

# Effects of Organic Fertilizer on Heavy Metal Pollution in Different Types of Farmland

Yanli Xu, Ying Li, Meixiao Yin, Lei Zheng, Yonglan Tian\*, Huayong Zhang

Research Center for Engineering Ecology and Nonlinear Science, North China Electric Power University, Beijing

Email: [yonglantian@ncepu.edu.cn](mailto:yonglantian@ncepu.edu.cn)

Received: Aug. 3<sup>rd</sup>, 2019; accepted: Aug. 22<sup>nd</sup>, 2019; published: Aug. 29<sup>th</sup>, 2019

## Abstract

In order to recognize the status of heavy metal enrichment and pollution in different types of farmland soil with the application of organic fertilizer, explore its prevention and control methods, ensure the quality and safety of plants, the lettuce soil and strawberry soil in one of the greenhouses in Hebei province were studied. Before cultivating the lettuce and strawberry, the organic fertilizer home-made by the park was applied into the soil, and organic fertilizer was added during the growth of plants. The surface soil before fertilization and during the ripening period of the plants was then collected. The heavy metals, including copper (Cu), zinc (Zn), nickel (Ni), plumbum (Pb), chromium (Cr), cadmium (Cd), and arsenic (As) were measured and compared with the risk screening values. The pollution degrees of heavy metals in soil were evaluated comprehensively by single factor pollution index method, Nemerow comprehensive pollution index method, geoaccumulation index method and potential ecological hazard index method, respectively. The results showed that the contents of Zn, As, Cd, Pb and Cr in lettuce soils at ripening stage increased compared with those before fertilization, and the contents of six heavy metals except Ni in strawberry soils at ripening period also increased to a certain extent. The contents of seven heavy metals in lettuce and strawberry soils before fertilization and during the ripening period of the plants were lower than the risk screening values. According to the single factor pollution index and Nemerow comprehensive pollution index, the heavy metal pollution in lettuce soil and strawberry soil before fertilization and during the ripening period of the plants did not exceed the standard. The evaluation results of the geoaccumulation index showed that the application of organic fertilizer had a great influence on the geoaccumulation index of Zn in lettuce soil, which made Zn in lettuce soil slightly polluted during the ripening period of the plants. Application of organic fertilizer had a prominent effect on the geoaccumulation index of Zn, Cd and Pb in strawberry soil, making Cd in strawberry soil during the ripening period of the plants close to moderate pollution, while Zn and Pb were also slightly polluted. Results of potential ecological hazard index evaluation showed that Cd in lettuce soil during the ripening period of the plants reached moderate ecological hazard and the total potential ecological index enhanced after applying organic fertilizer. After the application of organic fertilizer, the moderate ecological harm of Cd in strawberry soil before fertilization reached the strong ecological hazard during the ripening period of the plants, and at the same time, the total potential ecological index was greatly improved. Therefore, the application of organic fertilizer had a significant impact on the pollution of Zn and Cd in lettuce soil and Zn, Pb and Cd in strawberry soil, in that the further production and application of organic fertilizer

\*通讯作者。

should be mainly controlled.

## Keywords

Organic Fertilizer, Heavy Metal Pollution, Risk Screening Value, Geoaccumulation Index, Potential Ecological Hazard Index

# 有机粪肥施加对不同类型农田土壤重金属污染的影响

徐艳丽, 李莹, 阴美晓, 郑磊, 田永兰\*, 张化永

华北电力大学工程生态学与非线性科学研究中心, 北京

Email: yonglantian@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2019年8月3日; 录用日期: 2019年8月22日; 发布日期: 2019年8月29日

## 摘要

为认识施加有机粪肥条件下, 不同类型农田土壤重金属富集现状和污染危害, 探索其防控途径, 为有机粪肥的施用、重金属污染防治提供科学依据, 确保作物质量安全, 选择河北省某大棚生菜土和草莓土为研究对象, 种植作物前在土壤中施加园区自制有机粪肥为底肥, 作物生长过程中追加有机粪肥, 采集施肥前和作物成熟期表层土壤, 测定土壤中重金属铜(Cu)、锌(Zn)、镍(Ni)、铅(Pb)、铬(Cr)、镉(Cd)、和砷(As)的含量, 与风险筛选值进行比较, 并采用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、地累积指数法和潜在生态危害指数法对土壤重金属污染程度进行综合评价。结果表明: 受到施加有机粪肥的影响, 作物成熟期生菜土中Zn、As、Cd、Pb和Cr含量相对于施肥前都有所增加, 作物成熟期草莓土中除了Ni以外的六种重金属含量也都有一定程度的升高。施肥前和作物成熟期生菜土和草莓土中七种重金属的含量均低于风险筛选值。从单因子污染指数和内梅罗综合污染指数来看, 施肥前和作物成熟期生菜土和草莓土中的重金属污染都未超标。地累积指数的评价结果表明, 有机粪肥的施加对生菜土中Zn的地累积指数影响较大, 使作物成熟期生菜土中的Zn处于轻度污染。施加有机粪肥对草莓土中Zn、Cd和Pb的地累积指数影响较大, 使作物成熟期草莓土中的重金属Cd接近中度污染, Zn和Pb也存在一定的轻度污染。潜在生态危害指数评价结果分析表明, 施加有机粪肥后, 作物成熟期生菜土中的Cd达到了中度生态危害, 总的潜在生态指数也有所增加; 草莓土中Cd由施肥前的中度生态危害达到生物成熟期的强生态危害, 同时极大地提高了总的潜在生态指数。因此, 施加有机粪肥对生菜土中的Zn和Cd以及草莓土中Zn、Pb和Cd的污染作用较大, 在进一步生产和施用有机粪肥时应重点把控。

## 关键词

有机粪肥, 重金属污染, 风险筛选值, 地累积指数, 潜在生态危害指数

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

土壤是农业最基本的生产资料，是农业发展的基础，是不可再生的自然资源。土壤重金属污染是世界性的重大环境问题。有调查显示，我国受重金属污染的耕地面积已达 2000 万  $\text{hm}^2$ ，占全国总耕地面积的 1/6，全国每年因重金属污染的粮食高达 1200 万 t，造成的直接经济损失超过 200 亿元[1] [2]。

重金属主要是指密度大于  $5.0 \text{ g/cm}^3$  的金属元素，包括铜(Cu)、锌(Zn)、镍(Ni)、铅(Pb)、铬(Cr)、镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、铁(Fe)、锰(Mn)、钼(Mo)、钴(Co) [3]。有调查表明，我国耕地土壤质量堪忧，其点位超标率为 19.4%，主要无机污染物是 Cd、Ni、As、Pb、Cu、Hg [4]。重金属污染的加剧导致土壤中的有益菌大量减少，土壤质量下降，自净能力减弱，影响农作物的产量与品质，危害人体健康[5]，如我国有些稻米含 Cd 浓度已超过诱发“骨痛病”的含 Cd 标准；某些大中城市污灌区的癌症死亡率比对照区高 10~20 倍[6]。另外，重金属元素还会通过人类的皮肤、呼吸道和消化道等潜入人体内，严重情况下它们会损害人体的新陈代谢功能，甚至会造成人体生理器官的损坏[7]。

重金属污染风险评价是判断重金属污染水平的重要手段。张凌云等人[8]采用单污染指数法和内梅罗综合污染指数法对南充市不同区域土壤质量进行了评价，结果表明，南充市农村土壤重金属平均内梅罗综合污染指数为 1.01，受到了重金属轻微污染，主要重金属污染物为 Hg、Ni、Cu 和 Zn。赵庆令等人[9]以济宁城区南部农田为研究区域，采集 77 个土壤样品进行调查，用地累积指数法分析区内 8 种重金属元素的污染程度，均表明土壤环境中 Hg、Cd 为轻度污染程度，其他 6 种元素均为无污染。李一蒙等人[10]采用潜在生态危害指数评价开封市土壤中 As、Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的潜在生态危害程度，结果表明，开封城市土壤中 Cd 存在极强生态危害，其余元素均为轻度危害。

土壤中重金属的来源有自然源和人类活动。自然源主要是地质活动，如岩石风化、火山喷发等，人类活动主要有农业活动、工业污染、生活污染等[11]。已有研究表明人类活动对土壤重金属污染物具有重要的贡献[12] [13]，包括施肥、养殖场粪便的排放、污水灌溉，大气沉降等[14]。Luo 等人[15]研究表明，Cu 和 Cr 主要受农业活动的影响，Pb 主要来自于工业污染的大气沉降。Niu 等人[16]对中国大陆的农田土壤重金属进行了风险评估，认为土壤中 Pb、Cd、Zn 和 Cu 可能与施加有机粪肥相关。据报道，牲畜粪便便是农业土壤中重金属的主要来源之一，对 Cd、Cu 和 Zn 的贡献率为 55%、69%和 51% [15]。当前有机粪肥的施用正普遍推广，一方面可以减少粪便污染，另一方面可以提高作物产量。然而有机粪肥中的重金属随着施用过程逐渐进入土壤，可能造成重金属的富集和污染风险，需要重点关注和分析。

本研究选取了河北省某施用有机粪肥的大棚内生菜土和草莓土作为研究对象，通过对土壤中 Zn、Ni、Pb、As、Cd、Cr 和 Cu 含量进行分析，结合农用地土壤污染风险管控标准中的风险筛选值进行重金属含量评价，采用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、地累积指数法和潜在生态危害指数法对研究区域的重金属污染情况及潜在生态危害进行定量评价，综合分析有机粪肥施加对土壤环境质量造成的影响，以期有机粪肥施加的农田土壤的安全与重金属污染防控提供参考依据。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 样品采集与处理

本研究选用大棚生菜土和草莓土作为研究对象，是北方地区具有代表性的两种大棚土壤。一方面，生菜和草莓具有一定的经济价值，在北方地区的大棚种植较为普遍；其次，大棚生菜和草莓种植期与收割期较为接近，通过对比可以得出不同类型土壤的性质差异。选取的生菜大棚和草莓大棚常年种植生菜和草莓，6 月将玉米秸秆与土壤混合，7 月添加 5 方自制有机粪肥和土的混合物作为底肥，覆膜高温杀菌约 1 个月，之后利用模具人工成垄，并于 8 月底 9 月初在草莓大棚播种草莓，9 月中下旬在生菜大棚种

植生菜, 12 月份生菜和草莓都到达了成熟期。在生菜大棚和草莓大棚内采用等距取样法进行样品采集, 生菜每隔 16 垄、草莓每隔 25 垄取耕作层(0~20 cm)的农田土壤 1 kg, 分别取 5 次, 当场充分混匀, 采用四分法平铺成圆形, 分成四等分, 取相对的两份混合, 然后再平分, 直到样品大约为 1 kg 为止。将所采集的土壤样品带回实验室, 摊平在塑料薄膜上, 室温自然风干, 避免阳光照射。样品风干后用陶瓷研钵研磨, 使土壤样品全部通过 100 目尼龙筛, 分装、备用。

河北省作为我国畜牧业最发达的地区之一, 规模化养殖场畜禽粪便有机肥的农田利用是最经济有效的资源化利用和污染控制途径[17]。生菜种植和草莓种植每年都施加有机粪肥, 生菜和草莓种植过程中施肥分为底肥与追肥。粪肥取自周边小型养殖场, 夏天将粪肥进行堆放发酵。草莓的生长过程中每月施用 2~3 次粪肥, 每次用量大约为 7.5 方/亩。种植生菜时, 从种植到收割追肥两次, 每次施用有机粪肥为 10 方/亩。自制有机粪肥是鸡粪有机肥, 鉴于鸡的生理特点, 鸡摄入的饲料并没有完全消化吸收, 约有 40%~70%的营养物被排出体外, 因此鸡粪在所有禽畜粪便当中养分是最高的。采用好氧发酵, 将鸡粪的蛋白质等大分子分解成小分子, 作物可直接吸收。通过生物技术, 将鸡粪进行灭菌、无害化处理和腐熟彻底, 生产出来的有机肥料在所有有机肥料中是最好的。自制鸡粪有机肥是先在鸡粪中加入适量酵母拌匀, 放在阳光下曝晒, 发酵过程中做好水分管理, 翻动混合物进行温度调节。最后将这些经过发酵处理的腐熟鸡粪有机肥贮存起来, 待需要的时候再取出来施用。所施用有机粪肥中的重金属含量见表 1。

**Table 1.** Heavy metal content in organic fertilizer

**表 1.** 所施用有机粪肥中的重金属含量

指标	Zn	Ni	As	Cd	Pb	Cr	Cu
含量(mg/kg)	135.7	19.6	5.8	0.04	6.6	38.8	低于检测线(<0.0005%)

## 2.2. 样品测定与分析

土壤 pH 值测定: 称取过 100 目尼龙筛的风干土壤 10 g, 放入装有 25 ml 去离子水的烧杯中, 用玻璃棒搅拌均匀后, 放置 30 min 钟后取上清液用 pH 计(雷磁 PHS-3C 型)进行测定。土壤样品经  $\text{HNO}_3\text{-HCl-HClO}_4$  消煮, 土壤中 Zn、Ni、Cu 和 Cr 采用 iCE3300 AAS 原子吸收光谱仪测定[18] [19]; Pb 和 Cd 采用 AI1200 石墨炉原子吸收光谱仪进行测定[20]; As 含量采用 AFS-230 型双道原子荧光光度计测定[21]。样品在测试过程中通过平行双样方式进行质量控制。

## 2.3. 评价标准与方法

### 2.3.1. 重金属含量评价标准

土壤中重金属含量的评价标准采用(GB 15618-2018)《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》要求进行。根据标准中的农用地土壤风险筛选值与实际土壤中重金属含量的关系, 划分重金属元素污染风险和进一步环境质量评估。风险筛选值的具体数值见表 2。农用地土壤风险筛选值是指农用地土壤中重金属污染物的含量等于或低于该值, 对农产品的质量、农作物生长或土壤生态环境的风险低, 一般情况下可以忽略[22]; 若超过该值的, 对农产品的质量、农作物生长或土壤生态环境可能存在风险, 应当加强土壤环境监测和农产品协同监测, 原则上应该采取措施进行修复, 以保障安全利用[22]。

### 2.3.2. 评价方法

#### 1) 单因子污染指数法

单因子污染指数法是指某种重金属污染物的实测值与该重金属的评价标准的比值, 用得出的比值对土壤环境的污染程度进行评判分级, 确定土壤污染程度的方法[23]。

**Table 2.** Screening value of soil pollution risk of agricultural land (mg/kg)**表 2.** 农用地土壤污染风险筛选值(单位 mg/kg)

序号	污染物项目	污染物项目	风险筛选值			
			pH ≤ 5.5	5.5 < pH ≤ 6.5	6.5 < pH ≤ 7.5	pH > 7.5
1	镉(Cd)	水田	0.3	0.4	0.6	0.8
		其他	0.3	0.3	0.3	0.6
2	砷(As)	水田	30	30	25	20
		其他	40	40	30	25
3	铅(Pb)	水田	80	100	140	240
		其他	70	90	120	170
4	铬(Cr)	水田	250	250	300	350
		其他	150	150	200	250
5	铜(Cu)	果园	150	150	200	200
		其他	50	50	100	100
6	镍(Ni)		60	70	100	190
7	锌(Zn)		200	200	250	300

注：① 重金属和类重金属 As 均按元素总量计。② 对于水旱轮作地，采用其中较严格的风险筛选值。

其计算公式为：

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中： $P_i$  为土壤中污染物  $i$  的单因子污染指数； $C_i$  为土壤中污染物  $i$  的实测含量，单位与  $S_i$  保持一致； $S_i$  为土壤污染物  $i$  的评价标准量，以国家标准农用地土壤污染风险筛选值作为评价标准。 $P_i$  越大，其受污染程度越高，不同的单因子污染指数对应的土壤污染超标等级见表 3。

**Table 3.** Evaluation of soil heavy metal content by single factor index method**表 3.** 土壤重金属含量单因子指数法评价超标分级标准

等级	单因子污染指数 $P_i$	评价等级
1	$P_i \leq 1$	无污染
2	$1.0 < P_i \leq 2.0$	轻微污染
3	$2.0 < P_i \leq 3.0$	轻度污染
4	$3.0 < P_i \leq 5.0$	中度污染
5	$P_i > 5.0$	重度污染

## 2) 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法用来评价土壤综合超标或污染情况，突出最高一项超标指数的作用[24]。

计算公式如下：

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(P_{i\text{max}})^2 + (\bar{P}_i)^2}{2}} \quad (2)$$



式中： $P_{综}$ 为土壤综合评价指数； $P_{i\max}$ 为重金属单因子污染指数最大值。 $\bar{P}_i$ 为土壤各重金属单因子污染指数平均值。

其计算公式为：

$$\bar{P}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (3)$$

内梅罗综合污染指数高低对应的土壤污染超标等级及水平参见表4。

**Table 4.** Evaluation of soil heavy metal content by Nemerow comprehensive pollution index method

**表 4.** 土壤重金属含量内梅罗综合污染指数法评价超标分级标准

等级	综合污染指数 $P_{综}$	污染程度
1	$P_{综} \leq 0.7$	未超标
2	$0.7 < P_{综} \leq 1$	轻微超标
3	$1.0 < P_{综} \leq 2.0$	轻度超标
4	$2.0 < P_{综} \leq 3.0$	中度超标
5	$P_{综} > 3.0$	重度超标

### 3) 地累积指数法

地累积指数  $I_{geo}$ ，也被称为 Muller 指数。地累积指数除了考虑到地球化学背景值对重金属污染物的影响，还能够评估人为活动对重金属累积的作用[25]。

该指数的计算公式如下：

$$I_{geo} = \log_2 \left[ \frac{C_i}{(k B_i)} \right] \quad (4)$$

式中： $C_i$ 为重金属在土壤中的实测值(mg/kg)， $B_i$ 为重金属的土壤背景值，本研究以河北省的土壤背景值为标准[26]，Zn、Ni、As、Cd、Pb、Cr 和 Cu 的土壤背景值分别为 78.4、30.8、13.6、0.094、21.5、68.3 和 21.8 mg/kg， $k$ 为修正背景值波动而设定的系数(一般  $k$  为 1.5)。依据地累积指数法把重金属的污染累积程度确定为从无污染到极强污染的七个等级，见表5。

**Table 5.** Geoaccumulation index and heavy metal pollution level

**表 5.** 地累积指数与重金属污染等级

地累积指数 $I_{geo}$	$\leq 0$	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	>5
级数	0	1	2	3	4	5	6
污染等级	无	无-中	中	中-强	强	强-极强	极强

### 4) 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数法是目前最为常用的评价土壤(沉积物)重金属污染程度的方法之一，由瑞典著名地球化学家 Hakanson 在 1980 年提出，它结合化学、生物毒理学、生态学等方面的内容，以定量的方法划分出重金属潜在危害的程度[27]。徐争启等人[28]重新修正计算了此方法中重金属的毒性系数，毒性系数反应重金属的毒性强度。

潜在生态危害指数的计算方法如下：

$$C_f^i = \frac{C_D^i}{C_R^i} \quad (5)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \quad (6)$$

$$RI = \sum E_r^i = \sum T_r^i \times C_f^i \quad (7)$$

式中： $C_f^i$  是重金属的污染指数； $C_D^i$  为土壤重金属实测值； $C_R^i$  为土壤背景值； $E_r^i$  是单种重金属的潜在生态危害系数； $T_r^i$  是重金属的毒性系数，Zn、Ni、As、Cd、Pb、Cr 和 Cu 的毒性系数分别为 1、5、10、30、5、2 和 5。 $RI$  是多种重金属潜在生态危害指数。潜在生态危害分级标准见表 6。

**Table 6.** The relationship between index and classification of potential ecological hazards caused by heavy metal pollution  
**表 6.** 重金属污染潜在生态危害指标与分级关系

单种重金属的潜在生态危害系数( $E_r^i$ )范围	单因子污染物生态危害程度	潜在生态危害指数( $RI$ )范围	总的潜在生态危害程度
$E_r^i < 40$	轻度	$RI < 150$	轻度生态危害
$40 \leq E_r^i < 80$	中度	$150 \leq RI < 300$	中度生态危害
$80 \leq E_r^i < 160$	强	$300 \leq RI < 600$	强生态危害
$160 \leq E_r^i < 320$	很强	$RI \geq 600$	很强生态危害
$E_r^i \geq 320$	危险级		

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 土壤中的重金属含量特征及其污染评价

通过对施肥前和作物成熟期生菜土和草莓土的 pH 与 Zn、Ni、As、Cd、Pb、Cr 和 Cu 七种重金属含量进行测定，得出的结果见表 7。根据我国第二次土壤普查养分分级标准[29]，我国把土壤酸碱度分为六级：强酸(pH < 4.5)、酸(pH 为 4.5~5.5)、弱酸(pH 为 5.5~6.5)、中性(pH 为 6.5~7.5)、弱碱(pH 为 7.5~8.5)、碱(pH 为 8.5~9.5)和强碱(pH > 9.0)。从表 7 可见，施肥前生菜土的 pH 值为  $6.45 \pm 0.01$ ，属于弱酸性土；作物成熟期生菜土的 pH 值为  $7.2 \pm 0.03$ ，属于中性土。施肥前草莓土的 pH 值为  $6.09 \pm 0.01$ ，属于弱酸性土；作物成熟期草莓土的 pH 值为  $7.58 \pm 0.01$ ，属于弱碱性土。有研究表明，我国土壤中重金属 Pb、Cr、Cu 等与 pH 具有密切的相关性[16]。在碱性土壤中，重金属的流动性降低，相对来说，重金属在碱性土壤中有更大的保留性[30]。

从表 7 可以得出，施肥前生菜土中 Zn 含量最高为  $79.8 \pm 0.02$  mg/kg，Cd 含量最低为  $0.11 \pm 0.01$  mg/kg，七种重金属含量的排序为 Zn > Cr > Cu > Ni > Pb > As > Cd。其中，Zn、Ni、Cu 和 Cd 的含量高于背景值，这可能是由于常年施用有机粪肥引起的重金属积累。作物成熟期生菜土中 Zn 含量最高为  $144 \pm 4.24$  mg/kg，Cd 含量最低为  $0.14 \pm 0.03$  mg/kg，七种重金属含量的递减排序为 Zn > Cr > Cu > Pb > Ni > As > Cd。其中，Zn、Pb、Cd 和 Cu 的含量高于背景值，表明这生菜土中已遭受到不同程度的 Zn、Pb、Cd 和 Cu 污染。和施肥前生菜土中重金属含量比较可得，作物成熟期生菜土中除了 Ni、Cu 以外的其他五种重金属含量均高于施肥前生菜土，这表明有机粪肥的施用一定程度上增加了生菜土中的 Zn、As、Cd、Pb 和 Cr 的重金属含量。除此之外，重金属还可能来自其他人活动，包括灌溉和施加农药等。据报道，Pb 可能存在一些农药中[31]。作物成熟期生菜土中 Ni 和 Cu 含量的相对减少可能是由于这两种重金属在生菜中富集程度较高产生的。与重金属的风险筛选值进行比较可得施肥前和作物成熟期生菜土七种重金属的含量均低于风险筛选值，因此，施肥前和作物成熟期生菜土中重金属污染风险都低。

施肥前草莓土中 Zn 的含量最高，为  $84.2 \pm 0.01$  mg/kg；Cd 含量最低，为  $0.13 \pm 0.01$  mg/kg。七种重金属的排序为 Zn > Cr > Cu > Ni > Pb > As > Cd。其中，Zn、Cd 和 Cu 的金属含量高于背景值，可能是由

**Table 7.** Soil background value (mg/kg) and pH value, heavy metal content (mg/kg) and risk screening value (mg/kg) of lettuce soil and strawberry soil before fertilization and during the ripening period of the plants**表 7.** 河北省土壤背景值(mg/kg)和施肥前以及作物成熟期生菜土和草莓土 pH 值、重金属含量(mg/kg)与风险筛选值(mg/kg)

指标	河北省土壤背景值	施肥前生菜土		作物成熟期生菜土		施肥前草莓土		作物成熟期草莓土	
		平均值 ± 标准差	风险筛选值	平均值 ± 标准差	风险筛选值	平均值 ± 标准差	风险筛选值	平均值 ± 标准差	风险筛选值
pH		6.45 ± 0.01		7.2 ± 0.03	-	6.09 ± 0.01		7.58 ± 0.01	-
Zn	78.40	79.8 ± 0.02	200	144 ± 4.24	250	84.2 ± 0.01	200	173 ± 2.83	300
Ni	30.80	35 ± 1.25	70	26 ± 1.41	100	21 ± 0.08	70	21 ± 2.82	190
As	13.60	2.53 ± 0.02	40	7.18 ± 0.08	30	3.56 ± 0.02	40	6.1 ± 0.21	25
Cd	0.09	0.11 ± 0.01	0.3	0.14 ± 0.03	0.3	0.13 ± 0.01	0.3	0.28 ± 0.01	0.6
Pb	21.50	4.2 ± 1.01	90	30 ± 1.41	120	4.8 ± 1.43	90	38 ± 1.41	170
Cr	68.30	51 ± 1.22	150	51 ± 1.42	200	48 ± 0.09	150	65 ± 0.71	250
Cu	21.80	36 ± 2.11	50	33 ± 2.12	100	30 ± 2.43	50	31 ± 0.7	100

常年施加有机粪肥造成的重金属积累污染。作物成熟期草莓土中 Zn 的含量最高，为  $173 \pm 2.83$  mg/kg；Cd 含量最低，为  $0.28 \pm 0.01$  mg/kg。重金属的含量排序为  $Zn > Cr > Pb > Cu > Ni > As > Cd$ 。作物成熟期的草莓土中七种重金属含量均大于等于施肥前的草莓土，表明施加有机粪肥对作物成熟期草莓土中的重金属含量影响较大。作物成熟期草莓土七种重金属中 Zn、Pb、Cd 和 Cu 的含量高于背景值，表明作物成熟期草莓土受到施加的有机粪肥的影响增加了草莓土中 Zn、Pb、Cd 和 Cu 的污染。施肥前和作物成熟期草莓土中七种重金属含量均低于重金属风险筛选值，说明草莓土中重金属污染风险低。

总的来说，施肥前和作物成熟期生菜土和草莓土中均是 Zn 的含量最高，Cd 的含量最低。作物成熟期的生菜土和草莓土受到施加有机粪肥的影响，作物成熟期生菜土中 Zn、As、Cd、Pb 和 Cr 含量相对于施肥前都有所增加，作物成熟期草莓土中除了 Ni 以外的六种重金属含量也都有一定程度的升高。除此之外，施肥前和作物成熟期生菜土和草莓土中的重金属污染风险都很低。

### 3.2. 土壤中重金属超标评价与分级

生菜土和草莓土中重金属污染物的超标评价与分级方法采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法。将土壤样品中的重金属含量带入公式(1)，可计算得到单因子污染指数，结合计算得到的单因子污染指数带入公式(2)，可得内梅罗综合污染指数，同时根据表 3 和表 4 中的相关评价标准确定土壤重金属的污染程度。

从表 8 可以看出，施肥前生菜土中七种重金属的单因子污染指数递减排序为： $Cu > Ni > Zn > Cd > Cr > As > Pb$ 。七种重金属单因子污染指数均小于 1，处于无污染等级。内梅罗综合污染指数小于 0.7，说明重金属污染没有超标。作物成熟期生菜土中七种重金属的单因子污染指数递减排序为： $Zn > Cd > Cu > Cr = Ni > Pb > As$ 。七种重金属单因子污染指数均小于 1，处于无污染等级，内梅罗综合污染指数小于 0.7，说明重金属污染没有超标。

施肥前草莓土中七种重金属的单因子污染指数递减排序为： $Zn > Cd > Cu > Cr > As > Pb > Ni$ 。七种重金属单因子污染指数均小于 1，处于无污染等级。内梅罗综合污染指数为 0.48 小于 0.7，说明重金属污染没有超标。作物成熟期草莓土中七种重金属单因子污染指数递减排序为： $Zn > Cd > Cu > Cr > As > Pb >$



Ni。七种重金属单因子污染指数均小于 1，处于无污染等级，内梅罗综合污染指数也小于 0.7，属于未超标。

**Table 8.** Single factor pollution index and Nemerow comprehensive pollution index of heavy metals in lettuce soil and strawberry soil before fertilization and during the ripening period of the plants

**表 8.** 施肥前和作物成熟期生菜土和草莓土中重金属单因子污染指数和内梅罗综合污染指数

指标	施肥前生菜土		作物成熟期生菜土		施肥前草莓土		作物成熟期草莓土	
	单因子污染指数 $P_i$	内梅罗综合污染指数 $P_{综}$	单因子污染指数 $P_i$	内梅罗综合污染指数 $P_{综}$	单因子污染指数 $P_i$	内梅罗综合污染指数 $P_{综}$	单因子污染指数 $P_i$	内梅罗综合污染指数 $P_{综}$
Zn	0.40		0.58		0.42		0.58	
Ni	0.50		0.26		0.30		0.11	
As	0.06		0.24		0.09		0.24	
Cd	0.37	0.48	0.47	0.47	0.43	0.48	0.47	0.46
Pb	0.05		0.25		0.05		0.22	
Cr	0.34		0.26		0.32		0.26	
Cu	0.72		0.33		0.60		0.31	

综上分析可得施肥前和作物成熟期生菜土和草莓土中七种重金属的单因子污染指数均小于 1，各种重金属都处于无污染等级，且内梅罗综合污染指数都小于 0.7，表明重金属污染未超标。

### 3.3. 地累积指数法评价结果及分析

选取研究区域所在省河北省土壤背景值作为评价标准，计算出研究区域土壤重金属地累积指数，对应相应重金属污染等级，得出重金属污染评价结果。从表 9 中的评价结果可以发现：在施肥前生菜土的七种重金属中，地累积指数大小排序为： $Cu > Cd > Ni > Zn > Cr > Pb > As$ 。Cu 的地累积指数最高为 0.14，表明由于常年施用有机粪肥，在施肥前的生菜土中会累积 Cu 污染。其余六种重金属的地累积指数均小于 0，表明没有出现重金属累积污染。作物成熟期生菜土中的七种重金属的地累积指数大小排序为： $Zn > Cu > Cd > Pb > Ni > Cr > As$ 。重金属 Zn 的地累积指数最高，有一定程度的累积污染，Cu 刚刚出现累积污染。重金属 Ni、As、Cd、Pb 和 Cr 的地累积指数均小于 0，对环境无污染。将施肥前生菜土和作物成熟期生菜土中的重金属地累积指数进行比较可得，作物成熟期生菜土中除了 Cu 和 Cr 以外的其他五种重金属的地累积指数均大于等于施肥前生菜土，表明有机粪肥的施加增长了生菜土中的地累积指数，提高了生菜土中的重金属累积量。生菜土中 Cu 的地累积指数的减少可能是由于生菜对 Cu 的富集作用较大。

施肥前草莓土中七种重金属的地累积指数大小顺序依次为： $Cd = Cu > Zn > Cr > Ni > As > Pb$ ，这七种重金属的地累积指数均小于 0，表明草莓土在施肥前不存在重金属累积污染。作物成熟期草莓土中的七种重金属的地累积指数大小顺序依次为： $Cd > Zn > Pb > Cu > Cr > Ni > As$ ，有机粪肥的施加对草莓土中重金属 Zn、Cd 和 Pb 的地累积指数影响较大，其中，Cd 的地累积指数为 0.99，接近中等污染水平，Zn、Pb 有一定程度的累积污染，处于轻度污染水平，其余四种重金属的地累积指数小于 0，表明不存在重金属累积污染。

综合以上分析表明，有机粪肥的施加对生菜土中 Zn 的地累积指数影响较大，作物成熟期生菜土中的 Zn 处于轻度污染。施加有机粪肥对草莓土中 Zn、Cd 和 Pb 的地累积指数影响较大，使草莓土中的重金属 Cd 接近中度污染，Zn 和 Pb 也存在一定的轻度污染。因此，在之后的农业生产中，要加强对生菜土中 Zn

**Table 9.** Results of heavy metal geoaccumulation index evaluation of lettuce soil and strawberry soil before fertilization and during the ripening period of the plants**表 9.** 施肥前和作物成熟期生菜土和草莓土重金属地累积指数评价结果

指标	施肥前生菜土			作物成熟期生菜土			施肥前草莓土			作物成熟期草莓土		
	地累积指数	级数	污染等级	地累积指数	级数	污染等级	地累积指数	级数	污染等级	地累积指数	级数	污染等级
Zn	-0.56	0	无污染	0.29	1	无-中	-0.48	0	无污染	0.56	1	无-中
Ni	-0.40	0	无污染	-0.83	0	无污染	-1.14	0	无污染	-1.14	0	无污染
As	-3.01	0	无污染	-1.51	0	无污染	-2.52	0	无污染	-1.74	0	无污染
Cd	-0.36	0	无污染	-0.01	0	无污染	-0.12	0	无污染	0.99	1	无-中
Pb	-2.94	0	无污染	-0.10	0	无污染	-2.75	0	无污染	0.24	1	无-中
Cr	-1.01	0	无污染	-1.01	0	无污染	-1.09	0	无污染	-0.66	0	无污染
Cu	0.14	1	无-中	0.01	1	无-中	-0.12	0	无污染	-0.08	0	无污染

和草莓土中 Zn、Cd 和 Pb 的污染管制。

### 3.4. 潜在生态危害指数法评价结果及分析

将土壤重金属实测值、土壤背景值和重金属毒性系数带入公式(5)、(6)和(7)，得到施肥前和作物成熟期生菜土和草莓土中单种重金属的潜在生态危害系数和总的潜在生态危害指数，并计算出单种重金属在潜在生态危害指数的贡献率。从表 10 可以得出，施肥前生菜土中七种重金属均属于轻度生态危害，总的潜在生态指数  $54.39 < 150$ ，属于轻度生态危害。而在作物成熟期生菜土中的重金属潜在生态危害系数排序为  $Cd > Cu > Pb > As > Ni > Zn > Cr$ 。其中，除了 Cd 存在中等强度生态危害外，其余重金属都属于轻度生态危害，总的潜在生态危害指数  $72.06 < 150$ ，属于轻度生态危害。每种重金属对污染危害的相对贡献以单种重金属的潜在生态危害系数和总的潜在生态危害指数的比值( $E_i^p/RI$ )来计算，在施肥前和作物成熟期的生菜土中，Cd 都是主要的污染物，其贡献率分别达到 64.55%和 62.10%。施加有机粪肥一定程度上提高了生菜土中 Zn、As、Cd 和 Pb 的潜在生态危害系数，总的潜在生态危害指数也有所增加。

**Table 10.** Index of heavy metal potential ecological damage in lettuce soil and strawberry soil before fertilization and during the ripening period of the plants**表 10.** 施肥前和作物成熟期生菜土和草莓土重金属潜在生态危害指数

指标	施肥前生菜土			作物成熟期生菜土			施肥前草莓土			作物成熟期草莓土		
	$E_i^p$	RI	贡献率	$E_i^p$	RI	贡献率	$E_i^p$	RI	贡献率	$E_i^p$	RI	贡献率
Zn	1.02		1.87%	1.84		2.55%	1.07		1.85%	2.21		1.88%
Ni	5.68		10.45%	4.22		5.86%	3.41		5.88%	3.41		2.91%
As	1.86		3.42%	5.28		7.33%	2.62		4.51%	4.49		3.82%
Cd	35.11	54.39	64.55%	44.68	72.06	62.01%	41.49	57.99	71.55%	89.36	117.31	76.17%
Pb	0.98		1.80%	6.98		9.68%	1.12		1.92%	8.84		7.53%
Cr	1.49		2.75%	1.49		2.07%	1.41		2.42%	1.90		1.62%
Cu	8.26		15.18%	7.57		10.50%	6.88		11.87%	7.11		6.06%

施肥前草莓土中 Cd 的潜在生态危害系数  $41.49 > 40$ ，刚达到中度生态危害，其余六种重金属均为轻度生态危害，总的潜在生态危害指数  $57.99 < 150$ ，处于轻度生态危害。作物成熟期草莓土中七种重金属潜在生态危害系数的递减顺序为： $Cd > Pb > Cu > As > Ni > Zn > Cr$ 。其中，只有 Cd 属于强生态危害，其余重金属皆是轻度生态危害，总的潜在生态危害指数  $117.31 < 150$ ，属于轻度生态危害。施肥前和作物成熟期草莓土中 Cd 污染的贡献率依旧最大，分别达到 71.55%和 76.17%。施加有机粪肥对草莓土中除了 Ni 以外的六种重金属的潜在生态危害系数均有影响，其中，对 Cd 的潜在生态危害系数影响最大。同时，施加有机粪肥极大地增长了总的潜在生态危害指数。

综上可得，施加有机粪肥后，作物成熟期生菜土中的 Cd 达到了中度生态危害，总的潜在生态指数也有所增加。草莓土中 Cd 由施肥前的中度生态危害达到作物成熟期的强生态危害，同时极大地增长了总的潜在生态危害指数。Cd 为生菜土和草莓土中潜在生态危害的主要贡献因子，是后续农业活动中需要关注的重点。

#### 4. 结论

1) 有机粪肥的施用一定程度上增加了生菜土中的 Zn、As、Cd、Pb 和 Cr 的重金属含量，草莓土中 Zn、As、Cd、Pb、Cr 和 Cu 的重金属含量也有所提高。施肥前和作物成熟期的生菜土和草莓土中的重金属含量均低于农用地土壤污染风险管控标准中的风险筛选值，表明有机粪肥的施加引起的重金属污染风险较低。

2) 施肥前和作物成熟期生菜土和草莓土中的单因子污染指数均小于 1，内梅罗综合污染指数均小于 0.7，表明施肥前和作物成熟期生菜土和草莓土中各种重金属污染均未超标。

3) 地累积指数法的评价结果表明，有机粪肥的施加提高了生菜土中 Zn 的地累积指数，使作物成熟期生菜土中的 Zn 达到轻度污染水平。同时，作物成熟期草莓土中的 Zn、Cd 和 Pb 在施加有机粪肥的作用下都达到了轻度污染水平，Cd 接近中度污染水平。在接下来的有机粪肥施加和农业生产中，需要采取一定的措施对生菜土中的 Zn 和草莓土中的 Cd、Zn 与 Pb 污染进行管控。

4) 潜在生态危害指数法的评价结果表明，有机粪肥的施加提高了生菜土和草莓土中 Cd 的潜在生态危害系数。在施加有机粪肥后，作物成熟期生菜土的 Cd 达到了中度生态危害，作物成熟期草莓土中的 Cd 达到了强生态危害，同时也增长了作物成熟期生菜土和草莓土的总的潜在生态危害指数。在生菜土和草莓土中，Cd 污染的贡献率最大，具有较高的潜在生态危害，需采取相应措施减轻重金属 Cd 带来的危害。

根据选取的四种方法的评价结果进行分析可得，施加有机粪肥对生菜土中的 Zn 和 Cd 以及草莓土中 Zn、Pb 和 Cd 的影响作用较大。从整体上看，有机粪肥的施加提高了生菜土和草莓土中重金属含量，生菜土和草莓土中重金属污染程度都有所加深，在进一步生产和施用有机粪肥的过程中应重点控制。对于土壤重金属污染的评价，方法众多，但是仍然没有一种方法被广泛接受和使用，使用单一的评价方法在实际过程中进行评价时，都有各自的局限性，无法给出准确且全面的结果，而两种或者多种评价方法相结合来评价土壤重金属的污染程度能够尽可能降低这种局限性。此外，在进行土壤重金属污染风险评价时，需综合考虑重金属种类、累积程度、生物毒性和人类活动等参数指标，才能更加科学客观的凭据重金属在土壤中的环境风险。

#### 基金项目

本研究受到国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07101003)、中央高校基本科研业务费专项资金(2018MS051)资助。

## 参考文献

- [1] Wu, G., Kang, H. and Zhang, X. (2010) A Critical Review on the Bio-Removal of Hazardous Heavy Metals from Contaminated Soils: Issues, Progress, Eco-environmental Concerns and Opportunities. *Journal of Hazardous Materials*, **174**, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.09.113>
- [2] 樊霆, 叶文玲, 陈海燕. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]. 生态环境学报, 2013(10): 1727-1736.
- [3] 黄国勤. 江西省土壤重金属污染研究[C]//2011 中国环境科学学会学术年会论文集: 第二卷. 北京: 中国环境出版社, 2011: 773-778.
- [4] 国土资源部. 环境保护部全国土壤污染状况调查公报[J]. 北京: 环境保护部国土资源部, 2014: 2.
- [5] 王红艳. 农田污染亟待处理[J]. 农业工程, 2014(3): 9.
- [6] 崔斌, 王凌, 张国印. 土壤重金属污染现状与危害及修复技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(1): 373-375.
- [7] 王一豪. 土壤重金属污染及治理修复技术[J]. 环境与发展, 2019, 31(2): 87.
- [8] 张凌云, 尹鹏, 夏杰. 南充市农村土壤重金属污染现状调查与评价[J]. 四川环境, 2013, 32(S1): 143-149.
- [9] 赵庆令, 李清彩, 谢江坤. 应用富集系数法和地累积指数法研究济宁南部区域土壤重金属污染特征及生态风险评估[J]. 岩矿测试, 2015, 34(1): 129-137.
- [10] 李一蒙, 马建华, 刘德新. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评估[J]. 环境科学, 2015(3): 1037-1044.
- [11] Nagajyoti, P.C., Lee, K.D. and Sreekanth, T.V.M. (2010) Heavy Metals, Occurrence and Toxicity for Plants: A Review. *Environmental Chemistry Letters*, **8**, 199-216. <https://doi.org/10.1007/s10311-010-0297-8>
- [12] Wu, C. and Zhang, L. (2010) Heavy Metal Concentrations and Their Possible Sources in Paddy Soils of a Modern Agricultural Zone, Southeastern China. *Environmental Earth Sciences*, **60**, 45-56. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0168-4>
- [13] Li, J., Lu, Y. and Yin, W. (2009) Distribution of Heavy Metals in Agricultural Soils near a Petrochemical Complex in Guangzhou, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, **153**, 365. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0363-x>
- [14] Jiao, W., Chen, W. and Chang, A.C. (2012) Environmental Risks of Trace Elements Associated with Long-Term Phosphate Fertilizers Applications: A Review. *Environmental Pollution*, **168**, 44-53. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.03.052>
- [15] Lei, L., Ma, Y. and Zhang, S. (2009) An Inventory of Trace Element Inputs to Agricultural Soils in China. *Journal of Environmental Management*, **90**, 2524-2530. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.01.011>
- [16] Niu, L., Yang, F. and Xu, C. (2013) Status of Metal Accumulation in Farmland Soils across China: From Distribution to Risk Assessment. *Environmental Pollution*, **176**, 55-62. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.01.019>
- [17] 茹淑华, 苏德纯, 张永志, 张国印, 耿暖, 孙世友, 王凌. 河北省集约化养殖场畜禽粪便中重金属含量及变化特征[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(6): 533-539.
- [18] 国家环境保护局. GB/T 17138-1997 土壤质量铜、锌的测定[N]. 1997-12-08.
- [19] 国家环境保护局. GB/T 17139-1997 土壤质量镍的测定[N]. 1997-07-30.
- [20] 国家环境保护局. GB/T 17141-1997 土壤质量铅、镉的测定[N]. 1997-07-30.
- [21] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 22105.2-2008 土壤质量总汞、总砷、总铅的测定[N]. 2008-06-07.
- [22] 生态环境部. GB 15618-2018.土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)[N]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- [23] 盛蒂, 朱兰保, 戚晓明. 蚌埠市区土壤重金属积累特征及生态风险评估[J]. 土壤通报, 2015, 46(3): 715-720.
- [24] 张江华, 赵阿宁, 王仲复. 内梅罗指数和地质累积指数在土壤重金属评价中的差异探讨[J]. 环保与分析, 2010(8): 43-46.
- [25] 张钊, 白向玉, 周磊. 地累积指数法和潜在生态危害指数法在污泥重金属污染中的应用[C]//2011 中国环境科学学会学术年会论文集: 第二卷. 北京: 中国环境出版社, 2011: 874-878.
- [26] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 329-476.
- [27] 赵沁娜, 徐启新, 杨凯. 潜在生态危害指数法在典型污染行业土壤污染评价中的应用[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2005(1): 111-116.
- [28] 徐争启, 倪师军, 庾先国. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115.

- 
- [29] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 356.
- [30] Tian, K., Huang, B. and Xing, Z. (2017) Geochemical Baseline Establishment and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in Greenhouse Soils from Dongtai, China. *Ecological Indicators*, **72**, 510-520. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.08.037>
- [31] Chen, T.B., Wong, J.W. and Zhou, H.Y. (1997) Assessment of Trace Metal Distribution and Contamination in Surface Soils of Hong Kong. *Environmental Pollution*, **96**, 61-68. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(97\)00003-1](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(97)00003-1)

**知网检索的两种方式:**

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;  
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5485, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [aep@hanspub.org](mailto:aep@hanspub.org)