

DOI: 10.11766/trxb201810160364

张阿龙, 高瑞忠, 张生, 贾德彬, 杜丹丹, 秦子元, 王喜喜. 吉兰泰盐湖盆地土壤重金属铬、汞、砷分布的多方法评价[J]. 土壤学报, 2020, 57 (1): 130–141.

ZHANG Along, GAO Ruizhong, ZHANG Sheng, JIA Debin, DU Dandan, QIN Ziyuan, WANG Xixi. Evaluation Using Numerous Methods of Distribution of Heavy Metals Cr, Hg and As in Jilantai Salt Lake Basin[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (1): 130–141.

吉兰泰盐湖盆地土壤重金属铬、汞、砷分布的多方法评价*

张阿龙¹, 高瑞忠^{1, 2†}, 张生^{1, 2}, 贾德彬^{1, 2}, 杜丹丹^{1, 2}, 秦子元¹, 王喜喜³

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古水资源保护与利用重点实验室, 呼和浩特 010018; 3. Old Dominion University, Norfolk 23529)

摘要: 选择西北旱区吉兰泰盐湖盆地为研究对象, 以随机布点法对表土层 (0~10 cm)、心土层 (50 cm)、底土层 (100 cm) 的重金属铬 (Cr)、汞 (Hg)、砷 (As) 以及主要化学成分进行空间采样测定, 揭示 Cr、Hg、As 的空间分布特征, 研究确定其土壤环境背景值, 并以此背景值为评价基准, 利用单因子污染指数、地累积指数、生态风险指数、内梅罗综合污染指数、潜在生态风险综合指数、污染负荷指数等六种常用方法对表土进行评价及对比分析。结果表明: 盐湖盆地表层土壤中 Cr、Hg、As 总体具有相似的空间分布特征; 盐湖盆地土壤 Cr、Hg、As 背景值分别为 27.89 mg·kg⁻¹、0.039 mg·kg⁻¹、12.83 mg·kg⁻¹, 对比宁夏、新疆等相关地区, 盆地 Cr 背景值较低, Hg 背景值较高, As 元素相近; 以背景值为基准进行污染评价, 盆地表层土壤重金属污染顺序依次为 Hg、Cr、As, 简单指数法呈现 Cr、Hg、As 整体处于轻微污染状态, Hg 存在的生态风险较 Cr、As 大, 类似的, 综合指数法表明盆地整体上处于轻微污染状态, 综合生态风险相对较大; 单因子污染指数法的土壤污染等级评价结果大于综合污染指数法; 三种综合指数法均与三种简单指数法对 Hg 的评价结果具有显著相关性, 表明盐湖盆地表层土壤中 Cr、Hg、As 形成受到成土母质、天然水文地球化学作用和气候特征条件等综合作用的影响, 局部受到人类活动的扰动。

关键词: 土壤重金属; 空间分布; 背景值; 评价

中图分类号: P285.1; S159.9 **文献标志码:** A

Evaluation Using Numerous Methods of Distribution of Heavy Metals Cr, Hg and As in Jilantai Salt Lake Basin

ZHANG Along¹, GAO Ruizhong^{1, 2†}, ZHANG Sheng^{1, 2}, JIA Debin^{1, 2}, DU Dandan^{1, 2}, QIN Ziyuan¹, WANG Xixi³

(1. Institute of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018 China; 2. Inner Mongolia

* 国家自然科学基金项目 (51969022)、内蒙古自然科学基金项目 (2018MS05006) 和美国国家自然科学基金项目 (100653-010) 资助
Supported by the National Natural Science Foundation (No. 51969022), the Inner Mongolia Natural Science Foundation of China (No. 2018MS05006) and the National Science Foundation of the United States (No. 100653-010)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: ruizhonggao@qq.com

作者简介: 张阿龙 (1992—), 男, 汉族, 内蒙古呼和浩特市人, 硕士研究生, 主要从事干旱半干旱地区气候-水文-土壤特征解析与诊断性方面的研究。E-mail: 562061251@qq.com

收稿日期: 2018-10-16; 收到修改稿日期: 2018-11-22; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-04-03

Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization, Hohhot 010018, China; 3. Old Dominion University, Norfolk 23529, USA)

Abstract: [Objective] In recent years, the study on heavy metal pollution in soil has become popular. Although quite a number of scholars reported achievements in this field, they have not overcome the defects in regional background value and evaluation method, especially in salt lake basins in the arid region. So, it was difficult for them to achieve accurate results. The objective of this paper is to characterize spatial distribution and determine environmental background values of heavy metals pollutants, to evaluate soil quality using different methods, and to investigate sources of heavy metals pollution in salt lake basins, in an expectation to provide certain scientific reference for researchers in studies on accumulating basic data, determining environmental capacity, setting up soil environmental standards, protecting soil environment, eliminating soil environmental risks, rationalizing utilization of soil resources and so on and for government policy-makers in all these fields. [Method] The Jilantai Salt Lake Basin, located in the arid region of Northwest China, was selected as the object for the study. Soil samples were collected from topsoil (0 to 10 cm), subsoil (50 cm) and substrate (100 cm) in the study area using the random arrangement method. Heavy metals (e.g. Cr, Hg and As) for analysis of chemical composition in the Inner Mongolia Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization. Spatial distribution of Cr, Hg and As was characterized through geo-statistical interpolation maps and background values of the elements in the soil environment were determined as benchmarks for evaluation of soil quality. Six commonly used methods (i.e. single factor index, geo-accumulation index, ecological risk index method, Nemero index, potential ecological risk integration index and pollution load index) were used to evaluate soil quality for comparison analysis. [Result] Results show that the three heavy metal elements, Cr, Hg, and As, in the Jilantai Basin, were on the whole quite similar in spatial distribution characteristic; the background value of Cr, Hg and As in the soil of the basin was $27.89 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0.039 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $12.83 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively; Cr was higher in the Bayinwula Mountain Region, the Wulanbuhe Desert Region, and the hilly southwestern part of the study area; Hg was higher only in the northeastern and the hilly southwestern parts of the study area; and As was higher areas near the lake, the Helan Mountain Region, the Bayinwula Mountain Region, and the Wulanbuhe Desert Region. The evaluation based on background value reveals that the three pollution elements in the topsoil of the study area followed a decreasing order of $\text{Hg} > \text{Cr} > \text{As}$ in pollution level; the evaluation using the simple factor index method shows that Cr, Hg and As were all light in pollution level in the study area; the evaluation using the ecological risk method indicates that Hg was higher than Cr and As in ecological risk; and the evaluation using the comprehensive pollution index method suggests that the pollution of the three elements, when talked about separately, was slight in the topsoil, but their comprehensive ecological risk was high. The pollution level evaluated with the simple factor index methods was higher than that evaluated with the comprehensive pollution index method, Furthermore, the correlation coefficients of the evaluations using the two methods, simple and comprehensive, reached over 0.80 and 0.65 ($\alpha=0.01$), respectively. In evaluating Hg, all the evaluations using the three comprehensive pollution index methods were significantly correlated with those using the three simple factor index methods, with correlation coefficient being 0.53 ($\alpha=0.01$), while no significant correlations were found with the other two heavy metal elements. [Conclusion] It can be concluded from the spatial distribution characteristics and the evaluations that the presence of Cr, Hg and As in the surface soil of the salt lake basin is subject to the comprehensive impact of soil-forming parent material, natural hydro-geochemistry and climatic conditions, and partially to the disturbance of human activities.

Key words: Heavy metals in soil; Spatial distribution; Background value; Evaluation

土壤是与人类关系最为密切的一种环境要素，其表层或里面有生物栖息，是联系有机界和无机界的中心环节^[1]。土壤在环境系统中起着重要的稳定与缓冲作用，能够对污染物质进行容纳、缓冲和净化，但同时也会间接通过水体、大气、植物将污染

物作用于人体，被人体吸收^[2]。当土壤中含有害物质过多、超过土壤自净能力时，就会引起土壤的组成、结构和功能发生变化，土壤微生物活动受到抑制^[3]，有害物质或其分解产物在土壤中逐渐积累，达到危害人体健康的程度，或者对生态系统造成危

害^[4]。土壤重金属污染评价是土壤环境管理的基础性工作也是土壤环境研究的和污染防治的重要基础^[5]，采用合理的污染评价方法，选取恰当的土壤环境标准，才能确定土壤环境容量，识别土壤重金属污染状况，满足土壤环境管理和决策需要^[6]。大多数学者将土壤环境标准与土壤污染评价割裂研究，难以保证评价结果的准确性，对污染防治工作带来困扰。

土壤重金属污染已成为近年来国内外研究的热点。众多学者采用不同的研究方法对流域^[7-9]、城郊区^[10-12]、工矿区^[13-14]、农田灌区^[15-16]和自然保护区^[17-18]土壤中的重金属元素的来源、含量、分布和评价进行了报道。但是旱区盐湖盆地区的研究缺乏，且评价选用的标准^[19]至今已 23 年，选用地区背景值^[20]至今已 28 年，已不适应当前土壤环境管理的需求，从而导致对当前土壤环境容量和土壤污染评价结果造成一定的偏差，且评价方法选取欠妥，评价过程中缺乏多种方法联合运用，很难达到预期的效果。

本研究针对上述问题，对西北旱区吉兰泰盐湖盆地不同土层铬（Cr）、汞（Hg）、砷（As）进行测定分析，揭示空间分布特征，确定土壤环境背景值，对表土用六种方法进行评价及对比分析，旨在为西

北旱区盐湖盆地流域积累环境要素基本数据、资料，为确定环境容量，制定土壤环境标准基本数据，为社会经济发展中土壤环境保护、土壤质量评价、土壤污染治理、土壤环境风险预警和土壤资源合理利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

吉兰泰盐湖盆地地处欧亚大陆腹地（38°50′~40°45′N，105°00′~106°40′E），面积 20 025 km²，高程变化 1 013~3 159 m（图 1），平均海拔高度为 1 020 m。属典型的大陆性干旱气候，干旱少雨，冬寒夏热，盆地西北部的巴音乌拉山和东南部贺兰山由前震旦系区域变质岩系和火成岩系构成，盆地中心为第四纪更新统湖积物堆积，巴音乌拉山和贺兰山山前为更新统洪积物分布^[21]。盆地东北部被乌兰布和沙漠所覆盖，形成沙山、沙丘、沙垄和平沙等地貌景观，植被稀少覆盖度较低。盆地有五大地貌单元，即侵蚀地形地貌、剥蚀地形地貌、堆积地形地貌、风成地形地貌和其他微地形地貌。

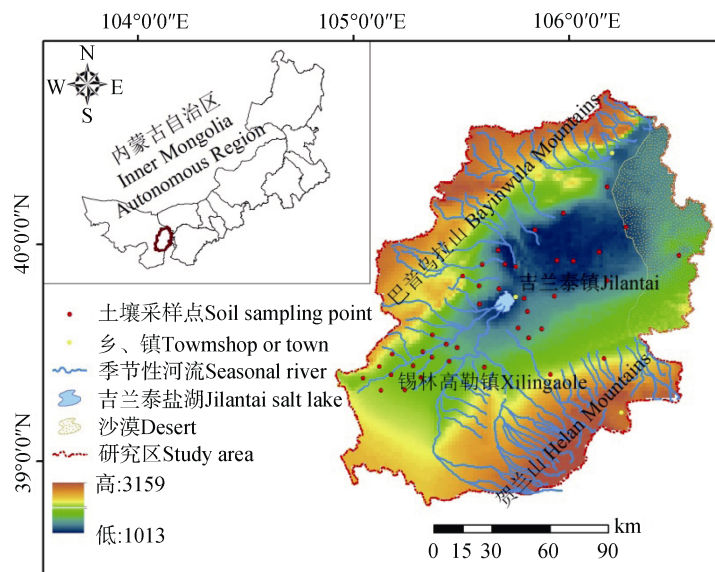


图 1 研究区地理位置及土壤采样点图

Fig. 1 Geographic locations of the study area and soil sampling sites

吉兰泰盐湖盆地主要行政区划属内蒙古阿拉善盟吉兰泰镇，沙区外围周边交通情况较为发达，有包兰铁路、京藏高速公路、110 国道、109 国道、乌

巴省级公路等，南部有乌—吉铁路专用线^[22]。区内以吉兰泰盐湖盐业及副产品工业为主，包括少量农业、畜牧业和商业等共存的多元化经济结构，其中

吉兰泰盐湖是我国重要的盐业生产基地，在全国盐业生产工业中具有举足轻重的地位。

1.2 样品采集与分析

考虑地形、土地利用类型、自然气象要素等综合因素，2016年7—8月以随机布点法采样，共40个采样点(图1)。每个土壤采样点以手持GPS定位，分表土层(0~10 cm)、心土层(-50 cm)和底土层(-100 cm)3层采样，每个样品质量约1 kg，共采集120个代表性样品。装入聚乙烯塑料袋。

土壤Hg和As通过北京普析通用PF6-2型双道全自动原子荧光光度计测定，检出限分别为 $Hg < 0.001 \mu g \cdot kg^{-1}$ 、 $As < 0.01 \mu g \cdot kg^{-1}$ ，精密度 $< 1.0\%$ ，测试线性范围 $> 10^3$ ；Cr通过日立Z-2700型石墨炉原子吸收分光光度计测定，检出限为 $0.004 mg \cdot kg^{-1}$ ，精密度 $\leq 1.0\%$ ，样品残留 $\leq 10^{-5}$ 。每个样品均采用3组平行实验，取均值作为样品测定的最终量。

1.3 土壤背景值计算

区域土壤背景值指一定区域内，远离工矿、城镇和公路，无或无有过“三废”污染影响的土壤中有毒物质在某一保证率下的含量，其公式为^[20, 23]

$$C_{0i} = \bar{C}_i \pm S \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (C_{ij} - \bar{C}_i)^2}{N-1}} \quad (2)$$

式中， C_{0i} 为区域土壤中第*i*种有毒物质的背景值； C_{ij} 为区域土壤第*j*个样品中第*i*种有毒物质点位实测值； \bar{C}_i 为区域土壤中第*i*种有毒物质实测值的平

均值；*S*为标准差；*N*为统计样品个数。

1.4 评价方法

本文采用的评价方法主要有单因子污染指数法(P_i)^[24]、地累积指数法(I_{geo})^[13]、生态风险指数法(E_r^i)^[4, 12, 25]、潜在生态风危害综合指数法(RI)^[4, 12, 22]、内梅罗综合污染指数法(P_N)^[2, 13, 24]和(PLI)污染负荷指数法^[26]，这些方法计算过程可参见相关参考文献，在此不再赘述，根据公式(1、2)计算出背景值，制定评价标准见表1。

2 结果

2.1 土壤中Cr、Hg、As的空间分布

分析吉兰泰盐湖盆地表层土壤Cr、Hg、As的空间分布(图2)，土壤中Cr含量的高值区主要分布于吉兰泰盐湖盆地北部的乌兰布和沙漠和巴音乌拉山地区，在盐湖盆地的西南局部区域也出现Cr含量的高值区(图2a)，这种分布的主要原因为上游巴音乌拉山丘区存在含Cr矿物，经多年雨季溶解随季节性河流顺流而下，造成该区Cr含量的较高分布；Hg含量高值区主要位于吉兰泰盐湖盆地的西南低山丘陵地区(图2b)，且主要分布在图格力高勒沟和沙尔布尔的沟附近区域，原因是地势较高的上游低山台地地区有含Hg矿物，经过雨水冲刷被带到沟中，多年水走盐留的累积，形成研究区西南部Hg含量较高，且该区域被省道218穿过，车流量较大，尾气中重金属Hg污染较为严重，Hg排放到空气中，经大气沉降和雨水冲刷到沟中，经多年的累积，导致该区Hg浓度较高^[26]；该区土壤As元素浓度较高区域主要分布在盐湖西北部区域，这是多年蒸发浓缩导致(图2c)。总体上，3种重金属元素在

表1 评价标准建议值

Table 1 Recommended values of the evaluation criteria

重金属元素 Heavy metal element	评价等级 Evaluation level			
	I级 I level	II级 II level	III级 III level ^[23-24]	IV级 IV level ^[23-24]
Cr	27.89	46.27	125.00	250.00
Hg	0.039	0.382	0.50	1.00
As	12.83	24.37	27.00	30.00

注：I级：研究区土壤背景值 \bar{X} ；II级：土壤临界值即 $\bar{X} \pm 2S$ 。Note: I level: Soil background value of the study area is \bar{X} ; II level: Soil critical value is $\bar{X} \pm 2S$.

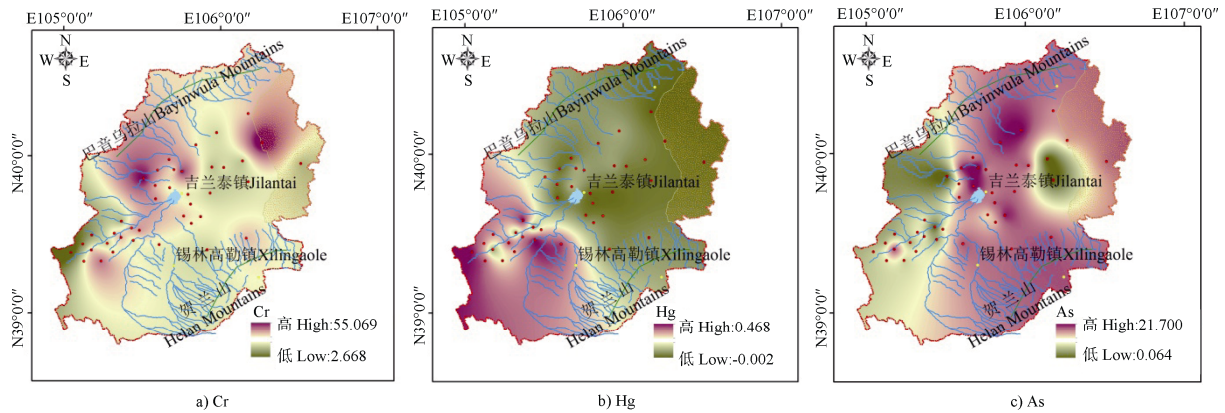


图 2 研究区土壤重金属 Cr、Hg、As 含量分布 ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Fig. 2 Distribution map of Cr, Hg and As in the soil of the study area ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

吉兰泰盐湖盆地地区呈现了明显的斑块分布特征,表明研究区表层土壤在天然水文地球化学作用下,可能局部受到生活垃圾排放、交通运输、工业排放和大气沉降等的影响。

2.2 土壤背景值

土壤数据分布类型若服从正态分布,用算术平均值 \bar{X} 表示数据的集中趋势,用算术平均值标准差 S 表示数据的分散程度,用 $\bar{X}+2S$ 表示 95%置信度数据的范围值;若服从对数正态分布,用几何平均值 M 表示数据的集中趋势,用几何平均值标准差 D 表示数据的分散程度,用 $M/D^2-M\cdot D^2$ 表示 95%置信度数据的范围值^[20, 23-24]。以其特征值表达该元素背景值的集中趋势,不剔除任何异常值,分别做 Q-Q 图进行正态检验,如果散点均聚集在固定直线的周围,可以认为数据资料近似服从正态分布。盆地土壤 Cr、As 均近似服从常数正态分布, Hg 近似服从对数正态分布(图 3)。

对样品的各分析数据做必要的检验,剔除可疑污染土样,以保证区域土壤环境背景值的真实性。可疑污染土样常采用平均值加标准差的方法^[20, 23-24]剔除,如采用平均值加二倍标准差的方法,对于 $X1>X+2S$ 的样品视为可疑污染,予以剔除,该法对于成土母质相对均一的地区适用,而且简单^[23]。将其污染点剔除后再计算,得到更为精确的背景值,对该区污染状况进行较为准确的评价。

由于 Cr 和 As 服从正态分布,可用算术平均值 \bar{X} 作为土壤背景值, Hg 服从对数正态分布,可用几何平均值 M 表示土壤背景值,通过剔除污染点,

最后取表、心、底土平均值(综合值)作为研究区土壤背景值, Cr 的背景值为 $27.89\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Hg 的背景值为 $0.039\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, As 的背景值为 $12.83\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 2)。

盐湖盆地位于内蒙古西部的阿拉善盟,南邻宁夏,西邻新疆,西南与甘肃接壤,通过对比分析,可以看出,研究区 Cr 背景值较低, Hg 背景值较高, As 元素与区域甘肃最为接近(表 3)。

2.3 土壤 Cr、Hg、As 污染评价

单因子污染指数法表明,表层土壤 Hg 污染(77.5%)大于 Cr 污染(47.5%)大于 As 污染(55%),且 Cr、Hg 的评价结果中均出现中度污染,分别为 5%、12.5%, As 均处于轻微及以下污染状态;地累积指数法评价结果显示,表层土壤 Hg 污染(60%)大于 As 污染(15%)大于 Cr 污染(7.5%),且 Hg 的评价结果中出现中度和强度污染,分别为 10%、25%;生态风险指数法可以看出,该区表层土壤 Hg 污染(77.5%)大于 Cr 污染(0%)和 As 污染(0%),且 Hg 的评价结果中出现极强生态风险为 22.5%,强度及以上分险为 55%, Cr、As 均处于轻微生态风险状态(表 4)。

单因子污染指数法评价的 Cr、As 上限均在轻微污染内,但 Cr 存在 5%的异常值属于中度污染, Hg 上限属于中度污染,且所占比例为 12.5%, Cr、Hg、As 上四分位数、中值均在轻微污染内,下四分位数均为未污染状态且 Cr、Hg、As 未污染状态;地累积指数法 Cr、As 上限均在未污染状态,且所占比例分别为 92.5%、85%, Hg 上限属于中度,且所占比例之和为 10%, Hg 上四分位数均在轻微污染内,且

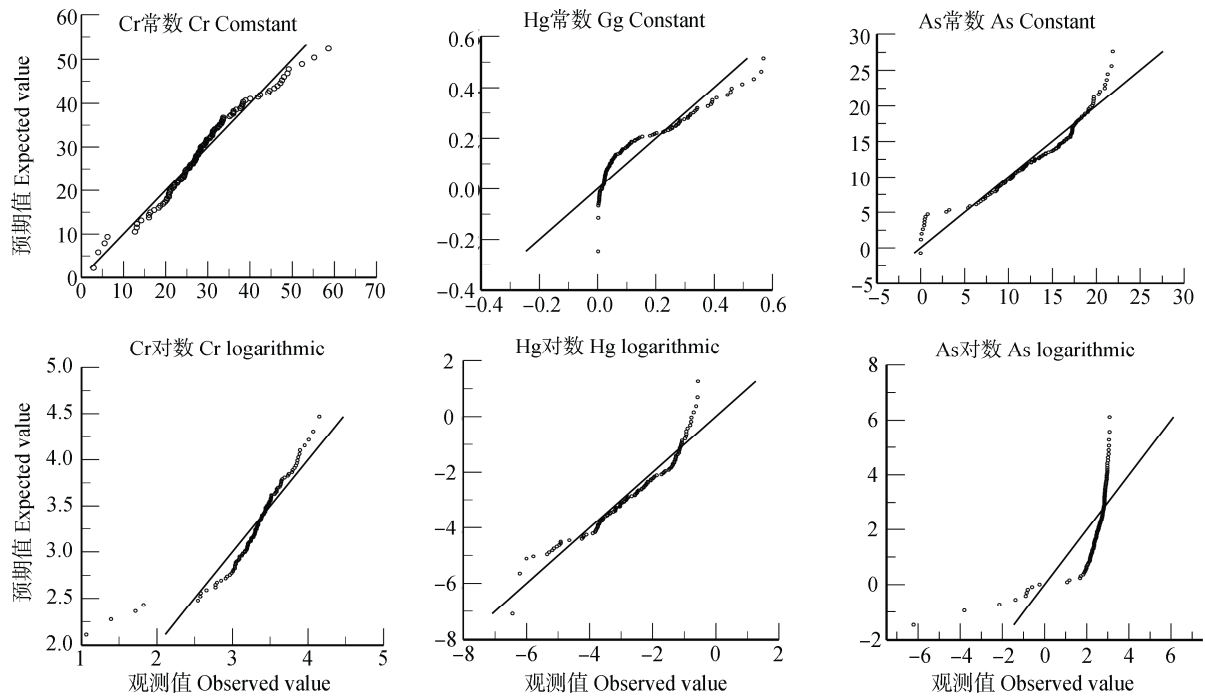


图3 Q-Q图正态检验

Fig. 3 Normal test from Q-Q graph

表2 研究区土壤 Cr、Hg、As 含量剔除后的统计值

Table 2 Statistics of the refined Cr, Hg and As contents in the soil of the study area

重金属 Heavy metal	土层 Soil layer	最小值 Min	最大值 Max	算术 Arithmetic		几何 Geometric	
				平均值 Average	标准差 Standard deviation	平均值 Average	标准差 Standard deviation
Cr	表土 Topsoil	2.90	49.15	27.13	8.22	25.29	7.98
	心土 Middlesoil	6.19	47.18	28.18	8.43	26.63	8.13
	底土 Subsoil	4.03	48.03	28.35	10.90	25.57	10.67
	综合 Comprehensive	2.90	49.15	27.89	9.19	25.83	8.93
Hg	表土 Topsoil	0.002	0.335	0.105	0.117	0.050	0.106
	心土 Middlesoil	0.002	0.319	0.092	0.106	0.034	0.096
	底土 Subsoil	0.002	0.310	0.074	0.087	0.033	0.079
	综合 Comprehensive	0.002	0.335	0.091	0.103	0.039	0.094
As	表土 Topsoil	0.01	21.74	12.92	6.11	8.45	7.60
	心土 Middlesoil	0.12	20.41	12.76	5.60	9.56	6.47
	底土 Subsoil	0.01	21.87	12.82	5.72	8.18	7.41
	综合 Comprehensive	0.01	21.87	12.83	5.77	8.71	7.10

表 3 世界范围和我国、以及其他相近地区的 Cr、Hg、As 背景值

Table 3 Background values of Cr, Hg and As for similar regions, China and the world / (mg·kg⁻¹)

背景值 Background value	世界 World		中国 China		内蒙古 Inner Mongolia	新疆 Xinjiang	宁夏 Ningxia	甘肃 Gansu	吉兰泰 Jilantai
	均值	含量范围	均值	含量范围					
	Mean	Content range	Mean	Content range					
Cr	70	5~1 500	57.3	17.4~118.8	41.4	49.3	60	70.2	27.89
Hg	0.03~0.1	0.03~0.3	0.04	0.006~0.272	0.028	0.013	0.02	0.016	0.039
As	6	0.1~41	9.6	2.5~33.5	7.5	11.2	11.9	12.6	12.83

表 4 简单指数法评价结果

Table 4 Evaluation using the simple index methods

评价方法 Evaluated method	污染等级 Polluted level	重金属元素等级比重 Percent of heavy metal element /%		
		Cr	Hg	As
单因子污染指数法 Single factor pollution index method	I 无污染 None	52.50	32.50	45.00
	II 轻微 Slight	42.50	55.00	55.00
	III 中度 Moderate	5.00	12.50	0.00
	IV 强度 Intensity	0.00	0.00	0.00
地累积指数法 Ground accumulation index method	I 无污染 None	92.50	40.00	85.00
	II 轻微 Slight	7.50	25.00	15.00
	III 中度 Moderate	0.00	10.00	0.00
	IV 强度 Intensity	0.00	25.00	0.00
生态风险指数法 Ecological risk index method	I 轻微 Slight	100.00	32.50	100.00
	II 中度 Moderate	0.00	12.50	0.00
	III 强度 Intensity	0.00	25.00	0.00
	IV 很强 Strong	0.00	7.50	0.00
	V 极强 Very strong	0.00	22.50	0.00

所占比例之和为 25%，Cr、Hg、As 中值、下四分位数均处于未污染内且所占比例为分别为 92.5%、85%、40%；生态风险指数法评价结果中 Cr、As 上限均在轻微污染状态，Hg 上限属于极强风险，且所占比例为 22.5%，上四分位数在很强风险内，且所占比例为 7.5%（表 4，图 4）。三种方法相互对比，相互验证可看出该区表土存在污染，Cr、Hg、As 整体处于轻微污染状态，但 Hg 存在较大的生态风险，且 Hg 的生态风险大于 Cr 和 As，应引起相关部门重视。

潜在生态风险综合指数法、内梅罗综合污染指数法和污染负荷指数法评价结果（表 5）显示，污染程度依次为潜在生态风险综合指数法、内梅罗综

合指数法、污染负荷指数法。潜在生态风险综合指数法评价结果综合风险指数均处于强度及以下污染水平，强度污染占 22.5%，中度污染占 12.5%，其他 65%均处于轻微污染水平；内梅罗综合污染指数法评价中，处于中度污染占 5%，90%的取样点处于轻微污染状态，2.5%的取样点处于尚清洁污染状态；污染负荷指数法评价中，存在中度污染占 5%，其他均处于轻微及以下。

综合指数法评价结果（图 5）可看出，潜在生态风险综合指数法大于内梅罗综合指数法大于污染负荷指数法；潜在生态风险综合指数法的结果整体上处于中度及以下风险，上限处于强度污染水平，上四分位数处于中度污染水平，中值处于轻微污染

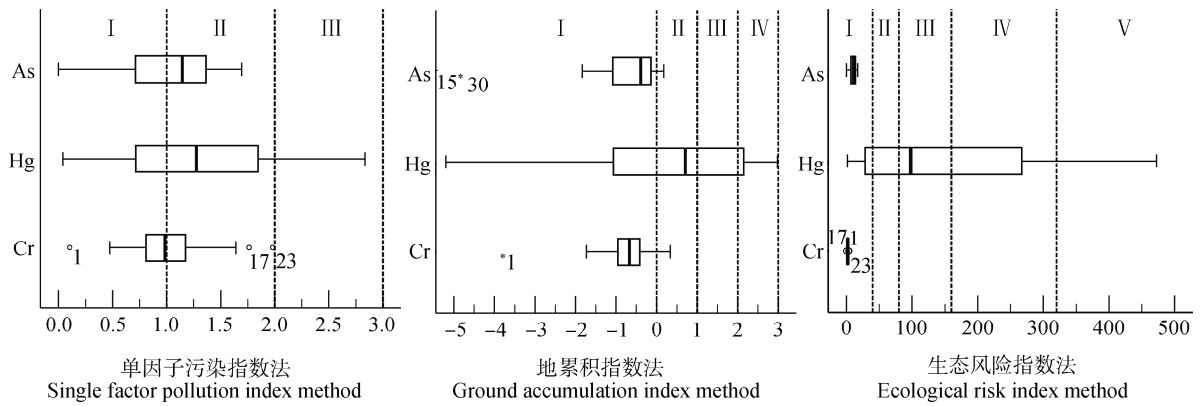


图 4 简单指数法评价结果

Fig. 4 Evaluation using the simple index methods

表 5 综合指数法评价结果

Table 5 Evaluation using the comprehensive index methods

评价方法 Evaluated method	污染等级			
	无污染 None	轻微 Sight	中度 Moderate	强度 Strong
潜在生态风险综合指数法 Potential ecological risk comprehensive index method	—	67.5%	10.0%	22.5%
污染负荷指数法 Pollution load index method	37.5%	57.5%	5.0%	0.0%
内梅罗综合污染指数法 Nemero polluted index method	5.0%	90.0%	5.0%	0.0%

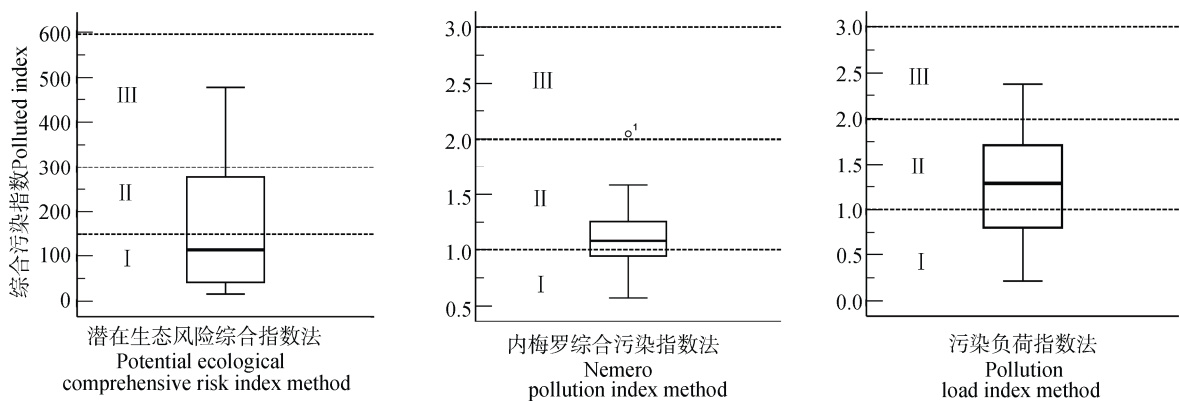


图 5 综合污染指数箱线图

Fig. 5 Box plot of the comprehensive pollution index

水平；内梅罗综合指数法整体上处于轻微污染，综合污染指数上限处于中度污染水平，上四分位数、中值和下四分位数均处于轻微污染水平，下线处于无污染水平；污染负荷指数法整体上处于轻微污染，

综合污染指数上限处于中度污染水平，上四分位数与中值均处于轻微污染水平，下四分位数处于无污染水平；三种方法相互对比，相互验证可看出该区表土已存在污染，综合污染整体上处于轻微污染状

态, 但综合生态风险相对较大。

如果多种评价方法的评价结果间显著相关, 表明这些评价方法具有可比性^[27-28]。单因子指数法、生态风险指数法和地累积指数法评价结果具有显著的相关性, 相关系数均达到 0.80 ($\alpha=0.01$) 以上; 单因子指数法和生态风险指数法评价结果具有高度一致性和相关性, 相关系数达到 0.94 以上, 但两者的污染评价等级均低于或等于地累积指数法, 这可

能与地累积指数法的非线性算法及参比算法有关; 综合指数法中潜在生态风险综合指数法、污染负荷指数法和内梅罗综合污染指数法评价结果显著相关, 相关系数 0.65 ($\alpha=0.01$) 以上; 三种综合指数法均与三种简单指数法对 Hg 的评价结果具有较好的相关性, 相关系数达到了 0.53 ($\alpha=0.01$) 以上, 而与 Cr、As 均无显著相关性, 这说明该区土壤三种重金属中 Hg 的污染明显 (表 6)。

表 6 不同方法评价结果的相关分析

Table 6 Correlation coefficient of the results of the evaluations

	RI	PLI	P _N	P _{Cr}	P _{Hg}	P _{As}	Cr I _{geo}	Hg I _{geo}	As I _{geo}	Cr E _r ⁱ	Hg E _r ⁱ	As E _r ⁱ
RI	1.000	0.653**	0.695**	-0.313*	0.944**	-0.353*	-0.406**	0.837**	-0.044	-0.337*	1.000**	-0.349*
PLI	0.653**	1.000	0.595**	-0.032	0.683**	0.251	0.042	0.727**	0.451**	-0.018	0.636**	0.257
P _N	0.695**	0.595**	1.000	0.200	0.643**	0.056	-0.018	0.538**	0.124	0.184	0.684**	0.058
P _{Cr}	-0.313*	-0.032	0.200	1.000	-0.284	0.005	0.862**	-0.207	-0.184	0.993**	-0.313*	0.007
P _{Hg}	0.944**	0.683**	0.643**	-0.284	1.000	-0.374*	-0.379*	0.943**	-0.121	-0.305	0.945**	-0.372*
P _{As}	-0.353*	0.251	0.056	0.005	-0.374*	1.000	0.129	-0.337*	0.805**	0.040	-0.380*	1.000**
Cr I _{geo}	-0.406**	0.042	-0.018	0.862**	-0.379*	0.129	1.000	-0.274	-0.067	0.896**	-0.409**	0.130
Hg I _{geo}	0.837**	0.727**	0.538**	-0.207	0.943**	-0.337*	-0.274	1.000	-0.149	-0.225	0.837**	-0.337*
As I _{geo}	-0.044	0.451**	0.124	-0.184	-0.121	0.805**	-0.067	-0.149	1.000	-0.156	-0.068	0.815**
Cr E _r ⁱ	-0.337*	-0.018	0.184	0.993**	-0.305	0.040	0.896**	-0.225	-0.156	1.000	-0.338*	0.041
Hg E _r ⁱ	1.000**	0.636**	0.684**	-0.313*	0.945**	-0.380*	-0.409**	0.837**	-0.068	-0.338*	1.000	-0.376*
As E _r ⁱ	-0.349*	0.257	0.058	0.007	-0.372*	1.000**	0.130	-0.337*	0.815**	0.041	-0.376*	1.000

注: “**” 0.01 水平显著相关, “*” 0.05 水平显著相关, 样本数 40 Note: The “**” 0.01 level was significantly correlated, and the “*” 0.05 level was significantly correlated with a sample size of 40

3 讨论

吉兰泰盐湖盆地土壤中普遍含有 Cr、Hg、As, 其含量、时空分布变化基本符合旱区盆地物理化学特征天然形成规律, 但存在局部高值区域可能与人类活动影响、天然特征与气候或水文地球化学演化规律相关, 如 24~18 cal ka BP 到 5.5 cal ka BP 时期, 吉兰泰湖区所在这一季风边缘区域气候干旱, 期间受到天然水文地球化学作用和古气候特征条件的影响, 干旱加剧, 湖泊开始不断萎缩, 各种化学成分

不断沉积, 盐度不断升高和富集^[29-30], Cr、Hg、As 也因此含量增高。盐湖盆地常年蒸发强烈、干旱少雨, 地下水埋深较浅区域, 地下水通过毛细作用不断向地表运移, 在地表高温蒸发条件下, 各种化学成分开始浓缩并富集在表层土壤中, 造成土壤 Cr、Hg、As 局部偏高。土壤化学组成深受成土母质影响, 西北巴音乌拉山主要为棕红色、褐红色砂质泥岩等, 东南贺兰山主要为灰绿~灰黑色混合质角闪斜长片麻岩等, 盆地内主要为石英、斜长石等^[21-22], 不同岩石矿物化学组成及含量差别显著, 造成土壤中 Cr、Hg、As 含量差异较大; 大量燃烧化石燃料、过量使

用化肥等人类活动也是导致土壤中 Cr、Hg、As 含量悬殊的重要原因之一。因此,盐湖盆地土壤中 Cr、Hg、As 含量差异及空间分布特征受到成土母质、天然水文地球化学作用、气候特征条件和人类活动等综合作用的影响。

吉兰泰盐湖盆地土壤中 Cr、Hg、As 总体具有相似的空间分布特征,这与高瑞忠^[31]等对吉兰泰盐湖盆地地下水中 Cr⁶⁺、Hg、As 的高值区分布相似,表明该区域土壤与地下水化学特征具有一定联系。本研究率定的土壤重金属元素背景值与中国环境监测总站《中国土壤元素背景值》中内蒙古、甘肃、新疆、宁夏等相近地区土壤背景值相比,整体含量 Cr 相对较低, Hg 相对较高, As 与之相近。单因子指数法、生态风险指数法和地累积指数法评价结果具有较好的相关性,相关系数均在 0.80 以上,这与周长松^[27]、谢志宜^[28]等的研究结果一致,但生态风险指数法和潜在生态风险综合指数法由于引用毒性响应系数,致使评价结果的客观性较差。多种方法评价结果对比分析表明盐湖盆地土壤重金属污染依次为 Hg、Cr、As,综合指数法得出该区表土存在污染,综合污染整体上处于轻微污染状态,且综合生态风险相对较大,尽管依据环境背景值进行评价显示盆地存在污染分布区域,但张阿龙等^[26]对吉兰泰盐湖盆地土壤 Cr、Hg、As 污染负荷特征与健康风险评价的研究表明,该区 Cr、Hg、As 污染对人体健康不造成危害,属于人体可耐受风险。不同评价指标的标准值与实测值复杂交叉,致使不同方法评价结果存在差异,故实际应用中应适当选用。盆地东北沙漠区域布点相对较少,对研究造成一定程度的影响,想要细致的掌握该区地土壤重金属污染分布状态和详细的污染来源,需在后续研究中,增加采样密度,进行分区(农业区、工业区、沙漠牧区)小尺度的详细研究,以揭示该区土壤重金属空间变异性,以及沙地土壤重金属评价与污染源查找的研究。

4 结 果

盐湖盆地表层土壤中 Cr、Hg、As 总体具有相似的空间分布特征, Cr、Hg、As 背景值分别为 27.89 mg·kg⁻¹、0.039 mg·kg⁻¹、12.83 mg·kg⁻¹,其形成受到成土母质、天然水文地球化学作用和气候特

征条件等综合作用的影响,局部受到人类活动的扰动,单因子污染指数法、综合指数法 Cr、Hg、As 整体处于轻微污染状态, Hg 较 Cr、As 存在的生态风险和综合生态风险大,且单因子污染指数法的土壤污染等级评价结果大于综合污染指数法。本研究的背景值、评价思路与成果对西北旱区盐湖盆地流域确定环境容量、生态研究、开展区域环境质量评价、社会经济发展具有一定的参考价值。

参考文献 (References)

- [1] Chen J Z, Chen J, Xie X J, et al. Soil pollution and its environmental impact. *Soils*, 2003, 35 (4): 298—303. [陈晶中, 陈杰, 谢学俭, 等. 土壤污染及其环境效应. *土壤*, 2003, 35 (4): 298—303.]
- [2] Guo W, Sun W H, Zhao R X, et al. Characteristic and evaluation of soil pollution by heavy metal in different functional zones of Hohhot. *Environmental Science*, 2013, 34 (4): 1561—1567. [郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 等. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价. *环境科学*, 2013, 34 (4): 1561—1567.]
- [3] Hong J P. *Soil pollution and prevention*. Beijing: China Agricultural Press, 2011. [洪坚平. 土壤污染与防治. 北京: 中国农业出版社, 2011.]
- [4] Dai B, Lü J S, Zhan J C, et al. Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong Province, Eastern China. *Environmental Science*, 2015, 36 (2): 507—515. [戴彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价. *环境科学*, 2015, 36 (2): 507—515.]
- [5] Zhou H, Zeng M, Zhou X, et al. Assessment of heavy metal contamination and bioaccumulation in soybean plants from mining and smelting areas of southern Hunan Province, China. *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* 2013, 32 (12): 2719—2727.
- [6] Qi J Y, Zhang H L, Li X P, et al. Concentration, spatial distribution, and risk assessment of soil heavy metals in a Zn-Pb mine district in southern China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188 (7): 413.
- [7] Zhang Y X, Song B, Chen T B, et al. Spatial distribution study and pollution assessment of Pb in soils in the Xijiang River drainage of Guangxi. *Environmental Science*, 2018, 39 (5): 2446—2455. [张云霞, 宋波, 陈同斌, 等. 广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价. *环境科学*, 2018, 39 (5): 2446—2455.]
- [8] Lui C, Song B, Zhang Y X, et al. Spatial variability and contamination of Arsenic in soils of Xijiang River Basin. *Environmental Science*, 2018, 39 (2): 899—908. [刘畅, 宋波, 张云霞, 等. 西江流域土壤砷含量空间变异与污染评价. *环境科学*, 2018, 39 (2): 899—908.]

- [9] Song B, Yang Z J, Zhang Y X, et al. Accumulation of Cd and its risks in the soils of the Xijiang River drainage Basin in Guangxi. *Environmental Science*, 2018, 39(4): 1888—1900. [宋波, 杨子杰, 张云霞, 等. 广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估. *环境科学*, 2018, 39(4): 1888—1900.]
- [10] Zheng Q Z, Wang C D, Wang S H, et al. Spatial variation of soil heavy metals in Lin'an city and its potential risk evaluation. *Environmental Science*, 2018, 39(6): 2875—2883. [郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 等. 典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价: 以临安市为例. *环境科学*, 2018, 39(6): 2875—2883.]
- [11] Zhang W C, Lü S L, Liu D Y, et al. Distribution characteristics of heavy metals in the street dusts in Xuanwei and their health risk assessment. *Environmental Science*, 2015, 36(5): 1810—1817. [张文超, 吕森林, 刘丁彘, 等. 宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估. *环境科学*, 2015, 36(5): 1810—1817.]
- [12] Dai J R, Pang X G, Song J H, et al. A study of geochemical characteristics and ecological risk of elements in soil of urban and suburban areas of Zibo City, Shandong Province. *Geology in China*, 2018, 45(3): 617—627. [代杰瑞, 庞绪贵, 宋建华, 等. 山东淄博城市和近郊土壤元素地球化学特征及生态风险研究. *中国地质*, 2018, 45(3): 617—627.]
- [13] Liu W, Yang J J, Wang J, et al. Contamination assessment and sources analysis of soil heavy metals in opencast mine of East Junggar Basin in Xinjiang. *Environmental Science*, 2016, 37(5): 1938—1945. [刘巍, 杨建军, 汪君, 等. 准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析. *环境科学*, 2016, 37(5): 1938—1945.]
- [14] Guo Y, Li Y B, Xue S G, et al. Risk analysis of heavy metal contamination in farmland soil around a bauxite residue disposal area in Guangxi. *Environmental Science*, 2018, 39(7): 3349—3357. [郭颖, 李玉冰, 薛生国, 等. 广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险. *环境科学*, 2018, 39(7): 3349—3357.]
- [15] Xu M M, Liu A F, Shi R G, et al. Characteristics of heavy metals pollution of farmland and the leaching effect of rainfall in Tianjin. *Environmental Science*, 2018, 39(3): 1095—1101. [许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 等. 天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸探究. *环境科学*, 2018, 39(3): 1095—1101.]
- [16] Wang Y J, Ou M H. Contents and distribution of soil nutrients and heavy metal elements in farmlands of Xuzhou. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(6): 1438—1450. [王玉军, 欧名豪. 徐州农田土壤养分和重金属含量与分布研究. *土壤学报*, 2017, 54(6): 1438—1450.]
- [17] Li S L, Jin Y H, Wang D, et al. Assessment of contamination and spatial distribution of Zn and Pb in roadside soils of Changbai Mountain Nature Reserve. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(2): 477—483. [李善龙, 金永焕, 王铎, 等. 长白山自然保护区道路影响域土壤 Zn 和 Pb 分布及污染分析. *土壤通报*, 2012, 43(2): 477—483.]
- [18] 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. *Wetland Science*, 2016, 14(6): 916—922. [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. *湿地科学*, 2016, 14(6): 916—922.]
- [19] State Environmental Protection Administration, State Bureau of Technical Supervision. GB15618—1995 Soil environmental quality standards. Beijing: China Standards Press, 1995. [国家环境保护总局, 国家技术监督局. GB15618—1995 土壤环境质量标准. 北京: 中国标准出版社, 1995.]
- [20] China Environmental Monitoring Station. Background value of soil elements in China. Beijing: Science Press, 1990. [中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值. 北京: 科学出版社, 1990.]
- [21] Yu Z T, Liu X Q, Wang Y, et al. Evolution of Jilantai Salt Lake, Inner Mongolia in the last 13.8 ka. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(4): 629—636. [于志同, 刘兴起, 王永, 等. 13.8ka 以来内蒙古吉兰泰盐湖的演化过程. *湖泊科学*, 2012, 24(4): 629—636.]
- [22] Gao R Z, Zhang A L, Zhang S, et al. Spatial distribution characteristics and potential ecological risk assessment of Cr, Hg and As in soils of the Salt Lack Basin in northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(7): 2532—2544. [高瑞忠, 张阿龙, 张生, 等. 西北内陆盐湖盆地土壤重金属铬、汞、砷空间分布特征及潜在生态风险评价. *生态学报*, 2019, 39(7): 2532—2544.]
- [23] Yang X Y, Yang G Z. Distribution and numerical test of soil background values. *Environmental Science*, 1983, 4(2): 17—22. [杨学义, 杨国治. 土壤背景值的布点和数值检验. *环境科学*, 1983, 4(2): 17—22.]
- [24] Xia J Q. Detailed understanding of soil environmental quality standards. Beijing: China Agricultural Press, 1994. [夏家淇. 土壤环境质量标准详解. 北京: 中国农业出版社, 1994.]
- [25] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Research*, 1980, 14(8): 975—1001.
- [26] Zhang A L, Gao R Z, Zhang S, et al. Pollution load characteristics and health risk As sessment of heavy metals Cr, Hg and As in salt lake basin of the northwest arid area, China. *Arid Zone Research*, 2018, 35(5): 1057—1067. [张阿龙, 高瑞忠, 张生, 等. 吉兰泰盐湖盆地土壤铬、汞、砷污染的负荷特征与健康风险评价. *干旱区研究*, 2018, 35(5): 1057—1067.]

- [27] Zhou C S, Zou S Z, Li L J, et al. Comparison of evaluation methods for soil heavy metals contamination. *Earth and Environment*, 2015, 43(6): 709—713. [周长松, 邹胜章, 李录娟, 等. 几种土壤重金属污染评价方法的对比. *地球与环境*, 2015, 43(6): 709—713.]
- [28] Xie Z Y, Zhang Y J, Chen D Q, et al. Research on assessment methods for soil heavy metal pollution: A case study of Guangzhou. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(7): 1329—1337. [谢志宜, 张雅静, 陈丹青, 等. 土壤重金属污染评价方法研究——以广州市为例. *农业环境科学学报*, 2016, 35(7): 1329—1337.]
- [29] Yu G, Lai G Y, Liu J, et al. Late MIS 3 climate simulations. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(1): 12—24. [于革, 赖格英, 刘健, 等. MIS3 晚期典型阶段气候模拟的初步研究. *第四纪研究*, 2003, 23(1): 12—24.]
- [30] Shi Y F, Kong Z C, Wang S M, et al. Climates and environments of the holocene Mega thermal maximum in China. *Science in China*, 1994, 37(4): 481—493.
- [31] Gao R Z, Qin Z Y, Zhang S, et al. Health risk assessment of Cr⁶⁺, As and Hg in groundwater of Jilantai salt lake basin, China. *China Environmental Science*, 2018, 38(6): 2353—2362. [高瑞忠, 秦子元, 张生, 等. 吉兰泰盐湖盆地地下水 Cr⁶⁺、As、Hg 健康风险评价. *中国环境科学*, 2018, 38(6): 2353—2362.]

(责任编辑: 卢 萍)