

设施菜地土壤中速效磷是镉生物有效性的关键调控因子

张水勤¹, 王峰源², 姜慧敏¹, 张建峰¹, 杨俊诚^{1*}, 郭俊梅¹, 李先³, 刘恋⁴, 谢义琴⁴, 李玲玲¹

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 2. 辽宁大学环境学院, 沈阳 110036; 3. 湖南省核农学与航天育种研究所, 长沙 410125; 4. 四川农业大学资源环境学院, 成都 611130)

摘要:通过田间实地调查与取样分析, 运用简单相关、回归方程拟合和主成分分析等方法, 研究了关中设施蔬菜种植区土壤中镉(Cd)的生物有效性及其与土壤速效磷含量(AP)、有机质含量(OM)和pH值等土壤基本理化性质的相关性, 并研究了各基本理化因子对其的调控作用。结果表明: (1) 研究区内设施菜地土壤中镉的有效态含量(DTPA浸提, Cd_A)与设施菜地土壤中速效磷含量、有机质含量和pH值均存在显著相关关系($P < 0.05$), 与土壤阳离子交换量、电导率不相关。(2) 通过对土壤有效镉含量和与其呈显著相关关系的土壤基本理化性质指标分别进行回归方程拟合得出: $y_{1[Cd_A]} = 0.501 5x_{1[AP]} + 0.010 6$ ($R^2 = 0.345 2$, $P < 0.01$)、 $y_{2[Cd_A]} = 0.370 7x_{2[OM]} + 0.028 6$ ($R^2 = 0.139 0$, $P < 0.01$)、 $y_{3[Cd_A]} = -0.055 2x_{3[pH]} + 0.564 1$ ($R^2 = 0.050 9$, $P < 0.05$), 土壤中有效镉含量主要受以上三个因子的影响; 通过多元回归方程拟合, 土壤有效态镉含量的表达式为 $y_{4[Cd_A]} = 0.174 8 + 0.435 2x_{1[AP]} + 0.049 0x_{2[OM]} - 0.013 2x_{3[pH]}$ ($R^2 = 0.368 6$, $P < 0.01$); 主成分分析发现, 土壤速效磷含量是设施菜地土壤中镉的生物有效性的关键调控因子。(3) 研究区蔬菜果实中镉含量与土壤镉有效态含量的相关系数为0.464, 高于其与土壤镉全量(Cd_T)的相关系数(0.387), 从食品安全和健康风险控制的角度考虑, 在设施菜地土壤污染风险评价中, 认为以土壤镉有效态含量替代土壤镉全量可以更准确地表征土壤镉的安全风险。因此, 设施蔬菜生产过程中, 应严格控制土壤速效磷含量, 以降低土壤有效镉含量, 从而保证设施蔬菜产品的食品安全。

关键词: 设施菜地; 镉生物有效性; 关键调控因子; 速效磷

中图分类号: X820.3 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)09-1721-07 doi:10.11654/jaes.2014.09.008

Available Phosphorus is a Key Regulator of Cadmium Phytoavailability in Greenhouse Soils

ZHANG Shui-qin¹, WANG Feng-yuan², JIANG Hui-min¹, ZHANG Jian-feng¹, YANG Jun-cheng^{1*}, GUO Jun-mei¹, LI Xian³, LIU Lian⁴, XIE Yi-qin⁴, LI Ling-ling¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; 2. College of Environment, Liaoning University, Shenyang 110036, China; 3. Hunan Institute of Nuclear Agronomy and Astronautics Breeding, Changsha 410125, China; 4. College of Resource and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: A large number of soil samples from greenhouse facilities was obtained to study the phytoavailability of cadmium (Cd) and its influencing factors using correlation, regression and principal component analysis. The content of available Cd (Cd_A) in the soils was correlated significantly with soil available phosphorus (AP), organic matter (OM) and pH value ($P < 0.05$), but not with soil cationic exchange capacity and electric conductivity, implying that AP, OM and pH were the main influencing factors of Cd_A . Single regression equations of Cd_A -AP, Cd_A -OM, and Cd_A -pH were $y_{1[Cd_A]} = 0.501 5x_{1[AP]} + 0.010 6$ ($R^2 = 0.345 2$, $P < 0.01$), $y_{2[Cd_A]} = 0.370 7x_{2[OM]} + 0.028 6$ ($R^2 = 0.139 0$, $P < 0.01$) and $y_{3[Cd_A]} = -0.055 2x_{3[pH]} + 0.564 1$ ($R^2 = 0.050 9$, $P < 0.05$), respectively, while multiple regression equation $y_{4[Cd_A]} = 0.174 8 + 0.435 2x_{1[AP]} + 0.049 0x_{2[OM]} - 0.013 2x_{3[pH]}$ ($R^2 = 0.368 6$, $P < 0.01$).

收稿日期: 2014-01-28

基金项目: 农业部行业专项(201103007); 国家重点基础研究发展计划(973项目)(2013CB127406); 国家自然科学基金(21107139); 科技部科研院所技术开发研究专项资金(2012EG134235); 科技部农业科技成果转化资金(2012GB23260542); 中央级公益性科研院所专项资金(IARRP-2014-8)

作者简介: 张水勤(1988—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤环境。E-mail: shuiqin08@163.com

* **通信作者:** 杨俊诚 E-mail: yangjuncheng@caas.cn

$0.049 0 \lg x_{2[\text{OM}]} - 0.013 2 x_{3[\text{pH}]} (R^2=0.368 6, P<0.01)$ 。Principal component analysis showed that AP was the key regulator of Cd_A in the greenhouse soils. Correlation coefficient ($R=0.464$) between Cd contents in vegetable fruits (Cd_F) and soil Cd_A was higher than that ($R=0.387$) between Cd_F and total cadmium (Cd_T), suggesting that Cd_A would be better to assess Cd contamination in vegetable fruits and to predict the safety risk for vegetable production than soil Cd_F . Therefore, it is necessary to regulate soil available phosphorus to reduce Cd phytoavailability so as to guarantee the food safety of greenhouse vegetables.

Keywords: greenhouse soil; cadmium phytoavailability; key regulator; available phosphorus

我国 Cd 污染农田面积已达 $1.09 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 且呈逐年增长趋势^[1], 对农产品产地环境质量和农产品安全生产构成威胁^[2]。Cd 一般通过施肥、污水灌溉等方式进入农田土壤, 并长期滞留于耕作层^[3-4]。污染土壤中的 Cd 可通过食物链进入人体, 进而危害人类健康。近些年来, 蓬勃发展的设施蔬菜产业产地土壤重金属污染问题日益受到人们的关注。与其他利用方式的农田相比, 设施菜地土壤中有多种重金属存在着明显的累积, 其中以 Cd 的累积程度最为严重^[5]。

目前对设施菜地 Cd 的研究多集中在区域设施菜地土壤中 Cd 累积状况及特征和不同种类蔬菜对 Cd 的差异性吸收等方面^[6-7], 而对设施菜地土壤中 Cd 全量及其有效态含量与蔬菜果实中 Cd 含量的相互关系和 Cd 生物有效性的影响因素研究相对较少。本文基于关中地区典型设施菜地土壤肥力及重金属累积田间调查的分析结果, 对该地区设施菜地土壤与蔬菜中 Cd 含量之间的关系、Cd 有效态影响因素等进行了系统性地分析, 从而探讨土壤中 Cd 全量、有效态含量与蔬菜果实中 Cd 含量的相互关系及土壤中 Cd 有效态含量的影响因素, 为设施蔬菜生产过程中 Cd 的安全防控提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区基本概况

关中地区位于陕西省中部(东经 $106^\circ 18' \sim 110^\circ 37'$, 北纬 $33^\circ 35' \sim 35^\circ 50'$), 属黄河支流渭河的下冲积平原, 又称关中平原、关中盆地, 处于暖温带半湿润季风气候区, 年降水量 500~700 mm, 主要分布在 4—10 月, 年平均温度 $11 \sim 13^\circ \text{C}$, 是我国传统的蔬菜生产基地。目前, 该区设施蔬菜种植面积达 $1.22 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占陕西省设施蔬菜种植总面积的 85.4%, 是陕西省蔬菜核心生产区。

1.2 样品的采集与制备

1.2.1 土壤与蔬菜果实样品采集

2012 年 7 月在研究区选取设施蔬菜大棚 125 个, 为避免偶然性, 在该设施菜地密集种植区布点采

样, 每个采样点以 GPS 精确定位, 采用多点混合法, 即在一定面积 ($300 \sim 2250 \text{ m}^2$) 温室中采集 4~8 个表层 ($0 \sim 20 \text{ cm}$) 土样组成一个完全混合样, 按四分法保留 1 kg, 编号分装, 同时采集与土壤采样点相对应位置的蔬菜果实, 分别采集土壤、蔬菜——对应样品各 125 个, 并调查、记录每个采样点的种植年限、施肥种类及施肥量等信息。

1.2.2 样品处理

土壤样品于室温下自然风干, 除杂, 磨碎, 混匀, 依次过 2、0.149 mm 尼龙筛, 密封贮存于塑料袋中待测; 果实样品用去离子水洗净, 置于 105°C 烘箱内杀青 30 min, 75°C 烘干后, 研磨, 过 0.149 mm 尼龙筛, 待测。

1.3 测定指标与方法

土壤 Cd 全量测定参考 GB/T 17140—1997, 采用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸全消解法, ICP-MS 测定; 土壤有效 Cd 含量测定参考 GB/T 23739—2009, 采用 DTPA 浸提法, ICP-MS 测定; 蔬菜果实中 Cd 含量测定参考 GB/T 5009.15—2003, 采用硝酸-高氯酸湿式消解法, ICP-MS 测定。土壤 Cd 全量、土壤有效态 Cd 含量和植物 Cd 含量的回收率分别用标准物质 GBW 07454(陕西省洛川黄土)、GBW 07461(安徽潮土)和 GBW 10011(小麦)控制。土壤 pH、有机质含量、阳离子交换量和电导率分别采用电位法、重铬酸钾外加热法、乙酸铵法和电导法测定^[8]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 整理数据, 运用 SAS 8.0 软件进行数据分析, 利用 Origin 8.0 软件作图。

2 结果与分析

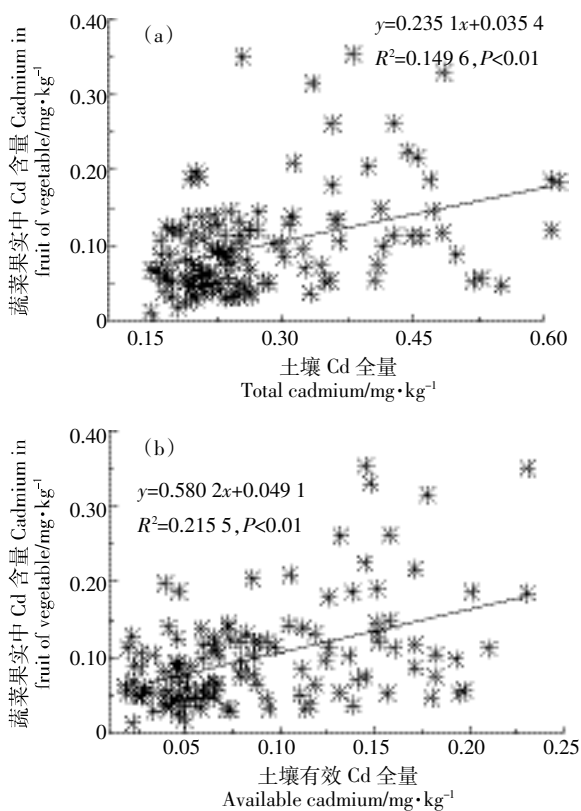
2.1 土壤 Cd 含量对蔬菜果实中 Cd 含量的影响

研究区土壤样品 ($n=125$) 中 Cd 全量 (Cd_T) 范围为 $0.15 \sim 0.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $0.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Cd 有效态含量 (Cd_A) 范围为 $0.02 \sim 0.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 蔬菜果实样品 ($n=125$) 中 Cd 含量 (Cd_F) 范围为 $0.01 \sim 0.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。运用简

单相关分析 Cd_T 与 Cd_p 、 Cd_A 与 Cd_p 之间的关系,结果(图1)表明,蔬菜果实中 Cd 的含量与土壤中 Cd 全量、有效态含量均呈极显著正相关关系($P<0.01$),但 Cd_p 与 Cd_A 的相关性($R=0.464$)高于其与 Cd_T 的相关性($R=0.387$)。运用线性回归方程拟合, Cd_p 与 Cd_A 的拟合效果($R^2=0.2155$)优于 Cd_p 与 Cd_T 的拟合效果($R^2=0.1496$)。以上结果说明蔬菜可食部位中 Cd 含量主要受土壤有效态 Cd 含量的影响,相对于 Cd 全量而言,土壤中 Cd 有效态含量能更好地反映蔬菜中 Cd 的潜在污染、预测食品中重金属安全性。

2.2 土壤理化性质对土壤 Cd 生物有效性的影响

分析结果表明,该研究区土壤中有效 Cd 含量的分异较大,变异系数为 60.69%。运用简单相关分析设施菜地土壤理化性质与 Cd 有效态含量的关系发现,土壤有效 Cd 含量分别与设施菜地速效磷含量、有机质含量、pH 值显著相关($P<0.05$),而与土壤阳离子交换量和电导率不相关。运用线性回归方程拟合的结果

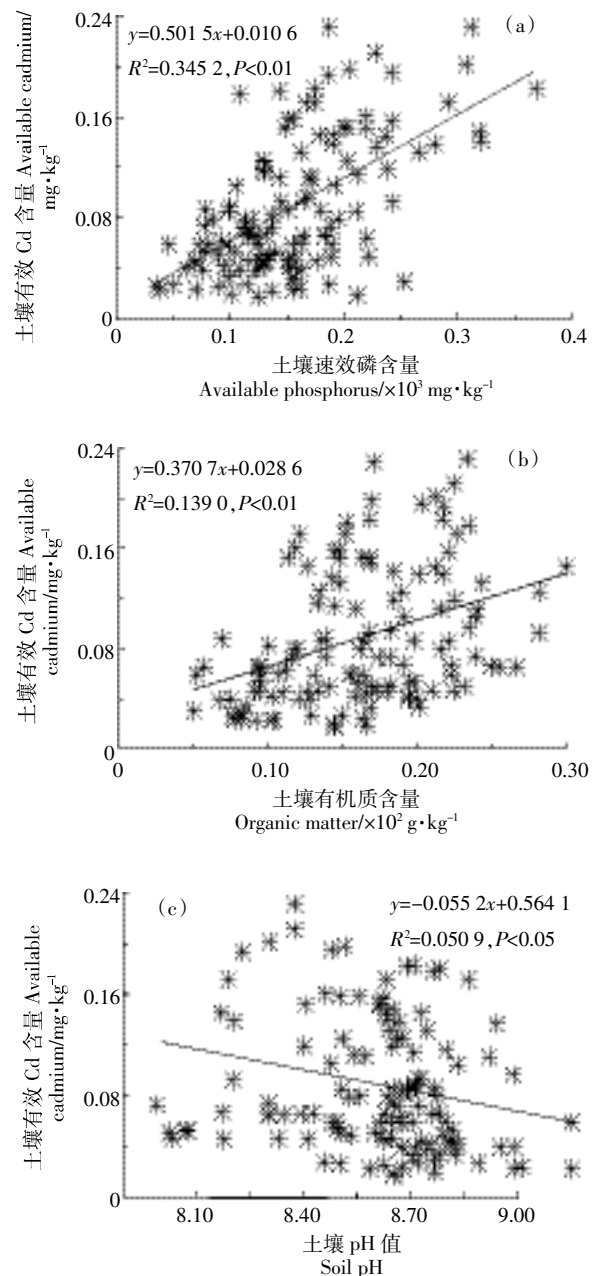


(a)式中, y 代表蔬菜果实中 Cd 含量(Cd_p), x 代表土壤 Cd 全量(Cd_T);
(b)式中, y 代表蔬菜果实中 Cd 含量(Cd_p),
 x 代表土壤镉有效态含量(Cd_A)

图1 蔬菜中 Cd 含量分别与土壤中 Cd 全量、有效态含量的回归分析($n=125$)

Figure 1 Regression between Cd_T and Cd_A and Cd_p ($n=125$)

如图2所示,土壤速效磷含量范围在 $0.04 \times 10^3 \sim 0.37 \times 10^3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,土壤速效磷每增加 $0.10 \times 10^3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤中 Cd 的有效态含量增加 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 土壤有机质含量分布在 $0.05 \times 10^2 \sim 0.30 \times 10^2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的范围内,土壤有机质含量每增加 $1.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤中 Cd 的有效态含量增加 $0.0037 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。以上结果表明,土壤 Cd



(a)式中, y 代表土壤 Cd 有效态含量, x 代表土壤速效磷含量;
(b)式中, y 代表土壤 Cd 有效态含量, x 代表土壤有机质含量;
(c)式中, y 代表土壤 Cd 有效态含量, x 代表土壤 pH 值

图2 土壤有效 Cd 含量与土壤理化性质的相关关系($n=125$)

Figure 2 Correlation between Cd_A and soil physicochemical properties ($n=125$)

有效态含量随着设施菜地土壤速效磷含量和有机质含量的增加极显著地提高($P<0.01$)。此外,由土壤Cd的有效态含量与pH值线性回归拟合结果可知,pH值每降低0.20,Cd有效态含量将增加 $0.01\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($P<0.05$),表明随着土壤酸化程度的加剧,土壤中Cd转化为有效态的部分也将增加。

2.3 影响土壤Cd有效性的主控因子分析

为进一步揭示土壤Cd生物有效性的影响因素,探讨研究区土壤各指标间的特征及相互关系,以土壤速效磷含量、有机质含量、pH值、阳离子交换量、电导率和土壤Cd有效态含量等为影响因子进行主成分分析,结果见表1。

根据主成分分析原则,选择主成分时特征向量特征值应大于1,累积方差贡献率应大于80%,考虑到本研究中样本量大等特点,选取前3个主成分进行分析,这3个主成分特征值分别是2.169、1.409、1.042,对各变量的方差贡献率分别为36.15%、23.49%和17.37%,所含信息量为总体信息量的77.01%,接近80%,足以解释原始信息。

在主成分分析的基础上,选择前3个主成分进行了因子轴正交旋转,结果如表2所示。土壤因子在各主成分上的载荷量大小反映因子在该主成分上的影响力大小,载荷量大的因子影响力大,是主要影响因子,其正负则反映因子的复合性,从而可根据因子载荷量的大小及正负评价土壤各因子之间的关系。

以第1主成分F1为横坐标,第2主成分F2为纵坐标,以其所对应特征向量的6个分量为数据点,得到这6个指标的二维因子载荷图(图3)。土壤Cd有效态含量、速效磷含量和有机质含量在主成分1上均有较大的正载荷,说明这三个因子具有较强的相关性,与相关性分析及回归方程拟合结果一致,这一类指标整体变异大,主要受肥料等农用化学用品外源输

表2 方差最大旋转后的主成分因子载荷矩阵及主要指标组合
Table 2 Principal component matrix with varimax rotation and combination of main indicators

指标 Indicator	F ₁ (Factor 1)	F ₂ (Factor 2)	F ₃ (Factor 3)
AP	0.806	0.267	-0.111
Cd _A	0.735	0.407	0.050
CEC	0.093	-0.266	0.923
EC	0.258	-0.855	-0.183
OM	0.715	0.084	0.360
pH	-0.628	0.603	0.113
主要指标 Main Indicators	AP、Cd _A 、OM	EC、pH	CEC

注:AP:速效磷;Cd_A:有效Cd;CEC:阳离子交换量;EC:电导率;OM:有机质。

入的影响;土壤电导率在主成分2上有较大的正载荷量,而土壤pH值在主成分2上有较大的负载荷,两者在第1主成分上的载荷较小,这类指标整体变异不大,主要受到土壤质地等因素的影响;土壤阳离子交换量在主成分1和主成分2上的载荷量均较小,说明阳离子交换量与第1、第2主成分上载荷量较大的因子不相关,结合主成分分析及因子轴正交旋转结果可知,其主要被第3主成分所解释。

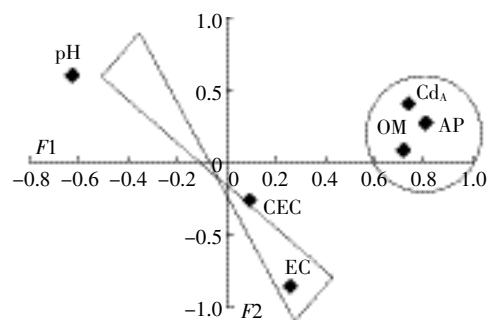


图3 各指标的二维因子载荷

Figure 3 Loading plots of PCA analysis of two-dimensional factor for the various indicators

表1 主成分分析特征值及其贡献率

Table 1 Eigenvalues and proportion of principal component analysis

主成分 Factor	特征值 Eigenvalue	贡献率/% Proportion	累积贡献率/% Cumulative proportion
1	2.169	36.15	36.15
2	1.409	23.49	59.64
3	1.042	17.37	77.01
4	0.600	10.01	87.01
5	0.481	8.01	95.02
6	0.299	4.98	100.00

3 讨论

3.1 通过土壤有效态Cd含量预测蔬菜中Cd含量

土壤中Cd以不同形态存在,而某些形态并不会被作物所吸收^[9]。大量研究结果^[10-11]表明,作物中Cd的含量与土壤中Cd总量的相关性并不显著,而与Cd的某一形态,尤其是有效态含量有关。也有研究^[12]发现,小白菜可食部位中Cd含量与土壤有效态Cd含量的相关性在相关系数和显著性方面均优于其与土壤Cd全量的相关关系。本研究发现蔬菜果实中Cd含量与土壤Cd有效态含量的相关系数($R=0.464$)高

于其与土壤 Cd 全量的相关系数($R=0.387$),同小白菜可食部位中 Cd 含量与土壤 Cd 含量的相关性研究结果一致,可见,设施菜地土壤有效态 Cd 能够更好地预测蔬菜中 Cd 的含量,对调控土壤有效态 Cd 含量、预防 Cd 污染具有重要指导意义。

3.2 土壤中 Cd 有效态含量与土壤理化性质的相关性

土壤中磷酸盐易与 Cd^{2+} 形成 CdHPO_4^0 、 $\text{CdH}_2\text{PO}_4^+$ 络合物或 $\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$ 沉淀,降低 Cd 的有效性^[13-14]。也有研究认为磷对 Cd 有效性的影响与磷的浓度有关:刘芳^[15]研究结果表明低磷浓度($<160 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)范围内,磷浓度的升高促进了 Cd 的解吸;而 Chen 等^[16]研究认为,磷肥施用量超过 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (P_2O_5)时,磷才对 Cd 的有效性有提升作用。以上研究结果表明磷对土壤中 Cd 的有效性是有影响的,但这种影响存在差异,这一差异可能与供试土壤的性质和土壤中磷与 Cd 的浓度等有关。本研究结果表明,研究区土壤中 Cd 有效态含量与速效磷含量呈极显著正相关关系($P<0.01$),这可能与土壤中速效磷含量的变化有关。土壤中速效磷含量的增加主要是由于土壤中根系分泌物等对磷的活化和外源磷的投入^[17-18]。根系活化磷的过程中分泌的质子、低分子量有机酸等都会降低磷与 Cd 形成的化合物的稳定性^[18-20],释放出磷酸根离子和 Cd 离子,使 Cd 的有效态含量随速效磷含量的提高而增加;另一方面,研究区土壤为石灰性土壤,钙磷所占比例较大,磷活化过程中, Ca^{2+} 浓度增加,与 Cd^{2+} 竞争阳离子吸附位点,从而使土壤中有效 Cd 含量增加。外源磷投入后,土壤速效磷含量升高,同时也会有较多的磷酸根被土壤胶体固定,因此土壤胶体吸附位点更多的被磷所占据,降低了其对 Cd^{2+} 的吸附;再一方面,外源磷投入中,肥料占有重要的方面,而商品磷肥中含一定量的 Cd^[21],施用磷肥在提高土壤速效磷含量的同时,也可带入以有效态形式存在的 Cd,从而提高了土壤中有效 Cd 的含量;此外,研究区土壤以磷酸氢二铵和过磷酸钙为主要磷源,它们进入土壤后,水解产生的 Ca^{2+} 、 NH_4^+ 分别与土壤中 Cd^{2+} 发生竞争吸附、络合反应,从而增加土壤溶液中水溶态 Cd 的含量,提高 Cd 的生物有效性^[22]。

土壤有机质能通过络合作用,降低 Cd 的有效态含量,因此,常被用作土壤 Cd 污染的修复材料^[9],而也有研究结果^[23]表明土壤有机质含量与 Cd 的生物有效性呈正相关关系,本研究结果进一步证明了后者的结论。原因之一:有机质对土壤中 Cd 有效性的影响与有机质的组成密切相关。有机质中低分子量的有机

酸能够促进 Cd 的移动性和生物有效性^[20],腐殖质中胡敏酸/富里酸(HA/FA)与交换态 Cd 含量之间存在显著负相关关系($P<0.05$)^[24],因此,研究区土壤有机质含量与有效 Cd 含量呈极显著正相关关系($P<0.01$),可能是由于研究区有机质中低分子量有机酸、富里酸大量存在,与 Cd 形成了较多易溶的络合物,增加了土壤溶液中 Cd 的浓度,从而提高了 Cd 的有效性。原因之二:有机质对土壤中 Cd 有效性的影响还与有机肥的投入有关。对研究区有机肥中 Cd 含量的测定发现,Cd 含量范围为 $0.16\sim 0.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而有机肥的投入又是有机质含量提升的重要原因,即土壤有机质对 Cd 有效性的影响与有机肥的投入密切相关。

研究区土壤 Cd 有效态含量与 pH 值之间存在显著的负相关关系($P<0.05$),原因可能是随着土壤 pH 值的降低,土壤中 H^+ 含量增加,Cd 的化合物、螯合物等稳定性降低,有效态 Cd 含量增加^[19];此外,土壤黏粒矿物和有机质表面负电荷会随着 H^+ 含量增加而减少。因此,土壤胶体及土壤中有机物质对 Cd 的吸附能力减弱^[25],增加了 Cd 的有效性。

3.3 土壤中 Cd 的有效态含量主要受速效磷含量调控

有研究表明,土壤有机质含量、速效磷含量、阳离子交换量和 pH 值等理化性质均对土壤中重金属化学形态的分配有较大影响^[26-28],本研究采用多元回归方程拟合土壤 Cd 有效态含量和与其呈显著相关的速效磷含量、有机质含量、pH 值的关系,得到以下方程:

$$Y_{\text{Cd}} = 0.1748 + 0.4352x_{\text{AP}} + 0.0490\lg x_{\text{OM}} - 0.0132x_{\text{pH}} \quad (R^2=0.3686, P<0.01)$$

结合主成分分析结果,土壤速效磷含量、有机质含量、pH 值在第 1 主成分中的载荷大小顺序为 $\text{AP}>\text{OM}>\text{pH}$,且土壤有效 Cd 含量在第一主成分上占有的载荷为 0.735,低于速效磷含量、高于有机质含量所占载荷,结合土壤基本理化性质与 Cd 有效态含量的线性回归分析发现,速效磷与土壤 Cd 有效态含量的拟合效果最好($R^2=0.3452$),可以推断,土壤速效磷含量是 Cd 生物有效性的主控因子。与本研究不同的是:袁波等^[12]的研究结果表明,北碚区土壤 pH 值(4.95~6.94)对菜地土壤有效态 Cd 含量影响显著,而其他土壤基本理化因子对其影响远低于 pH;邓朝阳等^[29]对不同性质土壤(pH 为 4.58~7.22)中 Cd 形态影响因素的分析结果表明,pH 是最活跃的影响因素,有机质次之,但没有考虑速效磷含量的影响。已有研究多是基于相关分析结果的显著性来分析与评价因子影响力

的大小,集中在对土壤各理化因子的单因子相关或回归分析。本研究在此基础上,又采用了主成分分析、因子轴正交旋转、多元回归等方法综合分析各理化因子对土壤中有效 Cd 含量的影响后发现,虽然 pH 值也是土壤中有效 Cd 含量的主要影响因素之一(关中设施菜地土壤 pH 为 8.00~9.15),但速效磷含量才是设施菜地土壤中 Cd 生物有效性的主控因子。结合研究区实际,这一结论显然更具有实际意义和应用价值。

有研究^[30-31]表明,随着磷酸氢二铵、磷酸二氢铵和过磷酸钙三种磷源投入量的增加,土壤 pH 值降低,土壤速效磷和有效 Cd 含量显著增加;而磷酸氢钙与磷酸三钙对土壤 pH 影响不大,钙镁磷肥能提高土壤 pH,随着三种磷源施入量的增加,土壤速效磷含量增加,有效态 Cd 含量显著降低。因此,研究区土壤施肥过程中可优先选择对土壤 pH 影响小或提高土壤 pH 的磷肥种类,如磷酸三钙、钙镁磷肥等,从而控制土壤中磷的活化及速效磷含量的过快增长,降低土壤 Cd 的生物有效性。

根据文献[32]的划分标准,菜地土壤速效磷含量在 30~60 mg·kg⁻¹ 为缺乏,60~90 mg·kg⁻¹ 为适宜,大于 90 mg·kg⁻¹ 为过高。研究区速效磷平均含量为 0.16×10³ mg·kg⁻¹,属速效磷含量过高的状况,超标(>90 mg·kg⁻¹)率达88.00%。鉴于以上分析结果,可通过控制磷肥施用量、适当减施甚至在短时期内不施磷肥等方法,以在维持温室蔬菜生产的同时,减少磷肥施用带入的 Cd。

4 结论

(1)设施菜地蔬菜果实中 Cd 含量与土壤 Cd 有效态含量的相关性强于其与土壤 Cd 全量的相关性,可以考虑以土壤 Cd 有效态含量替代土壤 Cd 全量,建立设施菜地土壤污染评价标准,以更准确地预测土壤 Cd 的环境安全风险。

(2)设施菜地土壤速效磷含量、有机质含量和 pH 值与土壤 Cd 有效态含量均呈显著相关关系($P < 0.05$),其中速效磷含量对土壤 Cd 有效态含量的影响最大,是设施菜地土壤 Cd 有效态含量的主控因子。

(3)结合研究区生产实际,建议可通过选择低 Cd 含量的肥料、改变施用磷肥的种类、适当减施甚至短时期内不施磷肥等控制磷肥施用量的方法使土壤有效磷含量保持在适宜浓度范围,进而控制土壤有效 Cd 含量的持续增加,降低设施蔬菜重金属 Cd 污染风险。

参考文献:

- [1] 胡超,付庆灵. 土壤重金属污染对蔬菜发育及品质的影响之研究进展[J]. 中国农学通报, 2007, 23(6): 519-523.
HU Chao, FU Qing-ling. Study progresses on heavy metal pollution of soil and absorption of vegetables and management[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(6): 519-523.
- [2] 赵其国,孙波,张桃林. 土壤质量与持续环境:I. 土壤质量的定义及评价方法[J]. 土壤, 1997, 29(3): 113-120.
ZHAO Qi-guo, SUN Bo, ZHANG Tao-lin. Defining soil quality for a sustainable environment; I. The definition and evaluation method of soil quality[J]. *Soils*, 1997, 29(3): 113-120.
- [3] 郭燕梅,王昌全,李冰. 重金属镉对植物的毒害研究进展[J]. 陕西农业科学, 2008, 3: 122-125.
GUO Yan-mei, WANG Chang-quan, LI Bing. The research advance in toxic hazard of heavy metal Cd on plant[J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 3: 122-125.
- [4] 祖艳群,李元,陈海燕,等. 蔬菜中铅镉铜锌含量的影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 289-292.
ZU Yan-qun, LI Yuan, CHEN Hai-yan, et al. Research on factors influencing concentrations of Pb, Cd, Cu and Zn in vegetables[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(3): 289-292.
- [5] 白玲玉,曾希柏,李莲芳,等. 不同农业利用方式对土壤重金属累积的影响及原因分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(1): 96-104.
BAI Ling-yu, ZENG Xi-bai, LI Lian-fang, et al. Effects of land use on heavy metal accumulation in soils and source analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(1): 96-104.
- [6] 徐明飞,郑纪慈,阮美颖,等. 不同类型蔬菜重金属(Pb, As, Cd, Hg)积累量的比较[J]. 浙江农业学报, 2008, 20(1): 29-34.
XU Ming-fei, ZHENG Ji-ci, RUAN Mei-ying, et al. Comparison of the amounts of heavy metals(Pb, As, Cd, Hg) accumulated by different groups of vegetables[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2008, 20(1): 29-34.
- [7] 成世才. 山东寿光蔬菜基地生态地质环境现状与选择性种植研究[D]. 山东科技大学, 2010.
CHENG Shi-cai. Seco-geology environment situation of vegetable cultivation base of Shouguang, Shandong and study on selective cultivation[D]. Shandong University of Science and Technology, 2010.
- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
LU Ru-kun, Analytical methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 2000.
- [9] Van Lune P, Zwart K B. Cadmium uptake by crops from the subsoil[J]. *Plant and Soil*, 1997, 189(2): 231-237.
- [10] Kachenko A G, Singh B. Heavy metals contamination in vegetables grown in urban and metal smelter contaminated sites in Australia[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2006, 169(1-4): 101-123.
- [11] Wallace A, Berry W L. Dose-response curves for zinc, cadmium, and nickel in combinations of one, two, or three[J]. *Soil Science*, 1989, 147(6): 401-410.
- [12] 袁波,傅瓦利,蓝家程,等. 菜地土壤铅、镉有效态与生物有效性

- 研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 130-134.
- YUAN Bo, FU Wa-li, LAN Jia-cheng, et al. Study on available and bioavailability of lead and cadmium in soil of vegetable plantation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 130-134.
- [13] Kirkham M B. Cadmium in plants on polluted soils; Effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments[J]. *Geoderma*, 2006, 137(1): 19-32.
- [14] 刘世亮, 崔海燕, 介晓磊, 等. 磷锌配施对镉污染石灰性土壤中磷锌镉有效性的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 623-626.
- LIU Shi-liang, CUI Hai-yan, JIE Xiao-lei, et al. Effect of combined application phosphorus and Zn on availability of P, Zn, Cd in Cd contaminated calcareous soil[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(2): 623-626.
- [15] 刘 芳. 石灰性土壤中磷对镉吸附及其生物有效性的影响[D]. 新疆农业大学, 2006.
- LIU Fang. Effect of phosphates on adsorption and bioavailability of cadmium in calcareous soil[D]. Xinjiang Agricultural University, 2006.
- [16] Chen S, Sun T H, Sun L N, et al. Influences of phosphate nutritional level on the phytoavailability and speciation distribution of cadmium and lead in soil[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(6): 1247-1253.
- [17] 王永壮, 陈 欣, 史 奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素[J]. 应用生态学报, 2013, 42(1): 260-268.
- WANG Yong-zhuang, CHEN Xin, SHI Yi. Phosphorus availability in cropland soils of China and related affecting factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 42(1): 260-268.
- [18] 聂艳丽, 郑 毅, 林克惠. 根分泌物对土壤中磷活化的影响[J]. 云南农业大学学报, 2002, 17(3): 281-286.
- NIE Yan-li, ZHENG Yi, LIN Ke-hui. Effect of root exudates on activation of phosphates in soils[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2002, 17(3): 281-286.
- [19] 杜彩艳, 祖艳群, 李 元. pH 和有机质对土壤中镉和锌生物有效性影响研究[J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(4): 539-543.
- DU Cai-yan, ZU Yan-qun, LI Yuan. Effect of pH and organic matter on the bioavailability Cd and Zn in soil[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2005, 20(4): 539-543.
- [20] 余贵芬, 蒋 新, 孙 磊, 等. 有机物质对土壤镉有效性的影响研究综述[J]. 生态学报, 2002, 22(5): 682-688.
- YU Gui-fen, JIANG Xin, SUN Lei, et al. A review for effect of organic substances on the availability of cadmium in soils[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2002, 22(5): 682-688.
- [21] 王江平. 入世后高浓度磷肥中镉的问题[J]. 磷肥与复肥, 2002, 17(5): 11-15.
- WANG Jiang-ping. Cd level in high-analysis phosphate fertilizer after WTO accession[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2002, 17(5): 11-15.
- [22] 张宏彦, 刘全清, 张福锁. 养分管理与农作物品质[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009: 216-230.
- ZHANG Hong-yan, LIU Quan-qing, ZHANG Fu-suo. Nutrient management and the quality of crops[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009: 216-230.
- [23] 李双异, 刘 赫, 汪景宽. 长期定位施肥对棕壤重金属全量及其有效性影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6): 1125-1129.
- LI Shuang-yi, LIU He, WANG Jing-kuan. Effects of long-term located fertilization on heavy metals and their availability in brown earth[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(6): 1125-1129.
- [24] 陕 红, 李书田, 刘荣乐. 秸秆和猪粪的施用对土壤镉有效性的影响和机理研究[J]. 核农学报, 2009, 23(1): 139-144.
- SHAN Hong, LI Shu-tian, LIU Rong-le. Availability and the related mechanisms of cadmium in soils as influenced by the application of straw or pig manure[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2009, 23(1): 139-144.
- [25] 普锦成, 符娟林, 章明奎, 等. 土壤性质对水稻土中外源镉与铅生物有效性的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2253-2258.
- PU Jin-cheng, FU Juan-lin, ZHANG Ming-kui, et al. Effect of soil properties on bioavailability of added cadmium and lead in paddy soils[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(6): 2253-2258.
- [26] Römken P, 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): 2435-2444.
- [27] Sauve S, Hendershot W, Allen H E. Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils; Dependence on pH, total metal burden, and organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, 34(7): 1125-1131.
- [28] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2010: 185.
- CHEN Huai-man. Environmental soil science[M]. 2nd Edition, Beijing: Science Press, 2010: 185.
- [29] 邓朝阳, 朱霞萍, 郭兵, 等. 不同性质土壤中镉的形态特征及其影响因素[J]. 南昌大学学报(工科版), 2012, 34(4): 341-346.
- DENG Zhao-yang, ZHU Xia-ping, GUO Bing, et al. Distribution and influence factors of Cd speciation on the soil with different properties[J]. *Journal of Nanchang University(Engineering & Technology)*, 2012, 34(4): 341-346.
- [30] 陈青云, 胡承孝, 谭启玲, 等. 不同磷源对土壤镉有效性的影响[J]. 环境科学学报, 2011, 31(10): 2254-2259.
- CHEN Qing-yun, HU Cheng-xiao, TAN Qi-ling, et al. Effect of different phosphate sources on availability of cadmium in soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(10): 2254-2259.
- [31] 区惠平, 周柳强, 刘昔辉, 等. 不同施磷量对土壤-玉米系统中镉生物有效性的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(7): 1220-1225.
- OU Hui-ping, ZHOU Liu-qiang, LIU Xi-hui, et al. Effect of phosphate fertilizer on phytoavailability of cadmium in soil-corn system[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(7): 1220-1225.
- [32] 潘可可, 朱剑桥, 孙 娟, 等. 温州设施蔬菜的施肥现状及土壤地力特征分析[J]. 上海农业科技, 2011(5): 101-104.
- PAN Ke-ke, ZHU Jian-qiao, SUN Juan, et al. Study on fertilizer application status and soil fertility characteristics of greenhouse vegetable in Wenzhou City[J]. *Shanghai Agricultural Science and Technology*, 2011(5): 101-104.