

DOI: 10.5846/stxb201705220953

方凤满, 武慧君, 姚有如, 林跃胜, 何成, 吴明宏, 匡盈. 鸟粪对同里湿地公园土壤重金属及其形态的影响. 生态学报, 2018, 38(8): - .

Fang F M, Wu H J, Yao Y R, Lin Y S, He C, Wu M H, Kuang Y. Heavy metal concentrations and speciation of soil affected by bird droppings in Tongli Wetland Park, East China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(8): - .

鸟粪对同里湿地公园土壤重金属及其形态的影响

方凤满^{1,2,*}, 武慧君¹, 姚有如¹, 林跃胜¹, 何成³, 吴明宏¹, 匡盈¹

1 安徽师范大学国土资源与旅游学院, 芜湖 241003

2 安徽自然灾害过程与防控研究省级实验室, 芜湖 241003

3. 复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433

摘要: 为了解鸟粪对同里湿地公园土壤重金属含量及形态转化的影响, 测定了公园内有鸟粪土壤、无鸟粪土壤、鸟粪沉积物的理化性质, Co、Cr、Cu、Ni、Zn 含量及其形态分布, 并进行统计分析。结果显示: 同里湿地公园土壤及沉积物 pH 值平均含量达 4.5, N、C、H、S 和 TP 平均含量分别达到 3.69、38.07、10.97、0.52、1.43g/kg, 有鸟粪土壤中 N、C、H 和 S 含量显著高于无鸟粪土壤。Cu、Zn、Co 平均含量呈现出鸟粪沉积物 > 有鸟粪土壤 > 无鸟粪土壤; Cr 的平均含量表现为鸟粪沉积物 > 无鸟粪土壤 > 有鸟粪土壤; Ni 呈现出有鸟粪土壤 > 鸟粪沉积物 > 无鸟粪土壤。总体上, 鸟粪的进入增加了土壤 Cu、Zn、Co、Ni 含量。因此应及时清理土壤上覆鸟粪, 降低对当地重金属污染风险。相对于无鸟粪土壤中不同重金属形态的分布, 有鸟粪土壤中 Co、Cr、Cu、Zn 的活性态占全量的百分比均略有下降, 非活性态呈上升趋势。鸟粪的加入, 虽然会在一定程度上降低活性态重金属占总量的比例, 但因总量和活性态含量均上升, 向植物系统的迁移量会呈现增加趋势, 因此对鸟粪施肥再利用应慎重。

关键词: 同里湿地; 鸟粪; 重金属; 形态; 土壤

Heavy metal concentrations and speciation of soil affected by bird droppings in Tongli Wetland Park, East China

FANG Fengman^{1,2,*}, WU Huijun¹, YAO Youru¹, LIN Yuesheng¹, HE Cheng³, WU Minghong¹, KUANG Ying¹

1 College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China

2 Anhui Key Laboratory of Natural Disaster Process and Prevention, Wuhu 241003, China

3 Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract: The heavy metal content and speciation in soil and bird droppings from Tongli National Wetland Park were determined. The main purpose was to understand the impact of bird droppings on wetland soil heavy metal concentrations and their speciation changes. Soil with and without bird droppings was collected from Tongli Wetland. The metal concentrations were determined by inductively coupled plasma-optical emission spectrometry. The result suggested that the average pH for soil was 4.5, and the contents of N, C, H, S, and TP were 3.69, 38.07, 10.97, 0.52, and 1.43g/kg, respectively. Thus, the N, C, H, and S levels in soil containing bird dropping were significantly higher than those in soil without bird droppings. The average contents of Cu, Zn, and Co were in the order guano sediments > soil with bird dropping > soil without bird droppings. The average content of Cr was in the order guano sediments > soil without bird droppings > soil with bird dropping. The average content of Ni was in the order soil with bird droppings > guano sediments > soil without bird droppings. In general, the Cu, Zn, Co, and Ni contents in soil increased with the presence of bird droppings. Bird droppings should be cleaned in a timely manner to reduce the local pollution risk of heavy metals in soil. The percentages of

基金项目: 国家自然科学基金 (41371480); 安徽师范大学研究生科研创新与实践项目 (2017exsj055)

收稿日期: 2017-05-22; **网络出版日期:** 2017-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ffm1974@mail.ahnu.edu.cn

total active Co, Cr, Cu, and Zn fractions in soil containing bird droppings were slightly lower than those in soil without bird droppings. The inactive state showed an upward trend. The proportion of the total activity of heavy metals in soil reduced with the presence of guano, but the content of total and active heavy metals in the soil increased; therefore, the amount of migration of plant systems will increase, and fertilization using bird droppings should be applied carefully.

Key Words: Tongli wetland; bird droppings; heavy metals; formation; soil

重金属作为一种难降解、来源广、具有持久性的有毒污染物,通过大气、土壤、水等介质进入并富集于生物体内,能直接或间接地危害当地生态环境和人体健康^[1-2]。湿地作为全球生态系统的重要组成部分,因其地势低,导致自然源或人为源产生的重金属易通过地表、地下径流、大气降尘等多途径进入湿地系统^[3-4],并且湿地地表与地下环境均可吸附、迁移重金属^[5],但是当土壤、沉积物及水体的水文条件及理化性质发生改变,均会导致已吸附的重金属再次释放,从而造成二次污染及生态环境恶化^[6-7]。近年来,强烈的人类活动,如材料冶炼、重化工业、汽车尾气排放等人为源排放的重金属日益增加,导致重金属在湿地环境中累积^[6, 8]。

鸟类处于食物链的顶端,在生态系统间营养元素迁移与转化中扮演重要角色^[9],有研究表明鸟类在为陆地生态系统提供重要营养元素的同时,并可以运输人为活动排放的重金属,在繁殖地,鸟类会通过排便、反刍甚至死亡来释放自身所富集的重金属,对当地生境产生负面影响^[10]。因此通过鸟类累积或放大的重金属,会加剧对生态系统稳定性和生物体健康的威胁^[11-13]。学者开始关注鸟类内脏、羽毛对重金属的富集研究^[11],以及通过生物链过程中鸟类内脏、卵、羽毛和排泄物中富集的重金属含量来揭示当地的土壤及水体污染状况^[13-14]。粪便作为动物未完全被消化的食物残渣,加之生物体对重金属的生物富集与放大作用,导致粪便中含有较高的重金属,尤其对 Mn、Cd、Cu、Zn 等富集能力较强^[9, 15-16]。鸟类粪便的大量进入,会明显改变湿地水体、土壤及沉积物的理化性质,对重金属的富集及迁移产生影响。有研究表明,海鸟粪是海岸表土与沉积物部分重金属的主要来源^[17]。虽然国内外学者开始关注鸟粪对于生态环境重金属污染的问题,但基于生活于陆地生态系统内部的湿地地区候鸟排泄物,对迁入地生境表层土壤重金属污染的研究较少,排泄物与土壤之间重金属形态转化研究较缺乏。本文拟研究湿地地区,候鸟排泄物对迁入地表层土壤重金属含量及形态转化的影响,从而对同里湿地生态系统重金属污染与防治具有一定实践指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

同里国家湿地公园位于江苏省吴江市同里古镇东北部,东邻昆山市,周环澄湖和白蚬湖。占地面积近 690hm²,其中水域面积 240hm²、陆地面积 450hm²。公园内生态系统多样,目前已知,陆生植物分布有银杏、水杉等 170 种植物种类,鸟类分布有白鹭、夜鹭、翠鸟等 12 目 28 科 91 种^[18]。

1.2 样品采集与处理

土壤样品采集:2016 年 7 月,在经过 5 日以上晴朗天气,采样当天为晴朗天气情况下,于同里湿地公园内采用梅花形布点,避开水位影响区域,选择长期处于水位以上的土壤进行采集(见图 1),每一采样点在 5m×5m 区域内 0—15cm 土层采集 5 点土壤样品,均匀混合后,采用四分法剔除多余样品,保留约 1kg 土壤,无鸟粪土壤(The soil without droppings, OS)12 个;对于上覆鸟粪的土壤(The soil with droppings, WS),使用小铲剔除鸟粪层后,同采集 OS 方法一致,采集下覆 0—15cm 土层的土壤,共 9 个。鸟粪沉积物(Bird' droppings, BS)的采集:在采集上覆鸟粪土壤样点处,选取鸟粪堆积较厚(约 0.5—1cm 厚)的地点采集鸟粪沉积物,采用四分法剔除多余样品,保留 100—200g,共计 4 个。

土壤与鸟粪沉积物样品自然风干后,剔除石块、植物根系残留物、有机残渣及可见侵入体后,过 20 目尼龙筛,再用玛瑙研钵研磨后过 100 目尼龙筛,备用。

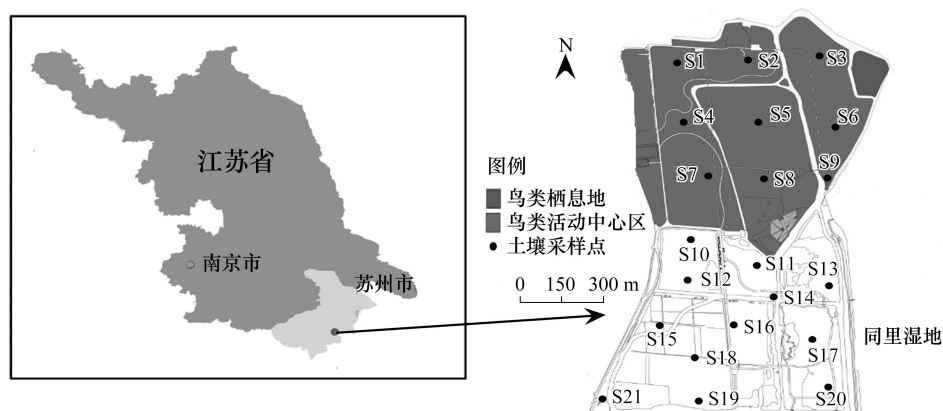


图1 采样点分布图

Fig.1 Spatial distribution maps about sampling points

S1—S9 为有鸟粪土壤, S10—S21 为无鸟粪土壤

1.3 实验过程与质量控制

土壤及鸟粪沉积物中 pH 使用梅特勒 pH 计 (Mettler-Toledo, 美国) 测定。C、N、H、S 含量使用元素分析仪 (Elementar, 德国) 测定。全磷 (TP) 使用酸溶-钼锑抗比色法进行消解^[19], 紫外分光光度计测定。重金属全量使用电热板湿法消解, 即称取 0.2000g 样品, HF-HClO₄-HNO₃ 进行消解^[20]。重金属形态使用 Tessier 五步连续提取法, 所对应的形态为可交换态 (F1)、碳酸盐结合态 (F2)、铁锰氧化物结合态 (F3)、有机结合态 (F4) 和残渣态 (F5), 其中活性态为 F1、F2、F3 的总和, F4 和 F5 为非活性态^[21-22]。土壤及沉积物中的 Cr、Co、Cu、Zn、Ni 的全量及提取态重金属含量均使用 ICP-OES (Perkin-Elmer, 美国) 测定。

为保证实验数据的可靠性, 土壤及沉积物测定过程中按样品总量的 15% 比例插入国家土壤标准样品 (GSS-3) 进行参比, 回收率为 87%—119%。每 4 个样品随机挑选 1 个做平行样 (重复 3 次), 每批样品均做空白样, 结果符合质控要求。所用试剂均为优纯级、水为超纯水、器皿均采用 10% 硝酸溶液浸泡 24h 以上。

2 结果分析

2.1 同里湿地公园土壤及鸟粪沉积物理化性质

同里湿地公园土壤总体 pH 达 4.5, 呈酸性。其中 OS 的 pH 显著高于 WS ($P = 0.023 < 0.05$), 高出 21.64% (表 1)。公园土壤中 N、C、H、S、TP 平均含量均较高, 分别达到 (3.69 ± 0.98) 、 (38.07 ± 16.01) 、 (10.97 ± 2.45) 、 (0.52 ± 0.25) 、 (1.43 ± 1.02) g/kg。其中 WS 的 S 平均含量与 OS 呈现出极显著差异 ($P \approx 0.000 < 0.01$), 高出 102.60%, 而 WS 的 N、C、H 的平均含量显著高于 OS ($P = 0.028, 0.043, 0.035 < 0.05$), 分别高出 38.17%、59.95%、22.92%, 而 WS 与 OS 之间, TP 之间的差异性无统计学意义 ($P > 0.05$)。

BS 中 pH 为 4.68, 呈酸性, 其 N、C、H 和 TP 的含量均高于 OS 和 WS, 其 C/N、C/H 均高于上述土壤。BS 中 S 含量虽然高于土壤总体水平和 OS, 但是略低于 WS。

2.2 同里湿地公园土壤及鸟粪重金属含量特征

土壤及鸟粪中 Co、Cu、Zn 均呈现出 BS > WS > OS (图 2)。BS 中 Co 的平均含量高出 OS 达 53.90%, 三者变异系数均在 10% 左右, 变异程度较小; BS 中 Cu 的平均含量高出 WS 和 OS 为 64.81%、124.94%, 三者均呈现出中等强度变异, 相比较 Cu 的国家土壤环境质量一级标准值 35mg/kg, BS 中 Cu 的平均含量高出标准值 3.99 倍, WS 高出 1.44 倍, OS 高出 0.78 倍。BS 中 Zn 的平均含量分别高出 WS 和 OS 为 7.77%、60.79%, 其中 WS 与 OS 呈现出中等强度变异, BS 中 Zn 的含量超出国家土壤环境一级标准值 24.61%, 土壤中也有部分高于标准值。Cr 表现为 BS > OS > WS, 其中 BS 高出 OS 和 WS 为 71.04%、79.91%, 三者呈现出中等强度变异, 对比国家土壤环境质量一级标准值 90mg/kg, BS 中 Cr 含量超出 47.80%, 土壤样本超标率 19.05%。Ni 表现为: WS

> BS > OS, WS 与 BS 的 Ni 含量相差较小,但 WS 与 OS 差异较大。通过非差异性检验,OS 与 WS 中 Ni、Co、Zn 含量呈现出极显著差异($P \approx 0.000$ 、 0.000 、 $0.006 < 0.01$),Cu 表现为显著性差异($P \approx 0.023 < 0.05$),Cr 之间的差异性无统计学意义。

表 1 同里湿地公园土壤及鸟粪沉积物理化性质/(g/kg)

Table 1 Physical and chemical characters in soil and sediments from Tongli

类别 Type	特征 Characteristic	pH	氮 N	碳 C	氢 H	硫 S	全磷 TP	碳氮比 C/N	碳氢比 C/H
无鸟粪土壤 OS	平均含量	4.89	3.17	30.29	9.99	0.36	1.22	9.56	2.99
The soil without droppings ($n=12$)	标准差	0.99	0.67	12.10	2.28	0.13	0.67	2.50	1.07
	变异系数/%	20.24	21.09	39.96	22.86	36.62	54.92	27.40	35.95
有鸟粪土壤 WS	平均含量	4.02	4.38	48.45	12.28	0.73	1.48	11.07	3.87
The soil with droppings ($n=9$)	标准差	0.48	0.93	15.08	2.10	0.20	1.19	1.50	0.76
	变异系数/%	11.94	21.22	31.13	17.14	27.02	80.41	13.87	19.59
鸟粪沉积物 BS	平均含量	4.68	6.24	81.50	15.34	0.70	2.44	13.06	5.22
Bird' droppings ($n=4$)	标准差	0.24	1.48	26.06	3.55	0.21	1.03	1.38	0.62
	变异系数/%	5.13	23.77	31.98	23.12	30.54	42.21	10.75	11.86

2.3 土壤及鸟粪沉积物重金属形态特征

土壤及鸟粪中重金属形态分布具有一定差异(图 3)。其中 Co 在 WS、OS 与 BS 中形态分布为:F5 > F4 > F3 > F2 > F1,其中 BS 与 WS 中活性态含量占全量的百分比分别为 13.30%、11.35%,OS 中活性态占比为 14.87%,略高于 BS 与 WS;Cr 各形态在 OS 中呈现出:F5 > F4 > F3 > F1 > F2,在 BS 与 WS 中为:F5 > F4 > F3 > F2 > F1,活性态占全量的百分比呈现出 OS > WS > BS,分别为 3.13%、2.80%、2.33%;Cu 各形态在 OS 与 WS 中表现为:F5 > F4 > F1 > F2 > F3,在 BS 中则表现为:F5 > F4 > F1 > F3 > F2,活性态占全量的百分比也呈现出 OS > WS > BS,分别为:12.18%、7.85%、7.44%;Zn 各形态在 OS 中呈现出:F5 > F3 > F1 > F4 > F2,在 BS 与 WS 中为:F5 > F3 > F4 > F1 > F2,活性态占全量的百分比呈现出 OS > BS > WS,分别为:28.85%、25.19%、15.83。Ni 各形态在 BS、WS 与 OS 中均呈现出:F5 > F4 > F3 > F1 > F2,其中活性态占比呈现出 WS > BS > OS,三者分别为:6.75%、5.79%、4.23%。

3 讨论

3.1 鸟粪对同里湿地土壤重金属全量的影响

粪便是鸟类排泄体内重金属的一个主要途径^[15]。同里湿地有鸟粪与无鸟粪土壤重金属含量具有明显差异性。有研究报道范阿斯纳尔岛、查尼亚拉尔岛和漳浦菜屿岛,由大量鸟粪累积的营巢地土壤重金属的含量明显高于鸟类活动区域土壤重金属的含量^[15,23],鸟粪对南海东岛土壤重金属增加产生明显影响^[17]。在有鸟粪覆盖的土壤区域,鸟粪堆积过程中,受到降雨的淋溶作用,加之本地的酸性土壤,提升了土壤中重金属淋失水溶性,并沉积到土壤表层,使其重金属浓度高于 OS 区。有研究表明,当外源重金属施入土壤后,重金属的不同形态就重新在土壤固相之间进行分配^[24-25],在模拟酸性与微肥的条件下,Zn、Cu 表现出良好的淋失水溶性^[26]。WS 与 BS 中 Ni 的平均含量差异性无统计学意义($P > 0.05$),但 BS、WS 与 OS 中 Ni 含量均呈现出差异性($P < 0.05$),可见,鸟粪的施入会增加土壤中 Ni 的富集。而 Cr 在 WS 与 OS 间为未表现出显著性差异,主要由于 Cr 形态以 F4、F5 态为主,其重金属活性系数较小,其生物活性与潜在迁移能力较弱^[27]。

同里湿地有鸟粪土壤 Co 含量高于范阿斯纳尔岛营巢地与鸟类活动区土壤 Co 含量,但是低于查尼亚拉尔岛的营巢地土壤 Co 含量;同里湿地有鸟粪土壤中 Cu、Ni 含量均高于两地营巢地土壤 Cu 和 Ni 的含量;而 Cr 和 Zn 的含量低于两地营巢地土壤 Cr 与 Zn 的含量。同里湿地鸟粪沉积物中 Cr、Cu、Ni 的含量均较高,明显高于漳浦菜屿岛鸟粪沉积物中的含量,但是 Zn 含量低于漳浦菜屿岛和南海东岛鸟粪沉积物中的含量(表 2)。

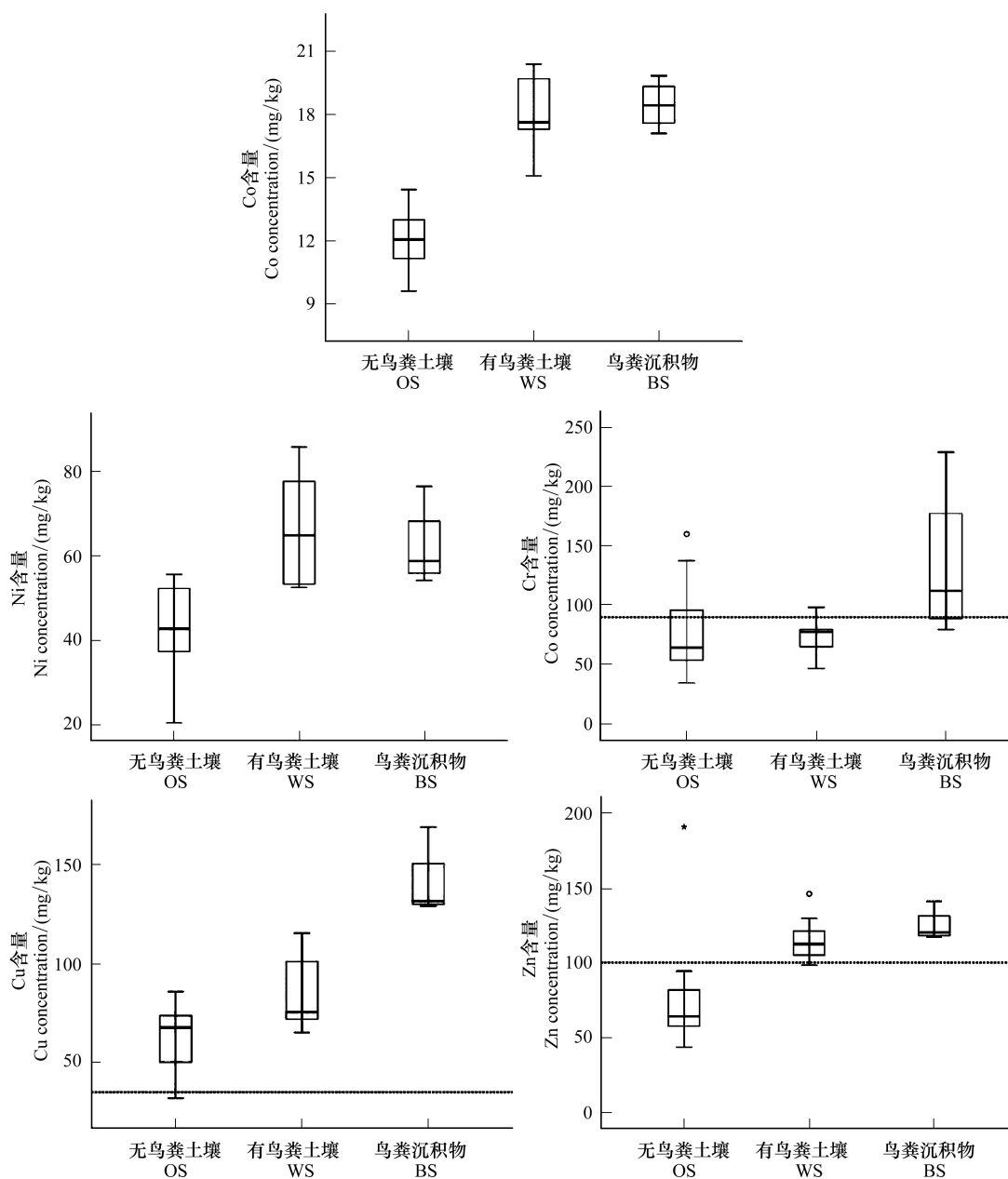


图 2 不同介质重金属含量分布图

Fig.2 Content distribution of heavy metal in different medium

OS, 无鸟粪土壤 The soil without droppings; WS 有鸟粪土壤 The soil with droppings; BS, 鸟粪沉积物 Bird' droppings; 虚线为国家土壤环境质量一级标准值

综上,同里湿地土壤重金属含量较以上各地含量偏高,由于同里湿地处于大陆内部,更容易受到人为工业活动影响,导致重金属含量高于以上海岛或海岸区。

3.2 鸟粪对土壤中重金属形态转化的影响

相对于 OS 中不同重金属形态的分布,WS 中重金属形态分布呈现出 Co、Cr、Cu、Zn 的活性态占全量的百分比均略有下降,非活性态呈上升趋势,说明对于土壤而言,鸟粪的进入会降低土壤部分重金属的活性,但是其土壤中各重金属总量会呈现明显上升趋势。该研究与郑国砥的研究结论一致^[28]。WS 中重金属有效性降低,其主要原因是受环境中腐殖质的作用^[29]。植被凋落的枯枝落叶和鸟粪中的微生物和有机物质加剧了环境中腐殖质的形成与堆积,使其胡敏酸和富里酸比值提升,重金属在有机质中的分布大部分存在于胡敏酸中,

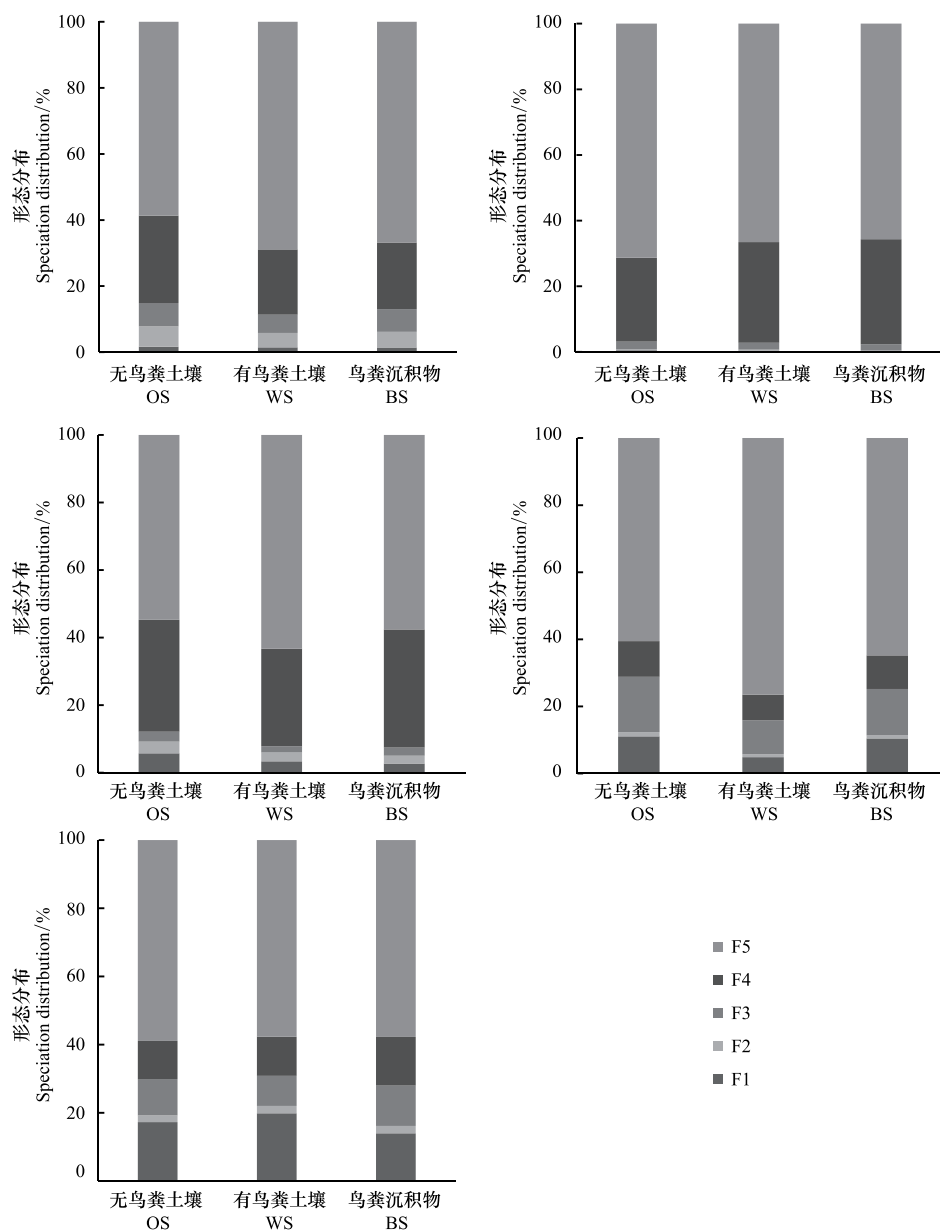


图3 土壤及沉积物重金属形态分布图

Fig.3 Distribution of heavy metals speciation in soils and sediments

F1, 可交换态 Exchangeable forms; F2, 碳酸盐结合态 Carbonate bound forms; F3, 铁锰氧化物结合态 Fe-Mn oxide bound forms; F4, 有机结合态 Organic bound forms; F5, 残渣态 Residual forms

从而提高有机质结合重金属的量。由于胡敏酸分子量较富里酸大,与 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 发生络合反应时,形成的复合物稳定性较大^[28, 30]。Co 在酸性土壤条件下有机层中也易于向下迁移,因为在酸性土壤溶液中,含亲水性基团的小分子腐殖质不易凝聚,与 Co 结合形成可溶性螯合物,易发生淋溶,从而迁移至矿质土层^[28]。

3.3 土壤及沉积物中重金属全量与理化性质相关关系

同里湿地公园土壤及沉积物 Co-Cu 呈现出显著正相关,Co-Zn、Co-Ni 表现为极显著正相关(表 3),说明同里湿地公园土壤中 Co、Cu、Ni 和 Zn 之间具有相同的人为源或自然源。Cu-Cr 之间存在显著相关性,Cu-Zn、Cu-Ni 之间存在极显著相关性,说明 Cu-Cr、Cu-Zn 以及 Cu-Ni 的来源具有一定的相关性。综上,Co、Cu、Zn 和 Ni 可能来源较多元,Cr 来源较为单一。

同里湿地公园土壤中 S-Co、S-Ni、S-Zn 呈显著负相关(表 3)。有研究表明,硫可钝化土壤重金属,降低

其生物有效性。湿地土壤含水量较高,常处于淹水条件下,土壤的氧化还原电位较低,S 常被还原为 S^{2-} , S^{2-} 常与 Co^{2+} 、 Zn^{2+} 形成金属硫化物沉淀,从而降低重金属的活性。土壤中存在较多的含 S 有机化合物,有机化合物中含硫官能团可与重金属形成共价化合物,对重金属的活化和固定起重要作用^[31]。TP 与 Cu、TP 与 Zn 呈现显著正相关,有研究表明磷酸盐进入土壤后能降低土壤 pH,从而促进 Cu、Zn 迁移效率,高浓度的磷进入土壤后,能够促进土壤中残渣态以及部分有机结合态的 Cu、Zn 向交换态转化^[32]。由于鸟粪中较高浓度的 TP 进入土壤后,能够活化 Cu、Zn 的迁移效率,将鸟粪中的高浓度 Cu、Zn 经过淋溶至土壤表层,导致 WS 中 Cu、Zn 的含量显著高于 OS 的含量。

表 2 不同地区鸟粪与土壤重金属含量分布/(mg/kg)
Table 2 Distribution of heavy metal content from bird droppings and soil in different regions

地区 Region	类别 Type	钴 Co	铬 Cr	铜 Cu	镍 Ni	锌 Zn	参考文献 References
范阿斯纳尔岛	营巢地土壤	10.57±2.79	165.6±22.96	35.34±9.99	43.74±11.54	152.76±33.88	[15]
Pan de Azúcar Island	鸟类活动区土壤	5.87±3.43	54.80±57.85	21.56±5.70	31.86±16.02	76.20±21.19	
查尼亚拉尔岛	营巢地土壤	47.32±4.81	116.00±7.42	54.74±23.03	55.88±5.40	117.52±20.56	[15]
Chañaral Island	鸟类活动区土壤	33.20±8.97	104.64±26.97	55.20±9.62	44.08±15.07	98.08±11.94	
南海东岛	海鸟粪沉积物	—	—	39.8	—	489	[17]
Dongdao Island	鸟粪表土	—	—	16.125	—	154.36	
漳浦菜屿岛	营巢地土壤	—	39.273±37.642	1.874±0.930	20.591±45.894	39.248±2.240	[23]
Caiyu Island	非营巢地土壤	—	32.334±37.333	0.647±0.576	3.498±3.712	29.888±7.392	
	鸟粪沉积物	—	20.000±37.223	7.038±2.569	6.968±5.245	424.292±268.727	
同里湿地	有鸟粪土壤	18.168±1.819	73.934±14.702	85.238±17.993	65.625±12.939	115.623±14.913	本研究
Tongli wetland	无鸟粪土壤	11.992±1.343	77.770±38.171	62.450±18.198	42.460±10.280	77.500±10.280	
	鸟粪沉积物	18.456±1.160	133.018±66.578	140.477±19.230	124.609±11.057	124.609±9.900	

表 3 土壤及鸟粪重金属全量与理化性质相关关系($n=25$)
Table 3 Correlation between total heavy metal content and physical and chemical properties from soils and bird droppings

元素 Element	钴 Co	铬 Cr	铜 Cu	锌 Zn	镍 Ni	硫 S	pH	全磷 TP
钴 Co	1	—	—	—	—	—	—	—
铬 Cr	0.227	1	—	—	—	—	—	—
铜 Cu	0.585 **	0.490 *	1	—	—	—	—	—
锌 Zn	0.654 **	0.163	0.516 **	1	—	—	—	—
镍 Ni	0.596 **	0.377	0.544 **	0.337	1	—	—	—
硫 S	-0.398 *	0.129	-0.014	-0.397 *	-0.441 *	1	—	—
pH	0.260	0.025	0.093	0.150	0.563 **	-0.498 *	1	—
全磷 TP	0.195	0.174	0.496 *	0.427 *	0.106	0.316	0.331	1

* * 在 $P = 0.01$ 水平上显著相关, * 在 $P = 0.05$ 水平上显著相关

土壤与鸟粪中 N、C、H、S 和 TP 含量与其重金属部分形态呈现出一定相关性(表 4)。Zn 的 F1 与 N、C、H、S 和 TP 均呈现正相关关系;F3 态与 TP 呈现正相关关系;F4 与 N、C 和 H 呈现正相关关系;其 F5 态与 S 呈现负相关关系。对于 Cu,F2 和 F3 态与 TP 呈现出显著正相关关系,F3、F4 和 F5 与 N、C、H 均呈现正相关关系。而 Cr 的 F4 态与 N、C 和 H 呈现正相关关系。说明,土壤养分元素的升高,有利于提高 Zn 的可交换态、有机结合态与残渣态的富集,而 S 含量的升高,则降低了 Zn 残渣态的浓度,可交换态浓度却呈现升高趋势,但是,相比无鸟粪土壤,含有较高浓度 S 的鸟粪进入土壤后,残渣态的 Zn 有利于向非活性态的有机结合态转化,对活性态影响较小。TP 含量的升高,有利于 Cu 和 Zn 活性态含量的升高,同时也会促进 Zn 有机结合态含量的升高。土壤及鸟粪中的养分含量升高有助于 Cu、Cr 的非活性态含量的增加,对于活性态影响则无统计学意义。

表 4 土壤及鸟粪重金属形态与理化性质相关关系 ($n=25$)

Table 4 Correlation between heavy metal concentration of chemical speciation and physical and chemical properties from soils and bird droppings

元素 Element	形态 Speciation	氮 N	碳 C	氢 H	硫 S	全磷 TP
锌 Zn	F1	0.535 **	0.541 **	0.401 *	0.582 **	0.453 *
	F3	—	—	—	—	0.640 **
	F4	0.562 **	0.580 **	0.517 **	—	0.637 **
	F5	—	—	—	-0.453 *	—
铜 Cu	F2	—	—	—	—	0.475 *
	F3	0.509 **	0.522 **	0.402 *	—	0.453 *
	F4	0.646 **	0.672 **	0.633 **	—	—
	F5	0.465 *	0.424 *	0.421 *	—	—
铬 Cr	F4	0.589 **	0.620 **	0.570 **	—	—

** 在 $P=0.01$ 水平上显著相关, * 在 $P=0.05$ 水平上显著相关。— 表示两者相关性无统计学意义

4 结论

(1) 同里湿地公园受鸟粪进入的影响,有鸟粪土壤中 N、C、H 和 S 平均含量显著高于无鸟粪土壤,并且鸟粪的加入增加了土壤中 Co、Zn、Cu、Ni 的总量。说明鸟类对生态环境中重金属富集有一定的作用。为减少湿地土壤重金属的风险,最好应及时清理土壤上覆鸟粪,降低对当地重金属污染风险。

(2) 相对于 OS 中活性态比重的分布,WS 中 Co、Cr、Cu、Zn 的活性态占全量的百分比均略有下降,非活性态呈上升趋势,说明鸟粪的进入会降低土壤部分重金属的活性,但是活性态与非活性态浓度均呈现升高趋势。鸟粪含有大量的营养物质,经常作为优质肥料进行施肥。但本研究发现鸟粪的加入,虽然会在一定程度上降低活性态重金属占总量的比例,但因总量和活性态的含量均上升,向植物系统的迁移量可能呈现增加趋势,因此对鸟粪施肥再利用应慎重,可能会导致重金属污染加剧。

参考文献 (References):

- [1] Wu G, Kang H B, Zhang X Y, Shao H B, Chu L Y, Ruan C J. 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*, 2010, 174(1/3): 1-8.
- [2] 汤洁, 陈初雨, 李海毅, 张天琴, 肖瑞. 大庆市建成区土壤重金属潜在生态危害和健康风险评价. *地理科学*, 2011, 31(1): 117-122.
- [3] 徐明露, 方凤满, 林跃胜. 湿地土壤重金属污染特征、来源及风险评价研究进展. *土壤通报*, 2015, 46(3): 762-768.
- [4] Ramos-Miras J J, Roca-Perez L, Guzmán-Palomino M, Boluda R, Gil C. Background levels and baseline values of available heavy metals in Mediterranean greenhouse soils (Spain). *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, 110(2): 186-192.
- [5] Idaszkin Y L, Carol E, del Pilar A M. Mechanism of removal and retention of heavy metals from the acid mine drainage to coastal wetland in the Patagonian marsh. *Chemosphere*, 2017, 183: 361-370.
- [6] Liang J, Yang Z X, Tang L, Zeng G M, Yu M, Li X D, Wu H P, Qian Y Y, Li X M, Luo Y. Changes in heavy metal mobility and availability from contaminated wetland soil remediated with combined biochar-compost. *Chemosphere*, 2017, 181: 281-288.
- [7] Bonanno G, Borg J A, Di Martino V. Levels of heavy metals in wetland and marine vascular plants and their biomonitoring potential: a comparative assessment. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 796-806.
- [8] Liu J Y, Liang J, Yuan X Z, Zeng G M, Yuan Y J, Wu H P, Huang X L, Liu J F, Hua S S, Li F, Li X D. An integrated model for assessing heavy metal exposure risk to migratory birds in wetland ecosystem: a case study in Dongting Lake Wetland, China. *Chemosphere*, 2015, 135: 14-19.
- [9] Liu X D, Zhao S P, Sun L G, Yin X B, Xie Z Q, Luo H H, Wang Y H. P and trace metal contents in biomaterials, soils, sediments and plants in colony of red-footed booby (*Sula sula*) in the Dongdao Island of South China Sea. *Chemosphere*, 2006, 65(4): 707-715.
- [10] Wamken J, Ohlsson R, Welsh D T, Teasdale P R, Chelsky A, Bennett W W. Antimony and arsenic exhibit contrasting spatial distributions in the sediment and vegetation of a contaminated wetland. *Chemosphere*, 2017, 180: 388-395.
- [11] Zarrintab M, Mirzaei R, Mostafaei G, Dehghani R, Akbari H. Concentrations of metals in feathers of magpie (*Pica pica*) from Aran-O-Bidgol city

- in Central Iran. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2016, 96(4): 465-471.
- [12] Mansouri B, Babaei H, Hoshiyari E. Heavy metal contamination in feathers of Western Reef Heron (*Egretta gularis*) and Siberian gull (*Larus heuglini*) from Hara biosphere reserve of Southern Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184(10): 6139-6145.
- [13] Mirsanjari M M, Sheybanifar F, Arjmand F. The study of forest hara biosphere reserve in coast of Persian gulf and the importance of heavy metal accumulation; case study: feathers of great cormorant. *Nusantara Bioscience*, 2014, 6(2): 159-164.
- [14] Zamani-Ahmadmashmoodi R, Esmaili-Sari A, Ghasempouri S M, Savabieasfahani M. Mercury in wetland birds of Iran and Iraq: contrasting resident Moorhen, *Gallinula chloropus*, and migratory common Teal, *Anas crecca*, life strategies. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, 82(4): 450-453.
- [15] Espejo W, Celis J E, González-Acuña D, Jara S, Barra R. Concentration of trace metals in excrements of two species of penguins from different locations of the Antarctic Peninsula. *Polar Biology*, 2014, 37(5): 675-683.
- [16] 吴逸群, 刘建文, 许秀, 刘方庆. 东方亚种大鸕越冬种群粪便中的重金属元素分析. *湖北农业科学*, 2014, 53(8): 1909-1911.
- [17] 晏宏, 张文超, 刘成程, 李明, 赵三平, 孙立广. 重金属元素 Hg、Cd、Cu、Zn 和 Se 在南海东岛上的时空分布特征. *地球环境学报*, 2015, 6(5): 330-340.
- [18] 姚岚. 肖甸湖国家森林公园水生植物配置调查分析. *现代园艺*, 2015, (10): 15-16.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 166-169.
- [20] Lin Y S, Fang F M, Wang F, Xu M L. Pollution distribution and health risk assessment of heavy metals in indoor dust in Anhui rural, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(9): 565.
- [21] 武文飞, 南忠仁, 王胜利, 周婷, 廖琴, 李程程. 绿洲土 Cd、Pb、Zn、Ni 复合污染下重金属的形态特征和生物有效性. *生态学报*, 2013, 33(2): 619-630.
- [22] 江培龙, 方凤满, 张杰琼, 邓正伟, 林跃胜. 淮南煤矿复垦区土壤重金属形态分布及污染评价. *水土保持学报*, 2013, 27(5): 178-182, 187-187.
- [23] Fang W Z, Chen X L, Lin Q X, Zhou X P. Effect of colonial breeding of Chinese Egret (*Egretta eulophotes*) on the heavy metal accumulation in heronry soil. *Chinese Birds*, 2010, 1(2): 124-131.
- [24] 原梦云, 商和平, 李洋, 张涛, 韩丽媛, 苏德纯. 畜禽粪便有机肥中 Cu、Zn 在水稻土中的有效性动态变化和形态归趋. *环境科学学报*, 2016, 36(7): 2613-2623.
- [25] Kashem M A, Singh B R. Transformations in solid phase species of metals as affected by flooding and organic matter. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2004, 35(9/10): 1435-1456.
- [26] 陈喆, 铁柏清, 段真玥, 杨洋, 刘孝利, 邓刚. 降雨和微肥在油菜环境下对重金属淋失的影响. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 141-145, 151-151.
- [27] 李小平, 徐长林, 刘献宇, 刘洁, 张旭. 宝鸡城市土壤重金属生物活性与环境风险. *环境科学学报*, 2015, 35(4): 1241-1249.
- [28] 郑国砥, 陈同斌, 高定, 罗维, 李艳霞. 好氧高温堆肥处理对猪粪中重金属形态的影响. *中国环境科学*, 2005, 25(1): 6-9.
- [29] Planquart P, Bonin G, Prone A, Massiani C. Distribution, movement and plant availability of trace metals in soils amended with sewage sludge composts: application to low metal loadings. *Science of the Total Environment*, 1999, 241(1/3): 161-179.
- [30] Qiao L, Ho G. The effect of clay amendment on speciation of heavy metals in sewage sludge. *Water Science and Technology*, 1996, 34(7/8): 413-420.
- [31] 孙丽娟, 段德超, 彭程, 何俊昱, 施积炎. 硫对土壤重金属形态转化及植物有效性的影响研究进展. *应用生态学报*, 2014, 25(7): 2141-2148.
- [32] 郭亮, 李忠武, 黄斌, 王艳, 张艳. 不同施磷量 (KH_2PO_4) 作用对 Cu、Zn 在红壤中的迁移转化. *环境科学*, 2014, 35(9): 3546-3552.