

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2020013002

张成丽, 钱静, 雷雨辰, 等. 开封市西瓜种植地土壤重金属污染及风险评价[J]. 环境化学, 2021, 40(6): 1714-1722.

ZHANG Chengli, QIAN Jing, LEI Yuchen, et al. Sources of heavy metal pollution and risk assessment of soil in watermelon planting areas in Kaifeng City[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40 (6): 1714-1722.

开封市西瓜种植地土壤重金属污染及风险评价*

张成丽^{1,2,3,4} 钱静¹ 雷雨辰¹ 聂建欣⁵ 马建华¹ 张君丽^{6**}

(1. 河南大学环境与规划学院, 开封, 475001; 2. 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室(河南大学), 开封, 475001; 3. 河南大学环境与规划国家级实验教学示范中心, 开封, 475001; 4. 河南省高等学校工程技术研究中心环境与健康工程技术研究中心(河南大学), 开封, 475001; 5. 复旦大学环境科学与工程系, 上海, 200433; 6. 河南大学生命科学学院/作物逆境适应与改良国家重点实验室, 开封, 475001)

摘要 为了解开封市西瓜种植区土壤重金属污染特征, 选取范村、西姜寨、杏花营、朱仙镇等4个乡镇西瓜种植区, 采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)对种植区土壤样品中Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb等6种重金属进行检测分析. 结果表明, 以河南省A层土壤背景为依据, 开封市西瓜地土壤重金属Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb均不同程度的超出背景值. 6种重金属的变异系数均在10%—100%之间, 其中Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb分别超出农用地土壤污染风险筛选值17.60%、0.75%、11.24%、13.11%、80.52%和0.75%. 依照单因子指数法对各采样区土壤进行评价, 西瓜种植区朱仙镇土壤Cr与Zn处于轻微污染, 其余采样区无污染; 各采样区Ni、Cu和Pb均处于无污染状态; Cd均处于轻微污染状态. 内梅罗综合污染指数分析结果表明, 西姜寨、杏花营、朱仙镇处于轻度污染状态, 范村处于警戒级状态. 潜在生态风险评价表明, 西瓜种植区土壤Cd存在极强生态风险, 其余均有轻微的生态风险, 且Cd是构成生态危害的主要风险因子. 由相关性以及主成分分析结果可知, pH与Cr、Cu、Ni、Zn、Cd、Pb均在0.01置信度水平下呈显著负相关, 开封市西瓜种植地土壤重金属的污染源主要为农业源.

关键词 开封市, 西瓜种植区, 土壤重金属, 主成分分析.

Sources of heavy metal pollution and risk assessment of soil in watermelon planting areas in Kaifeng City

ZHANG Chengli^{1,2,3,4} QIAN Jing¹ LEI Yuchen¹ NIE Jianxin⁵
MA Jianhua¹ ZHANG Junli^{6**}

(1. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng, 475001, China; 2. Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions (Henan University), Ministry of Education, Henan University, Kaifeng, 475001, China; 3. National Demonstration Center for Environmental and Planning, Henan University, Kaifeng, 475001, China; 4. Henan Engineering Research Center for Control & Remediation of Soil Heavy Metal Pollution (Henan University), Kaifeng, 475001, China; 5. Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai, 200433; 6. State Key Laboratory of Crop Stress Adaptation and Improvement, School of Life Sciences, Henan University, Kaifeng, 475001, China)

2020年1月30日收稿(Received: January 30, 2020).

* 国家自然科学基金(41601522), 中国博士后科学基金(2017M612387), 河南省博士后科研项目(001701033)和2018年度河南省社科普及规划项目(1076)资助.

Supported by the National Natural Science Youth Foundation of China (41601522), China Postdoctoral Science Foundation (2017M612387), Henan Provincial Postdoctoral Research Project (001701033) and the 2018 Henan Provincial Social Science Popularization Planning Project (1076).

** 通讯联系人 **Corresponding author**, E-mail: zhangjunli0522@163.com

Abstract In order to evaluate the soil heavy metal pollution and health risk of watermelon planting region in Kaifeng, four watermelon planting region including Zhuxianzhen, Fancun, Xijiangzhai and Xinghuaying in Kaifeng city was selected as the study area, and the contents of Cr, Ni, Cu, Zn, Cd and Pb were monitored and analyzed by inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS). The results showed that heavy metals of Cr, Ni, Cu, Zn, Cd and Pb were all exceeded the A layer soil background value of Henan Province to a varying degree. The coefficient of variation of the six heavy metals was between 10% and 100%. The over-standard rate of Cr, Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in the soil was calculated to be 17.60%, 0.75%, 11.24%, 13.11%, 80.52% and 0.75% respectively, by “soil pollution risk screening value of agricultural land”. According to the single-factor exponential method, the Zhuxianzhen watermelon planting region was slightly polluted by Cr and Zn, the remaining sampling areas had not been polluted. All sampling areas had not been polluted by Ni, Cu and Pb, while slightly polluted by Cd. The analysis results of Nemeruo comprehensive pollution index showed that Xijiangzhai, Xinghuaying and Zhuxianzhen were in a state of light pollution, and Fancun was in a state of alert. Based on the calculation of the potential ecological risk index, it was found that strong ecological harm in the investigated region with Cd as the major pollution factor, and other metals were of slight risk to the environment. From the correlation analysis and principal component analysis, it could be seen that pH was significantly negatively correlated with Cr, Cu, Ni, Zn, Cd and Pb at the level of 0.01 confidence, the pollution sources of heavy metals were mainly agricultural sources in watermelon planting soil in Kaifeng City.

Keywords Kaifeng City, watermelon planting area, soil heavy metals, principal component analysis.

土壤作为农作物生产的基础和载体,其环境质量的优劣直接影响到农产品安全^[1-2]。2014年全国土壤污染状况调查发现:耕地土壤点位超标率为19.4%,无机污染物超标点位占全部超标点位的82.8%^[3]。工业“三废”的排放、农田污水的灌溉等问题致使土壤中重金属含量不断累积,不仅导致农作物产量下降和质量降低,还可通过食物链危害人类健康^[4-6]。

近年来,国内外学者对农业区土壤重金属污染含量、来源及风险评价进行大量的研究,Mungai等^[7]对东非肯尼亚农田土壤中8种重金属Zn、Pb、Cr、Cu、As、Ni、Hg和Cd进行了研究分析,结果表明,8种重金属均超过美国农业土壤标准值,并分析发现农业土壤中8种重金属的污染源主要来自人为活动和自然风化。李伟迪等^[8]以太湖流域土壤背景值为基准,利用单因子指数和内梅罗指数评价农田土壤重金属污染状况,结果表明87.29%样点的土壤重金属呈现轻度污染,5.93%样点呈现中度污染,6.78%样点呈现重度污染;卢鑫等^[9]应用UNMIX模型进行了土壤重金属源解析的研究可知,云南省会泽县铅锌矿区农田土壤样品的3个土壤重金属污染来源分别为工业活动造成的人为污染源、燃煤和施肥导致的人为污染源与自然的综合污染源。王小莉等^[10]对开封市城乡交错区农田土壤重金属(Cd、Pb、Cu、Ni、Zn和Cr)进行研究,结果表明该区农田土壤Cd和Hg为重度污染,Zn、Pb和Cu为轻度污染,Ni、Cr和As处于无污染状态,其来源主要与人类活动有关。开封市位于河南省中部偏东,黄河冲击平原的东端^[11],西瓜是开封市重要的高效经济作物,常年西瓜种植面积保持在4万hm²以上,居全国前列^[12]。开封市西瓜种植地土壤的环境质量直接影响着当地居民的食品安全和身体健康,开展以重金属为目标的开封市西瓜种植地土壤环境质量状况调查十分必要。

目前,开封市内土壤重金属的相关研究主要集中在城郊污灌区含量、分布及环境质量的评价^[13-14]。然而针对开封市西瓜种植土壤重金属污染情况的调查以及来源分析,鲜有报道。本文采用野外调查和实验分析相结合,利用单因子指数和内梅罗指数评价土壤重金属污染状况。并在评价农田土壤重金属状况的基础上,结合主成分分析,明确开封市西瓜种植地土壤重金属的污染来源对土壤重金属污染情况,为该区土壤重金属污染防治、保障瓜果的食用安全提供科学依据。

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 研究区概况与样品来源

开封市位于东经 114°07′—114°43′, 北纬 34°30′—34°56′, 属黄河、淮河合力冲击平原的组成部分, 海拔高度在 62.5—89.3 m 之间, 暖温带大陆性季风气候, 年平均气温 14 ℃, 年降水量为 628 mm, 无霜期 214 d. 土壤类型是潮土, 质地为沙壤土, 土壤 pH 值约为 8.4, 呈碱性. 该区雨水丰沛, 气候适宜, 适宜西瓜生长. 开封西瓜种植区划定的地域保护范围为兰考县、杞县、通许县、尉氏县、祥符区、龙亭区, 选取祥符区农业过渡地带的范村、西姜寨、杏花营、朱仙镇的 4 个乡镇西瓜种植区为代表进行分析. 目前, 该区有 50 万亩西瓜种植规模, 是全国西瓜市场的主产地, 图 1 为开封市西瓜种植区位置及采样点分布示意图.

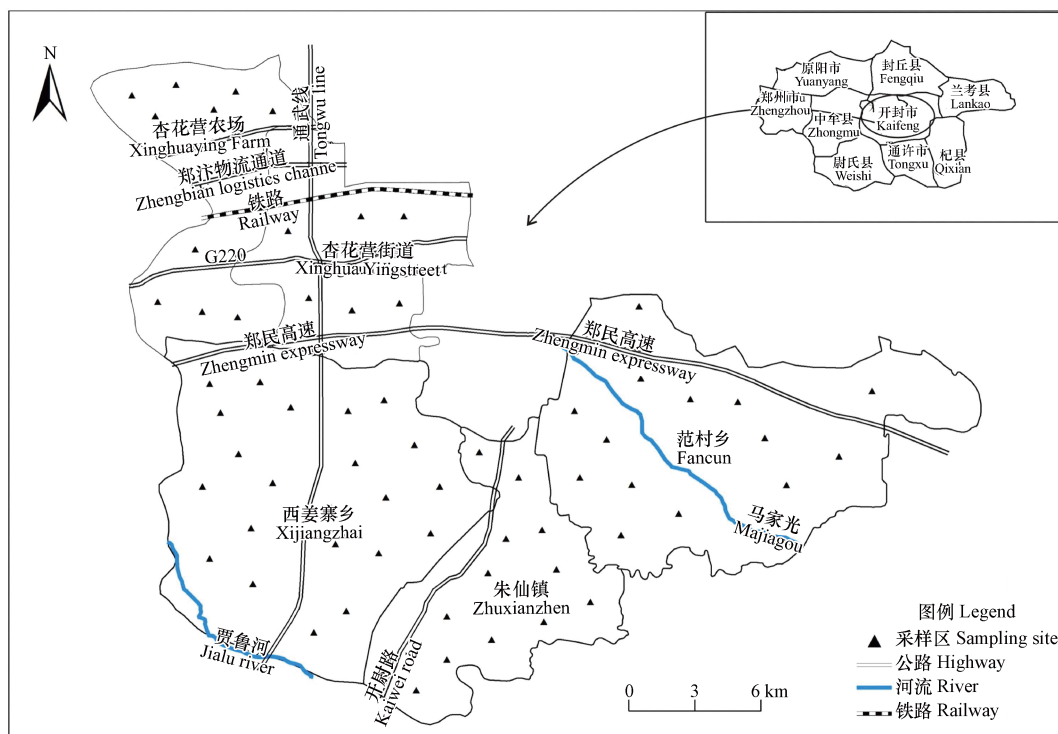


图 1 开封市西瓜种植区位置及采样点分布示意图

Fig.1 Location and sampling distribution of watermelon growing areas in kaifeng city

1.2 样品采集与测定

根据开封市西瓜种植情况, 选取范村、西姜寨、杏花营、朱仙镇等 4 个乡镇为采样区. 采用 100 m×100 m 网格法布点, 采样深度为 0—20 cm, 按“梅花型”采集 5 个子样, 混合后得到某样点土壤样品. 共采集样品 267 个, 其中朱仙镇、范村、西姜寨和杏花营分别采样 87、63、45、72 个. 采集的土壤样品室内常温风干, 去除动植物残体、石块等杂物, 玛瑙研钵粉碎后过 0.149 mm 尼龙筛, 充分混匀, 备用. 土壤样品采用硝酸-氢氟酸-高氯酸三酸^[15] 消解体系, 用石墨消解仪(ST-60)自动消解. 采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Elan6000)测定重金属 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 含量. 按规范要求质量控制, 以确保实验数据准确可靠.

1.3 评价方法

1.3.1 土壤重金属污染评价

土壤重金属污染评价以我国《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB15618—2018)农用地土壤污染风险筛选值为参照, 采用单因子指数法^[16] 与内梅罗综合污染指数法^[17] 进行评价分析, 内梅罗综合污染指数法是在单因子污染指数法的基础上, 计算其平均值和最高值平方加和后再开方, 计算公式分别如下:

$$P_i = \frac{C_i}{C_o} \quad (1)$$

$$P_{\text{综合}} = \sqrt{\frac{(\bar{P}_i)^2 + \max(P_i)^2}{2}} \quad (2)$$

式中, C_i 为土壤中污染元素 i 的实测值; C_o 为土壤中污染元素 i 的评价标准. $P_i \leq 1$ 表示无污染, $1 < P_i \leq 2$ 表示轻微污染, $2 < P_i \leq 3$ 表示轻度污染, $3 < P_i \leq 5$ 表示中度污染, $P_i > 5$ 表示重度污染^[16]; $P_{\text{综合}}$ 为内梅罗综合污染指数, $(\bar{P}_i)^2$ 为土壤中所有重金属单因子指数平均值的平方; $\max(P_i)$ 为土壤中所有重金属单因子指数最大污染指数. 且当 $P_{\text{综合}} \leq 0.7$ 时, 土壤样品污染等级为安全; $0.7 < P_{\text{综合}} \leq 1.0$ 时, 为警戒级; $1.0 < P_{\text{综合}} \leq 2.0$ 时, 为轻度污染; $2.0 < P_{\text{综合}} \leq 3.0$ 时, 为中度污染; $P_{\text{综合}} > 3.0$ 时, 为重度污染.

1.3.2 潜在生态风险评价

采用 Hakanson 潜在生态风险指数法^[18]对重金属污染进行生态风险评价, 该方法以土壤中重金属的元素背景值^[19]为基准, 结合重金属的生物毒性(毒性响应因子)、环境效应(污染指数)计算其潜在生态风险系数, 评价公式如下:

$$RI = \sum_i^n E_r^i = \sum_i^n (T_r^i \times C_f^i) = \sum_i^n (T_r^i \times C_D^i / C_R^i) \quad (3)$$

式中, C_f^i 为重金属元素 i 的污染指数; C_D^i 为土壤中重金属元素 i 的实测含量; C_R^i 为参照值; T_r^i 为重金属元素 i 的毒性影响因子; E_r^i 为重金属元素 i 的潜在生态风险系数; RI 为综合潜在生态风险指数. 重金属 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 的毒性系数分别为 2、5、5、1、30 和 5(表 1).

表 1 潜在生态风险评价指标分级

Table 1 Classification of potential ecological risk assessment indicators

E_r^i	单因子生态危害程度 Single factor ecological harm degree	RI	总的潜在生态危害程度 Total potential ecological hazard
<40	轻微Slight risk	<150	轻微Slight risk
40—80	中等Medium risk	150—300	中等Medium risk
80—160	强Strong risk	300—600	强Strong risk
160—320	很强Very strong risk	600—1200	很强Very strong risk
≥ 320	极强Extremely strong risk	≥ 1200	极强Extremely strong risk

1.4 数据分析

相关性分析和主成分分析采用 SPSS 19.0 软件分析, 相关性分析采用 Pearson 相关系数分析方法, 分别对单因子指数和内梅罗综合污染指数进行分析, 用 ORIGIN 9.0 分析软件进行绘图.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 重金属含量

按照上述的试验方法进行处理, 开封市不同采样点土壤重金属含量分析结果见表 2. 由表 2 可知, 《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB15618—2018)农用地土壤污染风险筛选值中 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 的含量值分别为 250、190、100、300、0.6、170 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 的河南省 A 层土壤背景值^[20]分别为 62.5、26.1、19.2、58.4、0.07、19.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

经测定开封市西瓜种植区 pH 均值为 8.98, 西姜寨、范村、杏花营和朱仙镇 pH 值分别为 8.95、9.27、8.75 和 9.30, 均呈碱性土壤. 西瓜种植区土壤 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 的平均值分别为 181.7、71.00、57.40、209.3、0.97、73.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别为河南省 A 层土壤背景值的 2.91、2.72、2.99、3.58、13.86、3.85 倍, 由各村庄的西瓜地土壤数据来看, 朱仙镇土壤中重金属 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 含量均为最高, 分别为 255.2、99.30、81.81、299.3、1.16、87.74 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别为河南省 A 层土壤背景值的 4.08、3.80、4.26、5.13、16.52、4.59 倍, 分别为农用地土壤污染风险筛选值的 1.02、0.52、0.82、1.00、

1.93、0.52 倍;其次为杏花营,重金属 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 的含量分别为 191.5、71.02、57.40、209.6、1.07、74.90 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别为河南省 A 层土壤背景值的 3.06、2.72、2.99、3.59、15.22、3.92 倍,分别为农用地土壤污染风险筛选值的 0.77、0.37、0.57、0.70、1.78、0.44 倍;西姜寨土壤中 Cr、Ni、Cu 和 Zn 含量最小,分别为 92.73、42.88、32.94、125.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别为河南省 A 层土壤背景值的 1.48、1.64、1.72、2.15 倍,为农用地土壤污染风险筛选值的 0.37、0.23、0.33、0.42 倍,范村土壤中 Cd 与 Pb 最小,分别为 0.63 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 59.47 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,为河南省 A 层土壤背景值的 8.95 倍和 3.11 倍,是农用地土壤污染风险筛选值的 1.05 倍和 0.35 倍。

表 2 开封市西瓜地土壤重金属描述性统计分析($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 2 Descriptive statistical analysis of heavy metals in watermelon soil in Xiangfu District, Kaifeng City ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

采样点Sampling site	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
西姜寨(pH8.06—9.46)	92.73	42.88	32.94	125.4	0.91	63.62
范村(pH8.54—5.59)	132.5	51.97	41.15	144.7	0.63	59.47
杏花营(pH7.76—9.49)	191.5	71.02	57.40	209.6	1.07	74.90
朱仙镇(pH8.84—9.60)	255.2	99.30	81.81	299.3	1.16	87.74
土壤标准值Soil standard value	250.0	190.0	100.0	300.0	0.60	170.0
土壤背景值Soil background value	62.50	26.10	19.20	58.40	0.07	19.10
平均值The average	181.7	71.00	57.40	209.3	0.97	73.54
最大值The maximum	708.7	280.7	241.4	798.6	4.34	186.6
最小值The minimum value	6.37	3.51	2.36	6.96	0.41	3.81
标准差The standard deviation	110.8	39.58	34.57	118.2	0.48	23.08
变异系数Coefficient of variation/%	60.95	55.74	60.22	56.48	49.87	31.38
超标率Exceeding rate/%	17.60	0.75	11.24	13.11	80.52	0.75

开封市西瓜种植区共采集样品 267 个,以该土壤农用地土壤污染风险筛选值为依据评价开封市土壤污染超标情况,采样点中 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 含量分别有 47、2、30、35、215 和 2 个超标点,超标率分别为 17.60%、0.75%、11.24%、13.11%、80.52% 和 0.75%。其他重金属均在国家土壤环境质量农用地土壤污染风险筛选值以内,低于标准值,可认为无土壤污染危害风险。

变异系数可反映采样点之间的变异程度,当变异系数小于 10%,属弱变异性,在 10%—100% 属中等变异,大于 100% 为强变异性。开封市 6 种重金属的变异系数均在 10%—100% 之间,属于中等变异,其中重金属 Cr 变异系数最大,为 60.95%,其次为 Cu、Zn、Ni、Cd、Pb。这说明重金属 Cr 受外部影响较其他重金属大,空间分异明显。

2.2 重金属污染评价

依照上述单因子指数法与内梅罗综合污染指数法对西瓜种植区各采样区土壤进行评价,结果见图 2。

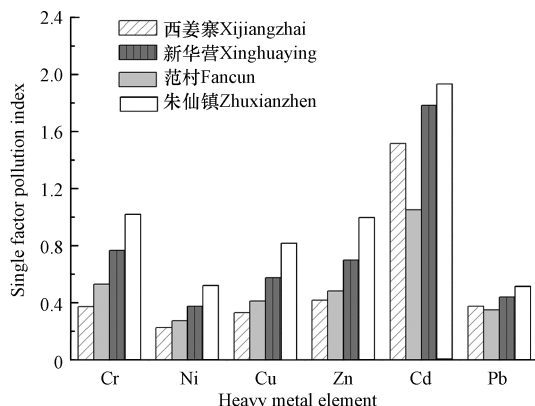


图 2 西瓜种植区不同采样点土壤重金属的单因子污染指数

Fig.2 Single factor pollution index of soil heavy metals at different sampling points in watermelon planting area

西瓜种植区中各采样点 Cr、Zn 朱仙镇轻微污染, 其余无污染; Ni、Cu 均无污染, 西瓜种植区各采样点 Cr、Ni、Cu、Zn 的单因子污染指数按照从大到小的排序均为朱仙镇>杏花营>范村>西姜寨. Cd 均处于轻微污染, 按照从大到小的排序为朱仙镇>杏花营>西姜寨>范村. Pb 的均处于无污染状态, 单因子污染指数按照从大到小的排序为朱仙镇>杏花营>西姜寨>范村.

从内梅罗综合污染指数来看, 西瓜种植区各采样点土壤中内梅罗综合污染指数分别为 1.14、0.83、1.37 和 1.53, 西姜寨、杏花营、朱仙镇处于轻度污染状态, 范村处于警戒级状态, 按照从大到小的排序为朱仙镇>杏花营>西姜寨>范村.

2.3 潜在生态风险评价

基于河南省土壤背景值计算 6 种重金属生态风险系数可得表 3, 可以看出西姜寨、范村、杏花营和朱仙镇的 Cr、Ni、Cu、Zn 和 Pb, 均处于轻微生态风险, 范村 Cd 的存在强生态危害, 西姜寨、杏花营和朱仙镇 Cd 的潜在生态危害处于极强状态, 西姜寨、范村、杏花营和朱仙镇的综合潜在生态风险指数分别为 428.6、313.0、516.5 和 573.7, 均处于强危害生态水平. 开封市西瓜地土壤重金属生态风险系数分别为 5.81、14.95、3.58、415.0 和 19.25, Cd 有极强生态危害, 其余均有轻微的生态风险, 综合潜在生态风险指数为 472.2, 存在强生态危害. Cd 对西姜寨、范村、杏花营和朱仙镇的综合潜在生态风险指数贡献率分别为 91.00%、86.26%、88.79%、86.65% 和 87.88%, 显然 Cd 是构成生态危害的主要风险因子.

表 3 开封市西瓜地土壤重金属潜在生态风险评价分析

Table 3 Evaluation on Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Soil of Watermelon in Xiangfu District, Kaifeng City

采样点 Sampling site	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb	RI
西姜寨	2.97	8.58	2.15	390.0	16.65	428.6
范村	4.24	10.72	2.48	270.0	15.57	313.0
杏花营	6.13	14.95	3.59	458.6	19.61	516.5
朱仙镇	8.17	21.30	5.13	497.1	22.97	573.7
开封市	5.81	14.95	3.58	415.0	19.25	472.2

2.4 土壤重金属相关性分析

为综合了解西瓜地中 6 种重金属是否来自相同的污染源, 计算了采样区重金属 Cr、Cu、Ni、Zn、Cd、Pb 之间的皮尔森相关系数, 见表 4. 采样区的 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 之间均呈显著正相关, 可能具有相同的污染源. 开封市 pH 与 Cr、Cu、Ni、Zn、Cd、Pb 均呈显著负相关.

表 4 采样区土壤重金属皮尔森相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficient of soil heavy metals in sampling area

指标 Indicators	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	pH
Cr	1						
Ni	0.524**	1					
Cu	0.640**	0.919**	1				
Zn	0.541**	0.883**	0.914**	1			
Cd	0.443**	0.422**	0.521**	0.641**	1		
Pb	0.279*	0.416**	0.475**	0.528**	0.677**	1	
pH	-0.257**	-0.173	-0.229	-0.146	-0.124	-0.114	1

**在 0.01 水平(双侧)上显著相关; *在 0.05 水平(双侧)上显著相关.

**Correlation is significant at the 0.01 level; *Correlation is significant at the 0.05 level.

2.5 主成分分析与源解析

通过上述相关性分析, 发现西姜寨、范村、杏花营、朱仙镇各重金属元素间具有显著的相关性, 同时 Bartlett 球形度检验相伴概率均为 0.000, 小于显著性水平 0.05, KMO(Kaiser-Meyer-Olkin) 检验统计值分别为 0.77、0.83、0.83、0.90, 均大于 0.7, 因此, 各采样点重金属数据适合于作因子分析. 由表 5 可知, 西姜寨、范村的 6 种重金属元素辨识出了 2 个主成分, 西姜寨的第一主成分的方差贡献率为 58.44%, Cr、Ni、Cu 和 Zn 占有较高的正荷载, Cd 与 Pb 的荷载较低.

表 5 采样区土壤重金属主成分分析结果

Table 5 Principal component analysis results of heavy metals in sampling area

元素Element	因子载荷Factor loading					
	西姜寨		范村		杏花营	朱仙镇
	PC1(58.44%)	PC2(25.74%)	PC1(61.13%)	PC2(18.90%)	PC1(83.50%)	PC1(82.61%)
Cr	0.82	—	0.71	—	0.89	0.94
Ni	0.97	—	0.88	—	0.96	0.98
Cu	0.98	—	0.91	—	0.95	0.97
Zn	0.94	—	0.91	—	0.98	0.98
Cd	—	0.83	0.53	0.74	0.86	0.60
Pb	—	0.87	0.68	0.56	0.87	0.93
方差贡献率/%	58.44	25.74	61.13	18.9	83.5	82.61
累积贡献率/%	58.44	84.18	61.13	80.04	83.5	82.61

注: 百分数为各因子(各主成分)在总变量中的贡献率; “—”表示该元素在对应的主成分上载荷小于0.4。

Note: the percentage is the contribution rate of each factor (principal component) in the total variable; “—” means that the element's load on the corresponding principal component is less than 0.4.

第二主成分的方差贡献率为 25.74%, Cd 与 Pb 占有较高的正荷载范村的第一主成分的方差贡献率为 61.13%, Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 占有较高的正荷载第二主成分的方差贡献率为 18.90%, Cd 与 Pb 占有较高的正荷载。表 5 可知杏花营、朱仙镇辨识出一个主成分。土壤重金属的来源广泛, 生活废弃物、工业废水、交通运输、燃料燃烧及灰尘沉降、肥料等人为污染源排放与地膜与土壤重金属有密切关系。人类活动性质与强度在空间的差异性决定着农田土壤重金属含量的不均匀分布。

由上述相关分析可知, 西姜寨、范村、杏花营、朱仙镇的重金属元素可能有相同的污染源, 西瓜种植区采样点土壤 Cr、Ni、Cu 和 Zn 的平均值分别为 160.7、63.42、50.88、184.7 mg·kg⁻¹, 分别为河南省 A 层土壤背景值的 2.57、2.43、2.65、3.16 倍。表 1 可知, 西姜寨、范村、杏花营、朱仙镇采样点的 Cd 与 Pb 均超过河南省土壤背景值, 可推测西姜寨、范村、杏花营、朱仙镇的 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 与 Pb 在一定程度上受到人类活动的影响。对杏花营、朱仙镇进一步主成分及因子分析得出一主因子, 杏花营、朱仙镇的 6 种重金属的污染来源可能相同。相关研究表明, Cd、Cr、Zn、Cu、Ni 和 Pb 主要来自农业肥料的施用, 煤炭燃烧, 电镀、电池、冶金等行业所排放的“三废”、橡胶轮胎磨损、润滑油耗损等交通源, 堆肥、猪粪等有机肥的使用^[21-24]。马建华等^[25]发现开封市杏花营公路两侧 300 m 范围内的土壤重金属含量明显高于对照区和中国潮土背景值, Zn 常用作汽车轮胎硬度添加剂, Cu 用来制备汽车散热器, 轮胎和散热器的磨损, 会产生含 Cu、Zn 的粉尘进入土壤^[26], 且杏花营采样区畜牧业、农业较为发达, 因此可以认为杏花营的主因子为农业源与交通源的混合源。朱仙镇第一产业为畜牧业, 研究表明, 在养殖过程中微量元素添加到饲料中后, 大量的微量元素未被动物吸收而排出体外, 导致排放到环境中重金属的含量相当高^[27], 第二产业为工业, 工业企业会有大量的废水、废气、废渣排放进入环境, 使土壤中的重金属严重超标^[9], 采样区的 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 均呈显著正相关, 则朱仙镇的主因子可能为农业源与工业源的混合源。西姜寨、范村进一步主成分及因子分析得出两个主因子: 第一主成分 Cr、Ni、Cu 和 Zn 占有较高的正荷载, Cr、Ni、Cu 和 Zn 累积贡献率为 58.44%, 通常来讲, 土壤中的 Cr 和 Ni 主要来源于成土母质, 受人为影响较小^[28], Cu 和 Zn 则有可能来自交通源^[29]。橡胶轮胎磨损、润滑油耗损、机械磨损等交通活动污染使土壤重金属含量不断累积^[30], 西姜寨交通干道环绕货物运输量大, 则西姜寨的第一污染源可能为自然源与交通源结合的混合源。单因子污染评价与潜在生态风险评价两种评价均显示 Cd 最主要污染因子, 西姜寨现为覆膜大蒜、花生、西瓜等多种作物种植基地, Cd 和 Pb 的累积贡献率为 84.18%, 西姜寨因子 2 应该与西姜寨普遍使用含 Cd 肥料及农膜有关^[31], 则西姜寨的主要污染源可能为农业源。范村第一主成分 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 占有较高的正荷载, Cd 为最主要污染因子, 地膜的使用、化肥农药施用、污水灌溉也是造成土壤重金属累积的原因, 范村乡具有花生、西瓜、林果、畜牧四大支柱产业, 则范村乡主要污染源可能为农业源。

3 结论(Conclusion)

(1)开封市西瓜种植区中 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 的超标率分别为 17.6%、0.75%、11.24%、13.11%、80.5% 和 0.75%。6 种重金属的变异系数均在 10%—100% 之间,属于中等变异。

(2)依照污染指数法与潜在生态风险评价各采样区土壤进行评价,西瓜种植区各采样点中 Cr 与 Zn,朱仙镇轻微污染,其余无污染;西瓜种植区 Ni、Cu 和 Pb 均处于无污染状态;Cr、Cu、Ni、Zn、和 Pb 均有轻微的生态风险,开封市西瓜种植区 Cd 存在极强生态风险,Cd 是构成生态危害的主要风险因子。

(3)西姜寨、范村、杏花营、朱仙镇的 Cr、Ni、Cu、Zn 之间均呈显著正相关,开封市西瓜种植区 pH 与 Cr、Cu、Ni、Zn、Cd、Pb 呈显著负相关。开封市西瓜种植区土壤重金属的污染源主要为农业源,杏花营采样区的重金属污染源为农业源与交通源的混合源;朱仙镇采样区的重金属污染源为农业源与工业源的混合源;西姜寨采样区的主要污染源为农业源,第二污染源为自然源与工业源结合的混合源;范村乡采样区的主要污染源为农业源。

参考文献 (References)

- [1] 杨新明,庄涛,韩磊,等. 小清河污灌区农田土壤重金属形态分析及风险评价 [J]. 环境化学, 2019, 38(3): 644-652.
YANG X M, ZHUANG T, HAN L, et al. Fraction distribution and ecological risk assessment of soil heavy metals in the farmland soil from the sewage irrigated area of Xiaoqing River [J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(3): 644-652(in Chinese).
- [2] 林海,靳晓娜,董颖博,等. 膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响 [J]. 环境科学, 2019, 40(2): 945-952.
LIN H, JIN X N, DONG Y B, et al. Effects of bentonite on chemical forms and bioavailability of heavy metals in different types of farmland soils [J]. Environmental Science, 2019, 40(2): 945-952(in Chinese).
- [3] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 [J]. 中国环保产业, 2014, 36(5): 10-11.
Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. National bulletin of soil pollution survey China [J]. Environmental Protection Industry, 2014, 36(5): 10-11(in Chinese).
- [4] 谢国辉,郭京霞,陈炎辉,等. 福建省某矿区周边土壤-农作物重金属空间变异特征与健康风险评价 [J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3): 544-554.
XIE T H, GUO J X, CHEN Y H, et al. Spatial variability and health risk assessment of heavy metals in soils and crops around the mining areain Fujian Province, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(3): 544-554(in Chinese).
- [5] 张军,董洁,梁青芳,等. 宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析 [J]. 环境科学, 2019, 40(8): 3774-3783.
ZHANG J, DONG J, LIANG Q F, et al. Heavy metal pollution characteristics and influencing factors in Baoji Arban Soils [J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3774-3783(in Chinese).
- [6] 赵慧,何博,孟晶,等. 典型城市化地区蔬菜重金属的累积特征与健康风险研究 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(12): 1892-1902.
ZHAO H, HE B, MENG J, et al. Accumulation characteristics and health risks of heavy metals in vegetables in typical urbanized areas [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(12): 1892-1902(in Chinese).
- [7] MUNGAI T M, OWINO A A, MAKOKHA V A, et al. Occurrences and toxicological risk assessment of eight heavy metals in agricultural soils from Kenya, Eastern Africa [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(18): 1-9.
- [8] 李伟迪,崔云霞,曾撑撑,等. 太漏运河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析 [J]. 环境科学, 2019, 40(11): 5073-5081.
LI W D, CUI Y M, ZENG C C, et al. Pollution characteristics and source analysis of heavy metals in farmland soils in the Taige Canal Valley [J]. Environmental Science, 2019, 40(11): 5073-5081(in Chinese).
- [9] 卢鑫,胡文友,黄标,等. 基于UNMIX模型的矿区周边农田土壤重金属源解析 [J]. 环境科学, 2018, 39(3): 1421-1429.
LU X, HU W Y, HUANG B, et al. Source apportionment of heavy metals in farmland soils around mining area based on UNMIX Model [J]. Environmental Science, 2018, 39(3): 1421-1429(in Chinese).
- [10] 王小莉,陈志凡,魏张东,等. 开封市城乡交错区农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价 [J]. 环境化学, 2018, 37(3): 513-522.
WANG X L, CHEN Z F, WEI Z D, et al. Heavy metal pollution and potential ecological risk assessment in agricultural soils located in the peri-urban area of Kaifeng City [J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(3): 513-522(in Chinese).
- [11] 李肃秋,陈光华. 1987-2016年开封市气候特征分析 [J]. 现代农业科技, 2017(23): 192, 198.
LI S Q, CHEN G H. Analysis on climate characteristics of Kaifeng from 1987 to 2016 [J]. Xiandai Nongye Keji, 2017(23): 192, 198(in Chinese).
- [12] 张存松,吴占清,张先亮,等. 推进农业供给侧结构性改革下看开封西瓜产业如何发展 [J]. 农业科技通讯, 2019(4): 47-49.
ZHANG C X, WU Z Q, ZHANG X L, et al. How to promote the agricultural supply-side structural reform to see the development of the watermelon industry in Kaifeng [J]. Communications on Agricultural Science and Technology, 2019(4): 47-49(in Chinese).
- [13] 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, 2016, 36(3): 1037-1043.
LI Y M, MA J H, LIU D X, et al. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng City,

- China [J]. *Environmental Science*, 2016, 36(3): 1037-1043(in Chinese).
- [14] 马建华, 马诗院, 陈云增. 河南某污灌区土壤-作物-人发系统重金属迁移与积累 [J]. *环境科学学报*, 2014, 34(6): 1517-1526. MA J H, MA S Y, CHEN Y Z. Migration and accumulation of heavy metals in soil-crop-hair system in a sewage irrigation area, Henan, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(6): 1517-1526(in Chinese).
- [15] 姜玉玲, 阮心玲, 杨玲, 等. 开封市城市土壤剖面Hg、As和Sb分布特征分析 [J]. *环境化学*, 2017, 36(5): 1036-1046. JIANG Y L, RUAN X L, YANG L, et al. Distribution of Hg, As and Sb concentrations in urban soil profiles of Kaifeng City, Henan Province [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(5): 1036-1046(in Chinese).
- [16] 张东明, 吕新, 王海江, 等. 工业区周边农田重金属污染评价及来源分析 [J]. *土壤通报*, 2017, 48(3): 715-723. ZHANG D M, LV Xin, WANG Hai Jiang, et al. Heavy metal pollution assessment and source analysis on farmland soil around an industrial area [J]. *Soil notification*, 2017, 48(3): 715-723(in Chinese).
- [17] 吴健, 王敏, 张辉鹏, 等. 复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险 [J]. *环境科学*, 2018, 39(12): 5620-5627. WU J, WANG M, ZHANG H P, et al. Heavy metal pollution and potential ecological risk of soil from reclaimed industrial sites and surrounding river sediments [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(12): 5620-5627(in Chinese).
- [18] 王春光, 刘军省, 殷显阳, 等. 基于IDW的铜陵地区土壤重金属空间分析及污染评价 [J]. *安全与环境学报*, 2018, 18(5): 1989-1996. WANG C G, LIU J S, YIN X Y, et al. Spatial analysis and pollution assessment of heavy metals in the soils of Tongling urban area based on IDW [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, 18(5): 1989-1996(in Chinese).
- [19] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [20] 邵丰收, 周皓韵. 河南省主要元素的土壤环境背景值 [J]. *河南农业*, 1998(10): 28. SHAO F S, ZHOU H Y. The background value of soil environment of main elements in Henan Province [J]. *Henan Agriculture*, 1998(10): 28(in Chinese).
- [21] 马牧源, 于一雷, 郭嘉, 等. 襄阳入江中小河流表层沉积物重金属污染特征及其潜在的生态风险评价 [J]. *环境科学学报*, 2019, 39(9): 3144-3153. MA M Y, YU Y L, GUO J, et al. Heavy metal pollution characteristics and potential ecological risk assessment of surface sediments in the middle and small rivers of the Yangtze River in the Yangtze River [J]. *Journal of Environmental Science*, 2019, 39(9): 3144-3153(in Chinese).
- [22] 何博, 赵慧, 王铁宇, 等. 典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价 [J]. *环境科学*, 2019(6): 1-11. HE B, ZHAO H, WANG T Y, et al. Spatial characteristics and risk assessment of heavy metal pollution in typical urbanized areas [J]. *Environmental Science*, 2019(6): 1-11(in Chinese).
- [23] 王洪涛, 张俊华, 丁少峰, 等. 开封城市河流表层沉积物重金属分布、污染来源及风险评估 [J]. *环境科学学报*, 2016, 36(12): 4520-4530. WANG H T, ZHANG J H, DING S F, et al. Distribution characteristics, sources identification and risk assessment of heavy metals in surface sediments of urban rivers in Kaifeng [J]. *Journal of Environmental Science*, 2016, 36(12): 4520-4530(in Chinese).
- [24] 郭欣, 姚莘, 杜焰玲, 等. 典型土地利用方式下土壤重金属污染物分布特征与源解析——以成都平原干溪河流域为例 [J]. *环境工程*, 2019, 37(1): 1-5. GUO X, YAO P, DU Y L, et al. Distribution characteristics and source apportionment of heavy metals in soils under typical land use patterns— A case study on the ganxi river basin of Chengdu plain [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(1): 1-5(in Chinese).
- [25] MA J H, LI J, SONG B. Contamination and spatial distribution of heavy metals in the soils of different operating sections along the Zhengzhou-Kaifeng highway [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(10): 1734-1743.
- [26] 白一茹, 张兴, 赵云鹏, 等. 基于GIS和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2019, 40(6): 2885-2894. BAI Y R, ZHANG X, ZHAO Y P, et al. Spatial distribution characteristics and source apportionment of soil heavy metals in Chinese wolfberry land based on GIS and the receptor model [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(6): 2885-2894(in Chinese).
- [27] 陈泉嘉, 邹广彬, 王昭君, 等. 沼气发酵等对长江下游典型规模化畜牧养殖业污染排放特征的影响 [J]. *江苏农业学报*, 2019, 35(2): 329-339. CHEN X J, ZOU G B, WANG Z J, et al. Effects of biogas fermentation on the pollutant emission characteristics of large-scale livestock breeding in the lower reaches of Yangtze River [J]. *Acta agriculturae Jiangsu*, 2019, 35(2): 329-339(in Chinese).
- [28] 周艳, 陈檣, 邓绍坡, 等. 西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价 [J]. *环境科学*, 2018, 39(6): 2884-2892. ZHOU Y, CHEN Q, DENG S P, et al. Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(6): 2884-2892(in Chinese).
- [29] BRESSI M, SCIARE J, GHERSI V, et al. Sources and geographical origins of fine aerosols in Paris (France) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(16): 8813-8839.
- [30] JIANG Y X, CHAO S H, LIU Y Y, et al. Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China [J]. *Chemosphere*, 2017, 168: 1658-1668.
- [31] 张璐, 聂建欣, 赵著燕, 等. 典型地膜残留地区土壤重金属残留测定及其健康风险评价 [J]. *有色金属材料与工程*, 2017, 38(1): 35-39. ZHANG L, NIE J X, ZHAO Z Y, et al. Field survey on the heavy metal concentration and health risk assessment in the soil with plastic residue [J]. *Non-Ferrous Metal Materials And Engineering*, 2017, 38(1): 35-39(in Chinese).