

DOI:10.19462/j.cnki.zgzy.20240830003

豫北农田土壤和小麦籽粒镉含量及风险评估

薛志伟 郭峰 杨春玲
(安阳市农业科学院,河南安阳 455000)

摘要:冬小麦是河南省重要的粮食作物,了解豫北农田土壤和小麦籽粒镉含量,可以为小麦的合理种植及籽粒质量安全提供参考依据。于2019年和2020年小麦收获季节,在豫北小麦种植区农田采集土壤和籽粒样品共计314份,分析小麦籽粒中镉元素的含量变化特征,评价其镉污染状况。结果表明,豫北农田土壤平均镉含量0.500mg/kg,超标率28.662%;小麦籽粒平均镉含量0.049mg/kg,超标率5.732%;对小麦籽粒和土壤镉含量进行相关性和富集系数分析表明,两者相关性达到极显著($r=0.417$),小麦籽粒镉含量对土壤镉含量的富集范围在0.050~0.200的占比最大(85.987%);小麦籽粒镉单污染指数范围为0.150~1.710,内梅罗综合污染指数平均值为0.494;收集的农田土壤和小麦籽粒存在部分镉含量超标现象,综合评价籽粒镉为轻度污染水平,因此在豫北小麦生产中应特别注意农田管理和风险防控。

关键词:小麦;土壤;籽粒;镉;富集特征;污染评价

Cadmium Content and Risk Assessment of Farmland Soil and Wheat Grain in Northern Henan

XUE Zhiwei, GAO Feng, YANG Chunling

(Anyang Academy of Agricultural Sciences, Anyang 455000, Henan)

近年来随着工业化、城市化和农业集约化的快速发展,含重金属的污染物通过工业废水、大气沉降、污水灌溉、采矿冶炼等途径进入农田,目前已成为我国土壤污染的主要形态^[1-3]。2014年环境保护部和国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,全国82.8%的土壤正在遭受严重的重金属污染,镉污染以7.0%的超标率位居无机污染物之首^[4]。人体长期摄入过量的镉污染食品后,身体各器官会发生一系列的病变,造成骨质疏松软化、肾损伤、器官衰竭等疾病,严重时会引起癌症^[5-7]。镉对于植物来讲为非必要元素,具有生物毒性高、易积累、不易去除的特点^[8-11]。小麦是中国重要的粮食作物之一,其种植面积和产量对于保障国家粮食安全具有重要意义^[12-13]。根据2024年国家统计

局的公告,全国小麦播种面积为2309.1万 hm^2 ,单位面积产量5985.8 kg/hm^2 ,小麦总产量13822万t。宋伟等^[14]对我国138个典型区域的耕地重金属污染情况进行统计,发现我国耕地的土壤重金属污染概率为16.67%左右,镉污染严重程度远超其他重金属。基于我国人均耕地占有量少(仅为0.15 hm^2)且后备耕地资源十分有限的现状,国内部分受镉污染的土壤区域仍从事农业生产^[15-16]。因此研究土壤和小麦籽粒中镉的含量特征,对于农田土壤管理具有重要意义。

作为镉中积累型作物,小麦具有一定的潜在镉污染风险^[17-18]。前人针对小麦镉的吸收和积累特点也进行了大量的研究^[19-21]。王世玉等^[22]选取国内外9个典型污灌区作为研究对象,结果发现在同一灌区小麦中镉的富集浓度高于玉米,其通过口食对于人体健康造成的风险较高。秦普丰等^[23]调查了工业型城市不同功能区的土壤和蔬菜中的污染情况,发

基金项目:财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系资助(CARS-3);中央引导地方科技发展资金项目(Z20221341025);安阳市科技攻关计划(2023C01NY005)

现其均受到不同程度的污染,其中镉和汞污染最为严重。张浩等^[24]调查了河南洛阳铅锌尾矿库土壤和蔬菜的污染特征,发现土壤中镉含量均高于土壤风险筛选值,蔬菜中镉含量超过食品污染限值。目前对镉污染研究多集中在污灌区、矿区以及工业区等,不同地区的土壤性质和环境条件均存在较大差异。

本文以河南北部农田小麦种植区为研究对象,在小麦种植区采集土壤和小麦籽粒样品,采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法进行分析及评价,旨在为小麦的安全生产和镉污染生态风险管控提供科学指导和决策依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料 2019年于小麦收获季节在河南北部安阳市汤阴县、内黄县等,鹤壁市淇滨区等、濮阳市高新区等小麦主要种植区域采集99份根际土壤及相应的小麦籽粒样品,2020年继续采集58份根际土壤及相应的小麦籽粒样品。在小麦籽粒成熟期通过5点取样法采集样品,混匀后按照4分法留取土壤样品200g和小麦籽粒样品100g作为1个样品点,将采集的样品放入样品袋中,注明采集时间、地点、编号等信息,邮寄至农业农村部环境保护科研监测所进行镉元素含量测定。

1.2 镉污染评价方法与标准 小麦籽粒镉污染评价标准采用GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》作为评价标准,镉限量值为0.1mg/kg。采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法^[25]对小麦进行污染风险评价。

单因子污染指数法: $P_i = \frac{c_i}{s_i}$, 式中, P_i 为单项重

金属 i 的污染指数, c_i 为作物中重金属 i 的实测浓度 (mg/kg); s_i 为重金属 i 的评价标准临界值 (mg/kg)。依据评价标准, $P_i \leq 1$ 表示未受污染, $1 < P_i \leq 2$ 表示轻度污染, $2 < P_i \leq 3$ 表示中度污染, $P_i > 3$ 表示重度污染。

内梅罗综合污染指数法: $P = \sqrt{\frac{\bar{P}_i^2 + P_{imax}^2}{2}}$, 式中,

P 为农作物籽粒中重金属的综合污染指数, \bar{P}_i 为重金属单项污染指数平均值, P_{imax} 为重金属单项污染指数最大值。评价标准: $P \leq 0.7$ 为未受到污染, $0.7 < P \leq 1.0$ 为警戒水平, $1.0 < P \leq 2.0$ 为轻度污染, $2.0 < P \leq 3.0$ 为中度污染, $P > 3.0$ 为重度污染。

1.3 数据分析与处理 采用 Excel 2019 和 SPSS 19.0 进行数据整理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 农田土壤镉含量分析 由表1可知,年度之间农田土壤中镉含量平均值有一定差异,2019年农田土壤中平均镉含量为0.390mg/kg,2020年为0.687mg/kg。2019年取样农田土壤镉含量变化幅度为0.130~1.230mg/kg,2020年为0.470~1.830mg/kg。按照国家标准GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》,农田土壤中镉含量风险筛选值为0.600mg/kg (pH值>7.5)。2019年有7个小麦土壤样品超标,2020年有38个土壤样品超标,超标率分别为7.071%和65.517%。本研究2019—2020年两年共收集157个农田土壤样品,农田土壤平均镉含量0.500mg/kg,超标率28.662%。2019年和2020年农田土壤镉含量变异系数分别为42.671%和30.842%,均属于中等变异程度。

2.2 小麦籽粒镉含量分析 由表2可知,小麦籽粒镉含量年度之间平均值差异较小,2019年小麦籽粒平均镉含量0.050mg/kg,2020年0.048mg/kg。2019年取样小麦籽粒镉含量变化幅度0.010~0.170mg/kg,2020年0.020~0.140mg/kg。按照GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》,籽粒中镉含量上限为0.100mg/kg。2019年有6个小麦籽粒样品超标,2020年有3个小麦籽粒样品超标,超标率分别为6.061%和5.172%。本研究2019—2020年两年共收集157个小麦籽粒样品,平均镉

表1 农田土壤镉含量描述性统计

采样年份	镉含量 (mg/kg)			标准差 (mg/kg)	变异系数 (%)	超标率 (%)
	最小值	最大值	平均值			
2019	0.130	1.230	0.390	0.166	42.671	7.071
2020	0.470	1.830	0.687	0.212	30.842	65.517
两年	0.130	1.830	0.500	0.234	46.744	28.662

表2 小麦籽粒镉含量描述性统计

采样年份	镉含量(mg/kg)			标准差(mg/kg)	变异系数(%)	超标率(%)
	最小值	最大值	平均值			
2019	0.010	0.170	0.050	0.028	56.339	6.061
2020	0.020	0.140	0.048	0.022	47.054	5.172
两年	0.010	0.170	0.049	0.026	53.218	5.732

含量 0.049mg/kg, 超标率 5.732%。2019 年和 2020 年小麦籽粒镉含量变异系数分别为 56.339% 和 47.054%, 均属于中等变异程度。

粮食作物中重金属含量受产地环境污染水平、土壤性质、气候、作物品种和种植管理水平等诸多因素影响。研究发现, 通常在外界环境存在镉污染的情况下, 作物中的镉基本来自于土壤中镉的迁移, 因此粮食作物最容易镉含量超标, 这一研究结果与王成尘等^[26]、陈京都等^[27]的研究结果相似。

2.3 小麦籽粒镉和土壤镉含量之间的相关关系分析 农田土壤生态系统中, 土壤中镉积累与粮食作物吸收之间的关系复杂多样。有学者对二者进行线

性回归方程分析, 发现土壤中镉含量可用于预测小麦籽粒镉含量, 因而土壤镉安全阈值是保障农产品安全的重要指标^[28]。本文将采集到的 157 份土壤—小麦籽粒镉含量进行线性回归分析, 由图 1 可以看出, 在田间条件下采样区域内小麦籽粒镉含量与土壤镉含量呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 相关系数为 $r = 0.417^{**}$ ($n = 157$)。

2.4 小麦籽粒镉和土壤镉含量之间的富集关系分析 富集系数反映了植株对镉的富集程度的高低或者摄取能力的强弱。小麦籽粒镉富集系数是籽粒镉含量与土壤中镉含量之比, 可说明镉在小麦籽粒中的富集情况。从图 2 可知, 小麦籽粒镉含

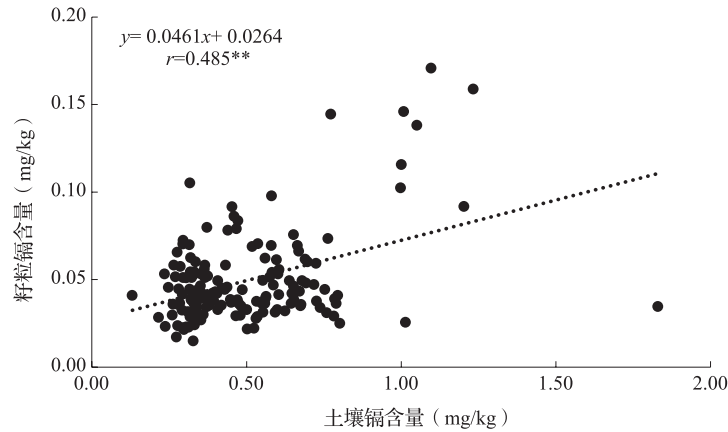


图1 土壤镉与小麦籽粒镉含量的相关关系

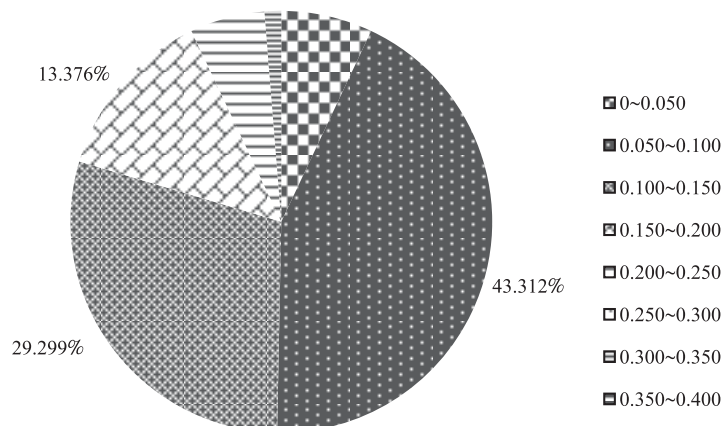


图2 小麦籽粒镉的富集系数频率分布

量对土壤镉含量的富集范围在 0.050~0.200, 占比最大(85.987%)。其中富集系数为 0.050~0.100 占比 43.312%, 富集系数为 0.100~0.150 占比 29.299%, 富集系数为 0.150~0.200 占比 13.376%。富集系数 0.250~0.300、0.350~0.400 占比为 0。富集系数 0~0.050、0.200~0.250、0.300~0.350 的占比分别为 7.006%、5.732%、1.274%。这从侧面说明, 小麦籽粒的镉富集能力存在差异, 因此, 我们可以通过有效措施, 筛选降低小麦籽粒中的镉含量^[29]。

表 3 小麦籽粒镉污染评价

采样年份	污染指数			不同污染等级占比(%)		综合污染指数
	最小值	最大值	平均值	无污染	轻度污染	
2019	0.150	1.710	0.503	94.949	5.051	1.259
2020	0.217	1.381	0.479	94.828	5.172	1.033
两年	0.150	1.710	0.494	94.904	5.096	1.257

3 讨论与结论

河南北部土壤镉含量变幅 0.130~1.830mg/kg, 小麦籽粒镉含量变幅 0.010~0.170mg/kg。研究结果表明, 小麦籽粒镉含量与土壤镉含量相关性达到极显著正相关, 其中 85.987% 的小麦籽粒镉含量对土壤镉含量的富集范围集中在 0.050~0.200。这表明, 尽管农田土壤和小麦籽粒镉含量在不同年份表现存在差异, 但整体来看, 河南北部麦区土壤存在一定程度的镉污染, 小麦籽粒内梅罗综合污染指数平均值为 0.494, 达到轻度污染水平。土壤污染具有隐蔽性、积累性等特点, 决定了其防治工作的艰巨性和复杂性^[30]。镉是一种具有积累性和毒性的重金属, 长期摄入镉污染的粮食作物会对人体健康造成潜在危害, 尤其是肝脏和肾脏。农田土壤环境质量在一定程度上决定着农产品的产量和质量, 小麦作为主要粮食作物, 其安全性直接关系到粮食安全和公共健康。因此, 河南北部麦区镉污染的防治工作刻不容缓, 需要政府、企业和公众的共同努力, 采取有效措施控制污染情况, 保障粮食安全和人类健康。

目前, 学术界对重金属镉的治理主要有以下手段:(1)加强对工业排放、矿山开采等镉污染源的监管, 从源头控制减少镉污染物的排放;(2)采用物理、化学、生物手段调理土壤性质, 降低重金属的生物有效性, 如使用钝化剂改变重金属形态和降低重金属活性^[31];(3)改善种植模式, 选择低镉富集的小

2.5 小麦籽粒镉污染情况分析 由表 3 可知, 2019 年和 2020 年取样小麦籽粒镉污染指数平均值分别为 0.503 和 0.479, 均为未受污染水平。2019 年和 2020 年小麦籽粒镉污染指数差异变化幅度分别为 0.150~1.710、0.217~1.381, 有个别地块小麦籽粒镉为轻度污染水平。本研究 2019~2020 年两年共收集 157 个小麦籽粒样品, 镉单污染指数范围为 0.150~1.710, 内梅罗综合污染指数平均值为 0.494, 综合评价小麦籽粒镉为轻度污染水平。

麦品种, 合理施肥, 降低小麦籽粒镉含量;(4)建立农田土壤和小麦籽粒镉含量监测网络, 及时发现和预警镉污染风险, 确保农产品安全。农田环境污染问题不容忽视, 未来应着重加强环境保护意识, 推动农业绿色发展, 积极构建人与自然和谐共生的现代化农业体系。

参考文献

- [1] 徐建明, 孟俊, 刘杏梅, 施加春, 唐先进. 我国农田土壤重金属污染防治与粮食安全保障. 中国科学院院刊, 2018, 33 (2): 153-159
- [2] Dunbar K R, Mclaughlin M J, Reid R J. The uptake and partitioning of cadmium in two cultivars of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54 (381): 349-354
- [3] Hereen T, Feller U. Transfer of zinc from xylem to phloem in the peduncle of wheat. *Journal of Plant Nutrition*, 1994, 17 (9): 1587-1598
- [4] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报. (2014-04-17) [2024-08-30]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/W020140417558995804588.pdf>
- [5] 邓新, 温璐璐, 迟鑫妹. 镉对人体健康危害及防治研究进展. *中国医疗前沿*, 2010, 5 (10): 4-5
- [6] 蔡嘉旖, 张文丽. 人群暴露环境镉污染与健康危害的流行病学研究进展. *环境卫生学杂志*, 2019, 9 (6): 621-627
- [7] 黄芸, 袁洪, 黄志军, 陆瑶. 环境重金属暴露对人群健康危害研究进展. *中国公共卫生*, 2016, 32 (8): 1113-1116
- [8] 于辉, 向言词. 镉不同积累型作物品种对镉吸收、转运和积累特性的研究进展. *生态科学*, 2018, 37 (2): 223-228
- [9] 季书勤, 郭瑞, 王汉芳, 张德奇, 赵淑章, 许令超. 河南省主要小麦品种重金属污染评价及镉吸收规律研究. *麦类作物学报*, 2006, 26 (6): 154-157

- [10] 徐佳慧,王萌,张润,吴玲玲. 土壤镉污染的生物毒性研究进展. 生态毒理学报,2020,15(5): 82-91
- [11] 熊敏先,吴迪,许向宁,郑明阳,邢涛. 土壤重金属镉对高等植物的毒性效应研究进展. 生态毒理学报,2021,16(6): 133-149
- [12] 李明辉,周玉玺,周林,杨洁,王盈桦. 中国小麦生产区域优势度演变及驱动因素分析. 中国农业资源与区划,2015,36(5): 7-15
- [13] 魏益民. 中国小麦的起源、传播及进化. 麦类作物学报,2021,41(3): 305-309
- [14] 宋伟,陈百明,刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况. 水土保持研究,2013,20(2): 293-298
- [15] 胡琼,吴文斌,项铭涛,陈迪,龙禹桥,宋茜,刘逸竹,陆苗,余强毅. 全球耕地利用格局时空变化分析. 中国农业科学,2018,51(6): 1091-1105
- [16] 詹杰,魏树和,牛荣成. 我国稻田土壤镉污染现状及安全生产新措施. 农业环境科学学报,2012,31(7): 1257-1263
- [17] 冯亚娟,黄议漫,余海英,张锡洲. 籽粒镉低积累小麦材料的筛选及稳定性分析. 麦类作物学报,2021,41(7): 842-850
- [18] 张琦,李仁英,徐向华,谢晓金,Chambe E A. 土壤镉污染对小麦生长及镉吸收的影响. 农业资源与环境学报,2019,36(4): 522-527
- [19] 易超,史高玲,陈恒强,姚澄,潘云俊,石月红,李标,高岩. 长江中下游麦区不同小麦品种镉积累差异研究. 农业环境科学学报,2022,41(6): 1164-1174
- [20] 胡铁柱,冯素伟,丁位华,姜小苓,于红彩,孙海燕,杨靖,张自阳,茹振钢. 镉对不同镉积累类型小麦幼苗的影响. 江苏农业科学,2018,46(19): 46-49
- [21] 潘建清,陆敏,杨肖娥. 不同小麦品种灌浆期生长和镉积累的差异研究. 农业环境科学学报,2021,40(4): 756-765
- [22] 王世玉,吴文勇,刘菲,赵漫,邱建强,仵军军. 典型污灌区土壤与作物中重金属健康风险评估. 中国环境科学,2018,38(4): 1550-1560
- [23] 秦普丰,刘丽,侯红,雷鸣,陈娅娜,李细红,贺琳. 工业城市不同功能区土壤和蔬菜中重金属污染及其健康风险评估. 生态环境学报,2010,19(7): 1668-1674
- [24] 张浩,王辉,汤红妍,温嘉伟,徐仁扣. 铅锌尾矿库土壤和蔬菜重金属污染特征及健康风险评估. 环境科学学报,2020,40(3): 1085-1094
- [25] Cao C, Chen X P, Ma Z B, Jia H H, Wang J J. Greenhouse cultivation mitigates metal-ingestion-associated health risks from vegetables in wastewater-irrigated agroecosystems. Science of the total environment, 2016,560-561: 204-211
- [26] 王成尘,田稳,向萍,徐武美,管冬兴,马奇英. 土壤-水稻/小麦重金属吸收机制与安全调控. 中国环境科学,2022,42(2): 794-807
- [27] 陈京都,戴其根,许学宏,仲晓春,郭保卫,郑超,张洪程,许轲,霍中洋,魏海燕. 江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价. 生态学报,2012,32(11): 3487-3496
- [28] 张红振,骆永明,章海波,宋静,夏家淇,赵其国. 土壤环境质量指导值与标准研究 V. 镉在土壤-作物系统中的富集规律与农产品质量安全. 土壤学报,2010,47(4): 628-638
- [29] 明毅,张锡洲,余海英. 小麦籽粒镉积累差异评价. 中国农业科学,2018,51(22): 4219-4229
- [30] 陈雅丽,翁莉萍,马杰,武晓娟,李永涛. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展. 农业环境科学学报,2019,38(10): 2219-2238
- [31] 胡含秀,周晓天,张慧敏,鲍广灵,曹迟,胡宏祥,马友华. 重金属污染耕地安全利用钝化材料作用机制及效果研究进展. 江苏农业科学,2023,51(8): 26-33 (收稿日期: 2024-08-30)

(上接第 92 页)

15D1252-1、1213-4、430-2 均为改良系;而 18 份父本系均为涵盖黄早四、旅大红骨和 Lancaster 系统相互改良育成的自交系,遗传基础丰富。其中多个父本系所配组合正处于省级区域试验和生产试验中,从而使本研究为育种提供参考奠定了一定遗传基础。

本研究结果表明,ASI 为加性遗传模型,亲本 GCA 对杂交种有显著影响,亲本一般配合力负向相对效应值越大,其杂交种越具有较大概率 $ASI \leq 0d$;亲本 ASI 的 GCA 与表型平均值线性方程为: $y = -163.2337 + 59.3577x$;建议母本系 $ASI < 3d$ 、父本系 $ASI \leq 4d$ 作为吉林省区域内育种选择指标。由于 ASI 遗传力较低,应加强整个分离世代选择,并强化对一般配合力负向相对效应值最大的 4 份父本系(19D395-1、15D752、18D516、15D956)及 3 份母本系(15D1252-1、430-2、PH6JM)继续进行改良,从而提高育种效率。

参考文献

- [1] 寇新玲. 高产玉米的育种与遗传改良技术研究. 黑龙江粮食,2024(1): 36-38
- [2] 张道磊,甘雨军,乐亮,普莉. 玉米产量性状的表观遗传调控机制和育种应用. 生物技术通报,2023,39(8): 31-42
- [3] 王艺焯,王瑞莲,李成,张春,王兆娟,康洪彪,杨毅成. 玉米自交系雌雄穗开花间隔与产量及抗旱性的相关性. 作物研究,2020,34(5): 427-430,434
- [4] 张风路, Bolanos J. 玉米的雌雄穗开花间隔研究进展. 河北农业大学学报,2002,25(S1): 24-25,37
- [5] 李争光,梁晓玲,雷志刚,阿布来提·阿布拉,邵红雨,韩登旭,李铭东,曹连蕾. 28 个玉米自交系主要农艺性状耐旱性研究. 新疆农业科学,2010,47(3): 449-456
- [6] 莫惠栋,李志民. 增产 NCII 设计和遗传模型测验. 作物学报,1991,17(1): 1-9
- [7] 唐启义. DPS 数据处理系统. 北京:科学出版社,2007
- [8] 孔繁玲. 植物数量遗传学. 北京:中国农业大学出版社,2006

(收稿日期: 2024-08-23)