

设施黄瓜菜田土壤镉污染预测模型及阈值研究

许芮, 曹石, 刘猛, 张惠, 刘月涵, 吕诗, 段亚军, 张玉坤, 杨志新

引用本文:

许芮, 曹石, 刘猛, 等. 设施黄瓜菜田土壤镉污染预测模型及阈值研究[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(10): 1630–1636.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200178>

(向下翻页, 阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[Cd与羧基化多壁碳纳米管复合胁迫下蚕豆幼苗Cd的富集与分布](#)

Cd enrichment and distribution in broad bean seedlings under stress of Cd combined with MWCNTs–COOH

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(5): 756–763 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190815>

[沼液施用条件下添加浮萍对稻田氮素流失和Cu、Pb变化的影响](#)

Nitrogen losses and Cu, Pb changes of paddy field affected by adding duckweed under biogas slurry application

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(4): 608–618 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190825>

[施肥对灌漠土作物产量、土壤肥力与重金属含量的影响](#)

Effects of different organic matters on crop yields, soil quality and heavy metal content in irrigated desert soil

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(6): 813–825 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190850>

[不同磷源对设施菜田土壤速效磷及其淋溶阈值的影响](#)

Available phosphorus status and critical threshold for leaching in greenhouse soils influenced by different fertilizer sources

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(5): 686–693 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180909>

[沿海滩涂区土壤重金属含量分布及其有效态影响因素](#)

Content and bioavailability factors of soil heavy metals in mudflat coastal areas

中国生态农业学报. 2017, 25(2): 287–298 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160407>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200178

许芮, 曹石, 刘猛, 张惠, 刘月涵, 吕诗, 段亚军, 张玉坤, 杨志新. 设施黄瓜菜田土壤镉污染预测模型及阈值研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(10): 1630-1636

XU R, CAO S, LIU M, ZHANG H, LIU Y H, LYU S, DUAN Y J, ZHANG Y K, YANG Z X. Prediction model and threshold of soil cadmium contamination in cucumber greenhouses[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(10): 1630-1636

设施黄瓜菜田土壤镉污染预测模型及阈值研究*

许芮, 曹石, 刘猛, 张惠, 刘月涵, 吕诗, 段亚军,
张玉坤, 杨志新**

(河北农业大学资源与环境科学学院/河北省农田生态环境重点实验室/河北省蔬菜产业协同创新中心 保定 071000)

摘要: 为指导设施栽培的安全生产, 以设施黄瓜为研究对象, 通过连续2年镉(Cd)污染微区试验, 对设施黄瓜菜田土壤Cd污染预测模型及阈值开展研究。结果表明, 设施黄瓜土壤全量Cd和有效态Cd含量均与黄瓜Cd含量呈极显著的线性、对数、幂函数和指数关系, 其中, 全量Cd含量以指数预测模型的相关系数最高, 有效态Cd含量以线性预测模型的相关系数最高。依据国家食品卫生标准, 利用呈极显著相关的模型, 提出了基于土壤 $\text{pH} \geq 7.5$ 且质地为壤土的设施黄瓜土壤全量Cd和有效态Cd的风险阈值分别为 $2.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。利用土壤敏感性指标脲酶活性对该阈值进行验证, 结果表明土壤全量Cd污染达 $2.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时才会引起土壤脲酶活性显著下降, 而 $\leq 2.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤全量Cd含量并未对土壤脲酶产生明显影响。可见, 通过土壤脲酶指标验证后确定的阈值是可行的; 并推荐当土壤中全量 $\text{Cd} > 0.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 且 $\text{Cd} \leq 2.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($\text{pH} \geq 7.5$)时, 选择黄瓜替代其他风险作物能够满足食用农产品质量的安全要求。该研究结果可为我国北方土壤Cd污染地区设施黄瓜的安全生产提供科学理论依据。

关键词: 设施黄瓜; 镉(Cd); 风险阈值; 模型预测; 脲酶活性

中图分类号: X53

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Prediction model and threshold of soil cadmium contamination in cucumber greenhouses*

XU Rui, CAO Shi, LIU Meng, ZHANG Hui, LIU Yuehan, LYU Shi, DUAN Yajun,

ZHANG Yukun, YANG Zhixin**

(College of Resources and Environmental Science, Hebei Agricultural University / Key Laboratory for Farmland Eco-environment of Hebei / Collaborative Innovation Center of Vegetable Industry in Hebei, Baoding 071000, China)

Abstract: The accumulation of heavy metals in soil is difficult to reverse, and this threatens China's agricultural safety. Nevertheless, the current implementation of heavy metal standards involves determining the risk screening value based on the pollutant items and pH value. However, there is a risk of contamination in edible agricultural products, which cannot meet quality and safety standards. In order to guide the selection of suitable crops for different soil types to avoid the risk of cadmium (Cd) pollution and to fully utilize land under the premise of safe production, thresholds for Cd pollution of different

* 河北省重点研发计划项目(19223811D)和国家重点研发计划项目(2018YFD0800402)资助

** 通信作者: 杨志新, 主要研究方向为生态、环境质量评价与监控研究。E-mail: yangzhixin@126.com

许芮, 主要从事农业环境污染与治理研究。E-mail: 13933507769@163.com

收稿日期: 2020-03-10 接受日期: 2020-04-26

* The study was supported by the Key R&D Project of Hebei Province (19223811D) and the National Key R&D Program of China (2018YFD0800402).

** Corresponding author, E-mail: yangzhixin@126.com

Received Mar. 10, 2020; accepted Apr. 26, 2020

crops in different soil types need to be developed urgently. A Cd pollution micro-plot experiment with cucumber as the research object was conducted for two consecutive years to establish a prediction model and threshold of Cd pollution in greenhouse soils. The results showed that the total Cd and available Cd in greenhouse cucumber soil exhibited significant linear, logarithmic, power functions, and exponential relationships with the Cd content in cucumbers. The total Cd content showed the highest correlation coefficient according to the exponential model, while the available Cd content had the highest correlation coefficient according to the linear model. On the basis of soil conditions with $\text{pH} \geq 7.5$ and loamy texture, the risk thresholds for total Cd and available Cd in facility cucumber soils were proposed to be $2.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, based on extremely significant correlation models and national food hygiene standards. The proposed threshold was further verified by the soil urease activity; thereby, it was concluded that soil Cd contents less than or equal to $2.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ had no significant effect on soil urease. Hence, the determined thresholds are feasible after soil urease verification. When the Cd content in the soil is greater than $0.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and less than or equal to $2.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (soil $\text{pH} \geq 7.5$), cucumbers can be recommended to replace other risk crops to meet the quality and safety requirements of edible agricultural products. The results of this study provide a scientific and theoretical basis for cucumber planting in the Cd-contaminated soil area of northern China, and thus hold practical significance. In this study, referring to the large body of existing research on the threshold value of vegetable soil Cd, the threshold value of soil Cd obtained by the soil sensitive soil index of urease activity and by constructing a cucumber soil Cd mathematical model are mutually confirmed, and a safe and reasonable threshold value of soil Cd under the experimental conditions is obtained.

Keywords: Cucumbers in the greenhouse; Cadmium; Risk threshold; Model prediction; Urease activity

近年来,设施农业的迅猛发展为解决我国居民蔬菜需求发挥了十分重要的作用。但由于设施农业有机肥料投入量大、温度高、湿度大、光照弱等特点,造成了土壤盐渍化、酸化、重金属积累等诸多环境及质量问题^[1-5],特别是设施菜地高度集约化经营方式加重了重金属的输入^[3]。有研究表明,很多大中城市市郊土壤安全和蔬菜健康普遍受到重金属污染的冲击,个别地区出现重金属污染严重甚至造成较大污染事故的现象^[6]。根据上海、浙江湖州、湖南长沙、广西、四川成都和北京等地抽样调查,蔬菜 Cd 超标率分别为 54.1%、33.8%、51.0%、24.3%、29.4%和 30.0%^[7]。郭智广等^[8]对郑州市近郊 794 个蔬菜样品中的 Pb、Cd 污染状况进行了调查,绿叶菜类 Pb 超标率最高为 14.5%,根茎类蔬菜超标率最低为 3.3%;豆类 Cd 超标率最高达 3.8%。由此看出,土壤重金属日趋严重,尤其是 Cd 污染现状令人担忧,直接危及蔬菜食品安全,已引起学者们的高度重视。

为了防控土壤重金属污染,我国 2018 年新推出了《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)。其中,针对土壤全量 Cd 给出了明确的限量规定。即当农用地土壤全量 Cd 高于风险筛选值($0.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{pH} \geq 7.5$)、等于或者低于风险管制值($4.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{pH} \geq 7.5$)时,可能存在食用农产品不符合质量安全标准的污染风险,原则上应当采取农艺调控、替代种植等安全利用措施^[9-10]。尽管如此,如何针对土壤类型及其质地选

择适宜的作物种植以规避土壤 Cd 污染风险,尚无清晰的结论。因此,在我国耕地污染不断加剧的情况下,急需研发不同作物在不同土壤类型安全种植的 Cd 污染阈值,以做到更加精细化地指导农业安全生产,尤其是受重金属污染比较严重的蔬菜类作物。

目前,已有部分学者在蔬菜-土壤 Cd 相关关系及土壤 Cd 阈值方面开展了一些研究工作。冯艳红等^[11]、陈慧茹^[12]、赵园园^[13]研究表明,不同种类蔬菜 Cd 含量与土壤 Cd 含量均呈显著正相关,与土壤 pH 呈负相关。王小蒙等^[14]推测了不同土壤 pH 条件下种植苋菜(*Amaranthus tricolor* L.)的 Cd 污染阈值,并提出在中性和碱性土壤上,现行的苋菜土壤环境质量标准可能偏严。赵亚玲^[15]、陈小华等^[16]研究结果指出不同作物对 Cd 的耐受性表现出明显的种间差异,作物可食部分 Cd 含量与土壤 Cd 含量呈显著正相关,不同作物土壤 Cd 安全限值有显著差异。现有 Cd 污染阈值研究以中国南方酸性土壤的叶菜类作物居多,而对于中国北方潮褐土壤不同蔬菜种类研究较少,瓜果类蔬菜重金属阈值研究更加缺乏。因此,本文通过微区试验,以设施黄瓜(*Cucumis sativus* L.)为研究对象,连续两年种植,构建设施黄瓜菜田土壤 Cd 污染的预测模型,并结合土壤脲酶活性以及黄瓜 Cd 含量等指标,探究土壤全量 Cd 和有效态 Cd 的安全阈值,为蔬菜重金属风险监测和污染控制提供新思路及数据支持,指导设施蔬菜的安全生产。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试土壤采自河北省永清县设施蔬菜田。土壤类型为潮褐土, 有机质含量为 $27 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效氮含量为 $146.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效磷含量为 $400.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾含量为 $684 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全 Cd 含量为 $0.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效态 Cd 含量为 $0.005 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH 为 7.5。供试黄瓜苗来自永清县永秀蔬菜专业合作社, 品种为‘津春 3 号’。

1.2 设施黄瓜微区试验设计

试验于 2016—2017 年在河北省保定市河北农业大学蔬菜大棚内连续两年进行。将永清蔬菜大田采集的土壤自然风干后剔除石块和植物根茎, 磨碎后过 3 mm 筛, 混匀备用。设定 7 个 Cd 含量处理, 以溶液形式加入分析纯 $\text{CdCl}_2\cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$, 与土壤样品混匀后使土壤全量 Cd 含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)分别达 0.5、1.0、1.5、2.5、3.5、4.5 和 5.5, 并不添加 Cd 的背景土壤为对照(CK), 每个处理 3 个重复。在蔬菜棚内挖掘长 \times 宽 \times 深为 $1 \text{ m}\times 1 \text{ m}\times 0.5 \text{ m}$ 的微区坑, 微区坑四周及底部均设有隔离防渗措施, 使其密闭以避免引起地下水及田间清洁土壤污染。将污染处理的不同 Cd 含量土壤分别放入微区坑中, 每个微区放置 200 kg 土壤, 土壤表面与地面基本齐平, 总计 24 个微区。微区土壤按照 60% 的田间持水量平衡 3 个月, 移栽定植黄瓜幼苗, 黄瓜生长期为 6 个月, 施肥及管理方式与永清大棚温室黄瓜基本一致。在盛果期采集黄瓜果实及其对应的土壤样品, 用于测定全量 Cd、有效态 Cd 含量及土壤脲酶活性。

1.3 样品采集与制备

收获黄瓜时采集土壤样品, 经自然风干, 过 2 mm 尼绒筛, 去除生物残留及砂石。取均匀土样 300 g, 研磨过 0.15 mm 尼绒筛; 采集的黄瓜样品洗净, 晾干, 经消煮浸提制备成浸提液。

1.4 分析项目及测定方法

土壤养分含量测定采用常规分析方法: 有机质含量采用重铬酸钾外加热法; 碱解氮(速效氮)含量采用碱解扩散法; 速效磷含量采用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 碳酸钠浸提-钼蓝比色法(Olsen 法); 速效钾含量采用 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙酸铵浸提, 火焰光度计测定。

土壤和黄瓜 Cd 含量测定均由河北省地矿中心试验室完成, 测定方法如下: 土壤全量 Cd 含量采用氢氟酸-高氯酸-硝酸消化-原子吸收分光光度法(AAS)于 20~25%、湿度 30%~40% 下测定, 土壤有效态 Cd 含量采用 DTPA 提取原子吸收分光光度法,

植物 Cd 含量采用高压消解-电感耦合等离子体质谱法测定, 土壤脲酶活性用比色法测定^[17]。

1.5 数据处理方法

土壤中全量 Cd 含量与黄瓜 Cd 含量相关模型采用 Excel 2019 软件进行分析, 土壤全量 Cd 及有效态 Cd 不同含量处理之间的脲酶活性差异显著性采用 SPSS 28.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 设施黄瓜土壤全量 Cd 污染预测模型及其阈值

以连续两年微区试验土壤中全量 Cd 含量与黄瓜 Cd 含量经 Pearson 相关分析构建黄瓜-土壤全量 Cd 污染预测模型, 并根据国家食品污染限量标准($\text{Cd}\leq 0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 预测土壤全量 Cd 的安全阈值。分析表明, 连续两年黄瓜 Cd 含量与土壤全量 Cd 含量间均表现出极显著的线性、对数、幂函数与指数正相关关系, 且第 2 年的相关系数大多明显高于第 1 年(表 1), 这可能与土壤 Cd 经 1 年时间后各形态稳定所致, 也表明黄瓜 Cd 含量随着土壤全量 Cd 含量的增加而增加的显著特征。同时, 在线性、对数、幂函数与指数方程中, 第 1 年和第 2 年均以指数方程的决定系数表现最高, 分别为 0.707 和 0.927 ($P< 0.01$)。

以国家食品污染限量标准($\text{Cd}\leq 0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)为计算依据, 利用表 1 中达极显著的预测模型推算黄瓜 Cd 含量达限量时的土壤全量 Cd 含量, 作为土壤 Cd 污染的全量安全阈值。在第 1 年, 由线性方程、对数方程、幂方程与指数方程得到的土壤全量 Cd 阈值分别为 $2.27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $2.14 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $2.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $2.27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 第 2 年分别为 $3.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $2.91 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $2.67 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $2.85 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。第 2 年土壤全量 Cd 含量阈值明显高于第 1 年的阈值, 其原因与添加 Cd 随着时间的老化吸附固定有关。随时间延长, Cd 吸附固定在土壤颗粒上的量越多, 有效态 Cd 越少, 黄瓜吸收就越低, 致使土壤阈值有较大幅度提高。为了土壤环境安全与蔬菜品质考虑, 将以上两年由不同方程获得的最小值作为土壤全量 Cd 环境安全阈值。因此, 在土壤类型为潮褐土、土壤 pH ≥ 7.5 、土壤质地为壤质土的约束条件下, 土壤全量 Cd 的阈值最终确定为 $2.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.2 设施黄瓜 Cd 含量及土壤有效态 Cd 预测模型及其阈值

因土壤有效态 Cd 也是土壤环境质量评价的重要指标, 在微区黄瓜种植第 2 年进行了土壤 Cd 有效

表 1 微区试验黄瓜与黄瓜土壤全 Cd 含量相关性模型及预测的土壤全 Cd 污染的安全阈值

Table 1 Correlation model of total Cd contents between cucumber and soil, and the predicted safety threshold for pollution of soil total Cd content

| 年份 Year | 模型类型 Model | 回归方程 ¹⁾ Regression equation ¹⁾ | 决定系数 Coefficient of determination (R^2) | P | 安全阈值 Safety threshold for pollution ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 土壤 pH 范围 Scope of soil pH |
|------------|------------------------------|---|---|-------|--|------------------------------|
| 2016 | 线性方程 Linear equation | $y=43.613x+0.089$ | 0.680** | <0.01 | 2.27 | ≥ 7.5 |
| | 对数方程 Logarithmic equation | $y=1.2559\ln(x)+5.900$ | 0.627** | <0.01 | 2.14 | |
| | 幂方程 Power equation | $y=29.052x^{0.8719}$ | 0.664** | <0.01 | 2.13 | |
| | 指数方程 Exponential equation | $y=0.5388e^{28.769x}$ | 0.707** | <0.01 | 2.27 | |
| 2017 | 线性方程 Linear equation | $y=69.955x-0.2699$ | 0.918** | <0.01 | 3.22 | ≥ 7.5 |
| | 对数方程 Logarithmic equation | $y=1.1888\ln(x)+6.469$ | 0.618** | <0.01 | 2.91 | |
| | 幂方程 Power equation | $y=32.09x^{0.83}$ | 0.903** | <0.01 | 2.67 | |
| | 指数方程 Exponential equation | $y=0.374e^{40.632x}$ | 0.927** | <0.01 | 2.85 | |

1)回归方程中 x 为黄瓜 Cd 含量, y 为土壤全 Cd 含量。**表示在 $P<0.01$ 水平(双侧)极显著相关。1) In the regression equation, x is the Cd content of cucumber, y is the total Cd of soil. ** indicates a significant correlation at $P<0.01$ level (both sides).

态含量的测定, 并且对其与黄瓜 Cd 含量相关关系进行了分析, 对土壤有效态 Cd 阈值做出了预测, 如表 2 所示。黄瓜 Cd 含量与土壤有效态 Cd 含量之间的相关方程同样呈极显著正相关, 在线性方程、对数方程、幂方程与指数方程中, 线性方程的决定系数最大(0.679, $P<0.01$)。由这 4 种预测模型预测出的土壤有效态 Cd 阈值为 $0.40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.42 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.32 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 为了土

壤环境安全与蔬菜品质考虑, 选择最小值 $0.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 作为土壤有效态 Cd 土壤安全阈值。本研究也分析了土壤全 Cd 与土壤有效态 Cd 的相关关系, 其相关关系达极显著相关(0.945, $P<0.01$), 因此基于这种关系提出的土壤有效态 Cd 阈值具有其科学性和准确性。在土壤类型为潮褐土, 土壤 $\text{pH}\geq 7.5$, 土壤质地为壤质土的约束条件下, 土壤有效态 Cd 的阈值确定为 $0.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

表 2 2017 年微区试验黄瓜 Cd 含量及土壤有效态 Cd 含量相关性模型(第 2 年)及预测的土壤有效态 Cd 污染的安全阈值
Table 2 Correlation model between cucumber Cd content and soil available Cd content in 2017 (the second year) and the predicted safety threshold for pollution of soil available Cd content

| 模型类型 Model | 回归方程 ¹⁾ Regression equation ¹⁾ | 决定系数 Coefficient of determination (R^2) | P | 安全阈值 Safety threshold for pollution ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 土壤 pH 范围 Scope of soil pH |
|------------------------------|---|---|-------|--|------------------------------|
| 线性方程 Linear equation | $y=8.9987x-0.04985$ | 0.679** | <0.01 | 0.40 | ≥ 7.5 |
| 对数方程 Logarithmic equation | $y=0.26945\ln(x)+1.233$ | 0.616** | <0.01 | 0.42 | |
| 幂方程 Power equation | $y=29.883x^{1.5113}$ | 0.650** | <0.01 | 0.32 | |
| 指数方程 Exponential equation | $y=0.02511e^{46.994x}$ | 0.621** | <0.01 | 0.26 | |

1)回归方程中 x 为黄瓜 Cd 含量, y 为土壤有效态 Cd 含量。**表示在 $P<0.01$ 水平(双侧)极显著相关。1) In the regression equation, x is the Cd content of cucumber, y is the available Cd content of soil. ** indicates a significant correlation at $P<0.01$ level (both sides).

2.3 利用敏感性的土壤脲酶活性验证土壤 Cd 阈值的可行性

土壤脲酶活性对土壤中物理、化学、生物等因素以及外界环境变化比较敏感, 常被人们用来指示土壤的污染状况^[18], 尤其对土壤重金属污染的指示已被很多学者认可。曾妍骅等^[19]在 Cd 对土壤脲酶的毒理作用研究中发现, 脲酶活性随着全 Cd 的增加而减弱; 杨志新^[20]在重金属 Cd、Zn、Pb 复合污染对土壤酶活性的影响中研究表明, 以脲酶活性作为判断土壤重金属复合污染程度的生化指标具有一定的可行性; 安凤秋^[21]通过研究 Pb、Cd 对两种不同性质土壤中土壤酶和微生物量的影响, 揭示了土壤

脲酶活性可以作为表征土壤 Cd 污染的有效生物指标。因此, 本文以土壤脲酶活性为衡量指标验证 2.1 部分 Cd 阈值。

微区试验土壤全 Cd 含量与脲酶活性测定结果如图 1A 所示。结果表明, 不同浓度 Cd 污染的微区土壤中脲酶活性受 Cd 抑制的程度差异较大。当土壤受 Cd 污染程度达 $2.74 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时土壤脲酶活性显著下降, 而 Cd 含量低于 $2.74 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的范围内脲酶活性变化不显著, 即在土壤中 Cd 浓度低于 $2.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 土壤中的脲酶活性受 Cd 胁迫的影响不显著。因此, 土壤全 Cd 阈值 $2.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 经敏感性土壤脲酶活性指标验证是可行的。

微区试验土壤有效态 Cd 含量与脲酶活性测定结果如图 1B 所示。可以看出, 当土壤有效态 Cd 含量达 $0.32 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时土壤脲酶活性显著下降, 而有效态 Cd 含量低于 $0.32 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的范围内脲酶活性变化不显著。可见, 本研究确定的土壤有效态 Cd 阈值 $0.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 经敏感性土壤脲酶活性指标验证也同样可行。

结合国家农用地土壤污染风险管控标准进行分析认为, 当土壤中全量 Cd 含量大于风险筛选

值 $0.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($\text{pH} \geq 7.5$) 且小于等于风险管制值 $4.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($\text{pH} \geq 7.5$) 时, 可能存在食用农产品不符合质量安全标准等土壤污染风险, 原则上应当采取农艺调控、替代种植等安全利用措施。基于本研究结果, 在土壤类型为潮褐土, 土壤 $\text{pH} \geq 7.5$ 且土壤质地为壤质土的约束条件下, 如果土壤全量 Cd 含量 $>0.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 且 $\leq 2.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 可以推荐种植黄瓜替代其他易积累的作物, 以达到食用农产品质量安全的要求。

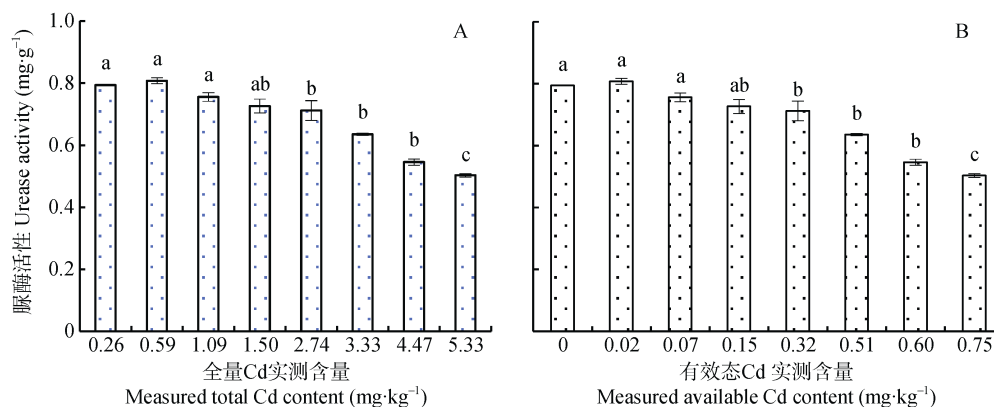


图 1 土壤全量 Cd 实测值(A)及有效态 Cd 实测值(B)含量对脲酶活性的影响

Fig. 1 Effects of measured soil total Cd (A) and available Cd (B) contents on urease activity
不同小写字母表示不同处理间差异显著。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments.

3 讨论

本研究拟合了潮褐土类壤质土 Cd 含量与黄瓜 Cd 含量的显著相关性模型, 通过国家食品污染限量标准($\text{Cd} \leq 0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 明确了土壤 Cd 含量的安全阈值, 并利用敏感性较强的土壤脲酶活性作为 Cd 污染的预警指标, 对由微区试验模型预测得出的土壤 Cd 全量及有效态阈值进行了验证, 提出了既符合国家标准又满足黄瓜蔬菜实际生长需要的 Cd 污染阈值。杨廷章等^[22]、陈彦芳等^[23]、温馨等^[24]研究表明, Cd 对土壤脲酶产生了明显的抑制作用, 并认为脲酶是指示土壤重金属污染的可靠生物指标。这些学者的研究结果均可以作为佐证土壤脲酶活性验证土壤 Cd 阈值可行性的有力证据。另外, 也有学者同样表明了不同作物中 Cd 含量与土壤中的全量 Cd、有效态 Cd 之间均存在显著的正相关, 与本研究结果相吻合^[25]。

本研究结果表明, 在土壤类型为潮褐土, 土壤 $\text{pH} \geq 7.5$ 且土壤质地为壤质土的约束条件下, 确定设施黄瓜土壤全量 Cd 的阈值为 $2.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效态 Cd 的阈值为 $0.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。目前国内外也有一些学者在其他蔬菜做了相关的研究工作。如刘香香^[26]

通过酸性黄壤土盆栽试验拟合了不同蔬菜砂壤土全量 Cd、有效态 Cd 含量与蔬菜 Cd 的线性方程, 并预测土壤全量及有效态 Cd 阈值: 小白菜(*Brassica chinensis* L.)分别为 $1.742 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.828 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 辣椒(*Oryza sativa* L.)为 $1.894 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.707 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。文典^[27]在酸性红壤土盆栽中也拟合了菜心(*Brassica campestris* L.)中 Cd 含量与土壤全量 Cd、有效态 Cd 含量间的线性回归方程, 预测全量及有效态 Cd 阈值分别为 $1.18 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 与 $0.64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。刘青栋^[28]通过辣椒试验预测石灰性土壤中全量 Cd 阈值 $2.57 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。上述所用拟合模型及其阈值均与本研究结果存在一定的差异, 这可能与土壤类型、土壤质地、土壤理化性质及作物品种等多种因素有关。

我国 2018 年新推出的《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)适用于耕地土壤污染风险筛查和分类, 包括水田及其他单独规定土壤的风险筛选值, 有利于指导现代农业生产。但这个标准仍是一个全国性的标准, 仅是根据不同 pH 范围的划分, 对于各地方具体的指导尚需要结合实际情况才能得以执行。从土壤质地来看, 同一土壤类型因土壤质地差异可以影响土壤中可被作物吸收 Cd 总量的大小。郑宏艳等^[29]、周

利军等^[30]得出的水稻(*Oryza sativa* L.)籽粒吸 Cd 能力为砂土<黏土的结论也证明了这一结果。从作物种类来看,不同农作物对重金属 Cd 的富集能力也存在着显著不同,如菠菜(*Spinacia oleracea* L.)Cd 富集量比香豌豆(*Pisum sativum* L.)高 110~175 倍^[31],同时,蔬菜种类对土壤 Cd 活性高低也有重要的影响^[32]。因此,科学构建不同种类蔬菜不同质地土壤 Cd 污染阈值具有重要的实际应用价值。本研究在潮褐土类壤质土壤上推荐了黄瓜土壤全量 Cd 和有效态 Cd 的阈值,这对于精确规避重金属污染风险具有重要的现实意义。该阈值对于南方土壤,如酸性红壤土、黄壤土等 pH 较低的土壤类型不具有适用性,而对于北方潮褐土区壤质土具有较强的适用性;此外,由于本试验所用黄瓜品种为‘津春 3 号’,不排除黄瓜品种差异对阈值存在的不确定影响,后期可进一步对潮褐土的沙质土和黏土及各种黄瓜品种开展相应的阈值研究。

4 结论

1)设施黄瓜土壤全量 Cd 和有效态 Cd 含量均与黄瓜 Cd 含量(x)呈现出了极显著的线性、对数、幂函数和指数关系,其中,全量 Cd 含量(y)以指数预测模型的相关系数表现最高,预测模型为 $y=0.538 8e^{28.769x}$,有效态 Cd 含量(y)以线性预测模型的相关系数表现最高,预测模型为 $y=8.998 7x-0.049 85$ 。

2)在土壤类型为潮褐土,土壤 $pH \geq 7.5$ 且土壤质地为壤质土的约束条件下,推荐设施黄瓜土壤全量 Cd 的阈值为 $2.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效态 Cd 的阈值为 $0.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

3)当土壤全量 Cd 含量 $>0.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 且 $\leq 2.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,在潮褐土类壤质土壤上推荐黄瓜种植替代其他易积累的作物,可使食用农产品符合质量安全的要求。

参考文献 References

- [1] 荣井荣,朱丽娟,罗中枢,等. 温室土壤与蔬菜重金属及类金属健康风险评价[J]. 环境卫生学杂志, 2018, 8(4): 307-314
RONG J R, ZHU L J, LUO Z S, et al. Health risk assessment on heavy metals and metalloids in soil and vegetables of greenhouse[J]. Journal of Environmental Hygiene, 2018, 8(4): 307-314
- [2] 孙硕,李菊梅,马义兵,等. 河北省蔬菜大棚土壤及蔬菜中重金属累积分析[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(2): 236-244
SUN S, LI J M, MA Y B, et al. Accumulation of heavy metals in soil and vegetables of greenhouses in Hebei Province, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(2): 236-244
- [3] 李杰,祝凌,仝利红,等. 蔬菜温室长期种植下土壤重金属累积风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2159-2165
LI J, ZHU L, TONG L H, et al. Risk assessment of heavy metals accumulation in soils under long-term greenhouse vegetable cultivation conditions[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(10): 2159-2165
- [4] 梁蕾,李季,杨合法,等. 长期温室菜地土壤重金属累积状况及污染评价[J]. 环境化学, 2018, 37(7): 1515-1524
LIANG L, LI J, YANG H F, et al. Soil heavy metal accumulation and risk assessment in a long-term vegetable-growing greenhouse[J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(7): 1515-1524
- [5] 茹淑华,耿暖,张国印,等. 河北省典型蔬菜产区土壤和蔬菜中重金属累积特征研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(8): 1407-1411
RU S H, GENG N, ZHANG G Y, et al. Heavy metals accumulation in soil and vegetable collected from typical vegetable production areas in Hebei Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(8): 1407-1411
- [6] 王明国,师荣光,李晓华. 重金属污染的土壤安全评价与蔬菜健康研究进展[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(24): 11705-11708
WANG M G, SHI R G, LI X H. Research progress on soil safety assessment and vegetable health under heavy metal pollution[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(24): 11705-11708
- [7] 李林艳,朱明元. 我国大米、蔬菜中铅镉污染监测的研究进展[J]. 实用预防医学, 2011, 18(9): 1812-1813
LI L Y, ZHU M Y. Research progress on monitoring of lead and cadmium pollution in rice and vegetables in China[J]. Practical Preventive Medicine, 2011, 18(9): 1812-1813
- [8] 郭智广,徐为霞,王毅红,等. 郑州地区蔬菜中铅、镉污染状况调查与分析[J]. 微量元素与健康研究, 2012, 1(1): 33-35
GUO Z G, XU W X, WANG Y H, et al. Investigation and analysis on the status of lead and cadmium pollution in vegetables in Zhengzhou[J]. Studies of Trace Elements and Health, 2012, 1(1): 33-35
- [9] 杜小平,康靖全,吕金印. 镉低积累青菜品种筛选及硫对镉胁迫下青菜镉含量和品质影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(8): 1592-1601
DU X P, KANG J Q, LYU J Y. Selection for low-Cd-accumulating cultivars of pakchoi (*Brassica chinensis* L.), effects of sulfur on Cd content, and quality characters under Cd stress[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(8): 1592-1601
- [10] 刘桂华,胡岗,秦松,等. 贵州典型酸性黄壤中 3 种叶菜类蔬菜对 Cd 累积特性及低累积品种筛选[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(1): 396-401
LIU G H, HU G, QIN S, et al. On the Cd accumulation risk features in the 3 leaf vegetables in the typical acid brown soil of Guizhou and the corresponding choice for better lower accumulated cultivars instead[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(1): 396-401
- [11] 冯艳红,王国庆,张亚,等. 土壤-蔬菜系统中镉的生物富

- 集效应及土壤阈值研究[J]. 地球与环境, 2019, 47(5): 653–661
- FENG Y H, WANG G Q, ZHANG Y, et al. Study on bioaccumulation of cadmium in soil-vegetable system and pollution threshold in soil[J]. Earth and Environment, 2019, 47(5): 653–661
- [12] 陈慧茹. 镉在水稻亚种间的吸收转运和积累差异及其低积累突变种质的创建[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2019
- CHEN H R. Absorption, transport, and accumulation of cadmium in rice cultivars and identification of low-cadmium rice mutant[D]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2019
- [13] 赵园园. 硒对镉胁迫下油菜生长及根部镉响应的调控[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019
- ZHAO Y Y. Selenium regulated plant growth and cadmium response in root of rape under cadmium stress[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019
- [14] 王小蒙, 郑向群, 丁永祯, 等. 不同土壤下苋菜镉吸收规律及其阈值研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(10): 1–8
- WANG X M, ZHENG X Q, DING Y Z, et al. Absorption rules and threshold value of amaranth cadmium under different soil types[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(10): 1–8
- [15] 赵亚玲. 土壤蔬菜中铅镉污染评价与富集特征研究[J]. 蔬菜, 2018, (12): 60–64
- ZHAO Y L. Evaluation and enrichment of lead and cadmium pollution in soil vegetables[J]. Vegetables, 2018, (12): 60–64
- [16] 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
- [17] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986
- GUAN S Y. Soil Enzymes and Their Research Methods[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986
- [18] 徐冬梅. 土壤酸性磷酸酶性质及汞、铜、锌对其影响的机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003
- XU D M. Acid phosphatase and its interaction with heavy metals, Hg(), Cu(), Zn() [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003
- [19] 曾妍骅, 梁宁, 周龙, 等. 镉对土壤脲酶的毒理作用研究[J]. 农家参谋, 2019, (10): 22
- ZENG Y H, LIANG N, ZHOU L, et al. Study on the toxicological effects of cadmium on soil urease[J]. Farmhouse Staff, 2019, (10): 22
- [20] 杨志新. 重金属复合污染对土壤酶活性及油菜的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 1998
- YANG Z X. Effects of heavy metal compound pollution on soil enzyme activity and rape[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 1998
- [21] 安凤秋. 外源重金属铅和镉对土壤生物活性及微生物群落多样性的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018
- AN F Q. Influence on soil biological activity and bacteria community diversity by exogenous lead and cadmium[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018
- [22] 杨廷章, 李龙飞, 谭添, 等. 重金属 Cd、Pb 离子对土壤酶活性的抑制影响[J]. 吉林农业, 2019, (16): 70–71
- YANG T Z, LI L F, TAN T, et al. Inhibition of soil enzyme activity by heavy metals Cd and Pb ion[J]. Jilin Agriculture, 2019 (16): 70–71
- [23] 陈彦芳, 曹柳, 马建华, 等. 土壤重金属复合污染钝化修复对酶活性的影响[J]. 河南大学学报: 自然科学版, 2020, 50(1): 1–10
- CHEN Y F, CAO L, MA J H, et al. Effect of in-situ remediation of soil contaminated with multiple heavy metals on enzyme activities[J]. Journal of Henan University: Natural Science, 2020, 50(1): 1–10
- [24] 温馨, 陈效民, 郭碧林, 等. 生物质炭添加对红壤性水稻土重金属有效性及土壤质量的影响[J/OL]. 生态学杂志, 2020, 39(4): 1183–1190
- WEN X, CHEN X M, GUO B L, et al. Effects of biochar addition on the availability of heavy metals and soil quality in red paddy soil[J/OL]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(4): 1183–1190
- [25] PARVEEN R, ABBASI A M, SHAHEEN N, et al. Accumulation of selected metals in the fruits of medicinal plants grown in urban environment of Islamabad, Pakistan[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2020, 13(1): 308–317
- [26] 刘香香. 广东省 4 种蔬菜中镉与土壤镉污染相关性及其阈值研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012
- LIU X X. Study on the relationship between soil Cd pollution and Cd contents in four kinds of vegetables and pollution threshold of soil in Guangdong Province[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012
- [27] 文典. 珠三角地区土壤中 5 种重金属在叶菜类蔬菜中的累积特征及其环境安全临界值[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012
- WEN D. Accumulation characteristics of five heavy metals in leafy vegetables and their environmental critical values in the Pearl River Delta[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012
- [28] 刘青栋. 镉在土壤-辣椒体系迁移富集及其耦合关系探究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019
- LIU Q D. Study on migration and enrichment of cadmium in soil-pepper system and its coupling relationship[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019
- [29] 郑宏艳, 刘书田, 米长虹, 等. 土壤-水稻籽粒系统镉富集主要影响因素统计分析[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(10): 1880–1888
- ZHENG H Y, LIU S T, MI C H, et al. Statistical analysis of factors affecting Cd bioaccumulation in soil-rice grain system[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(10): 1880–1888
- [30] 周利军, 武琳, 林小兵, 等. 土壤调理剂对镉污染稻田修复效果[J]. 环境科学, 2019, 40(11): 5098–5106
- ZHOU L J, WU L, LIN X B, et al. Remediation of cadmium contaminated paddy fields using soil conditioners[J]. Environmental Science, 2019, 40(11): 5098–5106
- [31] YANG J X, GUO H T, MA Y B, et al. Genotypic variations in the accumulation of Cd exhibited by different vegetables[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(8): 1246–1252
- [32] LIU J G, QIAN M, CAI G L, et al. Variations between rice cultivars in root secretion of organic acids and the relationship with plant cadmium uptake[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2007, 29(3): 189–195