

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2019092006

李伟, 布多, 孙晶, 等. 拉萨巴嘎雪湿地土壤重金属分布及生态风险评价[J]. 环境化学, 2021, 40(1): 195-203.

LI Wei, BU Duo, SUN Jing, et al. Distribution and ecological risk assessment of heavy metal elements in the surface sediments of Bagaxue wetlands in Lhasa[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(1): 195-203.

拉萨巴嘎雪湿地土壤重金属分布及生态风险评价*

李伟 布多 孙晶 单再毅 吕学斌 熊健**

(西藏大学理学院, 拉萨, 850000)

摘要 巴嘎雪湿地是西藏拉萨河流域的代表性湿地之一. 文章为了解巴嘎雪湿地的重金属分布特征, 在2018年10月采集了巴嘎雪湿地的表层土壤样品, 对土壤中的Cu、Zn、Cr、Ni、Pb、Cd、As、Hg重金属的含量进行了检测. 巴嘎雪湿地表层土壤的重金属污染评价采用的方法主要包括内梅罗综合污染指数法、地积累指数法和潜在生态风险指数法. 结果表明, 重金属Cu、Zn、Cr、Ni、As、Hg含量的平均值低于国家土壤环境质量标准(一级), 但Pb、Cd的含量略偏高; Ni、As、Cr、Hg的平均含量低于拉萨市环境背景值, 但Cu、Zn、Pb、Cd平均含量高于环境背景值. 该研究区域的内梅罗综合污染指数平均值 $P_N = 1.50$, 说明湿地整体处于轻度污染; 按照国家土壤环境质量标准(二级)作为背景值, 得到的 $P_N = 0.64$, 属于安全水平. 地积累指数平均值在 -2.587 到 -0.744 范围内, $I_{geo} < 0$ 区域整体上无污染; 潜在生态风险指数的平均值 $RI = 72.779$, 属于低风险. 各元素组合之间总体相关性不足, 说明重金属累积方式具有多源性特点. 巴嘎雪湿地整体生态环境优于国内大部分湿地, 其表层土壤中Hg、Pb、Cd元素为强度变异, 在部分位点中存在明显富集, 受到人类活动影响, 应加强关注.

关键词 巴嘎雪湿地, 重金属, 生态风险评价, 拉萨河流域.

Distribution and ecological risk assessment of heavy metal elements in the surface sediments of Bagaxue wetlands in Lhasa

LI Wei BU Duo SUN Jing SHAN Zaiyi LV Xuebin XIONG Jian**

(College of Science, Tibet University, Lhasa, 850000, China)

Abstract: Bagaxue wetland is one of the representative wetlands in the Lhasa River Basin of Tibet. Surface soil samples of the Bagaxue wetland were gathered in October 2018, and then detected the contents of heavy metals such as Cu, Zn, Cr, Ni, Pb, Cd, As and Hg in soil so as to understand the distribution characteristics of heavy metals in the Bagaxue wetland. The mainly methods used for heavy metal pollution assessment include Nemerow comprehensive pollution index method, Geo-accumulation index method and Potential ecological risk index method. The results indicated that the average contents of Cu, Zn, Cr, Ni, As and Hg were lower than the first grade of the environmental quality standard for soils (GB 15618—1995), while the contents of Pb and Cd were higher.

2019年9月20日收稿(Received: September 20, 2019).

* 中央支持地方高校改革发展专项资金(藏财教指[2018]54号), 环境化学与生态毒理学国家重点实验室开放基金(KF2017-07), 西藏大学培育基金(ZDCZJH18-08), 西藏大学大学生创新项目(2018XCX009)和西藏经济社会发展与高原科学研究共建创新基金专项项目(lzj2020002, lzt2020002)资助.

Supported by the Tibet University 2018 Central Financial Support Special Funds for Local Colleges and Universities ([2018] 54), Project of the Open Fund of the State Key Laboratory of Environmental Chemistry and Ecotoxicology (KF2017-07), Tibet University Cultivation Fund (ZDCZJH18-08), Tibet University Student Innovation Project (2018XCX009) and Tibetan Economic and Social Development and Plateau Scientific Research Co-Construction Innovation Fund" Special Project (lzj2020002, lzt2020002).

* ** 通讯联系人 Corresponding author, Tel: 0891-6405210, E-mail: 568284825@qq.com

Meanwhile, it was concluded that the average contents of Ni, As, Cr, Hg were lower than the environmental background value of Lhasa, whereas the average contents of Cu, Zn, Pb, Cd were higher. The mean value of the Nemerow comprehensive pollution index P_N in study area was 1.50, which manifested that the wetland as a whole was in light pollution. According to the second grade of environmental quality standard for soil (GB 15618—1995) as the background value, the calculated P_N was 0.64, which belonged to the safety level. The average value of Geo-accumulation index was within the range of -2.587 to -0.744 , and $I_{geo} < 0$ indicated that the region as a whole was pollution-free. The average RI of the potential ecological risk index was 72.779, which belonged to low risk. The overall correlation among elements combinations was insufficient, which indicated that the heavy metal accumulation mode was multi-source. In short, the overall ecological environment of Bagaxue wetland was better than that of most wetlands in China. Hg, Pb and Cd elements in the surface soil had strength variation and obvious enrichment in some sites, which were affected by human activities and should be paid more attention to.

Keywords: Bagaxue wetland, heavy metals, ecological risk assessment, Lhasa River basin.

湿地是介于水生和陆地生态系统之间的一种多功能生态系统,为区域内的环境净化、气候调节、防洪防旱、丰富和维持生物种类等方面提供着重要的服务功能^[1].随着人类活动范围的不断扩大,人类活动对湿地生态环境造成了较大的影响,重金属污染是常见问题之一,因湿地地势较低,容易成为重金属富集地,会严重危害湿地及周围的环境和人类健康^[2],因此,湿地重金属污染研究受到科研者广泛关注.

西藏高原由于特殊的地理环境,孕育了很多天然湿地,总面积多达 600 多万 hm^2 ,占全国湿地的面积的 9.5%^[3],西藏高原湿地地处高海拔、缺氧的条件下,其生态系统环境更为敏感,且自我恢复能力较弱^[4].由于近年来,全球环境的变化以及西藏农牧业、旅游业过度的开发等活动因素,给湿地及周围环境带来了一定的影响^[5].

巴嘎雪湿地地处拉萨城区和达孜区之间的城乡结合区域,是拉萨河流域代表性的湿地之一,属雅鲁藏布中游河谷黑颈鹤国家级湿地自然保护区的组成部分,该湿地在维护生态安全方面具有重要地位,目前的研究主要集中在动植物种群多样性和水环境特征分析^[6-10],关于土壤重金属分布和评价研究尚鲜有报道.本文对该湿地土壤中 Cu、Zn、Cr、Ni、Pb、Cd、As、Hg 的分布特征和生态风险进行了研究,为保护巴嘎雪湿地良好的生态环境提供理论依据.

1 材料和方法 (Materials and methods)

1.1 研究区域概况

巴嘎雪湿地是拉萨河流域的主要的天然高原湿地之一,地处拉萨市达孜县塔杰乡巴嘎雪村(北纬 $29^{\circ}41'58.42''\text{N}$ — $29^{\circ}42'58.42''\text{N}$,东经 $91^{\circ}25'34.55''\text{E}$ — $91^{\circ}25'58.20''\text{E}$),面积约为 0.16 km^2 ,湿地水资源和植被非常丰富,对该区域的饮水、农牧业和生态环境调节有着重要意义,同时因其独特的自然条件优势吸引了大批黑颈鹤等国家一级重点保护动物到此过冬^[8-10].

1.2 土样采集及测试方法

2018年10月2日,天气晴朗,通过在巴嘎雪湿地的实地勘查,样品采集依据国家土壤环境监测技术规范,根据人类活动的影响,综合考虑典型性和代表性,设置了9个采样点(图1),湿地属于高原沼泽地,分为上下两个核心区,下水前往湿地中间时发现有多处淤泥和植物残体,情况复杂,深处可超过2 m,考虑安全原因,所以中间区域的点位较少,其中D4、D5点为入水口,水流经过D3点从上往下流动,在D8汇入拉萨河.用木质铲按照“S”点法取表层土样(0—20 cm)1 kg左右于聚乙烯样品密封袋,同时现场记录样品相关的基本信息,样品经自然风干、去杂质、研磨,过筛后等预处理程序后送入实验室进行含量测定.Cu、Zn按照GB/T17138—1997、Cr按照HJ491—2009、Ni按照GB/T17139—1997的标准,分别用火焰原子吸收分光光度计(280DUO)测试;Pb和Cd按照GB/T17141—1997标准,用石墨炉原子吸收分光

光度计(GTA120)测试;Hg和As按照GB/T 22105.1—2008,用原子荧光光度计(AFS—8220)测试,其中Cu、Zn、Cr、Ni、Pb、Cd、As和Hg的检出限分别为1、0.5、5、5、0.01、0.01、0.01、0.002 mg·kg⁻¹,相对偏差均低于10%.

1.3 评价方法

1.3.1 土壤污染状况评价

湿地质量状况采用内梅罗综合污染指数法进行分析^[2,11-12].

单因子指数法:

$$P_i = s_i / S_{si} \quad (1)$$

式中, P_i 为单项污染物的污染指数; s_i 为土壤某项污染物的实测质量浓度, S_{si} 为土壤单项污染物的选定背景值.

综合污染指数法:

$$P_N = [(P_{imax}^2 + P_{iavg}^2) / 2]^{1/2} \quad (2)$$

式中, P_N 为内梅罗综合污染指数, P_{imax} 为土壤中污染指数最大值, P_{iavg} 为土壤中污染指数平均值.两者都分为5个等级,标准为: $P_i \leq 1$ 时无污染, $1 < P_i \leq 2$ 时轻微污染, $2 < P_i \leq 3$ 时轻度污染, $3 < P_i \leq 5$ 时中度污染, $P_i > 5$ 时重度污染;对于内梅罗综合污染指数,当 $P_N \leq 0.7$ 时清洁(安全), $0.7 < P_N \leq 1.0$ 时尚清洁(警戒限), $1.0 < P_N \leq 2.0$ 时轻度污染, $2.0 < P_N \leq 3.0$ 时中度污染, $P_N > 3.0$ 时重污染^[11-12].

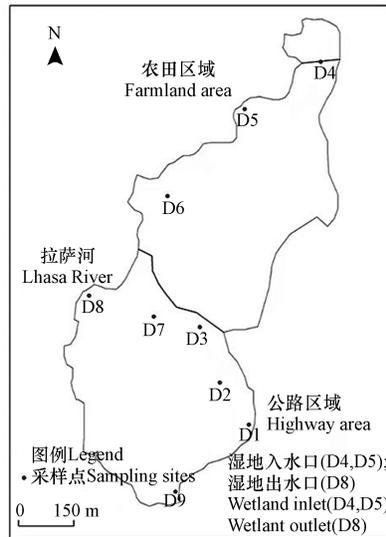


图1 巴嘎雪湿地采样点分布图

Fig.1 Sampling point distribution in the Bagaxue Wetland

1.3.2 生态风险水平评价

土壤重金属生态风险水平评价目前国内外并没有统一标准,评价方法各有优缺点,本文用地累积指数法和潜在生态风险评价双标准综合评价,从而能更全面地分析巴嘎雪湿地重金属的生态风险^[13],地累积指数法综合考虑到人为因素和自然因素影响,如式(3).

$$I_{geo} = \log_2(C_i / k B_i) \quad (3)$$

式中, C_i 为污染物的实测浓度, B_i 为土壤环境对照值, $k = 1.5$ 为岩石运动引起的背景值变化而取的系数;可以分7个等级,当 $I_{geo} \leq 0$ 是清洁, $0 < I_{geo} \leq 1$ 时轻微污染、 $1 < I_{geo} \leq 2$ 时偏中度污染、 $2 < I_{geo} \leq 3$ 时中度污染、 $3 < I_{geo} \leq 4$ 时偏重度污染、 $4 < I_{geo} \leq 5$ 时重度污染、 $I_{geo} > 5$ 时极重度污染^[13-14].

潜在生态风险评价能从多因素、多角度说明重金属对生态环境的综合潜在影响,如式(4)一(6).

$$RI = \sum E_r^i \quad (4)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_r^i \quad (5)$$

$$C_r^i = C_{\text{实测}}^i / C_n^i \quad (6)$$

其中,RI表示潜在生态危害指数, E_r^i 为单项重金属的潜在生态危害系数, T_r^i 指重金属毒性响应系数,Cd、Hg、As、Cu、Pb、Ni、Cr、Zn分别为30、40、10、5、5、5、2、1, C_r^i 为重金属的污染系数, $C_{实测}^i$ 为重金属污染物的实测值, C_n^i 为重金属环境背景值, E_r^i 分为5个等级,当 $E_r^i < 40$ 时表示低风险, $40 \leq E_r^i < 80$ 时表示中等风险, $80 \leq E_r^i < 160$ 时表示重度风险, $160 \leq E_r^i < 320$ 时表示较重度风险, $320 \leq E_r^i$ 时严重度风险;RI分为4个等级,当 $RI < 150$ 表示低生态危害; $150 \leq RI < 300$ 表示中等生态危害; $300 \leq RI < 600$ 表示重生态危害; $600 \leq RI$ 表示严重生态危害^[13,15].

2 结果与讨论(Results and discussing)

2.1 巴嘎雪湿地土壤重金属含量特征

巴嘎雪湿地各样点重金属Cu、Zn、Cr、Ni、Pb、Cd、As、Hg平均含量分别为31.22、80.40、35.70、12.80、50.69、0.23、7.25、0.070 mg·kg⁻¹,详情见表1.与《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)^[16]中的一级标准相比较,只有Pb、Cd平均含量超标,分别是标准值的1.4、1.2倍,但存在个别元素超标现象,其中Cu、Pb、Cd超标率为22.22%,Zn超标率为11.11%.与拉萨市环境背景值比较^[17],重金属Cu、Zn、Pb、Cd的平均值分别约为背景值的1.4倍、1.2倍、1.6倍、1.9倍;所有样点Ni和As含量均低于环境背景值,Cu、Zn、Cr、Pb、Cd、Hg的超标率分别为55.56%、55.56%、11.11%、22.22%、66.67%、11.11%.变异系数能反映人类活动与土壤中重金属污染关系,变异系数越大说明人类活动的参与度越高^[18],顺序为Hg>Pb>Cd>Cu>ZnAs>Ni>Cr,其中Hg、Cd、Pb变异系数值接近或者大于1,属于强度变异,受人类活动影响明显;Cr、Ni变异系数均低于0.3,分布均匀,受人类活动影响较小.

研究区域内重金属Cd污染问题最为突出可能与湿地内整体的农业生产活动有关,孙曦等^[19]和旦增等^[20]在研究西藏农田重金属也发现类似的现象,D1样点紧邻拉林公路,高海拔地区繁忙的交通因素会导致Cu、Zn、Pb、Cd^[21]的富集,该样点的Zn、Pb、Cd含量高于拉萨背景值.D4点有地表水汇入,正上方有水闸,附近有零散生活废弃物堆放,Cu、Cd的超量可能与之有关.D5样点Hg含量约为拉萨背景值的4.4倍,位于进水口的末端,周围有部分农田,采样时发现牛羊会在该区域内饮水活动,该区域曾经养过鸭子,已经取缔^[9],而研究发现磷肥使用,家禽类饲料和排泄物等因素会直接或间接影响Hg含量在土壤环境中积累^[22-24],具体原因有待进一步论证,其它样点的Hg含量明显低于背景值,猜测巴嘎雪湿地对Hg有一定的净化作用.D9样点处于西南角,南边处于公路一侧,西边地势平坦是民居区,以前常常有大量的机动车辆停靠,随着相关部门的重视,在该区域内停车现象基本消失,同时该样点处于拐角水流动性差,环境净化能力相对弱,人为活动频繁,Cu、Zn、Pb、Cd含量明显高于拉萨背景值,与其含量统计分析结果基本吻合.

表1 巴嘎雪湿地土壤重金属含量(mg·kg⁻¹)

Table 1 The contents of heavy metals in soils from Bagaxue Wetland(mg·kg⁻¹)

项目 Item	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	均值 Mean	变异 系数 Cv	国家土壤环境 质量标准 (一级) ^[16] National standard (level 1)	拉萨市背 景值 ^[17] Background value of Lhasa
Cu	19.00	13.00	36.00	79.00	23.00	20.00	8.00	31.00	52.00	31.22	0.71	35.00	22.00
Zn	97.20	52.10	73.80	53.10	59.80	86.20	44.70	70.80	186.00	80.40	0.54	100.00	65.00
Cr	25.00	33.00	38.00	31.00	32.00	40.00	40.00	49.00	33.00	35.70	0.19	90.00	42.00
Ni	9.00	12.00	12.00	10.00	13.00	18.00	11.00	17.00	13.00	12.80	0.23	40.00	21.00
Pb	105.00	18.60	25.90	16.60	21.50	21.30	18.70	19.60	209.00	50.69	1.30	35.00	31.00
Cd	0.38	0.10	0.21	0.13	0.14	0.15	0.06	0.14	0.80	0.23	0.98	0.20	0.12
As	11.20	4.22	5.32	9.86	14.30	8.01	2.48	3.53	6.29	7.25	0.54	15.00	20.00
Hg	0.023	0.023	0.030	0.025	0.409	0.048	0.015	0.032	0.039	0.070	1.77	0.15	0.092

2.2 土壤重金属环境质量评价

分别采用拉萨市环境背景值、国家土壤环境质量标准(一级)和国家土壤环境质量标准(二级)标准值对巴嘎雪湿地土壤中重金属进行评价见表 2。

以拉萨市背景值作为标准可知,72 项单因素污染指数中, $P_i \leq 1$ 无污染占 70.8%, $1 < P_i \leq 2$ 轻微污染占 18%, $2 < P_i \leq 3$ 轻度污染占 2.8%, $3 < P_i \leq 5$ 中度污染占 5.6%, $P_i > 5$ 时重度污染占 2.8%;内梅罗综合污染指数法评价中,平均值 $P_N = 2.08$ 为偏轻度污染,其中 $0.7 < P_N \leq 1.0$ 尚清洁有 2 个,占 22.22%; $1.0 < P_N \leq 2.0$ 轻度污染有 3 个,占 33.33%; $2.0 < P_N \leq 3.0$ 中度污染有 2 个,占 22.22%; $P_N > 3.0$ 重污染有 2 个占 22.22%。

以国家土壤环境质量标准(一级)计算,可知 72 项单因素污染指数中, $P_i \leq 1$ 无污染占 86.1%, $1 < P_i \leq 2$ 轻微污染占 6.9%, $2 < P_i \leq 3$ 轻度污染占 4.2%, $3 < P_i \leq 5$ 中度污染占 2.8%;内梅罗综合污染指数法评价中平均值 $P_N = 1.50$ 为轻度污染,其中 $P_N \leq 0.7$ 清洁(安全)有 1 个占 22.22%; $0.7 < P_N \leq 1.0$ 尚清洁有 3 个,占 33.33%; $1.0 < P_N \leq 2.0$ 轻度污染有 1 个,占 11.11%; $2.0 < P_N \leq 3.0$ 中度污染有 2 个,占 22.22%; $P_N > 3.0$ 重污染有 1 个,占 11.11%。

以国家土壤环境质量标准(二级)计算,可知 72 项单因素污染指数中, $P_i \leq 1$ 无污染占 97.22%, $1 < P_i \leq 2$ 轻微污染和 $2 < P_i \leq 3$ 轻度污染各占 1.39%。内梅罗综合污染指数法评价中平均值 $P_N = 0.64$ 为清洁水平,其中 $P_N \leq 0.7$ 清洁(安全)有 7 个,占 77.77%; $0.7 < P_N \leq 1.0$ 尚清洁有 1 个,占 11.11%; $1.0 < P_N \leq 2.0$ 轻度污染有 1 个,占 11.11%。

表 2 土壤重金属单因子污染指数和综合污染指数评价

Table 2 Single factor index(P_i) and Synthetic pollution index(P_N) of heavy metals of soil

项目 Item		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
拉萨市背景值 Background value of Lhasa	Cu	0.86	0.59	1.64	3.59	1.05	0.91	0.36	1.41	2.36
	Zn	1.50	0.80	1.14	0.82	0.92	1.33	0.69	1.09	2.86
	Cr	0.60	0.79	0.90	0.74	0.76	0.95	0.95	1.17	0.79
	Ni	0.43	0.57	0.57	0.48	0.62	0.86	0.52	0.81	0.62
	Pb	3.39	0.60	0.84	0.54	0.69	0.69	0.60	0.63	6.74
	Cd	3.17	0.83	1.75	1.08	1.17	1.25	0.50	1.17	6.67
	As	0.56	0.21	0.27	0.49	0.72	0.40	0.12	0.18	0.31
	Hg	0.25	0.25	0.33	0.27	4.45	0.52	0.16	0.35	0.42
	P_N	2.58	0.72	1.40	2.64	3.28	1.12	0.76	1.16	5.09
	国家土壤环境 质量标准(一级) National standard(level 1)	Cu	0.31	0.37	1.03	2.26	0.66	0.57	0.23	0.89
Zn		0.97	0.52	0.74	0.53	0.60	0.86	0.45	0.71	1.86
Cr		0.28	0.37	0.42	0.34	0.36	0.44	0.44	0.54	0.37
Ni		0.23	0.30	0.30	0.25	0.32	0.45	0.28	0.42	0.32
Pb		3.00	0.53	0.74	0.47	0.61	0.61	0.53	0.56	5.97
Cd		1.90	0.50	1.05	0.65	0.70	0.75	0.30	0.70	4.00
As		0.75	0.28	0.36	0.66	0.95	0.53	0.16	0.24	0.42
Hg		0.15	0.15	0.20	0.17	2.73	0.32	0.10	0.21	0.26
P_N		2.22	0.46	0.86	1.66	2.02	0.73	0.44	0.73	4.42
国家土壤环境 质量标准(二级) National standard(level 2)		Cu	0.11	0.13	0.36	0.79	0.23	0.20	0.08	0.31
	Zn	0.39	0.21	0.29	0.21	0.24	0.34	0.18	0.28	0.74
	Cr	0.08	0.11	0.13	0.10	0.11	0.13	0.13	0.16	0.11
	Ni	0.18	0.24	0.24	0.20	0.26	0.36	0.22	0.34	0.26
	Pb	0.35	0.06	0.09	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06	0.70
	Cd	1.27	0.33	0.70	0.43	0.47	0.50	0.20	0.47	2.67
	As	0.45	0.17	0.21	0.39	0.57	0.32	0.10	0.14	0.25
	Hg	0.05	0.05	0.06	0.05	0.82	0.10	0.03	0.06	0.08
	P_N	0.93	0.26	0.53	0.59	0.63	0.37	0.18	0.37	1.94

2.3 生态风险水平评价

2.3.1 地累积指数法

分别采用拉萨市环境背景值、国家土壤环境质量标准(一级)对巴嘎雪湿地土壤中重金属进行地累积指数法分析,结果见表3.

表3 地累积指数法评价巴嘎雪湿地重金属(I_{geo})
Table 3 Geo-accumulation indexes of heavy metals in the Bagaxue Wetland(I_{geo})

项目 Item		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	均值 Mean
拉萨市背景值 Background value of Lhasa	Cu	-0.840	-1.360	0.120	1.260	-0.510	-0.710	-2.060	-0.090	0.660	-0.392
	Zn	-0.004	-0.905	-0.402	-0.876	-0.706	-0.178	-1.127	-0.462	0.932	-0.414
	Cr	-1.333	-0.932	-0.730	-1.023	-0.980	-0.655	-0.655	-0.632	-0.932	-0.875
	Ni	-1.811	-1.392	-1.392	-1.675	-1.276	-0.808	-1.519	-0.889	-1.276	-1.338
	Pb	1.175	-1.322	-0.844	-1.468	-1.114	-1.126	-1.315	-1.245	2.167	-0.566
	Cd	1.078	-0.847	0.223	-0.470	-0.362	-0.264	-1.586	-0.362	2.152	-0.049
	As	-1.423	-2.826	-2.498	-1.604	-1.068	-1.905	-3.591	-3.083	-2.252	-2.250
	Hg	-2.582	-2.582	-2.204	-2.466	1.567	-1.519	-3.198	-2.109	-1.821	-1.879
国家土壤环境 质量标准(一级) National standard(level 1)	Cu	-2.252	-2.017	-0.544	0.589	-1.191	-1.393	-2.711	-0.760	-0.014	-1.144
	Zn	-0.625	-1.526	-1.023	-1.498	-1.327	-0.799	-1.747	-1.083	0.310	-1.035
	Cr	-2.432	-2.031	-1.830	-2.124	-2.075	-1.756	-1.756	-1.463	-2.031	-1.944
	Ni	-2.737	-2.322	-2.322	-2.585	-2.206	-1.737	-2.447	-1.189	-2.206	-2.194
	Pb	1.000	-1.498	-1.019	-1.668	-1.289	-1.300	-1.490	-1.421	1.993	-0.744
	Cd	0.341	-1.585	-0.515	-1.206	-1.099	-1.000	-2.322	-1.099	1.415	-0.786
	As	-1.006	-2.416	-2.079	-1.191	-0.682	-1.490	-3.184	-2.674	-1.840	-1.840
	Hg	-3.293	-3.293	-2.907	-3.171	0.862	-2.229	-3.907	-2.816	-2.528	-2.587

以拉萨市环境背景值作为标准根据公式(3)计算 I_{geo} ,所有样点重金属地累积指数平均值在-2.250到-0.049 范围内, $I_{geo} < 0$ 区域整体无污染,生态风险顺序 $Cd > Cu > Zn > Pb > Cr > Ni > Hg > As$.但 D3 样点中的 Cu、Cd,D9 样点中的 Cu、Zn 地累积指数分别为 0.120、0.223、0.660、0.932 属于轻度污染;D1 样点 Pb、Cd,D4 样点 Cu,D5 样点 Hg 地累积指数分别为 1.175、1.078、1.260、1.567 属于偏中度污染;D9 样点 Pb、Cd 分别为 2.167、2.152 属于中度污染.

以国家土壤环境质量标准(一级)作为标准根据公式(3)计算 I_{geo} ,所有样点的重金属地累积指数平均值在-2.587 到-0.744 范围内, $I_{geo} < 0$ 区域整体无污染,污染危险顺序与拉萨背景下的基本一致.但 D1 样点 Cd,D4 样点 Cu,D5 样点 Hg,D9 样点中的 Zn 地累积指数分别为 0.341、0.589、0.862、0.310 属于轻度污染;D1 样点 Pb,D9 样点 Pb、Cd 分别为 1.000、1.993、1.415 属于偏中度污染.

地累积指数法能同时反映出自然特征和人类活动对环境的影响,本次测试中 I_{geo} 均值小于 0,表明该区域生态环境总体情况良好,但部分样点的个别重金属元素偏高,Pb、Cd、Hg 污染问题较为明显属于偏中度污染范围,也说明巴嘎雪湿地生态环境受到人类活动轨迹的影响.

2.3.2 潜在生态风险指数法

分别采用拉萨市环境背景值、国家土壤环境质量标准(一级)对巴嘎雪湿地土壤中重金属进行潜在生态风险评价分析,见表4.

以拉萨市环境背景值作为标准根据公式(4)、(5)、(6)计算 E_r^i 、RI.从测试的 8 种重金属元素潜在生态危害系数 E_r^i 的平均值来看在 3.04 到 58.63 范围内,潜在生态危害顺序为 $Cd > Hg > Pb > Cu > As > Ni > Cr > Zn$,其中 Cd 为 58.63 属于中等风险,其它元素均为低风险,Cd 的潜在生态危害系数范围值在 15 到 200.10,D9 样点 Cd 属于重度风险;而 Hg 潜在生态危害系数平均值为 30.67,整体属于低风险,仅仅在 D5 样点 $E_r^i = 178$ 到达重度风险.综合潜在生态危害指数 RI,在 28.59 到 273.04 之间,平均值 114.18 为生态低危害风险,但 D5 和 D9,RI 值分别为 234.54、273.04 属于中等生态低危害风险.以国家土壤环境质量标准(一级)为背景,结果与以拉萨市环境背景值的类似,潜在生态危害系数 E_r^i 的平均值在 0.792 到 35.833,综合潜在生态危害指数 RI 平均值 72.779 两者均为低生态风险,仅 D9 样点 $RI = 161.504$,中等风险.通过对比发现生态风险来源主要与 Cd 与 Hg 有关.

2.3.3 不同评价方法的比较

地累积指数法中均值 $I_{geo} < 0$, 潜在生态风险评价平均值 $RI = 72.779$ 说明该研究区域整体处于无污染和低生态风险状态, 两种方法评价结果总体一致; 重金属的危险顺序分别为 $Cd > Cu > Zn > Pb > Cr > Ni > Hg > As$ 和 $Cd > Hg > Pb > Cu > As > Ni > Cr > Zn$, 从中可知元素 Cd 是污染风险的主要来源, 不同的是 Cu、Zn、Pb、Hg 的风险评价有所区别, 主要原因是这两种方法的侧重点有所区别, 地累积指数法主要考虑含量上的关系, 潜在生态风险评价法综合考虑含量以及对环境毒性等因素, Hg、Pb 为生物非必需元素, 毒性强, 而 Cu、Zn 为生物所需的微量元素, T_i 分别为 40、5、5、1, 所以 Hg 结果偏大, T_i 为主因^[25-26]。

表 4 湿地土壤重金属潜在生态危害指数 (E_i^p) 和风险指数评价 (RI)

Table 4 Potential ecological risk coefficients (E_i^p) and risk indices (RI) of heavy metals of soil in the wetland

项目 Item		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	均值 Mean
拉萨市背景值 Background value of Lhasa	Cu	4.30	2.95	8.20	17.95	5.25	4.55	1.80	7.05	11.80	7.09
	Zn	1.50	0.80	1.14	0.82	0.92	1.33	0.69	1.09	2.86	1.24
	Cr	1.20	1.58	1.80	1.48	1.52	1.90	1.90	2.34	1.58	1.70
	Ni	2.15	2.85	2.85	2.40	3.10	4.30	2.60	4.05	3.10	3.04
	Pb	16.95	3.00	4.20	2.70	3.45	3.45	3.00	3.15	33.70	8.18
	Cd	95.10	24.90	52.50	32.40	35.10	37.50	15.00	35.10	200.10	58.63
	As	5.60	2.10	2.70	4.90	7.20	4.00	1.20	1.80	3.10	3.62
	Hg	10.00	10.00	13.20	10.80	178.00	20.80	2.40	14.00	16.80	30.67
	RI	136.80	48.18	86.59	73.45	234.54	77.83	28.59	68.58	273.04	114.18
	国家土壤环境 质量标准(一级) National standard(level 1)	Cu	1.570	1.855	5.145	11.285	3.285	2.855	1.145	4.430	7.430
Zn		0.972	0.521	0.738	0.531	0.598	0.862	0.447	0.708	1.860	0.804
Cr		0.556	0.734	0.844	0.688	0.712	0.888	0.888	1.088	0.734	0.792
Ni		1.125	1.500	1.500	1.250	1.625	2.250	1.375	2.215	1.625	1.607
Pb		15.000	2.655	3.700	2.360	2.070	3.045	2.670	2.800	29.855	7.128
Cd		57.000	15.000	31.500	19.500	21.000	22.500	15.000	21.000	120.000	35.833
As		7.740	2.810	3.550	6.570	9.530	5.340	1.650	2.350	4.190	4.859
Hg		6.120	6.120	8.000	6.680	109.080	12.800	4.000	8.520	10.400	19.08
RI		89.813	31.195	54.977	48.864	147.830	50.540	27.175	43.111	161.504	72.779

2.4 土壤重金属相关性分析

利用 Excel 2010 和 SPSS 20 软件研究了巴嘎雪湿地土壤中重金属之间的相关性, 见表 5。Zn 与 Pb、Zn 与 Cd、Pb 与 Cd 之间相关系数均高于 0.9 ($P < 0.01$), 为极显著相关, 表明这 3 种元素来源相同, 可能与研究区内拉林公路交通和少量农业活动有关。Cr 与 Ni、Hg 与 As 之间相关系数分别为 0.744 和 0.684 ($P < 0.05$), 较显著相关, 有同源性, 结合 Cr 与 Ni 含量均低于城市背景值, 考虑为自然地质背景影响^[27]; 而 Hg 与 As 含量在 D5 点达到峰值, 平均含量低于背景值, 该区域没有工业存在, 推测与曾经养鸭厂饲料和动物排泄物有关, 与李航等^[28]研究辽河口湿地 Hg 与 As 特征结果相似, Cu 与其它元素之间相关性不足, 表现出强烈的异源特性, 积累方式也不同, 推测可能与当地居民的生活垃圾、废水有一定相关^[22]; 研究区域重金属累积具有多源性^[29], 矩阵元素组合总体相关性不足, KMO 检验值为 0.46, 也印证了这点。

表 5 重金属元素之间的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between heavy metals in the soils

元素 Element	Cu	Zn	Cr	Ni	Pb	Cd	As	Hg
Cu	1							
Zn	0.275	1						
Cr	-0.171	-0.191	1					
Ni	-0.172	0.108	0.744 *	1				
Pb	0.238	0.950 **	-0.381	-0.169	1			
Cd	0.320	0.975 **	-0.337	-0.102	0.987 **	1		
As	0.212	0.042	-0.649	-0.215	0.077	0.092	1	
Hg	-0.124	-0.138	-0.179	0.086	-0.146	-0.125	0.684 *	1

注: * 在 0.05 水平上显著相关 ($P < 0.05$); ** 在 0.01 水平上显著相关 ($P < 0.01$). * Correlation is significant at 0.05 level;

** Correlation is significant at 0.01 level.

3 结论 (Conclusion)

(1) 巴嘎雪湿地表层土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd 平均含量分别为 31.22、80.44、50.69、0.23 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 高于拉萨市环境背景值, Ni、As、Cr 和 Hg 平均含量低于环境背景值, 但 D5 中 Hg 单点含量约为拉萨背景值的 4.4 倍; 除 Pb、Cd 略超出国家土壤环境质量标准(一级)以外, 其它测试重金属均值都符合标准要求, 但存在部分样点的个别元素超标的现象. 测试重金属变异系数顺序为 $\text{Hg}>\text{Pb}>\text{Cd}>\text{Cu}>\text{Zn}>\text{As}>\text{Ni}>\text{Cr}$, 其中 Hg、Pb、Cd 属于强度变异, 受人类活动影响明显.

(2) 研究区域的内梅罗综合污染指数平均值 $P_N = 1.50$, 整体属于轻度污染, 其中 $P_N \leq 0.7$ 清洁(安全)有 1 个, 占 22.22%; $0.7 < P_N \leq 1.0$ 尚清洁有 3 个, 占 33.33%; $1.0 < P_N \leq 2.0$ 轻度污染有 1 个, 占 11.11%; $2.0 < P_N \leq 3.0$ 中度污染有 2 个, 占 22.22%; $P_N > 3.0$ 重污染有 1 个, 占 11.11%. 以国家土壤环境质量标准(二级)计算 $P_N = 0.64$, 属于清洁(安全)水平.

(3) 地积累指数评价法平均值在 -2.587 到 -0.744 范围内, $I_{\text{geo}} < 0$ 区域整体无污染, 但 D1 样点 Pb、D9 样点 Pb、Cd 属于偏中度污染. 潜在生态风险指数法的平均值 $\text{RI} = 72.779$, 属于低风险状态, 但 D9 样点 $\text{RI} = 161.504$, 中等风险. Zn、Pb 与 Cd 间, Cr 与 Ni 间, Hg 与 As 间表现出较显著相关性, 说明其来源相似, Cu 表现出强烈的异源特性. 各元素组合之间总体相关性不足, 说明重金属累积具有多源性. 巴嘎雪湿地生态整体环境要优于国内大部分湿地, 但部分样点中 Cd、Hg、Pb 污染风险因素也应引起相关部门的重视, 需进一步加强巴嘎雪湿地生态环境保护.

参考文献 (References)

- [1] 芦宝良, 陈克龙, 曹生奎, 等. 青海湖典型湿地土壤重金属空间分布特征[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 190-194.
LU B L, CHEN K L, CAO S K, et al. Spatial distribution characteristics of soil heavy metals of wetland in some representative Qinghai Lake [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(3): 190-194 (in Chinese).
- [2] 李卫平, 王非, 杨文焕, 等. 包头市南海湿地土壤重金属污染评价及来源解析[J]. 生态环境学报, 2017, 26(11): 1977-1984.
LI W P, WANG F, YANG W H, et al. Pollution assessment and source apportionment of heavy metals in Nanhai wetland soil of Baotou City [J]. Ecology and Environmental Sciences, 26(11): 1977-1984 (in Chinese).
- [3] 布多, 李明礼, 德吉, 等. 拉萨河流域甲玛湿地水质净化功能研究[J]. 资源科学, 2010, 32(9): 1650-1656.
BU D, LI M L, DE J, et al. Study on water purification functions of the jama wetland in the Lhasa River Basin [J]. Resources Science, 2010, 32(9): 1650-1656 (in Chinese).
- [4] 拉多, JOHN BIRKS, 普布, 等. 拉萨市拉鲁湿地植物群落与环境因素之间的关系及其分布格局[J]. 西藏大学学报(自然科学版), 2009, 24(1): 15-20.
LA D, JOHN B, PU B, et al. The relationship between composition and distribution of vegetation and environmental factors in Lhalu Dhamra, Lhasa [J]. Journal of Tibet University, 2009, 24(1): 15-20 (in Chinese).
- [5] 华国春, 黄川友, 李艳玲, 等. 拉萨拉鲁湿地生态恢复与重建对策研究[J]. 水资源保护, 2007, 23(6): 93-96.
HUA G C, HUANG C Y, LI Y L, et al. Ecological protection and restoration of Lahu Wetland in Lasa City [J]. Water Resources Protection, 2007, 23(6): 93-96 (in Chinese).
- [6] 袁齐涛, 巴桑, 王芸, 等. 巴嘎雪湿地秋季水生纤毛虫群落特征与水环境关系[J]. 西藏科技, 2015(11): 66-70.
YUAN Q T, BA S, WANG Y, et al. Relationship between community characteristics of aquatic ciliates and water environment in autumn in Bagaxue wetland [J]. Science of Tibet, 2015(11): 66-70 (in Chinese).
- [7] 巴桑, 普布, 马正学, 等. 西藏巴嘎雪湿地春季藻类群落特征研究[J]. 西藏大学学报(自然科学版), 2010, 25(2): 1-16.
BA S, PU B, MA Z X, et al. Characteristics of algae community of bagaxue wetland during spring, in Lhasa Valley [J]. Journal of Tibet University, 2010, 25(2): 1-16 (in Chinese).
- [8] 布多, 李明礼, 许祖银, 等. 西藏拉萨河流域巴嘎雪湿地水化学特征[J]. 中国环境科学, 2016, 36(3): 793-797.
BU D, LI M L, XU Z Y, et al. Study on aquatic chemistry characteristics of bagaxue wetland in Lhasa river basin, Tibet [J]. China Environmental Science, 2016, 36(3): 793-797 (in Chinese).
- [9] 陈德来, 马正学, 马世荣, 等. 西藏巴嘎雪湿地夏季土壤动物群落特征[J]. 湿地科学, 2014, 12(5): 624-630.
CHEN D L, MA Z X, MA S R, et al. Community characteristics of soil animals in bagaxue wetlands in Tibet in Summer [J]. Wetland Science, 2014, 12(5): 624-630 (in Chinese).
- [10] 拉多, 普布, 卓玛央金, 等. 西藏拉萨河谷巴嘎雪湿地植被群落组成及其环境因素之间的相关性[J]. 西藏大学学报(自然科学版), 2011, 26(1): 1-6.
LA D, PU B, ZHUO M Y J, et al. Correlation between composition and distribution of vegetation and environmental factors in Bagaxue wetland, Lhasa [J]. Journal of Tibet University, 2011, 26(1): 1-6 (in Chinese).
- [11] 谭小爱, 王平, 王倩, 等. 大山包黑颈鹤国家级自然保护区湿地土壤重金属污染评价[J]. 湿地科学, 2016, 14(6): 916-921.

- TAN X A, WANG P, WANG Q, et al. Evaluation on heavy metals contamination in the soils of wetlands in Dashanbao Black-necked Crane National Nature Reserve[J]. *Wetland Science*, 2016, 14(6):916-921(in Chinese).
- [12] 谭小爱,王平,邹亚萍,等.旅游活动对香格里拉景区土壤重金属污染的影响[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2017, 39(6): 121-127.
- TAN X A, WANG P, ZOU Y P, et al. Impct of tourism activities on heavy metal pollution of soil in the Shangri-La Scenic area[J]. *Journal of Southwest University*, 2017, 39(6):121-127(in Chinese).
- [13] 刘新,蒋豫,高俊峰,等.巢湖湖区及主要出入湖河流表层沉积物重金属污染特征及风险评价[J]. *湖泊科学*, 2016, 28(3): 502-512.
- LIU X, JIANG Y, GAO J F, et al. Pollution characteristics of heavy metals and the risk assessment for the surface sediments from Lake Chaohu and its main tributary rivers[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(3): 502-512(in Chinese).
- [14] FOSTNER U, WITTMANN G W. Metal pollution in the aquatic environment[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 1979:1-486.
- [15] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control Asedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [16] 国家环境保护总局.土壤环境质量标准(GB15618—1995)[S].北京:中国环境科学出版社,1995.
- State Environmental Protection Administration. Environmental quality standards for soil (GB15618—1995) [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 1995 (in Chinese).
- [17] 成杭新,李括,李敏,等.中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J]. *地学前缘*, 2014, 21(3):265-306.
- CHENG H X, LI K, LI M, et al. Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(3):265-306(in Chinese).
- [18] 陈碧珊,苏文华,罗松英,等.雷州半岛红树林土壤重金属空间分布特征及来源分析[J]. *海洋环境科学*, 2018, 37(6):922-928.
- CHEN B S, SU W H, LUO S Y, et al. Distribution characteristics and source analysis of heavy metals in soils from mangrove forest in Leizhou Peninsula [J]. *Marine Environmental Sciences*, 2018, 37(6):922-928(in Chinese).
- [19] 孙曦,刘合满,周通,等.林芝河谷地区典型农田土壤主要性质及重金属状况初探[J]. *土壤*, 2016, 48(1): 131-138.
- SUN X, LIU H M, ZHOU T, et al. Preliminary study on soil fertility and heavy metal concentrations of croplands in Nyingchi Valley of Tibet [J]. *Soils*, 2016, 48(1): 131-138(in Chinese).
- [20] 旦增,洛桑,李承鼎,等.拉萨市区大棚蔬菜重金属污染现状分析及评价[J]. *西藏大学学报(自然科学版)*, 2011, 26(2): 31-35.
- DAN Z, LUO S, LI C D, et al. Analysis and evaluation on heavy metal pollution status of green house vegetables in Lhasa region [J]. *Journal of Tibet University*, 2011, 26(2): 31-35(in Chinese).
- [21] 王冠星.拉萨市区及周边道路交通对路侧土壤环境的影响研究[D].北京:北京交通大学,2015.
- WANG G X. Study on effect of traffic roadside soil environment in lhasa and surrounding area[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015 (in Chinese).
- [22] VIVEKANANDA M, ABHISHEK D, ANIRBAN A, et al. Toxicity and profitability of rice cultivation under wastewater irrigation: The case of the East Calcutta Wetlands [J]. *Ecological Economics*, 2013, 93: 292-300.
- [23] 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[J]. *土壤通报*, 2015, 46(3):762-768.
- XU M L, FANG F M, LIN Y S. Advances in source, pollution characteristics and ecological assessment of heavy metals in wetland soils [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(3):762-768(in Chinese).
- [24] 刘全东,蒋代华,高利娟,等.畜禽粪便有机肥源重金属在土壤-蔬菜系统中累积、迁移规律的研究进展[J]. *土壤通报*, 2014, 45(1): 252-256.
- LIU Q D, JIANG D H, GAO L J, et al. Research progress on heavy metal accumulation and migration of livestock dung organic fertilizer in soil-vegetable system [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(1): 252-256(in Chinese).
- [25] 邵学新,吴明,蒋科毅.西溪湿地土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J]. *湿地科学*, 2007, 5(3):253-259.
- SHAO X X, WU M, JIANG K Y. Distribution and ecological risk assessment of heavy metal elements in soils of Xixi Wetland[J]. *Wetland Science*, 2007, 5(3):253-259(in Chinese).
- [26] 罗松英,王嘉琦,周敏,等.湛江东海岛红树林湿地表层土壤重金属空间分布特征及生态风险评价[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(8): 1547-1555.
- LUO S Y, WANG J Q, ZHOU M, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in the surface soils of mangrove wetland in Donghai Island, Zhanjiang [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(8): 1547-1555(in Chinese).
- [27] 张强英,布多,吕学斌,等.西藏帕隆藏布江流域天然水的水化学特征[J]. *环境化学*, 2018, 37(4):889-896.
- ZHANG Q Y, BU D, LYU X B, et al. Aquatic chemistry characteristics of natural water in the Parlung Zangbo River Basin, Tibet [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(4):889-896(in Chinese).
- [28] 李航,郑冬梅,杨继松,等.辽河口湿地土壤中汞、砷分布特征及风险评价[J]. *湿地科学*, 2017, 15(4):556-561.
- LI H, ZHENG D M, YANG J S, et al. Distribution characteristics of mercury and arsenic in soils of wetlands in Liaohe River Estuary and their risk assessment[J]. *Wetland Science*, 2017, 15(4):556-561(in Chinese).
- [29] 刘凤,李梅,张荣飞,等.拉萨河流域重金属污染及健康风险评价[J]. *环境化学*, 2012, 31(5):580-585.
- LIU F, LI M, ZHANG R F, et al. Pollution analysis and health risk assessment of heavy metals in Lhasa River [J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(5):580-585(in Chinese).