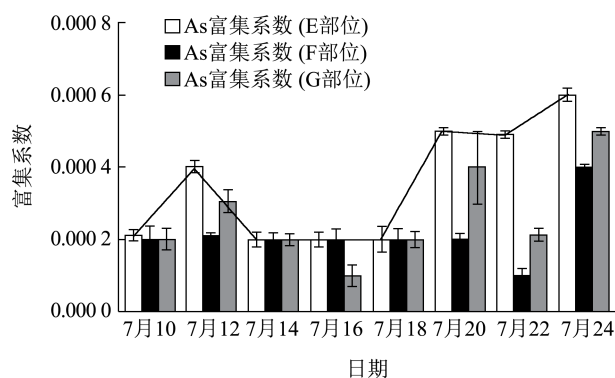


图7 甜瓜果肉As富集系数变化

Fig.7 Variation of As enrichment factor in melon pulp

7月10日、7月16日果皮C部位As富集系数高于其他两个部位,7月12日果皮B部位As富集系数高于其他两个部位,其他时间点果皮A部位As富集系数高于其他两个部位,3个部位中,A部位As富集系数变幅幅度为75%,高于其他两个部位(图6)。7月10日、7月14日、7月16日甜

瓜果肉E、F、G部位As富集系数接近,其他时间点E部位As富集系数均高于其他两个部位(图7),最终采集样品时富集系数分别达0.0006、0.0004、0.0005。上述结果表明:A部位和E部位富集系数的变化幅度相对较高,适合作为表征甜瓜果皮及果肉As富集变化的表征部位。

2.4 随时间延长甜瓜果实不同部位Ni富集系数的变化

随时间延长,甜瓜果皮和果肉Ni富集系数呈现出较强的波动性,其中果皮Ni富集系数极大值出现时间为7月18日,极小值出现时间为7月20日(图8)。果肉Ni富集系数极大值出现时间为7月24日,极小值出现时间为7月22日,该结果说明:延后采收期,可能会使甜瓜果肉镍富集水平升高(图9)。

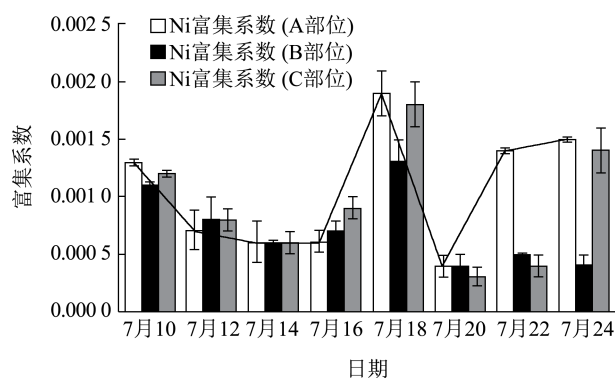


图8 甜瓜果皮Ni富集系数变化

Fig.8 Variation of Ni enrichment factor of melon rind

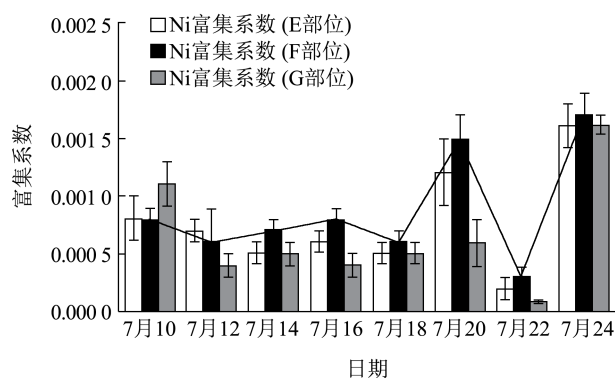


图9 甜瓜果肉Ni富集系数变化

Fig.9 Variation of Ni enrichment factor in melon pulp

7月10日、7月18日至7月24日,果皮A部位Ni富集系数高于其他2个部位,其他时间段果皮C部位Ni富集系数整体高于其他两个部位,3个部位中,A部位富集系数变化幅度为78.95%,高于其他两个部位(图8)。7月14日至7月24日,果肉F部位Ni富集系数高于其他两个部位,7月

10日、7月12日Ni富集系数相对较高的部位分别是G部位和E部位,3个果肉部位中,F部位富集系数变化幅度相对较高,为82.35%(图9)。由此可知:A部位和F部位分别适合作为甜瓜果皮、果肉中Ni富集变化的表征部位。

2.5 随时间延长甜瓜果实不同部位Cr富集系数的变化

甜瓜果实不同部位Cr富集系数变化列于图10和图11。由图10知:随时间延长,甜瓜果皮Cr富集系数呈先升高后降低的趋势,极大值出现时间为7月22日,极大值分别为0.0078、0.006、0.004;极小值出现时间为7月10日,极小值分别为0.0009、0.0007、0.0006。与之不同,甜瓜果肉Cr富集系数呈升高、趋于稳定后升高趋势,Cr富集系数极大值出现时间为7月24日图10。该结果提示:适当提前采收时间利于降低果肉Cr富集风险。

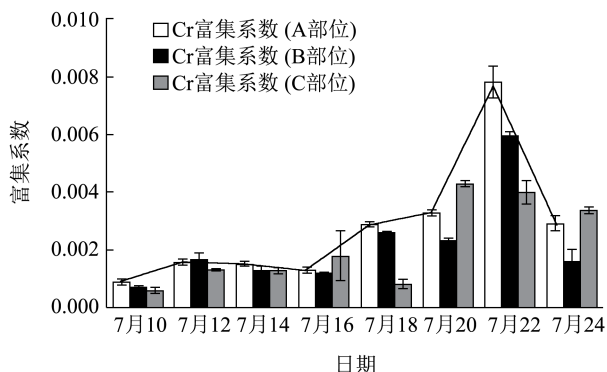


图10 甜瓜果皮Cr富集系数变化

Fig.10 Variation of Cr enrichment factor of melon rind

3个果皮部位中,A部位Cr富集系数高于其他两个部位;3个果肉部位中,F部位Cr富集系数整体高于其他两个部位,且上述两个部位Cr富集系数变幅也相对较高,分别为88.46%、88.89%。这说明:A部位和F部位分别适合作为甜瓜果皮和果肉Cr富集量变化的表征部位。

综合以上可知,目前已见多种农产品重金属富集变化的研究与探讨,但报道的研究结果有所不同,且不同重金属的富集变化也有所差异。具体为:随时间延长,茶叶中重金属含量^[25,26];与此不同,小麦根和茎叶中Cd含量及油茶果实Cu、Cd、Pb含量呈降低趋势^[27,28],本文研究结果与之相符;此外,相关报道还显示:不同重金属的富集变化也有所差异,如芹菜富集Pb的能力相对较强,叶片中Co含量相对较高等^[29]。

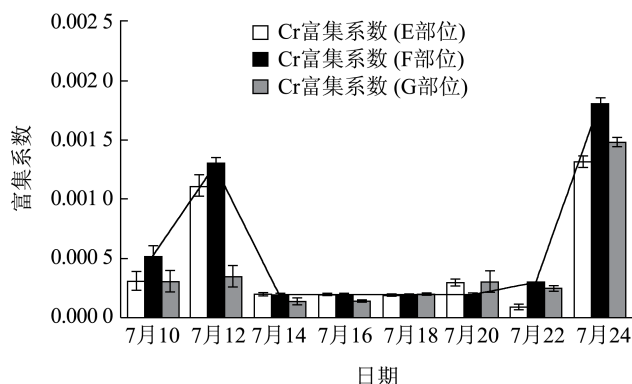


图11 甜瓜果肉Cr富集系数变化

Fig.11 Variation of Cr enrichment factor in melon pulp

另外,相关研究显示:氨基酸、糖、酸、酶等与作物重金属的富集分布具有一定关联性。如:烟草叶片中天门冬氨酸、苏氨酸、谷氨酸、丙氨酸、胱氨酸、异亮氨酸、酪氨酸、赖氨酸、组氨酸、精氨酸、脯氨酸和总氨基酸含量随Cd处理浓度增加而递增^[30];水稻及小麦中过氧化物酶(POD)活性随Cd胁迫浓度的增加而升高,过氧化氢酶(CAT)活性随Cd胁迫浓度的增加呈先升高后降低的趋势^[31,32];Cd具有提高植物蔗糖和还原糖浓度的作用^[33];Pb、Cd胁迫下,白菜中可溶性糖含量整体呈增加趋势^[34];小白菜还原糖含量随着土壤中Cd含量的增加逐渐降低^[35];紫苏中有机酸总量随着Cd处理浓度和时间的增加显著提高^[36];As胁迫下黑藻的草酸分泌量显著升高,添加外源草酸也能促进黑藻对As的吸收^[37]。上述前人研究进展表明:氨基酸、糖、酸、酶等可能是导致本文甜瓜果实不同时间段、不同部位重金属富集分布存在差异的原因,其协同关联关系及调控机制,还需进一步研究揭示。

3 结论

随时间延长,甜瓜果皮Cd、Cu、As富集系数呈降低、升高后降低的变化趋势,Cr富集系数呈先升高后降低的趋势,Ni富集系数呈现出较强的波动性;临近末次采样时间,果肉Cd富集系数整体呈降低趋势,Cu、As、Ni、Cr富集系数有升高趋势,该结果提示:适当延后采收期利于降低甜瓜果皮果肉Cd富集水平,适时提前采收利于降低果肉Cu、As、Ni、Cr富集水平。A部位和F部位Cd、Cu、Ni、Cr富集变化的差异性相对较高,A部位和E部位As富集变化的差异性相对较强;A部位富集系数变幅最高为88.46%,F部位富集系数变幅最高为88.89%。

参考文献

- [1] MCLAUGHLIN M J, PARKER D R, CLARKE J M. Metals and micronutrients-food safety issues [J]. Field Crops Research, 1999, 60(1-2): 143-163.
- [2] WILLIAMS P N, LEI M, SUN G, et al. Occurrence and partitioning of cadmium, arsenic and lead in mine impacted paddy rice: Hunan, China [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(3): 637-642.
- [3] WILLIAMS P N, VILLADA A, DEACON C, et al. Greatly enhanced arsenic shoot assimilation in rice leads to elevated grain levels compared to wheat and barley [J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(19): 6854-6859.
- [4] FANGMIN C, NINGCHUN Z, HAIMING X, et al. Cadmium and lead contamination in japonica rice grains and its variation among the different locations in southeast China [J]. Science of the Total Environment, 2006, 359(1-3): 156-166.
- [5] ZHAO X, JOO J C, LEE J K, et al. Mathematical estimation of heavy metal accumulations in *Helianthus annuus* L. with a sigmoid heavy metal uptake model [J]. Chemosphere, 2019, 220: 965-973.
- [6] 环境保护部和国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报[J].油气田环境保护,2014,24(3):66.
- [7] 方慧,柳小兰,颜秋晓,等.贵州油菜各器官在不同生育时期对土壤重金属的富集[J].北方园艺,2018,5:111-117.
- [8] 孙芳立,苏忠亮,郭庆增.Cd在小麦不同生育期器官及亚细胞中的分布[J].安徽大学学报(自然科学版),2019,43(1):87-93.
- [9] 张燕,铁柏清,刘孝利,等.玉米秸秆生物炭对水稻不同生育期吸收积累As、Cd的影响[J].生态环境学报,2017,26(3):500-505.
- [10] ÖZCAN M M, YILMAZ F G, KULLUK D A. The accumulation of element and heavy metal concentrations in different parts of some carrot and radish types [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2023, 195(6): 754.
- [11] 王志伟,楚箫,梁少华,等.镉在厚皮甜瓜植株中的分布及低积累品种筛选[J].中国瓜菜,2021,34(1):15-18.
- [12] CHAPLYGIN V, CHERNIKOVA N, FEDORENKO G, et al. Influence of soil pollution on the morphology of roots and leaves of *Verbascum thapsus* L [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2022, 44(1): 83-98.
- [13] 克依木·帕尔哈提,阿巴拜科日·麦麦提艾力,刘河疆,等.新疆西甜瓜中三种重金属含量特征[J].干旱区资源与环境,2020,34(4):197-202.
- [14] 沈琦,托乎塔尔汉玛合巴丽,曹叶青,等.甜瓜中矿物元素分布特征及其相关调控机制研究[J].核农学报,2021,35(10):2305-2310.
- [15] 沈琦.土壤中主要污染重金属在甜瓜中的富集拮抗元素及果实分布候选调控基因研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2022.
- [16] 杨国航,李琼,和利钊,等.晚稻全生育期Cd的迁移转化规律及预测模型研究[J].中国农学通报,2021,37(25):1-10.
- [17] 侯文焕,廖小芳,唐兴富,等.不同黄麻品种对重金属镉和铅的吸收与富集规律[J].西南农业学报,2020,33(9):2075-2081.
- [18] 唐莉丽,张成义,郝玥,等.吉林省不同区域毛樱桃中重金属的检测与分析[J].现代食品科技,2019,35(7):286-290, 181.
- [19] 康佳乐.甜瓜果实不同部位砷和镉的化学形态、亚细胞结构解析及其体外消化率评估[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2022.
- [20] 孔发明,魏勇,徐文静,等.九叶青花椒不同生育期矿质养分累积规律及分配特征研究[J].中国土壤与肥料,2023,4: 76-84.
- [21] 王帅,韩晓飞,王洋,等.九叶青花椒叶片矿质营养元素主要物候期动态变化特征[J].西南农业学报,2018,31(7): 1456-1461.
- [22] 赵明柳,唐守寅,董海霞,等.硅酸钠对重金属污染土壤性质和水稻吸收Cd、Pb、Zn的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(9):1653-1659.
- [23] 刘昭兵,纪雄辉,彭华,等.不同生育期水稻对Cd、Pb的吸收累积特征及品种差异[J].土壤通报,2011,42(5):1125-1130.
- [24] 刘利成,刘三雄,黎用朝,等.水稻镉积累与调控研究进展[J].中国农学通报,2016,32(24):1-5.
- [25] 李云,张进忠,童华荣.茶苗对重金属Pb、Cu、Cd和Cr的吸收累积规律[J].农业环境科学学报,2009,28(3):454-459.
- [26] 石元值,马立峰,韩文炎,等.铅在茶树中的吸收累积特性[J].中国农业科学,2003,36(11):1272-1278.
- [27] 孙芳立,张金恒,孙永红,等.重金属Cd、Cu、Zn在小麦全生育期中的富集规律[J].青岛科技大学学报(自然科学版),2018,39(5):34-41.
- [28] 罗佳,周小玲,田育新,等.油茶低产林养分需求和时间配置动态变化研究[J].生态学报,2019,39(6):1945-1953.
- [29] ÖZCAN M M, KULLUK D A, YILMAZ F G, et al. Macro-, micro-, and heavy metal element levels in different parts of celery (*Apium graveolens* L.) Plant [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2023, 195(5): 550.
- [30] 李元,祖艳群,王焕校.镉、铁及其复合污染对烟草叶片氨基酸含量的影响[J].生态学报,1998,18(6):78-85.
- [31] 胡雪萍.水稻响应镉胁迫代谢组学研究[D].南昌:南昌大学,2019.
- [32] LIU C X, FENG S L, SHAO Y, et al. Effects of arsenic on seed germination and physiological activities of wheat seedlings [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(6): 725-732.
- [33] JÚNIOR W V A, NETO C F O, FILHO B G S, et al. Biochemical metabolism of young plants of Ucuúba (*Virola surinamensis*) in the presence of cadmium [J]. BMC Plant Biology, 2021, 21(1): 151.
- [34] 邱海杰,熊治廷,费利西泰.水杨酸对Cd胁迫下两种大白菜主要营养品质的影响[J].农业环境科学学报,2006,25(4):871-874.
- [35] 谢建治,张书廷,刘树庆,等.潮褐土重金属Cd污染对小白菜营养品质指标的影响[J].农业环境科学学报,2004,23(4):678-682.
- [36] 陈燊,洪涌,何小三,等.镉胁迫下紫苏低分子量有机酸及镉含量变化[J].福建农林大学学报(自然科学版),2018,47(5):593-599.
- [37] 钟正燕,王宏镔,王海娟,等.砷形态对黑藻和竹叶眼子菜有机酸含量的影响[J].生态学报,2012,32(16):5002-5013.