

喀纳斯景区土壤重金属污染及其潜在生态风险评价

王文栋, 白志强, 刘端, 郭仲军

(新疆林业科学院 森林生态研究所, 新疆 乌鲁木齐 830063)

摘要: [目的] 对喀纳斯景区土壤重金属污染及其潜在生态风险进行评价, 为景区资源科学管理和保护提供参考依据。[方法] 以喀纳斯景区为研究区, 测定土壤样品 As, Pb, Hg, Cd, Zn, Cr, 和 Cu 含量, 通过污染负荷指数对喀纳斯景区重金属污染情况进行全面评价, 采用潜在生态风险指数法对土壤重金属进行潜在生态风险评价, 并运用相关分析与主成分分析法对土壤重金属来源与污染程度进行深入分析。[结果] ①研究区表层土壤 As, Pb, Hg, Cd, Zn, Cr 和 Cu 平均含量分别为 6.48, 16.60, 0.10, 0.08, 84.71, 2.47, 32.23 mg/kg, 其中 As, Pb, Hg 和 Cd 高于新疆土壤背景值, Zn, Cr 和 Cu 低于新疆土壤背景值。②人类活动扰动强由强至弱 4 个样地, 7 种重金属含量不同, 且同一重金属在 4 个样地间具有一定差异性。③人类活动扰动强样地、人类活动扰动较强样地和人类活动扰动轻微样地 3 个样地中 Hg 为重度污染 (PLI 值分别为 5.70, 4.36, 4.64), Zn, Cr, Cu 为轻度污染。全部金属 RI 均小于 150, 研究区仅存在轻微生态危害, 但研究区 Hg 污染需关注。④7 种重金属间大多存在关系, Pb 与 Hg, Cd 和 Zn 呈显著相关 ($p \leq 0.01$)。Cd 和 Hg 来源相同可能性较大, As, Zn 和 Cu 来源可能一致。[结论] 喀纳斯景区受旅游活动干扰土壤中重金属有不同程度的积累, 土壤重金属污染愈加严重。

关键词: 重金属污染; 污染评价; 潜在生态风险; 主成分分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)06-0352-06

中图分类号: X820.3

文献参数: 王文栋, 白志强, 刘端, 等. 喀纳斯景区土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 352-357. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.06.053. Wang Wendong, Bai Zhiqiang, Liu Duan, et al. Assessment of soil heavy metal pollution and its potential ecological risk in Kanas scenic area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 352-357.

Assessment of Soil Heavy Metal Pollution and Its Potential Ecological Risk in Kanas Scenic Area

WANG Wendong¹, BAI Zhiqiang¹, LIU Duan¹, GUO Zhongjun¹

(Institute of Forest Ecology, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi, Xinjiang 830046, China)

Abstract: [Objective] The heavy metal pollution and potential ecological risk of soil in Kanas scenic area were evaluated to provide reference for scientific management and protection of scenic area resources. [Methods] The Kanas area was used as the study area to determine As, Pb, Hg, Cd, Zn, Cr, and Cu contents of soil samples, through the pollution load index. A comprehensive evaluation of the heavy metal pollution in the Kanas area was conducted. The potential ecological risk index was used to evaluate the potential ecological risk of heavy metals in the soil. The correlation analysis and principal component analysis were used to analyze the heavy metal sources and pollution levels. [Results] ① The average contents of As, Pb, Hg, Cd, Zn, Cr and Cu in the surface soil of the study area were 6.48, 16.60, 0.10, 0.08, 84.71, 2.47 and 32.23 mg.kg⁻¹, respectively, of which As, Pb, Hg and Cd were high. The soil background values in Xinjiang area, Zn, Cr and Cu are lower than the soil background values in Xinjiang area. ② The human activities were different from the 7 kinds of heavy metals, their contents were different. ③ Hg was a heavy pollution in a extremely strong disturbance plot of human activities, a strong disturbance plot of human activities, and a

收稿日期: 2018-06-10

修回日期: 2018-07-08

资助项目: 新疆阿尔泰山森林生态系统国家定位研究站运行补助项目(2018-LYPT-DW-105)

第一作者: 王文栋(1979—), 男(汉族), 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市人, 硕士, 助理研究员, 主要从事森林生态、森林水文方面的研究。
E-mail: 274295760@qq.com.

slight disturbance plot of human activity(PLI values are 5.70, 4.36, and 4.64 respectively). And Zn, Cr and Cu were slightly polluted. All metal RIs were less than 150. There was only a slight ecological hazard in the study area, but Hg pollution in the study area needed more attention. ④ Correlation analysis showed that most of the 7 heavy metals had a relationship. The sources of Cd and Hg are the same and the source of As, Zn and Cu may be the same. [Conclusions] The Kanas scenic area interferes with the accumulation of heavy metals in the soil by tourism activities, and the heavy metal pollution in the soil is more serious.

Keywords: heavy metal pollution; pollution assessment; potential ecological risk; principal component analysis

土壤为大气圈、生物圈、水圈、岩石圈的连接纽带,对污染物质有净化功能^[1]。自然状况下,土壤中残落的生物物质以及母岩形成土壤中重金属^[2]。但随着人类旅游活动的快速发展,不可避免地给土壤生态环境带来一定的负面影响。在一定程度上,旅游地土壤状况反映了旅游活动干扰所带来的土壤生态效益。随着旅游业的快速发展,景区设施建设以及大量游客进入景区,必然产生了建筑垃圾、交通排放物、生活垃圾等给旅游景区带来了大量的重金属。旅游景区土壤环境安全问题正日趋严峻,重金属污染已是影响旅游目的地土壤环境的重要因素^[3-4]。重金属具有持久性、隐蔽性、易富集、难降解等特点,其不仅通过积累而影响土壤环境质量,毒害植物正常生长,且可通过食物链进入人体,严重威胁人类健康^[5]。游客践踏、游客露营、游径建设与使用对旅游景区土壤重金属含量产生一定的影响,因此测定旅游景区重金属含量对于揭示其生物毒性及其在环境中的迁移特性以及旅游景区资源与环境的可持续发展具有重要意义。近几十年来,国内外学者对不同区域土壤重金属分布、来源、污染评价等开展了相应工作,并取得重要研究成果。其研究主要集中于城市土壤、农田土壤、矿区等区域范围,较少关注旅游目的地景区^[6-9]。研究内容则聚焦于重金属含量、分布、来源以及污染状况^[10-14],但在不同生态系统中其特征不尽相同。由于旅游景区受人为因素、季节因素影响较大,较难获取,关于旅游地重金属污染研究鲜有报道。喀纳斯景区是国家自然地质公园和国家自然保护区,自对外开放后,旅游人数倍增,旅游活动日益增加^[15-16]。但伴随旅游业的迅猛发展,喀纳斯景区的环境污染和破坏问题也日益突出^[17]。土壤对旅游干扰反应较为敏感,因此研究喀纳斯景区土壤重金属对生态系统的稳定和景区的可持续发展具有重要意义。为此,本研究以喀纳斯景区为研究区,测定土壤样品 As, Pb, Hg, Cd, Zn, Cr, 和 Cu 含量,进行土壤重金属污染及其潜在生态风险评价,试图揭示土壤重金属含量对旅游活动的响应机制,以期对景区资源科学管理和保护提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆维吾尔自治区布尔津县境内,阿尔泰山中段,跨 86°54′—87°54′E, 48°35′—49°11′N, 最高海拔 4 371 m(友谊峰)。北起卡勒玛虚,南至何乌特,东接铁外克,西到阿尔圭萨拉,南北长约 66 km,东西宽约 74 km,面积约 2.50×10⁵ hm²。年均温 0.2℃,最冷月为 1 月,最热月为 7 月,年均降水量 1 065.4 mm,年均蒸发量 1 097 mm,无霜期约 80~120 d,积雪期约 200 d。主要植物为西伯利亚落叶松(*Larix*)、阿尔泰老鹳草(*Geranium*)、狭颖鹅冠草(*Roegneria mutabilis*),土壤为草甸黑钙土。

1.2 野外采样

2017 年 6—9 月在喀纳斯景区内选择依人类活动干扰由弱至强,选择 4 个典型样地。样地 1 为老村(人类活动扰动强烈),样地 2 为新村(人类活动扰动较强烈),样地 3 为老村的路边(人类活动扰动较轻微),样地 4 为喀纳斯湖湖边(人类活动扰动轻微)。在 4 个典型样地内,进行 0—20 cm 表层土壤样品随机采样,样地 1 选择 8 个样点,样地 2 选择 13 个样点,样地 3 选择 8 个样地,样地 4 选择 13 个样地,共采集 42 个土壤样品。为避免其他金属接触以及人为影响,样品采集、研磨过程中均使用非金属类用具。采样过程中,采用 10 m×10 m 内“梅花形”布设 5 个子样点,每个子样点采集表层土壤 200 g 左右,将其充分混合后装入自封袋中。记录样点地理位置、海拔高度、植物类型以及周围的环境状况。土样带回实验室后风干、碾碎、烘干(70℃)、混合、研磨、过筛(100 目)备用。

1.3 实验室分析

土壤样品带回实验室,剔除植物残体和石块,烘干(70℃),混合研磨,过 100 目筛备用,保存。重金属含量测定参照《中华人民共和国国家标准》测定。Pb, Cd 含量测定采用石墨炉原子吸收分光光度法(GB/T17141-1997); Zn 和 Cu 火焰原子吸收光度法(GB/T17138-1997); As 含量测定采用二乙基二硫代氨基甲酸银分光光度法(GB/T17134-1997); Hg 含量测定采用冷原子吸收分光光度法(GB/T17136-1997);

Cr 含量采用火焰原子分光光度法进行测量(GB/T17138-1997)。3 次空白样和平行样,取平均值作为样品的最终金属含量。在土壤重金属含量测定过程中加入 GSS-12(国家标准土壤参比物质)进行质量控制,7 种土壤重金属回收率均未超出国家标准参比物质的允许范围。

1.4 污染负荷指数法

污染负荷指数(pollution load index, PLI)是 Tomlinson 等在重金属污染水平分级相关研究中提出的一种污染评价方法,可表达各重金属对污染的贡献程度以及重金属时空变化趋势^[18]

$$CF_i = \frac{C_i}{c_n} \quad PLI = CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n \quad (1)$$

式中:CF_i——重金属 i 的污染指数; c_i——重金属 i 的测试浓度; c_n——重金属 i 的评价标准,本研究采用新疆土壤背景值作为评价标准。详细污染等级评价标准详见表 1。

表 1 土壤重金属污染等级划分标准

污染负荷指数				潜在生态危害			
CF	污染等级评价	PLI	污染等级评价	E _j	单一因子风险程度等级	RI	生态风险等级
≤1	无污染	≤1	无污染	<40	生态危害轻微	<150	生态危害轻微
1<CF≤2	轻度污染	1<CF≤2	轻度污染	40~80	生态危害中等	150~300	生态危害中等
2<CF≤3	中度污染	2<CF≤3	中度污染	80~160	生态危害强	300~600	生态危害强
CF≥3	重度污染	CF≥3	重度污染	160~320	生态危害很强	≥600	生态危害很强
				>320	生态危害极强		

1.6 数据分析

Excel 软件进行试验数据整理,采用 SPSS 17.0 软件,进行 LSD 多重比较与 Pearson 相关分析。运用 Canoco 4.5 进行主成分分析法探求重金属来源。

2 结果与分析

2.1 喀纳斯景区土壤重金属含量特征

由表 2 可知,研究区土壤重金属 As、Pb、Hg、Cd、Zn、Cr、Cu 含量平均值依次为:Zn>Cu>Pb>As>Cr>Cd>Hg。除 Cr 超过《国家土壤环境质量》I 级

1.5 潜在生态风险指数法

运用 Hakanson 提出的潜在生态风险指数法对喀纳斯景区内土壤重金属进行潜在生态风险评价^[19]。潜在生态风险指数(RI)不仅可反映单一重金属元素的污染水平,也可体现所有重金属元素的联合效应。单一重金属元素潜在生态风险指数 E_j 和多项重金属元素综合潜在生态风险指数 RI_j 的计算公式为:

$$RI_j = \sum_i^n E_j^i = \sum_{i=1}^n (T^i \cdot C_j^i) = \sum_{i=1}^n (T^i \times \frac{C_j^i}{C_r^i}) \quad (2)$$

式中:RI_j——j 样点多种重金属综合潜在生态风险指数; E_jⁱ——j 样点重金属 i 的单项潜在生态风险指数; C_jⁱ——j 样点土壤重金属 i 的实测浓度; C_rⁱ——重金属 j 的参比值(以《国家土壤环境质量标准一级标准》为参比值)^[20]; Tⁱ——重金属 j 的毒性系数(重金属 As、Pb、Hg、Cd、Zn、Cr、Cu 的毒性系数分别为 10、5、40、30、1、2、5)。潜在生态危害等级评价标准详见表 1。

标准的限值 0.20 外,As、Pb、Hg、Cd、Zn 和 Cu 的平均值均未超出国家标准的限值。As、Pb、Cd、Zn、Cr、Cu 均未超过背景值,仅 Hg 含量超过当地背景值。As、Hg、Zn、Cu 的超标率分别为 2.38%、4.76%、16.67%和 16.67%,Cr 的超标率高达 100%,仅 Pb 和 Zn 未超标。

土壤 As、Pb、Hg、Cd、Zn、Cr 和 Cu 含量变幅均较大,As 和 Cd 的变异系数分别为 0.56 与 0.76,大于 0.5,变异较明显。研究区土壤 pH 值在 6.15~7.89 的范围内,整体偏弱碱性。

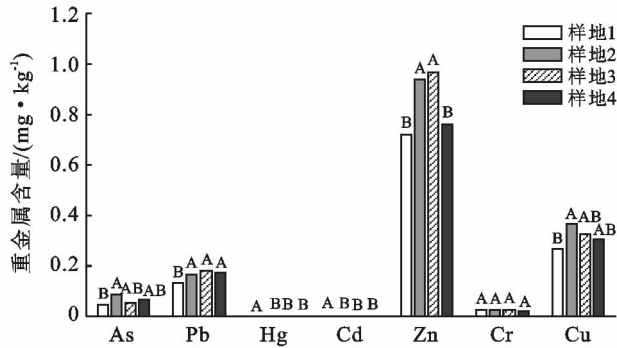
表 2 喀纳斯景区土壤重金属含量统计

指标	样本数	最大值	最小值	均值	标准差	变异系数	背景值	I 级标准值	超标率/%
As	42	24.51	1.62	6.48	3.63	0.56	11.20	15.00	2.38
Pb	42	20.60	9.70	16.60	2.45	0.15	19.40	35.00	0.00
Hg	42	0.31	0.06	0.10	0.04	0.42	0.02	0.15	4.76
Cd	42	0.33	0.02	0.08	0.06	0.76	0.12	90.00	0.00
Zn	42	142.00	38.40	84.71	20.21	0.24	68.80	100	16.67
Cr	42	4.05	0.99	2.47	1.19	0.47	49.30	0.20	100.00
Cu	42	86.90	18.10	32.23	10.07	0.31	26.70	35.00	16.67
pH 值	42	7.89	6.15	7.11	0.42	0.06	—	—	—

注:重金属含量单位为 mg/kg。

2.2 不同样地土壤重金属差异性特征分析

喀纳斯景区 7 种重金属在 4 个样地含量分布特征如图 1 所示,4 样地中均为 Zn 含量最高。同一金属元素不同样地间除 Cr 无显著差异外,其余元素均存在显著差异。Pb,Hg 和 Cd 均为样地 1 与样地 2,样地 3,样地 4 存在显著差异;As 和 Cu 样地 1 与样地 2 差异性显著;Zn 样地 1 和样地 4 与样地 2 和样地 3 差异显著。



注:大写字母为同一土壤重金属在不同样地间多重比较

图 1 喀纳斯景区重金属分布差异性特征

2.3 土壤污染指标评价及潜在生态风险评价

以新疆土壤重金属为背景值,经计算得出喀纳斯景区土壤重金属在 42 个样点单项污染指数(CF)与污染负荷指数(PLI),并依表 1 进行污染评价。单项污染指数平均值由大至小顺序依次为:Hg(4.39),Zn(1.23),Cu(1.21),Pb(0.86),Cd(0.65),As(0.58),Cr(0.05)。污染负荷指数 Hg 样地 1,2,3 均为重度污染,仅样地 4 为中度污染;Cd 仅样地 1 为轻度污染,样地 2,样地 3 和样地 4 均为无污染;Zn,Cu 仅样地 4 无污染,样地 1,样地 2 和样地 3 为轻度污染;Cr 均为轻度污染。As,Pb 重金属元素 PLI 评价结果是无污染(表 3)。旅游活动较为频繁的区域,所有重金属 PLI 污染负荷指数较高,而样地 4 湖边为旅游活动不频繁区域,所有重金属 PLI 污染负荷指数较低。单一因子风险程度等级评价结果显示,Hg 生态危害中等样本占样本总数的 4.76%,强度生态危害占样本总数的 2.38%;Cr 生态危害中等样本占样本总数的 58%;其余各元素各样本生态危害均为轻微。7 种重金属的综合潜在生态风险 RI 均为轻微生态危害。

表 3 喀纳斯景区土壤重金属土壤污染评价结果

重金属元素		As	Pb	Hg	Cd	Zn	Cr	Cu
样地 1	PLI	0.35	0.68	4.64	1.07	1.08	0.06	1.13
	污染等级	无污染	无污染	重度污染	轻度污染	轻度污染	轻度污染	轻度污染
样地 2	PLI	0.85	0.92	5.70	0.56	1.19	0.17	1.17
	污染等级	无污染	无污染	重度污染	无污染	轻度污染	轻度污染	轻度污染
样地 3	PLI	0.47	0.93	4.36	0.47	1.37	0.04	1.21
	污染等级	无污染	无污染	重度污染	无污染	轻度污染	轻度污染	轻度污染
样地 4	PLI	0.46	0.90	2.62	0.48	1.00	0.04	0.93
	污染等级	无污染	无污染	轻度污染	无污染	无污染	轻度污染	无污染

2.4 土壤重金属来源

相关分析法与主成分分析法可用以判断土壤中重金属来源。重金属含量间相关性显著或极显著,通常重金属间具有一定的同源关系或复合污染。研究区 7 种重金属相关性关系如表 4 所示,Pb 与 Hg,Cd,Zn 相关性极显著($p < 0.01$),Hg 与 Cd 相关性极显著($p < 0.01$)。As 与 Hg,Cd,Cu 相关性显著($p < 0.05$),Hg 与 Zn 相关性显著($p < 0.05$),Cd 与 Zn 相关性显著($p < 0.05$),Zn 与 Cr 相关性显著($p < 0.5$)。由此观之,上述几种重金属元素间存在一定同源关系或复合污染。

各重金属元素间相关性显著,需进行主成分分

析,进一步确定其重金属来源(图 2)。对 7 种重金属进行 PCA 后,可分类分析重金属来源。第 1 轴和第 2 轴累积贡献率高达 77.4%,由此可知前两轴能够较好地反映重金属含量信息。Cd 和 Hg 共同解释量为 48%,对研究区土壤重金属影响最大,且其重金属来源可能一致。土壤中 Hg 的污染与旅游活动紧密相关,老村、新村和老村的路边均为旅游活动极为频繁区域,受到的干扰程度更大,长期以来,产生大量 Hg 污染。As,Zn 和 Cu 这 3 种重金属元素为第二轴,解释量为 29.3%,其来源方向一样,主要为旅游活动所产生的如卫生纸、玻璃瓶、塑料制品、泡沫、卫生纸等此类固体垃圾污染。

表 4 喀纳斯景区土壤重金属元素间相关系数 mg/kg

项目	As	Pb	Hg	Cd	Zn	Cr	Cu
As	1						
Pb	0.15	1					
Hg	-0.33*	-0.40**	1				
Cd	-0.36*	-0.52**	0.72**	1			
Zn	0.26	0.35**	-0.37*	-0.36*	1		
Cr	-0.03	0.21	-0.26	-0.06	0.05*	1	
Cu	0.25*	0.08	-0.20	-0.19	0.28	0.06	1

注: * 表示 $p < 0.05$ 水平显著相关; ** 表示 $p < 0.01$ 水平极显著相关。

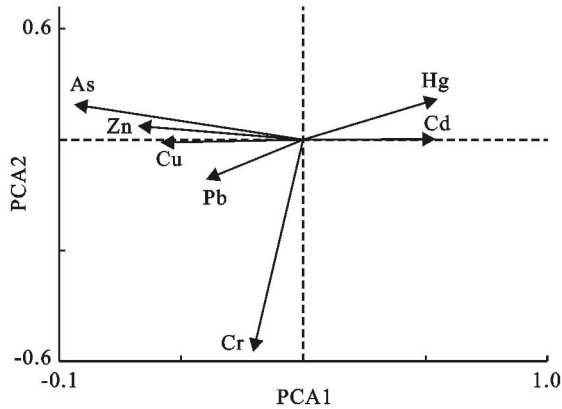


图 2 喀纳斯景区重金属含量双序图

3 讨论

3.1 重金属含量特征

研究区超标率 $As < Hg < Zn < Cu < Cr$, 说明该地区土壤中重金属 As, Hg, Zn, Cu 和 Cr 有不同程度的积累, As, Hg, Zn, Cu 和 Cr 污染可能比较显著和普遍, 其中 Cr 的污染可能最为严重。土壤重金属含量变幅大, 研究区土壤为弱碱性, 土壤重金属在弱碱性土壤环境中多以单质金属或难溶性化合物形式存在, 较难发生迁移, 伴随时间推移, 土壤重金属在土壤中的富集越来越明显^[24], 这表明喀纳斯景区土壤较大程度上长期受外源重金属污染的影响。变异系数大于 0.5, 表明重金属含量空间分布均匀程度不高, 有外源物质进入, 存在点源污染。As 和 Cd 受某些局部污染源影响较明显, 这可能是由于旅游活动的点源污染所致^[21-22]。同样地重金属间存在差异性, 这可能是由于旅游活动主要集中的区域, 受人为活动影响较大, 且外源物质进入多, 存在污染影响严重, 因此重金属分布区域不同, 其含量也不尽相同^[23-24]。同样地重金属含量存在差异性与不同金属含量在土壤中的迁移速度不同, 其富集量定然存在差异。而 Hg, Cd 和 Cr 在同一区域中含量大致相似, 可能是由于三种金属元素迁移速度差异小, 故其同一区域土壤中含量基本相同。

3.2 土壤重金属污染及风险特征与来源分析

喀纳斯景区土壤重金属污染 Hg 进入土壤的主要途径为干湿沉降^[25-28], 喀纳斯景区核心景点喀纳斯湖旅游区而四周均为村落, 特殊的地理位置, 促使大气干湿沉降加剧, 大量旅游活动进一步增大土壤中 Hg 的污染, 这与谭小爱在香格里拉景区所做研究相同^[29]。Zn 和 Cu 污染评价为轻度污染但却不存在潜在生态危害, 这是因为 Zn 和 Cu 毒性系数低(仅为 1, 5), 潜在生态危害小。Cr 污染评价和潜在生态危害相一致, 这可能是由于研究区旅游业的发展带动第三产业的发展, 产生大量生活垃圾, 导致 Cr 存在中等生态危害^[30]。除此之外游客数量较多不可避免会增加重金属的来源, 如游客鞋底(橡胶底、仿革底、塑料底等)的磨损、游客丢弃的含有重金属的垃圾(塑料杯、饮料、塑料袋、电池等)。部分游客散自带食物参观, 其散落的食物残渣中有机物含量高, 腐烂后使土壤呈酸性, 在与丢弃的金属制品接触后, 会释放出更多的重金属元素。

研究区重金属来源主要有以下两个方面: 一方面, 土壤中 As, Pb, Hg, Cd, Zn, Cr, Cu 等元素为主要的地质来源, 与地球化学成因有关^[31-32]。重金属“自然源因子”, 研究区土壤 As, Pb, Hg, Cd, Zn, Cr 和 Cu 主要受到额尔齐斯河流域土壤成土母质的控制与地质背景的影响。另一方面, 主成分分析中不同因子主要反映了各重金属超标部分的人为源差异, 喀纳斯为重要旅游活动场所, 长期的人为活动对地表环境影响较强烈, 其重金属来源中很大一部分是来自于旅游活动带来的一系列人为影响所致。

4 结论

(1) 喀纳斯景区土壤中重金属有不同程度的积累, 受旅游活动干扰频繁区域与受旅游活动干扰较大区域重金属含量不尽相同。

(2) 旅游活动日益频繁, 旅游干扰强度日益增大, 喀纳斯景区土壤重金属污染愈加严重。

(3) 7 种重金属来源虽较为复杂, 但主要原因是源于大量旅游活动以及其相关间接人为活动带来的一系列重金属积累。

[参 考 文 献]

- [1] Wilding L P, Lin H. Advancing the frontiers of soil science towards a geoscience[J]. Geoderma, 2017, 131(3): 257-274.
- [2] Wenyong Hu, Yong Chen, Biao Huang, et al. Health risk assessment of heavy metals in soils and vegetables from a typical Greenhouse vegetable production system

- in China[J]. *Human & Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2014, 20(5):1264-1280.
- [3] Pacwa-Plociniczak M, Plociniczak T, Yu D, et al. Effect of silene vulgaris and heavy metal pollution on soil microbial diversity in long-term contaminated soil[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2018, 229(1):13.
- [4] Cheng Huang, Liang Ao, Zhi Zhang. Heavy metals sedimentation risk assessment and sources analysis accompanied by typical rural water level fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(12):418-425.
- [5] 许友泽, 刘锦军, 成应向, 等. 湘江底泥重金属污染特征与生态风险评价[J]. *环境化学*, 2016, 35(1):189-198.
- [6] 李一蒙, 马建华, 刘德新, 等. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015(3):1037-1044.
- [7] Li Zhiyuan, Ma Zongwei, Tsering Jan van der Kuijp, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment. [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468(1):843-853.
- [8] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 艾尼瓦尔·买买提, 等. 博斯腾湖流域绿洲农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *地理学报*, 2017, 72(9):1680-1694.
- [9] 孙慧, 毕如田, 郭颖, 等. 广东省土壤重金属溯源及污染源解析[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(2):704-714.
- [10] 李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 等. 县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估[J]. *环境科学*, 2018, 39(1):363-370.
- [11] 王军, 陈振楼, 王初, 等. 上海崇明岛蔬菜地土壤重金属含量与生态风险预警评估[J]. *环境科学*, 2007, 28(3):647-653.
- [12] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 艾尼瓦尔·买买提, 等. 新疆焉耆盆地辣椒地土壤重金属污染及生态风险预警[J]. *生态学报*, 2018, 38(2):1075-1086.
- [13] 姚峰, 包安明, 古丽·加帕尔, 等. 新疆准东煤田土壤重金属来源与污染评价[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(10):1821-1828.
- [14] 刘巍, 王涛, 汪君, 等. 准东煤田露天矿区降尘、土壤重金属分布特征及生态风险评价[J]. *中国矿业*, 2017, 26(1):60-66.
- [15] 唐高溶, 郑伟, 王祥, 等. 旅游对喀纳斯景区植被和土壤碳、氮、磷化学计量特征的影响[J]. *草业科学*, 2016, 33(8):1476-1485.
- [16] 范子昂, 窦晓静, 邹陈, 等. 喀纳斯自然保护区林地和草地土壤呼吸速率差异及影响因素[J]. *土壤*, 2017, 49(1):189-195.
- [17] 赵梅, 邓新芳, 邵玲. 基于三大利益主体的喀纳斯生态旅游发展现状及可持续发展研究[J]. *价值工程*, 2017, 36(2):22-24.
- [18] Tomlinson D L, Wilson J G, Harris C R, et al. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index [J]. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 1980, 33(1/4):566-575.
- [19] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [20] 夏家洪. 土壤环境质量标准详解[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [21] 马建华, 朱玉涛. 嵩山景区旅游活动对土壤组成性质和重金属污染的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(3):955-965.
- [22] 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 等. 上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2017, 38(12):.
- [23] 李一蒙, 马建华, 刘德新, 等. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015, 36(3):1037-1044.
- [24] 王丹丹, 郑庆荣, 侯艳军, 等. 五台山土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *环境污染与防治*, 2017, 39(12):1327-1332.
- [25] 李永华, 杨林生, 王丽珍, 等. 基于 BCR 和 HG-ICP-AES 的矿区土壤重金属污染特征分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(9):1834-1836.
- [26] Braga A, Saldiva P, Pereira L, et al. Analysis of the air pollution health effects according to different children and adolescent age groups in São Paulo, Brazil [J]. *Epidemiology*, 2000, 11(4):97-97.
- [27] Sherman L S, Blum J D, Dvonch J T, et al. The use of Pb, Sr and Hg isotopes in Great Lakes precipitation as a tool for pollution source attribution[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 502(12):362-374.
- [28] 李霞, 张慧鸣, 徐震, 等. 农田 Cd 和 Hg 污染的来源解析与风险评价研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(7):1314-1320.
- [29] 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.
- [30] 郑海龙, 陈杰, 邓文靖, 等. 南京城市边缘带化工园区土壤重金属污染评价[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(9):1182-1188.
- [31] Boruvka L, Vacek O, Jehlicka J. Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils[J]. *Geoderma*, 2005, 128(3/4):289-300.
- [32] Fernández S, Cotos-Yáñez T, Roca-Pardiñas J, et al. Geographically weighted principal components analysis to assess diffuse pollution sources of soil heavy metal: Application to rough mountain areas in Northwest Spain[J]. *Geoderma*, 2016, 53(8):135-146.