**DOI：10.11766/trxb202003030088**

段海芹，秦秦，吕卫光，薛永，孙丽娟，宋科. 有机肥长期施用对设施土壤全镉和有效态镉含量的影响[J]. 土壤学报，2021，58（6）：1486–1495.

DUAN Haiqin，QIN Qin，LÜ Weiguang，XUE Yong，SUN Lijuan，SONG Ke. Effects of Long-term Application of Organic Manure on Contents of Total and Available Cadmium in Greenhouse Soil [J]. Acta Pedologica Sinica，2021，58（6）：1486–1495.

# 有机肥长期施用对设施土壤全镉和有效态镉含量的影响*

段海芹[1, 2]，秦　秦[2, 3]，吕卫光[2]，薛　永[2†]，孙丽娟[2]，宋　科[2]

（1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院，上海 201306；2. 上海市农业科学院生态环境保护研究所，农业部上海农业环境与耕地保育科学观测实验站，上海市农业环境保护监测站，上海低碳农业工程技术研究中心，上海市设施园艺技术重点实验室，上海 201403；3. 时科生物科技（上海）有限公司，上海 201108）

**摘　要：**应用长期田间定位试验方法，比较研究了长期有机肥不同施肥方式（不施肥、有机肥常量、有机肥减量及有机肥减量配施化肥）对设施土壤镉（Cd）全量及有效态含量的影响，同时考察了其对土壤特性的影响及二者的相关性。结果表明：与不施肥的设施土壤（对照）相比，长期定量施用有机肥土壤表层（0～20 cm）Cd 全量显著降低，且随着施用量下降，这种效果更显著，但对亚表层（20～40 cm）Cd 全量无显著影响。长期施用有机肥会提高设施土壤表层 Cd 有效态含量，特别是 0～10 cm 土壤有效态 Cd 含量显著高于对照，但与有机肥常量处理相比，有机肥减量和有机肥减量配施化肥处理土壤有效态 Cd 含量分别显著降低了 17.56%和 14.04%；同时，有机肥减量配施化肥对设施土壤有机质、全氮、表层有效磷均有大幅提升，且 pH 偏高于有机肥常量。相关分析表明，设施土壤有机质、有效磷含量均与土壤 Cd 全量和有效态含量之间呈显著或极显著正相关，土壤全氮含量与 Cd 有效态含量呈显著正相关，pH 与有效态含量之间呈极显著负相关。上述结果表明有机肥适当减施，同时辅以适量化肥，可进一步改善设施土壤特性，进而控制设施土壤表层 Cd 累积。

**关键词：**设施土壤；长期施有机肥；镉；土壤特性；富集

**中图分类号：**X53　　**文献标志码：**A

# Effects of Long-term Application of Organic Manure on Contents of Total and Available Cadmium in Greenhouse Soil

DUAN Haiqin[1, 2], QIN Qin[2, 3], LÜ Weiguang[2], XUE Yong [2†], SUN Lijuan[2], SONG Ke[2]

(1. *College of Marine Ecology and Environment*, *Shanghai Ocean University*, *Shanghai* 201306, *China*; 2. *Eco-environmental Protection Research Institute*, *Shanghai Academy of Agricultural Sciences*, *Shanghai Scientific Observation and Experimental Station for Agricultural Environment and Land Conservation*, *Ministry of Agriculture*, *Shanghai Agricultural Environmental Protection Monitoring Station*, *Shanghai Engineering Research Center of Low-carbon Agriculture*, *Shanghai Key Laboratory of Protected Horticultural Technology*, *Shanghai* 201403, *China*; 3. *SEEK Bio-Technology* (*Shanghai*) *Co*., *Ltd*, *Shanghai* 201108, *China*)

* 上海市农委科技兴农重点攻关项目（202002080012F01457）、上海市自然科学基金项目（17ZR1431200）和上海市农业科学院卓越团队计划项目（2017（A-03））资助 Supported by the Agricultural Applied Technology Development Program of Shanghai Agricultural Committee of China（No.202002080012F01457），the Natural Science Foundation of Shanghai of China（No. 17ZR1431200）and the Excellent Team Program of Shanghai Academy of Agricultural Sciences（No. 2017（A-03）

† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：exueyong@163.com

作者简介：段海芹（1994—），女，山西省长治市人，硕士研究生，主要研究方向为土壤重金属污染与修复。E-mail：1965104241@qq.com

收稿日期：2020–03–03；收到修改稿日期：2020–07–07；网络首发日期（www.cnki.net）：2020–10–20

**Abstract:** 【Objective】 Greenhouse soil is a typical commercial upland soil in suburban areas of China. With heavy metals, especially cadmium, accumulating year by year the greenhouse soil gradually loses its productivity, while degrading in ecological environment and agricultural product quality. Application of organic manure is one of the main measures to improve soil fertility and soil microbial activity in greenhouse agriculture, however, the manure often carries a certain amount of heavy metals. Consequently, long-term application of organic manure will increase the input of heavy metals in soil. In order to rationalize application organic manure for better soil properties and less heavy metal pollution in greenhouse soil, it is essential to study effects of long-term application of organic manure on the contents of total and available cadmium (Cd) and physicochemical properties of the greenhouse soil, as well as their correlations. 【Method】 Soil samples were collected from 0-10 cm, 10-20 cm and 20-40 cm soil layers of greenhouses different in fertilization, that is, application organic manure at a conventional rate (M1), application of organic manure at less than the conventional rate (M2), application of organic manure at less than the conventional rate plus chemical fertilizer at a certain rate (M3) and no fertilizer or manure (the control, CK), at the Zhuanghang Experimental Station of the Shanghai Academy of Agricultural Science, China for analysis of soil physicochemical properties, total Cd and available Cd, and further relationships between soil (total and available) Cd contents and physicochemical properties. 【Result】 As compared to the control, the greenhouse applied with organic manure significantly decreased the content of total Cd in the surface (0-20 cm) soil layer, and the reduction was more significant with less manure application. However, the effect was not observed in the subsurface (20-40 cm) soil layer, and how to apply organic manure did not have any effect either. The content of available Cd in the surface soil layer was higher than that in the subsurface soil layer. Long-term application of organic manure did increase the content of available Cd content in the surface soil layer, especially the 0-10 cm soil layer, where the content of available Cd was significantly higher than that in the control. Compared with Treatment M1, Treatment M2 and Treatment M3 was significantly or 17.56% and 14.04% lower than Treatment M1, respectively, in available Cd content in the 0-10 cm soil layer. Treatment M3 was significantly higher than CK in contents of soil organic matter, soil total nitrogen, and surface soil available phosphorous, and than Treatment M1 in pH. Correlation analysis shows that the contents of organic matter and available phosphorus were significantly and positively related to the contents of total and available Cd, and so was the content of total nitrogen to the content of available Cd, however pH ultra-significantly and negatively related to the content of available Cd. 【Conclusion】All the above findings show that application of organic manure at a properly reduced rate, while applying appropriate amount of chemical fertilizer, can further improve greenhouse soil properties, and reduce accumulation and availability of Cd in the surface soil of the greenhouses.

**Key words:** Greenhouse soil; Long-term application of organic manure; Cadmium; Soil properties; Accumulation

据统计，我国约有 19.4%的农田土壤重金属含量超标，主要污染元素为镉（Cd）、汞（Hg）、砷（As）、铜（Cu）和铅（Pb）[1]。土壤重金属污染不仅会影响土壤质量与作物产量，还能通过食物链危害人体健康，如骨痛病和水俣病[2]。设施土壤是我国城郊典型的商业化旱耕土，由于重金属累积程度逐年加深，引起设施土壤生产力逐年下降和生态环境破坏，导致农产品品质和经济效益也逐渐降低。因此，改善设施土壤重金属污染和环境健康状况，对提高城郊区生态环境功能和设施农业经济效益具有重要的现实意义。

有机肥施用是设施农业生产中改善土壤地力的重要方式之一，可显著提高土壤中有机质含量，改善土壤物理化学特性，促进微生物生长繁育，提高土壤微生物活性[3-5]。同时，有机肥本身也携带一定量重金属，长期施用会提高土壤重金属的投入。索琳娜等[6]研究认为有机肥施用是土壤 Cd、铬（Cr）累积的主要原因之一。王珂等[7]和王腾飞等[8]研究发现长期施用有机肥（猪粪、牛粪）会增加土壤 Cd 全量。严露等[9]研究发现施用有机肥不仅会增加土壤 Cd 累积，还会促使土壤 Cd 向较高生物活性的赋存形态转化。也有研究表明，有机肥含有大量的有机物质，会减少土壤重金属的生物有效性，降低土壤重金属的生物毒性以及作物体内重金属的含量，

改善作物产量和品质。谢运河等[10]研究发现施用有机肥（猪粪、鸡粪）有减少土壤有效态 Cd 含量和降低活性的趋势，可降低稻米中 Cd 含量。李顺江等[11]研究表明施用有机肥会降低土壤中 Cd 和 Cr 的生物有效性，抑制小白菜对 Cd 和 Cr 的吸收，并且有提高小白菜品质的效果。但也有学者认为，有机肥对土壤重金属具有活化效应，会提高土壤重金属的移动性和生物有效性。谭长银等[12]通过长期定位试验研究发现，有机肥施用显著增加了有效态 Cd 在黑土中的累积并提高了 Cd 的生物有效性。可见，现有有机肥对土壤重金属累积和重金属活性影响的研究结果不一，而且关于相对封闭、无雨水冲淋、易造成土壤重金属累积的设施土壤研究较少。与其他重金属元素相比，重金属 Cd 已被证实具有较高移动性，极强的生物活性、累积性和毒性[13]，我国农田土壤被 Cd 污染的现象时有报道[14]，导致每年均有一定数量的农产品被 Cd 污染[15]。再者，多位学者通过调查研究，发现设施土壤 Cd 超标问题比较突出[16-17]。因此，本研究以连续六年的长期田间定位试验为基础，研究长期有机肥不同施肥方式对设施土壤 Cd 全量和有效态含量的影响，其结果可为设施农业生产合理施用有机肥、控制土壤重金属污染、提高设施农产品品质及经济效益提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试土壤：试验点位于上海市奉贤区庄行镇上海市农业科学院综合实验站设施大棚（30 °53 ′419 ″N，121 °23 ′158 ″E），供试土壤为潮土，质地砂壤，初始土壤理化性质为：pH 7.21、有机质 18.9 $g\cdot kg^{-1}$、全氮 1.50 $g\cdot kg^{-1}$、有效磷 66.53 $mg\cdot kg^{-1}$、速效钾 150 $mg\cdot kg^{-1}$，全 Cd 0.12 $mg\cdot kg^{-1}$，有效态 Cd 0.05 $mg\cdot kg^{-1}$。

供试肥料：本试验中施用的有机肥料由慧塔实业有限公司提供，主要原料为猪粪和菌渣；化肥为尿素、硫酸钾及复合肥，购于上海奉贤庄行种子场，其理化性质见表 1。

**表 1 供试肥料基本理化性质**

**Table 1** Basic physical and chemical properties of tested fertilizers and manure

| 肥料 | pH | 有机质 Organic matter/（$g\cdot kg^{-1}$） | 含水量 Water content/（$g\cdot kg^{-1}$） | N/（$g\cdot kg^{-1}$） | $P_2O_5$/（$g\cdot kg^{-1}$） | $K_2O$/（$g\cdot kg^{-1}$） | Cd/（$mg\cdot kg^{-1}$） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 有机肥① | 6.37 | 476.6 | 401.1 | 16 | 19.7 | 19.7 | 0.07 |
| 尿素② | / | / | / | 460 | / | / | 未检出⑤ |
| 硫酸钾③ | / | / | / | / | / | 520 | 0.04 |
| 复合肥④ | / | / | / | 150 | 150 | 150 | 0.27 |

注：/ 表示未检测指标。下同。Note：/ indicates not tested. The same below. ①Organic manure，②Urea，③Potassium sulfate，④Compound fertilizer，⑤Not detectable.

### 1.2 试验设计

本试验于 2013 年开始，种植模式为西瓜连作，共设 4 个处理：对照（不施肥，CK）；有机肥常量（M1），有机肥减量（M2）及有机肥减量配施化肥（M3），每个处理设置 3 次重复，每个小区面积为 22 $m^2$，各小区随机排列，各处理的肥料施用量见表 2。其中，有机肥和钾肥作为基肥一次性施入；复合肥 72%作为基肥，余下 28%在西瓜彭果期作为追肥施入，氮肥作为追肥在西瓜苗期施入。灌溉及病虫害防治等其他田间管理措施相同，均参照当地习惯进行。施肥后与耕层土壤（0～20 cm）用小型旋耕机充分混匀。试验期 6 年，每年均按相同方法和用量施用肥料。

### 1.3 样品采集与预处理

在 2018 年 8 月 7 日栽培作物收获后，采用“S”型 5 点混合采样法采集土壤样品，采样深度为 0～10 cm、10～20 cm、20～40 cm 三个土层。去除植物残体等杂物后，将土壤样品置于干燥通风处自然风干，研磨、过筛备用。

表 2　各处理的肥料施用量

**Table 2**　Fertilizers（or manure）application rate relative to treatment/（kg·hm$^{-2}$）

| 处理 Treatment | 编号 No. | 有机肥 Organic manure/（N-$P_2O_5$-$K_2O$） | 尿素 Urea/（N） | 硫酸钾 Potassium sulfate/（$K_2O$） | 复合肥 Compound fertilizer/（N-$P_2O_5$-$K_2O$） |
|---|---|---|---|---|---|
| 不施肥① | CK | / | / | / | / |
| 有机肥常量② | M1 | 18 000（288-355-355） | / | / | / |
| 有机肥减量③ | M2 | 14 000（224-276-276） | / | / | / |
| 有机肥减量配施化肥④ | M3 | 9 000（144-177-177） | 150（69） | 182（95） | 527（79-79-79） |

注：括号内为有机肥或化肥总量换算成的养分纯量。Note：The values in the brackets were the nutrient contents converted from the total amount of organic manure or chemical fertilizer. ① No fertilizer,② Organic manure application at a conventional rate，③ Organic manure application at a reduced rate，④ Organic manure application at a reduced rate supplemented with a certain rate of chemical fertilizer.

### 1.4　分析方法

土壤 pH 采用无二氧化碳蒸馏水浸提（水:土 = 2.5:1），酸度计测定；全氮采用凯氏定氮法测定；有效磷采用 0.5 mol·L$^{-1}$ 碳酸氢钠溶液浸提，钼锑抗比色法测定；速效钾采用 1 mol·L$^{-1}$ 醋酸铵溶液浸提，火焰光度计法测定；有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法分析测定[18]。土壤重金属 Cd 全量采用王水-高氯酸法消解（GB/T 17141-1997）后，用火焰原子吸收分光光度法测定；土壤有效态 Cd 含量采用二乙基三胺五乙酸（DTPA）提取法浸提后，用火焰原子吸收分光光度法测定[19]。

### 1.5　数据处理

数据结果均为 3 次重复的平均值 ± 标准差表示。采用 SPSS 21.0 和 Microsoft Excel 2012 对数据结果进行统计分析，选取最小显著差异法（LSD）进行多重比较，差异显著性水平设为 $P$<0.05。

## 2　结　果

### 2.1　有机肥不同施用方式对设施土壤理化性质的影响

由表 3 可知，不同施肥处理间设施土壤 pH 呈现不同幅度的变化，表层土壤（0～20 cm）pH 总体上低于亚表层土壤。与对照（CK）相比，施肥处理（M1、M2、M3）土壤表层（0～20 cm）pH 均显著降低（$P$<0.05），降幅分别为 0.24～1.38（0～10 cm）和 0.05～0.76（10～20 cm）。其中，纯有机肥处理（M1 和 M2）偏低于有机肥减量配施化肥处理（M3）。与此相反，在 20～40 cm 亚表层，有机肥减量配施化肥处理下土壤 pH 要高于对照，且纯有机肥处理土壤 pH 偏低于配施化肥处理。由此可见，施用有机肥易造成设施土壤表层（0～20 cm）酸化，有机肥减量配施化肥会降低土壤表层酸化程度。

同样，由表 3 可知，施肥差异对设施土壤养分含量也具有显著影响。与对照相比，有机肥常量或者有机肥减量配施化肥处理后，土壤有机质、全氮和上表层（0～10 cm）有效磷含量均有大幅提升，而纯有机肥减量处理土壤养分含量均无显著增加。与对照相比，纯有机肥减量处理土壤有效磷、速效钾和表层全氮含量均显著降低，仅上表层土壤（0～10 cm）有机质有一定增加趋势。

### 2.2　有机肥不同施用方式对设施土壤镉全量的影响

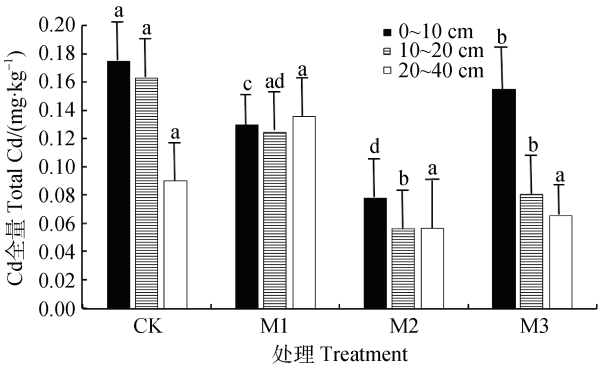
由图 1 可以看出，有机肥不同施用方式处理下设施土壤 Cd 全量呈现不同幅度的变化，表层土壤（0～20 cm）Cd 全量多数高于亚表层土壤（20～40 cm）。在 0～10 cm 土层，有机肥不同施用方式处理下土壤 Cd 全量差异显著，纯有机肥减量处理土壤 Cd 全量显著低于常量处理，而有机肥减量配施化肥处理后土壤 Cd 全量显著升高，甚至显著高于有机肥常量处理，但全 Cd 平均含量均显著低于对照。在 10～20 cm 和 20～40 cm 土层中，有机肥不同施用方式处理间土壤 Cd 全量均无显著差异（$P$>0.05），且与对照相比也同样无显著增加趋势。由此可见，设施土壤中 Cd 主要富集于表层，施用有机肥土壤中 Cd 全量总体无明显累积现象。

表 3 有机肥不同施用方式下的土壤理化性质

**Table 3** Effects of organic manure on soil physicochemical properties

| 处理 Treatment | | pH | 有机质 Organic matter/（g·kg$^{-1}$） | 全氮 Total nitrogen/（g·kg$^{-1}$） | 有效磷 Available phosphorus/（mg·kg$^{-1}$） | 速效钾 Readily available potassium /（mg·kg$^{-1}$） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0～10 cm | CK | 8.21±0.01a | 17.20±0.10c | 1.24±0.01b | 43.56±0.01b | 247.00±0.71a |
| | M1 | 6.83±0.01d | 21.10±0.11b | 1.53±0.01a | 47.61±0.01b | 204.00±0.71b |
| | M2 | 7.90±0.02c | 17.30±0.11c | 1.13±0.01c | 32.42±0.01c | 102.00±0.71d |
| | M3 | 7.97±0.01b | 23.50±0.14a | 1.63±0.01a | 53.88±0.07a | 153.00±0.01c |
| 10～20 cm | CK | 8.14±0.01a | 16.50±0.10c | 1.15±0.01a | 22.50±0.01b | 216.00±0.71a |
| | M1 | 7.38±0.01d | 22.50±0.12a | 1.16±0.01a | 25.14±0.01a | 78.00±0.71c |
| | M2 | 7.80±0.01c | 15.70±0.11c | 1.10±0.01b | 15.01±0.07c | 54.00±0.01d |
| | M3 | 8.09±0.01b | 20.10±0.10b | 1.19±0.01a | 15.42±0.01c | 87.00±0.01b |
| 20～40 cm | CK | 8.47±0.01b | 12.90±0.13b | 0.83±0.01a | 15.42±0.07a | 296.00±0.71a |
| | M1 | 8.07±0.01d | 15.20±0.11a | 0.88±0.01a | 10.96±0.07b | 65.00±0.01c |
| | M2 | 8.23±0.01c | 12.20±0.12b | 0.85±0.01a | 6.10±0.07c | 42.00±0.71c |
| | M3 | 8.63±0.01a | 13.70±0.11a | 0.95±0.01a | 8.13±0.07c | 103.00±0.71b |

注：同列数据后不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著（$P$< 0.05）。Note：Different lower-case letters affixed to the data in the same column show significant differences between treatments the same in soil layer （$P$ < 0.05）.




注：不同字母表示相同土层不同处理间差异显著（$P$<0.05）。下同。 Note：Different letters indicate significant differences between treatments the same in soil layer （$P$<0.05）. The same below.

图 1 有机肥不同施用方式处理下土壤中全镉变化

Fig. 1 Variation of total cadmium content in the soil relative to treatment

## 2.3 有机肥不同施用方式对设施土壤镉有效态含量的影响

对不同施肥方式处理的设施土壤 Cd 有效态含量比较发现，有机肥处理后上表层（0～10 cm）土壤 Cd 有效态含量显著高于对照（28.81%～55.93%），有机肥施用方式的差异对 0～10 cm 上表层土壤 Cd 有效态含量影响显著（图 2）。与有机肥常量处理相比，纯有机肥减量或者有机肥减量配施化肥处理土壤上表层（0～10 cm）有效态 Cd 含量显著降低（$P$<0.05），分别较有机肥常量处理下降 17.56%和 14.04%。在 10～20 cm 下表层，施有机肥（M1、M2、M3）土壤 Cd 有效态含量较对照无显著差异（$P$>0.05），而且有机肥不同施肥方式间差异也不显著。与表层土壤相反，施肥（M1、M2、M3）土壤亚表层（20～40 cm）Cd 有效态含量与对照相比呈下降趋势，但纯有机肥减量或有机肥减量配施化肥处理土壤有效态 Cd 含量与有机肥常量间无显著差异（$P$>0.05）。整体上，设施土壤表层 Cd 有效态含量均偏高于亚表层。

## 2.4 设施土壤重金属镉与土壤理化性质的相关性

由表 4 可看出，施有机肥（M1、M2、M3）土壤 pH 与土壤有效态 Cd 含量均呈极显著负相关，而与 Cd 全量之间无显著相关性，说明施用有机肥土壤 pH 降低的同时也会增加 Cd 在土壤中的活性。与土壤 pH 不同，施有机肥（M1、M2、M3）土壤重

金属 Cd 含量虽与土壤养分存在一定相关性，但相关程度与有机肥施用方式有关。有机肥常量处理土壤养分含量与土壤 Cd 有效态含量呈极显著正相关，而与土壤 Cd 全量之间无显著的相关性。单纯有机肥减量后，土壤速效钾、有效磷和有机质与土壤 Cd 全量呈极显著正相关，相关系数均大于 0.900，这说明重金属全 Cd 可能与土壤养分有相同的来源，土壤养分因有机肥减量而降低时，土壤中全 Cd 的携入量也会在一定程度上减少；有机肥减量配施化肥后，除土壤速效钾、有效磷和有机质外，土壤全氮也与土壤 Cd 全量存在良好的相关性，相关系数高达 0.981，说明含氮化肥的施用也可能会从源头携入一定量的 Cd，而土壤有效态 Cd 与土壤全氮、有效磷、有机质均存在极显著正相关，其中与有机质的相关系数最大。

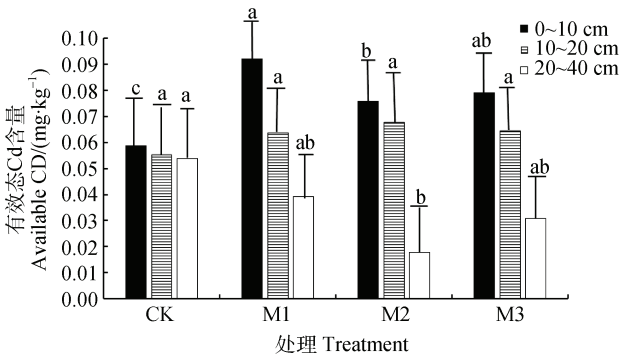



图 2　有机肥不同施用方式处理下土壤中有效态镉含量变化

Fig. 2　Variation of available cadmium content in the soil relative to treatment

**表 4　有机肥不同施用方式处理下设施土壤重金属 Cd 与土壤理化性质的相关性**

**Table 4**　Correlation analysis of total and available cadmium contents with soil physical and chemical properties

| 处理 Treatment | 指标 Index | pH | 有机质 Organic matter | 全氮 Total nitrogen | 有效磷 Available phosphorus | 速效钾 Readily available potassium |
|---|---|---|---|---|---|---|
| M1 | 全镉 Total Cd | 0.558 | –0.551 | –0.432 | –0.386 | –0.088 |
| | 有效态镉 Available Cd | –0.994** | 0.995** | 0.962** | 0.957** | 0.922** |
| M2 | 全镉 Total Cd | –0.281 | 0.997** | 0.570 | 0.938** | 0.979** |
| | 有效态镉 Available Cd | –0.938** | 0.660 | 0.956** | 0.838* | 0.748 |
| M3 | 全镉 Total Cd | –0.754 | 0.967** | 0.981** | 0.958** | 0.924** |
| | 有效态镉 Available Cd | –0.992** | 0.946** | 0.924* | 0.825* | 0.554 |

注：*为相关性达显著水平（$P<0.05$）；**为相关性达极显著水平（$P<0.01$）。Note：* is significant correlation （$P<0.05$）；** is extremely significant correlation （$P<0.01$）.

## 3　讨　论

### 3.1　有机肥长期施用对设施土壤特性和肥力的影响

随着设施栽培产业的不断发展，土壤被高度集约利用，其土壤特性和肥力特征均发生了深度变化。为了满足生产需求，保证土壤可持续利用，施肥（尤其是有机肥）通常是改善设施土壤特性和肥力的主要措施。诸多研究表明，随着有机肥施用年限的增加，土壤 pH 和有机质、全氮、有效磷等养分含量呈上升趋势[20-21]。同样，本研究结果也表明长期施用有机肥对设施土壤有机质、全氮和有效磷均具有显著增加效果，但会降低表层（0～20 cm）土壤 pH（表 3），这与谭长银等[12]研究结果一致。纯有机肥减量处理后除土壤有机质外，氮、磷养分均呈下降趋势，说明长期有机肥施用不足会造成设施土壤氮、磷养分耗竭严重，最终造成土壤肥力下降。但有机肥减量配施化肥处理后设施土壤有机质、全氮和有效磷养分含量均大幅增加，表层土壤 pH 也偏高于有机肥常量处理，表明合理有机-无机配施对缓解设施土壤表层酸化、增加土壤养分，最终对提升土壤肥力具有一定的效果。

### 3.2　有机肥长期施用对设施土壤全镉含量的影响

由于特殊的种植环境，设施土壤长期处于相对封闭的状态，有机肥在改善土壤特性和提升土壤肥力的

同时也是土壤中重金属的主要来源之一[11,22]。多数研究认为，有机肥肥源多为全国各大规模化养殖场的畜禽粪便，致使有机肥中一般具有较高含量的 Cd，长期连续施用必然会造成设施土壤 Cd 累积[8,23-24]。然而，在本研究中，各有机肥处理的设施土壤表层和亚表层（有机肥常量除外）Cd 全量均偏低于对照（图 1），原因可能是长期施用有机肥提高了栽培作物对 Cd 的吸收，使设施土壤中部分 Cd 因作物吸收而离开土体[8,25]。不同有机肥施用方式均对设施土壤上表层（0～10 cm）Cd 全量造成了显著影响（图 1）。例如，纯有机肥减量，Cd 源头携入量下降，设施土壤 Cd 全量显著降低，而有机肥减量配施化肥处理土壤 Cd 全量却呈上升趋势（图 1），结合相关性分析，认为这一方面可能是由于有机-无机配施大幅增加了土壤 0～10 cm 表土层有机质、全氮和有效磷等养分含量（表 3），影响到重金属 Cd 在设施土壤中的移动性所致[26-27]；另一方面也可能是由于含氮化肥的输入从源头携入一定量的 Cd 而增加了 Cd 在土壤中的累积，具体原因尚需结合长期有机-无机肥配施土壤理化特性和全 Cd 累积状况的动态变化做进一步分析。整体上，长期施用有机肥使设施土壤中 Cd 主要富集于表土层，这与其他研究[11,25]一致，主要是由于有机肥的长期施用提高了表层有机质含量（表 3），致使 Cd 与大量有机质发生络合而累积于表层。

### 3.3 有机肥长期施用对设施土壤有效态镉含量的影响

重金属对植物的毒害程度主要取决于土壤中重金属的有效态含量。谭长银等[12]等研究发现，长期施用猪粪可显著提高黑土表层（0～20 cm）有效态 Cd 含量。王开峰和彭娜[23]研究表明，施用有机肥可提高红壤稻田土壤表层（0～20 cm）重金属的有效态含量。王腾飞等[8]对比分析表明，长期施用猪粪肥会增加土壤表层（0～20 cm）和亚表层（20～40 cm）重金属 Cd 的有效态含量。本研究结果表明，施用有机肥会提高设施土壤表层（0～20 cm）Cd 有效态含量，而对土壤亚表层（20～40 cm）Cd 有效态含量无显著增加（图 2）。其中，有机肥常量处理土壤表层 Cd 有效态含量最高，而纯有机肥减量或有机肥减量配施化肥处理土壤表层 Cd 有效态含量较低，可见，纯有机肥减量或者与化肥合理配施对降低设施土壤 Cd 有效性具有一定的效果，其原因可能与有机肥减量从源头降低了高生物有效性 Cd 元素的带入以及土壤基本特性的改变有关。

Kirkham[28]研究认为，土壤 pH 和有机质含量是影响土壤 Cd 有效态含量的 2 个最重要因素。本研究结果表明，土壤 Cd 有效态含量与土壤 pH 呈极显著负相关，与土壤有机质呈极显著正相关（表 4），表明土壤 pH 和有机质含量均对设施土壤有效态 Cd 累积程度产生极显著影响。本研究中，长期施用有机肥降低了设施土壤表层 pH（表 3），致使施肥土壤中水合氧化物和有机质表面的负电荷减少，对重金属 Cd 离子吸附力减弱，增加了土壤中重金属 Cd 活性。同时，长期施用有机肥（减量除外）也显著增加了设施土壤表层（0～20 cm）有机质含量，有机质分解产生还原性物质，能够与重金属 Cd 形成络合物，从而减少了土壤吸附量，致使重金属 Cd 的有效态含量显著增加[29]。此外，本研究中设施土壤有效态 Cd 含量也与土壤全氮和有效磷含量呈显著甚至极显著正相关（表 4），表明土壤氮、磷养分含量对设施土壤有效态 Cd 含量也具有一定影响。

李顺江等[11]通过田间试验研究了施用有机肥对土壤-作物系统中重金属 Cd 生物有效性的影响，结果表明有机肥的施用明显降低了表层土壤 Cd 的生物活性，抑制了白菜对 Cd 的吸收。华珞等[30]及 Chang 和 Entz[31]研究表明，有机肥中的有机物质可通过吸附、螯合等作用固定重金属或者与重金属形成不可溶性盐，进而降低重金属的有效态含量，因此有机物作为重金属污染土壤改良剂被推广应用。本研究中长期施用有机肥可提高表层土壤有效态 Cd 含量的结果与上述研究产生差异的原因可能有三方面：一方面，有机物的短期和长期影响不同，致使其对土壤表层有效态重金属含量影响不同。谭长银等[12]认为短期有机物可能以固定土壤重金属为主，而随着有机物被分解（特别是缺少雨水淋溶且温、湿度高的设施土壤内），有机结合态重金属逐渐释放，提高了土壤重金属的有效态含量。杨叶晨等[22]和张云青等[32]研究发现，土壤中有效态重金属含量的高低与施用有机肥的时间进程和分解程度紧密相关，施用有机肥 6 个月后，Cd、Cu、Zn 等有效态重金属含量呈先下降后上升的趋势。吴清清等[33]研究发现，有机肥在腐解过程中对土壤强结合态重金属 Cd 具有活化效应，从而提高了 Cd 的生物有效性。另一方面，土壤自身理化特性的差异致使有机肥对土壤表层有效态重金属含量影响结果不

同。王怡雯等[4]研究表明，施用不同有机肥后土壤剖面中有机碳分布与 Cd 具有显著正相关。有机肥中含有有机酸，能降低土壤 pH，增加重金属 Cd 可溶性。也有研究认为，pH 是对土壤 Cd 溶解性影响最大的土壤特性，在土壤 Cd 含量处于临界值附近或已受 Cd 污染的土壤上，应避免施用高量的酸性肥料以及其他酸性物料[34]。王晶等[35]研究结果表明，土壤有机质的 C/N 和土壤 pH 对土壤有机态 Cd 活化过程均起到一定的辅助作用。再者，所施有机肥料种类的差异也会造成其对土壤表层重金属有效态含量影响结果不同。吴清清等[33]对比分析了两种 Cd 含量及肥效差异的有机肥料，发现施用鸡粪有机肥土壤中 Cd 有效态含量略有下降趋势，而施用垃圾有机肥土壤 Cd 有效态含量明显增加。谢运河等[10]研究认为有机肥料中有机质来源及组分差异会影响土壤 Cd 活性，如施用猪粪和鸡粪有降低 Cd 活性的趋势，而稻草则有增加土壤 Cd 活性的趋势。

## 4 结　论

设施土壤 Cd 主要富集于土壤表层( 0～20 cm )。长期连续施用有机肥后，设施土壤表层和亚表层 Cd 全量均无明显累积趋势，但表层土壤有效态 Cd 含量却显著增加。单纯有机肥减量可降低表层土壤有效态 Cd 累积程度，同时也会降低土壤有效磷、速效钾和表层全氮等养分含量，而有机肥减量配施化肥不仅可降低土壤有效态 Cd 累积程度，同时也可提升土壤 pH，增加土壤有机质、全氮和有效磷等养分含量。相关分析表明，土壤有机质、全氮和有效磷含量均与土壤 Cd 有效态含量呈显著或极显著正相关，土壤 pH 与土壤 Cd 有效态含量呈极显著负相关。可见，有机肥适当减施并辅以化肥，对改善设施土壤特性、提升土壤肥力进而控制重金属 Cd 累积具有重要作用。

**致　谢**　向上海市农业科学院生态环境保护研究所庄行综合试验站设施农业长期肥料试验的设计者郑宪清副研究员对设施大棚内初始土壤样品的提供表示衷心感谢！

**参考文献（References）**

[ 1 ] Yan D M，Guo Z H，Huang F L，et al. Effect of calcium magnesium phosphate on remediation paddy soil contaminated with cadmium using lime and sepiolite[J]. Environmental Science，2020，41（3）：1491—1497. [鄢德梅，郭朝晖，黄凤莲，等. 钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响[J]. 环境科学，2020，41（3）：1491—1497.]

[ 2 ] Guo B L，Chen X M，Jing F，et al. Effects of application of bio-organic fertilizer on heavy metals and microbial biomass in a red paddy soil[J]. Chinese Journal of Soil Science，2019，50（4）：952—957. [郭碧林，陈效民，景峰，等. 施用生物有机肥对红壤水稻土中重金属及微生物量的影响[J]. 土壤通报，2019，50（4）：952—957.]

[ 3 ] Wang W H，Liu Y，Tang H M，et al. Effects of long-term fertilization regimes on microbial biomass，community structure and activity in a paddy soil[J]. Environmental Science，2018，39（1）：430—437. [王伟华，刘毅，唐海明，等. 长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响[J]. 环境科学，2018，39（1）：430—437.]

[ 4 ] Wang Y W，Xu H，Ru S H，et al. Effects of continuous application of organic fertilizer on the distribution of organic carbon in soil profile and its relationship with heavy metals[J]. Chinese Journal of Ecology，2019，38（5）：1500—1507. [王怡雯，许浩，茹淑华，等. 有机肥连续施用对土壤剖面有机碳分布的影响及其与重金属的关系[J]. 生态学杂志，2019，38（5）：1500—1507.]

[ 5 ] Tian X M，Li J H，Wang C，et al. Effects of continuous application of bio-organic fertilizer for three years on soil nutrients，microbial biomass and enzyme activity[J]. Soils，2014，46（3）：481—488. [田小明，李俊华，王成，等. 连续 3 年施用生物有机肥对土壤养分、微生物生物量及酶活性的影响[J]. 土壤，2014，46（3）：481—488.]

[ 6 ] Suo L N，Liu B C，Zhao T K，et al. Evaluation and analysis of heavy metals in vegetable field of Beijing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2016，32（9）：179—186. [索琳娜，刘宝存，赵同科，等. 北京市菜地土壤重金属现状分析与评价[J]. 农业工程学报，2016，32（9）：179—186.]

[ 7 ] Wang K，Xu C L，Zhang Y T，et al. Cd accumulation and safety assessment of soil-crop system induced by long-term different fertilization[J]. Scientia Agricultura Sinica，2018，51（18）：3542—3550. [王珂，徐春丽，张宇亭，等. 长期不同施肥下紫色土-作物体系镉累积及安全性评估[J]. 中国农业科学，2018，51（18）：3542—3550.]

[ 8 ] Wang T F，Tan C Y，Cao X Y，et al. Effects of long-term fertilization on the accumulation and availability of heavy metals in soil[J]. Journal of Agro-Environment Science，2017，36（2）：257—263. [王腾飞，谭长银，曹雪莹，等. 长期施肥对土壤重金属积累和有效性的影响[J]. 农业环境科学学报，2017，36（2）：257—263.]

[ 9 ] Yan L，Lin Z J，Wang X，et al. Effects of organic manure fertilizers and its amendment of sulfates on availability of

arsenic and cadmium in soil-rice system[J]. Acta Pedologica Sinica，2020，57（3）：667—679. [严露，林朝君，王欣，等. 有机肥及复配硫酸盐对土壤-水稻系统砷镉有效性的调控[J]. 土壤学报，2020，57（3）：667–679.]

[ 10 ] Xie Y H，Ji X H，Wu J M，et al. Effect of different organic fertilizers on bioavailability of soil Cd and Zn[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2015，26（3）：826—832. [谢运河，纪雄辉，吴家梅，等. 不同有机肥对土壤镉锌生物有效性的影响[J]. 应用生态学报，2015，26（3）：826—832.]

[ 11 ] Li S J，Li P，Li X R，et al. The influence of concentration of chromium，cadmium in soil-crop system under different fertilizers and fertilization amount[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment，2015，32（3）：235—241. [李顺江，李鹏，李新荣，等. 不同肥源、施氮量对土壤-作物系统中铬、镉含量的影响[J]. 农业资源与环境学报，2015，32（3）：235—241.]

[ 12 ] Tan C Y，Wu L H，Luo Y M，et al. Cadmium accumulation and its development tendency in black soil under long-term fertilization[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2008，19（12）：2738—2744. [谭长银，吴龙华，骆永明，等. 长期施肥条件下黑土镉的积累及其趋势分析[J]. 应用生态学报，2008，19（12）：2738—2744.]

[ 13 ] Cui X，Wu L H，Wang W Y. Effects of soil properties on cadmium immobilization of contaminated soils in Guangdong and Hunan provinces using sepiolite and lime[J]. Soils，2019，51（3）：530—535. [崔旭，吴龙华，王文艳. 土壤主要理化性质对湘粤污染农田镉稳定效果的影响[J]. 土壤，2019，51（3）：530—535.]

[ 14 ] Li L F，Zhu C X，Zeng X B，et al. Accumulation characteristics of heavy metals in greenhouse soil and vegetables in Siping City，Jilin Province[J]. Environmental Science，2018，39（6）：2936—2943. [李莲芳，朱昌雄，曾希柏，等. 吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征[J]. 环境科学，2018，39（6）：2936—2943.]

[ 15 ] Yu H，Wang J L，Fang W，et al. Cadmium accumulation in different rice cultivars and screening for pollution-safe cultivars of rice[J]. Science of the Total Environment，2006，370（2/3）：302—309.

[ 16 ] Li S H，Zeng X B，Li L F，et al. Distribution characteristics of heavy metals in soil profile of facility vegetable fields[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2010，21（9）：2397—2402. [李树辉，曾希柏，李莲芳，等. 设施菜地重金属的剖面分布特征[J]. 应用生态学报，2010，21（9）：2397—2402.]

[ 17 ] Hou P C. Heavy metal accumulation and its risk assessment in greenhouse soils in Punan，Shanghai[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis，2014，26（6）：1609—1614. [侯鹏程. 上海松江“浦南”地区设施菜地土壤重金属含量及其风险评价[J]. 浙江农业学报，2014，26（6）：1609—1614.]

[ 18 ] Lu R K. Analytical methods for soil and agricultural chemistry [M]. China Agricultural Science and Technology Press，2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京：中国农业科学技术出版社，2000.]

[ 19 ] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing：China Agriculture Press，2000：268—270. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京：中国农业出版社，2000：268—270.]

[ 20 ] Wu J，Li J Y，Liu N. Effect of vermicompost on production，quality of tomato and soil chemical property[J]. Acta Agriculturae Shanghai，2018，34（4）：16—19. [吴珏，李建勇，刘娜. 蚯蚓粪有机肥对番茄产量、品质和土壤化学性质的影响[J]. 上海农业学报，2018，34（4）：16—19.]

[ 21 ] Xu B Z，Yu W X，Gao H F，et al. Soil pH and phosphor changing characteristics of protected vegetable plot[J]. Hunan Agricultural Sciences，2013（7）：57—60. [徐步洲，余婉霞，高和凤，等. 设施菜地土壤 pH 值与磷素变化特征研究[J]. 湖南农业科学，2013（7）：57—60.]

[ 22 ] Yang Y C，Yuan C F，Zhang J F，et al. Speciation of heavy metals in vegetable soil with different years of organic matter application [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences，2017，58（1）：78—79，89. [杨叶晨，袁承凤，张家富，等. 施用不同年限有机物设施菜地的土壤重金属形态[J]. 浙江农业科学，2017，58（1）：78—79，89.]

[ 23 ] Wang K F，Peng N. Effects of long-term integrated fertilization with organic manure and chemical fertilizers on heavy metal in paddy soil[J]. Jiangsu Agricultural Sciences，2009，37（2）：258—261. [王开峰，彭娜. 长期有机无机肥配施对红壤稻田土壤重金属的影响[J]. 江苏农业科学，2009，37（2）：258—261.]

[ 24 ] Wang Y，Xu C L，An Z，et al. Effect of dietary bovine lactoferrin on performance and antioxidant status of piglets[J]. Animal Feed Science and Technology，2008，140（3）：326—336.

[ 25 ] Han X K，Gao Y，Lou Y L，et al. Effects of long-term fertilization on the contents of Cu，Cd and its vertical distribution in the black soil[J]. Journal of Safety and Environment，2008，8（3）：10—13. [韩晓凯，高月，娄翼来，等. 长期施肥对黑土中 Cu、Cd 含量及其剖面分布的影响[J]. 安全与环境学报，2008，8（3）：10—13.]

[ 26 ] Loganathan P，Hedley M J. Downward movement of cadmium and phosphorus from phosphatic fertilisers in a pasture soil in New Zealand[J]. Environmental Pollution，1997，95（3）：319—324.

[ 27 ] Zhao X L，Qing C L，Wei S Q. Heavy metal runoff in relation to soil characteristics[J]. Pedosphere，2001，11（2）：137—142.

[ 28 ] Kirkham M B. Cadmium in plants on polluted soils：Effects of soil factors，hyperaccumulation，and amendments[J]. Geoderma，2006，137（1/2）：19—32.

[ 29 ] Wang K F，Peng N，Wang K R，et al. Effects of long-term manure fertilization on heavy metal content and its availability in paddy soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2008，22（1）：105—108. [王开峰，彭娜，王凯荣，等. 长期施用有机肥对稻田土壤重金属含量及其有效性的影响[J]. 水土保持学报，2008，22（1）：105—108.]

[ 30 ] Hua L，Bai L Y，Wei D P，et al. Effects of interaction by organic manure-Cd-Zn on Cd，Zn formation in soil and wheat growth[J]. China Environmental Science，2002，22（4）：346—350. [华珞，白铃玉，韦东普，等. 有机肥-镉-锌交互作用对土壤镉锌形态和小麦生长的影响[J]. 中国环境科学，2002，22（4）：346—350.]

[ 31 ] Chang C，Entz T. Nitrate leaching losses under repeated cattle feedlot manure applications in Southern Alberta[J]. Journal of Environmental Quality，1996，25（1）：145—153.

[ 32 ] Zhang Y Q，Zhang T，Li Y，et al. Bioavailability dynamics of heavy metals in livestock and poultry manure added to different farmland soils[J]. Journal of Agro-Environment Science，2015，34（1）：87—96. [张云青，张涛，李洋，等. 畜禽粪便有机肥中重金属在不同农田土壤中生物有效性动态变化[J]. 农业环境科学学报，2015，34（1）：87—96.]

[ 33 ] Wu Q Q，Ma J W，Jiang L N，et al. Effect of poultry and household garbage manure on the growth of *Amaranth tricolor* L. and heavy metal accumulation in soils[J]. Journal of Agro-Environment Science，2010，29（7）：1302—1309. [吴清清，马军伟，姜丽娜，等. 鸡粪和垃圾有机肥对苋菜生长及土壤重金属积累的影响[J]. 农业环境科学学报，2010，29（7）：1302—1309.]

[ 34 ] Zhao J，Feng W Q，Qin Y S，et al. Effects of application of nitrogen，phosphorus and potassium fertilizers on soil pH and cadmium availability[J]. Acta Pedologica Sinica，2010，47（5）：953—961. [赵晶，冯文强，秦鱼生，等. 不同氮磷钾肥对土壤 pH 和镉有效性的影响[J]. 土壤学报，2010，47（5）：953—961.]

[ 35 ] Wang J，Zhu P，Zhang N，et al. Effect of fertilization on soil active C and C pool management index of black soil[J]. Chinese Journal of Soil Science，2003，34（5）：394—397. [王晶，朱平，张男，等. 施肥对黑土活性有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 土壤通报，2003，34（5）：394—397.]

（**责任编辑：**陈荣府）