

山东偏酸性棕壤区小麦镉低累积品种筛选

井永苹, 聂岩, 李彦, 康馨, 黄现民, 赵瑞君, 仲子文

引用本文:

井永苹, 聂岩, 李彦, 康馨, 黄现民, 赵瑞君, 仲子文. 山东偏酸性棕壤区小麦镉低累积品种筛选[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(6): 1238-1246.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0860>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

低镉高产春小麦品种筛选及富集转运特征分析

马凤仪, 马立超, 赵宝平, 王永宁, 鲁瑞英, 郭晓宇, 陈淼, 刘景辉

农业环境科学学报. 2023, 42(5): 994-1003 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0980>

不同小麦品种对大田中低量镉富集及转运研究

熊孜, 李菊梅, 赵会薇, 马义兵

农业环境科学学报. 2018, 37(1): 36-44 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0811>

长江中下游麦区不同小麦品种镉积累差异研究

易超, 史高玲, 陈恒强, 姚澄, 潘云俊, 石月红, 李标, 高岩

农业环境科学学报. 2022, 41(6): 1164-1174 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1373>

不同玉米(Zeamays)品种对镉锌积累与转运的差异研究

杜彩艳, 张乃明, 雷宝坤, 胡万里, 付斌, 陈安强, 毛妍婷, 木霖, 王红华, 严婷婷, 段宗颜, 雷梅

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 16-23 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0872>

小麦对土壤镉富集和转运的品种差异性研究

王彦苏, 李士伟, 于学臻, 李合莲, 马义兵

农业环境科学学报. 2022, 41(1): 19-27 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0575>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

井永苹, 聂岩, 李彦, 等. 山东偏酸性棕壤区小麦镉低累积品种筛选[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(6): 1238-1246.

JING Y P, NIE Y, LI Y, et al. Low-cadmium accumulation wheat varieties preparation in acid brown soil region of Shandong Province [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(6): 1238-1246.

山东偏酸性棕壤区小麦镉低累积品种筛选

井永苹^{1,2}, 聂岩³, 李彦^{1,2*}, 康馨⁵, 黄现民³, 赵瑞君⁴, 仲子文¹

(1. 山东省农业科学院农业资源与环境研究所, 济南 250100; 2. 农业农村部黄淮海平原农业环境重点实验室, 济南 250100; 3. 山东省农业农村厅农业环境保护和农村能源总站, 济南 250100; 4. 招远市农业技术推广中心, 山东 招远 265400; 5. 银川市农业技术推广服务中心, 银川 750002)

摘要:为筛选出适宜于山东偏酸性棕壤Cd污染风险区种植的低累积小麦品种,从当地小麦栽培品种中选出20个作为研究对象,采用田间小区试验对20个小麦品种籽粒Cd积累差异进行研究。结果表明:20个品种的小麦籽粒中Cd含量范围为0.013~0.116 mg·kg⁻¹,各品种间富集系数和转运系数差异显著,富集系数最大值是最小值的9倍多,不同部位的转移系数最大值是最小值的2~5倍;综合聚类分析、富集系数、转运系数等指标,初步筛选出在试验条件下表现出低累积特性的3个小麦品种(烟农745、济麦55、济糯116),小麦产量指标结果显示其中2个品种的产量高于平均产量,结合健康风险评价指标最终确定出2个产量较高的Cd低累积小麦品种(烟农745、济麦55);但是对于筛选出的小麦Cd低累积品种的稳定性及其关键影响因素仍需进一步研究和验证。

关键词:土壤;小麦;产量;低累积;Cd;富集系数;转运系数

中图分类号:X131.3 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)06-1238-09 doi:10.11654/jaes.2022-0860

Low-cadmium accumulation wheat varieties preparation in acid brown soil region of Shandong Province

JING Yongping^{1,2}, NIE Yan³, LI Yan^{1,2*}, KANG Xin⁵, HUANG Xianmin³, ZHAO Ruijun⁴, ZHONG Ziwen¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China; 2. Key Laboratory of Agro-Environment in Huang-Huai-Hai Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jinan 250100, China; 3. Agricultural Environmental Protection and Rural Energy General Station of Shandong Provincial Department of Agriculture and Rural Areas, Jinan 250100, China; 4. Zhaoyuan Agricultural Technology Extension Center Shandong, Zhaoyuan 265400, China; 5. Yinchuan Agricultural Technology Extension Service Center, Yinchuan 750002, China)

Abstract: To determine the low-cumulative wheat varieties suitable for planting in the Cd pollution risk area of acidic brown soil in Shandong, 20 local wheat cultivars were selected as specimens, and field experiments were conducted to analyze the differences in grain Cd accumulation of the 20 wheat cultivars. The results showed that the Cd content in wheat grains ranged from 0.013 mg·kg⁻¹ to 0.116 mg·kg⁻¹. Furthermore, the enrichment and transport coefficients were significantly different ($P < 0.05$), among different varieties, the maximum enrichment coefficient is more than 9 times the minimum value, and the maximum transfer coefficient of different parts of wheat is 2-5 times the minimum value. Based on cluster analysis, enrichment coefficient, transport coefficient, and other indicators, 3 wheat varieties (Yannong 745, Jimai 55, Jinuo 116) exhibited low accumulation characteristics under experimental conditions, while the results of wheat yield indicated that 2 of them were higher than the average output. Combined with health risk evaluation indicators, two Cd low-

收稿日期:2022-08-30 录用日期:2023-02-02

作者简介:井永苹(1982—),女,山东济南人,博士,副研究员,主要从事农田土壤重金属污染修复研究。E-mail:jyp82916@163.com

*通信作者:李彦 E-mail:nkyliyan@126.com

基金项目:山东省重大科技创新工程项目(2021CXGC010801);山东省农业科学院创新工程项目(CXGC2022D05)

Project supported: Shandong Province Key R&D Program (2021CXGC010801); The Agricultural Scientific and Technological Innovation Project of Shandong Academy of Agricultural Sciences (CXGC2022D05)

accumulation wheat varieties with higher yields (Yannong 745, Jimai 55) were finally determined. Thus, the present study suggests Cd low accumulation wheat varieties for the safe utilization of local acidic brown soil Cd contaminated arable land. However, further studies are required to confirm the stability of the selected wheat cultivars with low Cd accumulation and the key influencing factors.

Keywords: soil; wheat; yield; low-accumulation; Cd; enrichment coefficient; transport coefficient

随着现代工农业的飞速发展和城镇化进程加快,污染物大量排放和不当处置导致我国农田土壤重金属Cd累积和农产品Cd超标等环境问题日益突出,特别是酸性土壤中Cd的生物有效性更高,已经引起社会各界的广泛关注^[1]。重金属主要通过土壤、大气沉降和灌溉等几种途径进入植物体,并在植物体内积累、迁移转化,最终通过食物链进入人体,给人体健康带来严重威胁^[2-6]。如何实现农产品安全生产一直是环境安全和农业可持续发展的重大问题^[7]。

目前,解决农产品中Cd超标问题主要有3种方法^[8-9]:一是通过降低土壤中Cd的生物有效性,减少作物对Cd的吸收;二是通过喷施特殊元素阻隔作物对Cd的吸收;三是从作物本身出发,筛选Cd低累积品种。大量研究表明,种植Cd低累积作物品种能有效降低农产品Cd富集量,进而有效降低人体对重金属Cd的摄入风险,是安全利用Cd污染耕地的重要措施。作物对重金属的吸收累积不仅存在显著的种间差异,而且还存在种内差异^[10-11]。研究表明,小麦和水稻比玉米更容易吸收累积重金属^[12-14],尤其是对Cd极易吸收富集。小麦是我国第二大粮食作物,种植范围广,常见于我国西南、西北、长江中下游和黄淮海等区域。据统计,Cd污染小麦及其衍生品占人体每日Cd摄入量的43%^[15]。筛选Cd低累积小麦品种是实现中轻度Cd污染农田小麦安全生产切实可行的办法。目前已经出现了较多关于Cd低累积小麦品种的筛选研究,但是小麦籽粒Cd累积除了受自身遗传特性影响外,还会受周边栽培环境的影响^[16],不同小麦品种对区域环境的适应性存在较大差异。因此,针对特定Cd污染区域进行Cd低累积小麦品种筛选非常必要。

本文以山东偏酸性棕壤区广泛种植的20个小麦品种作为试验材料,在棕壤Cd含量超过污染风险筛选值的条件下,通过大田试验,研究小麦不同品种及不同生育期对Cd的吸收累积差异,根据小麦籽粒Cd富集量进行聚类分析,并进行单因子污染指数、内梅罗综合污染指数和靶标危害系数评估,将20个品种小麦进行分类,筛选出适宜于当地栽培的Cd低累积小麦品种,为农作物的低累积品种筛选提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试土壤概况

试验开展于2020—2021年,试验地点位于山东省偏酸性棕壤区某地,该地属暖温带大陆性季风气候,四季分明,冬冷夏热,春秋适宜,日照充足,年均日照时数2 503.2 h,年平均气温11.5℃,年平均降水量607.3 mm,年均蒸发量1 664.8 mm。由于以前的技术条件所限,大多数工矿企业生产工艺及装备水平较差,污染防治设施简陋,工矿企业排放的“三废”没得到有效处理,长期暴露造成部分区域土壤Cd超标。试验地土壤为棕壤,机械组成分类为砂质壤土,土壤全Cd含量为0.293~0.553 mg·kg⁻¹,平均值为0.376 mg·kg⁻¹,中位数为0.338 mg·kg⁻¹,标准偏差(STDEV)为0.076,Cd含量离散程度较小,变化幅度相对较小,土壤pH为5.6,有机质含量为22.47 g·kg⁻¹,全氮、全磷、全钾含量分别为1.28、0.69、15.10 g·kg⁻¹,碱解氮、速效钾和有效磷含量分别为160.28、387.56、83.23 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

本试验采用完全随机区组设计,大田共分为3个区组,每个区组再均分为20个小区,小区规格为3.3 m×50 m,用垄沟隔开。每个区组内随机种植20个小麦品种(表1)。按当地种植习惯进行田间管理。

1.3 土壤和小麦样品采集

分别在小麦苗期和成熟期采集小麦样品和对应点位的土壤样品。在每个小区避开小区边际,按五点取样法采样。将每个小区内5个样点的样品组成1

表1 供试小麦品种

Table 1 Tested wheat varieties

编号 Serial number	品种 Variety	编号 Serial number	品种 Variety	编号 Serial number	品种 Variety
1	济麦23	8	烟农745	15	烟农1212
2	济麦44	9	烟农572	16	烟农999
3	中麦578	10	济麦106	17	济麦70
4	山农38	11	济麦0435	18	济麦5022
5	中麦415	12	济麦55	19	济麦5172
6	登海206	13	济糯116	20	济麦38
7	泰科33	14	烟农215		

个混合样。取0~20 cm耕层土壤,除去土样中的石子等异物,自然风干,过2 mm尼龙筛,玛瑙研钵研磨过100目尼龙筛,分别用作土壤物理、化学等指标分析。小麦苗收获后用自来水及去离子水冲洗干净,105 ℃杀青,再70 ℃烘至恒质量;小麦根、秸秆、籽粒经人工分离后分别用自来水及去离子水洗净,置于烘箱内,70 ℃烘至恒质量,各干样用不锈钢粉碎机粉碎后过20目筛,以备测定Cd含量。

1.4 土壤和植株样品分析

1.4.1 土壤养分及pH测定

参照《土壤农业化学分析方法》^[17]进行各指标的测定:土壤pH采用电位法,有机质采用丘林法,碱解氮采用碱解扩散法,有效磷采用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法(Olsen法),速效钾采用乙酸铵提取-火焰光度法,全氮采用半微量凯氏定氮法,全磷采用钒钼黄比色法,全钾采用火焰光度法。

1.4.2 全量Cd测定

土壤Cd全量分析采用HNO₃-HClO₄-HF消解法^[18],准确称取0.100 0 g土样于50 mL聚四氟乙烯坩埚中,用纯水湿润后,移至通风橱内,加入5 mL优级纯HCl开盖加热(200 ℃)蒸发至2 mL,取下稍冷,然后加入5 mL优级纯HNO₃、4 mL优级纯HF、2 mL优级纯HClO₄,加盖加热(220 ℃)1 h左右,开盖继续加热除硅,期间经常摇动坩埚,当加热至冒浓厚HClO₄白烟时,加盖加热至样品清亮,开盖蒸至内容物黏稠状。若消解不完全,可再加入2 mL优级纯HNO₃、2 mL优级纯HF、1 mL优级纯HClO₄重复上述消解过程,加热至内容物黏稠状。样品取下稍冷,用纯水冲洗坩埚盖及内壁,然后加入1 mL(HNO₃:纯净水=1:5)HNO₃溶液温热溶解残渣,将溶液用纯水转移至50 mL容量瓶定容,摇匀后过滤。

小麦Cd全量分析采用王水消解法^[19]。准确称取0.200 0 g样品至50 mL烧杯,加入优级纯HNO₃和优级纯HCl(1:3比例)配制成的王水12 mL,放入通风橱过夜,置于电热板上加热至250 ℃,待烧杯中溶液清亮状态,取下稍冷,将溶液转移至50 mL容量瓶并用纯水定容,摇匀后过滤待测。

土壤和小麦全量Cd均采用原子吸收分光光度计测定。土壤和植物样品均设置3份空白,并添加国家标准物质(植物:GBW-07603;土壤:GBW-07404)控制分析质量,保证分析误差控制在10%以内。

1.4.3 小麦产量和千粒质量

在每个小区内选取3个1 m²小麦样方,进行收割

脱粒,称质量后求平均值,计算小麦产量。每个处理随机选出3组1 000粒种子,称质量后求平均值,得到千粒质量。

1.5 小麦Cd富集系数和转运系数

富集系数(BCF)可反映小麦对Cd的摄取能力;植物对重金属的转运系数(TF)为植物体内某部位的重金属含量与另一部位中同种重金属含量的比值,可用于表征某种元素在植物不同部位之间的转运能力^[20]。公式如下:

$$\text{富集系数(BCF)} = \frac{\text{小麦籽粒Cd含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})}{\text{土壤中Cd含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})} \quad (1)$$

$$\text{根-秸秆转运系数}(TF_{\text{根系-秸秆}}) = \frac{\text{秸秆Cd含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})}{\text{根系Cd含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})} \quad (2)$$

$$\text{秸秆-籽粒转运系数}(TF_{\text{秸秆-籽粒}}) = \frac{\text{籽粒Cd含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})}{\text{秸秆Cd含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})} \quad (3)$$

1.6 污染风险评价

采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对小麦籽粒中重金属污染状况进行风险评价。

(1) 单因子污染指数法

单因子污染指数计算公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (4)$$

式中: P_i 为重金属*i*的污染指数; C_i 为重金属*i*的实测含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; S_i 为重金属*i*的评价标准, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。本研究采用《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中的限量评价标准,Cd为0.1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。单因子污染指数等级划分标准: $P_i \leq 1$ 无污染, $P_i > 1$ 为污染。

(2) 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数计算公式如下:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{P_{\text{max}}^2 + P_{\text{ave}}^2}{2}} \quad (5)$$

式中: $P_{\text{综}}$ 为内梅罗综合污染指数; P_{max} 为小麦籽粒中重金属最大单因子污染指数; P_{ave} 为小麦籽粒中重金属单因子污染指数平均值。内梅罗综合污染指数污染等级划分标准: $P_{\text{综}} \leq 0.7$ 清洁安全,0.7~1.0尚安全(警戒线), $P_{\text{综}} > 1.0$ 污染。

(3) 小麦籽粒健康风险评价

靶标危害系数(THQ)计算公式如下:

$$EDI = (C \cdot FIR \cdot EF \cdot ED) / (365Bw \cdot AT)^{[21-22]} \quad (6)$$

$$THQ = EDI / RfD \quad (7)$$

式中: EDI 为重金属膳食暴露量; THQ 为靶标危害系数,是一种用于人体通过食物摄取重金属风险的评估

方法,当 $THQ \leq 1.0$ 时,认为人体负荷的重金属对人体健康造成的影响不明显; C 为小麦籽粒中重金属含量, $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; FIR 为每人每日谷物摄入量, $\text{g} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; EF 为暴露频率,取 $365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$; ED 为暴露年限,取77.3 a(中国人口平均寿命); Bw 为成人的平均身体质量,取 $64.3 \text{ kg} \cdot \text{人}^{-1}$; AT 为生命期望值,取77.3 a; 365为转化系数; RfD 为消化食物的比率, $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。研究指出,成年人平均每天的谷类食物食用量为 $150 \text{ g} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$; 根据美国整合风险信息系统, Cd的 RfD 为 $1.0 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

1.7 数据统计与分析

所有实验数据先使用WPS Office进行整理,再用SPSS 22和Origin 2018软件进行统计分析及图表的绘制,使用单因素方差分析比较各处理间与对照组的差异性。采用系统聚类对不同品种进行聚类分析。

2 结果与分析

2.1 不同品种小麦产量指标

供试的20个小麦品种间产量(表2)有显著差异($P < 0.05$)。产量范围为 $5604.2 \sim 10\,593.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中烟农215的产量最高为 $10\,593.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。本研究中烟农系列小麦品种的产量均居前列,产量高于 $9\,500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 济麦44、济麦106、济麦0435和济麦55等产量高于 $8\,900 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,处于中等水平; 而中麦578和泰科33的产量水平较低,分别为 $6\,169.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $5\,604.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。穗数范围为438.0万~691.5万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$,其中济麦23的穗数最高。穗粒数范围为31.8~47.8粒,济麦5022的穗粒数最高。千粒质量最高的品种为37.0~49.4 g,中麦578和烟农215的千粒质量最高。不同品种小麦穗数、穗粒数、千粒质量和产量存在显

表2 小麦产量指标数据

Table 2 The data of wheat yield index

品种编号 Serial number	穗数/(万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$) Number of ears per acre(10 000 plants)	穗粒数/粒 Number of ears/grains	千粒质量 1,000 grain weight/g	产量 Yield/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
1	691.5±52.5a	34.0±5.0c	47.0±6.1ab	8 835.4±315.2bc
2	646.5±78.2b	37.1±6.0b	45.1±8.2b	9 195.2±390.3b
3	462.3±78.4c	31.8±2.0c	49.4±5.2a	6 169.5±300.1d
4	661.5±33.2b	36.5±4.0b	41.0±5.5b	8 595.1±165.0c
5	609.2±78.1c	33.9±6.0c	37.0±4.0c	6 750.3±285.2d
6	648.4±61.5b	34.5±2.0c	47.7±5.0ab	9 075.4±345.1b
7	438.0±48.2d	33.3±3.0c	45.2±3.0b	5 604.2±240.3e
8	658.5±91.5b	38.6±4.0b	46.9±3.6b	10 132.5±345.0ab
9	642.3±69.2b	40.3±3.0ab	47.2±4.0ab	10 380.4±375.4a
10	633.2±57.1b	37.4±2.0b	45.1±3.5b	9 075.2±255.4b
11	670.5±112.5b	36.3±2.2b	46.0±5.3b	9 516.2±270.3b
12	663.1±96.0b	37.1±2.0b	42.9±4.5b	8 970.4±345.0b
13	588.0±97.5c	37.5±5.0b	39.6±4.6c	8 130.3±360.2c
14	667.5±67.5b	38.1±4.0b	49.0±5.1a	10 593.0±465.0a
15	688.5±82.5a	40.1±5.0ab	43.5±3.6b	10 209.1±420.1ab
16	640.5±106.5b	39.3±4.0b	45.3±4.3b	9 693.3±300.2b
17	667.5±97.5b	35.5±5.0c	45.6±4.4b	9 184.5±165.1b
18	502.5±61.5d	47.8±3.0a	43.2±3.5b	8 700.0±225.0bc
19	609.2±105.3b	45.2±5.0ab	44.8±5.2b	8 400.1±255.3c
20	541.5±67.5d	42.6±4.0ab	43.2±3.5b	8 470.5±270.1c
最大值	691.5	47.8	49.4	10 593.0
最小值	438.0	31.8	37.0	5 604.2
变异系数	0.119	0.105	0.068	0.151

注:平均值±标准误差($n=3$)。同一列不同字母表示各品种之间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Mean ± standard error ($n=3$). The different letters after the same column of data showed significant difference between treatments ($P < 0.05$). The same below.

著性差异的原因可能是不同小麦品种之间存在遗传差异,以及受当地气候、土壤环境等因素的影响。

2.2 不同品种小麦籽粒Cd含量

20个供试小麦品种籽粒Cd含量(图1)的差异显著($P<0.05$)。小麦籽粒Cd含量最高的是3号小麦(中麦578),Cd含量为 $0.116\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,籽粒Cd含量最低的品种是12号小麦(济麦55)和13号小麦(济糯116),籽粒Cd含量均为 $0.013\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,最高值是最低值的8.923倍,20个品种籽粒的平均值为 $0.042\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。8号(烟农745)、20号(济麦38)和11号(济麦0435)小麦籽粒Cd含量也相对较低。只有3号小麦(中麦578)籽粒Cd含量超出了《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中规定的小麦Cd的限量标准值($0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),其余品种均不超标。

2.3 不同品种小麦苗期地上部Cd含量和富集系数

表3为20个小麦品种苗期地上部的Cd含量和富集系数。由表3可知,20个小麦品种苗期地上部Cd含量差异较大,介于 $0.039\sim 0.297\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均

值为 $0.126\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其中13号小麦(济糯116)苗期地上部的Cd含量最低,12号小麦(济麦55)、15号小麦(烟农1212)Cd含量也相对较低,14号小麦(烟农215)苗期地上部的Cd含量最高。20个小麦品种苗期地上部的富集系数间存在显著差异,介于 $0.119\sim 0.774$ 之间,富集系数最小的是13号小麦(济糯116),最大的是14号小麦(烟农215)。不同品种小麦苗对Cd的吸收富集存在显著差异的原因可能是不同小麦品种之间的遗传差异。

2.4 不同品种小麦籽粒富集系数和转运系数

由表4可知,20个小麦品种籽粒富集系数范围为 $0.038\sim 0.355$,不同品种间的富集系数差异显著,富集系数最小的小麦品种是13号(济糯116),其次是12号(济麦55)、8号(烟农745)、11号(济麦0435)、18号(济麦5022),富集系数最高的是3号(中麦578)。

小麦籽粒Cd含量变化特征与小麦不同部位Cd的转移能力有关。转运系数越小,表明Cd越难以到达籽粒。对20个小麦品种Cd转运系数分析发现(表4),

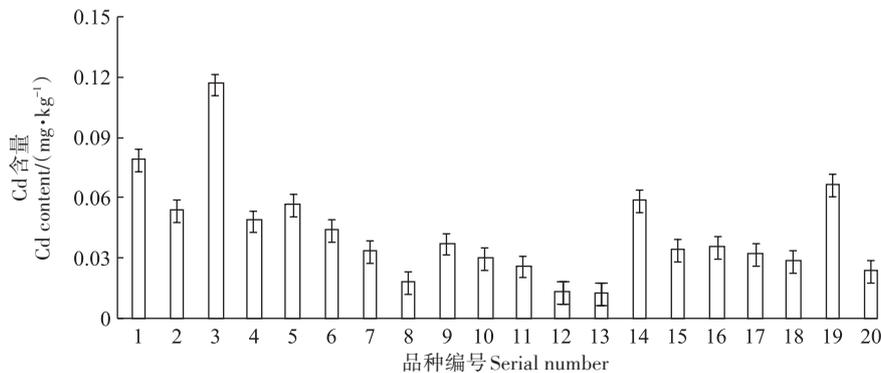


图1 供试20个小麦品种的籽粒Cd含量

Figure 1 Grain Cd content of 20 wheat varieties in field experiment

表3 小麦苗期地上部Cd含量和富集系数

Table 3 Cd content in aboveground part of wheat at seedling stage

品种编号 Serial number	Cd含量 Cd content/(mg·kg ⁻¹)	富集系数 BCF	品种编号 Serial number	Cd含量 Cd content/(mg·kg ⁻¹)	富集系数 BCF
1	0.160±0.015b	0.481±0.141b	11	0.096±0.021c	0.256±0.012c
2	0.188±0.014a	0.591±0.140a	12	0.053±0.005d	0.168±0.006d
3	0.077±0.011c	0.236±0.143c	13	0.039±0.011e	0.119±0.005e
4	0.079±0.026c	0.258±0.062c	14	0.297±0.008a	0.774±0.014a
5	0.164±0.017b	0.477±0.053b	15	0.058±0.015d	0.171±0.007d
6	0.094±0.005c	0.308±0.081c	16	0.188±0.006b	0.534±0.008b
7	0.124±0.016bc	0.395±0.123bc	17	0.079±0.005e	0.229±0.014c
8	0.148±0.012b	0.445±0.131b	18	0.188±0.005b	0.561±0.009b
9	0.130±0.007b	0.396±0.112b	19	0.177±0.013b	0.462±0.016b
10	0.110±0.007c	0.275±0.063c	20	0.074±0.010c	0.230±0.015c

$TF_{\text{根系-秸秆}}$ 为 0.320(济糯 116)~0.642(济麦 70), 最大值是最小值的 2.01 倍; $TF_{\text{秸秆-籽粒}}$ 为 0.093(济麦 38)~0.496(中麦 578), 最大值比最小值高 4.36 倍。12 号小麦(济麦 55)和 20 号小麦(济麦 38)的 $TF_{\text{秸秆-籽粒}}$ 最低, 其次是 11 号小麦(济麦 0435); $TF_{\text{根系-秸秆}}$ 最小的品种为 13 号(济糯 116)、8 号(烟农 745)、9 号(烟农 572)、12 号(济麦 55)、15 号(烟农 1212)。

12 号(济麦 55)和 13 号小麦(济糯 116)相较于其余 18 个品种在小麦苗期和成熟期均表现出低 Cd 累积特性。14 号小麦(烟农 215)在苗期表现出了较强的富集 Cd 的能力, 地上部 Cd 含量和富集系数均高于其余品种, 而籽粒中富集 Cd 的能力有所下降。3 号小麦(中麦 578)在小麦苗期并未表现出较高的 Cd 累积特性, 但是成熟期却表现出了较高的 Cd 累积特性。

2.5 Cd 低累积小麦品种聚类分析

根据小麦籽粒 Cd 含量进行聚类分析, 将 20 个供试小麦品种分为 5 组(图 2), 分别为低 Cd 累积品种、较低 Cd 累积品种、中等 Cd 累积品种、较高 Cd 累积品种、高 Cd 累积品种。组 I 为低 Cd 累积小麦品种(3 个), 包括 8 号(烟农 745)、12 号(济麦 55)、13 号(济糯

116)小麦, 平均 Cd 含量为 $0.015 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占所研究小麦品种的 15%。组 II 为较低 Cd 累积小麦品种(9 个), 包括 7 号(泰科 33)、9 号(烟农 572)、10 号(济麦 106)、11 号(济麦 0435)、15 号(烟农 1212)、16 号(烟农 999)、17 号(济麦 70)、18 号(济麦 5022)、20 号(济麦 38)小麦, 平均 Cd 含量为 $0.031 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占所研究小麦品种的 45%。组 III 为中等 Cd 累积小麦品种(6 个), 包括 2 号(济麦 44)、4 号(山农 38)、5 号(中麦 415)、6 号(登海 206)、14 号(烟农 215)、19 号(济麦 5172)小麦, 平均 Cd 含量为 $0.054 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占所研究小麦品种的 30%。组 IV 为较高 Cd 累积小麦品种(1 个), 为 1 号小麦(济麦 23), Cd 含量为 $0.079 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占所研究小麦的 5%。组 V 的 3 号(中麦 578)小麦 Cd 含量为 $0.116 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 超过国家标准(GB 2762—2017)规定的 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 限量值。占所研究小麦的 5%。通过聚类分析初步筛选出 8 号小麦(烟农 745)、12 号小麦(济麦 55)和 13 号小麦(济糯 116)为低 Cd 累积小麦品种。

2.6 不同小麦品种安全风险评价

使用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对小麦籽粒重金属污染状况进行评价(图 3), 结果发现 3 号小麦(中麦 578)单因子污染指数大于 1, 为污染状态, 其他品种的小麦籽粒 Cd 单因子污染指数均小于 1, 可见除 3 号以外其他小麦籽粒中 Cd 污染水平均为清洁状态, 这与根据 GB 2762—2017 国家限量评价标准判定的结果一致。12 号(济麦 55)和 13 号(济糯 116)小麦品种籽粒单因子污染指数最低, 风险最

表 4 不同品种小麦 Cd 籽粒生物富集系数和转运系数

Table 4 Bioaccumulation coefficient and transport coefficient of Cd in different wheat varieties

品种编号 Serial number	富集系数 BCF	$TF_{\text{根系-秸秆}}$ $TF_{\text{Root-Straw}}$	$TF_{\text{秸秆-籽粒}}$ $TF_{\text{Straw-Grain}}$
1	0.238±0.005ab	0.564±0.015a	0.333±0.011b
2	0.169±0.001b	0.493±0.017b	0.255±0.015c
3	0.355±0.011a	0.381±0.009c	0.496±0.017a
4	0.158±0.002b	0.365±0.002c	0.336±0.007b
5	0.165±0.007b	0.405±0.010bc	0.338±0.008b
6	0.145±0.004b	0.438±0.006bc	0.284±0.001bc
7	0.107±<0.001c	0.367±0.002c	0.215±0.002c
8	0.042±<0.001e	0.348±0.003c	0.110±0.010d
9	0.127±0.007b	0.348±0.001c	0.215±<0.001c
10	0.075±0.002d	0.478±0.004b	0.132±0.001d
11	0.055±0.001e	0.480±0.005b	0.105±0.003de
12	0.041±0.003e	0.357±0.007c	0.094±<0.001e
13	0.038±0.002e	0.320±0.001c	0.109±0.015de
14	0.106±0.003c	0.524±0.008ab	0.196±0.007c
15	0.078±0.005d	0.385±0.002c	0.163±<0.001d
16	0.079±0.002d	0.447±0.006b	0.162±0.003d
17	0.093±0.011c	0.600±0.015a	0.148±0.001d
18	0.065±0.002d	0.482±0.012b	0.130±0.001d
19	0.137±0.014b	0.510±0.017ab	0.245±0.007c
20	0.074±0.002d	0.642±0.012a	0.093±<0.001e

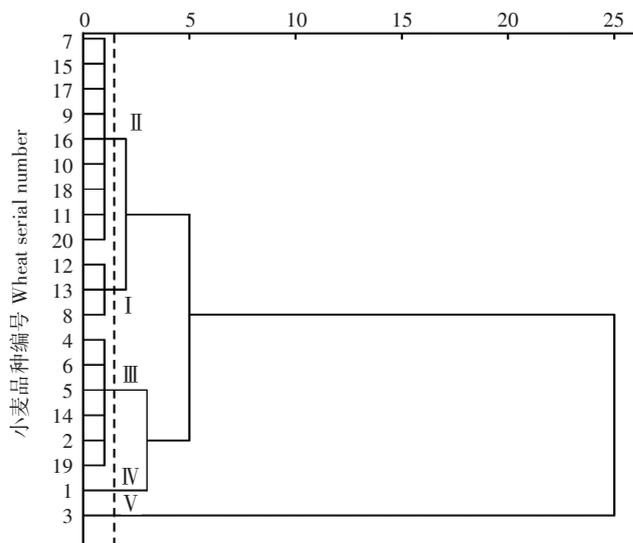


图 2 小麦籽粒 Cd 含量聚类分析

Figure 2 Cluster analysis of cadmium content in wheat grains

小。对所有品种小麦进行内梅罗综合污染指数计算的结果为0.822,属于尚安全状态。

不同品种小麦靶标危害系数如图4所示,所有品种小麦的靶标危害系数均小于1。3号(中麦578)的靶标危害系数最大,为0.30,12号(济麦55)和13号(济糯116)的靶标危害系数最小,均为0.03。

3 讨论

3.1 富集能力和转运能力对小麦籽粒Cd含量的影响

研究表明,小麦籽粒Cd累积在一定程度上受基因控制^[23],与根系、茎叶不同细胞器对Cd的固定储存能力、耐Cd特性、调控基因等密切相关^[23-26]。夏亦涛^[24]研究发现,不同基因型小麦的Cd吸收、转运和累积存在差异,小麦籽粒Cd含量与苗期地下部至地上部的Cd迁移系数呈显著正相关。Gray等^[25]研究认为筛选低累积作物品种的标准必须满足该品种对重金属富集系数和转运系数均小于1的条件。本研究发现,不同小麦品种对Cd的吸收累积量存在显著差异,富集系数最小的小麦品种为济糯116、其次是济麦

55、烟农745,其富集系数均小于0.1。富集系数与小麦籽粒Cd含量呈正比,这与前人研究结果一致^[26-27]。本研究中Cd由小麦根系向秸秆的转运系数,以及秸秆向籽粒的转运系数均小于1,说明Cd从土壤转运到小麦根系以及由根系向地上部转运的程度很小,大部分Cd被截留在根系以及秸秆部,这与李乐乐等^[28]的研究结果一致。生物富集系数和转运系数是评价不同小麦品种对Cd累积差异的重要指标。

3.2 籽粒Cd低累积小麦品种评价标准

筛选Cd低累积小麦品种不仅要求其籽粒中Cd含量低于国家标准,还要求其适宜于当地环境种植,农民接收程度高。为实现中轻度Cd污染农田的利用及粮食的安全生产,近年来诸多学者开展了Cd低累积型作物的筛选与培育工作,并得到了诸多具有Cd低累积特性的作物^[29-31]。目前,对Cd低累积品种的筛选多基于室内盆栽或水培试验、矿区附近重度污染农田环境等,均以小麦籽粒Cd累积量为标准,并未过多考虑小麦产量水平,以及农民接收程度等因素,因此不利于全面反映小麦在特定Cd污染区域下的自然生

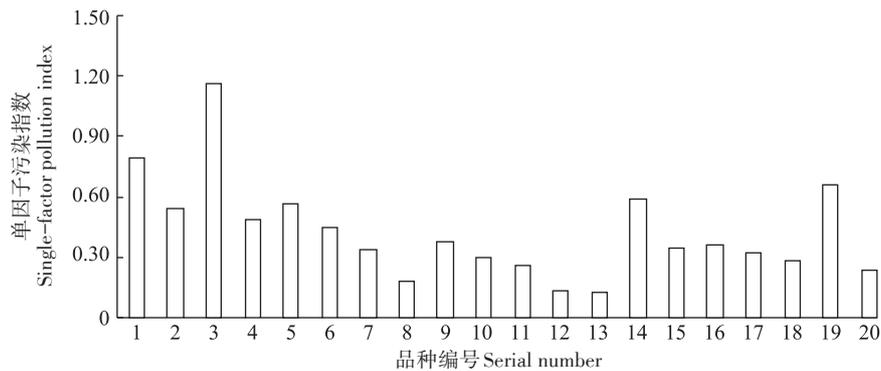


图3 不同品种冬小麦单因子污染指数

Figure 3 Single factor pollution index of different winter wheat varieties

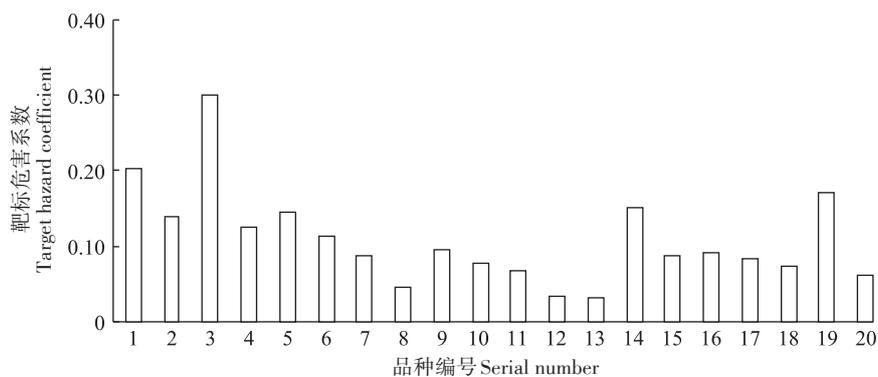


图4 不同品种冬小麦靶标危害系数

Figure 4 Target damage coefficient of different winter wheat varieties

产状况及实际推广应用。从区域粮食安全角度出发,所有筛选得到的Cd低累积品种既要具备小麦Cd低累积特性,还要适应当地农业生产环境,以满足实际生产应用的需要。本研究采用大田试验对20份小麦材料进行筛选与验证,以籽粒Cd含量为评价指标进行聚类分析,初步筛选出烟农745、济麦55、济糯116为小麦低Cd累积品种。20个小麦品种的平均产量为 $8\ 811\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中初步筛选出的3个低累积品种中产量高于平均产量的有2个,为烟农745和济麦55,济糯116低于平均产量。因此,综合考虑小麦产量和Cd低累积结果,确定烟农745和济麦55为该地区Cd低累积品种。

3.3 籽粒Cd低累积小麦品种风险评价

由于当地种植的主要粮食作物为小麦、玉米和花生,且主要以小麦为主食,因此,以供试的小麦品种为对象,探讨了膳食摄入重金属对当地居民产生的健康风险。采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对小麦籽粒Cd污染状况进行评价,同时采用靶标危害系数评价小麦籽粒中重金属Cd摄入对成人产生的健康风险^[32-33]。本研究发现供试的20个小麦品种中,中麦578的小麦籽粒单因子污染指数评价结果为污染状态,其他品种的小麦籽粒均为清洁状态,这与《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)判定结果一致。而按照靶标危害系数的评价结果,所有品种小麦的摄入对人体造成的危害风险均较低,内梅罗综合污染指数也显示属于尚清洁状态。该结果与单因子污染指数和国家限量评价标准评价结果不一致,这可能是由于在本研究中计算靶标危害系数所采用的参数均为平均指数,且并未考虑当地居民其他食物和暴露途径,因此本研究中的暴露评价结果比较保守,而我国国家标准的限量标准更为严格,从而导致两种判定结果不一致。研究认为重金属低累积小麦品种筛选标准必须满足的条件之一是该品种可食用部分的重金属含量必须低于相关国家标准,即使其他部位含量较高^[25]。因此,仍以国家标准为最终判定标准筛选Cd低累积小麦品种。

综合小麦产量、籽粒Cd累积量、富集系数和转运系数,以及靶标危害系数和聚类分析等结果,本研究筛选出济麦55、烟农745、济麦0435和济麦5022为适宜于当地种植的Cd低累积品种。从粮食安全角度出发,所筛选出的小麦Cd低累积品种还需进一步验证其低累积特征的稳定性,以及确定影响籽粒Cd含量的关键环境因素,从而合理确定Cd低累积型

小麦品种的安全种植区和低风险种植区,以满足实际生产应用的需要。

4 结论

(1)在研究区域内供试的20份小麦品种的籽粒Cd含量差异显著,除1个品种小麦籽粒Cd含量超国家限量标准值外,其他品种Cd含量均低于国家限量标准值。

(2)基于小麦籽粒Cd含量及相关评价指标筛选出的Cd低累积型小麦品种具有较高的参考和应用价值,为当地Cd污染风险区域的耕地安全利用提供了Cd低累积型品种材料,能够有效解决Cd污染耕地边生产边修复的问题,但受土壤Cd含量水平和低累积特征的稳定性限制,Cd低累积型小麦品种仍需要进一步验证。

参考文献:

- [1] 曾希柏,徐建明,黄巧云,等.中国农田重金属问题的若干思考[J].土壤学报,2013,50(1):186-194. ZENG X B, XU J M, HUANG Q Y, et al. Some deliberations on the issues of heavy metals in farmlands of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(1):186-194.
- [2] 张绪美,董元华,王辉,等.江苏省农田畜禽粪便负荷时空变化[J].地理科学,2007,27(4):597-601. ZHANG X M, DONG Y H, WANG H, et al. Spatial and temporal variation in farmland load of livestock feces in Jiangsu Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(4):597-601.
- [3] SUN Y, SUN G, XU Y, et al. Assessment of sepiolite for immobilization of cadmium-contaminated soils[J]. *Geoderma*, 2013, 193/194(2):149-155.
- [4] 朱桂芬,张春燕,王建玲,等.新乡市寺庄顶污灌区土壤及小麦重金属污染特征的研究[J].农业环境科学学报,2009,28(2):263-268. ZHU G F, ZHANG C Y, WANG J L, et al. Investigation of heavy metal pollution in soil and wheat grains in sewage-irrigated area in Sizhuangding, Xinxiang City[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(2):263-268.
- [5] 陈彩艳,唐文帮.筛选和培育镉低积累水稻品种的进展和问题探讨[J].农业现代化研究,2018,39(6):1044-1051. CHEN C Y, TANG W B. A perspective on the selection and breeding of low-Cd rice[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(6):1044-1051.
- [6] BOLAN N S, MAKINO T, KUNHIKRISHNAN N, et al. Cadmium contamination and its risk management in rice ecosystems[J]. *Advances in Agronomy*, 2013, 119:183-273.
- [7] HE Y B, HUANG D Y, ZHU Q H, et al. A three-season field study on the in situ remediation of Cd-contaminated paddy soil using lime, two industrial by-products, and a low-Cd-accumulation rice cultivar[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2017, 136:135-141.
- [8] ZHAO F J, MA Y, ZHU Y G, et al. Soil contamination in China: current status and mitigations strategies[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 49(2):750-759.

- [9] CLARKEJ M, MCCAIG T N, DEPAUW R M, et al. Strong field durum wheat[J]. *Canadian Journal of plant Science*, 2005, 85(3):651-654.
- [10] GRANT C A, CLARKE J M, DUGUID S, et al. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390(2/3):301-310.
- [11] 刘维涛, 周启星, 孙约兵, 等. 大白菜对铅积累与转运的品种差异研究[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(1):63-67. LIU W T, ZHOU Q X, SUN Y B, et al. Variety difference of lead accumulation and translocation in Chinese cabbage (*Brassica pekinensis* L.)[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(1):63-67.
- [12] 陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 等. 不同作物对土壤中Cd的富集特征及低累积品种筛选[J]. *环境科学*, 2019, 40(10):4647-4653. CHEN X H, SHEN G X, BAI Y J, et al. Accumulation of Cd in different crops and screening of low-Cd accumulation cultivars[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(10):4647-4653.
- [13] 秦冉, 娄飞, 代良羽, 等. 地质高背景区镉污染稻田中低累积水稻品种筛选[J]. *南方农业学报*, 2021, 52(10):2709-2716. QIN R, LOU F, DAI L Y, et al. Screening of low-bioaccumulation rice varieties in cadmium contaminated paddy fields with high geological background[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(10):2709-2716.
- [14] 薛涛, 廖晓勇, 王凌青, 等. 镉污染农田不同水稻品种镉积累差异研究[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(8):1818-1826. XUE T, LIAO X Y, WANG L Q, et al. Cadmium accumulation in different rice cultivars from cadmium-polluted paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8):1818-1826.
- [15] RIZWAN M, ALI S, ABBAS T, et al. Cadmium minimization in wheat: a critical review[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 130:43-53.
- [16] 熊孜, 李菊梅, 赵会薇, 等. 不同小麦品种对大田中低量镉富集及转运研究[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(1):36-44. XIONG Z, LI J M, ZHAO H W, et al. Accumulation and translocation of cadmium in different wheat cultivars in farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1):36-44.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 205-226. LU R K. Soil agro-chemical analysis method [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Publishing House, 2000:205-226.
- [18] HE Y B, HUANG D Y, ZHU Q H, et al. A three-season field study on the in-situ remediation of Cd-contaminated paddy soil using lime, two industrial by-products, and a low-Cd-accumulation rice cultivar [J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2017, 136:135-141.
- [19] HUANG X S, WANG H Y, ZHOU J M, et al. Risk assessment of potentially toxic element pollution in soils and rice (*Oryzasativa*) inatypical area of the Yangtze River Delta[J]. *Environment Pollution*, 2009, 157(8/9):2542-2549.
- [20] 刘克, 和文祥, 张红, 等. 镉在小麦各部位的富集和转运及籽粒镉含量的预测模型[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(8):1441-1448. LIU K, HE W X, ZHANG H, et al. Cadmium accumulation and translocation in wheat and grain Cd prediction[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(8):1441-1448.
- [21] 程加迁, 王俊平. 蔬菜水果重金属膳食暴露评估中风险权重的确定方法[J]. *食品科学*, 2018, 39(1):47-52. CHENG J Q, WANG J P. A method to determine risk weight in dietary exposure assessment to heavy metals in vegetables and fruits[J]. *Food Science*, 2018, 39(1):47-52.
- [22] 丁钢强, 马爱国, 孙长颖, 等. 中国居民膳食指南科学研究报告(2021)[R/OL]. 中国营养学会, 2021. <https://www.cnsoc.org/latesachie/455120204.html>. DING G Q, MA A G, SUN C Y, et al. Scientific research report on dietary guidelines for Chinese residents (2021) [R/OL]. Chinese Nutrition Society, 2021. <https://www.cnsoc.org/latesachie/455120204.html>.
- [23] 刘维涛, 周启星. 重金属污染预防品种的筛选与培育[J]. *生态环境学报*, 2010, 26(6):1452-1458. LIU W T, ZHOU Q X. Selection and breeding of heavy metal pollution-safe cultivars[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 26(6):1452-1458.
- [24] 夏亦涛. 小麦镉高低积累品种筛选及其镉吸收转运的差异机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019: 14. XIA Y T. Screening of high and low cadmium accumulation *Triticum aestivum* varieties and research on the difference and mechanism of cadmium absorption and transport[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019: 14.
- [25] GRAY C W, MCLAREN R G, ROBERTS A H C. Cadmium concentrations in some New Zealand wheat grain[J]. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 2001, 29(2):125-136.
- [26] YUE J Y, WEI X J, WANG H Z. Cadmium tolerant and sensitive wheat lines: their differences in pollutant accumulation, cell damage, and autophagy[J]. *Biologia Plantarum*, 2018, 62(2):379-387.
- [27] 杨玉敏, 陈春秀, 雷建容, 等. 四川推广小麦品种在镉胁迫下籽粒镉积累和生长响应[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(9):1796-1801. YANG Y M, CHEN C X, LEI J R, et al. Cadmium accumulation and growth of different sichuan wheat varieties under cadmium stress[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(9):1796-1801.
- [28] 李乐乐, 刘源, 李宝贵, 等. 镉低积累小麦品种的筛选研究[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(8):53-58, 72. LI L L, LIU Y, LI B G, et al. Screening of low-accumulation wheat varieties with cadmium[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(8):53-58, 72.
- [29] WU H Y, LIAO Q L, CHILLRUD S N, et al. Environmental exposure to cadmium; health risk assessment and its associations with hypertension and impaired kidney function[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6:29989.
- [30] 杨玉敏, 张庆玉, 杨武云, 等. 镉胁迫对不同基因型小麦产量及构成因子的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(3):532-538. YANG Y M, ZHANG Q Y, YANG W Y, et al. Effect of cadmium stress on yield and yield components of different wheat genotypes[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2011, 17(3):532-538.
- [31] ZHOU Z, ZANG B, LIU H T, et al. Zinc effects on cadmium toxicity in two wheat varieties (*Triticum aestivum* L.) differing in grain cadmium accumulation[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 183:109562.
- [32] HANG X S, WANG H Y, ZHOU J M, et al. Risk assessment of potentially toxic element pollution in soils and rice (*Oryza sativa* L.) in a typical area of the Yangtze River Delta[J]. *Environment Pollution*, 2009, 157:2542-2549.
- [33] KHAN M U, MALIK R N, MUHAMMAD S. Human health risk from heavy metal via food crops consumption with wastewater irrigation practices in Pakistan[J]. *Chemosphere*, 2013, 93(10):2230-2238.