

DOI: 10.11766/trxb202108140363

涂峰, 胡鹏杰, 李振炫, 张绪美, 潘云俊, 孔呈, 孙永泉, 邱一格, 吴龙华, 骆永明. 苏南地区 Cd 低积累水稻品种筛选及土壤 Cd 安全阈值推导[J]. 土壤学报, 2023, 60 (2): 435–445.

TU Feng, HU Pengjie, LI Zhenxuan, ZHANG Xumei, PAN Yunjun, KONG Cheng, SUN Yongquan, QIU Yige, WU Longhua, LUO Yongming. Screening of Low-Cd-accumulating Rice Varieties and Derivation of Soil Cd Safety Threshold in Southern Jiangsu[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60 (2): 435–445.

苏南地区 Cd 低积累水稻品种筛选及土壤 Cd 安全阈值推导*

涂峰^{1, 2}, 胡鹏杰^{2†}, 李振炫¹, 张绪美³, 潘云俊⁴, 孔呈⁵, 孙永泉⁶, 邱一格⁷, 吴龙华², 骆永明²

(1. 南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏省大气环境监测与污染控制高技术重点实验室, 南京 210044; 2. 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 3. 太仓市农业技术推广中心, 江苏太仓 215400; 4. 常熟市耕地质量保护站, 江苏常熟 215500; 5. 苏州市相城区现代农业发展中心, 江苏苏州 215131; 6. 苏州市耕地质量保护站, 江苏苏州 215011; 7. 江苏省生态环境监测监控有限公司, 南京 210019)

摘要: 解决农田土壤镉(Cd)污染及水稻 Cd 超标问题是国家和地方的重大需求。通过在苏南地区多年多点的田间小区试验和大田实地调查, 对当地主栽水稻品种的 Cd 积累性差异进行比较, 并推导出土壤 Cd 安全阈值。结果表明, 大田调查与小区试验结果一致, 18 个主栽水稻品种糙米 Cd 生物富集系数存在差异, 最高相差 4.7 倍, 南粳 46、南粳 3908 等品种的 Cd 积累性较低且稳定, 建议推广应用。利用物种敏感性分布法, 推导出苏南地区土壤 pH 5.0~6.5、6.5~7.5、7.5~8.5 下保护 95%水稻品种糙米不超标的土壤全量 Cd 安全阈值分别为 0.52、0.80、1.78 mg·kg⁻¹, 均高于现行的风险筛选值(GB 15618-2018)。研究结果对于苏南地区 Cd 污染稻田安全利用具有重要的应用价值。

关键词: 水稻土; 镉; 低积累品种; 土壤 pH; 安全阈值

中图分类号: X53 文献标志码: A

Screening of Low-Cd-accumulating Rice Varieties and Derivation of Soil Cd Safety Threshold in Southern Jiangsu

TU Feng^{1, 2}, HU Pengjie^{2†}, LI Zhenxuan¹, ZHANG Xumei³, PAN Yunjun⁴, KONG Cheng⁵, SUN Yongquan⁶, QIU Yige⁷, WU Longhua², LUO Yongming²

* 国家自然科学基金项目(41977135)、相城区耕地质量提升项目(ZYT2019-XC-G-010)、常熟市耕地质量提升项目(JSJY-Z2021D002)和太仓市重点研发计划项目(TC2018SF06)共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41977135), the Cultivated Land Quality Improvement Project of Xiangcheng District, Suzhou City, Jiangsu Province, China (No. ZYT2019-XC-G-010), the Cultivated Land Quality Improvement Project of Changshu City, Jiangsu Province, China (No. JSJY-Z2021D002) and the Key Research and Development Project of Taicang City, Jiangsu Province, China (No. TC2018SF06)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: pjhu@issas.ac.cn

作者简介: 涂峰(1997—), 男, 江西南昌人, 硕士研究生, 主要研究领域: 土壤污染修复。E-mail: 2220104949@qq.com

收稿日期: 2021-08-14; 收到修改稿日期: 2022-03-03; 网络首发日期(www.cnki.net): 2022-05-10

(1. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Taicang Agricultural Technology Extension Center, Taicang, Jiangsu 215400, China; 4. Changshu Cultivated Land Quality Protection Station, Changshu, Jiangsu 215500, China; 5. Xiangcheng District Modern Agricultural Development Center of Suzhou City, Suzhou, Jiangsu 215131, China; 6. Suzhou Cultivated Land Quality Protection Station, Suzhou, Jiangsu 215011, China; 7. Ecological Environment Monitoring & Supervising Co., Ltd. of Jiangsu Province, Nanjing 210019, China)

Abstract: 【Objective】 There are urgent requirements to solve the problem of cadmium (Cd) pollution in farmlands and rice. With the rapid economic development in Southern Jiangsu, Cd pollution in soil and rice caused by industrialization has significantly increased. The purpose of this study was to screen low-Cd-accumulating rice varieties from main cultivated varieties in Southern Jiangsu, and to deduce the local soil Cd threshold for the safe production of rice. 【Method】 In this study, field plot experiments and field investigation were conducted at different sites and years. Eighteen local main cultivated rice varieties in Southern Jiangsu were selected, including 15 Japonica conventional varieties: Wuyunjing 30 (WYJ30), Suxiangjing 100 (SXJ100), Changnongjing 10 (CNJ10), Nanjing 3908 (NJ3908), Nanjing 5055 (NJ5055), Changnongjing 12 (CNJ12), Nanjing 46 (NJ46), Changnongjing 11 (CNJ11), Jiahua 1 (JH1), Changxiangjing 1813 (CXJ1813), Changnongjing 8 (CNJ8), Wukejing 7375 (WKJ7375), Zaoxiangjing 1 (ZXJ1), Yangyujing 3 (YYJ3), Zhennuo 19 (ZN19), and 3 Japonica three-line hybrid varieties: Changyoujing 6 (CYJ6), Changyou 4 (CY4) and Changyoujing 11 (CYJ11). The differences of Cd bioconcentration factor (BCF) in rice grains among these varieties were comprehensively compared, and the soil Cd safety thresholds at different pH ranges were deduced using the species sensitivity distribution (SSD) method. 【Result】 The results showed that the order of grain Cd accumulation among tested varieties was consistent between field investigation and plot experiments. There were significant differences in Cd BCF among 18 main cultivated rice varieties, with a maximum difference of 4.7 times. The Cd accumulation in some varieties like NJ46 and NJ3908 was stably low. Based on the SSD method, the deduced safety thresholds of soil total Cd to protect 95% of rice varieties from exceeding the standard ($0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) (GB 2762-2017) under soil pH 5.0–6.5, 6.5–7.5 and 7.5–8.5 in southern Jiangsu were 0.52 , 0.80 and $1.78 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, which were higher than the current risk screening value (GB 15618-2018). It was verified that the deduced thresholds remarkably improved the accuracy of Cd risk prediction of rice in Southern Jiangsu. 【Conclusion】 Based on field plot experiments and field investigation, numerous local main cultivated rice varieties including NJ46 and NJ3908 were screened with stably low Cd accumulation capacity, stable yield and high quality, and therefore are suggested for cultivation in Cd contaminated paddy fields in Southern Jiangsu. The deduced local safety thresholds of soil total Cd to protect 95% of rice varieties from exceeding the standard were higher than the current risk screening value. The results have important implications for the safe utilization of Cd contaminated paddy fields in Southern Jiangsu.

Key words: Paddy soil; Cd; Low accumulating varieties; Soil pH; Safety threshold

随着工业化、城镇化和农业集约化快速推进,我国农田土壤重金属污染和农产品重金属超标风险日益严重,其中水稻镉(Cd)污染最受关注^[1-3]。解决农田土壤Cd污染及水稻Cd超标问题是国家和地方的重大需求^[4-5]。目前降低农产品重金属含量的措施很多,归结起来,一是从作物本身出发选择重金属积累性低的品种,二是通过外界调控手段减少重金属的根系吸收和向可食部分的转运^[6]。前者成本低、易推广,是减少污染土壤稻米Cd积累最经济有效的途径之一。该技术主要基于水稻品种之间基因型差异^[7-9],研究表明,一般情况下Cd积累性由

高到低依次为常规籼稻、杂交稻、常规粳稻^[10]。然而,水稻品种具有很强的气候和地域差异性,实际应用中,各地需要从适合本地气候和土壤且农户易接受的品种中进行筛选。水稻重金属积累性除受自身基因控制外,还受到土壤性质、污染程度、气温、降水、灌排水等各种环境因素的影响^[10-13],使得筛选难度变大,为此研究人员在提高单次试验精度的同时,通过设置参比品种、多年多点验证、温室盆栽与田间小区试验及大田调查相结合等方式,来尽量消除上述影响。

我国地域辽阔,气候、土壤、耕作方式、作物品

种等千差万别, 现行的《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[14], 难以对不同气候和不同土壤下水稻 Cd 污染进行有效控制^[15-16], 经常出现土壤超标而水稻不超标, 或土壤不超标而水稻超标的情况。研究建立地方或区域水稻达标生产的土壤 Cd 安全阈值, 对保护土壤环境质量和指导污染土壤安全利用均具有重要意义^[15]。物种敏感性分布法(species sensitivity distribution, SSD)是评价生态系统污染物阈值的常用方法, 该方法利用累积概率分布函数拟合污染物的毒理学数据, 建立其物种敏感性分布曲线, 依据不同的保护程度(风险水平)获取曲线上不同百分点所对应的危害浓度值(hazardous concentration, HC_p)作为基准值。该方法在土壤重金属安全阈值的研究方面也得到了广泛应用^[16]。

苏南地区是我国优质水稻主产区之一, 由于工业化、城市化和农业集约化的快速发展, 农田土壤受到 Cd 等重金属的污染, 对稻米质量产生一定影响^[17-18]。本文采用多年多点田间小区试验和大田调查相结合的方式, 比较了苏南地区 18 个主栽水稻品种对 Cd 的积累能力, 筛选出了 Cd 积累性较低且稳定的水稻品种, 并利用物种敏感性分布法推导出不同 pH 段下保护 95%水稻品种不超过国家食品安全标准的土壤 Cd 安全阈值。研究结果对指导苏南地区耕地质量保护和受污染耕地安全利用具有重要应用价值。

1 材料与方 法

1.1 研究区域概况

研究区域位于江苏省南部地区, 地势低平, 隶属长江三角洲平原地区和太湖平原地区, 属亚热带季风海洋性气候, 四季分明, 气候温和, 雨量充沛, 年均降水量 1 100 mm, 年均温 15.7℃, 1 月均温 2.5℃, 7 月均温 28℃。土地肥沃, 物产丰富, 自然条件优越, 农业发达, 广泛种植水稻、小麦、蔬菜、果品等。由于城乡工业发展, 土壤重金属污染情况日益严重, 尤其是 Cd 污染较为突出。

1.2 大田实地调查

根据土壤性质、Cd 污染程度及水稻品种分布, 2018 年 10 月和 2020 年 10 月水稻成熟季, 在研究

区共布设 161 个样点(31°23'N~31°42'N, 120°33'E~121°18'E), 协同采集土壤和水稻样品。共涉及水稻品种 10 个, 包括粳型常规稻 9 个: 武运粳 30 号、苏香粳 100、常农粳 10 号、南粳 3908、南粳 5055、常农粳 12 号、南粳 46、常农粳 11 号和嘉花 1 号, 粳型三系杂交稻 1 个: 常优粳 6 号。基本覆盖了苏南地区主栽的水稻品种。

1.3 小区试验设计

2019 年和 2020 年在苏南地区设置了 5 个试验点, 开展了不同水稻品种小区试验。各试验点土壤基本性质及试验品种信息见表 1。小区面积为 9 m²(3 m × 3 m), 小区间隔 0.5 m, 每个品种重复 3 个小区, 小区外围设置 0.5 m 以上的保护行。所有品种处理均按常规管理, 基肥施复合肥(N-P₂O₅-K₂O 比例为 15-15-15) 750 kg·hm⁻², 插秧 10 d 后追施尿素 150 kg·hm⁻²。水分管理: 前期淹水, 分蘖盛期晒田 5 d 左右, 后期采用干湿交替。病虫害防治及其他管理措施参照当地习惯。

方便起见, 本研究涉及的 18 个水稻品种, 包括粳型常规稻 15 个: 武运粳 30 号、苏香粳 100、常农粳 10 号、南粳 3908、南粳 5055、常农粳 12 号、南粳 46、常农粳 11 号、嘉花 1 号、常香粳 1813、常农粳 8 号、武科粳 7375、早香粳 1 号、扬育粳 3 号、镇糯 19 号, 粳型三系杂交稻 3 个: 常优粳 6 号、常优 4 号、常优粳 11 号, 分别缩写为 WYJ30、SXJ100、CNJ10、NJ3908、NJ5055、CNJ12、NJ46、CNJ11、JH1、CXJ1813、CNJ8、WKJ7375、ZXJ1、YYJ3、ZN19、CYJ6、CY4、CYJ11。

1.4 样品采集、处理与测定

大田调查和小区试验样品采集均采用梅花型布点法, 每个点位或小区用不锈钢土钻钻取 5~7 个 0~15 cm 土壤混合, 同时用不锈钢剪刀采集稻穗, 每个土壤样品不少于 500 g, 稻穗样品不少于 400 g。所有样品带回实验室进行处理与测定。土壤样品平铺自然风干后去除杂质, 研磨过 2 mm 的尼龙筛, 再取小部分土壤过 0.15 mm 尼龙筛。水稻样品用去离子水清洗后, 于 70℃下烘至恒重, 将稻穗脱粒、脱壳, 得到的糙米研磨粉碎。

土壤和稻米样品的测定参照《土壤农化分析》^[19]。土壤 pH 采用水土比 2.5:1 玻璃电极法测定。土壤采用优级纯 HCl-HNO₃(体积比 1:1) 消化, 糙米

采用优级纯 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ (体积比 3:1) 消化, 消化液 Cd 采用石墨炉原子吸收分光光度计 (Varian SpectraAA 220Z, 美国) 分析。采用国家标准参比物质 (土壤: GBW07405, 植物: GBW10045) 进行质量控制, 测定结果误差均在允许范围内。

1.5 数据统计分析

水稻糙米 Cd 生物富集系数通过以下公式计算:

$$\text{BCF}_i = \frac{C_{ig}}{C_{is}} \quad (1)$$

式中, BCF_i (bioconcentration factor) 为 i 品种的 Cd 富集系数, C_{ig} 、 C_{is} 分别表示 i 品种糙米和土壤中的 Cd 含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

为比较多年多点小区试验各水稻品种间的 Cd 积累性顺序, 以南粳 46 为基准, 计算各水稻品种相对积累指数, 公式如下:

$$\text{RAI}_i = \left(\sum_j^n \frac{C_{ij}}{C_{bj}} \right) / n \quad (2)$$

式中, RAI_i (relative accumulation index) 为 i 品种的相对积累指数平均值, 数值越低 Cd 积累性越低; C_{ij} 为 i 品种在第 j 年或 j 试验点糙米 Cd 平均含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_{bj} 为第 j 年或 j 试验点南粳 46 糙米 Cd 平均含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; n 为 i 品种小区试验总次数。

采用 SPSS 24 对大田调查和小区试验水稻品种 Cd 积累性进行系统聚类分析, 聚类方法采用组间链接, 平方欧氏距离测量区间。

土壤 Cd 安全阈值的推导方法: 分不同土壤 pH 范围, 将糙米生物富集系数取倒数 ($1/\text{BCF}$) 后按照递增的顺序排序, 采用 Burrlioz 2.0 (澳大利亚联

邦科学和工业研究组织) 中 Burr III 函数拟合 SSD 曲线, 得到不同百分点对应的浓度值 (hazardous concentration, HC_p), 取 5% 处所对应的 HC_5 , 即保护 95% 水稻品种, 代入糙米 Cd 国家食品卫生标准 (GB 2762-2017, $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) [20], 得到相应的土壤 Cd 安全阈值。Burr III 型函数的参数方程为:

$$y = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{b}{x} \right)^c \right]^k} \quad (3)$$

式中, y 为累积分布频率, x 为 $\frac{1}{\text{BCF}}$, b 、 c 、 k 为函数的 3 个参数。取 $y=5\%$, 得到的 x 即 HC_5 。

数据采用 Excel 2013 和 SPSS 24 进行分析, Origin 2021 绘图。不同品种间数据差异性采用最小显著性法 (LSD) 进行多重比较, 显著性水平为 0.05。

2 结果

2.1 大田实地调查结果及不同水稻品种糙米 Cd 积累性比较

本研究大田实地调查点位 161 个, 土壤 pH、全量 Cd 及糙米 Cd 的频率分布见图 1。可以看出, 土壤样品 pH 范围处于 5.0~8.5, 呈正态分布, 6.0~7.0 分布频率最高。土壤全量 Cd 浓度范围 0.11~2.67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 0.0~0.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的分布频率高, 大于 0.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的样本占比 47%, 大于 0.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的样本占比 13%。糙米 Cd 浓度范围 0.002~0.526 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 小于 0.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的分布频率高, 大于 0.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的样本占比 3%。

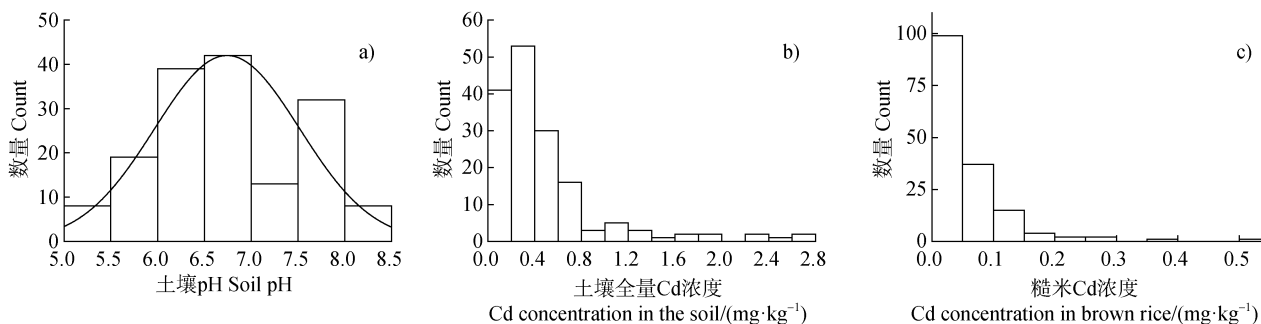
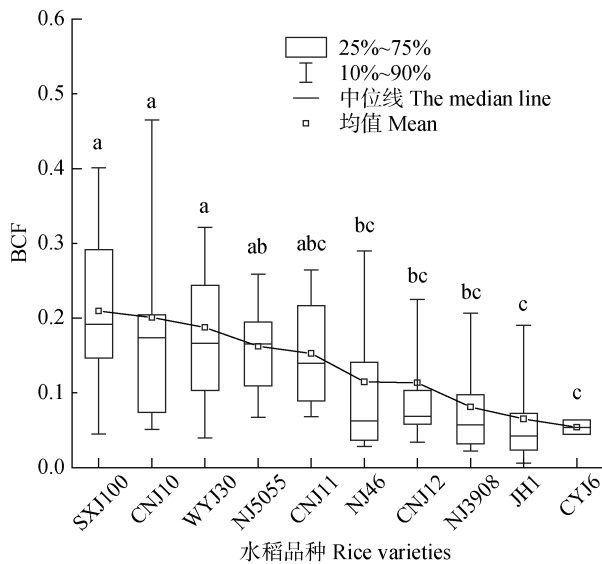


图 1 大田实地调查土壤 pH、全量 Cd 及糙米 Cd 频率分布

Fig. 1 The frequency distribution of pH and total Cd in soils and brown rice in field investigation

大田调查共涉及 10 个水稻品种,采用生物富集系数 BCF 比较不同水稻品种的 Cd 积累能力(图 2),BCF 越大,说明该品种水稻糙米对 Cd 的吸收能力越强,越容易富集 Cd。由图 2 可以看出,每个品种的 BCF 存在一定的变异,但不同品种间的 BCF 存在显著差异 ($P<0.05$),BCF 平均值中苏香粳 100 最大,为嘉花 1 号的 3.2 倍。嘉花 1 号、常优粳 6 号、南粳 3908、常农粳 12 号、南粳 46 五个品种的 BCF 平均值低于 0.1,南粳 5055、常农粳 10 号、常农粳 11 号三个品种的 BCF 介于 0.1~0.2 之间,苏香粳 100 和武运粳 30 号两个品种 BCF 介于 0.2~0.3 之间。



注:不同字母表示差异显著 ($P<0.05$),下同。品种从左到右依次为苏香粳 100、常农粳 10 号、武运粳 30、南粳 5055、常农粳 11 号、南粳 46、常农粳 12 号、南粳 3908、嘉花 1 号、常优粳 6 号。Note: Different letters indicate significant differences ($P<0.05$), the same below. The varieties from left to right are Suxiangjing 100, Changnongjing 10, Wuyunjing 30, Nanjing 5055, Changnongjing 11, Nanjing 46, Changnongjing 12, Nanjing 3908, Jiahua 1, Changyoujing 6.

图 2 大田实地调查不同水稻品种糙米 Cd 生物富集系数 (BCF)

Fig. 2 Bioconcentration factor (BCF) of Cd in brown rice of different varieties in field investigation

2.2 小区试验不同水稻品种糙米 Cd 积累性比较

2019 年和 2020 年,在 5 个试验区比较了不同品种水稻 Cd 积累性,共涉及 18 个品种(表 1)。试验区 A~D 土壤 pH 为 5.90~6.41,试验区 E 土壤 pH 为 8.02;试验区 A 和 B 土壤 Cd 含量分别为 1.70

和 $0.70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超出了现行土壤 Cd 风险筛选值(GB 15618-2018) [14],试验区 C、D、E 土壤 Cd 含量均小于 $0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均未超出风险筛选值。试验区 A 种植的 6 个水稻品种,糙米 Cd 含量介于 $0.130\sim 0.800 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,部分样品超出了 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的限量标准(GB 2762-2017) [20];试验区 B 种植的 5 个水稻品种,糙米 Cd 含量介于 $0.006\sim 0.242 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,部分超标;试验区 C 糙米 Cd 最大值 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,存在超标风险;试验区 D、E 各水稻品种糙米 Cd 均小于 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

由于 5 个试验区的土壤性质和 Cd 污染程度不同,为尽量消除年际间和不同试验区之间的影响,假定各品种的 Cd 积累性排序在不同年际和土壤性质间保持不变,将各品种糙米 Cd 与当地种植面积最大的南粳 46 糙米 Cd 相比,再取多年多点的平均值,作为该品种的糙米 Cd 相对积累指数 RAI,南粳 46 的 RAI 为 1,RAI 越大代表积累性越强,RAI 越小代表积累性越弱。由此得到多年多点不同水稻糙米 Cd 积累性的相对排序(图 3)。方差分析结果表明,扬育粳 3 号、常农粳 11 号、苏香粳 100、南粳 5055、常农粳 10 号 5 个品种 RAI 变异系数超过 30%,其余 10 个品种变异系数均低于 30%;不同品种间 RAI 存在显著差异 ($P<0.05$),最大值与最小值相差 4.5 倍。常香粳 1813 的积累性显著高于其他 17 个品种;南粳 3908、常农粳 10 号、常农粳 8 号、苏香粳 100、南粳 46、常农粳 11 号、常优 4 号、常农粳 12 号、常优粳 6 号、武科粳 7375、南粳 5055、扬育粳 3 号的糙米 Cd 相对积累指数无显著差异,均比较低;镇糯 19 号、武运粳 30 号、常优粳 11 号、早香粳 1 号之间差异不显著,但均显著低于常香粳 1813,而高于其他品种。

2.3 不同水稻品种糙米 Cd 积累性

将大田实地调查和试验区所有 18 个水稻品种糙米 Cd 的生物富集系数 BCF 进行综合统计和聚类分析得到图 4 和图 5。图 4 可看出,不同品种间 BCF 差异显著,武科粳 7375 的 BCF 最高,为 0.372,嘉花 1 号最低,为 0.079,两者相差 4.7 倍。各品种 BCF 从大到小依次为:武科粳 7375、常香粳 1813、苏香粳 100、镇糯 19 号、武运粳 30 号、常农粳 8 号、南粳 5055、早香粳 1 号、常农粳 10 号、扬育粳 3 号、常优 4 号、常农粳 11 号、南粳 46、常优粳 11 号、南粳 3908、常优粳 6 号、常农粳 12 号、

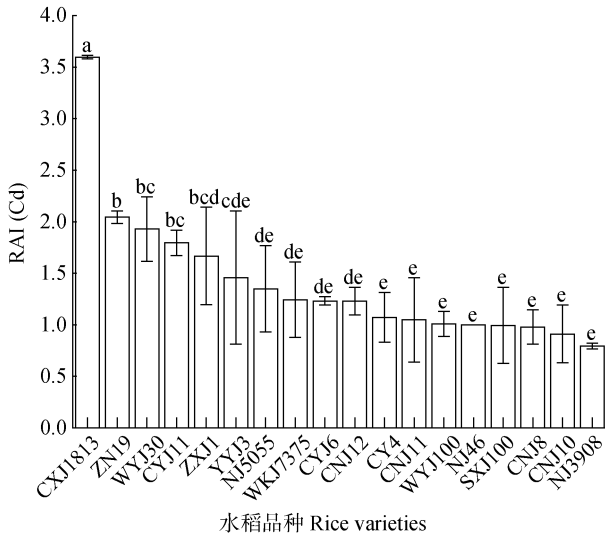
表 1 五个小区试验土壤和水稻信息

Table 1 Soil and rice information in five experimental sites

试验地点 Site	北纬 Latitude	东经 Longitude	土壤 pH Soil pH	土壤 Cd Soil Cd/ (mg·kg ⁻¹)	试验年份 Year	水稻品种数 Number of rice varieties	水稻品种名 Name of rice variety	糙米 Cd Grain Cd/ (mg·kg ⁻¹)
A	31.39	121.1	6.21	1.70	2019	6	NJ5055、NJ46、SXJ100、CNJ10、CNJ8、CY4	0.130~0.805
B	31.58	120.9	5.90	0.70	2019	5	NJ5055、NJ46、SXJ100、CNJ8、CY4	0.006~0.242
C	31.45	120.5	6.21	0.27	2020	8	NJ5055、NJ46、SXJ100、CNJ12、CYJ6、NJ3908、CNJ11、WKJ7375	0.020~0.200
D	31.45	120.5	6.41	0.18	2020	8	NJ5055、NJ46、CNJ12、WKJ7375、CXJ1813、YYJ3、ZXJ1、ZN19	0.012~0.097
E	31.53	120.6	8.02	0.10	2020	8	WYJ30、NJ46、SXJ100、CYJ6、NJ3908、CNJ11、WKJ7375、CYJ11	0.004~0.016

嘉花 1 号。这与单独的大田调查 (图 1) 及试验区 (图 3) 结果基本一致。也可以看出, 用 BCF (图 4)

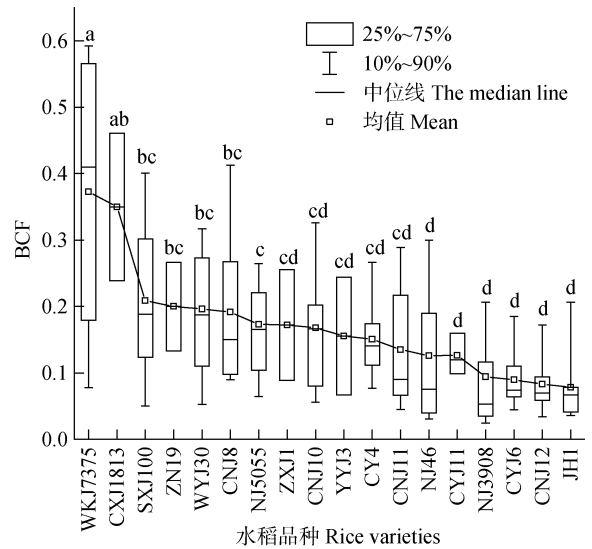
比较不同品种水稻糙米 Cd 积累性高低的变异性大于用 RAI 比较 (图 3)。



注: 数据为平均值 ± 标准差。品种从左到右依次为常香粳 1813、镇糯 19 号、武运粳 30 号、常优粳 11 号、早香粳 1 号、扬育粳 3 号、南粳 5055、武科粳 7375、常优粳 6 号、常农粳 12 号、常优 4 号、常农粳 11 号、南粳 46、苏香粳 100、常农粳 8 号、常农粳 10 号、南粳 3908。Note: Data are mean ± SD. The varieties from left to right are Changxiangjing 1813, Zhennuo 19, Wuyunjing 30, Changyoujing 11, Zaoliangjing 1, Yangyujing 3, Nanjing 5055, Wukeying 7375, Changyoujing 6, Changnongjing 12, Changyou 4, Changnongjing 11, Nanjing 46, Suxiangjing 100, Changnongjing 8, Changnongjing 10, Nanjing 3908.

图 3 五个试验区不同水稻品种糙米 Cd 相对积累指数 (RAI)

Fig. 3 The relative accumulation index (RAI) of Cd in brown rice of different varieties at five sites

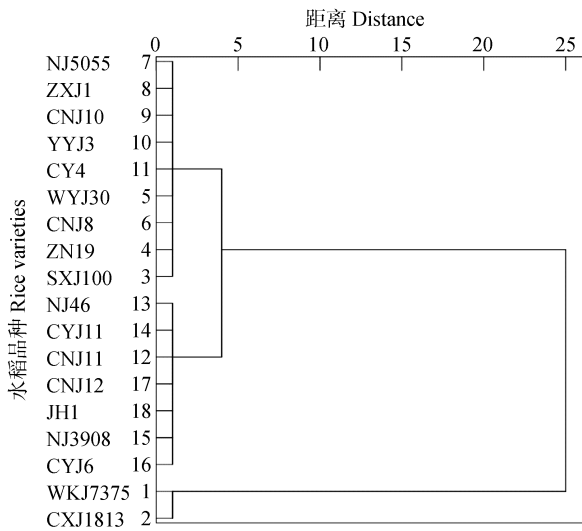


注: 品种从左到右依次为武科粳 7375、常香粳 1813、苏香粳 100、镇糯 19 号、武运粳 30 号、常农粳 8 号、南粳 5055、早香粳 1 号、常农粳 10 号、扬育粳 3 号、常优 4 号、常农粳 11 号、南粳 46、常优粳 11 号、南粳 3908、常优粳 6 号、常农粳 12 号、嘉花 1 号。Note: Varieties from left to right are Wukeying 7375, Changxiangjing 1813, Suxiangjing 100, Zhennuo 19, Wuyunjing 30, Changnongjing 8, Nanjing 5055, Zaoliangjing 1, Changnongjing 10, Yangyujing 3, Changyou 4, Changnongjing 11, Nanjing 46, Changyoujing 11, Nanjing 3908, Changyoujing 6, Changnongjing 12, Jiahua 1.

图 4 大田实地调查和 5 个试验区不同水稻品种糙米 Cd 生物富集系数综合比较

Fig. 4 Combined analysis of Cd BCF of brown rice of different rice varieties based on field investigation and five sites

聚类分析得到 3 类 (图 5): 常香粳 1813 和武科粳 7375 为第一类, 积累性最高; 苏香粳 100、镇糯 19 号、武运粳 30 号、常农粳 8 号、南粳 5055、早香粳 1 号、常农粳 10 号、扬育粳 3 号、常优 4 号, 这 9 个品种为第二类, 积累性次之; 其余 7 个品种为第三类, 包括嘉花 1 号、常农粳 12 号、常优粳 6 号、南粳 3908、常优粳 11 号、南粳 46、常农粳 11 号, 积累性最低。进一步通过对不同土壤 pH 段下各品种 Cd 积累稳定性的比较发现, 南粳 46 和南粳 3908 稳定性最好, 详见 2.5 小节。



注: 品种从上到下依次为南粳 5055、早香粳 1 号、常农粳 10 号、扬育粳 3 号、常优 4 号、武运粳 30 号、常农粳 8 号、镇糯 19 号、苏香粳 100、南粳 46、常优粳 11 号、常农粳 11 号、常农粳 12 号、嘉花 1 号、南粳 3908、常优粳 6 号、武科粳 7375、常香粳 1813。Note: The varieties from top to bottom are Nanjing 5055, Zaixiangjing 1, Changnongjing 10, Yangyujing 3, Changyou 4, Wuyunjing 30, Changnongjing 8, Zhennuo 19, Suxiangjing 100, Nanjing 46, Changyoujing 11, Changnongjing 11, Changnongjing 12, Jiahua 1, Nanjing 3908, Changyoujing 6, Wukejing 7375, Changxiangjing 1813.

图 5 不同水稻品种糙米 Cd 积累能力聚类分析

Fig. 5 Cluster analysis of Cd accumulation capacity in brown rice of different rice varieties

2.4 土壤 Cd 与糙米 Cd 之间的线性拟合

大田实地调查和试验区总样品数为 258 对, 土壤 pH 介于 5.0 到 8.5 之间, 将其分为三区间, 酸性 5.0~6.5, 中性 6.5~7.5, 碱性 7.5~8.5, 并将各 pH 段的土壤 Cd 与糙米 Cd 分别进行线性拟合 (图 6)。结果表明, 在土壤 pH 为 5.0~6.5 和 7.5~8.5 的情况下, 糙米 Cd 浓度与土壤 Cd 浓度相关性较高, R^2

分别为 0.616 和 0.797; 在 pH 为 6.5~7.5 的情况下, 糙米 Cd 浓度与土壤 Cd 浓度相关性较低, R^2 为 0.187。总体而言, 酸性土壤拟合方程的斜率要远大于中碱性土壤, 即随着 pH 的下降, 糙米 Cd 浓度随着土壤 Cd 浓度上升的速率在提高, 说明土壤酸化会促进水稻对 Cd 的吸收。

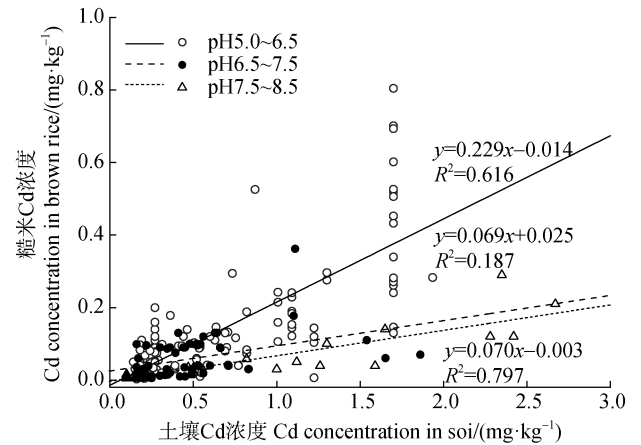


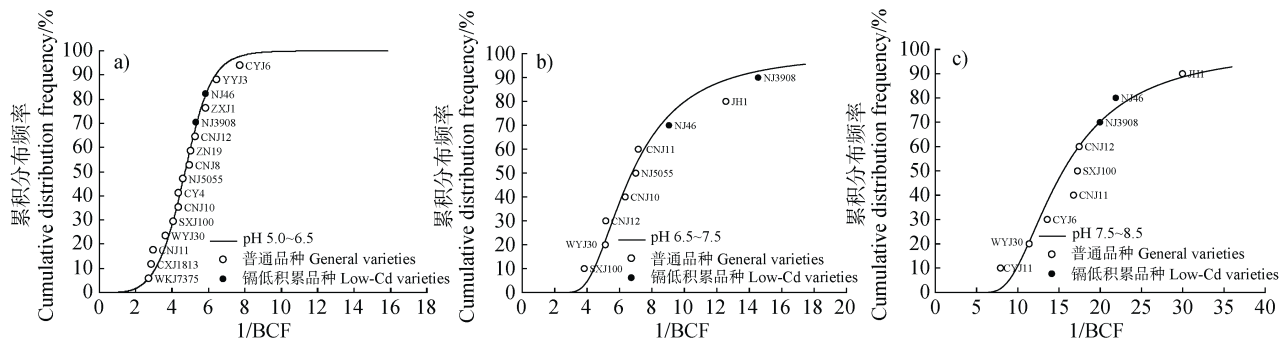
图 6 土壤 Cd 与糙米 Cd 相关性

Fig. 6 Correlation between soil Cd and brown rice Cd

2.5 苏南地区水稻达标生产的土壤 Cd 安全阈值

将大田实地调查和试验区的 258 对样品, 按土壤 pH 分为三个区间: 酸性 5.0~6.5、中性 6.5~7.5、碱性 7.5~8.5, 将各区间包含的水稻品种糙米 BCF 倒数的平均值输入 BurrliOZ 软件进行 Burr III 模型计算, 得到不同品种水稻的 SSD 曲线 (图 7), 通过计算, 得到土壤 pH 为 5.0~6.5、6.5~7.5、7.5~8.5 下, 5% 累积分布频率对应的 $1/BCF$ 分别为 2.6、4.0、8.9, 代入水稻糙米 Cd 限量标准 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 得到土壤 Cd 安全阈值 HC_5 分别为 0.52 、 0.80 、 $1.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

此外, 图 7 也展示了各品种在不同土壤 pH 下的积累性排序, 可以看出, 在上述分析积累性较低的几个品种中, 南粳 46、南粳 3908 两个品种, 在酸性、中性、碱性三个 pH 段的积累性均较低; 嘉花 1 号在中性和碱性条件积累性均较低; 常农粳 12 号在三个 pH 段的积累性处于中等或中等偏低水平; 常优粳 6 号在酸性条件积累性低, 而在碱性条件下积累性中等; 常农粳 11 号在中性和碱性条件积累性中等, 而在酸性条件较高。因此, 在考虑下土壤 pH 情况下, 南粳 46 和南粳 3908 的表现最稳定。



注: 1/BCF 为生物富集系数的倒数。品种为南粳 5055、早香粳 1 号、常农粳 10 号、扬育粳 3 号、常优 4 号、武运粳 30 号、常农粳 8 号、镇糯 19 号、苏香粳 100、南粳 46、常优粳 11 号、常农粳 11 号、常农粳 12 号、嘉花 1 号、南粳 3908、常优粳 6 号、武科粳 7375、常香粳 1813。Note: 1/BCF is the inverse of the bioconcentration factor. The varieties are Nanjing 5055, Zaoxiangjing 1, Changnongjing 10, Yangyujing 3, Changyou 4, Wuyunjing 30, Changnongjing 8, Zhennuo 19, Suxiangjing 100, Nanjing 46, Changyoujing 11, Changnongjing 11, Changnongjing 12, Jiahua 1, Nanjing 3908, Changyoujing 6, Wuhejing 7375, Changxiangjing 1813.

图 7 三个 pH 区间不同水稻品种糙米 Cd 富集系数的物种敏感性分布法 (SSD) 曲线 (a: pH 5.0~6.5, b: 6.5~7.5, c: 7.5~8.5)

Fig. 7 Species sensitivity distribution (SSD) curves of reciprocal BCF of brown rice Cd in different rice varieties at three pH ranges (a: pH 5.0~6.5, b: 6.5~7.5, c: 7.5~8.5)

3 讨论

重金属低积累水稻品种筛选与应用是当前受污染耕地安全利用的重要措施之一, 建立地方或区域特定耕作方式或农作物达标生产的土壤重金属安全阈值是保护农田土壤环境、精准管控污染风险的内在要求。本研究通过多年多点试验区及大田调查的方法, 基本覆盖了苏南地区土壤性质、pH 范围、Cd 污染情况和主栽水稻品种, 同时代表了苏南地区实际的耕作习惯及气候特征等, 在此基础上筛选出适合当地种植的 Cd 低积累品种, 并推导苏南地区水稻达标生产的土壤 Cd 安全阈值。

已有的研究表明, 不同水稻品种间 Cd 积累量差异较大, 日本学者盆栽试验发现 35 个水稻品种籽粒 Cd 含量差异 5 倍~23 倍^[21], 王天抗等^[22]通过田间试验对 275 份水稻材料进行籽粒 Cd 含量比较, 发现珞红 3A、珞红 4A 的籽粒 Cd 含量分别为 0.01 和 0.03 mg·kg⁻¹, 而其他 273 份材料的籽粒 Cd 含量范围为 0.16~1.92 mg·kg⁻¹, 相差 12 倍。本研究中大田实地调查不同品种间糙米 Cd 生物富集系数 BCF 相差 3.2 倍, 小区试验 Cd 相对积累指数 RAI 相差 4.5 倍, 而大田实地调查和小区试验综合后 Cd 的 BCF 相差 4.7 倍 (图 4), 这说明在苏南地区的主栽品种中, Cd 积累性存在差异。苏南地区水稻品种

以常规粳稻为主, 杂交稻为辅。本研究所用的 18 个水稻品种均为当地实际种植的品种, 其中常优 4 号、常优粳 6 号、常优粳 11 号 3 个品种为粳型杂交稻, 其余 15 个品种均为常规粳稻。有研究表明, Cd 积累性由高到低通常依次为籼稻、杂交稻、粳稻^[10], 通过盆栽试验对江苏省 12 个水稻品种的研究也发现 Cd 积累性为籼型杂交稻显著高于粳型常规稻和粳型杂交稻^[23]。本研究中 3 个杂交稻的 Cd 积累性总体处于中等和较低的水平 (图 4), 可能是因为所用的杂交稻品种数量较少。

通过大田实地调查和小区试验综合比较 (图 4, 图 5), 得到南粳 46、常优粳 11 号、南粳 3908、常优粳 6 号、常农粳 12 号、常农粳 11 号、嘉花 1 号等品种 Cd 积累性较低, 其中又以南粳 46 的实际推广面积最大。而苏香粳 100、镇糯 19 号、武运粳 30 号、常农粳 8 号、南粳 5055、早香粳 1 号、常农粳 10 号、扬育粳 3 号、常优 4 号等品种 Cd 积累性居中, 常香粳 1813 和武科粳 7375 的积累性最高。考虑土壤 pH 情况下, 上述积累性较低的品种中, 南粳 46 和南粳 3908 在酸性、中性、碱性土壤上均表现出低积累性特性且稳定性最好 (图 7)。因此, 建议在苏南地区 Cd 污染农田上, 选择南粳 46、南粳 3908 等 Cd 低积累且稳产、优质的水稻品种, 以降低水稻 Cd 积累风险。

土壤性质、气候特征、耕作习惯等不同, 导致土壤 Cd 的安全阈值也会不同^[24], 因此对于不同的区域, 需要因地制宜地设置土壤阈值, 阈值过于严格会影响正常的作物生产, 过于宽松会影响居民的身体健康。本研究发现(图 6), pH 5.0~6.5 及 7.5~8.5 时, 糙米 Cd 与土壤 Cd 总量之间符合线性关系, 拟合方程分别为 $y=0.229x-0.014$ ($R^2=0.616$) 和 $y=0.070x+0.025$ ($R^2=0.797$), 代入现行的风险筛选值, 糙米 Cd 浓度均低于 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的限值。这说明现行的 Cd 风险筛选值对于苏南地区的水稻过于严格。

本研究基于物种敏感性分布法 SSD, 建立不同土壤 pH 条件水稻品种安全生产的土壤全量 Cd 浓度阈值。土壤 pH 为 5.0~6.5、6.5~7.5、7.5~8.5 下, 土壤 Cd 安全阈值 HC_5 分别为 0.52、0.80、 $1.78 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 2), 这些值均高于现行《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)^[14]中水田的风险筛选值, 更高于其他(如水旱轮作)种植类型的风险筛选值。郑倩倩等^[23]通过盆栽实验拟合 12 个江苏水稻品种的 SSD 曲线, 推导出在 pH 为 5.7 和 pH 为 7.15 的黏泥土和乌栅土上保护 95% 的水稻品种糙米不超标的土壤全量 Cd 安全阈值分别为 $0.78 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 同样高于 GB 15618-2018^[14]。本研究推导的阈值可提高水稻 Cd 风险预测的准确性。以大田调查的 161 个点位为例, 按现行水田风险筛选值, 土壤 pH 5.0~6.5、6.5~7.5、7.5~8.5 下, 土壤超标而糙米不超标的样点分别有 20、11、11 个, 而按本研究推导的阈值, 分别降低至 13、6、4 个, 准确性明显提升。

苏南地区水稻安全生产土壤 Cd 阈值较高可能与土壤、气候、耕作习惯等有关。该地区多年推行秸秆还田、有机肥替代等措施, 使得土壤有机质含量总体较高^[25-27], 连续的水稻种植, 使得土壤黏性较强, 而且 6—10 月水稻生长期正值全年的雨季, 加上灌溉设施比较完备, 水源充足, 田面可以保持淹水或湿润状态, 这均有利于降低土壤 Cd 的有效性^[28-30]。此外又以 Cd 积累性较低的粳稻为主, 综合上述因素, 均降低了水稻 Cd 积累和超标风险。需要指出的是, 苏南地区以稻麦轮作为主, 制定土壤 Cd 阈值时还需要考虑小麦等作物的风险。

表 2 苏南地区种植水稻的土壤 Cd 阈值比较

Table 2 Comparison of soil Cd threshold for rice planting in Southern Jiangsu/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

土壤 pH Soil pH	5.0~6.5	6.5~7.5	7.5~8.5
本研究推导的 Cd 阈值 ^①	0.52	0.80	1.78
GB 15618-2018 水田 ^②	0.40 (pH 5.5~6.5)	0.60	0.80 (pH>7.5)
GB 15618-2018 其他 ^③	0.30 (pH 5.5~6.5)	0.30	0.60 (pH>7.5)

①Cd thresholds derived in this study, ②Paddy field, ③Others.

4 结 论

本研究通过多年多点的田间小区试验和大田实地调查, 筛选出南粳 46、南粳 3908 等 Cd 低积累且稳产、优质的水稻品种。同时, 利用物种敏感性分布法, 推导出苏南地区土壤 pH 5.0~6.5、6.5~7.5、7.5~8.5 下, 保护 95% 水稻品种糙米 Cd 不超标的土壤全量 Cd 安全阈值分别为 0.52、0.80、 $1.78 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。建议苏南地区参考该阈值, 并在 Cd 污染稻田上优先种植上述水稻品种, 以降低水稻 Cd 积累风险。

参考文献 (References)

- [1] Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. Report on the national general survey of soil contamination[R]. [2014-04-17]. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670_wh.htm. [环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. [2014-04-17]. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670_wh.htm.]
- [2] Huang Y, Wang L Y, Wang W J, et al. Current status of agricultural soil pollution by heavy metals in China: A meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2019, 651: 3034—3042.
- [3] Zhang L Y, Li L Q, Pan G X. Variation of Cd, Zn and Se contents of polished rice and the potential health risk for subsistence-diet farmers from typical areas of South China[J]. Environmental Science, 2009, 30 (9): 2792—2797. [张良运, 李恋卿, 潘根兴. 南方典型产地大米 Cd、Zn、Se 含量变异及其健康风险探讨[J]. 环境科学, 2009, 30 (9): 2792—2797.]
- [4] Chen W P, Yang Y, Xie T, et al. Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55

- (2): 261—272. [陈卫平, 杨阳, 谢天, 等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 261—272.]
- [5] Luo Y M, Teng Y. Research progresses and prospects on soil pollution and remediation in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(5): 1137—1142. [骆永明, 滕应. 中国土壤污染与修复科技研究进展和展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1137—1142.]
- [6] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(2): 750—759.
- [7] Römkens P F, Guo H Y, Chu C L, et al. Prediction of cadmium uptake by brown rice and derivation of soil-plant transfer models to improve soil protection guidelines[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(8/9): 2435—2444.
- [8] Zhao W J, Li Y C, Li X X, et al. Stability of cadmium accumulation and genetic similarity analysis in low-accumulation rice resources[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2020, 21(4): 819—826. [赵文锦, 黎用朝, 李小湘, 等. 镉低积累水稻资源的镉积累稳定性及遗传相似性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2020, 21(4): 819—826.]
- [9] Liu W T, Zhou Q X. Selection and breeding of heavy metal pollution-safe cultivars[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(6): 1452—1458. [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, 19(6): 1452—1458.]
- [10] Duan G L, Shao G S, Tang Z, et al. Genotypic and environmental variations in grain cadmium and arsenic concentrations among a panel of high yielding rice cultivars[J]. *Rice*, 2017, 10(1): 9.
- [11] Chen H P, Wang P, Gu Y, et al. The within-field spatial variation in rice grain Cd concentration is determined by soil redox status and pH during grain filling[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 261: 114151.
- [12] Ge L Q, Cang L, Liu H, et al. Effects of warming on uptake and translocation of cadmium (Cd) and copper (Cu) in a contaminated soil-rice system under Free Air Temperature Increase (FATI) [J]. *Chemosphere*, 2016, 155: 1—8.
- [13] Cao F B, Wang R F, Cheng W D, et al. Genotypic and environmental variation in cadmium, chromium, lead and copper in rice and approaches for reducing the accumulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 496: 275—281.
- [14] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Soil environmental quality-Risk control standard for soil contamination of agricultural land: GB15618—2018[S]. Beijing: China Standard Press, 2018. [生态环境部. 土壤环境质量—农用地土壤污染风险管控标准: GB 15618—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.]
- [15] Luo Y M, Teng Y. Regional difference in soil pollution and strategy of soil zonal governance and remediation in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 145—152. [骆永明, 滕应. 我国土壤污染的区域差异与分区治理修复策略[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 145—152.]
- [16] Sun C, Chen S B, Ma Y B, et al. Ecological hazard concentration (HC₅) of cadmium (Cd) to rice cultivars under hydroponic culture as determined with species sensitivity distribution model (Burr-III) [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(12): 2316—2322. [孙聪, 陈世宝, 马义兵, 等. 基于物种敏感性分布 (Burr-III) 模型预测 Cd 对水稻毒害的生态风险阈值 HC₅[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2316—2322.]
- [17] Pan Y M, Liao Q L, Hua M, et al. An evaluation of the heavy metal content in the plough layer and crops in southern Jiangsu Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, 38(2): 318—324. [潘永敏, 廖启林, 华明, 等. 江苏南部典型地区耕作层土壤及农作物中重金属评价[J]. 物探与化探, 2014, 38(2): 318—324.]
- [18] Qi Y B, Huang B, Yang Y F, et al. Heavy metal accumulation characteristics and risk assessment of rice grain in different regions of Suzhou City, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(4): 659—665. [齐雁冰, 黄标, 杨玉峰, 等. 苏州市不同区域水稻籽粒重金属积累特征与健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(4): 659—665.]
- [19] Bao S D. Analysis for soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [20] National Health and Family Planning Commission of China, China Food and Drug Administration. National food safety standard: Maximum levels of contaminants in food: GB2762—2017[S]. Beijing: China Standard Press, 2017. [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. 食品安全国家标准—食品中污染物限量: GB2762—2017. [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.]
- [21] Arao T, Ae N. Genotypic variations in cadmium levels of rice grain[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2003, 49(4): 473—479.
- [22] Wang T K, Li Y X, Song S F, et al. Excavation of rice resources with low cadmium accumulation in grains and development of new materials[J]. *Hybrid Rice*, 2021, 36(1): 68—74. [王天抗, 李懿星, 宋书锋, 等. 水稻籽粒镉低积累资源挖掘及其新材料创制[J]. 杂交水稻, 2021, 36(1): 68—74.]
- [23] Zheng Q Q, Wang X X, Ding C F. Food safety thresholds

- of cadmium in two typical paddy soils of Jiangsu Province based on species sensitivity distribution[J]. *Soils*, 2019, 51 (3): 557—565. [郑倩倩, 王兴祥, 丁昌峰. 基于物种敏感性分布的江苏省典型水稻土 Cd 安全阈值研究[J]. *土壤*, 2019, 51 (3): 557—565.]
- [24] Zhou D M, Wang Y J, Chen H M. Independence and dependence of soil environmental quality standard for heavy metals[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33 (2): 205—216. [周东美, 王玉军, 陈怀满. 论土壤环境质量重金属标准的独立性与依存性[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33 (2): 205—216.]
- [25] Xue Y F, Chen X H, Zhang L, et al. Straw returning and comprehensive supporting technology in Jiangsu Province [J]. *Agriculture Machinery Technology Extension*, 2015 (8): 37—38. [薛艳凤, 陈新华, 张璐, 等. 江苏秸秆还田及综合配套技术日趋完善[J]. *农机科技推广*, 2015 (8): 37—38.]
- [26] Lao X R, Sun W H, Wang Z, et al. Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 (4): 618—623. [劳秀荣, 孙伟红, 王真, 等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J]. *土壤学报*, 2003, 40 (4): 618—623.]
- [27] Li Y B, Li P, Wang S H, et al. Effects of organic fertilizer application in rice-wheat rotation system on crop yield and soil properties: A meta-analysis[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32 (9): 3231—3239. [李圆宾, 李鹏, 王舒华, 等. 稻麦轮作体系下有机肥施用对作物产量和土壤性质影响的整合分析[J]. *应用生态学报*, 2021, 32 (9): 3231—3239.]
- [28] Hu P J, Ouyang Y N, Wu L H, et al. Effects of water management on arsenic and cadmium speciation and accumulation in an upland rice cultivar[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 27 (1): 225—231.
- [29] Zhu D M, Liu Y, Zhang L, et al. Effects of pH, Eh, Fe, and flooded time on available-Cd content after flooding of different kinds of soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36 (8): 1508—1517. [朱丹妹, 刘岩, 张丽, 等. 不同类型土壤淹水对 pH、Eh、Fe 及有效态 Cd 含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36 (8): 1508—1517.]
- [30] Wang J, Wang P M, Gu Y, et al. Iron-manganese (oxyhydro) oxides, rather than oxidation of sulfides, determine mobilization of Cd during soil drainage in paddy soil systems[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53 (5): 2500—2508.

(责任编辑: 陈荣府)