广东农业科学 2019，46（3）：78-84
Guangdong Agricultural Sciences doi：10.16768/j.issn.1004-874X.2019.03.012

邓杰帆，吴翠玉，卢瑛，李军辉，曾彩明，刘金环，刘纪蓥，贾重建 . 东莞某工业镇农用地土壤镉污染及生态风险评价［J］. 广东农业科学，2019，46（3）：78-84.

东莞某工业镇农用地土壤镉污染及生态风险评价

邓杰帆[1]，吴翠玉[2]，卢 瑛[2]，李军辉[2]，曾彩明[1]，刘金环[2]，刘纪蓥[2]，贾重建[2]
（1. 东莞市环境科学研究所，广东 东莞 523009；2. 华南农业大学资源环境学院，广东 广州 510642）

摘 要：【目的】通过调查东莞某工业镇农用地土壤、农产品镉（Cd）污染特征，以期有效防治 Cd 污染。【方法】采集不同土地利用方式（菜地、果园、林地、荒地）123 个表层土壤样品及 27 个农产品（叶菜类、茄果类、水果类），采用石墨炉原子吸收法测定土壤和农产品可食部分的 Cd 含量，利用单因子指数法、地累积指数法和潜在生态指数法进行分析评价。【结果】研究区域土壤 Cd 的平均含量为 0.36 mg/kg（0.02~1.52 mg/kg），有 91.06% 的样点土壤 Cd 含量高于广东省自然背景值（0.056 mg/kg）；48.78% 的样点 Cd 含量高于农用地土壤污染风险管控标准筛选值（0.3 mg/kg，pH>7.5 时为 0.6 mg/kg，GB 15618-2018）；农产品中 Cd 含量平均值（0.013 mg/kg）低于食品安全国家标准中规定的蔬菜 Cd 含量限值（0.05 mg/kg），但有部分蔬菜超标，超标达 11.11%；不同利用方式土壤 Cd 含量、污染指数、地累积指数、潜在生态危害指数平均值大小均为：菜地 > 林地 > 果园 > 荒地，且菜地与其他 3 种利用方式差异显著。【结论】研究区域土壤 Cd 含量呈明显的累积现象，48.78% 的土壤存在污染风险；农产品中 Cd 含量对人群存在健康风险；不同利用方式对土壤 Cd 的累积造成不同程度的影响，菜地最为严重。

关键词：农用地；镉；土地利用方式；污染程度；潜在生态风险评价
中图分类号：X53 **文献标志码：**A **文章编号：**1004-874X（2019）03-0078-07

Soil Cadmium Pollution and Ecological Risk Assessment of Agricultural Land in an Industrial Town of Dongguan

DENG Jiefan[1], WU Cuiyu[2], LU Ying[2], LI Junhui[2], ZENG Caiming[1], LIU Jinhuan[2], LIU Jiying[2], JIA Chongjian[2]
(1. *Institute of Environmental Science Research, Dongguan* 523009, *China;*
2. *College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou* 510642, *China*)

Abstract:【Objective】The objective was to find a way to effectively prevent and control cadmium (Cd) pollution by investigating the characteristics of Cd pollution in agricultural soils and agro-products in an industrial town of Dongguan.【Method】A total of 123 surface soil samples and 27 agro-products(leaf vegetables, solanaceous fruits, and fruits) from different land uses(vegetable field, orchard, woodland and waste land) were collected and the Cd content of soils and and the edible part of agro-products were determined by using graphite furnace atomic absorption spectroscopy, and were analyzed and evaluated by using using single factor index, geo-accumulation index and potential ecological risk index .【Results】Results showed that the average concent of Cd in tested soils was 0.36 mg/kg (0.02-1.52 mg/kg), and the Cd content of 91.06% sample soil was higher than the natural background value of Guangdong Province (0.056 mg/kg). The Cd content of 48.78% of the sample soil was higher than the screening value of the soil pollution risk management standard for agricultural land (0.3 mg/kg, 0.6 mg/kg at pH>7.5). The average concent of Cd in agro-products (0.013 mg/kg) was lower than the maximum allowable concent in vegetables (0.05 mg/kg) specified in the national food

收稿日期：2018-11-13
基金项目：广东省科技计划项目（2013B020700002）
作者简介：邓杰帆（1972—），男，高级工程师，研究方向为环境污染防治、生态修复，E-mail：752082012@qq.com
通信作者：卢瑛（1966—），男，博士，教授，研究方向为耕地质量提升、土壤重金属污染控制与修复，E-mail：luying@scau.edu.cn

safety standards, but some vegetables exceeded the standard by 11.11%. The average concent of Cd, pollution index, geo-accumulation index and potential ecological risk index of vegetable plot were higher those of woodland, those of woodland were higher those of orchard, those of orchard were higher those of wasteland, and the vegetable land differed markedly with other three lands. 【Conclusions】The Cd concent in soil of the study area showed obvious accumulation, and 48.78% of the soil had pollution risk. The Cd content in agricultural products poses a health risk to human. The concent of Cd in soils varied in different land use types, while the highest Cd concent was observed in vegetable field.

Key words: agricultural soil; Cd; land uses; pollution degree; potential ecological risk assessment

【研究意义】近年来，随着工业的快速发展，大量工业污染物不合理排放，造成农用地土壤重金属污染日益严重[1-3]。由于重金属不能被土壤微生物降解，在土壤中不断积累，且可被植物富集，对环境和人体健康存在危害性[4]，因此土壤重金属污染问题已引起高度重视[5-7]。镉（Cd）是生物毒性最强的重金属元素之一，在环境系统中迁移活跃，可以通过土壤 - 农产品途径进入人体，影响酶系统活力，干扰人体微量元素代谢，引发高血压、骨质疏松等疾病，给人体健康带来严重威胁[8]。因此，土壤 Cd 的环境行为以及污染控制等研究一直以来备受关注[4,9-11]。

【前人研究进展】根据 2014 年环境保护部和国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》[12]显示，我国农田土壤点位超标率为 19.4%，其中以重金属 Cd 最为严重。不同土地利用方式对土壤重金属累积可产生重要影响[13]。目前国内北京[14]、上海[15]、天津[16]、广州[1]、深圳[17]等城市已广泛开展了不同土地利用方式土壤重金属研究。有研究表明我国约 24.1% 的菜地土壤样本 Cd 含量超过国家土壤环境质量Ⅱ级标准（GB15618-1995）[18]。【本研究切入点】东莞作为广东经济发达的城市，由于城市化、工业化的快速发展，导致了“三废”的大量产生，而“三废”未得到有效处理的排放以及垃圾和河涌底泥的农用，致使重金属污染物直接或间接地进入农田土壤[19]，对当地环境造成了一定的压力。因此，有关东莞市土壤重金属的相关研究已有众多报道[20-22]，而 Cd 作为一种累积性的剧毒重金属元素，其在不同土地利用方式农用地中相关分布状况的研究尚不多见。【拟解决的关键问题】通过对东莞市某工业镇不同土地利用方式土壤 - 农产品系统 Cd 进行调查和评价，了解土地利用方式对土壤 Cd 的累积、分布及其生态影响，以期为农用地土壤 Cd 污染的有效防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

充分考虑研究区域地形地貌、土壤类型和田块大小等因素，于 2017 年 7 月在东莞市某工业镇选取不同土地利用类型(菜地、果园、荒地、林地)的地块，进行样点布设，并且利用 GPS 准确定位。按照梅花布点五点混合法，用竹片采集表层土壤（0~15 cm）样品，四分法取 1 kg 装入样品袋中。共采集表层土壤样品 123 个，其中菜地 83 个、荒地 3 个、果园 26 个、林地 11 个。样品经室内自然风干后，使用玛瑙研钵研磨，分别过孔径 2.00 mm 和 0.15 mm 尼龙筛，贮存待测。

在种植有时令农产品的地块同时采集可食部分农产品，共计 27 个，其中叶菜类（通心菜、菜心、番薯叶）10 个、瓜果类（莴苣、水瓜、茄子）10 个、水果类（香蕉、龙眼、木瓜、芒果）7 个，放入提前准备有冰块的储藏箱中低温保存，带回实验室后进行预处理，去除虫咬、老残部分，用自来水冲洗去除污泥等，用蒸馏水洗净，并用纱布揩干水分，可食用部分立即碾碎分析。

1.2 分析方法

土壤 pH 值采用电位法测定（水土比 2.5∶1）[23]，土壤 Cd 经 $HCl-HNO_3-HClO_4-HF$ 消解后用石墨炉原子吸收法测定[23]。农产品 Cd 的测定参照 GB 5009.15-2014[24]，经 HNO_3-HClO_4 消解后用石墨炉原子吸收法测定。样品分析过程中，土壤和农产品分析通过空白、平行和标准物质（土壤标准物质 GSS-4 和 GSS-24、GSB-6 菠菜和 GSB-26 芹菜）来进行质量控制。平行间的相对误差均 < 10 %。

1.3 评价方法

为分析土壤和农产品 Cd 累积和污染程度，分别以广东省自然土壤背景值[25]、《农用地土壤污染风险管控标准》（GB 15618-2018）[26]

和《食品安全国家标准》（GB2762–2017）[27]食品中污染物限量为评价标准。土壤和农产品 Cd 污染评价标准：广东省自然土壤背景值 Cd 含量为 0.056 mg/kg；土壤污染风险筛选值 pH ≤ 7.5 时 Cd 含量为 0.3 mg/kg，pH>7.5 时 Cd 含量为 0.6 mg/kg；土壤污染风险管制值 pH ≤ 5.5 时 Cd 含量为 1.5 mg/kg，5.5<pH ≤ 6.5 时 Cd 含量为 2.0 mg/kg，6.5<pH ≤ 7.5 时 Cd 含量为 3.0 mg/kg，pH>7.5 时 Cd 含量为 4.0 mg/kg；农产品限量值新鲜蔬菜和新鲜水果 Cd 含量均为 0.05 mg/kg。

1.3.1 *污染评价* 采用单因子污染指数法和地累积指数法评价研究区域土壤 Cd 污染状况，单因子污染指数法和地累积污染指数法评价分级标准见表 1。

单因子污染指数法计算公式为：

$$P_i=C_i/S_i$$

式中，P_i 表示土壤重金属元素 i 的污染指数，C_i 表示土壤重金属元素 i 的实测含量（mg/kg），S_i 表示土壤重金属元素 i 的限量标准。

地累积污染指数法计算公式为：

$$I_{geo}=\log_2[C_i/(1.5B_n)]$$

式中，I_{geo} 表示土壤重金属元素 i 的地累积指数，C_i 表示土壤重金属元素 i 的实测值（mg/kg），B_i 表示土壤重金属元素 i 的背景值。

表 1 单因子污染指数法和地累积污染指数分级标准
Table 1 The contamination grading standards of single factor index and geo-accumulation index

等级 Grade	单因子污染指数 Single factor index		地累积污染指数 Geo-accumulation index	
	P_i	污染程度 Pollution degree	I_{geo}	污染程度 Pollution degree
0			$I_{geo} \le 0$	无污染
1	$P_i \le 0.7$	安全	$0<I_{geo} \le 1$	轻污染
2	$0.7 < P_i \le 1.0$	警戒级	$1<I_{geo} \le 2$	中污染
3	$1.0 < P_i \le 2.0$	轻污染	$2<I_{geo} \le 3$	中强污染
4	$2.0 < P_i \le 3.0$	中污染	$3<I_{geo} \le 4$	强污染
5	$P_i > 3.0$	重污染	$4<I_{geo} \le 5$	较强污染
6			$I_{geo} > 5$	极强污染

1.3.2 *潜在生态风险评价* 潜在生态风险指数法是瑞典学者 Hakanson[28]提出的，单一金属潜在生态危害指数计算公式为：

$$E_{ir}=T_{ir}C_{if}=T_{ir}C_{is}/C_{in}$$

式中，E_{ir} 为土壤中第 i 种重金属的潜在生态危害指数；Tir 为第 i 种重金属元素毒性系数，反映重金属的毒性水平和生物对重金属污染的敏感程度；C_{if} 为第 i 种重金属元素的污染系数，C_{is} 为土壤重金属元素含量实测值（mg/kg），C_{in} 为重金属参比值。土壤重金属含量越大，重金属的毒性水平越高，潜在生态危害指数 E_{ir} 值越大，表明其潜在危害也越大，其分级标准见表 2。用 Hakanson 制定的标准化重金属毒性系数为评价依据，重金属 Cd 的毒性系数 T_r=30。为了相对反映特定区域的分域性，参比值采用广东省土壤自然背景值。

表 2 Hakanson 单一金属潜在生态风险评价分级标准
Table 2 Grading standards of single metal potential ecological risk assessment by Hakanson

等级 Grade	E_{ir}	风险程度 Risk degree
1	$E_{ir} < 40$	轻微
2	$40 \le E_{ir} < 80$	中等
3	$80 \le E_{ir} < 160$	强
4	$160 \le E_{ir} < 320$	很强
5	$E_{ir} \ge 320$	极强

试验数据采用 Microsoft Excel 2010、SPSS 20.0 和 Origin 2016 软件进行相关的图表处理及统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 值及 Cd 含量特征

由表3可知,研究区域土壤pH值为3.81~8.29，平均值为 6.08，有 66.7% 的样点土壤 pH<6.5，即有 2/3 的土壤偏酸性；不同利用方式间土壤 pH 平均值表现为：荒地 > 林地 > 菜地 > 果园。土壤 Cd 含量变化范围为 0.02~1.52 mg/kg，平均值为 0.36 mg/kg，仅 8.94% 的样点 Cd 含量未超过广东省自然土壤背景值，表明研究区域土壤已呈现一定程度的 Cd 累积；48.78% 的样点 Cd 含量高于土壤污染风险筛选值，但均没有超过管控值（GB 15618–2018）。土壤 Cd 含量在不同利用方式间的大小顺序为：菜地 > 林地 > 果园 > 荒地，且菜地土壤 Cd 含量显著高于其他 3 种利用方式。

变异系数可以反映采样总体中各样点之间的平均变异程度[29]。表 3 表明，菜地、果园土壤 Cd 的变异系数达到 65% 以上，远大于林地和荒地土壤的 Cd 变异系数，说明菜地和果园土壤受人为活动的干扰比较显著，空间变异较大。

表 3　土壤 pH 和 Cd 含量统计特征

Table 3　Description statistics of soil pH and Cd content

利用方式 Land use	pH			Cd 含量 Cd content（mg/kg）		
	范围 Range	均值 ± 标准差 Mean ± *S.D.*	变异系数 *C.V.*（%）	范围 Range	均值 ± 标准差 Mean ± *S.D.*	变异系数（%） *C.V.*
菜地 Vegetable field	4.06~8.08	6.15 ± 0.81b	13.25	0.04~1.52	0.47 ± 0.32a	67.84
果园 Orchard	3.81~7.98	5.60 ± 1.19b	21.21	0.04~0.40	0.12 ± 0.10b	82.28
林地 Woodland	4.34~8.29	6.27 ± 1.33b	21.25	0.02~0.31	0.18 ± 0.09b	52.14
荒地 Waste land	6.16~8.28	7.51 ± 1.17a	15.59	0.06~0.12	0.10 ± 0.03b	33.94
合计 Total	3.81~8.29	6.08 ± 1.00	16.53	0.02~1.52	0.36 ± 0.31	86.00

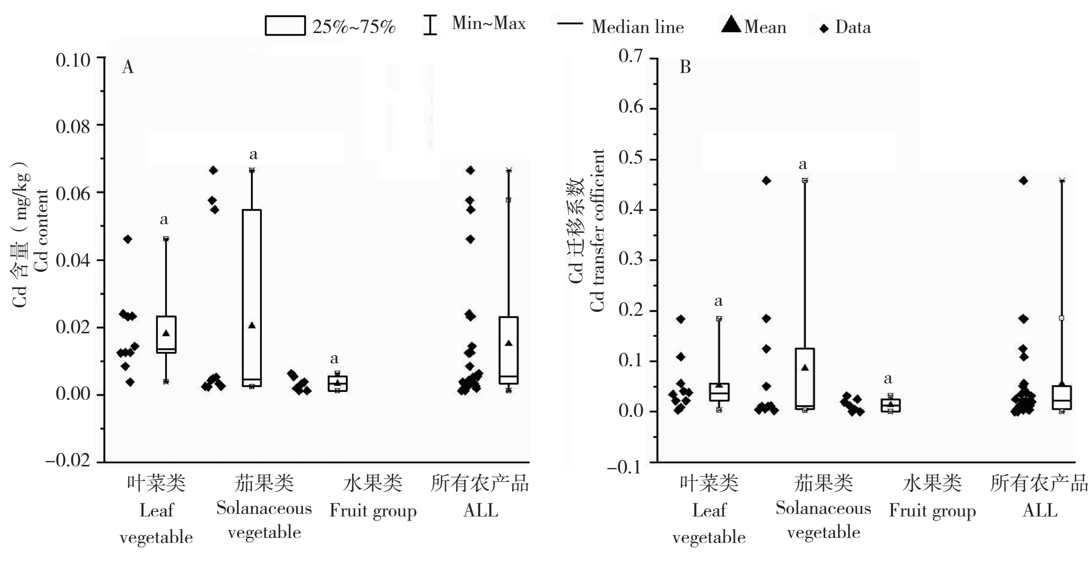
注：同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著。

Note: Different lowercase letters in the same column represent significant differences.

2.2　农产品 Cd 含量及迁移特征

从图 1A 可以看出，供试农产品 Cd 含量为 0.000015~0.062 mg/kg，平均含量为 0.013 mg/kg，与《食品安全国家标准》（GB 2762–2017）农产品 Cd 限量值相比，有 11.11% 的农产品 Cd 含量超标，且超标的农产品均为茄果类，说明已有部分茄果类蔬菜受到 Cd 污染。不同种类农产品 Cd 含量平均值由大到小依次为：茄果类 > 叶菜类 > 水果类，单因素方差统计分析结果显示 3 类农产品之间无显著差异。

农产品对重金属的吸收和积累特征，众多研究者采用农产品中重金属的含量与相应土壤重金属含量的比值表示[20，30–31]，本研究将农产品 Cd 含量与相应土壤的比值称之为迁移系数，Cd 迁移系数越大，表明农产品从土壤中吸收 Cd 的能力越强，抗土壤 Cd 污染的能力就越弱[31]。从图 1B 可以看出，Cd 在土壤 – 农产品间的迁移系数为 0.000031~0.46，平均值为 0.055。不同种类农产品 Cd 迁移系数平均值由大到小依次为：茄果类 > 叶菜类 > 水果类，三者间无显著差异，这与各类农产品 Cd 含量的大小顺序一致。



小写英文字母不同者表示差异显著

Different lowercase letters represent significant differences

图 1　农产品 Cd 含量（A）及迁移系数（B）

Fig. 1　Cd concent (A) and transfer coefficient (B) in agro–products

2.3　土壤 Cd 污染评价

2.3.1　基于单因子污染指数的土壤 Cd 污染评价　以《农用地土壤污染风险管控标准》（GB 15618–2018）中土壤污染风险筛选值为依据，计算 Cd 污染指数，结果见表 4。从表 4 可以看出，土壤 Cd 污染指数为 0.06~5.06，平均值为 1.19，

48.78% 的样点处于轻污染 ~ 重污染水平，其中 93.33% 的受污染样点为菜地，荒地土壤 Cd 处于安全水平。菜地的 Cd 污染指数显著高于其他 3 种利用方式。

2.3.2 基于地累积指数的土壤 Cd 污染评价　由表 4 可知，研究区土壤 Cd 地累积指数为 −2.19~4.17，平均值为 1.55，84.55% 的样点处于轻污染以上的水平。不同利用方式土壤的 Cd 地累积指数平均值均大于 0，菜地的 Cd 污染指数显著高于其他 3 种利用方式。可见，研究区菜地受人类活动的影响程度远大于其他 3 种利用方式。

2.3.3 基于潜在生态危害指数的土壤 Cd 污染风险评价　从土壤 Cd 潜在生态危害指数结果（表 4）来看，研究区土壤 Cd 潜在生态危害指数为 9.88~812.64，处于轻微、中等、强、很强、极强水平的比例分别为 13.82%、13.82%、23.58%、30.89%、17.89%，表明研究区土壤 Cd 的生态风险较高，其中菜地土壤 Cd 的生态风险最高，有 97.59% 的样点土壤处于中等以上的生态风险水平。方差分析结果显示，菜地土壤 Cd 潜在生态危害指数与其他 3 种利用方式差异显著。

表 4　土壤 Cd 污染评价结果

Table 4　The results of Cd contamination assessement in soils

利用方式 Land use	单因子污染指数 Single factor index			地累积指数 Geo-accumulation index			潜在生态危害指数 Potential ecological risk index		
	范围 Range	均值 ± 标准差 Mean ± *S.D.*	污染程度 Pollution degree	范围 Range	均值 ± 标准差 Mean ± *S.D.*	污染程度 Pollution degree	范围 Range	均值 ± 标准差 Mean ± *S.D.*	风险程度 Risk degree
菜地 Vegetable field	0.13~5.06	1.57 ± 1.07a	安全 ~ 重污染	−1.05~4.17	2.15 ± 1.05a	无 ~ 较强污染	21.69~812.64	252.70 ± 171.43a	轻微 ~ 极强
果园 Orchard	0.12~1.33	0.36 ± 0.31b	安全 ~ 轻污染	−1.26~2.25	0.13 ± 1.02b	无 ~ 中强污染	18.82~213.67	63.95 ± 52.55b	轻微 ~ 很强
林地 Woodland	0.06~1.05	0.57 ± 0.34b	安全 ~ 轻污染	−2.19~1.90	0.79 ± 1.21b	无 ~ 中污染	9.88~168.15	97.06 ± 50.48b	轻微 ~ 很强
荒地 Waste land	0.19~0.20	0.19 ± 0.11b	安全	−0.50~0.48	0.14 ± 0.56b	无 ~ 轻污染	31.87~62.60	51.96 ± 17.41b	轻微 ~ 中等
合计 Total	0.06~5.06	1.19 ± 1.05	安全 ~ 重污染	−2.19~4.17	1.55 ± 1.36	无 ~ 较强污染	9.88~812.64	193.99 ± 166.81	轻微 ~ 极强

注：同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著。

Note: Different lowercase letters in the same column represent significant differences.

3　讨论

在自然情况下，土壤重金属主要来源于母岩和残落的生物物质，但随着工农业生产活动的发展，人为活动对土壤重金属分布的影响不断加强，污水灌溉、农药、无机和有机肥料（包括城市垃圾、污泥）的施用等管理措施均会导致土壤重金属的积累[4, 8, 13, 32]。本研究中，有 90% 以上的样点土壤 Cd 含量高于广东省自然背景值，累积现象明显。土地利用方式不同，管理措施通常也不同[13]，从而导致土壤重金属含量及污染特征产生差异。本研究中通过对研究区域菜地、林地、果园以及荒地土壤取样分析表明，不同利用方式对土壤中 Cd 的含量有不同程度的影响，其中菜地土壤最为显著，Cd 污染程度最严重，这与前人研究基本一致[1, 13-14]。这是由于菜地土壤耕作强度大、肥料农药使用量大、投入和产出高、受人类活动影响最为强烈[18]，而 Cd 作为一种较为典型的因人类活动进入环境的元素[14]，在菜地土壤中的积累程度较其他利用方式强烈。

土壤中重金属是造成蔬菜重金属污染的主要因素，且通过食物链被动物富集，直接或间接地威胁人类安全和健康[22, 33]，由于作物主要是通过根系从土壤溶液中吸收元素[30]，不同农产品因对水分的需求不同而导致对重金属的吸收以及体内运移效率有很大差异。本研究中 11.11% 的农产品 Cd 超标，Cd 在土壤 – 农产品间的迁移系数较高，不同种类农产品 Cd 迁移系数平均值由大到小依次为：茄果类 > 叶菜类 > 水果类，茄果类及叶菜类等蔬菜较水果类对环境产生风险效应强。农用地土壤重金属污染物不仅对农作物生长造成影响，还可通过食物链的传递作用对人体健康造成危害。因此，不同种类农产品累积 Cd 的

差异可指导实际农业生产过程中作物种类的选择与种植，就研究区域而言，水果类更适宜于该研究区域种植。

4 结论

（1）研究区 91.06% 的样点土壤 Cd 含量高于广东省自然背景值，呈现明显的累积现象；48.78% 的样点 Cd 含量高于农用地土壤污染风险管控标准筛选值，存在土壤污染风险，处于轻污染 ~ 重污染水平；地累积指数法评价结果为 84.55% 的样点 Cd 处于轻污染 ~ 较强污染水平；潜在生态危害指数法评价结果为 86.18% 的样点土壤 Cd 的生态风险处于中等 ~ 极强水平。

（2）研究区农产品 Cd 含量平均值均低于食品安全国家标准中规定的蔬菜 Cd 含量限值，但有 11.11% 的蔬菜超标，对人群存在健康风险。

（3）利用方式影响土壤 Cd 的累积，土壤 Cd 含量、污染指数、地累积指数、潜在生态危害指数平均值大小顺序均为：菜地 > 林地 > 果园 > 荒地，且菜地与其他 3 种利用方式差异显著。

参考文献（References）：

[1] LI J H, LU Y , YIN W, GAN H H, ZHANG C, DENG X L, LIAN J. Distribution of heavy metals in agricultural soils near a petrochemical complex in Guangzhou, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 153(1-4):365-375.

[2] 陈春霞, 卢瑛, 尹伟, 邓香连, 连瑾. 骨粉和沸石对污染土壤中铅和镉生物有效性的影响 [J]. 广东农业科学, 2011, 38（14）: 000060-62.
CHEN C X, LU Y, YING W, DENG X L, LIAN J. Effect of bonemeal and zeolite on bioavailability of lead and cadmium in contaminated soils [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(14):60-62.

[3] 韦绪好, 孙庆业, 程建华, 窦智勇, 王琛. 焦岗湖流域农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价 [J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(12): 2304-2311.
WEI X H, SUN Q Y, CHENG J H, DOU Z Y, WANG C. Pollution and potential ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils in Jiaogang Lake Basin,China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(12):2304-2311.

[4] 肖明, 杨文君, 张泽, 吕新, 迟德钊. 柴达木农田土壤 Cd 的积累及风险预测 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5):1272-1280.
XIAO M, YANG W J, ZHANG Z, LV X, CHI D Z. Cadmium accumulation in soil and risk prediction in the Qaidam Basin [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(5):1272-1280.

[5] RACHWAŁ M, KARDEL K, MAGIERA T, BENS O. Application of magnetic susceptibility in assessment of heavy metal contamination of Saxonian soil (Germany) caused by industrial dust deposition [J]. *Geoderma*, 2017, 295:10-21.

[6] 陈卫平, 杨阳, 谢天, 王美娥, 彭驰, 王若丹. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策 [J]. 土壤学报, 2018, 55（2）: 261-272.
CHEN W P, YANG Y, XIE T, WANG M E, PENG C, WANG R D. Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(2):261-272.

[7] 付丽丽, 姚常琦, 李学斌, 姜彬慧. 沈阳农用土地重金属污染评价与来源分析 [J]. 广东农业科学, 2013, 40（16）: 178-181.
FU L L, YAO C Q, LI X B, JIANG B H. Evaluation of heavy metal pollution in soils of agricultural lands in Shenyang and source analysis [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013, 40(16):178-181.

[8] 陈怀满. 土壤 - 植物系统中的重金属污染 [M]. 北京 : 科学出版社 , 1996:7-121.
CHEN H M. Heavy metals contamination of soil-plant system [M]. Beijing: Science Press, 1996:7-121.

[9] CHANEY R L, REEVES P G, RYAN J A, SIMMONS R W, WELCH R M, ANGLE J S. An improved understanding of soil Cd risk to humans and low cost methods to phytoextract Cd from contaminated soils to prevent soil Cd risks [J]. *Biometals An International Journal on the Role of Metal Ions in Biology Biochemistry & Medicine*, 2004, 17:549-53.

[10] GODT J, SCHEIDIG F, GROSSE-SIESTRUP C, ESCHE V, BRANDENBURG P, REICH A, GRONEBERG D A. The toxicity of cadmium and resulting hazards for human health [J]. *Journal of occupational medicine and toxicology*, 2006, 1: 22-27.

[11] 林子江, 贾燕, 夏迪, 曾经文, 蔡倩怡, 赵坤荣. 土壤调理剂对蔬菜镉吸收的影响研究 [J]. 广东农业科学 , 2018, 45(5): 47-51.
LIN Z J, JIA Y, XIA D, ZENG J W, CAI Q Y, ZHAO K R. Effects of soil conditioner on cadmium uptake in vegetables [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2018, 45(5): 47-51.

[12] 全国土壤污染状况调查公报 [EB/OL].（2014-04-17）. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm.
Report on the national general survey of soil contamination [EB/OL]. (2014-04-17). http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm.

[13] 钟来元, 郭良珍. 不同利用方式农用地土壤重金属污染状况及其动态变化特征——以广东省徐闻县为例 [J]. 生态环境学报, 2011, 20(12):1934-1939.
ZHONG L Y, GUO L Z. A case study of heavy metals pollution and their seasonal changes in soils with different use types in Xuwen, Guangdong province [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(12):1934-1939.

[14] 郑袁明, 罗金发, 陈同斌, 陈煌, 郑国砥, 吴泓涛, 周建利. 北京市不同土地利用类型的土壤镉含量特征 [J]. 地理研究, 2005, 24(4): 542-548.
ZHENG Y M, LUO J F, CHEN T B, CHEN H, ZHENG G D, WU H T, ZHOU J L. Cadmium accumulation in soils for different land uses in Beijing [J]. *Geographical Research*, 2005, 24(4): 542- 548.

[15] 孙超, 陈振楼, 毕春娟, 刘耀龙, 张翠, 王东启, 史贵涛, 叶明武. 上海市崇明岛农田土壤重金属的环境质量评价 [J]. 地理学报, 2009, 64（5）: 619-628.
SUN C, CHEN Z L, BI C J, LIU Y L, ZHANG C, WANG D Q, SHI G T, YE M W. Evaluation on environmental quality of heavy metals in agricultural soils of Chongming Island, Shanghai [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(5): 619-628.

[16] 陈宗娟, 张倩, 张强, 孙文彬, 鞠美庭, 邵超峰, 李发生, 谷庆宝. 天

津东南部某区域不同土地利用方式下土壤重金属的累积特征[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(2): 166–173.

CHEN Z J ZHANG Q, ZHANG Q, SUN W B, JU M T, SHAO C F, LI F S, GU Q B. Accumulation characteristics of heavy metals in soils as affected by land use in Southeast Tianjin[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, 31(2):166–173.

[17] 谢婧, 吴健生, 郑茂坤, 王仰麟, 李俊杰, 彭建. 基于不同土地利用方式的深圳市农用地土壤重金属污染评价[J]. 生态毒理学报, 2010, 5(2): 202–207.

XIE J, WU J S, ZHENG M K, WANG Y L, LI J J, PENG J. Evaluation of the heavy metal pollution in different agricultural soils of Shenzhen City[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2010, 5(2):202–207.

[18] 曾希柏, 李莲芳, 梅旭荣. 中国蔬菜土壤重金属含量及来源分析[J]. 中国农业科学, 2007, 40(11): 2507–2517.

ZENG X B, LI L F, MEI X R. Heavy metal content in soils of vegetable-growing lands in China and source analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(11):2507–2517.

[19] 夏运生, 万洪富, 杨国义, 马瑾, 罗薇. 东莞市不同区域菜地土壤重金属污染状况研究[J]. 生态环境学报, 2004, 13(2): 170–172.

XIA Y S, WAN H F, YANG G Y, MA J, LUO W. The heavy metal contamination of vegetable soil in Dongguan City[J]. *Ecology and Environmental Sciences* 2004, 2004, 13(2):170–172.

[20] 蔡立梅, 马瑾, 周永章, 黄兰椿, 陈飞香, 谢晓华, 杨小强. 东莞市农田土壤和蔬菜重金属的含量特征分析[J]. 地理学报, 2008, 63(9): 994–1003.

CAI L M, MA J, ZHOU Y Z,HUANG L C, CHEN F X, XIE X H, YANG X Q. Heavy metal concentrations of agricultural soils and vegetables from Dongguan, Guangdong Province, China. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(9): 994–1003.

[21] 蔡立梅, 马瑾, 周永章, 黄兰椿, 窦磊, 张澄博, 付善明. 东莞市农业土壤重金属的空间分布特征及来源解析[J]. 环境科学, 2008, 29(12): 3496–3502.

CAI L M, MA J, ZHOU Y Z, HUANG L C, DOU L, ZHANG C B, FU S M. Multivariate geostatistics and GIS-based approach to study the spatial distribution and sorces of heavy metals in agricultural soil in the Pearl River Delta, China[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(12):3496–3502.

[22] 窦磊, 马瑾, 周永章, 付善明, 彭先芝, 张澄博, 蔡立梅, 钟莉莉. 乡镇企业密集区菜地土壤重金属含量分布特征及生态效应——以东莞市为例[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6): 2048–2056.

DOU L, MA J, ZHOU Y Z, FU S M, PENG X Z, ZHANG C B, CAI L M, ZHONG L L. Distribution characteristics and ecological effects of heavy metals in vegetable soils from township – enter – prise prosperity area: a case study of Dongguan[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(6):2048–2056.

[23] 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: 12–479.

LU R K. Methods of soil and agro-chemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 12–479.

[24] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.15–2014 食品安全国家标准——食品中镉的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

The State Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.15–2014 The national food safety standard-measurement of cadmium in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.

[25] 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: 330–381.

China National Environmental Monitoring Centre. Soil Element Background Values in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 330–381.

[26] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. GB 15618–2018 土壤环境质量——农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.

Ministry of ecology and environment of the people's republic of china, state administration for market regulation. GB 15618–2018 Soil environmental quality-risk control standard for soil contamination of agricultural land (Trial implementation)[S]. Beijing: China Environmental Press, 2018.

[27] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 2762–2017 食品安全国家标准——食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

The state health and family planning commission of the People's Republic of China, China food and drug administration. GB 2762–2017 The national food safety standard-limit standard of contaminants in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

[28] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975–1001.

[29] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 赵其国. 长江三角洲地区土壤重金属污染的空间变异特征——以江苏省太仓市为例[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 33–40.

ZHONG X L, ZHOU S L, LI J T ZHAO Q G. Spatial variability of soil heavy metals contamination in the Yangtze River Delta——a case study of taicang city in Jiangsu province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1):33–40.

[30] 李军辉, 卢瑛, 尹伟, 聂呈荣, 吴大付, 张朝, 陈春霞, 董飞. 佛山市某工业区周边蔬菜重金属富集特征的研究[J]. 华南农业大学学报, 2008, 29(4): 17–20.

LI J H, LU Y, YIN W NIE C R, WU D F, ZHANG C, CHEN C X, DONG F. Accumulation of heavy metals in vegetables grown around an industrial area in Foshan[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2008, 29(4):17–20.

[31] 师荣光, 周启星, 刘凤枝, 赵玉杰, 郑向群, 张浩. 天津郊区土壤-蔬菜系统中 Cd 的积累特征及污染风险[J]. 中国环境科学, 2008, 28(7): 634–639.

SHI R G, ZHOU Q X, LIU F Z, ZHAO Y J, ZHENG X Q, ZHANG H. Cadmium accumulation and pollution risks to human health based on Monte-Carlo model of soil and vegetable using vegetable field in Tianjin suburbs as example[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(7):634–639.

[32] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌, 王敏. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 392–397.

LIU R L, LI S T, WANG X B, WANG M. Contents of heavy metal in commercial organic fertilizers and organic wastes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2):392–397.

[33] ALEXANDER P D, ALLOWAY B J, DOURADO A M. Genotypic variations in the accumulation of Cd, Cu, Pb and Zn exhibited by six commonly grown vegetables[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144(3): 736–745.

(责任编辑　杨贤智)