

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

麦麦提吐尔逊·艾则孜^{1,2}, 阿吉古丽·马木提¹, 艾尼瓦尔·买买提³, 马国飞¹

(1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 2. 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室,
新疆师范大学, 乌鲁木齐 830054; 3. 新疆大学化学与化工学院, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 新疆博斯腾湖流域绿洲采集 195 个农田土壤样品, 测定其中 As、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 和 Zn 等 8 种重金属元素的含量, 基于地统计法分析农田土壤重金属空间分布规律, 采用污染负荷指数(PLI)和潜在生态风险指数(RI)评价农田土壤重金属污染和潜在生态风险程度, 并对重金属的来源进行讨论。结果表明: ① 博斯腾湖流域农田土壤 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量平均值分别超出新疆土壤背景值的 1.67 倍、1.13 倍、1.15 倍、1.29 倍、2.11 倍和 1.65 倍。② 农田土壤中 8 种重金属元素空间分布基本呈现岛状分布格局, 各金属元素在部分区域出现高值区, 表明研究区人类活动对农田土壤环境具有负面效应。③ 农田土壤 Pb 呈现中度污染, Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 轻度污染, Mn 轻微污染, As 无污染。农田土壤重金属污染负荷指数的平均值为 1.09, 呈现轻度污染态势。④ 各重金属元素单项生态风险指数平均值从大到小依次为: Cd、Ni、As、Cu、Pb、Cr、Zn。综合生态风险指数平均值为 18.63, 处于轻微生态风险态势。从生态风险程度的区域差异来看, 各县生态风险指数从大到小依次为: 和硕县、博湖县、焉耆县、和静县。⑤ 农田土壤 Cr、Cu、Mn、Ni 与 Zn 主要受到土壤地球化学成因的控制, As、Cd 和 Pb 主要受到人类活动的影响。Cd 与 Pb 是研究区主要的污染因子, 研究区农田土壤中 Cd 与 Pb 污染必须关注。

关键词: 农田; 土壤重金属; 污染评价; 生态风险; 博斯腾湖流域

DOI: 10.11821/dlxb201709012

1 引言

土壤是人类赖以生存的基本自然资源, 是净化自然环境的过滤器^[1]。区域城市化、工业化和农业集约化背景下, 具有生理毒性的物质进入土壤系统而导致土壤环境恶化、功能失调等一系列土壤安全问题, 其中重金属污染是影响土壤环境质量的主要因素之一^[2-5]。重金属由于具有潜伏性强、迁移速率慢、污染后果严重、生态环境效应复杂等特点, 不仅通过积累影响土壤的正常功能, 阻碍植物生长, 而且还通过生态系统间的循环进入人体, 威胁人类的健康, 从而受到普遍关注^[6-8]。

农产品质量与安全与农作物产地土壤环境质量有着密切的关系^[9-10]。人类活动导致的重金属污染使农田土壤环境质量不断恶化, 严重威胁农产品质量安全^[11-12]。因此, 调查和评价农田土壤环境中重金属的分布、污染以及生态风险已成为地理科学、环境科学和土壤

收稿日期: 2016-11-14; 修订日期: 2017-05-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41561073); 新疆杰出青年科技人才培养项目(qn2015jq003) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41561073; Fund for Training Program of Distinguished Young Scientists of Xinjiang, No.qn2015jq003]

作者简介: 麦麦提吐尔逊·艾则孜(1981-), 男, 维吾尔族, 新疆喀什人, 博士后, 副教授, 主要从事干旱区绿洲土壤环境安全研究。E-mail: oasiseco@126.com

科学研究的热点问题之一。研究表明^[13-15], 近年来中国农田农药高残留与重金属含量超标等问题频频出现, 农田土壤污染已成为影响农产品质量安全的重要因素之一。2014年4月环境保护部与国土资源部公布的“全国土壤污染状况调查公报”中指出, 中国土壤总点位超标率为16.1%^[16]。近年来, 国内学者对中国不同区域农田土壤重金属污染评价方面开展了不少工作^[17-21], 取得了一些重要研究成果, 但研究大多集中在经济发展程度相对较高的东部、中部地区。随着中国东部沿海地区产业向西北地区转移, 曾被称为“净土”的西北干旱区绿洲农田土壤环境受到了不同程度的重金属污染威胁^[22]。虽然也有一些学者对新疆的艾比湖流域^[23]、准东地区^[24]、奎屯垦区^[25]、乌鲁木齐^[26-28]、石河子垦区^[29]、喀什^[30]、焉耆^[31]和沙湾^[32]等绿洲农田土壤重金属污染及生态风险方面进行了研究, 但新疆绿洲农田土壤重金属污染方面较全面、系统的研究目前相对缺乏。

基于此, 本文以新疆典型内陆湖流域—博斯腾湖流域绿洲为研究区, 以绿洲农田土壤重金属污染及生态风险为研究对象, 在高密度农田土壤样品采集的基础上, 测定农田土壤样品As、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb和Zn含量, 采用地统计分析、Tomlinson污染负荷指数和Håkanson生态风险指数, 对博斯腾湖流域绿洲农田土壤中重金属的空间分布格局、污染特征、潜在生态风险以及重金属主要来源进行评估, 以此来讨论新疆绿洲现代农业化强度不断增大的背景下, 农田土壤重金属的污染及生态风险态势, 为维护绿洲农田土壤环境安全以及土壤资源科学利用提供科学依据。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

博斯腾湖流域绿洲(86°54'E~87°29'E, 41°52'N~42°22'N)位于北天山主脉的依连哈比尔尕山及其支脉科克铁克山、霍拉山中间的蒙尔宾山和南部的库鲁克塔格山组成的复杂地貌形态的中生代断陷盆地, 总面积278045 hm², 在行政区划上包括新疆维吾尔自治区和硕县、和静县、焉耆县和博湖县(图1), 是新疆绿洲经济发展的核心示范区之一。研究区气候属于暖温带大陆性干旱荒漠气候, 海拔1050~1800 m, 多年平均降水量68.1 mm, 且80%以上集中在5-9月, 多年平均蒸发量2366 mm, 多年平均气温8.63℃。盆地

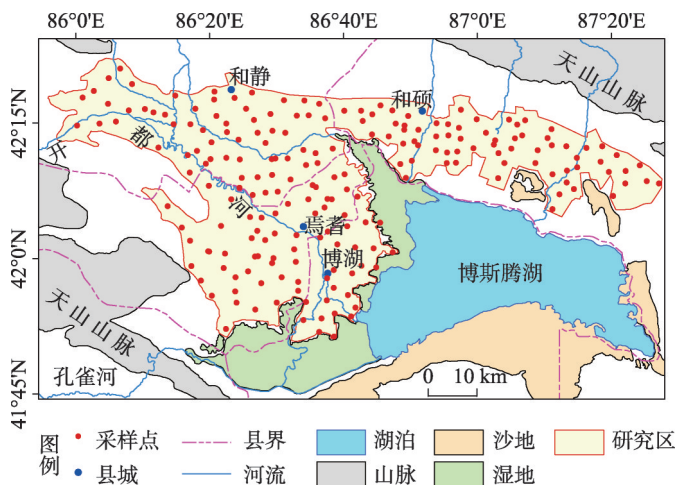


图1 博斯腾湖流域位置及采样点分布图

Fig. 1 The location of the Bosten Lake Basin and sampling points

腹地是中国最大的内陆淡水湖—博斯腾湖,因受博斯腾湖水域的调节,冷热变化不十分剧烈,日照时间长,热量较丰富, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温约 3700°C ,农作物生长期为4-9月。农作物以辣椒、番茄、小麦、玉米、向日葵等为主^[31, 33]。灌区2015年末农作物种植面积约 10.36万 hm^2 ,其中粮食播种面积约 2.81万 hm^2 ,经济作物播种面积约 7.55万 hm^2 。研究区是新疆加工辣椒主产区,加工辣椒种植面积约 1.8万 hm^2 ,辣椒加工产业已成为当地农民增收的重点产业之一。灌区土壤类型主要为灌耕草甸土、潮土、灌耕棕漠土、灌耕沼泽土、灌耕石质土与风沙土等土壤类型。其中,灌耕草甸土面积约 3.48万 hm^2 ,潮土面积约 3.16万 hm^2 ,灌耕棕漠土面积约 2.97万 hm^2 ,灌耕沼泽土面积约 0.31万 hm^2 ,灌耕石质土面积约 0.02万 hm^2 ,风沙土面积约 0.21万 hm^2 ^[31]。

研究区驻有工业番茄和工业辣椒等农作物为主的农产品生产布局。近年来从沿海城市引入了建材、冶金等重点企业和重大项目。矿产资源丰富,主要有菱镁矿、铁、煤、大理岩、石灰砂岩、食盐、芒硝、泥炭等优势矿产。近年来在国家政策调整和区域经济发展政策倾斜以及东部地区产业转移的驱动下,经济发展水平不断提高,经济开发活动强度不断增加,经济发展的水平逐渐在新疆处于前列^[31, 33]。

2.2 样品采集与处理测定

2016年5-8月在博斯腾湖流域绿洲进行表层(0~20 cm)农田土壤样品采样,总采集195个样品。样品采集过程中,参照《农田土壤环境质量监测技术规范》(NY/T 395—2000)^[34]。采样过程中,采用 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 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洁净自封塑料袋内。在取样同时,记录样点的地理位置、海拔高程、农作物类型以及周围的环境状况以备分析。将采集的土样带回实验室于室温下风干,用塑料棒碾碎,于烘箱中 70°C 烘干,最后将其充分混合,从中约40点取样约20 g进一步研磨,通过100目尼龙筛混匀后备用。为避免人为干扰及与其它金属接触,样品采集、混合、研磨和粉碎等过程中均采用塑料铲、塑料棒和玛瑙研钵等用具,并尽量选取远离公路、铁路、工厂以及居民点等污染源的,具有代表性的农田作为取样地点。

2.3 样品测定

测定方法参考了《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)^[35]。在测定Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb和Zn含量时,土壤样品采用 $\text{HNO}_3\text{-HCl-HF-HClO}_4$ 法电热板加热消解。Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb和Zn的含量用火焰原子吸收光谱仪(Agilent 200AA)测定,As含量用PERSEE原子荧光光度机(PF-7)测定。每批土样做3次空白样和平行样,取平均值作为样品的最终含量。测试过程中加入国家标准土壤参比物质(GSS-12)进行质量控制,各重金属的回收率均在国家标准参比物质的允许范围内。土壤pH值用Mettler Toledo pH计测定。测定实验在新疆大学理化测试中心进行。

2.4 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,能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^[36],其计算公式为:

$$CF_i = c_i/c_n \quad (1)$$

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times \cdots \times CF_n} \quad (2)$$

式中, CF_i 为重金属*i*的污染指数; c_i 为重金属*i*的测试浓度; c_n 为重金属*i*的评价标准,本研究采用新疆土壤背景值作为评价标准。 CF 的污染分级标准为: $CF \leq 0.7$ 属于无污染, $0.7 < CF \leq 1$ 属于轻微污染, $1 < CF \leq 2$ 属于轻度污染, $2 < CF \leq 3$ 属于中度污染,

$CF \geq 3$ 属于重度污染^[34]。 PLI 为重金属污染负荷指数, n 为参加评选的重金属元素个数; PLI 的污染分级标准为: $PLI \leq 1$ 属于无污染, $1 < PLI \leq 2$ 属于轻度污染, $2 < PLI \leq 3$ 属于中度污染, $PLI \geq 3$ 属于重度污染^[6]。

2.5 潜在生态风险指数法

采用Håkanson提出的潜在生态风险指数法对研究区农田土壤重金属进行潜在生态风险评价^[37]。潜在生态风险指数(RI)能反应单个重金属元素的污染水平, 也能表达参加评选的所有重金属元素的联合效应。该方法在不同区域农田土壤重金属污染研究中已被广泛采用^[9, 20, 38]。单一重金属元素潜在生态风险指数 E_j^i 和多项重金属元素综合潜在生态风险指数 RI_j 的计算公式如下:

$$RI_j = \sum_{i=1}^n E_j^i = \sum_{i=1}^n T^i \times C_j^i = \sum_{i=1}^n T^i \times \frac{c_j^i}{c_r^i} \quad (3)$$

式中: RI_j 为 j 样点多种重金属综合潜在生态风险指数; E_j^i 为 j 样点重金属 i 的单项潜在生态风险指数; C_j^i 为 j 样点重金属 i 的污染指数; c_j^i 为 j 样点土壤重金属 i 的实测浓度; c_r^i 为重金属 i 的参比值(以《国家土壤环境质量标准》(GB15618-1995)作为参比值)^[39]; T 为重金属 i 的毒性系数, 反映重金属在水相、固相和生物相之间的响应关系, 可以综合的反映重金属的毒性、污染水平和污染的敏感程度(重金属As、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb和Zn的毒性系数分别为10、30、2、5、1、5、5和1)^[37]。 E_j^i 的生态风险程度分级标准为: $E \leq 40$ 属于轻微风险, $40 < E \leq 80$ 属于中等风险, $80 < E \leq 160$ 属于较强风险, $160 < E \leq 320$ 属于很强风险, $E > 320$ 属于极强风险; RI 的生态风险程度分级标准为: $RI \leq 150$ 属于轻微风险, $150 < RI \leq 300$ 属于中等风险, $300 < RI \leq 600$ 属于较强风险, $600 < RI \leq 1200$ 属于很强风险, $RI > 1200$ 属于极强风险^[37]。

3 结果与分析

3.1 农田土壤重金属含量特征

描述性统计分析结果表明(表1), 博斯腾湖流域农田土壤中重金属As、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn含量平均值分别为 $6.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $55.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $30.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $503.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $34.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $40.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $113.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

表1 博斯腾湖流域土壤重金属含量统计($n=195$)
Tab. 1 Statistics of heavy metal concentrations in Bosten Lake Basin ($n=195$)

重金属元素	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	pH
最小值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.52	0.05	33.68	19.45	312.82	19.45	0.99	38.99	7.90
最大值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	63.87	0.69	123.39	73.12	789.68	55.97	96.36	911.98	9.50
平均值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	6.57	0.20	55.71	30.58	503.50	34.37	40.92	113.69	8.56
标准差($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	6.79	0.07	11.54	6.44	61.49	6.78	23.81	141.51	0.31
变异系数	1.03	0.35	0.21	0.21	0.12	0.19	0.58	1.24	0.03
新疆灌耕土背景值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	9.09	0.12	39.60	35.80	688.0	26.40	13.50	16.80	—
新疆土壤背景值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	11.20	0.12	49.30	26.70	688.0	26.60	19.40	68.80	8.10
国家土壤环境质量Ⅱ级标准($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	25.0	0.60	250.0	100.0	—	60.0	350.0	300.0	—
超标率(%)	15.38	0.51	0	0	—	0	0	6.15	—

除 Mn 没有可比的国家标准值外, As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的平均值均未超出《国家土壤环境质量》II 级标准的限值。As、Cd 和 Zn 的超标率分别为 15.38%、0.51% 和 6.15%, Cr、Cu、Ni 和 Pb 均未超标, 说明该地区土壤中重金属 As、Cd 和 Zn 有不同程度的积累, As、Cd 和 Zn 污染可能比较显著和普遍。

农田土壤 As、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 和 Zn 含量变幅都较大, 分别为 0.52~63.87 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、0.05~0.69 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、33.68~123.39 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、19.45~73.12 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、312.82~789.68 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、19.45~55.97、0.99~96.36、38.99~911.98 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤重金属在碱性条件下(研究区土壤 pH 值的平均值为 8.56)多以单质金属或难溶性化合物形式存在, 不容易发生迁移, 随着时间的推移, 土壤重金属富集越来越明显^[6], 这表明研究区农田土壤受外源重金属污染的影响。

土壤 As、Cu 和 Mn 含量的平均值未超出新疆灌耕土背景值^[40], Cd、Cr、Ni、Pb 和 Zn 含量的平均值分别超出新疆灌耕土背景值的 1.67 倍、1.41 倍、1.30 倍、3.03 倍和 6.77 倍; As 和 Mn 含量的平均值未超出新疆土壤背景值, Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量的平均值分别超出新疆土壤背景值^[23]的 1.67 倍、1.13 倍、1.15 倍、1.29 倍、2.11 倍和 1.65 倍。由于土壤背景值是未受人类活动影响下的土壤环境中重金属元素的自然含量, 重金属含量超出背景值表明在研究区农业生产及其他人类活动的影响下, 耕地土壤中重金属的聚集趋势较为明显。

变异系数(coefficient of variation)能反映各样点重金属含量的平均变异程度, 若变异系数大于 0.5, 说明重金属含量空间分布不均匀, 存在点源污染可能, 有外源物质进入所致^[41]。研究区土壤中重金属 As、Pb 和 Zn 的变异系数分别为 1.03、0.58、1.24, 均大于 0.5, 变异比较明显, 表明 As、Pb 和 Zn 受某些局部污染源的影响比较明显, 很可能是由人为来源的点源污染引起。土壤 pH 值变异系数为 0.03, 土壤理化性质较稳定。

3.2 农田土壤重金属含量空间分布特征

地统计法广泛应用于农田土壤环境中重金属污染分布的研究^[8, 19, 23]。本文基于地统计法分析农田土壤重金属含量的空间分布格局。首先利用 GS+9.0 软件确定最佳半方差函数理论模型, 然后利用 ArcGIS 10.3 软件制作空间分布图。土壤 8 种重金属含量与土壤 pH 值采用指示克里金法(indicator kriging)进行插值。指示克里金法是一种非参数估计方法, 不受特异值的影响^[42]。指示克里金法中指示变量值是 0 或 1, 通过将各样点重金属含量转换为值为 0 或 1 的二进制变量, 数据变换后, 应用二进制变量来表示采样点的种类。因此, 本研究中由指示克里金法获得的土壤重金属含量预测结果可以解析成变量的预测值为 1 的概率。采用指示变换值进行土壤中重金属变异函数模型的计算和选取。计算完成后将所求取的变异函数模型参数输入到 ArcGIS 10.3 软件中进行空间插值分析, 以此得到土壤重金属含量空间分布图。由于土壤受到点源污染会出现特异值, 采用指示克里金法进行重金属空间分布的预测精度比普通克里金法(ordinary kriging)更高^[42]。

3.2.1 半方差函数理论模型 由半方差函数理论模型的拟合结果可知(表 2), 博斯腾湖流域农田土壤中重金属 As、Cd、Cu、Mn、Ni 的变异函数理论模型均符合指数模型, Cr、Pb 和土壤 pH 值符合球状模型, Zn 符合高斯模型。各重金属元素的有效变程(a)介于 4314~7111 m 之间, 表明各重金属元素迁移、循环机制的差异。所有元素的决定系数(R^2)均大于 0.692, RSS 较小, 说明本研究中理论模型的选取符合进行地统计分析的基本要求。重金属 Mn 和 Ni 的基地效应($C_0/(C_0+C)$)小于 0.25, 这两个元素的空间变异很可能以成土母质、地形条件等结构性变异为主。Cr、Pb 和 Zn 的基地效应均大于 0.75, 表明农田土壤中这些元素的空间分布以随机性因素引起的空间变异为主, 可能是由城镇生

表2 重金属含量的半方差函数理论模型及相关参数

Tab. 2 The semivariogram model and related parameters for heavy metal concentrations

变量	理论模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	基底效应 $C_0/(C_0+C)$	变程 a/m	残差平方 RSS	决定系数 R^2
As	指数	0.188	0.286	0.657	5434	3.77E-04	0.813
Cd	指数	0.305	0.389	0.784	5266	1.51E-04	0.803
Cr	球状	0.812	0.917	0.885	6120	9.51E-04	0.895
Cu	指数	0.610	1.361	0.448	5191	1.44E-03	0.910
Mn	指数	0.103	0.478	0.215	6413	1.87E-04	0.824
Ni	指数	0.078	0.394	0.198	4664	4.93E-04	0.971
Pb	球状	2.217	1.639	1.353	4314	6.43E-03	0.692
Zn	高斯	0.294	0.36	0.817	7111	8.29E-04	0.867
pH	球状	0.195	0.855	0.228	8266	1.38E-04	0.946

活污染、工业污染、交通运输污染以及农生生产过程中的化肥、农药污染等随机因素导致的空间变异。As、Cd、Cu的基底效应介于0.25~0.75之间，呈现中等空间相关性，表明这些元素可能受到较明显的人为、自然因素综合作用。

3.2.2 农田土壤重金属空间分布特征 图2为采用指示克里金法得到的博斯腾湖流域农田土壤重金属与pH值空间分布情况。总体看，农田土壤中8种重金属元素空间分布基本呈现岛状分布格局，各重金属元素均出现含量高值区，表明该区域人类活动对农田土壤中重金属含量具有负面效应。重金属Cd、Cr和Mn含量的空间分布格局比较相似（图2b、2c、2e），既含量较高的区域主要分布于和硕县与和静县东部靠近城镇、交通干道（G30国道和南疆铁路线）附近的农田。As和Pb含量的空间分布格局比较相似（图2a、2g），并呈现面状分布格局，说明可能存在点源污染。Cu和Zn含量的空间分布格局也比较相似（图2d、2h），含量较高的区域主要分布于各县城周边城镇附近的农田。Ni含量较高的区域主要分布于焉耆县和博湖县县城南部的农田。结合研究区实际状况分析，研究区

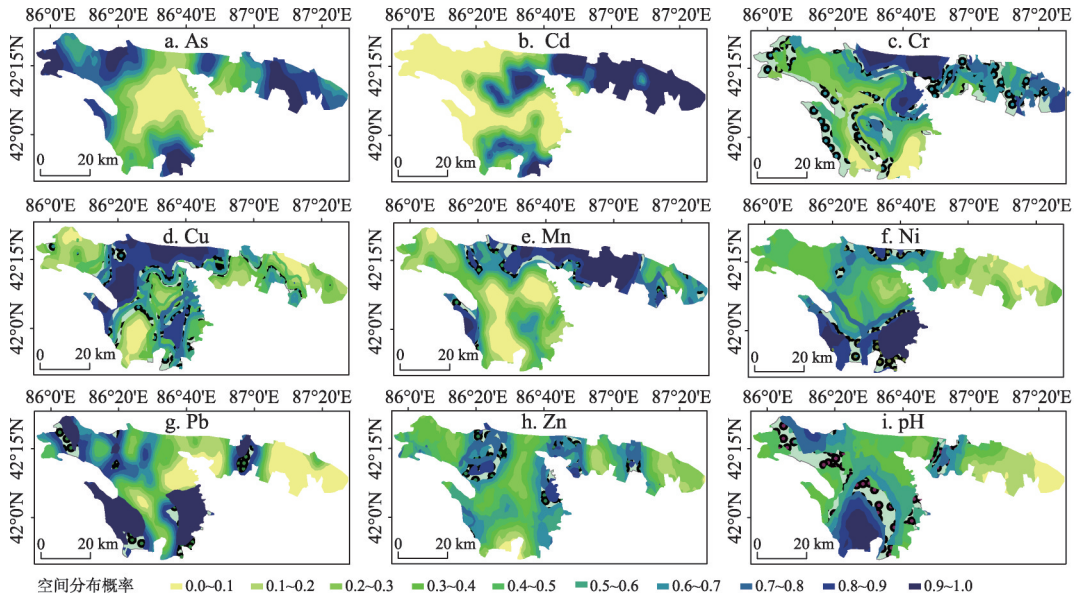


图2 博斯腾湖流域农田土壤重金属含量与pH值空间分布概率

Fig. 2 The probability of spatial distribution of heavy metal concentrations and pH value of farmland soil in Bosten Lake Basin

北部靠近县城、国道、省道以及乡镇道路周边的农田各重金属元素含量较高，该区域城镇生活、工业生产污染排放以及交通运输含重金属污染物排放可能是造成农田土壤中重金属污染的主要原因。土壤pH值高值区主要分布在博斯腾湖西南部湖滨湿地北部的农田，这可能与该区地下水埋深较小和矿化度较大引起的土壤盐碱化有关^[43]。

3.3 农田土壤重金属污染空间分布差异

由于土壤是具有空间变异性的自然综合体，各土壤样点重金属含量只能代表样点本身的土壤环境状况。而基于地统计方法，采用克里金空间插值技术，可以直观地了解土壤重金属污染的空间分布格局。图3为博斯腾湖流域农田土壤重金属单项污染指数(CF)(图3a~3h)和污染负荷指数(PLI)(图3i)的空间分布。

图3可知，8种重金属的单项污染指数反映的环境风险空间分布格局各不相同。Pb是污染程度和污染面积最大的元素，表现出区域性污染特征，在研究区西北部、东南部和西南部出现重度、中度污染；Cd是污染面积和污染程度第二大的元素，和硕县东部、博湖县南部与和静县东南部呈现中度污染态势，和静县南部存在污染高值区，属于重度污染；Zn是污染程度第三大的元素，在和硕县西存在一个污染高值区，呈现重度、中度污染；其他区域主要是轻度污染和轻微污染，其中轻度污染面积最大。Cr、Cu和Ni在研究区内大部分区域表现为轻度污染态势；As在研究区南部出现小范围的污染高值区以外，大部分区域基本表现为无污染态势，基本属于清洁水平；Mn表现出区域性分布特征，主要呈现无污染、轻度污染态势，污染程度很低。

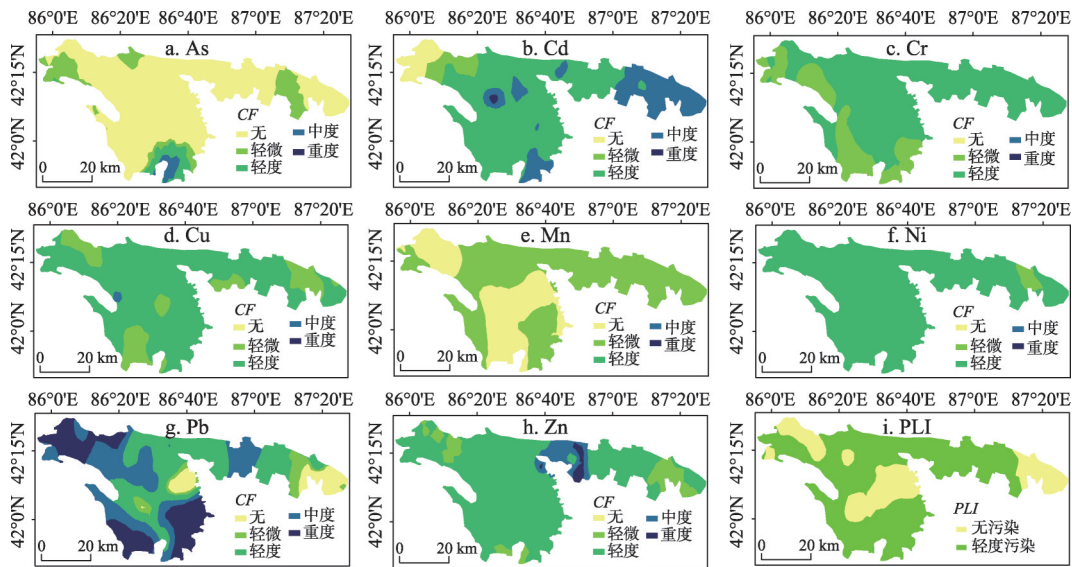


图3 博斯腾湖流域农田土壤重金属的CF与PLI空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of CF and PLI values of farmland soil heavy metals in Bosten Lake Basin

博斯腾湖流域农田土壤各重金属元素单项污染指数平均值从大到小依次为：Pb (2.10)、Cd (1.70)、Zn (1.65)、Ni (1.29)、Cu (1.15)、Cr (1.13)、Mn (0.73)、As (0.59)。Pb属于中度污染，Cd、Cr、Cu、Ni和Zn轻度污染，Mn轻微污染，As无污染。从各重金属元素不同污染级别样点数占样点总数的比例来看（表3），大部分样点As污染指数属于无污染，As无污染样点数占样点总数的76.32%；Cd无污染、轻度、轻度和重度污染样点的比例分别占样点总数的4.10%、8.72%、62.56%、23.59%和1.03%。大部分样点Cr、Cu、Ni和Zn的污染指数属于轻度污染，这些元素轻度污染样点数分别

占样点总数的66.84%、73.16%、87.37%和55.79%。Mn样点中无污染和轻微污染样点的比例较大,分别占样点总数的40.0%和58.95%。Pb的污染指数也表现出区域性分布规律,无污染、轻微、轻度、中度和重度污染样点的比例分别占样点总数的15.26%、3.69%、33.68%、23.16%和24.21%。

从博斯腾湖流域农田土壤重金属污染负荷指数(PLI)变化范围在0.59~1.84之间,平均值为1.09,呈现轻度污染。PLI属于无污染与轻度污染的样点数分别占样点总数的31.79%、68.21%。从空间分布情况来看(图3i),无污染区主要分布于和硕县东部、焉耆县和博湖县北部,以及和静县西部区域,其他区域基本表现为轻度污染。各县PLI分析结果显示,焉耆县、博湖县、和静县与和硕县PLI平均值分别为1.0、1.24、1.08和1.10,均呈现轻度污染态势。焉耆县属于无污染和轻度污染的样点数分别占样点总数的43.48%和56.52%;博湖县属于无污染和轻度污染的样点数分别占样点总数的12.0%、88.0%;和静县属于无污染和轻度污染的样点数分别占样点总数的38.33%、61.67%;和硕县属于无污染和轻度污染的样点数分别占样点总数的25.0%、75.0%(表4)。可以看出,博湖县农田土壤重金属污染程度最高,焉耆县最低。

3.4 农田土壤污染的潜在生态风险及区域差异

以国家土壤环境质量II级标准作参比值,计算得到博斯腾湖流域农田土壤重金属在各样点的单项潜在生态风险指数(E)及综合潜在生态风险指数(RI),并根据Håkanson潜在生态风险分级标准进行了生态风险评价。博斯腾湖流域农田土壤重金属单项潜在生态风险指数的平均值从大到小依次为: Cd (10.21)、Ni (2.87)、As (2.62)、Cu (1.53)、Pb (0.60)、Cr (0.45)、Zn (0.38)。所有样点As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn的潜在生态风险程度均处于轻微风险水平。博斯腾湖流域农田土壤重金属污染综合潜在生态风险指数(RI)的平均值为18.63,属于轻微生态风险,变化范围在8.74~45.36之间。按照Håkanson的评价标准,所有样点RI的潜在生态风险程度均处于轻微风险水平。从RI的空间分布格局(图4)来看,RI空间分布呈现明显的地带性分

表3 博斯腾湖流域CF不同污染级别样点数占样点总数的比例(%)

Tab. 3 Proportion of sites at different CF levels to the total number of sites in Bosten Lake Basin (%)

重金属元素	无污染	轻微污染	轻度污染	中度污染	重度污染
As	76.32	15.26	6.32	1.05	1.05
Cd	4.10	8.72	62.56	23.59	1.03
Cr	0.53	32.11	66.84	0.53	0
Cu	0	25.79	73.16	1.05	0
Mn	40.00	58.95	1.05	0	0
Ni	0	11.05	87.37	1.58	0
Pb	15.26	3.68	33.68	23.16	24.21
Zn	1.58	31.05	55.79	4.21	7.37

表4 博斯腾湖流域各县PLI不同污染级别样点数占样点总数的比例(%)

Tab. 4 Proportion of sites at different PLI levels in Bosten Lake Basin(%)

污染级别	焉耆县	博湖县	和静县	和硕县	博斯腾湖流域
无污染	43.48	12.0	38.33	25.0	31.79
轻度污染	56.52	88.0	61.67	75.0	68.21

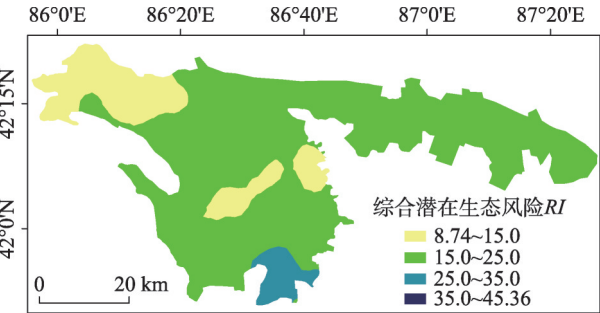


图4 博斯腾湖流域土壤重金属综合潜在生态风险分布
Fig. 4 Spatial distribution of RI for soil heavy metals in Bosten Lake Basin

布规律,博湖县南部农田土壤潜在生态风险指数最大,和静县西部、焉耆县北部以及博湖县北部区域农田土壤潜在生态风险指数较小。博斯腾湖流域所有农田土壤 RI 在空间分布上均呈现轻微生态风险态势。

从各县农田土壤重金属元素的单项潜在生态风险指数 (E) 的平均值来看,焉耆县农田土壤重金属单项潜在生态风险指数从大到小依次为: Cd (9.22)、Ni (2.98)、As (2.15)、Cu (1.57)、Pb (0.49)、Cr (0.43)、Zn (0.29); 博湖县土壤重金属单项潜在生态风险指数从大到小依次为: Cd (11.20)、As (4.79)、Ni (3.33)、Cu (1.59)、Pb (0.95)、Cr (0.40)、Zn (0.27); 和静县土壤重金属单项潜在生态风险指数从大到小依次为: Cd (8.73)、Ni (2.87)、As (2.20)、Cu (1.56)、Pb (0.67)、Cr (0.44)、Zn (0.39); 和硕县土壤重金属单项潜在生态风险指数从大到小依次为: Cd(11.98)、Ni (2.60)、As (2.49)、Cu (1.43)、Cr (0.48)、Zn (0.47)、Pb (0.41)。和硕县 Cd 的潜在生态风险程度最高,和静县 Cd 的潜在生态风险程度最低。博斯腾湖流域 4 个县所有样点土壤 As、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的潜在生态风险程度均属于轻微风险水平。从各县农田土壤重金属综合潜在生态风险指数 (RI) 的平均值来看,焉耆县、博湖县、和静县与和硕县 RI 平均值分别为 17.13、22.54、16.87 和 19.88,均处于轻微生态风险水平。和硕县农田土壤重金属污染生态风险最大,和静县生态风险最小。

3.5 农田土壤重金属来源与污染程度解析

相关分析法和主成分分析法可以用来判别土壤中重金属的来源^[3, 18, 20]。各重金属元素间相关分析结果表明(表 5),研究区土壤 Cd-Mn-Zn、Cr-Cu-Mn-Ni-Pb、Cu-Mn-Ni 与 Mn-Ni 之间的 Pearson 相关系数较高,通过了 0.01 水平的检验,As-Ni、Cu-Zn 与 Ni-Pb 之间的 Pearson 相关系数通过了 0.05 水平的检验,各重金属元素之间存在较强的相关性,说明这些元素可能有共同的人为和自然污染源。各重金属元素之间存在的较强的相关性说明进行主成分分析的必要性。

主成分分析结果表明(表 6),前两个主成分累计解释了总方差的 86.181%,符合分

表 5 博斯腾湖流域土壤重金属元素之间相关系数
Tab. 5 Correlation matrix for the heavy metals in soils of Bosten Lake Basin

元素	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
As	1							
Cd	0.052	1						
Cr	-0.054	0.019	1					
Cu	-0.004	0.035	0.256**	1				
Mn	0.028	0.217**	0.451**	0.367**	1			
Ni	0.156*	0.049	0.219**	0.460**	0.355**	1		
Pb	-0.002	-0.095	-0.362**	0.111	0.068	0.393*	1	
Zn	-0.082	0.274**	0.127	0.176*	0.110	0.101	-0.048	1

注: **: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$ 。

表 6 土壤重金属元素因子载荷
Tab. 6 Factor matrix of soil heavy metal elements

主成分	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	方差贡献率(%)	累计方差贡献率(%)
PC1	0.421	0.473	0.798	0.803	0.870	0.908	0.317	0.918	69.891	69.891
PC2	0.922	0.850	0.591	0.588	0.477	0.400	0.826	0.335	16.290	86.181

析要求, 对所有指标基本给出充分的概括。第一主成分(PC1)的方差贡献率为69.891%, Cr、Cu、Mn、Ni与Zn在PC1上具有较大载荷, 分别为0.798、0.803、0.870、0.908与0.918。对照描述性统计结果(表1), Cr、Cu、Mn、Ni的平均值接近新疆土壤背景值, 这些元素之间的相关性也较强(表5), 污染分布格局也较均匀(图3)。相关研究^[44]认为土壤中Cr、Cu、Mn、Ni和Zn等元素主要受地球化学成因影响, 主要为地质来源。因此可以把第一主成分作为重金属的“自然源因子”, 故研究区农田土壤Cr、Cu、Mn、Ni与Zn主要受到博斯腾湖流域土壤地球化学成因(成土母质)的控制。

第2主成分上重金属As、Cd和Pb具有较高的载荷, 分别为0.922、0.850与0.826。这些元素含量空间分布上均出现了较明显的高值区(图2), As、Cd和Pb平均含量与新疆土壤环境背景值差距较大。As重度污染区分布于博湖县南部区域农田, 这很可能与该区域辣椒、番茄加工产业以及交通、人口密集的旅游景观有关。已有研究表明, 农田土壤As与Cd主要来源于农药、化肥和有机肥等人类活动^[8], 农药和杀虫剂中含有Pb^[45], 干旱区绿洲农田土壤对Pb的吸附能力很大^[46]。结合采样点实际情况, As、Cd、Pb、Zn含量较高的样本主要分布于博斯腾湖流域内人口密集的城镇周边的农田和交通主干道(国道G30、南疆铁路以及省道S205、S306、S305)周边的农田。这些交通干道两侧农田土壤重金属Cd与Pb很可能来自汽车轮胎和含铅汽油的燃烧^[47]。这说明研究区工业、农业和交通运输对农田土壤中As、Cd和Pb污染的影响较明显。因此, 可以把第二主成分作为重金属的“人为源因子”。

从污染评价结果来看, Cd是研究区最主要的污染物, 对研究区污染负荷指数(PLI)和综合潜在生态风险指数(RI)的贡献非常大, 是直接导致研究区农田土壤呈现轻度污染以及轻微潜在生态风险态势的主要原因。有研究表明^[14, 48], 中国农田土壤重金属Cd含量明显高出背景值, 农田土壤每年的Cd总含量中农业活动造成的比重为56%, 说明中国农田Cd含量不同程度地受到人为活动干扰。中国不同区域农田重金属污染方面相关研究也显示, 湘南矿区^[18]、湘江中下游^[19]、广西都安县^[20]、河南省某市^[21]、株洲市^[49]、云南沱江流域^[50]、太湖地区^[51]、鄱阳湖流域^[52]、江苏省东北部^[53]、贵州兴仁县^[54]、都江堰市^[55]等区域农田土壤Cd含量平均值分别为 $24.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $2.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $4.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $4.827 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $45.017 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $5.545 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.331 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.945 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均超出国家土壤环境质量标准的下限值。

重金属Cd是农业生产过程中施用化肥和农药的标识元素^[56]。中国化肥与农药的利用效率较低, 约有70%流失到土壤、空气和水中^[8]。博斯腾湖流域4县是新疆工业番茄和工业辣椒生产基地, 近年来, 部分区域为了增加产量过度使用化肥和农药, 化肥和农药施用量高出全国平均用量^[31]。研究区长期以来的农业生产活动使Cd在土壤中明显积累。此外, 交通运输和化石燃料燃烧也是土壤Cd的重要来源^[6]。由于经济发展程度比较落后, 研究区是典型的燃煤型地区, 随着区域总人口的增加和工业发展, 原煤消耗量和机动车保有量逐年增加, 含Cd气溶胶排放量也呈现增加趋势, 这可能是城镇周边地区和交通干道周边区域的农田Cd污染较严重、生态风险较大的另一个原因。

4 结论

(1) 描述性统计分析表明, 博斯腾湖流域农田土壤As、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn的平均值分别为 $6.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $55.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $30.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $503.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $34.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $40.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $113.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 各重金属元素含

量存在一定积累。所有元素含量平均值均未超出国家土壤环境质量的限值。Cd、Cr、Ni、Pb和Zn含量的平均值分别超出新疆灌耕土背景值的1.67倍、1.41倍、1.30倍、3.03倍和6.77倍；Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn含量的平均值分别超出新疆土壤背景值的1.67倍、1.13倍、1.15倍、1.29倍、2.11倍和1.65倍。

(2) 地统计分析表明, 博斯腾湖流域农田土壤中8种重金属元素含量空间分布呈现岛状分布格局, 各重金属元素在几个地区出现高值点, 表明人类活动对农田土壤环境质量具有负面效应。As和Pb, Cd、Cr和Mn, Cu和Zn含量的空间分布格局比较相似。研究区北部靠近县城及国道、省道以及乡镇道路周边的农田各重金属元素含量较高。

(3) 博斯腾湖流域8种重金属CF值反映的环境风险得空间分布格局各不相同。各重金属元素CF值大小顺序依次为: Pb > Cd > Zn > Ni > Cu > Cr > Mn > As。Pb属于中度污染, Cd、Cr、Cu、Ni和Zn属于轻度污染。Cd与Pb是污染面积和污染程度较高, 一定程度上增加了研究区农田土壤重金属污染程度和污染范围。研究区农田土壤重金属PLI的平均值呈现轻度污染。博湖县农田土壤重金属污染程度最高, 焉耆县最低。无污染区主要分布于和硕县东部、焉耆县和博湖县北部, 以及和静县西部区域, 其它区域基本表现为轻度污染。

(4) 博斯腾湖流域农田土壤各个重金属单项潜在生态风险指数的平均值大小顺序依次为: Cd > Ni > As > Cu > Pb > Cr > Zn。研究区RI平均值呈现轻微生态风险。RI空间分布格局呈现明显的地带性分布规律, 博湖县南部农田土壤潜在生态风险指数最大, 和静县西部、焉耆县北部以及博湖县北部区域农田土壤潜在生态风险指数较小。

(5) 博斯腾湖流域农田土壤各重金属元素之间存在较强的相关性。研究区农田土壤Cr、Cu、Mn、Ni与Zn主要受到研究区土壤地球化学成因的控制; As、Cd和Pb主要受到人类活动的影响。Cd与Pb是研究区主要的污染物, 对研究区污染负荷指数和综合潜在生态风险指数的贡献较大, 是导致研究区农田土壤污染的主要元素, 研究区农田土壤中Cd与Pb污染应得到关注。

参考文献(References)

- [1] Zhu Hejian, Chen Jianfei, Chen Songlin, et al. Soil Geography. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2010. [朱鹤健, 陈建飞, 陈松林, 等. 土壤地理学. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2010.]
- [2] Zhang Zhaoyong, Ji Lili Abuduwalli, Jiang Fengqiang. Determination of occurrence characteristics of heavy metals in soil and water environments in Tianshan Mountains, Central Asia. Analytical Letters, 2013, 46(13): 2122-2131.
- [3] Chen Xiuduan, Lu Xinwei, Zhao Caifeng, et al. The spatial distribution of heavy metals in the urban topsoil collected from the interior area of the Second Ring Road, Xi'an. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(9): 1281-1288. [陈秀端, 卢新卫, 赵彩凤, 等. 西安市二环内表层土壤重金属空间分布特征. 地理学报, 2011, 66(9): 1281-1288.]
- [4] Maas S, Scheifler R, Benslama M, et al. Spatial distribution of heavy metal concentrations in urban, suburban and agricultural soils in a Mediterranean city of Algeria. Environmental Pollution, 2010, 158(6): 2294-2301.
- [5] Fang Shubo, Jia Xiaobo, An Shuqing, et al. The priority pattern for managing the potential ecological risks associated with heavy metals of the top soil on Yancheng coast. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(1): 27-35. [方淑波, 贾晓波, 安树青, 等. 盐城海岸带土壤重金属潜在生态风险控制优先格局. 地理学报, 2012, 67(1): 27-35.]
- [6] Li Yimeng, Ma Jianhua, Liu Dexin, et al. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng city, China. Environmental Science, 2015, 36(3): 1037-1044. [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. 环境科学, 2015, 36(3): 1037-1044.]
- [7] Chang C Y, Yu H Y, Chen J J, et al. Accumulation of heavy metals in leaf vegetables from agricultural soils and associated potential health risks in the Pearl River Delta, south China. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(3): 1547-1560.
- [8] Cai Limei, Ma Jin, Zhou Yongzhang, et al. Heavy metal concentrations of agricultural soils and vegetables from

- Dongguan, Guangdong province, China. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(9): 994-1003. [蔡立梅, 马瑾, 周永章, 等. 东莞市农田土壤和蔬菜重金属的含量特征分析. *地理学报*, 2008, 63(9): 994-1003.]
- [9] Sun Chao, Chen Zhenlou, Bi Chunjuan, et al. Evaluation on environmental quality of heavy metals in agricultural soils of Chongming Island, Shanghai. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(5): 619-628. [孙超, 陈振楼, 毕春娟, 等. 上海市崇明岛农田土壤重金属的环境质量评价. *地理学报*, 2009, 64(5): 619-628.]
- [10] Yu Yuanyaun, Huang Yufei, Song Bo, et al. Investigation and health risk assessment of heavy metal content in soil and agricultural products in mining area of Nandan County. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(11): 2133-2135. [余元元, 黄宇妃, 宋波, 等. 南丹县矿区周边土壤与农产品重金属含量调查及健康风险评价. *环境化学*, 2015, 34(11): 2133-2135.]
- [11] Gray C W, McLaren R G, Roberts A H C. The effect of long-term phosphatic fertiliser applications on the amounts and forms of cadmium in soils under pasture in New Zealand. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 54: 267-277.
- [12] Yang Pingguo, Mao Renzhao, Shao Hongbo, et al. An investigation on the distribution of eight hazardous heavy metals in the suburban farmland of China. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 167(1): 1246-1251.
- [13] Zheng Shunan, Tang Jiewei, Zheng Hongyan, et al. Pollution characteristics and risk assessments of mercury in wastewater-irrigated paddy fields. *China Environmental Science*, 2015, 35(9): 2729-2736. [郑顺安, 唐杰伟, 郑宏艳, 等. 灌溉区稻田汞污染特征及健康风险评价. *中国环境科学*, 2015, 35(9): 2729-2736.]
- [14] Zhang Xiaomin, Zhang Xiuying, Zhong Taiyang, et al. Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China. *Environmental Science*, 2014, 35(2): 692-703. [张小敏, 张秀英, 钟太洋, 等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究. *环境科学*, 2014, 35(2): 692-703.]
- [15] Teng Wei, Liu Qi, Li Qian, et al. Hazard and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution on Agricultural Products. Beijing: Chemical Industry Press, 2010. [腾威, 柳琪, 李倩, 等. 重金属污染对农产品的危害与风险评估. 北京: 化学工业出版社, 2010.]
- [16] Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. National Soil Pollution Survey of China. 2014. [环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报. 2014.]
- [17] Jiang Yijun, Hu Xuefeng, Shu Ying, et al. Accumulation of heavy metals in the soil-rice system and assessment of dietary safety of the rice produced in the paddy fields: A case study of a town in the northern part of Hunan Province, China. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2): 410-420. [蒋逸骏, 胡雪峰, 舒颖, 等. 湘北某镇农田土壤—水稻系统重金属累积和稻米食用安全研究. *土壤学报*, 2017, 54(2): 410-420.]
- [18] Hu Miao, Wu Jiaqiang, Peng Peiqin, et al. Assessment model of heavy metal pollution for arable soils and a case study in a mining area. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(2): 423-430. [胡淼, 吴家强, 彭佩钦, 等. 矿区耕地土壤重金属污染评价模型与实例研究. *环境科学学报*, 2014, 34(2): 423-430.]
- [19] Guo Zhaohui, Xiao Xiyuan, Chen Tongbin, et al. Heavy metal pollution of soils and vegetables from midstream and downstream of Xiangjiang River. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(1): 3-11. [郭朝晖, 肖细元, 陈同斌, 等. 湘江中下游农田土壤和蔬菜的重金属污染. *地理学报*, 2008, 63(1): 3-11.]
- [20] Wu Yang, Yang Jun, Zhou Xiaoyong, et al. Risk assessment of heavy metal contamination in farmland soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China. *Environmental Science*, 2015, 36(8): 2964-2971. [吴洋, 杨军, 周小勇, 等. 广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价. *环境科学*, 2015, 36(8): 2964-2971.]
- [21] Chen Zhifan, Fan Lidong, Chen Yunzeng, et al. Spatial distribution and source analysis of heavy metals in agricultural soils in a peri-urban area based on IDW interpolation and chemical fractions: A case study in Henan Province. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(4): 1317-1327. [陈志凡, 范礼东, 陈云增, 等. 城乡交错区农田土壤重金属总量及形态空间分布特征与源分析: 以河南省某市东郊城乡交错区为例. *环境科学学报*, 2016, 36(4): 1317-1327.]
- [22] Wang Mei'e, Peng Chi, Chen Weiping. Impacts of industrial zone in arid area in Ningxia province on the accumulation of heavy metals in agricultural soils. *Environmental Science*, 2016, 37(9): 3532-3539. [王美娥, 彭驰, 陈卫平. 宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响. *环境科学*, 2016, 37(9): 3532-3539.]
- [23] Zhang Zhaoyong, Jilili Abuduwaili, Jiang Fengqing, et al. Environment risk and chemical forms of heavy metals in farmland of Ebinur basin. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(9): 1198-1206. [张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清, 等. 艾比湖流域农田土壤重金属的环境风险及化学形态研究. *地理科学*, 2015, 35(9): 1198-1206.]
- [24] Bao Anming, Guli Jiapaer, Yin Junqi, et al. Soil heavy metal sources and pollution assessment in the coalfield of east Junggar Basin in Xinjiang. *China Environmental Science*, 2013, 33(10): 1821-1828. [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. *中国环境科学*, 2013, 33(10): 1821-1828.]

- [25] Luo Yanli, Zheng Chunxia, Jiang Ping'an, et al. Assessment of ecological risk of heavy metals in soils in Kuitun, Xinjiang. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(5): 1247-1252. [罗艳丽, 郑春霞, 蒋平安, 等. 新疆奎屯垦区土壤重金属风险评价. *土壤通报*, 2012, 43(5): 1247-1252.]
- [26] Zheng Jiang, Zhang Jiangli, Yu Hong, et al. Assessment of farmland soil heavy metal pollution in Urumqi Midong sewage irrigation region. *Arid Environmental Monitoring*, 2012, 26(1): 17-21. [郑江, 张江丽, 于洪, 等. 乌鲁木齐市米东污灌区农田土壤重金属污染评价. *干旱环境监测*, 2012, 26(1): 17-21.]
- [27] Qian Yi, Yu Hong, Wang Ling. Spatial distribution of heavy metal content in the farmlands from Midong District of Urumqi. *Arid Land Geography*, 2013, 36(2): 303-310. [钱翌, 于洪, 王灵. 乌鲁木齐市米东区农田土壤重金属含量的空间分布特征. *干旱区地理*, 2013, 36(2): 303-310.]
- [28] Yi Zhiwu, Wang Ling, Qian Yi, et al. Heavy metal contents and evaluation of farmland soil in Urumqi. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23(2): 150-154. [易治伍, 王灵, 钱翌, 等. 乌鲁木齐市农田土壤重金属含量及评价. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(2): 150-154.]
- [29] Lou Changan, Pan Neng, Wen Wen, et al. Assessment and analysis of heavy metal content in farmland soil in Shihezi reclamation area. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2013, 31(5): 541-548. [娄长安, 潘能, 文雯, 等. 石河子垦区农田土壤重金属含量与风险评价. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2013, 31(5): 541-548.]
- [30] Zha Xianghao, Zhang Wenhe, Yi Haiyan, et al. Research on characteristics of agricultural soil heavy metal pollution evaluation in Kashgar. *Hubei Agricultural Sciences*, 2016, 55(15): 3891-3894. [查向浩, 张文河, 易海艳, 等. 喀什市农田土壤重金属污染评价研究. *湖北农业科学*, 2016, 55(15): 3891-3894.]
- [31] Mamattursun Eziz. *Environmental Evolution and Ecological Security in Inner River Basin*. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2016. [麦麦提吐尔逊·艾则孜. *内陆河流域环境演变与生态安全*. 北京: 北京理工大学出版社, 2016.]
- [32] Lai Yingshuai, Ma Yuanyuan, Wang Wei, et al. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of soils in Shawan of Xinjiang. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2016, 34(4): 518-523. [赖营帅, 马媛媛, 王卫, 等. 新疆沙湾地区土壤重金属污染及潜在生态风险的评价. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2016, 34(4): 518-523.]
- [33] Zulpiya Mamat, Hamid Yimit, Mamattursun Eziz, et al. Analysis of the ecology-economy coordination degree in Yanqi basin, Xinjiang, China. *Asian Journal of Chemistry*, 2013, 25(16): 9034-9040.
- [34] NY/T 395-2000. Technical specification for farmland soil environmental quality monitoring. [NY/T 395-2000. 农田土壤环境质量管理技术规范.]
- [35] HJ/T 166-2004. Technical specification for soil environmental monitoring. [HJ/T 166-2004. 土壤环境监测技术规范[S].]
- [36] Tomlinson D L, Wilson J G, Harris C R, et al. Problems in the assessment of heavy metals levels in estuaries and the formation of pollution index. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 1980, 33(1-4): 566-575.
- [37] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [38] Wang Shuang, Li Ronghua, Zhang Zengqiang, et al. Assessment of the heavy metal pollution and potential ecological hazardous in agricultural soils and crops of Tongguan, Shaanxi Province. *China Environmental Science*, 2014, 34(9): 2313-2320. [王爽, 李荣华, 张增强, 等. 陕西潼关农田土壤及农作物重金属污染及潜在风险. *中国环境科学*, 2014, 34(9): 2313-2320.]
- [39] GB15618-1995. Environmental Quality Standard for Soils. Beijing: Standards Press of China, 1997. [GB15618-1995. 土壤环境质量标准. 北京: 中国标准出版社, 1997.]
- [40] Zheng Guozhang. *Theory and Practice of Research on Heavy Metal Pollution in Agricultural Soil*. Beijing: China Environmental Science Press, 2007. [郑国璋. *农业土壤重金属污染研究的理论与实践*. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.]
- [41] Lei Guojian, Chen Zhiliang, Liu Qianjun, et al. The assessments of polluted degree and potential ecological hazards of heavy metals in suburban soil of Guangzhou city. *China Environmental Science*, 2013, 33(增刊1): 49-53. [雷国建, 陈志良, 刘千钧, 等. 广州郊区土壤重金属污染程度及潜在生态危害评价. *中国环境科学*, 2013, 33(Suppl.1): 49-53.]
- [42] Tang Guoan, Yang Xin. *ArcGIS Spatial Analysis Experiments for Geographic Information System*. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2012. [汤国安, 杨昕. *ArcGIS地理信息系统空间分析实验教程*. 2版. 北京: 科学出版社, 2012.]
- [43] Mamattursun Eziz, Mihrigul Anwar, Mardan Abla, et al. Geochemical characteristics of groundwater in Yanqi basin.

- Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(4): 263-268. [麦麦提吐尔逊·艾则孜, 米热古丽·艾尼瓦尔, 麦尔丹·阿不拉, 等. 新疆焉耆盆地地下水地球化学特征. 水土保持研究, 2016, 23(4): 263-268.]
- [44] Boruvka L, Vacek O, Jehlicka J. Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils. *Geoderma*, 2005, 128: 289-300.
- [45] Filzek P D B, Spurgeon D J, Broll G, et al. Pedological characterisation of sites along a transect from a primary cadmium/lead/zinc smelting works. *Ecotoxicology*, 2004, 13(8): 725-737.
- [46] Hu Xiaona, Nan Zhongren, Wang Shengli, et al. Sorption and desorption of copper, zinc and lead in the irrigated desert soil from the oasis in the arid regions, Northwest China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6): 2183-2188. [胡小娜, 南忠仁, 王胜利, 等. 干旱区绿洲灌漠土 Cu、Zn 和 Pb 的吸附解吸特征. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2183-2188.]
- [47] Li Tao, Li Canyang, Yu Danna, et al. Effects of heavy metals from road traffic on the community structure and spatial distribution of cropland soil animals. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(18): 5001-5011. [李涛, 李灿阳, 俞丹娜, 等. 交通要道重金属污染对农田土壤动物群落结构及空间分布的影响. 生态学报, 2010, 30(18): 5001-5011.]
- [48] Lei Luo, Ma Yibing, Zhang Shuzhen, et al. An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(8): 2524-2530.
- [49] Li Xiaoyong, Chen Xiaoyin. Characteristics of heavy metals pollution and health risk assessment in farmland soil of Zhuzhou. *Journal of Guilin University of Technology*, 2016, 36(3): 545-549. [李晓勇, 陈肖胤. 株洲市农田土壤重金属污染特征及风险评价. 桂林理工大学学报, 2016, 36(3): 545-549.]
- [50] Zhao Xiaoqing, Li Lijiao, Yang Honghui, et al. The geochemical characteristics of heavy metals in agricultural soils of the Bijiang Watershed in Yunnan Province. *Acta Geoscientica Sinica*, 2012, 33(3): 331-340. [赵筱青, 李丽娇, 杨红辉, 等. 云南泇江流域农田土壤重金属 Pb、Zn、Cd、As 的地球化学特征. 地球学报, 2012, 33(3): 331-340.]
- [51] Liu Honglian, Li Yanhui, Li Lianqing, et al. Pollution and risk evaluation of heavy metals in soil and agro-products from an area in the Taihu Lake region. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(5): 60-63. [刘洪莲, 李艳慧, 李恋卿, 等. 太湖地区某地农田土壤及农产品中重金属污染及风险评价. 安全与环境学报, 2006, 6(5): 60-63.]
- [52] Ye Jiamin, Yu Houping, Jian Minfei, et al. The ecological risk assessment of the heavy metals pollution on the typical wetland and farmland of Poyang Lake. *Journal of Jiangxi Normal University (Natural Science)*, 2016, 40(4): 429-436. [叶嘉敏, 余厚平, 简敏菲, 等. 鄱阳湖流域农田重金属污染的生态风险评估. 江西师范大学学报(自然科学版), 2016, 40(4): 429-436.]
- [53] Chen Jingdu, Dai Qigen, Xu Xuehong, et al. Heavy metal contents and evaluation of farmland soil and wheat in typical area of Jiangsu Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(11): 3487-3496. [陈京都, 戴其根, 许学宏, 等. 江苏省典型区农田土壤及小麦中重金属含量与评价. 生态学报, 2012, 32(11): 3487-3496.]
- [54] Pang Wenpin, Qin Fanxin, LYU Yachao, et al. Chemical speciations of heavy metals and their risk assessment in agricultural soils in a coal mining area from Xingren County, Guizhou Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(5): 1468-1478. [庞文品, 秦樊鑫, 吕亚超, 等. 贵州兴仁煤矿区农田土壤重金属化学形态及风险评估. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1468-1478.]
- [55] Yang Keyan, Xiong Wei, Luo Yang, et al. Analysis and assessment on pollution condition of heavy metals in soil in the farmland around Dujiangyan City. *Environmental Monitoring in China*, 2011, 27(5): 10-16. [杨克燕, 熊伟, 罗阳, 等. 都江堰市城区周边农田土壤重金属污染状况分析与评价. 中国环境监测, 2011, 27(5): 10-16.]
- [56] Gray C W, McLaren R G, Roberts A H C. The effect of long-term phosphatic fertiliser applications on the amounts and forms of cadmium in soils under pasture in New Zealand. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 54: 267-277.

Assessment of heavy metal pollution and its potential ecological risks of farmland soils of oasis in Bosten Lake Basin

Mamattursun EZIZ^{1,2}, Ajigul MAMUT¹, Anwar MOHAMMAD³, MA Guofei¹

(1. College of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China;

2. Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Xinjiang Normal University,

Urumqi 830054, China; 3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang University,

Urumqi 830046, China)

Abstract: A total of 195 soil samples of farmland were collected from oasis in the Bosten Lake Basin, Xinjiang, and the concentrations of eight heavy metal elements (As, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn) were identified by standard methods. The spatial distribution of soil heavy metals in farmland was analyzed based on geostatistical analysis, while the pollution load index (*PLI*) and potential ecological risk index (*RI*) were employed to the assessment of the soil heavy metal pollution levels and potential ecological risk. Then the main sources of heavy metals were discussed. Results showed that: (1) The average value of the contents of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn exceeded by 1.67, 1.13, 1.15, 1.29, 2.11 and 1.65 times of the soil background value of Xinjiang, respectively. (2) The spatial distribution of eight heavy metals showed an island-like pattern, and all the heavy metal elements showed high value areas in some parts of the study area, indicating the negative effects of human activities on soil environment of farmlands. (3) Pb presented a moderate pollution, whereas Cd, Zn, Ni, Cu and Cr a light pollution, Mn a slight pollution and As no pollution for farmland soils. The average *PLI* value of the heavy metals was 1.09, which showed a slight pollution. (4) The average *E* value for each heavy metal element was ranked as: Cd > Ni > As > Cu > Pb > Cr > Zn. The average *RI* value was 18.63, which showed a slight ecological risk situation. In terms of regional differences, the ecological risk index was ranked as: Hoshut County > Baghrash County > Karashahar County > Hejing County. (5) Cr, Cu, Mn, Ni and Zn contents were controlled mainly by the soil geochemical genesis and As, Cd and Pb were mainly affected by human activities. Cd and Pb were the main pollution sources of farmland soils, which should be given more attention.

Keywords: farmland; soil heavy metal; pollution assessment; ecological risk; Bosten Lake Basin