



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

鸽粪农业利用潜力及其重金属风险评价

王家裕, 何振贤, 郑雄开, 赖伟斌, 陈惠诗, 贾爱萍, 邹梦遥, 陶雪琴, 杜建军

引用本文:

王家裕, 何振贤, 郑雄开, 赖伟斌, 陈惠诗, 贾爱萍, 邹梦遥, 陶雪琴, 杜建军. 鸽粪农业利用潜力及其重金属风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 442–451.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0235>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

杞麓湖径流区不同湿地沉积物重金属污染特征及潜在生态风险评价

浦江, 张翠萍, 刘淑娟, 杨小燕, 赵斌, 李淑英, 陆轶峰, 王媛媛, 周元清

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 755–763 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0484>

珠江河网淡水鱼、虾和河蚬重金属污染特性及安全性评价

谢文平, 马丽莎, 郑光明, 刘书贵

农业资源与环境学报. 2019, 36(6): 839–846 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0187>

宁夏贺兰县土壤重金属分布特征及其生态风险评价

周勤利, 王学东, 李志涛, 王夏晖, 何俊, 季国华

农业资源与环境学报. 2019, 36(4): 513–521 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0191>

安徽省某市农田土壤与农产品重金属污染评价

岳蛟, 叶明亮, 杨梦丽, 崔俊义, 马友华

农业资源与环境学报. 2019, 36(1): 53–61 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0336>

典型喀斯特地区土壤重金属累积特征及环境风险评价

刘南婷, 刘鸿雁, 吴攀, 罗广飞, 李学先

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 797–809 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0434>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王家裕, 何振贤, 郑雄开, 等. 鸽粪农业利用潜力及其重金属风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 442–451.

WANG J Y, HE Z X, ZHENG X K, et al. Evaluation of the agricultural use potential of pigeon manure and its heavy metal risks[J]. *Journal of*

Agricultural Resources and Environment, 2024, 41(2): 442–451.



开放科学 OSID

鸽粪农业利用潜力及其重金属风险评价

王家裕¹, 何振贤¹, 郑雄开², 赖伟斌¹, 陈惠诗¹, 贾爱萍¹, 邹梦遥¹, 陶雪琴^{1*}, 杜建军¹

(1. 仲恺农业工程学院资源与环境学院, 广东省农业产地环境污染防治工程技术研究中心, 广州 510225; 2. 华南理工大学环境与能源学院, 工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室, 广州 510006)

摘要: 为了解鸽粪组分及其农业利用过程中重金属的潜在生态风险, 本研究采集了广东省肉鸽养殖基地的鸽粪样品, 检测分析了鸽粪中 Cu、Zn、Cd、Cr、Ni、Pb、Hg、As 8 种重金属含量以及全氮、全磷、全钾含量, 采用单因子污染指数法与综合污染指数法评价了鸽粪重金属污染程度, 同时, 根据水稻所需全氮含量分析鸽粪安全农使用年限, 并通过 Hakanson 潜在生态污染评价法进行验算。结果表明: 对比德国腐熟肥料标准, 鸽粪中 Cu、Zn 含量超标, 样品超标率分别为 18.18% 和 36.36%, 总超标率为 45.45%。单因子污染指数表明鸽粪重金属 Zn、Cu、Ni 分别有 36.36%、18.18%、18.18% 的样品处于污染水平, 其余重金属含量均在《有机肥料》(NY/T 525—2021) 的限量范围内。内梅罗综合污染指数表明, 处于警示及以上污染水平的点位主要受 Cu、Zn 污染。在不考虑重金属流失情况下, 广东省水稻种植中连续施用鸽粪 10 a 无重金属污染风险, 而在水田旱作系统中, 以作物所需全磷量为施肥指标的情况下, 鸽粪安全农使用年限可达 50 a。研究表明, 鸽粪农利用过程中会使重金属在农田土壤中累积, 引起重金属污染, 应加强鸽粪无害化处理及安全利用等技术研究。

关键词: 鸽粪; 农业利用; 重金属; 安全施使用年限; 风险评价

中图分类号: S141.9

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2024)02-0442-10

doi: 10.13254/j.jare.2023.0235

Evaluation of the agricultural use potential of pigeon manure and its heavy metal risks

WANG Jiayu¹, HE Zhenxian¹, ZHENG Xiongkai², LAI Weibin¹, CHEN Huishi¹, JIA Aiping¹, ZOU Mengyao¹, TAO Xueqin^{1*}, DU Jianjun¹

(1. College of Resources and Environment, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangdong Engineering Research Center of Environmental Pollution Prevention and Control in Agricultural Areas, Guangzhou 510225, China; 2. Key Laboratory of Pollution Control and Ecological Restoration in Industrial Agglomeration, Ministry of Education, School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: To investigate the potential ecological risks of heavy metals in pigeon manure fractions and their agricultural use, samples of pigeon manure were collected from meat pigeon breeding bases in eight cities of Guangdong Province. The contents of eight heavy metals (Cu, Zn, Cd, Cr, Ni, Pb, Hg, and As) and of total N, total P, and total K were detected, and the pollution degree of heavy metals in pigeon manure was evaluated by the single-factor and comprehensive contamination index method. At the same time, the safe agricultural use life of pigeon manure applied to soil was analyzed according to the content of total nitrogen required for rice, and was verified by Hakanson's potential pollution evaluation method. The results showed that compared with the German standard for decomposed manure, there were mainly Cu and Zn exceedances in pigeon manure, which were 18.18% and 36.36%, respectively, and the total exceedance rate of the samples was 45.45%. The results of the single-factor pollution index method showed that out of all heavy metals assessed, 36.36%, 18.18%, and 18.18% of Zn, Cu, and Ni in pigeon manure were at the pollution level, respectively. The heavy metals that reached the warning levels and exceeded the pollution levels of the Nemero integrated pollution index were mainly Cu and Zn. Without considering heavy metal loss, there was no risk of heavy metal pollution in rice cultivation in Guangdong Province with continuous application of pigeon

收稿日期: 2023-04-14 录用日期: 2023-06-30

作者简介: 王家裕(1999—), 男, 广东潮州人, 硕士研究生, 主要从事农业资源利用与环境修复技术研究。E-mail: wjy2473745004@163.com

*通信作者: 陶雪琴 E-mail: xqtiao@foxmail.com

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2020B0202080002, 2019B110207001)

Project supported: The Key-Area Research and Development Program of Guangdong Province(2020B0202080002, 2019B110207001)

manure for 10 years. In the case of the dry farming system in rice fields, the safe agricultural use of pigeon manure could be for up to 50 years if the amount of total P required by the crop is used as the fertilization index. In conclusion, pigeon manure could cause heavy metal accumulation and pollution in agricultural use, thus, it is necessary to strengthen the safe utilization of pigeon manure.

Keywords: pigeon manure; agricultural utilization; heavy metals; safe application life; risk assessment

在我国,每年产生超过30亿t动物粪便,其中部分粪便未经预处理直接施入农田,畜禽粪便中的毒害物质容易通过多种途径输入到土壤、地表水和大气中,造成区域环境污染^[1-2]。肉鸽具有较高的营养价值,其产业在国内已达到一定规模^[3]。近年来随着我国种鸽存栏量不断增加,生产总量已占到世界总量的80%以上^[3-4]。2020年农业农村部将鸽子列为家禽,位居鸡、鸭、鹅之后,成为名副其实的第四禽,其中广东省的肉鸽养殖规模占全国一半以上^[4-5]。而据相关统计数据计算,广东省鸽粪年排放量高达 9.9×10^5 t,与鸡粪的年产生量相当^[6-8]。

畜禽粪便产量大、营养组分含量高,将其作为有机肥直接还田曾被认为是最经济实用的资源利用化方式之一,其能有效节约农业生产的成本,改变农业施肥结构,形成良好的生态循环^[9]。然而,畜禽粪便由于其复杂的组分可能会成为污染源,其内源的重金属和病原微生物等污染物可能会对土壤环境和农作物产生危害,且将其直接用于农业可能导致水体的化学需氧量、氨氮、全氮、全磷等指标超标。2020年我国生态环境部等发布的《第二次全国农业污染源普查公报》显示,畜禽粪便是目前农业面源污染的主要来源之一。已有研究表明,我国农业土壤重金属Cu、Zn和Cd输入总量的69%、51%和55%来自牲畜粪便,密集持续施用有机肥会使土壤Cu、Zn、Cd和Cr污染加重^[10-11]。此外,土壤中的重金属含量过高会导致细菌、放线菌等土壤微生物的数量和活性降低,进而影响土壤在农业生产中的功能^[12]。因此,将畜禽粪便等有机肥用于农业土壤前需保证其内源重金属水平在较低范围内^[13]。

禽畜粪便中的重金属水平因动物种类不同而差异较大,肉鸽养殖业作为新兴行业,其粪便具有农业利用潜力。而目前的研究主要针对猪、牛、羊等畜禽粪便的营养组分和重金属含量,而对于肉鸽行业产生的粪便组分及其施用于农田土壤后的环境生态风险仍缺乏系统调研^[14]。此外,稻米作为我国第二大粮食作物、南方地区第一大粮食作物,其质量安全在我国粮食安全中的地位举足轻重^[15]。鉴于此,本研究在采集广东省8个城市肉鸽养殖基地的鸽粪基础上,系统

分析其营养组分和重金属含量等指标,同时,依据广东省水稻一年两造的种植周期,利用施氮量、鸽粪含氮量、广东省土壤重金属背景值等指标,对比有机肥相关限量标准和《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),对鸽粪的安全农用年限及其农用风险进行估算,为鸽粪有机肥的安全合理施用提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集和制备

在广东省茂名市(MM1、MM2)、韶关市(SG1、SG2)、清远市(QY1、QY2)、潮州市(CZ1)、深圳市(SZ1)、广州市(GZ1)、湛江市(ZJ1)、梅州市(MZ1)8个城市的11个肉鸽养殖基地采集鸽粪样品。每个点位的样品混匀后,采用四分法收集样品1 kg于塑料密封袋中。采集粪便置于大棚中自然风干至恒质量,剔除石砾和植物残体,研磨过20目和100目筛,储存于密封袋中备用。

1.2 样品理化性质测定

鸽粪中Cu、Zn、Cd、Cr、Ni、Pb、Hg、As含量采用盐酸-硝酸消化,电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定^[16]。全氮、全磷、全钾测定参照《有机肥料》(NY/T 525—2021)。

1.3 参照标准

广东省重金属土壤背景值参照《中国土壤元素背景值》^[17]中的A层土壤重金属含量;粪便重金属评价中Cd、Cr、Pb、As、Hg限值参考《有机肥料》(NY/T 525—2021),重金属Cu、Zn、Ni采用德国腐熟堆肥中重金属限值^[18];土壤重金属风险评价参考《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)。具体数值如表1所示。

1.4 鸽粪农用风险分析方法

1.4.1 鸽粪安全施用年限

水稻是广东省的主要粮食作物,畜禽粪便农用需考虑其氮含量^[19]。Zhang等^[20]对我国27个省2346个村进行调查,结果表明,水稻平均氮肥施用量为 $209 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。假定种植模式为早晚造水稻,则广东省鸽粪输入农田的安全农用年限理论值具体为:

表1 鸽粪农用风险评价参照标准($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 1 Reference standards for agricultural risk assessment of pigeon manure($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

参照标准 Reference standard	Cu	Zn	Cd	Cr	Ni	Pb	As	Hg
《有机肥料》(NY/T 525—2021)			3	150		50	15	2
德国腐熟肥料标准	100	400			20			
广东省土壤背景值	17.00	47.30	0.056	50.50	14.40	36.00	8.90	0.078
《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)	50	200	0.3	250	60	80	30	0.5

植物养分需求量(粪肥)=

植物养分需求量×施肥供给养分占比×粪肥占施肥比例
粪肥当季利用率

(1)

$$L = \frac{R_n}{N_m} \times M_m \quad (2)$$

$$T = \frac{(M_s - M_b) \times m \times 10^{-3}}{L} \quad (3)$$

式中:植物养分需求量综合现实情况取值为 $418 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;施肥供给养分占比取值为55%^[21];粪肥占施肥比例取值为50%^[22];粪肥当季利用率采用《畜禽粪便还田技术规范》(GB/T 25246—2010)推荐值30%; L 为每年带入农田土壤的重金属总量, $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; R_n 为植物养分需求量(粪肥), $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; N_m 为鸽粪含氮量, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; M_m 为鸽粪中重金属质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; T 为农田土壤重金属达到限值所用时间, a; M_s 为GB 15618—2018规定的重金属限值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; M_b 为土壤重金属背景值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; m 为农田表层0~20 cm土壤质量,取值为 $2.3\times 10^6 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

1.4.2 施用鸽粪的环境风险

单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法是当前国内外反映有机肥料重金属实际污染状况的主要方法之一^[23]。

单因子污染指数法的计算公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (4)$$

式中: P_i 为重金属 i 的单因子污染指数; C_i 为重金属 i 的平均浓度值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; S_i 为重金属 i 相应的限量标准, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

内梅罗综合污染指数法的计算公式如下:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{P_{i\max}^2 + \bar{P}_i^2}{2}} \quad (5)$$

式中: $P_{i\max}$ 为单因子污染指数最大值; $\bar{P}_i$ 为各污染指数平均值; $P_{\text{综}}$ 为综合污染指数。

根据表2及表3所示污染指数分级评价污染级别^[23], P_i 或 $P_{\text{综}}$ 越大,表示环境风险越大。

1.4.3 施用鸽粪的潜在生态风险

Hakanson潜在污染评价法已被广泛应用于评价土壤重金属污染,该评价法引入了毒性响应系数,从毒理学的角度考虑了各重金属元素的毒性效应,将环境效应同毒理学关联,其评价结果更能体现土壤环境质量安全状况^[24],可通过公式(6)对广东省施用鸽粪的潜在生态风险进行评价:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n T_i \times C_i = \sum_{i=1}^n T_i \times \frac{C_i}{C_r} \quad (6)$$

式中: RI 为多种重金属的潜在生态风险指数; E_i 为单一重金属 i 的潜在生态风险系数; T_i 为重金属 i 的毒性响应系数,Hg、Cd、As、Pb、Cu、Ni、Cr和Zn 8种重金属的 T_i 依次为40、30、10、5、5、5、2、1; C_i 为重金属 i 的污染系数; C_i 为重金属含量实际值, C_r 为重金属地累积速率×施用年限+ C_r ; C_r 为广东省土壤环境背景值。Hakanson潜在生态指数分级标准见表4^[24]。

2 结果与分析

2.1 鸽粪重金属含量

广东省不同城市的鸽粪重金属含量如图1所示,鸽粪重金属Cd、Cr、Ni、Pb、Hg、As含量均在我国《有机肥料》(NY 525—2021)重金属标准限值以内,重金属Cu、Zn含量超过德国腐熟粪肥标准。Cu超标样品占

表2 单因子污染指数分级

Table 2 Single factor pollution index classification

$P_i < 1$	$1 \leq P_i < 2$	$2 \leq P_i < 3$	$P_i \geq 3$
无污染	轻度污染	中度污染	严重污染

表3 综合污染指数分级

Table 3 Classification of comprehensive pollution index

$P_{\text{综}} < 0.7$	$0.7 \leq P_{\text{综}} < 1$	$1 \leq P_{\text{综}} < 2$	$2 \leq P_{\text{综}} < 3$	$P_{\text{综}} \geq 3$
无污染	警示	轻度污染	中度污染	严重污染

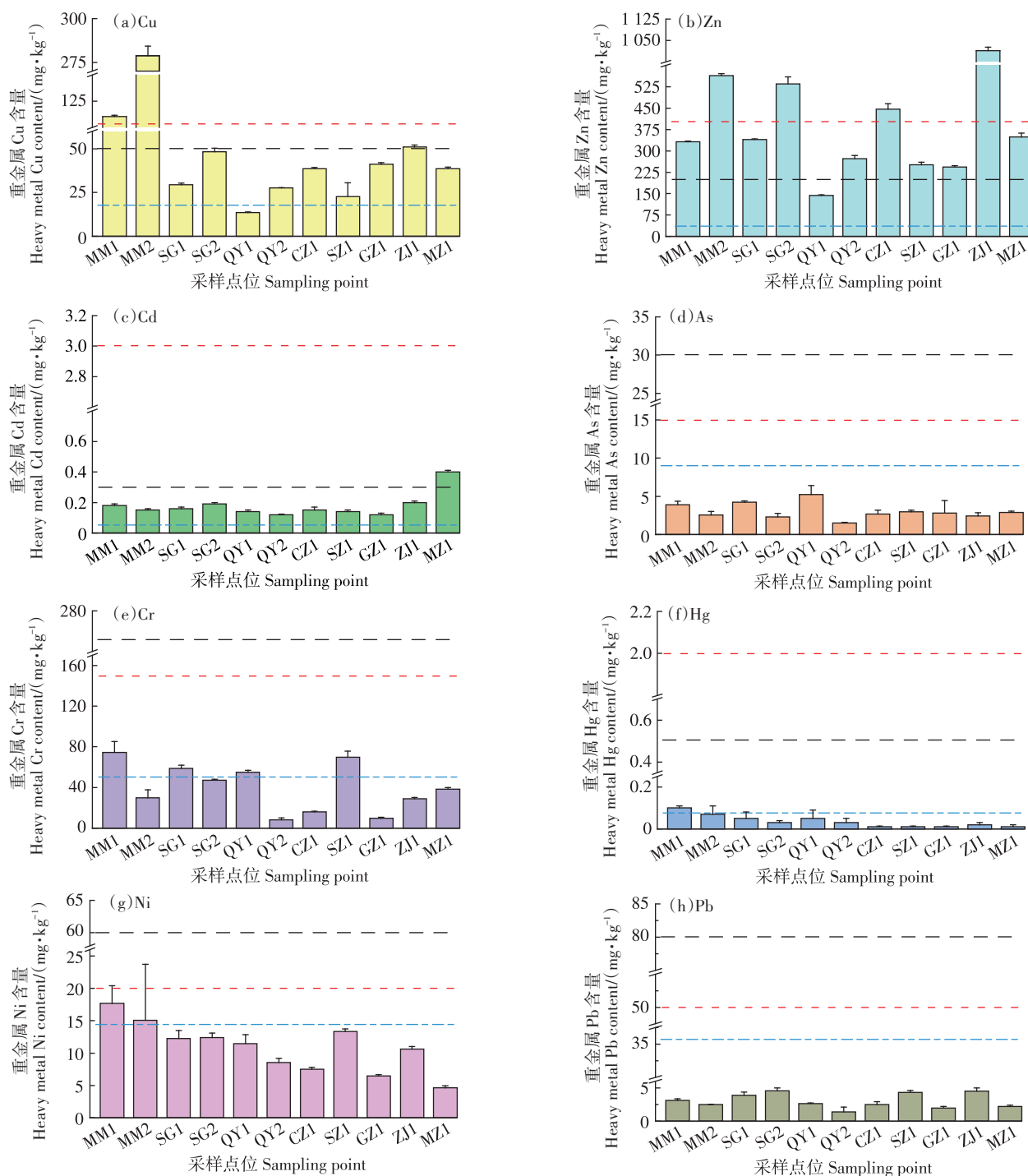
表4 Hakanson潜在生态风险等级划分

Table 4 Classification of Hakanson's potential ecological risk

$RI < 135$	$135 \leq RI < 265$	$265 \leq RI < 525$	$RI \geq 525$
低度	中度	重度	严重

总样品的18.18%,Zn超标样品占总样品的36.36%,整体超标率高达45.45%。而相较于《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),广东省鸽粪重金属Cu、Zn和Cd含量均存在一定的超标现象,其中Cu超标率为27.27%,最高值超

过标准4.56倍;Zn超标率为90.91%,最高值超过标准4.07倍;Cd超标率为9.09%,最高值超过标准33%。各城市间无明显规律,但均为重金属Cu、Zn含量偏高,因此鸽粪施用于农田可能存在一定的重金属累积风险。



--- 《有机肥料》(NY/T 525—2021)限值 -- 《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)限值 --- 广东省土壤背景值

图1 广东省鸽粪重金属含量

Figure 1 Heavy metal content of pigeon manure in Guangdong Province

2.2 鸽粪养分

畜禽粪便由于富含有机质和氮磷钾养分,对改善土壤结构、提高农作物品质、缓解化学肥料的过量使用具有至关重要的作用。目前我国有机肥料的施用通常以有机肥的含氮量作为基准,而作物对磷的需求量通常低于氮,作物常见的氮磷比通常在10~20之间,过低的氮磷比可能会导致土壤磷的流失,进而造成农业面源污染^[11,25]。广东省不同城市的鸽粪全氮、全磷、全钾含量如图2所示。

由图2可见,广东省不同城市的鸽粪全氮含量平均值为 $27.38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,最高值为点位MZ1($36.28 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),最低值为点位MM1($14.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$);全磷含量平均值为 $16.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,最高值为点位ZJ1($23.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),最低值为点位QY1($9.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$);全钾含量平均值为 $19.07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,最高值为点位ZJ1($27.90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),最低值为点位QY1($8.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。广东省各城市的鸽粪养分含量普遍呈现全氮>全钾>全磷的趋势。同时,由于鸽粪的氮磷比平均值低至1.70,鸽粪直接施用可能导致土壤磷的流失,进而造成水体富营养化。

2.3 广东省鸽粪安全施用年限与潜在生态风险

广东省鸽粪安全农用地年限估算结果如图3所示,Ni、Pb、Hg、As、Cr的输入对鸽粪安全农用地年限影响较小,而Zn、Cu、Cd是影响鸽粪安全农用地年限的主要限制因子,持续输入27.09~144.23、19.28~330.08、120.10~424.73 a的鸽粪可分别导致土壤Zn、Cu、Cd超标,最低安全农用地年限为19 a。

同时,根据鸽粪的安全使用年限计算重金属的地累积速率,假设不考虑重金属流失,连续施用10 a鸽粪,采用Hakanson潜在污染评价法得到土壤的潜在生态风险,如图4所示。鸽粪施用10 a后,所有采样

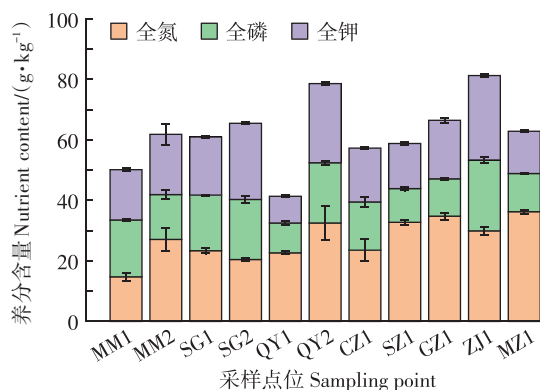


图2 广东省鸽粪养分含量

Figure 2 Nutrient content of pigeon manure in Guangdong Province

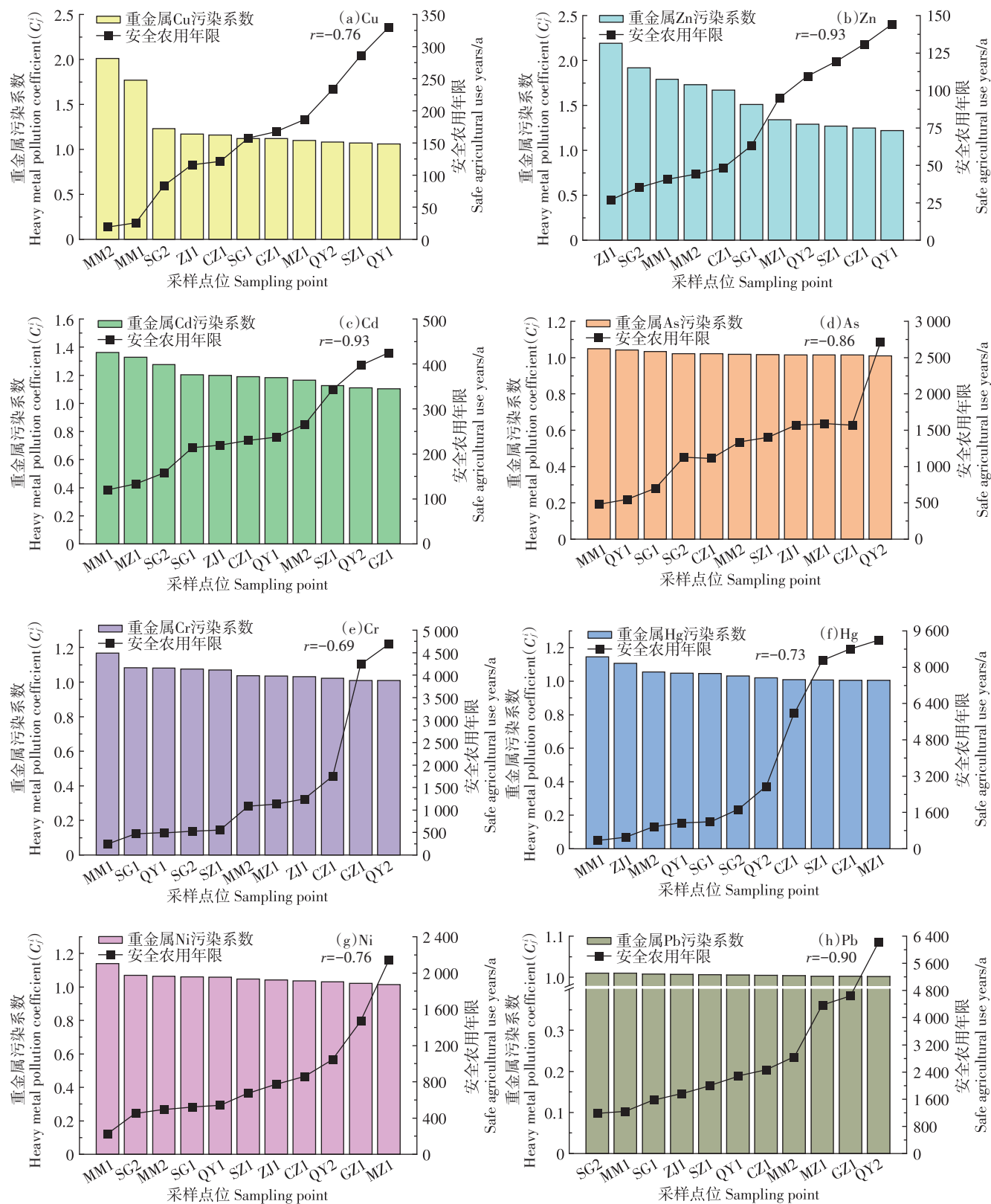
点位潜在生态风险指数均<135,风险程度均属于低度,且安全农用地年限与重金属污染系数高度负相关。

2.4 广东省鸽粪施用环境风险

根据鸽粪中的重金属含量(图1)与其相应限量标准计算得到相应的单因子污染指数(图5a),依据表1的单因子污染指数分级可知:重金属Zn单因子污染指数普遍较高,单因子污染指数范围在0.36~2.53之间,63.64%样品处于无污染水平,27.27%样品处于轻度污染水平,9.09%样品处于中度污染水平;Cu单因子污染指数范围在0.14~2.79之间,81.82%样品处于无污染水平,9.09%样品处于轻度污染水平,9.09%样品处于中度污染水平;Ni单因子污染指数范围在0.23~0.88之间,81.82%样品处于无污染水平,18.18%样品处于轻度污染水平;Cd、Cr、Pb、Hg、As单因子污染指数范围分别在0.04~0.13、0.07~0.50、0.03~0.09、0.01~0.08、0.10~0.35之间,均处于无污染水平。由图5b可知:采样点位SG1、QY1、QY2、SZ1、GZ1、MZ1综合污染指数值为无污染水平;点位MM1、SG2、CZ1综合污染指数值为警示水平;点位ZJ1综合污染指数值为轻度污染水平;点位MM2综合污染指数值为中度污染水平。综合污染指数在警示及以上水平的点位主要受到重金属Cu、Zn的污染。

3 讨论

为评价鸽粪中的重金属含量对其农业利用是否存在风险,本研究选取我国的鸽子养殖大省——广东省进行采样及调查分析。结果发现,对比德国腐熟肥料标准,广东省鸽粪重金属Cu、Zn含量超标,Cu超标率为18.18%,Zn超标率为36.36%,总超标率高达45.45%。这是由于从20世纪初开始,Cu和Zn被逐渐添加到动物饲料和兽药中,以促进家畜生长和伤口愈合^[26-27]。随着畜禽摄入饲料和兽药,大量没有被吸收的重金属残存于粪便中,而后被施入农田,导致重金属Cu、Zn在土壤中不断累积^[28]。姚丽贤等^[14]对广东省集约化养殖场鸽粪重金属含量调查发现,鸽粪的Cu含量为 $56.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Zn含量为 $210.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Pb含量为 $3.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cd含量为 $0.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cr含量为 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,As含量为 $2.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,除Cd外其余重金属均低于本研究中鸽粪的重金属含量。这可能与肉鸽矿物质饲料——保健砂配比不均有关^[29]。为此,本研究还检测了点位MZ1的肉鸽进食饲料中的重金属含量(表5),由表可知,保健砂中Cu、Zn、Cr含量分别是原粮的21.54、40.36、11.58倍,是复合粮的10.68、



r 为 CORREL 函数计算所得, 两组数据正相关性越大, r 越接近 1; 反之两组数据负相关性越大, r 越接近 -1。

r is calculated by CORREL function, the greater the positive correlation between the two groups of data, the closer r is to 1; conversely, the greater the negative correlation between the two groups of data, the closer r is to -1.

图3 广东省鸽粪安全农用地年限与各重金属污染系数

Figure 3 Safe agricultural use years and heavy metal pollution coefficients of pigeon manure in Guangdong Province

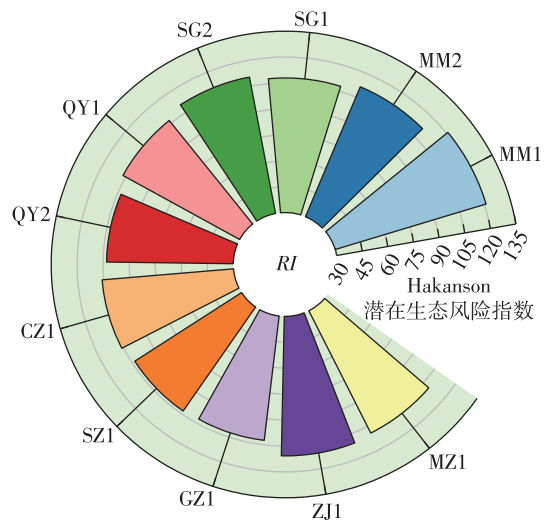


图4 鸽粪施用10 a后各点位潜在生态风险

Figure 4 Potential ecological risks at various sites after 10 years of pigeon manure application

12.97、13.73 倍,说明保健砂为鸽粪重金属的主要来源。此外,在本研究中不同养殖场的鸽粪重金属含量差异较大,这除了与保健砂配比不均有关外,还与不同养殖场的粪污收集方式有关(图6)。点位SG2(Cu: 48.25 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Zn: 535.23 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、ZJ1(Cu: 51.05 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Zn: 1 013.63 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)粪污收集方式如图6a

所示;点位SG1(Cu: 29.43 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Zn: 339.58 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、QY1(Cu: 13.61 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Zn: 144.13 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、QY2(Cu: 27.56 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Zn: 272.50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、GZ1(Cu: 41.12 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Zn: 243.66 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、MZ1(Cu: 38.6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Zn: 349.59 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)粪污收集方式如图6b所示。肉鸽喂养区与生活区分离,能有效防止保健砂掉落在鸽粪收集装置中,降低鸽粪重金属Cu、Zn超标的风险。Sohi等^[30]采集了印度农村地区野生蓝岩鸽新鲜粪便,测定其重金属含量,发现鸽粪Cu含量为10.58 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Zn含量为54.85 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Pb含量为3.1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cd含量为0.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Ni含量为2.85 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,As含量为0.7 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其重金属Cu、Zn远低于本研究 and 姚丽贤等^[14]的研究中鸽粪重金属含量,这说明人工养殖下肉鸽所摄入的重金属Cu、Zn远高于野生鸽子。

然而,不同来源的畜禽粪便往往具有不同的养分含量(表6)和重金属污染特征(表7)。由表6可知,鸽粪中氮、磷、钾养分含量均高于其他畜禽粪便。由表7可知,不同类别畜禽粪便重金属含量总体呈猪粪>鸡粪>鸽粪>牛粪>羊粪的趋势,其中鸽粪相较于鸡粪重金属Zn含量偏高,其余重金属含量均低于鸡粪。整体而言,鸽粪具有较高的农业利用价值。

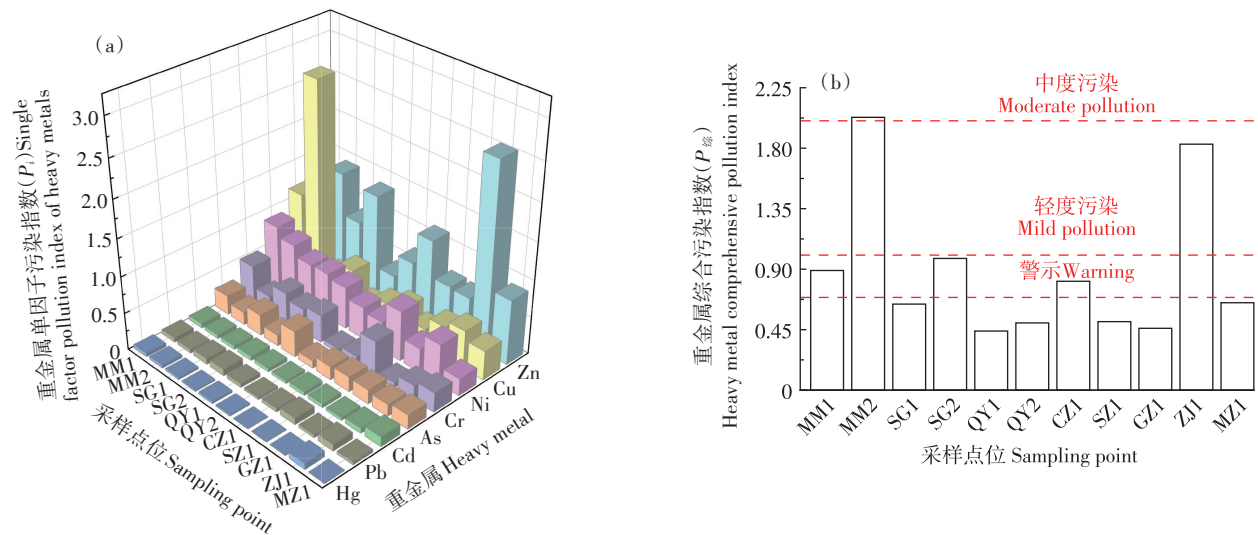


图5 鸽粪重金属单因子污染指数(a)和综合污染指数(b)

Figure 5 Single factor pollution index(a) and comprehensive pollution index(b) of heavy metals in pigeon manure

表5 肉鸽进食饲料重金属含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 5 Heavy metal content of feed for meat pigeons($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

进食饲料类别 Feeding category	Cu	Zn	Cd	Ni	Cr	Pb	Hg	As
原粮	9.32	47.37	0.10	3.12	8.11	0.83	<0.001 7	2.23
复合粮	18.80	147.39	0.09	5.97	6.84	0.86	<0.001 7	3.42
保健砂	200.83	1 911.95	0.53	5.05	93.92	2.19	<0.001 7	11.46

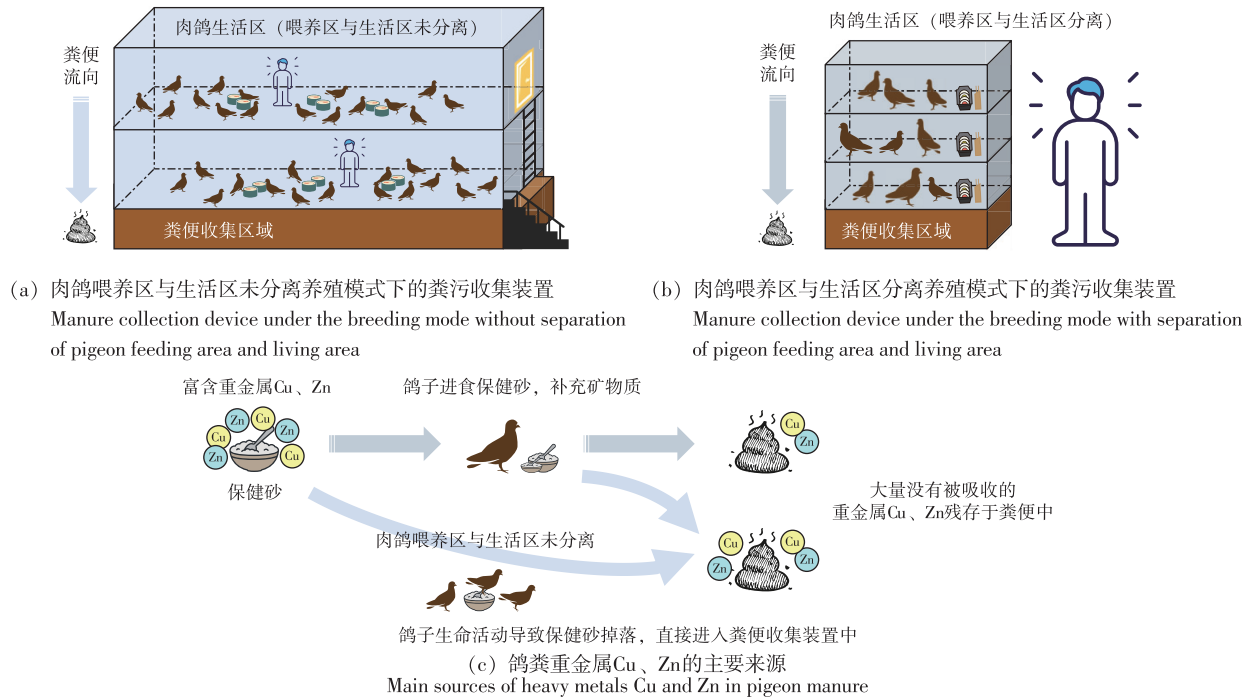


图6 不同粪污收集方式下鸽粪重金属Cu、Zn来源示意图

Figure 6 Schematic diagram of the sources of heavy metals Cu and Zn in pigeon manure under different manure collection methods

本研究按照水稻所需全氮量估算鸽粪安全施用年限,发现长期施用鸽粪 19 a 后土壤重金属 Zn、Cu、Cd 可能存在超标风险。而后通过 Hakanson 潜在污染评价法验证鸽粪安全施用年限,结果显示,在连续施用鸽粪 10 a 且不考虑重金属流失的情况下,所有采样点位潜在生态风险程度均属于低度。

为了鸽粪能在实际中更好地被应用,本研究还选取磷为主要指标,结合东亚国家常见的水稻-油菜种植体系,对鸽粪的安全利用年限进行估算(磷是水旱种植制度中作物产量的重要限制因素^[33-34])。水稻和油菜的总磷需求量分别取值为 41.5 kg·hm⁻² 和 57.0 kg·hm⁻²^[34],一年两造情况下总磷需求量为 98.5 kg·hm⁻²·a⁻¹,粪肥当季利用率取值为 35%,其他基础参数不变,计算结果显示:鸽粪中 Ni、Pb、Hg、As、Cr 的输入对其安全农使用年限影响较小,而 Zn、Cu、Cd 是影响鸽

粪安全农使用年限的主要限制因子,持续输入 52.15~711.95、104.81~331.57、228.78~1 203.14 a 的鸽粪可分别导致土壤 Zn、Cu、Cd 超标,最低安全农使用年限为 52 a。鸽粪施用 50 a 后,所有采样点位潜在生态风险程度均属于低度,且安全农使用年限与重金属污染系数高

表 6 不同类别畜禽粪便中养分含量
Table 6 Nutrient contents in manure of different types of livestock and poultry

畜禽粪便类别 Livestock manure category	全氮 TN/ (g·kg ⁻¹)	全磷 TP/ (g·kg ⁻¹)	全钾 TK/ (g·kg ⁻¹)	N/P	文献 Reference
牛粪	16.7	4.3	9.5	3.9	[31]
羊粪	10.1	2.2	5.3	4.6	[31]
猪粪	20.9	9.0	11.2	2.3	[31]
鸡粪	23.4	9.3	16.1	2.5	[31]
鸽粪	27.4	16.1	19.1	1.7	本研究

表 7 不同类别畜禽粪便中重金属含量(mg·kg⁻¹)

Table 7 Content of heavy metals in manure of different types of livestock and poultry(mg·kg⁻¹)

畜禽粪便类别 Livestock manure category	Cu	Zn	Cd	Ni	Cr	Pb	Hg	As	文献 Reference
牛粪	56.93	221.27	0.84	10.10	24.53	11.72	0.12	2.09	[32]
羊粪	60.89	178.83	1.09	7.62	12.27	11.14	0.78	1.53	[32]
猪粪	531.37	1 019.98	2.97	10.69	26.80	8.63	0.10	16.47	[32]
鸡粪	96.05	346.17	1.34	13.93	58.93	12.43	0.13	6.88	[32]
鸽粪	64.16	408.6	0.18	10.91	39.70	3.06	0.04	3.05	本研究

度负相关。

我国目前尚未对农田施用粪肥量进行限制,在评估土地施用粪肥对农田污染的风险时,通常采用 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 作为阈值,而我国山东省 ($105.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、北京市 ($55.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、辽宁省 ($33.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、福建省 ($31.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、上海市 ($30.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、广东省 ($30.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的农田平均粪肥负荷均已超过该阈值^[35]。Zhen 等^[10]对我国的蔬菜生产基地开展了长达 15 a 的施用有机肥跟踪试验,发现高施肥处理下 ($103.46 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的 Zn、Cu、Cr 含量和中施肥处理下 ($41.48 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的 Cd、Zn 含量在 100 a 内均超过其土壤阈值,为保证 100 a 清洁生产周期,重金属 Zn、Cu 和 Cr 的畜禽粪肥推荐用量分别为 44 、 $74 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $63 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。因此,需要采取措施尽量减少来自粪肥的重金属 (Cd、Zn、Cr 和 Cu) 污染的风险,以确保食品安全。综上所述,鸽粪具有较大的农用潜力,但不合理的施用仍有造成农田重金属污染的风险。

4 结论

(1) 本研究所采集的广东省鸽粪样品中重金属 Cd、Cr、Ni、Pb、Hg、As 含量均在相关有机肥标准限值之内,对比德国腐熟肥料标准,鸽粪中重金属 Cu、Zn 含量超标。Cu 超标率为 18.18%, Zn 超标率为 36.36%,总超标率高达 45.45%。

(2) 单因子污染指数法评价结果显示,27.27% 的鸽粪样品处于 Zn 轻度污染水平,9.09% 处于 Zn 中度污染水平;9.09% 的样品处于 Cu 轻度污染水平,9.09% 处于 Cu 中度污染水平;18.18% 的样品处于 Ni 轻度污染水平;Cd、Cr、Pb、Hg、As 均处于无污染水平。内梅罗综合污染指数法评价结果显示,处于警示及以上污染水平的点位主要受重金属 Cu、Zn 污染。

(3) 在不考虑重金属流失情况下,通过水稻所需全氮量估算鸽粪的安全农用年限,同时经 Hakanson 潜在污染评价法验算得到,广东省水稻种植中连续施用鸽粪 10 a 无重金属污染风险。而在水旱种植制度 (水稻-油菜) 下,以作物所需全磷量估算鸽粪安全农用年限得到,连续施用鸽粪 50 a 无重金属污染风险,远高于水稻连作体系下以全氮估算的安全农用年限。

参考文献:

- [1] XIE W Y, SHEN Q, ZHAO F J. Antibiotics and antibiotic resistance from animal manures to soil: a review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(1): 181-195.
- [2] 于娜, 王晓茹, 李婷婷, 等. 山东省畜禽粪便的环境污染现状及风险

- 评价[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(5): 820-828. YU N, WANG X R, LI T T, et al. Risk assessment of farmland and water contamination with livestock manure in Shandong Province[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(5): 820-828.
- [3] 邓凯东, 蒋加进, 霍淑娟, 等. 种鸽和童鸽粪便营养成分含量分析[J]. *中国家禽*, 2015, 37(6): 51-52. DENG K D, JIANG J J, HUO S J, et al. Analysis of the nutrient content of the faeces of breeding and child pigeons[J]. *China Poultry*, 2015, 37(6): 51-52.
- [4] 罗建民. 为打好我国种业翻身仗贡献广东方案广东经验: 广东畜禽种业现状、存在问题和建议[J]. *广东饲料*, 2021, 30(2): 11-16. LUO J M. Contribute Guangdong's plan and experience to the turnaround of country's seed industry: the status existing problems and suggestions of Guangdong's livestock and poultry seed industry[J]. *Guangdong Feed*, 2021, 30(2): 11-16.
- [5] 刘震, 周雪勤, 徐翥, 等. 包被丁酸钠对种鸽和乳鸽的生长性能、屠宰性能、免疫器官指数及消化酶活性的影响[J]. *中国畜牧兽医*, 2023, 50(3): 998-1006. LIU Z, ZHOU X Q, XU F, et al. Effects of coated sodium butyrate on growing performance, slaughter performance, immune organ index and digestive enzyme activity of breeding pigeons and squabs[J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2023, 50(3): 998-1006.
- [6] 陈康林, 李江涛, 钟晓兰, 等. 广东省畜禽粪便时空变化特征及耕地负荷分析[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(12): 7177-7181. CHEN K L, LI J T, ZHONG X L, et al. Analysis on spatial-temporal variation characteristics and farmland load of poultry and livestock excrement in Guangdong Province[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(12): 7177-7181.
- [7] 阎波杰, 潘瑜春, 赵春江, 等. 大兴区畜禽养殖沼气潜能评估及应用研究[J]. *中国沼气*, 2008, 26(6): 26-30. YAN B J, PAN Y C, ZHAO C J, et al. The biogas potential evaluation and application in Daxing County[J]. *China Biogas*, 2008, 26(6): 26-30.
- [8] 胡家晴, 王洋, 于锐, 等. 典型河源区畜禽粪便农田施用的环境承载力研究[J]. *土壤与作物*, 2021, 10(1): 37-46. HU J Q, WANG Y, YU R, et al. Environmental carrying capacity of livestock and poultry manure application to farmland in typical river source region[J]. *Soils and Crops*, 2021, 10(1): 37-46.
- [9] 常志州, 黄红英, 靳红梅, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践: 氮磷养分循环利用技术[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(10): 1901-1907. CHANG Z Z, HUANG H Y, JIN H M, et al. Reduce-retain-reuse-restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: reuse of nitrogen and phosphorous in agricultural wastes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(10): 1901-1907.
- [10] ZHEN H, JIA L, HUANG C, et al. Long-term effects of intensive application of manure on heavy metal pollution risk in protected-field vegetable production[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 263: 114552.
- [11] LUO L, MA Y, ZHANG S, et al. An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(8): 2524-2530.
- [12] WANG T, YUAN Z, YAO J. A combined approach to evaluate activity and structure of soil microbial community in long-term heavy metals contaminated soils[J]. *Environmental Engineering Research*, 2018, 23(1): 62-69.
- [13] 袁凯, 熊苏雅, 梁静, 等. 畜禽粪便中铜和锌污染现状及风险分析

- [J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1837–1842. YUAN K, XIONG S Y, LIANG J, et al. Status and risk analysis of copper and zinc pollution in livestock manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(8): 1837–1842.
- [14] 姚丽贤, 李国良, 党志. 集约化养殖禽畜粪中主要化学物质调查[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1989–1992. YAO L X, LI G L, DANG Z. Major chemical components of poultry and live stock manures under intensive breeding[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(10): 1989–1992.
- [15] 方雅瑜, 邹慧玲, 尹晓辉, 等. 赤泥和有机肥对镉、铅在水稻中吸收分布的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(5): 466–476. FANG Y Y, ZOU H L, YIN X H, et al. Effects of red-mud and organic fertilizer on cadmium and lead absorption and distribution in rice[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(5): 466–476.
- [16] 杨世忠, 赵薇, 陈彬龙. 堆肥前后放牧绵羊粪便主要养分及重金属的变化[J]. 家畜生态学报, 2022, 43(4): 85–88. YANG S Z, ZHAO W, CHEN B L. Analysis of grazing sheep manure characteristics and the changes of major nutrients in composting process[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2022, 43(4): 85–88.
- [17] 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: 330–378. China National Environmental Monitoring Centre. Background values of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 330–378.
- [18] VERDONCK O. International symposium on composting & use of composted material in horticulture[C]. Leuven: Compost Specifications, 1997.
- [19] 陈秋会, 席运官, 张弛, 等. 有机与常规养殖生猪粪便重金属污染特征与农用风险评价[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(3): 351–356. CHEN Q H, XI Y G, ZHANG C, et al. Pollution characteristic and agricultural pollution risk estimation on heavy metals of organic and conventional pig manures[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, 41(3): 351–356.
- [20] ZHANG W, DOU Z, HE P, et al. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(21): 8375–8380.
- [21] 付强, 尹佳文, 杨红新, 等. 种养平衡理念下中国区域农田畜禽承载风险情景分析[J]. 经济地理, 2020, 40(1): 164–172. FU Q, YIN J W, YANG H X, et al. The senario analysis of China's regional livestock carrying capacity risk of farmland under the principle of planting-breeding balancing[J]. *Economic Geography*, 2020, 40(1): 164–172.
- [22] 侯红乾, 冀建华, 刘秀梅, 等. 不同比例有机肥替代化肥对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 土壤, 2020, 52(4): 758–765. HOU H Q, JI J H, LIU X M, et al. Effect of long-term combined application of organic and inorganic fertilizers on rice yield, nitrogen uptake and utilization in red soil area of China[J]. *Soils*, 2020, 52(4): 758–765.
- [23] 刘小燕, 陈棉彪, 李良忠, 等. 云南会泽铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染特征及健康风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(3): 221–229. LIU X Y, CHEN M B, LI L Z, et al. Contaminant characteristics and health risk assessment of heavy metals in soils from lead-zinc melting plant in Huize County, Yunnan Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(3): 221–229.
- [24] 刘南婷, 刘鸿雁, 吴攀, 等. 典型喀斯特地区土壤重金属累积特征及环境风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 797–809. LIU N T, LIU H Y, WU P, et al. Accumulation characteristics and environmental risk assessment of heavy metals in typical karst soils[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(5): 797–809.
- [25] 谢国雄, 吴崇书, 孔樟良, 等. 规模化养殖场畜禽粪中磷的化学形态与稳定化[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2015, 41(2): 213–218. XIE G X, WU C S, KONG Z L, et al. Chemical forms and stabilization of phosphorus in manures from large-scale livestock and poultry farms[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 2015, 41(2): 213–218.
- [26] FROSSARD E, BÜNEMANN E, JANSÁ J, et al. Concepts and practices of nutrient management in agro-ecosystems: can we draw lessons from history to design future sustainable agricultural production systems?[J]. *Die Bodenkultur*, 2009, 60(1): 43–60.
- [27] KIM M, CHO J H, SEONG P N, et al. Fecal microbiome shifts by different forms of copper supplementations in growing pigs[J]. *Journal of Animal Science and Technology*, 2021, 63(6): 1386–1396.
- [28] 宋江燕, 吴根义, 苏文幸, 等. 惠州市畜禽养殖污染耕地承载负荷估算及风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(2): 191–197. SONG J Y, WU G Y, SU W X, et al. Carrying load estimation and risk assessment of cultivated land contaminated by livestock and poultry breeding in Huizhou[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(2): 191–197.
- [29] 肖长峰, 吕文纬, 朱丽慧, 等. 肉鸽保健砂成分研究及存在问题分析[J]. 上海畜牧兽医通讯, 2020(5): 45–46. XIAO C F, LÜ W W, ZHU L H, et al. Research on the composition of pigeon health sand and analysis of problems[J]. *Shanghai Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2020(5): 45–46.
- [30] SOHI G K, KLER T K, KAUR S. Heavy metal contamination in excreta of blue rock pigeon (*Columba livia*) and Indian peafowl (*Pavo cristatus*) in rural areas of Punjab[J]. *Journal of Animal Research*, 2019, 9(3): 425–430.
- [31] 高定, 陈同斌, 刘斌, 等. 我国畜禽养殖业粪便污染风险与控制策略[J]. 地理研究, 2006, 25(2): 311–319. GAO D, CHEN T B, LIU B, et al. Releases of pollutants from poultry manure in China and recommended strategies for the pollution prevention[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(2): 311–319.
- [32] LIU W R, ZENG D, SHE L, et al. Comparisons of pollution characteristics, emission situations, and mass loads for heavy metals in the manures of different livestock and poultry in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 734: 139023.
- [33] ZHOU W, LV T F, CHEN Y, et al. Soil physicochemical and biological properties of paddy-upland rotation: a review[J]. *Scientific World Journal*, 2014, 2014: 856352.
- [34] YAN J Y, REN T, WANG K K, et al. Improved crop yield and phosphorus uptake through the optimization of phosphorus fertilizer rates in an oilseed rape-rice cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2022, 286: 108614.
- [35] HU Y, CHENG H, TAO S. Environmental and human health challenges of industrial livestock and poultry farming in China and their mitigation[J]. *Environment International*, 2017, 107: 111–130.