

土壤镉食品卫生安全阈值影响因素及预测模型

——以长沙某地水稻土为例*

和君强 贺前锋[†] 刘代欢[†] 黄放 唐春敏

(湖南永清环保研究院有限责任公司, 长沙 410330)

摘要 镉(Cd)是我国农田土壤首要污染物,在南方一些地区稻米Cd超标严重,土壤Cd风险评估十分必要。采用长沙某地稻田土壤—糙米Cd点对点数据,通过生物富集系数(BCF)和Burr-III物种敏感性分布(SSD)方程,构建了基于稻米食品卫生标准(GB2762-2012)和保护95%稻米品种的土壤Cd限值(HC₅),探讨了HC₅与土壤性质参数的量化关系和预测模型,并与我国土壤环境质量标准(GB15618-1995/2008)进行了比较。结果表明,pH、有机质(OM)和土壤全镉(TCd)对HC₅影响显著,分别可控制HC₅变异的62.2%、19.4%和18.3%。基于土壤pH和OM(TCd)的两因子模型能对HC₅较为准确地预测,决定系数 R^2 可达0.817(0.802)。土壤pH、TCd与HC₅呈正相关,而OM与之呈负相关。随着数值的增大,TCd和OM对HC₅的影响降低,而pH影响相对稳定。本研究可为科学合理地进行稻田土壤风险管控及产地土壤环境质量基准研究提供一定依据。

关键词 镉;食品安全阈值;生物富集系数;土壤性质;预测模型

中图分类号 X825 **文献标识码** A

土壤重金属环境风险按类型可分为两类,其一为生态风险,主要对陆地生物及关键的土壤生态功能造成危害,如铜(Cu)和镍(Ni)等;另一类为健康风险,主要对人体健康造成损害,如镉(Cd)和铅(Pb)等。Cd为农田土壤最优先控制元素之一,迁移活跃,且有较大生物毒性^[1]。土壤是农作物生产的基础,土壤污染与农产品安全乃至人体健康息息相关。水稻作为易吸收Cd的作物之一,全国65%以上的人口以稻米为主食。在我国南方局部区域,受品种和土壤酸化等影响,稻米Cd超标风险十分严峻。据统计,我国2%~13%的稻米样品Cd含量超过0.2 mg kg⁻¹的安全限值^[2-3],在湖南某市市售大米Cd超标率甚至高达46%($n=100$)^[4],由此可见,植稻土壤Cd安全风险

控制与预警十分必要。研究显示,食物链途径是农田土壤Cd污染健康风险评估的关键环节^[5-6]。我国现有的土壤环境质量标准是基于总量控制原则,在参考国外基准基础上,由生态环境效应推导的基于不同土地利用类型和pH的分段污染物限值。在实际应用中已暴露出“土壤Cd超标(不超标),农产品Cd不超标(超标)”等问题^[7],不利于实现对土壤中Cd食物链安全风险的准确识别和科学评价。

土壤农产品安全阈值是保障生产的食品安全的土壤中污染物含量限值。近年来,我国虽在土壤重金属农产品安全阈值领域开展了一些工作^[8],但基础理论和系统性研究相对缺乏^[9]。目前,土壤污染物风险阈值确定方法中最常用的是物种敏感性

* 国家重点研发计划项目(2016YFD0800700)、湖南省青年基金项目(2017JJ3227)和湖南省科技计划项目(2016TP1024)共同资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFD0800700), the Youth Foundation Project of Hunan Province (No.2017JJ3227) and the Planned Science and Technology Project of Hunan Province, China (No. 2016TP1024)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: 78087666@qq.com; 36882233@qq.com

作者简介: 和君强(1991—),山西孝义人,硕士,工程师,研究方向为农业环境修复与评估。E-mail: 365155513@qq.com

收稿日期: 2017-03-30; 收到修改稿日期: 2017-06-05; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-06-14

分布法 (Species sensitivity distribution, SSD), 该方法假设生态系统中不同物种对某一污染物的敏感性能被一个累积概率分布曲线描述, 依据不同的保护程度, 获取曲线上不同百分点所对应的浓度值作为基准值, 其中农业用地常选取5%毒害浓度 (Hazardous concentration, HC_5), 即保护95%生物物种的限量值, 这一阈值推导过程综合考虑了物种敏感性、土壤性质和生物有效性等因素的差异, 具有科学性、基础性和区域性的特点^[10-11]。对于稻田土壤-植物系统, 土壤Cd通过食物链对人体的危害程度取决于稻米Cd含量。通过实验室分析获取稻米Cd含量既费时又耗费庞大资金, 所以, 通常基于大量的实验数据和统计分析, 通过构建数学模型进行估算^[12], 其核心为从土壤至食物的富集系数 (Bioconcentration factors, BCF) 这一经验因子^[13], 在国际上, BCF值也常作为评估污染物植物有效性和品种差异的一项重要参数^[14]。目前, 将SSD法用于稻田土壤中Cd健康风险评价及农产品安全阈值的研究尚鲜有报道。

当前, 土壤Cd农产品安全阈值研究大多基于温室盆栽试验, 基于大田试验的研究较少。本研究拟应用长沙某地稻田土壤-植株Cd点对点数据, 构建基于水稻生物富集系数与显著影响稻米Cd吸收的土壤性质因子 (pH、有机质 (OM) 与全镉 (TCd)) 的多元回归模型; 对数据变量进行归一化处理, 利用Burr-III模型计算不同品种水稻对土壤Cd的富集效应敏感性分布频次, 推导出基于保护研究区95%水稻品种和稻米食品卫生标准的土壤中Cd的 HC_5 值; 探讨了 HC_5 与土壤性质参数的量化关系和预测模型, 并与我国现行土壤环境质量二级标准进行了比较, 以期为农产品产地土壤环境质量基准和膳食暴露途径风险评估研究提供一定参考和依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为湖南省长沙市辖区, 地处湘中东北部, 湘江下游两岸。全区现辖白箬铺、靖港和乔口等5镇, 乌山、铜官、丁字湾等10个街道, 新康1个乡, 位于 $112^{\circ}35'48'' \sim 113^{\circ}02'30''E$ 和 $27^{\circ}58'28'' \sim 28^{\circ}33'45''N$ 之间。属中亚热带季风湿润气候, 年平均气温 $17^{\circ}C$, 降水量 $1\ 370\ mm$, 日照

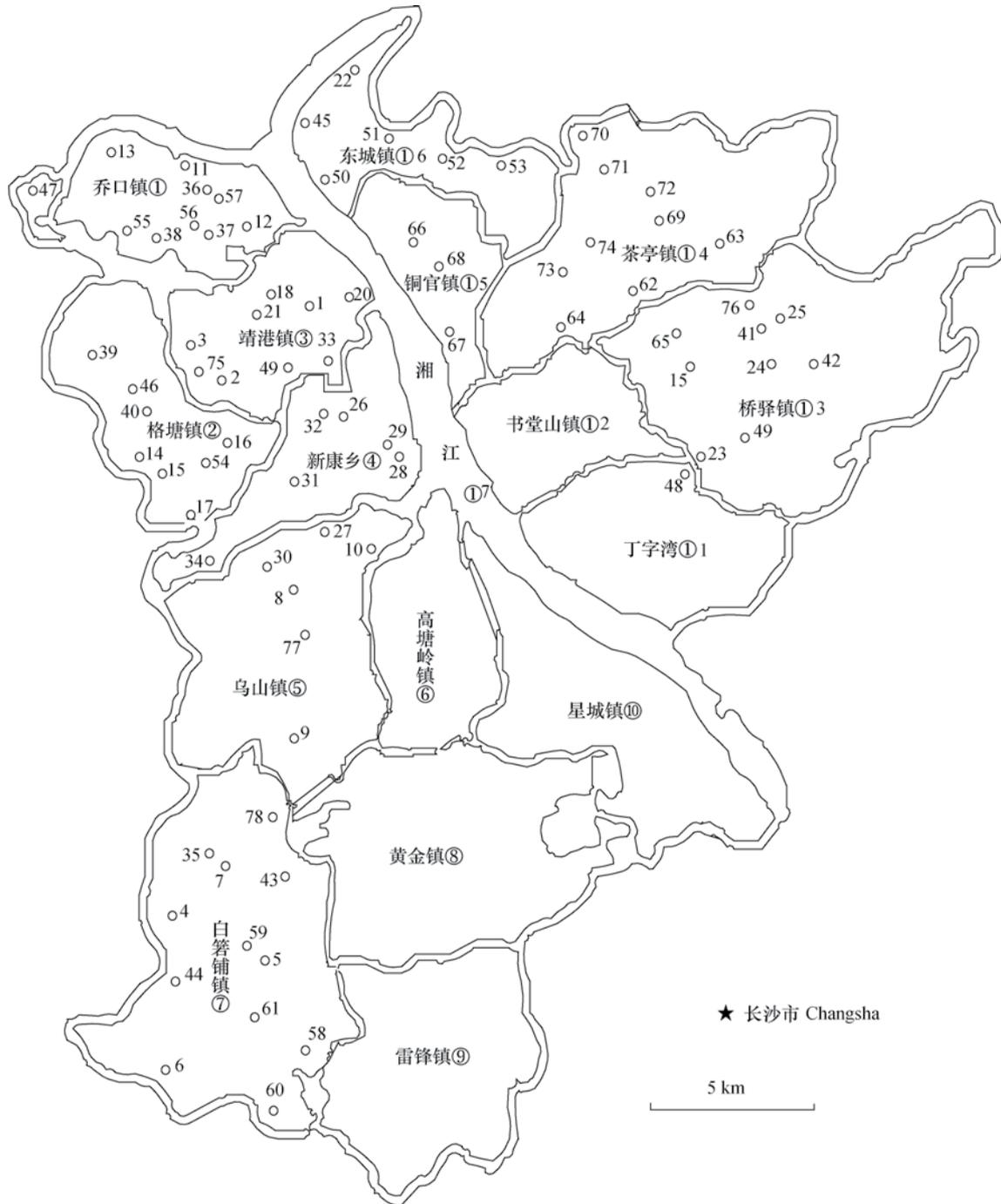
$1\ 610\ h$, 无霜期 $274\ d$ 。典型的农业种植模式为稻-稻轮作。研究区土壤种类繁多, 其中, 黏性湿润富铁土 (红壤) 面积占土地总面积的52.1%, 其次为筒育/潜育水耕人为土 (水稻土), 占土地总面积的25.2%, 淡色潮湿锥形土 (潮土) 占土地总面积的15.7%, 其他零星分布有紫色常湿锥形土 (紫色土)、铝质湿润淋溶土 (山地黄壤)、肥熟旱耕人为土 (菜园土) 和铁质湿润淋溶土 (黄棕壤) 等。研究区主要成土母质为第四纪红土, 其次为石英砂岩和花岗石, 间或有紫色页岩、板页岩和湖中沉积物等。供试区稻田土壤主要以中低度Cd污染为主, 详见2.1。

1.2 样点分布与采集

在研究区采集早稻糙米样品78份, 以及其对应的表层 (0~20cm) 土壤, 样点涵盖5乡镇78个村组, 包括15个早稻品种 (矮子稻、金优974、陵两优211、湘早籼11号、湘早籼13号、湘早籼143、湘早籼24号、湘早籼26号、湘早籼31号、湘早籼32号、湘早籼45号、湘早籼7号、中嘉早17、株两优02和株两优819), 采集时间为2015年5月25—26日, 具体样点位置见图1。

1.3 试验方法

1.3.1 土壤及稻米指标测定 土壤样品经自然风干后分别过10目和100目尼龙筛, 检测土壤pH、OM、TCd和汞 (Hg)、铅 (Pb)、砷 (As)、铬 (Cr) 总量。收获后的水稻籽粒经去离子水反复冲洗干净, $70^{\circ}C$ 烘干, 粉碎并检测Cd、Hg、Pb、As和Cr含量。pH (水土比2.5:1) 采用酸度计 (PHS-3C, 上海仪电科学仪器股份有限公司) 测定。土壤有机质采用水合热重铬酸钾氧化-比色法测定^[15]。土壤和稻米中重金属含量测定方法参照国家标准方法^[16-19]。土壤样品经 HNO_3 -HF- $HClO_4$ 混合酸消化, 稻米样品经 HNO_3 - $HClO_4$ 混合酸消化, 消解液中Cd、Pb及Cr采用赛默飞电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, Element 2/XR, 德国) 测定, Hg、As采用双道原子荧光光度计 (APS-230E, 北京海光仪器有限公司) 检测。样品中重金属测定过程中采用国家标准样品作为内标进行质量控制, 土壤和稻米标样分别选取GBW07406 (GSS-6) 和GBW10045 (GSB-23), 每测定10个样品插入一个内标, 要求回收率90%以上。土壤Cd环境质量评价参考文献 [20-21] 二级标准, 稻米Cd质量评价参考文献 [22]。内梅罗综合污染指



注：图中1~78代表具体的样点位置 Note: The digits from 1 to 78 in the figure are serial numbers of the locations of sampling sites; ①Qiaokou Town, ②Jinggang Town, ③Getang Town, ④Xinkang Town, ⑤Wushan Town, ⑥Gaotangling Town, ⑦Bairuopu Town, ⑧Huangjin Town, ⑨Xingcheng Town, ⑩Leifeng Town, ⑪Dongcheng Town, ⑫Tongguan Town, ⑬Chating Town, ⑭Shutangshan Town, ⑮Qiaoyi Town, ⑯Dingziwan Town, ⑰Xiangjiang River

图1 样点分布、位置信息

Fig. 1 Information about distribution and location of sampling sites

数 (Nemero pollution index, NPI) 计算公式如下:

$$NPI = \sqrt{\left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{ave}^2 + \left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{max}^2} \quad (1)$$

式中, C_i 为土壤重金属含量实测值, S_i 为 GB15618-1995 二级标准。

1.3.2 镉生物富集 (BCF) 数据归一化 土壤中 Cd 向稻米中迁移, 与土壤性质有关, 且与植物

体内各种物理、化学和生物过程密切相关。BCF表征了土壤中Cd对大米的有效性，本研究指大米Cd含量(C_{grain})与TCd的比值。近年来，许多学者尝试采用BCF均值、分位数等确定性方法直接表征和预测作物Cd吸收特征，表现出较大的局限性^[23-24]。这是因为，影响大米Cd富集过程的因子复杂多样，除生物因子如品种、拮抗离子等，还有土壤因子如TCd、pH、OM等^[25]。基于此，本文在土壤中Cd含量与作物可食部位浓度对数转换基础上，引入因子pH和OM构建BCF多元回归量化模型^[26-27]。

在建模时，不可避免地需考虑如何消除土壤性质及与品种因子之间的交互效应。借鉴李波^[28]和韦东普^[29]构建的铜生物毒性数据(EC_{10})归一化原理，将本文15个早稻品种的大田BCF数据归一化至不同土壤条件下，获得对应不同土壤条件的Cd生物富集数据组，操作方法参考文献[30]。综合考量调查区土壤性质和污染特征，设定土壤归一化条件：TCd 0.1~0.9 mg kg⁻¹，pH 4.0~8.0，OM 20~60 g kg⁻¹，每个因子均设5个等间距梯度。

1.3.3 物种敏感性(SSD)分布及HC₅值推导

利用归一化后数据组，通过对不同品种水稻Cd的BCF值进行倒数变换后，利用最新的分布函数模型(Burr-III型方程)进行特定土壤条件下(TCd、pH及OM)不同品种水稻Cd富集系数的SSD分布曲线拟合。利用澳大利亚联邦科学和工业研究组织提供的软件BurrIIZO，从Burr-III模型拟合得到不同土壤条件下基于95%保护水平的水稻Cd的BCF安全临界值(BCF_5)。结合我国大米Cd食品卫生标准(0.2 mg kg⁻¹)和 BCF_5 值，计算稻田土壤中Cd的食品安全阈值(HC_5)，即在此土壤条件下保护生境中95%的水稻品种相对安全的土壤TCd限值^[31-32]。

Burr-III型函数的参数方程为

$$F(x) = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{b}{x}\right)^c\right)^k} \quad (2)$$

$$HC_5 = \frac{0.2}{BCF_5} \quad (3)$$

式中， $F(x)$ 为累积概率，%； x 为BCF的倒数； b 、 c 、 k 为函数的3个参数； BCF_5 为式(2)中 $F(x)=0.05$ 时 $1/x$ 的取值； HC_5 为稻田土壤Cd农产品安全阈值，mg kg⁻¹。

1.3.4 HC_5 预测模型构建与验证 利用 HC_5 及其对应的归一化后的TCd、pH及OM数据，构建

多元回归模型(式(4))，即为稻田土壤Cd农产品安全阈值预测模型。为了对本研究模型进行验证，选取70组大田土壤—大米点对点样品，检测TCd 0.15~1.12 mg kg⁻¹、pH 4.08~6.94、OM 17.78~57.72 g kg⁻¹及大米Cd含量0.056~0.748 mg kg⁻¹，构建独立数据库，采样方式及测定方法同1.3.1。大田验证样本取自研究区2014年早稻田，样点涵盖8乡镇(桥驿、白箬铺、东城、格塘、靖港、乔口、乌山镇及新康乡)和1街道(丁字湾)，共计70个村组。

$$\lg[HC_5] = m \lg[TCd] + n \text{pH} + p \lg[OM] + q \quad (4)$$

式中，TCd为土壤全镉，mg kg⁻¹；OM为土壤有机质含量，g kg⁻¹； m 、 n 和 p 为函数参数，分别表征土壤TCd、pH和OM对 HC_5 的偏相关系数， q 为常数项。

1.4 数据处理

实验数据均采用Excel 2007和SAS 9.0分析处理，采用Origin 8.5和AutoCAD 2016制图，邓肯新复极差法(Duncan法)进行差异显著性分析($p=0.05$)。

2 结果

2.1 研究区Cd污染现状

如图2所示，研究区土壤TCd和大米Cd含量均呈极显著正态分布，具有统计学意义。土壤TCd集中分布于区间0.2~0.6 mg kg⁻¹，占全部点位的83.3%；未超标土壤(<0.3 mg kg⁻¹)、超标1倍以内(0.3~0.6 mg kg⁻¹)、超标1倍~2倍(0.6~0.9 mg kg⁻¹)及超标2倍以上(>0.9 mg kg⁻¹)分别占比21.8%、62.8%、12.8%和2.6%，调查区土壤Cd呈典型中轻度污染。大米Cd含量未超标(<0.2 mg kg⁻¹)、超标1倍以内(0.2~0.4 mg kg⁻¹)及超标1倍以上(>0.4 mg kg⁻¹)点位占比分别为62.82%、33.33%和3.85%，同样呈现轻度污染趋势。土壤内梅罗污染指数(NPI)可用来表征土壤整体污染趋势(Cd、Hg、Pb、As和Cr)， $NPI < 1$ 和 $NPI \in (1, 2)$ 分别表征安全警戒级和轻污染级。研究显示， $NPI \in (1, 2)$ 和 $NPI < 1$ 点位占比分别为44.6%和56.4%，这表明，研究区土壤重金属污染风险集中于轻度污染。

2.2 BCF与土壤因子间关系

对生物富集(BCF)数据归一化处理能体现因子间及其与BCF的交互作用(表1)。未归一化处

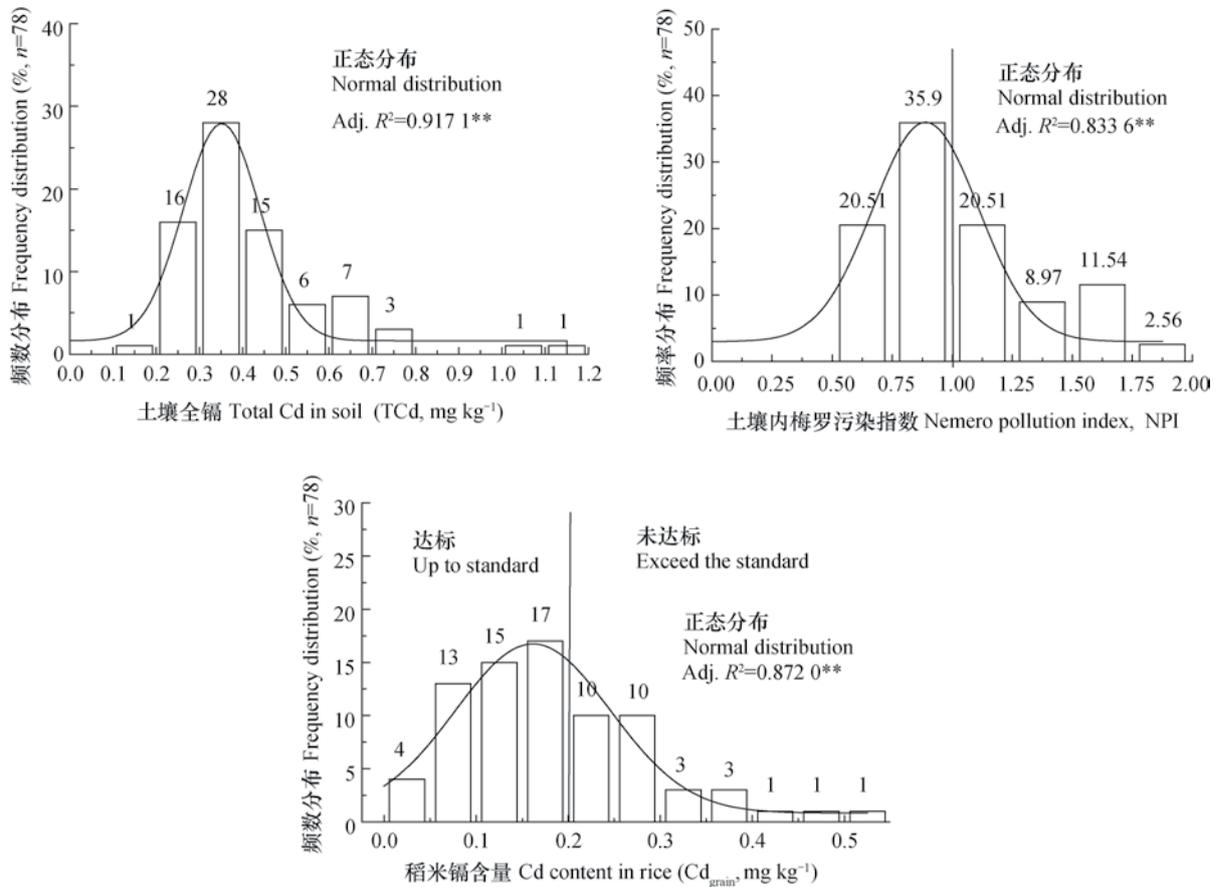


图2 土壤全镉、稻米镉及土壤内梅罗污染指数区间频率分布

Fig. 2 Frequency distributions of TCd, C_{grain} and NPI

表1 水稻镉生物富集因子 (BCF) 与土壤性质的相关性

Table 1 Relationships of biological concentration factor (BCFs) of Cd in rice with soil properties

处理/Treatment	因子/Factor	BCF	pH	OM ¹⁾	TCd ²⁾
未归一化 No normalization	BCF	1.000 0	-0.315 0**	0.209 5	-0.236 5*
	pH		1.000 0	-0.013 0	0.382 7**
	OM			1.000 0	0.315 4**
	TCd				1.000 0
归一化 Normalization	BCF	1.000 0	-0.522 3**	0.285 9**	-0.289 1**
	pH		1.000 0	0.000 0	0.000 0
	OM			1.000 0	0.000 0
	TCd				1.000 0

注：1) OM指土壤有机质；2) TCd指土壤全镉；表中*和**分别表征显著 ($p < 0.05$) 和极显著 ($p < 0.01$) 差异。下同 Note: 1) OM stands for soil organic matter; 2) TCd for soil total cadmium; *and ** for significant difference ($p < 0.05$) and extremely significant ($p < 0.01$). The same below

理，土壤TCd与pH、OM均呈显著正相关，OM与pH、BCF均不相关。归一化后，OM、TCd及pH间的交互作用得以消除，三因子相互独立且均与BCF呈显著正相关，这有益于多因子回归模型构建。由

相关系数可得，各因子对BCF的影响程度表现为pH (-0.5223) > TCd (-0.2891) \approx OM (0.2859)，其中，随着pH的提高，稻米Cd富集能力显著降低；随着TCd的提高，同等土壤条件下，同一品种

稻米Cd富集能力也相对降低。

此外,土壤OM与BCF呈负相关,同等土壤条件下,同一品种水稻在较高有机质土壤中更易富集Cd。有研究表明,土壤有机物表面吸附或螯合态Cd受生物活动影响较大,且在低pH和Eh时可重新释放出来,从而提高植物有效性;而有关Cd的生物有效性研究则表明,Cd与有机质形态密切相关,大分子量腐殖质(如胡敏酸)可与Cd形成高稳性络合物^[33],另一方面,可溶性有机质(如富里酸)可与Cd形成可溶态络合物以增加土壤中Cd的移动性和有效性^[34]。由于淹水和地域等因素,本研究土壤pH和Eh普遍较低,有机质腐熟度可能

偏高,从而提高了其植物有效性,具体机理有待进一步求证。以上研究结果可为Cd污染稻田土壤改良和风险管控提供一定参考。

2.3 土壤性质对HC₅的影响

通过相关分析(表2)可知,土壤性质与HC₅值间存在显著的相关关系。HC₅与pH的相关系数最高,可达0.761 1,与OM和TCd相关系数分别为-0.438 9和0.381 9。由此可见,土壤性质可以影响稻米中Cd的富集,故在评价农产品Cd安全风险时,需要考虑土壤性质之间的分异,其中,pH为最主要因子,其次为OM,此外,TCd对HC₅值的影响也不容忽视。

表2 土壤Cd食品安全阈值(HC₅)与土壤性质的相关性

Table 2 Relationships of hazardous concentrations (HC₅) for rice with soil properties

处理Treatment	因子Factor	HC ₅	pH	OM	TCd
归一化	HC ₅	1.000 0	0.761 1**	-0.438 9**	0.381 9**
Normalization	pH		1.000 0	-0.000 0	0.000 0
	OM			1.000 0	0.000 0
	TCd				1.000 0

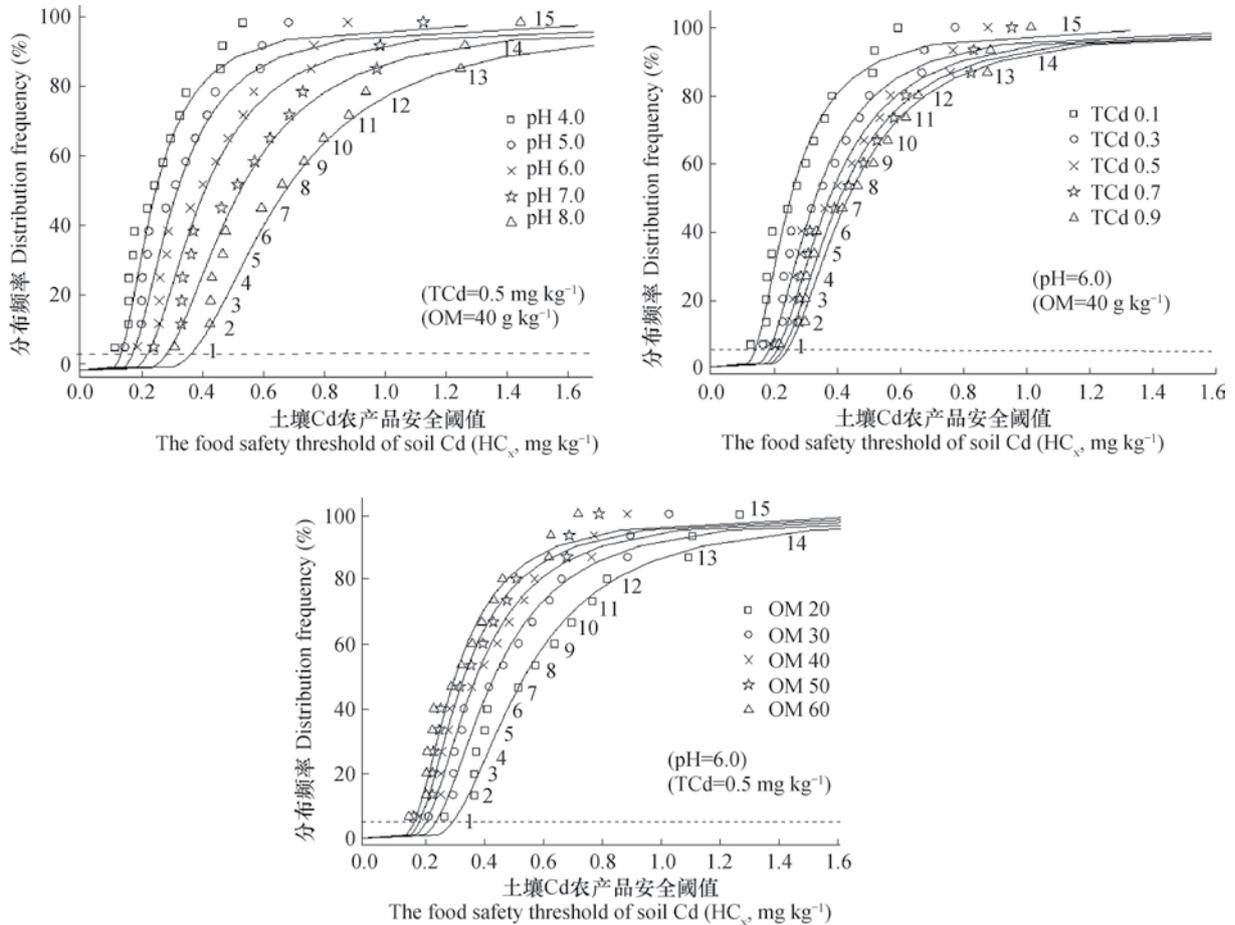
由于作物品种显著影响稻米中Cd的富集,本文对归一化至不同土壤条件下不同品种的HC₅进行了SSD分布曲线拟合。不同土壤条件下(pH、TCd、OM)的SSD曲线(图3)表明:随着pH升高或TCd的增大,TCd的SSD曲线向X轴数值大的方向(右)移动,HC₅值随着pH升高和TCd增高而增大,但变化趋势有显著差别;随着数量的增加,TCd对HC₅的影响程度降低,而pH的影响则表现出一定的持续性。OM对稻田土壤中Cd的SSD曲线有一定影响,随着OM的增加,SSD曲线向着X轴数值小的方向移动,但随OM增大,其影响程度降低;3个因子均在低累计概率分布范围内影响程度小(<10%),而在中轴(50%~80%)影响程度较大。调查区稻田土壤OM分布相对集中,且TCd集中分布于0.2~0.6 mg kg⁻¹的中低度水平,故在进行长株潭稻田土壤Cd风险管控与预警时,需强调TCd对HC₅值的影响,并重视pH调节,降低稻米Cd安全风险。

2.4 HC₅值的预测模型

利用SAS 9.0多元回归模块,量化HC₅与对应的土壤性质(pH、OM和TCd)之间的关系,获得HC₅的量化预测模型(表3)。由单因子模型

(a~c)可再次证明,pH为HC₅主控因子,决定系数可达62.2%,其次为OM和TCd,决定系数分别为19.4%和18.3%,且模型均达到极显著水平($p < 0.01$)。使用双因子模型和三因子模型均能很好地预测HC₅,模型决定系数>80.2%。Ding等^[35-40]对土壤—胡萝卜中Cd转移的模型预测显示,pH和OM是影响Cd吸收的两个最显著因子,使用土壤TCd、pH和OM可以很好地预测胡萝卜中的Cd浓度($R^2=0.90$)。François等^[41]、Liu等^[42]构建的小麦中Cd含量的SPT(Soil-to-plant-transfer models)模型同样表明,土壤pH、CEC和土壤重金属活性等因素是模型主控因素。南方稻田土壤CEC普遍较低、差异较小且更受制于土壤有机质含量,故本研究模型只考虑了pH、OM和TCd对HC₅的影响。

本研究中,预测模型土壤性质适用区间为pH 4.0~8.0、OM 20~60 g kg⁻¹、TCd 0.1~0.9 mg kg⁻¹,且可以解释HC₅预测模型变异的95%以上,但在极端土壤性质条件下,可能在应用中造成较大误差。此处建立的HC₅预测模型综合考虑了品种的影响(SSD分布),也体现了土壤性质对Cd食品安全阈值的影响,量化了土壤性质参数(pH、OM与



注：图中TCd 0.1~0.9表示土壤全镉分别为0.1~0.9 mg kg⁻¹；OM 20~60表示土壤有机质分别为20~60 g kg⁻¹；虚线（……）与方程曲线交点的横坐标值表征不同条件下的HC₅值；图中1~15分别表示品种湘早143、湘早籼11号、湘早籼31号、矮子稻、湘早籼13号、湘早籼24号、陵两优211、湘早籼26号、株两优02、湘早籼32号、湘早籼7号、金优974、中嘉早17、株两优819和湘早籼45号。下同 Note: TCd 0.1~0.9 indicates that total Cd in the soil is 0.1~0.9 mg kg⁻¹, respectively; OM 20~60 indicates that the soil organic matter is 20~60 g kg⁻¹, respectively; The value of the intersection of the dotted line with the equation curve on the abscissa indicates HC₅ varying with environmental conditions; The digits from 1 to 15 in the figure are serial numbers of the early rice varieties; 1-Xiangzao 143, 2-Xiangzaoxian 11, 3-Xiangzaoxian 31, 4-Aizidao, 5-Xiangzaoxian 13, 6-Xiangzaoxian 24, 7-Lingliangyou 211, 8-Xiangzaoxian 26, 9-Zhuliangyou 02, 10-Xiangzaoxian 32, 11-Xiangzaoxian 7, 12-Jinyou 974, 13-Zhongjiaiao 17, 14-Zhuliangyou 819, 15-Xiangzaoxian 45. The same below

图3 不同土壤条件下物种敏感性分布曲线

Fig. 3 Species sensitivity distribution (SSD) curves relative to soil properties

表3 不同土壤条件下土壤Cd的HC₅预测模型

Table 3 HC₅ prediction models for Cd in soil relative to soil properties

No.	因子数 Quantity	因子 Factors	预测模型 Prediction models	R ²	显著性水平 (p) Significance level
a	单因子 Single factor	pH	$\lg [HC_5] = 0.108pH - 1.331$	0.622	< 0.01
b		OM	$\lg [HC_5] = -0.508\lg [OM] + 0.115$	0.194	< 0.01
c		TCd	$\lg [HC_5] = 0.246\lg [TCd] - 0.582$	0.183	< 0.01
d	双因子 Double factor	pH; OM	$\lg [HC_5] = 0.108pH - 0.508\lg [OM] - 0.533$	0.817	< 0.01
e		pH; TCd	$\lg [HC_5] = 0.108pH - 0.246\lg [TCd] - 1.232$	0.802	< 0.01
f	三因子 Tri factor	pH; OM; TCd	$\lg [HC_5] = 0.246\lg [TCd] + 0.108pH - 0.508\lg [OM] - 0.434$	1.000	< 0.01

TCd)与Cd农产品安全阈值的数值关系,也说明了建立基于物种敏感性分布和土壤性质对应的污染物食品安全阈值的必要性。本研究基于大田数据,构建的稻田土壤Cd食品安全阈值(HC_5)量化预测模型,可为稻田土壤实际污染的安全风险评价提供科学依据,同时也为制定适用性更强的稻田土壤Cd环境质量标准提供科学依据。

2.5 HC_5 预测模型的验证

为了对本研究中构建 HC_5 预测模型进行验证,探究是否可应用大田条件下土壤Cd安全预警,选取2014年某地70个村组的早稻样品对模型进行独立数据验证。样点涵盖某地8乡镇和1街道,共计70个样点,土壤性质变异区间为:TCd $0.15 \sim 1.12$

mg kg^{-1} , pH 4.08 ~ 6.94, OM $17.78 \sim 57.72$ g kg^{-1} , 稻米Cd含量变化区间为 $0.056 \sim 0.748$ mg kg^{-1} 。利用三因子模型(f)将本研究建立的 HC_5 预测模型(方程f)的计算值与对应TCd进行比较,其结果如图4。当TCd低于其对应的 HC_5 (坐标点位于1:1线上方)时,稻米Cd均不超过食品卫生标准(100%保护率),这与本阈值基于保护95%物种(品种)安全的目标相一致;当TCd > HC_5 时(坐标点位于1:1线下方)时,稻米Cd含量不一定超标,这与品种差异有关,但这一部分的超标点位率(64.7%)远大于未超标点位率(35.3%)。这表明,本研究阈值模型能够实现稻田土壤Cd食品安全预警目标,但模型推导值可能偏严格且有待进一步校正。

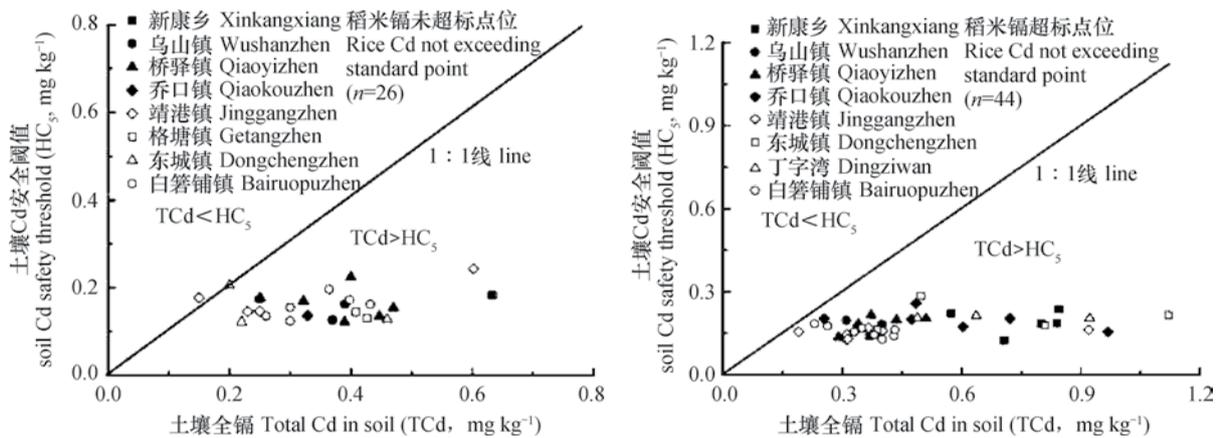


图4 预测模型 HC_5 推导值判别稻米Cd安全风险

Fig. 4 Use of HC_5 derived from prediction models to determine Cd safety risk of rice

3 讨论

3.1 HC_5 推导值与我国土壤环境质量的比较

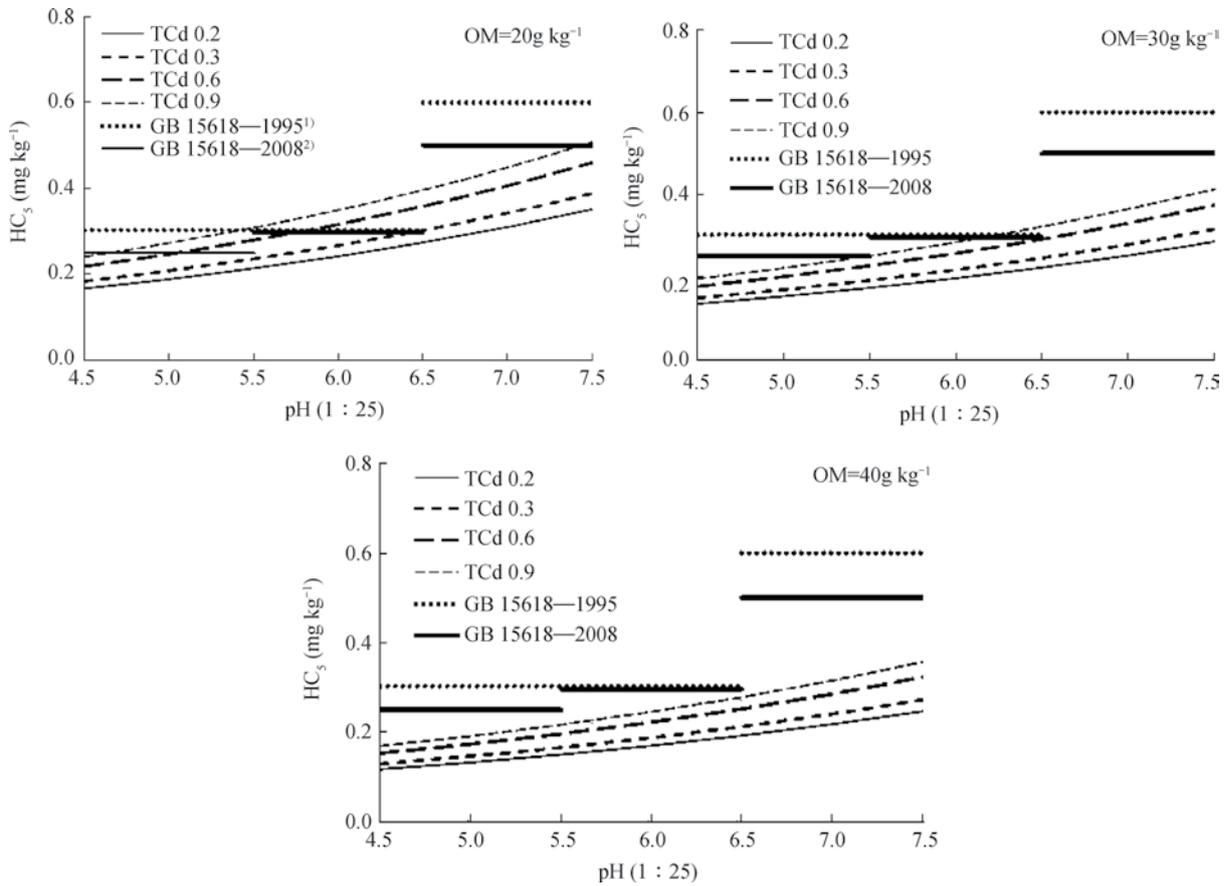
我国现行土壤环境质量标准GB15618-1995和GB15618-2008,其中,二级标准针对分段土壤pH进行了TCd限定值。将模型f预测值分别与这两个标准的推导值进行比较,如图5所示。与两标准相比,在土壤pH > 6.5的情况下,在本研究TCd $0.2 \sim 0.9$ mg kg^{-1} 和OM $20 \sim 40$ g kg^{-1} 变异区间下,现行标准推导值均高于模型预测值,说明现行标准可能比较宽松,保护度不足,易造成土壤TCd不超标,稻米Cd浓度超标的情况。在pH < 6.5的情况下,现行标准推导值介于不同OM和TCd下的模型预测值之间,即当OM > 30 g kg^{-1} 时,现行标准推导值高于模型预测值,说明标准过于严格;当OM < 30 g kg^{-1} , TCd取不同值时($0.2 \sim 0.9$ mg kg^{-1}),

随着TCd和OM的增加,原本低于现行标准值的情况可能逐渐变为持平或高于现行标准值。

以上结果表明,由土壤理化性质不同而导致土壤Cd食品安全风险临界值的差异,会使以单一段式来控制TCd的现行标准可能同时存在保护不足与保护过度的问题。此外,这也表明了,构建基于不同土壤性质参数的动态、量化的风险阈值预测模型的重要性,同时证明了基于单一因子(pH)分段确定目标污染物的总量以控制农产品产地食物链安全风险的不科学性。表4为基于食品卫生安全标准的稻田土壤Cd风险阈值在不同土壤性质参数下的分段基准建议值以及连续标准计算公式。

3.2 HC_5 预测模型的局限性

本研究建立的稻田土壤Cd食品安全 HC_5 值预测模型,综合考量了生物因子即品种和土壤性质因子对稻米Cd富集特征的影响。由于受研究区地



注：1) 为土壤环境质量标准GB 15618—1995二级标准；2) 为GB 15618—2008二级标准。下同 Note: 1) Grade II criteria of the standard GB 15618—1995; and 2) Grade II criteria of the standard GB 15618—2008. The same below

图5 模型f的HC₅预测值与我国土壤环境质量标准的比较

Fig. 5 Comparison of HC₅ predicted with Model f with the standard of China for soil environment quality

表4 稻田土壤中Cd的食品卫生安全基准建议值

Table 4 Recommended food health safety standards for Cd in paddy soil

推导方法 Deduction	基准值计算方程 Equation	分段标准值Segmented standard values									
		TCd ¹⁾ < 0.3 mg kg ⁻¹			TCd 0.3 ~ 0.6 mg kg ⁻¹			TCd 0.6 ~ 1.0 mg kg ⁻¹			
		< 5.5 ²⁾	5.5 ~ 6.5	6.5 ~ 7.0	< 5.5	5.5 ~ 6.5	6.5 ~ 7.0	< 5.5	5.5 ~ 6.5	6.5 ~ 7.0	
直接法Direct (pH, TCd, OM)	20 ³⁾	0.21	0.27	0.34	0.23	0.29	0.38	0.25	0.32	0.41	
	f	30	0.17	0.22	0.28	0.19	0.24	0.31	0.20	0.26	0.33
	40	0.15	0.19	0.24	0.16	0.21	0.27	0.17	0.22	0.29	
GB15618—1995		0.30	0.30	0.60	0.30	0.30	0.60	0.30	0.30	0.60	
GB15618—2008		0.25	0.30	0.50	0.25	0.30	0.50	0.25	0.30	0.50	

注：1) TCd < 0.3、0.3 ~ 0.6和0.6 ~ 1.0 mg kg⁻¹分别按TCd=0.30、0.45和0.60 mg kg⁻¹计算；2) 中pH < 5.5、5.5 ~ 6.5和6.5 ~ 7.0分别按pH=5、6和7计算；3) 为土壤有机质，g kg⁻¹ Note: 1) TCd < 0.3, 0.3 ~ 0.6 and 0.6 ~ 1.0 are calculated at TCd=0.30, 0.45 and 0.60 mg kg⁻¹, respectively; 2) pH < 5.5, 5.5 ~ 6.5 and 6.5 ~ 7.0 are calculated at pH=5, 6 and 7, respectively; 3) Soil organic matter (OM, g kg⁻¹)

域限制,土壤性质分异区间较窄($TCd < 1.0$; pH 4~7),水稻品种相对集中($n=15$),且模型推导中仅考量了 pH 、 OM 和 TCd 三个土壤性质因子,因而,预测模型一定程度上有适用局限性,但基本上可根据不同的土壤条件较为准确地预测土壤Cd基于稻米食品卫生安全风险的安全阈值。本阈值模型可应用于我国南方尤其是长株潭地区稻田土壤Cd风险预警和管控,可能对北方偏碱性土壤适用性较差。尽管本研究利用独立数据对预测模型进行了田间验证,但验证区域较窄,模型参数仍需大量的田间试验进一步修正。本研究阈值模型基于污染物全量构建,在污染物含量极低(极高)的情况下,使用全量往往会明显高估(低估)植物体内的重金属含量,仅根据全量不能对其生物有效性进行很好预测。土壤有效态或提取态而非全量对污染物在生物体内的富集效应的响应起决定性因素,国外一些机构也更倾向于使用土壤有效态进行污染风险评估。

稻田土壤Cd污染根本上讲是一个健康风险问题,最终受体为人体健康,且典型暴露途径为手—口膳食过程。在农田Cd膳食暴露评估中,有两个相互关联的重要环节:1) Cd从土壤到可食部位(稻米)的过程,其核心在于土壤Cd生物有效性预测;2) 稻米中Cd经膳食途径进入人体并产生危害的过程,其关键在于食品Cd健康风险评估。本文基于土壤—植物中镉传输过程,以富集系数(BCF)为主要参数构建的土壤Cd食品卫生安全阈值模型,主要立足于上述第一环节,尚未涉及稻米Cd膳食暴露健康风险评估。农田土壤Cd健康风险评估需要对不同环节环境风险进行识别、分级和预测,以便指导安全生产实践。近年来,应用一些新技术和新手段构建农田土壤重金属有效性机理或半机理模型,并进行风险预警预测已成为风险评估领域热点之一。张厦等^[43]基于Cd、Pb在土壤—溶液中的形态分布和分配机理,构建了农田土壤Cd、Pb有效性预测模型;宋金茜等^[44]比较了传统标准方法、农产品产地评估标准方法和改进的累积综合指数法,并运用GIS地统计学方法对某农业土壤重金属风险水平、空间分布以及生态风险特征进行了评价;蒋红群等^[45]利用地统计学与土壤重金属累积通量模型,对北京市土壤重金属潜在风险进行了预警。在稻田Cd膳食暴露评估方面,杨敏等^[46]、蒋逸骏等^[47]借鉴美国环境保护总局(EPA)风险

评估模型分别对石门雄黄矿、湘北某镇硫铁矿周边重金属污染农田土壤的健康风险进行了评估。

4 结论

土壤中Cd的SSD曲线随着 pH 和 TCd 的增大向浓度值(X 轴)增大方向移动; OM 和 TCd 对SSD曲线的影响程度均随数值的增大而减弱;三个因子(pH 、 OM 与 TCd)均在累积概率较低范围内对曲线影响程度较小。 HC_5 受土壤 pH 、 OM 及 TCd 等因子的共同影响,其中, pH 是最主要影响因子,可控制 HC_5 变异的60%以上,其次为 OM 和 TCd ,且后两因子影响程度均随因子数量的增大而减弱。通过BCF的SSD方程构建了基于保护95%品种的稻田土壤Cd食品安全阈值(HC_5)模型,探讨了品种及 pH 、 OM 和 TCd 对 HC_5 的影响,可为我国南方尤其是长株潭稻田土壤Cd污染风险评估和基准研究提供一定参考。

参考文献

- [1] McLaughlin M J, Singh B R E. Cadmium in soils and plants. Dordrecht: Kluwer Academic, 1999
- [2] Qian Y, Chen C, Zhang Q, et al. Concentrations of cadmium, lead, mercury and arsenic in Chinese market milled rice and associated population health risk. Food Control, 2010, 21 (12): 1757—1763
- [3] Zhen Y H, Cheng Y J, Pan G X, et al. Cd, Zn and Se content of the polished rice samples from some Chinese open markets and their relevance to food safety. Journal of Safety & Environment, 2008, 8: 119—122
- [4] 谢燕湘, 郭志忠, 李兆敏, 等. 南方某市2012年市售大米镉污染状况及膳食暴露评估. 海峡预防医学杂志, 2014, 20 (1): 5—6, 11
Xie Y X, Guo Z Z, Li Z M, et al. Analysis on Cadmium contamination in rice and assessment of dietary exposure of residents in a southern city in 2012 (In Chinese). Strait Journal of Preventive Medicine, 2014, 20 (1): 5—6, 11
- [5] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological profile for Cadmium. U.S. Department of Health and Human Services. Washington, D. C., 2007
- [6] 李丹, 高阳俊, 耿春女. 食物链途径人体健康风险评估的关键内容探讨. 环境化学, 2015, 34 (3): 431—441
Li D, Gao Y J, Geng C N. Discussions on the human

- health risk assessment by food-chain exposure pathways (In Chinese). *Environmental Chemistry*, 2015, 34 (3): 431—441
- [7] Fang Y, Sun X, Yang W, et al. Concentrations and health risks of lead, cadmium, arsenic, and mercury in rice and edible mushrooms in China. *Food Chemistry*, 2014, 147 (6): 147—151
- [8] 周启星, 滕涌, 林大松. 污染土壤修复基准值推导和确立的原则与方法. *农业环境科学学报*, 2013, 32 (2): 205—214
Zhou Q X, Teng Y, Lin D S. The principles and methods of deriving and determining remediation criteria for contaminated soils (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32 (2): 205—214
- [9] 王波, 刘晓青, 冯昌伟. 芜湖市部分市售蔬菜重金属含量及其健康风险研究. *中国农学通报*, 2011, 27 (31): 143—146
Wang B, Liu X Q, Feng C W. Concentration and health risk of heavy metals in vegetables from the markets of wuhucity (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27 (31): 143—146
- [10] 王小庆, 韦东普, 黄占斌, 等. 物种敏感性分布法在土壤中铜生态阈值建立中的应用研究. *环境科学学报*, 2014, 33 (6): 1787—1794
Wang X Q, Wei D P, Huang Z B, et al. Application of species sensitivity distribution in deriving of ecological thresholds for copper in soils (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 33 (6): 1787—1794
- [11] 王小庆, 韦东普, 黄占斌, 等. 物种敏感性分布在土壤中镍生态阈值建立中的应用研究. *农业环境科学学报*, 2012, 31 (1): 92—98
Wang X Q, Wei D P, Huang Z B, et al. Application of species sensitivity distribution in deriving of ecological thresholds for nickel in soils (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31 (1): 92—98
- [12] 李志博, 骆永明, 宋静, 等. 基于稻米摄入风险的稻田土壤镉临界值研究: 个案研究. *土壤学报*, 2008, 45 (1): 76—81
Li Z B, Luo Y M, Song J, et al. Critical values for Cd in paddy field based on Cd risk of rice consumption: A case study (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (1): 76—81
- [13] 陈梦舫, 骆永明, 宋静, 等. 场地基准建立的理论、方法和常用模型. *环境监测与管理技术*, 2011, 23 (3): 14—18
Chen M F, Luo Y M, Song J, et al. Theory and commonly used models for the derivation of soil generic assessment criteria for contaminated sites (In Chinese). *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2011, 23 (3): 14—18
- [14] 周启星, 王毅. 我国农业土壤质量基准建立的方法体系研究. *应用基础与工程科学学报*, 2012, 20 (S1): 38—44
Zhou Q X, Wang Y. Methodological systems of building agricultural soil quality criteria in China (In Chinese). *Journal of Basic Science and Engineering*, 2012, 20 (S1): 38—44
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [16] 中国环境监测总站. 土壤质量铅、镉的测定石墨炉原子吸收分光光度法: GB/T 17141—1997. 北京: 中国环境科学出版社, 1998
China National Environmental Monitoring Centre. Soil quality-determination of lead and cadmium-graphite furnace atomic absorption spectrometric method: GB/T 17141—1997. Beijing: China Environmental Science Press, 1998
- [17] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 土壤质量总汞、总砷、总铅的测定原子荧光法: GB/T 22105.2—2008. 北京: 中国标准出版社, 2008
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of P.R.China, Standardization Administration of China (SAC). Soil quality-Determination of total mercury, total arsenic, total lead-atomic fluorescence spectrometry: GB/T 22105.2—2008. Beijing: China Standards Press, 2008
- [18] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 食品安全国家标准食品中镉的测定: GB 5009.15—2014. 北京: 中国标准出版社, 2014
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of P.R.China, Standardization Administration of China (SAC). National standard for food safety-Determination of cadmium in foods: GB 5009.15—2014. Beijing: China Standards Press, 2014
- [19] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 食品安全国家标准食品中总砷及无机砷的测定: GB 5009.11—2014. 北京: 中国标准出版社, 2014
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of P.R.China, Standardization Administration of China (SAC). National standard for food safety-Determination of total arsenic and inorganic arsenic in food: GB 5009.11—2014. Beijing: China Standards Press, 2014
- [20] 国家环境保护局, 国家技术监督局. 土壤环境质量标

- 准: GB 15618-1995. 北京: 中国标准出版社, 1995
National Environmental Protection Agency, State Bureau of Technology Supervision. Environmental quality standard for soils of China: GB 15618-1995. Beijing: China Standards Press, 1995
- [21] 国家环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 土壤环境质量标准: GB 15618-2008. 北京: 中国标准出版社, 2008
Ministry of Environmental Protection of the P. R. China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of P.R.China. Environmental quality standard for soils of China: GB 15618-2008. Beijing: China Standards Press, 2008
- [22] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化委员会. 食品安全国家标准食品中污染物限量: GB 2726-2012. 北京: 中国标准出版社, 2012
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of P.R.China, Standardization Administration of China (SAC). National standard for food safety-limit of pollutants in foods: GB 2726-2012. Beijing: China Standards Press, 2012
- [23] Fryer M, Collins C D, Ferrier H. Human exposure modeling for chemical risk assessment: A review of current approaches and research and policy implications. *Environment Science & Policy*, 2006, 9 (3): 261—274
- [24] Meyer J S. The utility of the terms “bioavailability” and “bio-available fraction” for metals. *Marine Environmental Research*, 2002, 53 (4): 417—423
- [25] Ma Y B, Mclaughlin M J, Zhu Y G, et al. Final report for metals management 200990 8 2524-2530 in Asia. CSIRO Land and Water, Beijing, 2009
- [26] 程韵韵, 周其文, 赵玉杰, 等. 基于蒙特卡洛模拟技术的杭嘉湖平原稻田土壤Cd安全阈值研究. *科学技术与工程*, 2014, 14 (7): 88—93
Cheng Y Y, Zhou Q W, Zhao Y J, et al. The study on Cd safety benchmarks of paddy soil based on monte carlo simulation technology on Hangjiahu Plain (In Chinese). *Science Technology and Engineering*, 2014, 14 (7): 88—93
- [27] 张红振, 骆永明, 章海波, 等. 水稻、小麦籽粒砷、镉、铅富集系数分布特征及规律. *环境科学*, 2010, 31 (2): 488—495
Zhang H Z, Luo Y M, Zhan H B, et al. Characterizing the plant uptake factor of As, Cd and Pb for rice and wheat cereal (In Chinese). *Environmental Science*, 2010, 31 (2): 488—495
- [28] 李波. 外源重金属铜、镍的植物毒害及预测模型研究. 北京: 中国农业科学院, 2010
Li B. Plant toxicity and prediction model of exogenous heavy metal copper and nickel (In Chinese). Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010
- [29] 韦东普. 应用发光细菌法测定中国土壤中铜、镍毒性的研究. 北京: 中国农业科学院, 2010: 75—76
Wei D P. Application of bioluminescent bacteria bioassay on determination the toxicity of copper and nickel in Chinese soils (In Chinese). Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010: 75—76
- [30] 王小庆. 中国农业土壤中铜和镍的生态阈值研究. 北京: 中国矿业大学, 2012
Wang X Q. Ecological thresholds for copper and nickel in Chinese agricultural soils (In Chinese). Beijing: China University of Mining and Technology, 2012
- [31] Lock K, Janssen C R. Influence of aging on copper bioavailability in soils. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2003, 22 (5): 1162—1166
- [32] Newman M C, Ownby D R, Mezin L C A, et al. Applying species-sensitivity distributions in ecological risk assessment: Assumptions of distribution type and sufficient numbers of species. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, 19 (2): 508—515
- [33] 熊雄, 李艳霞, 韩杰, 等. 堆肥腐殖质的形成和变化及其对重金属有效性的影响. *农业环境科学学报*, 2008, 27 (6): 2137—2142
Xiong X, Li Y X, Han J, et al. Formation and transformation of humus in composting and its impacts on bioavailability of toxic metals (In Chinese). *Journal of Agro-environment Science*, 2008, 27 (6): 2137—2142
- [34] Garcia-Mina J M. Stability, solubility and maximum metal binding capacity in metal-humic complexes involving humic substances extracted from peat and organic compost. *Organic Geochemistry*, 2006, 37 (12): 1960—1972
- [35] Ding C F, Zhang T L, Wang X X, et al. Prediction model for Cadmium transfer from soil to carrot (*Daucus carota* L.) and its application to derive soil thresholds for food safety. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61 (43): 10273—10282
- [36] Ding C F, Zhang T L, Li X G, et al. Major controlling factors and prediction models for mercury transfer from soil to carrot. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14 (6): 1136—1146
- [37] Ding C F, Li X G, Zhang T L, et al. Phy-to-toxicity and accumulation of chromium in carrot plants and

- the derivation of soil thresholds for Chinese soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 108 (2): 179—186
- [38] Ding C F, Zhou F, Li X G, et al. Modeling the transfer of arsenic from soil to carrot (*Daucus carota* L.) -A greenhouse and field-based study. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22 (14): 10627—10635
- [39] Ding C F, Li X G, Zhang T L, et al. Transfer model of lead in soil-carrot (*Daucus carota* L.) system and its food safety thresholds in soil. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2015, 34 (9): 2078—2086
- [40] Ding C F, Ma Y B, Li X G, et al. Derivation of soil thresholds for Lead applying species sensitivity distribution: A case study for root vegetables. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 303: 21—27
- [41] François M, Grant C, Lambert R, et al. Prediction of Cadmium and zinc concentration in wheat grain from soils affected by the application of phosphate fertilizers varying in Cd concentration. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 83 (2): 125—133
- [42] Liu K, Lü J L, Dai Y C, et al. Cross-species extrapolation of models for predicting lead transfer from soil to wheat grain. *PLoS One*, 2016, 11 (8): e0160552
- [43] 张厦, 宋静, 高慧, 等. 贵州铅锌冶炼区农田土壤镉铅有效性评价与预测模型研究. *土壤*, 2017, 49 (2): 328—336
- Zhang X, Song J, Gao H, et al. Assessment and modeling of Cd and Pb availability in contaminated arable soils in mining area of Guizhou (In Chinese). *Soils*, 49 (2): 328—336
- [44] 宋金茜, 朱权, 姜小三, 等. 基于GIS的农业土壤重金属风险评价研究——以南京市八卦洲为例. *土壤学报*, 2017, 54 (1): 81—91
- Song J Q, Zhu Q, Jiang X S, et al. GIS-based heavy metals risk assessment of agricultural soils—a case study of Baguazhou, Nanjing (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (1): 81—91
- [45] 蒋红群, 王彬武, 刘晓娜, 等. 北京市土壤重金属潜在风险预警管理研究. *土壤学报*, 2015, 52 (4): 731—745
- Jiang H Q, Wang B W, Liu X N, et al. Earlywarning of heavy metals potential risk governance in Beijing (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (4): 731—745
- [46] 杨敏, 滕应, 任文杰, 等. 石门雄黄矿周边农田土壤重金属污染及健康风险评估. *土壤*, 2016, 48 (6): 1172—1178
- Yang M, Teng Y, Ren W J, et al. Pollution and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil around Shimen Realgar Mine (In Chinese). *Soils*, 2016, 48 (6): 1172—1178
- [47] 蒋逸骏, 胡雪峰, 舒颖, 等. 湘北某镇农田土壤-水稻系统重金属累积和稻米食用安全研究. *土壤学报*, 2017, 54 (2): 410—420
- Jiang Y J, Hu X F, Shu Y, et al. Accumulation of heavy metals in the soil-rice system and assessment of dietary safety of the rice produced in the paddy fields—A case study of a town in the northern part of Hunan Province, China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (2): 410—420

Major Factors Affecting Threshold of Soil Cd for Food Health Safety and Relevant Prediction Models: A Case Study of Paddy Soil in Changsha

HE Junqiang HE Qianfeng[†] LIU Daihuan[†] HUANG Fang TANG Chunmin

(Hunan Yonker Environmental Protection Research Institute Co., Ltd., Changsha 410330, China)

Abstract 【Objective】 Cadmium (Cd) is the major pollutant in farmland soils of China, especially in South China, where the rice produced in certain areas is very high in over limit rate. It is, therefore, essential to perform soil Cd risk assessment and explore for major pathways of the food chain getting exposed to Cd pollution. Based on the point-to-point data of Cd in the soil and brown rice of a certain tract of paddy field in Changsha, the Food Health Standard for Rice (GB 2762–2012) and the research target of protecting 95% of the bio-species in the ecosystem, a threshold value for soil Cd was worked out using the biological concentration factor (BCF) and SSD (species sensitivity distribution) equations, quantitative relationships of HC₅ (hazardous concentrations) with soil properties and their prediction models discussed and studies

done to compare the threshold value with the criteria for Cd in the Standard for Soil Environment Quality of China. **【Method】** Some foreign research institutions and scholars usually use BCF as an important parameter in assessing effect and variety of the pollutant, and HC_5 as the concentration of a substance in soil being toxic to 5% of bio-species in the ecosystem, in other words, protecting 95% of the bio-species in the ecosystem. HC_5 is the scientific basis for setting up soil environmental quality standards. In the present study, HC_5 for Cd in soil was derived using the species sensitivity distribution method and the concept of BCF based on point-to-point field data from paddy soils. Prediction models for Cd crop safety thresholds based on soil properties were also developed and a function of soil physicochemical properties established. **【Result】** Results show that soil pH is the main soil factor affecting soil Cd food safety thresholds, and followed by organic matter (OM) content and total Cd (TCd), explaining 62.2%, 19.4% and 18.3% of the variation of HC_5 in paddy soil, respectively. The two-factor (soil pH and OM) prediction models can predict Cd crop safety thresholds quite accurately with determination coefficients (R^2) ranging from 0.802 to 0.817, while the three-factor (soil pH, OM and TCd) prediction models are more accurate than the two-factor ones. With rising soil pH or TCd, HC_5 increases in value, but the trend varies significantly. When the number of factors rises from two to three, the influence of TCd on HC_5 decreases in degree, while the effect of pH does not vary much. In the test range, OM and HC_5 show a certain negative relationship between the two. Soil Cd food safety thresholds vary with soil physical and chemical properties. The variation may lead to the the problem of insufficient protection and excessive protection at the same time, when the thresholds are used for controlling total Cd content by a single stage. In this study, a dynamic and quantitative food safety threshold model for Cd in soil was established. **【Conclusion】** The prediction models developed in the present study prove that quantitative relationships exist between soil properties and risk thresholds. And all the findings in this study are beneficial to developing and implementing soil specific, scientific and reasonable risk control of Cd in paddy soil and formulating regional soil environmental quality standards.

Key words Cadmium; Crop safety threshold; Biological concentration factor; Soil properties; Prediction model

(责任编辑: 陈荣府)