

宁夏养鸡场粪污及周边土壤重金属和细菌群落特征研究

张俊华, 贾萍萍, 刘吉利, 孙媛, 尚天浩

引用本文:

张俊华, 贾萍萍, 刘吉利, 等. 宁夏养鸡场粪污及周边土壤重金属和细菌群落特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1692-1705.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0303>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

鸡粪-堆肥中重金属残留、抗生素耐药基因及细菌群落变化研究

邓雯文, 陈姝娟, 何雪萍, 晋蕾, 杨盛智, 余秀梅, 刘书亮, 邹立扣

农业环境科学学报. 2019, 38(2): 439-450 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0716>

长期定位施肥下设施土壤重金属积累及生态风险的研究

沃惜慧, 杨丽娟, 曹庭悦, 李军

农业环境科学学报. 2019, 38(10): 2319-2327 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0293>

沈阳市新民设施菜地土壤重金属污染特征分析

郭畔, 宋雪英, 刘伟健, 李玉双, 魏建兵, 李秀颖, 夏思雨

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 835-844 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0883>

鸡粪生物炭对土壤铜和锌形态及植物吸收的影响

张艺腾, 范禹博, 徐笑天, 张秀芳, 李明堂

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2514-2521 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0390>

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

张云青, 张涛, 李洋, 苏德纯

农业环境科学学报. 2015, 34(1): 87-96 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.01.013>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张俊华, 贾萍萍, 刘吉利, 等. 宁夏养鸡场粪污及周边土壤重金属和细菌群落特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1692–1705.

ZHANG Jun-hua, JIA Ping-ping, LIU Ji-li, et al. Heavy metal and bacterial community characteristics in poultry farm manure and surrounding soils in Ningxia, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(8): 1692–1705.



开放科学 OSID

宁夏养鸡场粪污及周边土壤重金属和细菌群落特征研究

张俊华¹, 贾萍萍², 刘吉利^{1*}, 孙媛², 尚天浩²

(1. 宁夏大学环境工程研究院, 银川 750021; 2. 宁夏大学资源环境学院, 银川 750021)

摘要: 为了解宁夏蛋鸡养殖场粪污及周边土壤中重金属及细菌群落状况, 在宁夏最大的蛋鸡养殖区采集了不同养殖期新鲜鸡粪和相关土壤样品, 测定了7种重金属含量和细菌群落组成及多样性。结果表明: 该地区鸡粪中Cu、Cd、Cr、Pb、Hg和As含量低于全国平均值26.83%~93.23%, 而Zn含量高于全国平均值28.74%, 与德国有机肥料中重金属限量标准相比Zn超标6.94%。随着养殖期的推移, 鸡粪中Cu、Cd、As含量均先减少后增加; 育雏期Cu、Zn、Cd、Hg含量在全养殖期都相对最高, 育成期鸡粪Cu、Zn、Cr、Pb和As含量均最低。鸡粪重金属综合污染指数除育成期属于安全水平外, 其他4个时期均属于警戒限水平; 高产期鸡粪重金属综合污染指数最高。养殖场周边土壤和施用了鸡粪的土壤Cu、Zn含量均高于对照土壤; 各土壤重金属综合污染指数均处于安全水平。鸡粪中优势菌门是Firmicutes、Proteobacteria和Bacteroidetes。土壤中相对丰度较高的是Proteobacteria、Bacteroidetes、Actinobacteria、Acidobacteria和Planctomycetes。施用鸡粪后土壤细菌在门水平上数量发生变化, 但并不显著。在鸡粪基本理化性质中, pH和全钾对细菌群落多样性和优势菌门有显著的促进作用, 重金属中Zn的影响较大。土壤基本理化性质中有机质对土壤细菌优势菌门丰度影响最大, 重金属中Cu和Zn对细菌多样性和优势菌门普遍具有显著影响。

关键词: 鸡粪; 养殖期; 土壤; 重金属; 细菌群落; 重金属-细菌相关性

中图分类号: X713; S154.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2020)08-1692-14 **doi:** 10.11654/jaes.2020-0303

Heavy metal and bacterial community characteristics in poultry farm manure and surrounding soils in Ningxia, China

ZHANG Jun-hua¹, JIA Ping-ping², LIU Ji-li^{1*}, SUN Yuan², SHANG Tian-hao²

(1. Institute of Environmental Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. The Resource and Environment College of Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to understand the status of heavy metals and bacterial communities in the manure and surrounding soils of poultry farms in Ningxia, China, fresh poultry manure and soil samples were collected during different breeding periods from the largest laying hen breeding area in the region. The heavy metal contents and the composition and diversity of the bacterial communities were analyzed and the results showed that the mean contents of Cu, Cd, Cr, Pb, Hg, and As in the poultry manure were 26.83%~93.23% lower than their national means, while the content of Zn was 28.74% higher than the national mean and approximately 6.94% higher than the maximum limit allowed by German composting regulations. During the breeding periods, the contents of Cu, Cd, and As in poultry manure first decreased and then increased. Manure collected in the brooding period had the highest Cu, Zn, Cd, and Hg contents across all periods, while the manure collected during the growth period had the lowest Cu, Zn, Cr, Pb, and As contents. The comprehensive pollution index of heavy metals for poultry manure was only at a safe level during the growth period; it was highest during the peak laying period and remained at dangerous

收稿日期: 2020-03-18 录用日期: 2020-04-29

作者简介: 张俊华(1977—), 女, 宁夏中卫人, 博士, 研究员, 主要从事土壤质量提升及废弃物资源化利用方面研究。E-mail: zhangjunhua728@163.com

*通信作者: 刘吉利 E-mail: 18295172155@163.com

基金项目: 宁夏自治区重点研发项目(2019BFG02015)

Project supported: The Key Research and Development Projects of Ningxia Autonomous Region(2019BFG02015)

levels across all other breeding periods. Meanwhile, the Cu and Zn contents in the soils around the poultry farms and with poultry manure application were higher than those in the control treatment, yet their comprehensive pollution indices were at safe levels. The dominant microbial communities at the phylum level in the poultry manure were Firmicutes, Proteobacteria, and Bacteroidetes. Proteobacteria, Bacteroidetes, Actinobacteria, Acidobacteria, and Planctomycetes in soils occurred at higher relative abundances than other phyla. After poultry manure was applied, the relative abundances of bacteria at the phylum level in soils did not vary significantly. In poultry manure, pH and total potassium significantly promoted the diversity of the bacterial community and the dominant phyla; Zn had the greatest influence on the bacterial community among the heavy metals. In soils, the organic matter content significantly influenced the diversity of the bacterial community, and Cu and Zn significantly promoted the diversity of the bacterial community and dominant phyla.

Keywords: poultry manure; breeding period; soil; heavy metal; bacterial community; metal-bacteria relationship

我国是畜禽养殖大国,每年都会产生大量畜禽粪便,其中规模化畜禽养殖产生新鲜粪便约 1.019×10^9 t^[1]。畜禽粪便中含有大量有机质和养分,可以改善土壤养分循环,提高作物产量,保持和改善土壤质量,但同时也可能会引起重金属污染或病原菌入侵,导致环境污染和健康风险^[2]。

养殖场粪便中的重金属与畜禽疾病预防、促进生长的饲料添加剂或兽药有关^[3]。畜禽粪便重金属残留是成品有机肥中重金属污染的主要来源^[4]。据统计,我国每年生产饲料使用的微量元素添加剂约为 15 万~18 万 t,大约有 10 万 t 未被动物利用而随着畜禽粪便进入环境^[5]。倪治华等^[6]收集了浙江省商品有机肥、农家堆肥和畜禽粪便样品检测发现,浙江商品有机肥平均合格率为 72.5%,而重金属超标是产品不合格的主要原因。目前全国商品鸡粪中 Cd、Pb 和 Cr 超标率分别为 10.3%、17.2% 和 17.2%,Cu、Zn 含量是 20 世纪 90 年代初的 1.5~16.2 倍^[7]。养殖场粪污中 Cu 和 Zn 含量普遍较高,已成为一个世界性问题^[8]。在黑土中施用化肥和畜禽粪便有机肥 3 a 后,土壤中 Zn 含量高于对照土壤和单施化肥处理^[9]。黑土和红壤上有机肥与化肥配施与不施肥对照相比土壤 Cu、Zn 和 Cd 含量显著提高^[10]。调查表明畜禽粪便农区小麦中的 Cr、Ni、Cd 和 As 均存在不同程度超标情况,其中鸡粪农区 Cr 的超标率达 66.67%^[3]。《土壤污染防治行动计划》中也明确指出“要鼓励农民增施有机肥并减少化肥用量,合理使用化肥农药”,但连续大量施用畜禽粪便、有机肥势必会向土壤-植物系统带入大量外源重金属元素,从而对土壤质量造成负面影响,甚至威胁农产品安全^[11-12]。

畜禽粪便中携带的病原微生物主要包括细菌、病毒和寄生虫等,其中致病菌的种类及数量最为丰富,且对动物及人体的健康存在极大的威胁,其中大肠杆菌(*Escherichia coli*)、沙门氏菌(*Salmonella*)、贾第鞭毛

虫(*Giardia*)、弯曲杆菌(*Campylobacter*)、微小隐孢子虫(*Cryptosporidium parvum*)、结核杆菌(*Mycobacterium tuberculosis*)、炭疽杆菌(*Bacillus anthracis*)、马尔他布鲁氏菌(*Brucella melitensis*)和金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)等都是养殖场粪污中常见的致病菌^[13]。这些致病菌直接或间接地威胁着人类的健康^[14]。Bloem 等^[15]指出养殖场有机肥可以提高土壤中有机磷的含量和磷素利用率,但也会带来有害金属和病原菌。土壤中高浓度 NH_4^+ 能够显著抑制病原微生物的生长^[16]。有机肥种类不同或施用量不同对土壤中微生物相对含量有一定影响^[17],如鸡粪施用量为 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的土壤中微生物总量及各菌群生物量均高于其他处理^[18]。养殖场粪污中重金属含量与其微生物多样性及优势种群的数量是否有关,也有待进一步研究。

养殖场堆肥中的重金属含量与新鲜粪污中的重金属含量密切相关^[6]。随着养殖时间的推移,鸡粪中重金属和细菌群落有无规律性变化?养鸡场的存在对周边土壤中重金属含量和细菌群落有无影响?针对这些问题,本文以宁夏最大的蛋鸡养殖区为例,开展了不同养殖时期鸡粪中 7 种重金属含量和细菌群落状况分析研究,分析不同养殖期鸡粪中重金属含量水平及变化规律,明确养殖场对周边土壤重金属含量和细菌群落多样性及组成的影响程度,揭示鸡粪、土壤理化性质、重金属和细菌群落之间的关系,以期当地蛋鸡饲料添加剂的科学规范使用以及鸡粪有机肥施用的安全风险控制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点概况及样品采集

宁夏中卫市沙坡头区宣和镇是全区蛋鸡养殖存栏量最大的乡镇。本研究在宣和镇选取有代表性的不同规模蛋鸡养殖场 12 家(其中养殖规模在 5 000~

30 000 只的3家,30 000~100 000 只的9家,主要品种为海兰褐和京红等)。同一养殖场相同养殖时间作为同一个处理,每个处理取样时取3个样充分混合为一个样,所有养殖场共采集新鲜粪污样品(以下均简称鸡粪)29个。为了便于分析,按照蛋鸡生长期将不同养殖场所有鸡粪样品归为5个时期,分别为育雏期(P1)、育成期(P2)、初产期(P3)、高产期(P4)和终产期(P5)。具体各养殖场鸡粪采集信息见表1。

为了探究养殖场的存在是否对其周边土壤重金属和细菌群落有影响,本研究选择了建场时间较长、卫生条件很差的2户传统小规模养鸡场(其他规模较大的养鸡场均远离居民区,且建场时间普遍少于10 a),均坐落在宣和镇三营村农户居住区边缘,建场养殖分别为13 a和11 a,规模较小(保持在5 000~15 000只),粪污处理为干清粪,每月清理一次(其他养鸡场均为一日清理一次或两次),每年只消毒2~3次。两家养鸡场旁都有一条排水沟,土壤取自排水沟边(无人为添加任何肥料)。分别在距离养殖场20、50、100、200 m和300 m处各采集表层土壤(0~20 cm)作为养殖场周边土壤样品。然后采集施用了鸡粪的蔬菜地土壤表层样品18个(一般都在养殖场院内,具体采样信息见表1)。此外,在远离所有养殖场5 km处且没有施用过

任何肥料的荒地上采集对照土样3个。土样均采用多点混合取样,每个样品约1 kg。

采集的鸡粪和土壤样品均分为2份,一份新鲜样品冷冻于-20 ℃冰箱用于细菌群落组成和多样性的测定,一份在塑料盘中剔除杂质后自然风干,一部分用木槌研磨后过尼龙筛用于样品基本理化性状的测定,剩余部分用陶瓷研钵研磨后过尼龙筛用于重金属的测定。

1.2 指标的测定

1.2.1 基本理化性质的测定

在水:样品=5:1的条件下采用酸度计法和电导法测定土壤和鸡粪pH和电导率(EC);有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定;全N、全P和全K采用H₂SO₄-H₂O₂消解,全N用凯氏定氮仪测定,全P采用钒钼黄比色法测定,全K采用火焰光度法测定。本研究鸡粪和土壤的基本理化性状如表2所示。

1.2.2 重金属的测定

称取10.00 g样品,置于干燥具塞三角瓶中,加入DTPA浸提剂20 mL,盖紧瓶塞,于25 ℃±2.5 ℃温度下振荡2 h后立即过滤,在48 h内用原子吸收分光光度计测定Cu和Zn的含量。

称取0.100 0 g过100目筛样品于消煮管中,加入

表1 鸡粪和土壤样品信息
Table 1 The information of poultry manure and soil

序号 Number	建场时间 Time/a	养殖规模/只 Scale	品种 Breed	鸡粪样品 Poultry manure sample	土壤样品来源 Source of soil sample	鸡粪施用量 Rate of applied/(t·hm ⁻²)
1	8	65 000	海兰褐	P2、P4、P5	玉米地	37.5
2	10	40 000	两凤花,麻鸡	P1、P4、P5	西红柿地,辣椒地	45
3	3	100 000	京红	P3、P4	青菜地、豆角地	30
4	3	60 000	海兰褐	P1、P2	西红柿地	30
5	5	14 000	海兰褐	P3、P4	生菜地	30
6	4	84 000	海兰褐,京红	P2、P4、P5	青菜地,西红柿地	30
7	4	25 000	京红	P1、P2	辣椒地	45
8	11	15 000	海兰褐	P1、P4	西红柿地、豆角地	30
9	8	13 000	海兰褐	P3、P4、P5	葱地	22.5
10	13	5 000	海兰褐	P1、P4	西红柿地	30
11	3	50 000	海兰褐	P3、P4、P5	豆角地、西红柿地	45
12	7	30 000	海兰褐	P3、P5	玉米地、豆角地	22.5

表2 鸡粪和土壤的基本理化性状
Table 2 The physiochemical properties of poultry manure and soil

种类Type	pH值 pH value	电导率 EC/(mS·cm ⁻¹)	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	全N Total N/(g·kg ⁻¹)	全P Total P/(g·kg ⁻¹)	全K Total K/(g·kg ⁻¹)
鸡粪	7.26	25.27	397.56	19.59	6.58	24.93
土壤	8.22	3.90	11.70	0.71	1.63	18.59

8 mL 王水(HCl:HNO₃=3:1, 体积比)并将管口封闭, 冷消化过夜。次日使用密闭式微波消解法进行样品消解, 待冷却后将消解液转移并进行过滤。最后消解液中Cd、Pb和Cr的含量使用石墨炉原子吸收分光光度计测定, Hg和As含量使用氢化物发生原子荧光光度计测定。在整个测定过程中通过平行测定、加入空白样和国家标准参比物质进行全程质量控制。

1.2.3 细菌群落多样性及组成测定

样品DNA提取: 每个样品取0.5 g提取DNA, 本试验采用FastDNA®SPIN Kit For Soil试剂盒提取鸡粪和土壤微生物基因组DNA, 按说明书操作步骤进行。用1%的琼脂糖凝胶检验DNA纯度。DNA浓度用NanoDrop(ND-2000)检测。

Illumina HiSeq 测序及数据分析: 将鸡粪和土壤样品送生工生物工程(上海)股份有限公司进行16S rDNA高通量测序, 鸡粪细菌的通用引物序列为338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3')和806r(5'-GGACTAC HVGGGTWTCTAAT-3'), 土壤细菌的通用引物为515f(GTGCCAGCMGCCGCGGTAA)和806r(GGACTA CHVGGGTWTCTAAT)。

微生物测序指数等的分析: Illumina Miseq™得到的原始图像数据文件经CASAVA碱基识别(Base calling)分析转化为原始测序序列(Sequenced reads, 文中简称为Sequence)。将所有样本序列按照序列间的距离进行聚类, 后根据序列之间的相似性将序列分成不同的操作分类单元(OTU)。通常在97%的相似水平下对OTU进行生物信息统计分析。在OTU聚类结果的基础上, 获取OTU聚类中的代表性序列, 选择丰度最高的序列作为OTU的代表性序列。细菌群落各多样性指数算法如下:

$$\text{Shannon} = - \sum_{i=1}^{S_{\text{obs}}} \frac{n_i}{N} \ln \frac{n_i}{N}$$

式中: S_{obs} 为实际观测到的OTU数; n_i 为第*i*个OTU包含的序列数; N 为所有个体数目, 此处为序列总数。

$$\text{Chao1} = S_{\text{obs}} + \frac{n_1(n_1 - 1)}{2(n_2 + 1)}$$

式中: Chao1 为估计的OTU数; S_{obs} 为实际观测到的OTU数; n_1 为只含有一条序列的OTU数目; n_2 为只含有两条序列的OTU数目。

$$\text{Simpson} = \frac{\sum_{i=1}^{S_{\text{obs}}} n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)}$$

式中: S_{obs} 为实际观测到的OTU数; n_i 为第*i*个OTU包含的序列数; N 为所有个体数目, 此处为序列总数。

1.3 重金属污染评价

本研究运用单因子指数法和内梅罗综合污染指数法^[19]对鸡粪和土壤中重金属含量进行污染评价。

1.4 数据处理

使用SAS进行数据的方差比较, 采用LSD法进行差异显著性检验。利用R对物种分类学统计结果进行作图; 利用R的gplots package作物种丰度热图。鸡粪和土壤中微生物群落组成与土壤理化性质、重金属之间的Pearson相关性分析采用SPSS 13.0计算。图表中数据均为相同处理的平均值。

2 结果与讨论

2.1 鸡粪及养鸡场周边土壤中重金属含量

2.1.1 鸡粪中重金属含量

宁夏蛋鸡养殖场鸡粪中Cu、Cd、Cr、Pb、Hg和As含量都较低(表3), 其平均值分别比全国鸡粪平均值^[7]低67.06%、86.00%、90.13%、93.23%、88.24%和26.83%; 而Zn含量比全国鸡粪平均值高28.74%。参考我国有机肥料中重金属限量标准^[20]和德国有机肥料中重金属限量标准^[21], Zn含量超过德国有机肥料中重金属限量标准6.94%, 其他6种重金属则都未超标。Zn可以提高畜禽生殖能力, 增强免疫力, 调节食欲, 加快畜禽生长^[22]; 所以蛋鸡饲料中Zn是最常用的添加剂之一。Zn是生物必需的营养元素, 当土壤中的Zn供给不足时, 农作物及畜产品的产量和质量都会受到影响, 而我国北方石灰性土壤Zn含量偏低^[23], 所以施用鸡粪可能有助于提升农产品Zn含量, 从而在一定程度上解决缺Zn问题。但长期施用高含量Zn鸡粪是否会导致土壤Zn污染, 从而进入食物链影响人体健康还需要继续监测。

2.1.2 不同养殖期鸡粪中重金属差异

随着养殖时间的推移, 鸡粪中Cu、Cd和As含量均先减少后增加(图1), 但As增幅较Cu和Cd更大, 终产期鸡粪As含量居全养殖期之首。Zn和Cr则呈减少-增加-减少变化, 但Zn含量除了育成期外, 其他4个养殖期含量差异均未达到显著水平; Cr含量在整个产蛋期差异很小, 与育雏期和育成期均呈显著差异。育雏期Cu、Zn、Cd和Hg含量在全养殖期都相对较高, 尤其是Hg含量比其他4个时期的平均值高142.05%。这是由于雏鸡生长发育迅速, 代谢旺盛, 但消化器官容积小, 消化能力弱, 且该时期饲料中常含有石灰矿石粉、多种维生素和多种微量元素及载体^[24], 所以雏鸡重金属排出体外的量较其他时期大。

表3 鸡粪中重金属含量
Table 3 Heavy metal contents of poultry manure

指标 Parameters	Cu	Zn	Cd	Cr	Pb	Hg	As
最大值 Maximum/(mg·kg ⁻¹)	73.18	572.77	0.29	87.22	8.06	0.09	7.45
最小值 Minimum/(mg·kg ⁻¹)	22.87	254.60	0.15	11.64	2.83	0.02	2.83
平均值 Mean/(mg·kg ⁻¹)	47.13	426.77	0.21	34.23	5.11	0.04	4.39
标准偏差 SD/(mg·kg ⁻¹)	2.70	14.16	0.01	4.05	0.25	0.00	0.28
变异系数 CV/%	5.73	3.32	4.14	11.83	4.97	11.15	6.49
超标率 Exceeded ratio/%*	0	6.94	0	0	0	0	0
全国平均值 National average/(mg·kg ⁻¹)	143.10	331.50	1.50	346.70	75.50	0.34	6.00

注：*德国标准 Cu≤100 mg·kg⁻¹ DM, Zn≤400 mg·kg⁻¹ DM; 中国标准 Cd≤3 mg·kg⁻¹ DM, Cr≤150 mg·kg⁻¹ DM, Pb≤50 mg·kg⁻¹ DM, Hg≤2 mg·kg⁻¹ DM, As≤15 mg·kg⁻¹ DM。
Note: Germany standard Cu≤100 mg·kg⁻¹ DM, Zn≤400 mg·kg⁻¹ DM; Chinese standard Cd≤3 mg·kg⁻¹ DM, Cr≤150 mg·kg⁻¹ DM, Pb≤50 mg·kg⁻¹ DM, Hg≤2 mg·kg⁻¹ DM, As≤15 mg·kg⁻¹ DM。

Hg能起到杀菌作用,但对动物的毒性很大,家禽对其非常敏感,中毒后的雏禽表现为消瘦、厌食、生长发育受阻^[22]。据检测,鸡饲料的主要原料玉米、麸皮、豆粕、花生粕、棉籽粕、DDGS和微量元素预混料中Hg的检出率均为100%^[25]。因此,要特别注意饲料原料中Hg元素的污染超标情况,尤其是育雏期。育成期鸡粪Cu、Zn、Cr、Pb和As含量均最低。育成鸡食欲旺盛,生长迅速,消化机能逐渐健全,采食量与日俱增,此时日粮中粗蛋白质含量较育雏期低,饲料一般为浓缩料加入粉碎的玉米和麸皮^[24],故该时期鸡粪中的重金属含量最低。

2.1.3 鸡粪中重金属污染评价

在鸡粪重金属单项污染指数中,Zn的单项污染指数最高(表4),除育成期处在安全水平外其他4个时期Zn均属于轻度污染;Hg和Cd的单项污染指数均低于0.10;Pb和Cr也较低。整个养殖期鸡粪重金属单项污染指数平均值顺序为Zn>Cu>As>Cr>Pb>Cd>Hg,除Zn外其他重金属含量在整个养殖期单项污染指数均小于0.70,属于未污染水平。不同养殖期鸡粪中各重金属综合污染指数顺序为P4>P1≈P3>P5>P2,

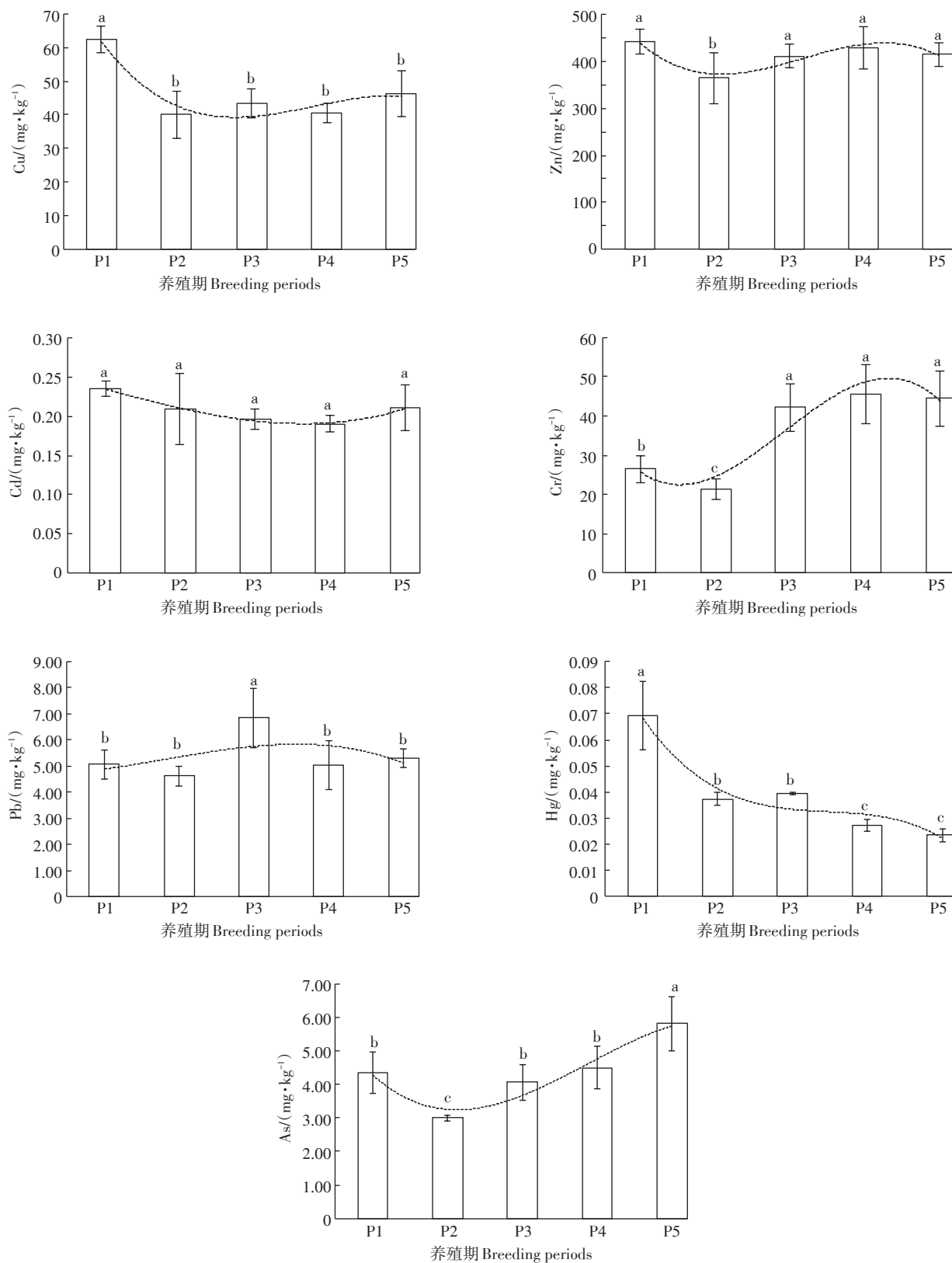
除育成期属于安全水平外,其他4个时期均属于警戒限水平;高产期鸡粪重金属综合污染指数最高。可以看出,养殖户在产蛋高峰期为了保证产蛋量给鸡食用的饲料或药品中含有较高的重金属。

2.1.4 养鸡场周边土壤重金属含量及污染评价

分别将距离养鸡场20、50、100、200 m和300 m的土样依次编号为DP1、DP2、DP3、DP4和DP5,CK为距离所有养殖场约5 km处荒地土壤,AP为施用了鸡粪的18块菜地土壤。由图2可知,对照土壤CK中Cu、Zn和As含量最低,与其他土壤呈显著性差异;对照土壤Pb和Hg含量也较低。距养鸡场较近的土壤中Cu、Zn、Cr、Pb、Hg和As含量比相对较远的土壤低,这说明养鸡场的存在对周边土壤这5种重金属含量并无影响,但Cd含量则表现出离养殖场越远含量越低,是否与养殖场的存在有关还有待进一步验证。施用鸡粪的土壤Pb含量最高,但其他6种重金属含量与养殖场周边土壤平均值差异很小。依据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[26],所有土壤各重金属含量均未超标。茹淑华等^[4]指出与施化肥处理相比,连续7 a施用鸡粪的处

表4 养鸡场粪污重金属污染指数
Table 4 Pollution index of heavy metals of poultry manure at different breeding periods

养殖期 Breeding periods	单因子污染指数 Single pollution index (P _i)							综合污染指数 Comprehensive pollution index (P _综)	
	Cu	Zn	Cd	Cr	Pb	Hg	As	值 Value	污染程度 Pollution level
P1	0.62	1.11	0.079	0.18	0.10	0.035	0.29	0.82	警戒限 Boundry
P2	0.40	0.91	0.070	0.14	0.09	0.019	0.20	0.67	安全 Safety
P3	0.45	1.11	0.069	0.43	0.12	0.014	0.30	0.82	警戒限 Boundry
P4	0.39	1.14	0.065	0.19	0.10	0.013	0.30	0.84	警戒限 Boundry
P5	0.46	1.04	0.070	0.30	0.11	0.012	0.39	0.77	警戒限 Boundry
P _总	0.47	1.06	0.070	0.25	0.10	0.018	0.29	0.78	警戒限 Boundry

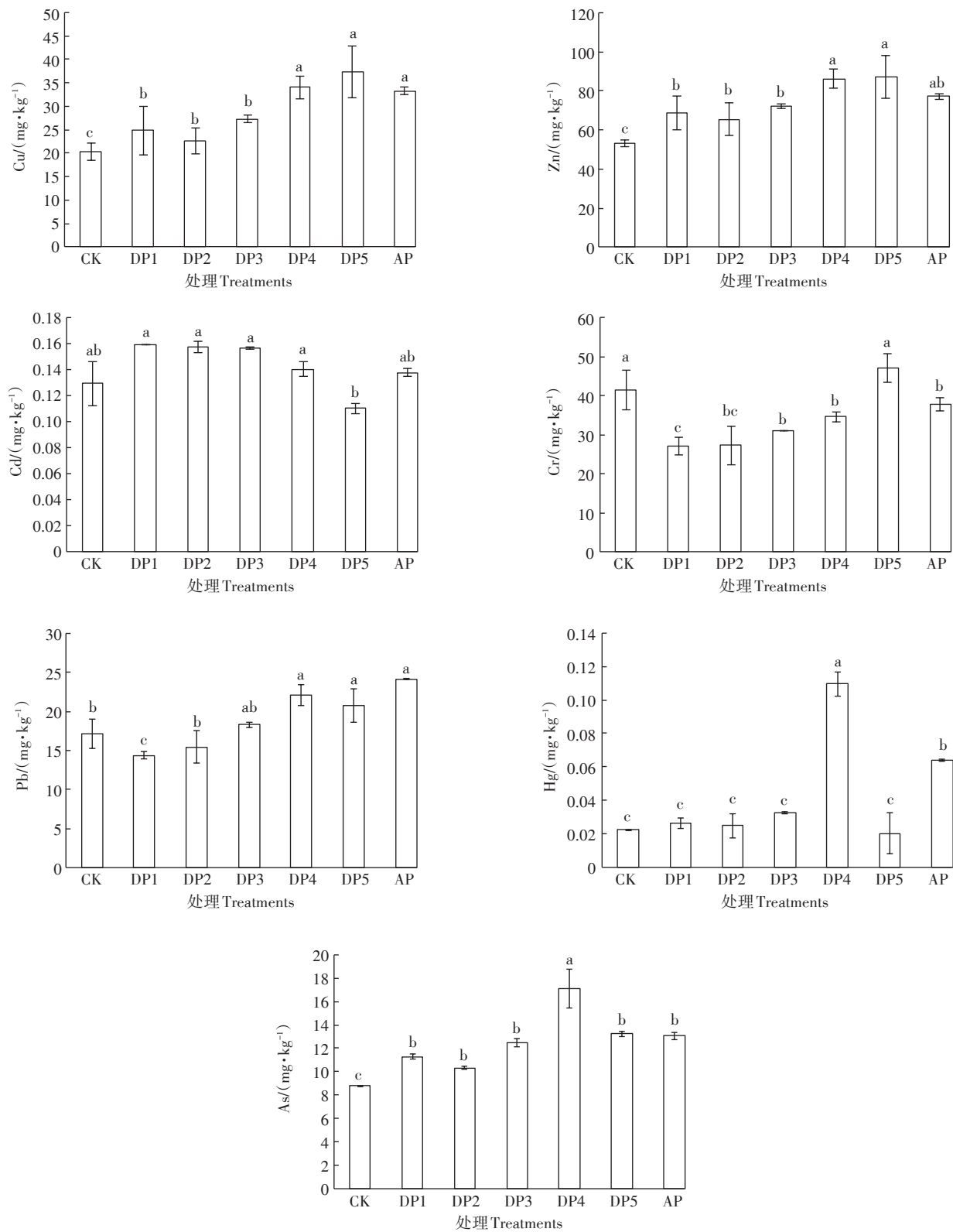


不同小写字母表示不同养殖期间差异显著 ($P < 0.05$)

The different lowercase letters indicate significant differences among different breeding periods ($P < 0.05$)

图1 不同养殖期鸡粪重金属变化情况

Figure 1 Heavy metal content of poultry manure at different breeding periods



不同小写字母代表处理间差异显著
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments

图2 养鸡场周边土壤重金属含量
Figure 2 Heavy metal contents of soil around poultry farms

理土壤Cu、Zn和Cr含量显著增加;连续7a施用高量鸡粪的处理小麦籽粒Zn和Cd含量显著增加。本研究中养殖场周边土壤和施用了鸡粪的土壤Cu、Zn含量均高于对照土壤,且鸡粪中Zn有超标现象,所以仍需谨慎施用。

养殖场土壤Hg和Cd的单项污染指数均小于0.10(表5),其次为Zn、Cr和Cu,距离养鸡场200m处土壤As单因子污染指数大于1.0,属于轻度污染,其他土壤中As单项污染指数也较其他重金属大,但都属于无污染等级。整体来讲,养殖场周边土壤各重金属单项污染指数由小到大的顺序为Hg<Cd<Zn<Cr<Cu<Pb<As。各土壤重金属的综合污染指数均小于0.30,都为安全水平,其中距离养鸡场200m的表层土壤综合污染指数略大,其次是距离养鸡场300m的土壤;不同土壤综合污染指数间并无显著差异。说明养殖场存在10a以内并不影响周边土壤重金属含量,施用鸡粪对土壤重金属综合污染指数的影响也不显著。

2.2 鸡粪及周边土壤细菌群落相对丰度分析

2.2.1 不同养殖期鸡粪细菌群落相对丰度分析

从门水平来计算鸡粪中不同细菌相对丰度(图3a)。整体来讲,鸡粪中优势菌门种类较少,Firmicutes相对丰度最大,平均高达50.58%,其中育成期最高,占总量的70.96%,而育雏期最低,只占总量的21.51%;从育成期到终产期Firmicutes丰度逐渐降低。其次为Proteobacteria,平均丰度为30.46%(育雏期最高,占该时期总量的54.03%);Bacteroidetes丰度列第3(平均为11.33%),整个养殖期这3类平均占细菌丰度总量的92.37%,其他还有少量的Actinobacteria、Verrucomicrobia和Planctomycetes等。育雏期和终产期细菌门类相对较丰富。

2.2.2 养鸡场周边土壤细菌群落相对丰度分析

与鸡粪细菌门种类相比,土壤细菌优势菌门种类更丰富(图3b)。土壤中Proteobacteria相对丰度最高,平均为36.62%;其次是Bacteroidetes和Actinobacteria,各占比约15%,而Acidobacteria、Planctomycetes、Gemmatimonadetes和Firmicutes平均丰度分别为7.33%、4.12%、2.72%和2.22%。对照、距养殖场不同距离、施用了鸡粪的土壤中各优势菌门丰度虽然各不相同,但整体并无显著差异。施用了鸡粪的土壤Firmicutes和Gemmatimonadetes相对丰度比其他土壤高,而Actinobacteria丰度相对略低,说明施用鸡粪后土壤细菌在门水平上数量发生变化,但变幅并不显著。

2.3 鸡粪及周边土壤细菌群落结构组成分析

通过高通量测序,在不同养殖期鸡粪中共检测到548个属的细菌,对属水平的细菌群落数量在前30的属进行热图分析(图4a)。鸡粪中优势属主要有*Lactobacillus*、*Ignatzschineria*、*Escherichia*/*Shigella*、*Enterococcus*、*Psychrobacter*和*Erysipelothrix*,这几种优势菌属是家畜肠道内常见菌属^[27]。育雏期*Escherichia*/*Shigella*和*Ignatzschineria*所占比例最大,分别为17.56%和16.88%,显著高于其他时期,而*Enterococcus*、*Psychrobacter*和*Erysipelothrix*数量明显少于其他时期,*Escherichia*/*Shigella*可引起人腹泻或食物中毒,*Ignatzschineria*是与苍蝇有关的细菌,该时期雏鸡养殖时间短、消化系统不完善,免疫能力也较差,故鸡粪中有大量致病菌存在^[28]。育成期乳杆菌属*Lactobacillus*数量显著高于其他时期,*Lactobacillus*具有维护机体健康和调节免疫功能的作用,可能是由于该养殖期鸡粪中重金属普遍较低,故鸡的健康状况良好,免疫能力也较强;该养殖期*Ignatzschineria*数量很少。终产期*Psychrobacter*、*Erysipelothrix*和*Bacteroides*数量少于初产期和高产期。

选取土壤细菌中数量居前30位的属进行热图分析(图4b)。养鸡场周边土壤中*Salinimicrobium*、*Rhodoligotrophos*、*Nitriliruptor*、*Thiopfundum*、*Aliifodinibius*、*Sphingomonas*、*Halomonas*、*Gp10*、*Gp6*和*Gemmatimonas*数量普遍较多。因养鸡场周边土壤取自旁边排水沟,整体土壤盐碱化程度较严重,所以*Salinimicrobium*、*Rhodoligotrophos*、*Nitriliruptor*、*Thiopfundum*、*Aliifodinibius*、*Sphingomonas*、*Halomonas*这些耐盐碱属的数量都较多,*Gp10*、*Gp6*属于*Acidobacteria*中的优势亚属,是土壤中的常见属^[29]。在施用了鸡粪的蔬菜地中优势属为*Gemmatimonas*、*Sphingomonas*、*Gp6*、*Lysobacter*、*Massilia*、*Gp4*和*Pedobacter*,其中*Sphingomonas*和*Massilia*在环境保护及工业生产方面具有巨大的应用潜力,可以有效降解多环芳烃(PAHs)及六六六(HCH)异构体等,但也都是致病菌,能够引起植物根部或动物伤口感染^[30],而*Lysobacter*对植物病原真菌及卵菌具有广谱的抗菌活性^[31],这也说明施用鸡粪在增加降解有机污染物菌属的同时,也会有带入致病菌的危险。虽然鸡粪呈弱碱性,但当地土壤pH普遍在8.0~8.5,所以施用鸡粪后土壤pH会略有降低,适合盐碱化条件下生长的优势菌属数量会减少。李晓华^[27]指出未施粪肥土壤中Firmicutes的比例显著低于粪肥还田土壤,细菌群落组成

表5 养鸡场周边土壤重金属污染指数

Table 5 Pollution index of heavy metals of soils around poultry farms

处理 Treatments	单因子污染指数 Single pollution index (P_i)							综合污染指数 Comprehensive pollution index ($P_{\text{综}}$)	
	Cu	Zn	Cd	Cr	Pb	Hg	As	值 Value	污染程度 Pollution level
CK	0.20	0.13	0.043	0.28	0.34	0.011	0.59	0.19	安全 Safety
DP1	0.25	0.17	0.053	0.18	0.29	0.013	0.75	0.21	安全 Safety
DP2	0.23	0.16	0.052	0.18	0.31	0.012	0.69	0.20	安全 Safety
DP3	0.27	0.18	0.052	0.21	0.37	0.016	0.83	0.23	安全 Safety
DP4	0.34	0.22	0.047	0.23	0.44	0.055	1.14	0.29	安全 Safety
DP5	0.37	0.22	0.037	0.31	0.41	0.032	0.88	0.28	安全 Safety
AP	0.33	0.19	0.046	0.25	0.48	0.008	0.87	0.26	安全 Safety

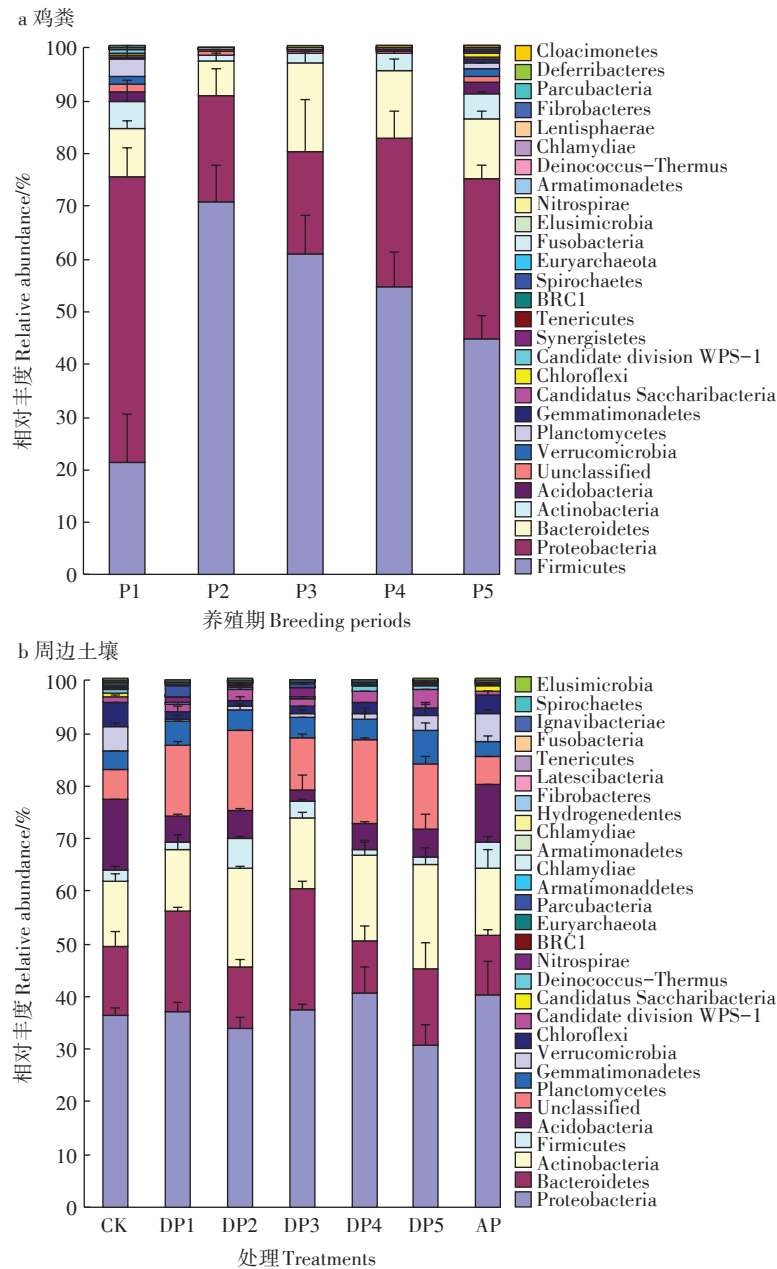


图3 不同养殖期鸡粪和周边土壤中门水平优势细菌相对丰度

Figure 3 Relative abundances of dominant bacteria at phylum level at different periods of menure and soil

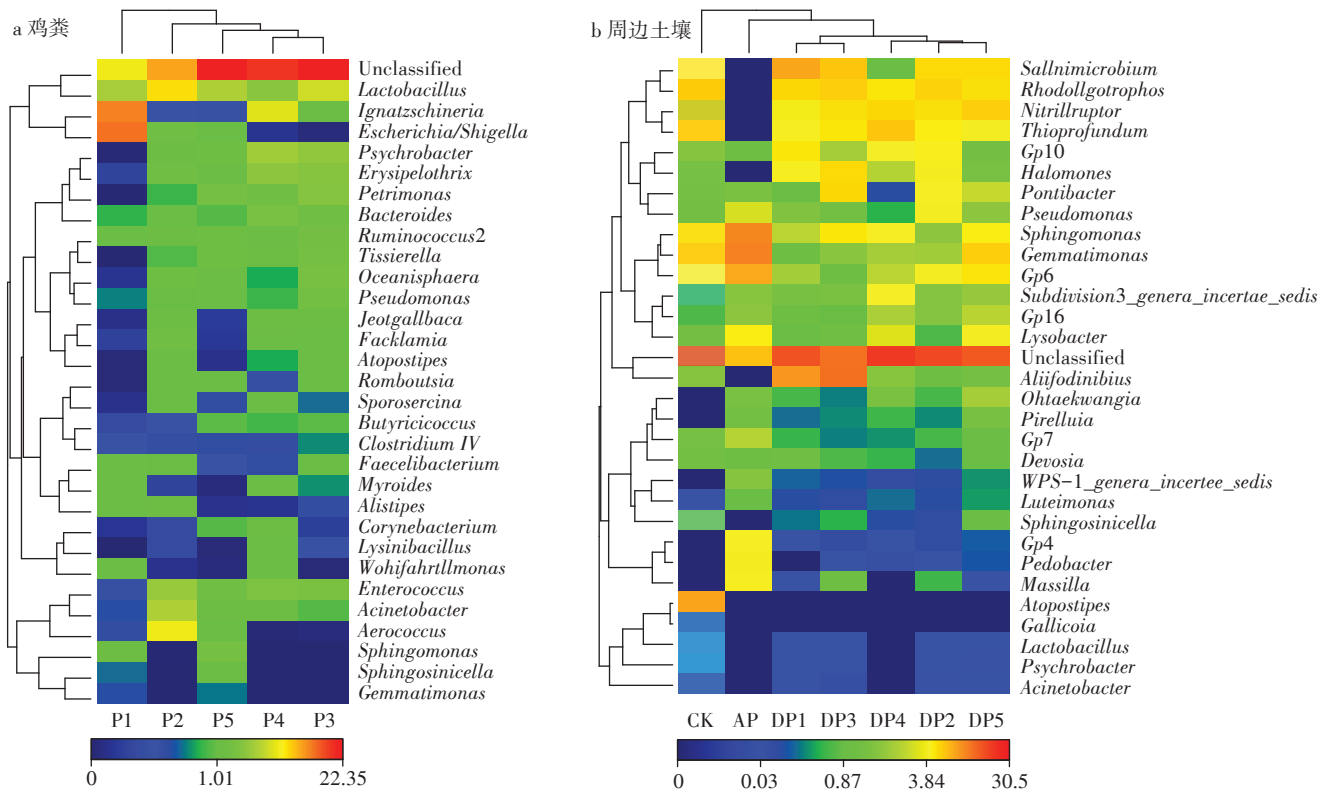


图4 鸡粪及周边土壤中属水平优势细菌相对丰度

Figure 4 The relative percentages of the bacterial genus in manure and soil

在粪污与土壤样品中的差异极大,但粪肥还田土壤中保留了部分粪污中细菌群落结构的特征,结论与本研究相似。

2.4 鸡粪及周边土壤细菌群落与其理化性质及重金属的相关性分析

2.4.1 鸡粪细菌群落与其理化性质及重金属的相关性分析

从鸡粪的基本理化性状、重金属与其细菌群落多样性及优势菌门丰度的相关性来看(表6),鸡粪中细菌群落 OTU、Shannon、Chao1、Actinobacteria、Acidobacteria、Planctomycetes、Gemmatimonadetes、Candidatus Saccharibacteria 与 pH 值均呈极显著正相关,但 Simpson 与 pH 呈显著负相关。细菌群落 Shannon、Bacteroidetes 与 EC 呈显著负相关, Simpson 与 EC 呈极显著正相关。研究区鸡粪 EC 为 $25.27 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,盐分含量较高,所以对群落多样性有抑制作用,但对均匀度有促进作用。只有 Bacteroidetes 与有机质呈极显著负相关,其他优势菌门、多样性指数与有机质含量均无相关性;全 N 与细菌群落多样性和各门类均不相关;Shannon 和 Candidatus Saccharibacteria 与全 P 呈显著正相关, Spirochaetes 与全 P 呈显著负相

关;细菌多样性和多数主要门类与全 K 均呈极显著正相关关系(除 Proteobacteria 与全 K 呈显著负相关外),说明细菌群落在这个全 K 水平条件下适合生长和繁殖。

不同重金属与鸡粪细菌群落相关性不同。除 Sequence 与 Zn、Shannon 与 Hg 呈显著和极显著负相关、Sequence 与 As、Simpson 与 Hg 呈显著和极显著正相关外,其他细菌多样性指数与各重金属含量相关性均未达到显著水平。Firmicutes 与 Cu 和 Zn、Bacteroidetes 与 Hg 呈极显著和显著负相关,这也进一步解释了育雏期 Cu、Zn 含量高,但其 Firmicutes 相对丰度很低,而育成期 Cu、Zn 含量较低,但其 Firmicutes 相对丰度较高的现象。Firmicutes 虽有耐重金属的特性^[32],但由于鸡粪中 Cu 和 Zn 含量过高,致使 Firmicutes 生长受到抑制。鸡粪中 Bacteroidetes、Verrucomicrobia 与 Cu、Proteobacteria、Actinobacteria、Verrucomicrobia、Acidobacteria、Spirochaetes、Gemmatimonadetes 与 Zn、Bacteroidetes、Verrucomicrobia 与 Cd、Firmicutes、Proteobacteria 与 Cr、Proteobacteria 与 As 均达极显著或显著正相关。整体而言,在鸡粪基本理化性质中,pH 和全 K 对细菌群落多样性和优

表6 鸡粪细菌群落特征与其理化性质、重金属含量的相关性

Table 6 Correlations between bacterial community and physicochemical properties, heavy metal contents of poultry manure

指标 Parameters	pH	EC	OM	TN	TP	TK	Cu	Zn	Cd	Cr	Pb	Hg	As
Sequence	-0.137 9	-0.271 9	-0.121 4	0.053 0	0.099 3	0.251 5	-0.114 4	-0.375 3*	0.074 0	0.277 1	0.241 7	0.131 1	0.363 5*
OTU	0.495 1**	-0.088 6	0.177 1	0.028 1	0.161 0	0.460 6**	-0.023 8	0.204 1	0.108 8	-0.238 6	-0.205 5	-0.259 9	-0.055 4
Shannon	0.448 3**	-0.330 4*	-0.059 3	-0.066 9	0.391 4*	0.434 9**	-0.030 5	0.198 6	0.118 8	-0.111 0	-0.185 8	-0.576 5**	-0.033 1
Chao1	0.474 7**	-0.089 4	0.175 9	0.008 5	0.162 2	0.438 1**	-0.046 4	0.173 0	0.110 3	-0.240 8	-0.168 8	-0.262 3	-0.033 1
Simpson	-0.322 7*	0.386 0**	0.311 5	0.250 7	-0.600 1**	-0.228 2	0.243 4	0.038 2	0.046 2	-0.138 5	0.089 8	0.819 8**	-0.039 6
Firmicutes	-0.211 6	0.061 0	-0.172 2	0.085 6	0.233 6	-0.225 9	-0.447 7**	-0.464 9**	-0.311 1	0.369 4*	0.154 0	-0.224 7	0.080 3
Proteobacteria	0.014 6	-0.076 1	0.005 9	0.091 0	-0.283 5	-0.376 9*	-0.052 9	0.533 1**	0.187 0	0.455 8**	-0.153 7	0.245 3	0.551 9**
Bacteroidetes	-0.302 9	-0.367 0*	-0.581 3**	-0.050 4	0.106 5	0.202 0	0.487 4**	0.291 2	0.386 2**	-0.187 3	-0.036 3	-0.361 0*	0.174 5
Actinobacteria	0.505 0**	-0.064 5	0.158 8	0.002 3	0.028 9	0.349 1*	-0.015 0	0.333 7*	0.057 0	-0.205 4	-0.249 6	-0.216 5	-0.117 5
Verrucomicrobia	0.300 8	-0.066 8	-0.215 3	-0.077 6	0.139 3	0.381 8**	0.385 5**	0.381 9**	0.365 4*	-0.284 3	-0.273 7	-0.301 6	-0.000 9
Acidobacteria	0.430 3**	-0.002 3	0.178 2	0.035 9	-0.053 3	0.352 8*	0.030 6	0.339 0*	0.101 5	-0.291 9	-0.203 4	-0.153 0	-0.101 5
Planctomycetes	0.436 0**	0.057 1	0.266 6	0.080 3	0.274 6	0.390 1**	0.170 0	0.112 5	0.072 8	-0.240 5	-0.239 1	0.005 2	-0.157 3
Spirochaetes	0.292 4	-0.084 3	0.028 7	0.116 9	-0.322 8*	0.231 8	-0.178 7	0.384 1**	-0.016 2	-0.190 5	-0.191 4	-0.190 7	-0.097 6
Gemmatimonadetes	0.383 1**	-0.018 9	0.113 6	0.071 5	-0.176 6	0.316 4	-0.061 5	0.376 7*	0.061 9	-0.261 8	-0.200 0	-0.156 9	-0.108 1
Candidatus Saccharibacteria	0.452 2**	0.102 6	0.171 8	0.093 1	0.352 5*	0.434 8**	-0.082 7	0.071 5	-0.220 0	-0.025 7	-0.132 2	-0.169 7	-0.288 9

注:**代表 $P<0.01$; *代表 $P<0.05$, 下同。
Note: ** indicates $P<0.01$; * indicates $P<0.05$, the same below.

势菌门有显著的促进作用,重金属中Zn的影响较大,全N和Pb含量对鸡粪细菌群落无影响。研究区鸡粪pH平均值为7.26,呈微碱性,适合大多数微生物的生长和繁殖。K是微生物生长所必需的营养素,鸡粪全K含量平均为 $24.93\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于猪粪和牛粪^[33]。刘殿锋^[34]指出富K生境中细菌OTU和克隆数量都显著高于低K生境,K能够显著提高细菌的组成和多样性。鸡粪中Zn含量相对最高,所以对细菌群落组成和多样性均有显著影响。鸡粪中Proteobacteria、Actinobacteria和Gemmatimonadetes 3类菌门可适应重金属污染环境,并可能可以通过自身代谢降低重金属的毒性^[35]。

2.4.2 养鸡场周边土壤细菌群落与其理化性质及重金属的相关性分析

在养鸡场周边土壤基本理化性质中有机质对细菌优势菌门丰度影响最大(表7),pH、EC和全N对细菌群落影响较小,全P和全K几乎无影响。土壤细菌群落Sequence、Firmicutes与pH、Planctomycetes、Chloroflexi与EC、Planctomycetes、Gemmatimonadetes、Chloroflexi与有机质、Gemmatimonadetes与全N、Actinobacteria与全K均达极显著或显著正相关;Bacteroidetes与pH、Simpson、Firmicutes与有机质、Simpson与全氮之间呈显著负相关。除土壤pH外,土壤有机质也是影响细菌群落结构的主要因素,该结论与黄健等^[36]研究结论相似。

土壤重金属中Cu和Zn对微生物多样性和优势菌门普遍具有显著影响,Pb和As影响较小,而Cd、Cr、Hg对细菌群落影响甚微。除Simpson、Firmicutes和Cu、Zn呈负相关关系外,细菌群落多样性指数、大部分主要优势菌门与Cu和Zn均呈极显著或显著正相关;其他重金属中除Verrucomicrobia与Cd、Firmicutes与As、Deinococcus-Thermus与Cr、Gemmatimonadetes与Pb、Proteobacteria与Hg间呈显著或极显著正相关或负相关外,与各多样性指数、主要门类均无相关性。Jiang等^[37]发现影响耐Cu植物根际土壤细菌群落的最重要的环境因素是土壤pH而不是Cu浓度,而本研究中Cu对土壤细菌群落的影响明显大于pH,这可能与不同生境微生物对重金属的适应性和选择性有关。Du等^[38]指出重金属Zn、Cd和Cr对沉积物微生物多样性没有影响,但由于本研究土壤中Zn含量较高,已对微生物群落多样性和分布产生显著影响,但Cd和Cr含量很低,所以对细菌群落多样性没有影响。

李晓华^[27]研究指出,理化性质差异仅对畜禽粪便和土壤耐药菌的组成和分布具有显著影响,本研究与该结论不完全一致,鸡粪理化性质对优势菌门的组成、多样性和分布均有影响,但土壤理化性质对其优势菌门的组成和分布具有显著影响。整体来讲,鸡粪理化性质与细菌群落多样性和组成的相关性高于重金属,而养殖场周边土壤中Cu和Zn含量对细菌群落的影响

表7 养鸡场周边土壤细菌群落特征与其理化性质、重金属的相关性

Table 7 Correlations between bacterial community and physicochemical properties, heavy metal contents of soil around poultry farms

指标 Parameters	pH	EC	OM	TN	TP	TK	Cu	Zn	Cd	Cr	Pb	Hg	As
Sequence	0.325 7*	0.037 6	-0.135 7	-0.035 3	0.024 0	-0.129 1	-0.134 7	-0.082 8	-0.053 1	0.130 6	-0.015 4	0.056 8	-0.165 9
OTU	0.109 3	0.069 5	0.201 7	0.076 3	0.216 1	-0.036 9	0.4500 **	0.440 2**	-0.282 6	-0.296 2	-0.004 2	0.013 5	0.162 5
Shannon	0.091 6	0.230 0	0.321 2	0.186 4	0.203 5	0.040 7	0.475 0**	0.460 4**	-0.137 1	-0.186 9	0.017 1	-0.011 3	0.244 5
Chao1	0.058 7	0.019 9	0.204 5	0.071 3	0.209 8	-0.027 9	0.385 1**	0.380 3**	-0.269 5	-0.285 1	-0.009 4	-0.005 0	0.184 4
Simpson	0.111 3	-0.287 3	-0.414 9**	-0.351 5*	-0.206 7	-0.133 8	-0.415 1**	-0.472 3**	-0.026 5	0.059 3	-0.053 2	-0.059 4	-0.241 6
Proteobacteria	-0.031 5	-0.060 1	-0.121 9	-0.104 5	0.067 8	-0.270 0	-0.228 8	-0.003 7	-0.306 9	0.011 2	-0.141 1	0.336 6*	-0.134 0
Bacteroidetes	-0.457 3**	-0.023 9	0.056 7	0.121 6	0.180 4	0.262 9	-0.121 3	-0.006 5	-0.264 2	-0.111 8	-0.379 8*	0.008 8	0.064 1
Actinobacteria	-0.126 7	0.275 4	0.362 1*	0.191 1	-0.081 9	0.339 0*	0.516 3**	0.383 2**	0.057 2	0.157 6	0.258 6	0.016 8	0.281 9
Firmicutes	0.328 8*	-0.286 9	-0.460 5**	-0.312 0	-0.237 6	-0.271 4	-0.370 0*	-0.471 3**	0.294 7	0.022 5	0.095 5	-0.158 5	-0.336 2*
Acidobacteria	0.001 0	-0.131 8	0.240 4	0.145 8	0.093 7	0.058 7	0.323 6*	0.222 3	0.071 8	-0.042 6	0.306 4	-0.132 2	0.227 3
Planctomycetes	0.190 0	0.448 4**	0.397 1**	0.237 7	0.320 1	0.007 4	0.510 2**	0.554 7**	-0.176 3	-0.190 4	-0.192 0	0.074 5	0.257 5
Gemmatimonadetes	-0.197 3	-0.267 5	0.413 3**	0.364 9*	0.197 7	0.239 9	0.320 5	0.201 8	0.239 1	0.262 6	0.507 7**	-0.120 9	0.316 9
Verrucomicrobia	0.047 8	-0.067 9	0.159 9	0.060 9	0.154 4	-0.013 1	0.396 3**	0.386 2**	-0.359 4*	-0.213 9	0.001 1	-0.006 0	0.201 2
Chloroflexi	0.159 9	0.738 3**	0.381 1**	0.198 7	-0.019 8	0.237 6	0.630 4**	0.558 5**	-0.137 1	-0.273 3	-0.244 7	-0.019 0	0.363 7*
Deinococcus-Thermus	0.016 4	0.261 5	0.037 0	0.095 6	-0.020 3	0.124 4	-0.147 8	-0.135 8	-0.117 7	0.483 9**	0.107 1	0.093 5	0.210 0

响均大于土壤理化性质。理化性质中鸡粪pH、全K对其细菌群落结构和多样性的影响最大;重金属中土壤Cu和Zn对其细菌群落结构和多样性的影响最大。

3 结论

(1)宁夏蛋鸡养殖场鸡粪中Zn含量高出国平均值26.83%,其他重金属含量都显著低于全国平均值。育成期鸡粪重金属含量普遍最低,其综合污染指数属安全水平,其他4个时期均处于警戒限水平。土壤重金属并非离养鸡场越近含量越高;养鸡场周边土壤和施用了鸡粪的土壤重金属含量均在安全范围内,但其土壤Cu和Zn含量均高于对照土壤,所以仍需谨慎施用。

(2)鸡粪优势菌门种类较少,Firmicutes相对丰度最大,其次为Proteobacteria和Bacteroidetes,育成期Firmicutes丰度最高。养殖场周边土壤中细菌优势菌门种类更多,主要是Proteobacteria、Bacteroidetes和Actinobacteria。对照、距养殖场不同距离、施用了鸡粪的土壤中各优势菌门丰度虽各不相同,但整体上并无显著差异。

(3)鸡粪细菌优势属主要有*Lactobacillus*、*Ignatzschinia*、*Escherichia* / *Shigella*、*Enterococcus*、*Psychrobacter*和*Erysipelothrix*。养鸡场周边土壤中*Salinimicrobium*、*Rhodoligotrophos*、*Nitriliruptor*、*Thioprofundum*、*Aliifodinibius*、*Sphingomonas*等数量普遍较多。

(4)鸡粪基本理化性质中pH和全K对细菌群落

多样性和优势菌门的影响最大;重金属中Zn的影响较大。养殖场周边土壤基本理化性质中有机质对细菌优势菌门丰度影响最大;重金属中Cu和Zn对土壤细菌多样性和优势菌门普遍具有显著影响。

参考文献:

- [1] 武淑霞,刘宏斌,黄宏坤,等.我国畜禽养殖粪污产生量及其资源化分析[J].中国工程科学,2018,20(5):103-111.
WU Shu-xia, LIU Hong-bin, HUANG Hong-kun, et al. Analysis on the amount and utilization of manure in livestock and poultry breeding in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, 20(5): 103-111.
- [2] Bhatti A U, Khan Q, Gurmani A H, et al. Effect of organic manure and chemical amendments on soil properties and crop yield on a salt affected Entisol[J]. *Pedosphere*, 2005, 15(1):46-51.
- [3] Peng H, Chen Y L, Weng L P, et al. Comparisons of heavy metal input inventory in agricultural soils in North and South China: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660:776-786.
- [4] 茹淑华,徐万强,侯利敏,等.连续施用有机肥后重金属在土壤-作物系统中的积累与迁移特征[J].生态环境学报,2019,28(10):2070-2078.
RU Shu-hua, XU Wan-qiang, HOU Li-min, et al. Effects of continuous application of organic fertilizer on the accumulation and migration of heavy metals in soil-crop systems[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(10):2070-2078.
- [5] 黄绍文,唐继伟,李春花.我国商品有机肥和有机废弃物中重金属、养分和盐分状况[J].植物营养与肥料学报,2017,23(1):162-173.
HUANG Shao-wen, TANG Ji-wei, LI Chun-hua. Status of heavy metals, nutrients, and total salts in commercial organic fertilizers and organic wastes in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(1):162-173.

- [6] 倪治华, 孙万春, 林辉, 等. 浙江省畜禽粪源有机肥质量安全风险与控制对策[J]. 浙江农业学报, 2020, 31(12): 1-9.
NI Zhi-hua, SUN Wan-chun, LIN Hui, et al. Quality safety risk and control countermeasures of manure-derived organic fertilizer in Zhejiang Province[J]. *Acta Agriculture Zhejiangensis*, 2020, 31(12): 1-9.
- [7] Xu Y, Li J, Zhang X B, et al. Data integration analysis: Heavy metal pollution in China's large-scale cattle rearing and reduction potential in manure utilization[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 232: 308-317.
- [8] Tullo E, Finzi A, Guarino M, et al. Review: Environmental impact of livestock farming and precision livestock farming as a mitigation strategy[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 2751-2760.
- [9] 杨子仪, 吴景贵, 冯娜娜, 等. 不同畜禽粪肥与化肥配施下黑土中 Zn 含量及形态变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(9): 1728-1735.
YANG Zi-yi, WU Jing-gui, FENG Na-na, et al. Effects of different livestock manures combined with chemical fertilizers on contents and fractions of Zn in black soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(9): 1728-1735.
- [10] 王美, 李书田, 马义兵, 等. 长期不同施肥措施对土壤铜、锌、镉形态及生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1500-1510.
WANG Mei, LI Shu-tian, MA Yi-bing, et al. Influence of different long-term fertilization practices on fractionations and bioavailability of Cu, Zn, and Cd in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(8): 1500-1510.
- [11] Huang Q Q, YU Y, Wan Y N, et al. Effects of continuous fertilization on bioavailability of cadmium in soil and its uptake by rice (*Oryza Sativa* L.)[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 215: 13-21.
- [12] 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 等. 我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 986-996.
MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, et al. Heavy metal contents in animal manure in China and the related soil accumulation risks[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(2): 986-996.
- [13] Silva J, Leite D, Fernanade M, et al. *Campylobacter* spp. as a forborne pathogen: A review[J]. *Front Microbiol*, 2011, 2(1): 200.
- [14] 王飞, 赵立欣, 沈玉君, 等. 华北地区畜禽粪便有机肥中重金属含量及溯源分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 202-208.
WANG Fei, ZHAO Li-xin, SHEN Yu-jun, et al. Analysis of heavy metal contents and source tracing in organic fertilizer from livestock manure in North China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(19): 202-208.
- [15] Bloem E, Albiñá A, Elving J, et al. Contamination of organic nutrient sources with potentially toxic elements, antibiotics and pathogen microorganisms in relation to P fertilizer potential and treatment options for the production of sustainable fertilizers: A review[J]. *The Science of the Total Environment*, 2017, 607-608: 225-242.
- [16] Tenuta M, Lazarovits G. Ammonia and nitrous acid from nitrogenous amendments kill the microsclerotia of *Verticillium dahliae*[J]. *Phytopathology*, 2002, 92(3): 255-264.
- [17] Poulsen P H B, Ai-Soud W A, Bergmark L, et al. Effects of fertilization with urban and agricultural organic wastes in field trial-prokaryotic diversity investigated by pyrosequencing[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 784-793.
- [18] 李可, 孙彤, 孙涛, 等. 施用鸡粪有机肥对种植小油菜土壤微生物群落结构多样性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20200326.1036.004.html>.
LI Ke, SUN Tong, SUN Tao, et al. Effects of applying organic fertilizer from chicken excrement on the microbial community structural diversity in soils planted with Chinese cabbage (*Brassica chinensis*) [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20200326.1036.004.html>.
- [19] 魏益华, 邱素艳, 张金艳, 等. 农业废弃物中重金属含量特征及农用风险评估[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 212-220.
WEI Yi-hua, QIU Su-yan, ZHANG Jin-yan, et al. Characteristic of heavy metal contents in agricultural wastes and agricultural risk assessment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(14): 212-220.
- [20] 中华人民共和国农业部. 有机肥料(NY 525—2012)[S]. 北京: 中国农业出版社, 2012.
The Ministry of Agriculture of the PRC. Organic fertilizer (NY 525—2012)[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2012.
- [21] Verdonck O, Szmidt R A K. Compost specifications[J]. *Acta Horticulture*, 1998, 469: 169-177.
- [22] 原泽鸿, 黄选洋, 张克英, 等. 四川省蛋鸡配合饲料及鸡蛋重金属含量分布[J]. 动物营养学报, 2015, 27(11): 3485-3494.
YUAN Ze-hong, HUANG Xuan-yang, ZHANG Ke-ying, et al. Heavy metal content in the compound feed and eggs of laying hens of Sichuan Province[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2015, 27(11): 3485-3494.
- [23] 刘铮. 我国土壤中锌含量的分布规律[J]. 中国农业科学, 1994, 27(1): 30-37.
LIU Zheng. Regularities of content and distribution of zinc in soils of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1994, 27(1): 30-37.
- [24] 许静, 丁传贵. 蛋鸡饲养管理要点[J]. 中国家禽, 2012, 34(23): 59.
XU Jing, DING Chuan-gui. Main points of laying hens feeding and management[J]. *China Poultry*, 2012, 34(23): 59.
- [25] 陈甫, 朱风华, 徐丹, 等. 2015年山东省肉鸡饲料原料中重金属污染情况调查及风险评估[J]. 动物营养学报, 2016, 28(10): 3175-3182.
CHEN Fu, ZHU Feng-hua, XU Dan, et al. Investigation and risk assessment of heavy metal pollution of feedstuffs in broiler chicken in Shandong Province in 2015[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, 28(10): 3175-3182.
- [26] 生态环境部. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 GB 15618—2018(试行)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
Ministry of Ecological Environment. Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land GB 15618—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [27] 李晓华. 规模化猪场粪污中典型抗生素归趋行为及抗性基因扩散特征研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
LI Xiao-hua. Migration characteristics of the typical antibiotics and

- spread of antibiotic resistance genes in the environment of large-scale swine feedlots[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.
- [28] Zhang L, Morey A, Bilgili S F. Effectiveness of several antimicrobials and the effect of contact time in reducing *Salmonella* and *Campylobacter* on poultry drumsticks[J]. *Journal of Applied Poultry Research*, 2019, 28(4):1143-1149.
- [29] 姚钦. 生物炭施用对东北黑土土壤理化性质和微生物多样性的影响[D]. 长春:中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2017.
- YAO Qin. Effects of biochar application on soil physical and chemical properties and microbial diversity in black soil of northeast China[D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [30] 胡杰, 何晓红, 李大平, 等. 鞘氨醇单胞菌研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2007, 13(3):431-437.
- HU Jie, HE Xiao-hong, LI Da-ping, et al. Progress in research of *Sphingomonas*[J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2007, 13(3):431-437.
- [31] 刘径. 产酶溶杆菌 OH11 中 sigma 因子的鉴定及功能研究[D]. 南京:南京农业大学, 2016.
- LIU Jing. Identification and functional analysis of sigma factors in lysozyme-producing strain OH11[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.
- [32] Mounaouer B, Nesrine A, Abdennaceur H. Identification and characterization of heavy metal-resistant bacteria selected from different polluted sources[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2014, 52(37/38/39):7037-7052.
- [33] 周博, 朱振国, 周建斌, 等. 杨凌地区不同畜禽有机肥养分及重金属含量研究[J]. 土壤通报, 2013, 44(3):714-718.
- ZHOU Bo, ZHU Zhen-guo, ZHOU Jian-bin, et al. Contents of nutrients and heavy metals in the different livestock and poultry manure[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(3):714-718.
- [34] 刘殿锋. 含钾岩石生物转化中的微生物多样性与作用机制研究[D]. 南京:南京师范大学, 2011.
- LIU Dian-feng. Microbial diversities during bioconversion of potassium-bearing rocks and its mechanisms[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2011.
- [35] Bier R L, Voss K A, Bernhardt E S. Bacterial community responses to a gradient of alkaline mountaintop mine drainage in Central Appalachian streams[J]. *Isme Journal*, 2014, 9(6):1378-1390.
- [36] 黄健, 朱旭炎, 陆金, 等. 狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(12):5550-5560.
- HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, et al. Effects of different land use types on microbial community diversity in Shizishan mining area[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(12):5550-5560.
- [37] Jiang L F, Song M K, Yang L, et al. Exploring the influence of environmental factors on bacterial communities within the rhizosphere of the Cu-tolerant plant, *Elsholtzia splendens*[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6:36302.
- [38] Du H, Harata N, Li F. Responses of riverbed sediment bacteria to heavy metals: Integrated evaluation based on bacterial density, activity and community structure under well-controlled sequencing batch incubation conditions[J]. *Water Research*, 2018, 130:115-126.