



推荐阅读:

[广西城市污水处理厂污泥产生及处置现状分析](#)

[平顶山市煤矿区土壤重金属污染程度评价](#)

[基于灰色关联分析法的宜昌市空气质量影响因素分析](#)

[废旧锂离子电池流向及管理现状调研](#)

[生物法处理气态污染物的研究现状与应用前景](#)

[环境敏感区农村生活污水处理工艺设计案例分析](#)

[氨法脱硫+低温 SCR 脱硝工艺在焦炉烟气净化中的应用](#)

[反渗透双膜工艺处理印染废水研究进展](#)

[重金属污染土壤修复技术研究进展](#)

[基于 SARIMA 模型的二氧化氮时间序列预测研究](#)

[碳基功能材料在土壤修复中的应用](#)

[虾蟹壳对水中刚果红吸附性能的研究](#)

[农村生活垃圾生物质热解和燃烧气相数值模拟](#)

[基于灰色 GM\(1, 1\)模型的成都市大气污染物浓度预测](#)

[江苏省非道路移动源大气污染排放清单研究](#)

[欧盟 15 国污水污泥产生量与处理处置方法对比](#)

[基于 Hydrus-1D 的粉煤灰堆场 Cr\(VI\) 在包气带中迁移规律的研究](#)

[工业废水活性炭深度处理的研究](#)



移动扫码阅读

李晓倩,焦伟,鲁利民,等. 中原油田周边农田重金属含量特征、来源解析与风险评估[J]. 能源环境保护, 2020, 34(3): 77-84.

LI Xiaolian, JIAO Wei, LU Limin, et al. Characteristics, source analysis and risk assessment of heavy metal content in farmland around Zhongyuan Oilfield[J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(3): 77-84.

# 中原油田周边农田重金属含量特征、来源解析与风险评估

李晓倩<sup>1</sup>, 焦伟<sup>2,3</sup>, 鲁利民<sup>1</sup>, 姚志建<sup>2,3,\*</sup>

(1. 中国石化中原油田分公司油地工作处, 河南 濮阳 457001;

2. 南京大学 环境学院, 江苏 南京 211046;

3. 江苏国创环保科技有限公司, 江苏 南京 211106)

**摘要:**以中原油田周边农田为研究对象,分析了360个土壤表层(0~20 cm)样品中As、Cd、Pb、Cu、Zn、Ni、Cr含量,基于地统计法研究了土壤重金属的空间分布规律,利用内梅罗综合污染指数法、地累积指数法和Hakanson潜在生态危害指数法评价了农田土壤重金属污染的潜在生态风险程度,利用多元统计分析法解析了土壤中重金属的来源。结果表明:土壤重金属的空间分布具有显著特征,Zn、Cr含量平均值是河南省土壤背景值的1~2倍且存在积累效应,其余重金属含量均低于河南省背景值;所有元素的变异系数均小于1,属于轻微变异性,Kolmogorov-Smirnov检验结果均为显著( $P < 0.05$ ),呈非正态分布,该区域土壤受人类活动的轻微影响;土壤重金属存在潜在生态风险且总体处于轻微水平,Cd风险指数范围为18.1~69.6,存在轻微至强生态风险,轻微风险指数占96%,为该研究区域土壤的主要生态危害元素;土壤中Ni、Cr、Cd的含量存在一定的相关性,主要受成土母质及地质活动的影响,As、Cu、Pb等重金属元素受油田开发、农业生产和当地居民生活污染等人类活动的影响;研究区土壤重金属含量都处于清洁范畴,仅0.3%的检测结果超过风险筛选值(GB 15618—2018);受自然积累和人类活动影响,研究区的Cr、As、Cd存在一定的潜在生态风险,但土壤环境质量总体处于安全水平。

**关键词:**农田;重金属;污染评价;来源解析;油田

中图分类号:X820.4

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2020)03-0077-08

## Characteristics, source analysis and risk assessment of heavy metal content in farmland around Zhongyuan Oilfield

LI Xiaolian<sup>1</sup>, JIAO Wei<sup>2,3</sup>, LU Limin<sup>1</sup>, YAO Zhijian<sup>2,3,\*</sup>

(1. Oil Field Office of Sinopec Zhongyuan Oilfield Company, Puyang 457001, China;

2. School of Environment, Nanjing University, Nanjing 211046, China;

3. Jiangsu Guochuang Environmental Protection Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Based on the analysis of As, Cd, Pb, Cu, Zn, Ni and Cr contents in 360 soil surface samples (0~20 cm) surrounding Zhongyuan Oilfield, the spatial distribution of heavy metals in the soil was analyzed by geostatistics, the potential ecological risk of heavy metal pollution in farmland soil was evalua-

收稿日期:2020-03-29

基金项目:国家自然科学基金(No. 51778281);国家自然科学基金(No. 51678290);江苏省自然科学基金(No. BK20171342)

第一作者简介:李晓倩(1969-),男,河南南乐人,研究生,高级经济师,主要从事土地风险评估及再利用方面的研究。E-mail: zymaxin.zyyt@sinopec.com

通信作者简介:姚志建(1986-),女,江苏盐城人,博士,高级工程师,主要从事毒害污染物控制及资源化研究。E-mail: dg1525036@smail.nju.edu.cn

ted by Nemer comprehensive pollution index, geo-accumulation index and Hakanson potential ecological harm index, and the sources of heavy metals in soil were analyzed by multivariate statistical analysis. The results show that heavy metals in soil has significant characteristics of spatial distribution. The average content of Zn and Cr is 1~2 times of the background value of soil in Henan with accumulation effect, however, the contents of other heavy metals are lower than the background value. The coefficients of variation (CV) of all elements are less than 1, which belongs to slight variability. The results of Kolmogorov Smirnov test are all significant ( $P < 0.05$ ) with non normal distribution, which indicates that the soil in this area is slightly affected by human activities. Soil heavy metals have a slight level of potential ecological risk. The Cd risk index ranges from 18.1 to 69.6 with a slight to strong ecological risk. It is the main ecological hazard element in the study area with a risk index accounting for 96%. The contents of Ni, Cr and Cd in the soil have a certain correlation, which is mainly affected by the parent material and geological activities. The contents of As, Cu, Pb and other heavy metal elements are affected by human activities such as oilfield development, agricultural production and domestic pollution of local residents. Only 0.3% of the test results exceed the risk screening value (GB 15618—2018), and the rest are in the cleaning category. Influenced by natural accumulation and human activities, Cr, As and Cd have certain potential ecological risk, but the soil environmental quality is at a safe level in generally.

**Key Words:** Farmland; Heavy metals; Pollution assessment; Source analysis; Oilfield

## 0 引言

随着经济的高速增长,人们对石油资源的需求也与日俱增。原油开采过程与许多其他采矿活动一样,不可避免地产生影响环境的气体、液体和固体污染物<sup>[1]</sup>。土壤中重金属类污染物通过农产品等可能在人体中累积,危害人群健康。大量研究表明,油田开发区域土壤中存在重金属污染<sup>[1-3]</sup>,原油中含有 Cd、Pb、Ni、V 等重金属,钻井液中也含有 Cr、Pb、Zn 等重金属<sup>[4-6]</sup>,落地原油应该是石油污染土壤中重金属含量较高的直接原因。被污染土壤中的石油烃会发生一定程度的自然降解,增加有机质的含量,可与重金属形成有机-金属络合物<sup>[7-9]</sup>。同时,原油开采过程,如钻井和井下作业,也会改变当地的土壤特性<sup>[2,4]</sup>。因此,原油开采过程很可能会影响土壤中重金属的含量和重金属在土壤中的分布。随着石油开采过程持续时间的延长,重金属污染物将进一步积聚,造成更高的环境风险。与有机污染物相比,重金属污染具有持久性、累积性和不可逆性等特点<sup>[10]</sup>。

重金属在农田土壤中大量富集,将会对农田土壤产生持久性的影响。土壤中重金属类污染物通过农产品等进入食物链,可能在人体中累积,危害人群健康<sup>[11-13]</sup>。因而,对油田开发区域的农田

土壤重金属含量水平、分布特征与生态风险的研究具有十分重要的现实意义。

本次研究选取河南省中原油田采油区域附近农田抛荒地作为研究区域,分析油田附近农田土壤中重金属含量现状,评价潜在生态风险特征及其影响因素,对重金属来源进行分析。以期探讨中原油田井场附近农田重金属的空间分布特点及污染的来源,为准确评价该地区农田土壤重金属的累积程度及后期农田抛荒地复垦提供科学依据。

## 1 研究区概况

总部位于河南省濮阳市的中原油田是中国石化集团有限公司的第二大油气田,历经 45 年的开发建设,已经成为我国东部地区战略性油气生产基地。河南省也是我国的粮食生产大省,中原油田有部分油气井四周都是广阔的基本农田。受季风影响,中原油田所属地区四季分明,多年平均气温 13~14℃,多年平均降水 600 mm。当地土壤主要以盐碱土为主,0~20 cm 土层碱化度 > 45%<sup>[14]</sup>。近年来,中原油田完成了近 30 000 亩农田抛荒地退耕治理工作,7 500 亩已缴纳耕地占用税的临时农田占地实现全部退耕,在农田土壤环境保护、污染防治及合理处置方面走在时代前列。

本研究区域位于濮阳市东南地区、黄河西岸,区域总面积 503 平方公里(35°29′07.68~35°45′

44.95°N, 114°59'54.70"~115°23'13.97"E); 采样点位分布于 10 个乡镇, 土壤类型为棕壤、黄土, 土地类型为基本农田, 主要农作物为玉米和大豆。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 样品采集

本次样品采集是根据油田开发建设的特点,

在采样过程中考虑疑似污染物扩散方向, 同时考虑土壤的类型和采样点的均匀性, 以使调查结果具有客观性、典型性和代表性, 具体采样点位见图 1。本研究于 2018 年 7 月在河南省中原油田井场周边采集有代表性的 360 个表层土壤(0~20 cm) 样品。按 4 分法取样并装入聚乙烯塑料袋中, 带回实验室自然风干。



图 1 研究区域采样点位示意图

### 2.2 样品处理与分析方法

土壤样品自然风干, 每个样品去除动植物残体及石块后用玛瑙研钵研磨并过 100 目尼龙筛。前处理过程切实保证土壤样品不接触任何金属物质, 以避免交叉污染。本研究的环境监测过程主要参考《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)。土壤样品的 Cu、Zn、Ni、Cr 含量采用火焰原子吸收分光光度法检测; Cd、Pb 含量采用石墨炉原子吸收分光光度法检测; As 采用原子荧光法检测, 具体参考标准及检出限见表 1。

表 1 土壤样品分析及检出限

项目	参考标准	检出限 mg/kg, pH 无量纲
pH	HJ 962—2018	/
铜	GB/T 17138—1997	1
锌	GB/T 17138—1997	0.5
镍	GB/T 17139—1997	5
铬	HJ 491—2009	5
镉	GB/T 17141—1997	0.01
铅	GB/T 17141—1997	0.1
砷	GB/T22105.2—2008	0.01

### 2.3 质量控制

选用 GBW07408(GSS-8) 作为标准参考物质进行重金属分析的质量控制。同时, 进行空白试验和重复测试以确保分析的准确度和精密度, 7 种重金属的回收率都在 80%~120%。

### 2.4 评价方法

以 GB 15618—2018 中的风险筛选值作为参比, 基于地统计法分析土壤重金属的空间分布规律, 利用内梅罗综合污染指数法<sup>[15]</sup>、地累积指数法<sup>[16]</sup>和 Hakanson 潜在生态危害指数法<sup>[17]</sup>评价农田土壤重金属潜在生态风险程度, 并利用多元统计分析对土壤中重金属来源进行分析。

## 3 结果与讨论

### 3.1 土壤重金属的统计特征

本研究区域农田土壤重金属含量平均值由高至低依次为 Cr>Zn>Ni>Cu>Pb>As>Cd。其中 Zn、Cr 平均值分别为 85.33 mg/kg 和 86.42 mg/kg, 是河南省土壤背景值的 1~2 倍, 其余重金属含量均低于河南省背景值, 显然土壤中 Zn、Cr 存在积累效应。从变异系数来看, 所有元素的变异系数均

小于1,属于中等变异性。Zn、As明显高于其它元素,最高达到0.46。变异系数越大,元素在土壤中分布越不均匀,受人类活动影响越大,统计结果表明该区域土壤Zn、As受一定程度的人类活动影响。

研究区土壤pH值均大于7.5,检测结果与土壤环境质量农用地土壤污染风险筛选值(GB 15618—2018)相比,360个样品中仅有1个样品Cr超标,有7个样品As超标,其余样品均未超标,经统计土壤样品检测总合格率为99.7%。

表2 研究区表层土壤重金属含量特征

特征参数	Cu	Zn	Ni	Cr	Cd	Pb	As
最小值	11.90	37.10	12.40	54.30	0.05	6.66	3.00
最大值	43.90	199.00	43.60	265.00	0.21	39.70	25.70
平均值	20.94	85.33	26.75	86.42	0.09	13.86	11.74
变异系数	0.25	0.46	0.24	0.26	0.24	0.31	0.44
河南地区背景值 <sup>[18]</sup>	21.40	65.10	24.90	53.60	0.09	14.40	8.45
风险筛选值	100	300	190	250	0.60	170	25

采用内梅罗污染指数法对研究区域监测点位的土壤重金属含量水平进行评价,内梅罗污染指数统计结果见图2。统计结果表明:本研究区域土壤监测点位的7种重金属中仅Cr和As的内梅罗指数处于清洁和警戒限之间,其余金属元素均为清洁状态。

### 3.2 土壤重金属的正态分布特征

样本数据的正态分布分析是用于评价土壤中重金属是否存在人为干扰的依据之一<sup>[19]</sup>。偏度越接近0,说明样本数据越接近正态分布。如表3所示,所有重金属元素的Kolmogorov-Smirnov检验结果均为显著( $P < 0.05$ ),为非正态分布,说明这些元素的累积受一定程度的人为干扰。

### 3.3 重金属污染程度分析

以河南省土壤背景值为评价标准,对研究区土壤重金属污染程度进行了累积指数评价。重金属污染指数平均值从高至低顺序为 $Cr > Ni > As > Zn > Cu > Cd > Pb$ ,所有元素指数均值都小于0,说明所研究区域整体污染风险不大。有1个土壤样品Cr地累积指数达到1.3,呈现中度污染;20%的土壤As呈现轻微污染状态,详见表4;整体分布基本符合样品检测超标情况。

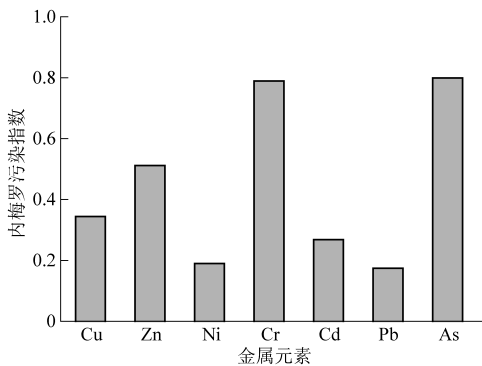


图2 土壤污染内梅罗污染指数统计结果

表3 土壤重金属含量的Kolmogorov-Smirnov检验

特征参数	Cu	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb	As
标准差	5.259	39.191	22.610	6.350	0.021	4.331	5.213
偏度	0.079	0.263	0.177	0.103	0.245	0.109	0.125
峰度	1.500	4.985	3.355	1.958	4.656	2.074	2.363
显著性	0.022	0	0	0.001	0	0	0

表4 土壤重金属污染地累积指数分级

金属元素	指数均值	地累积指数等级分布(各级样本数)						
		无污染	轻污染	中污染	中~重污染	重污染	重~极重污染	极重污染
Cu	-1.07	360	0	0	0	0	0	0
Zn	-0.93	319	41	0	0	0	0	0
Ni	-0.52	339	21	0	0	0	0	0
Cr	-0.34	335	24	1	0	0	0	0

续表

金属元素	指数均值	地累积指数等级分布(各级样本数)						
		无污染	轻污染	中污染	中~重污染	重污染	重~极重污染	极重污染
Cd	-1.09	365	5	0	0	0	0	0
Pb	-1.17	358	2	0	0	0	0	0
As	-0.68	300	60	0	0	0	0	0

### 3.4 重金属潜在生态风险评价

研究区域土壤 pH 值大于 7.5,为偏碱性,重金属含量较高,增加了土壤重金属污染的生态风险水平。为进一步评价土壤重金属的污染水平,并且对土壤中重要的污染物进行有效的识别,本研究以河南省土壤背景值作为参比值,进行研究区农田土壤潜在生态危害风险程度评价,该方法不但将重金属的含量考虑在内,还将重金属的生态

效应、环境效应和毒理学效应联系起来,是目前生态风险评价使用较广泛的方法。研究区生态风险指数见表 5。

从单项重金属潜在生态风险看,全部样品的 Cr、Cu、Ni、As、Pb 和 Zn 生态风险指数均小于 40,为轻微生态风险;Cd 风险指数范围为 18.1~69.6,存在轻微至强生态风险,其中 96%为轻微风险;因此 Cd 可能为研究区土壤主要生态危害元素。

表 5 潜在生态风险评价分级特征

金属元素	分布范围 ( $E_r^i$ )	各等级分布				
		轻微 ( $<40$ )	中 (40~80)	强 (80~160)	很强 (160~320)	极强 ( $\geq 320$ )
Cu	2.8~10.3	360	0	0	0	0
Zn	0.6~3.1	360	0	0	0	0
Ni	2.5~9.3	360	0	0	0	0
Cr	2~9.9	360	0	0	0	0
Cd	18.1~69.6	347	13	0	0	0
Pb	2.3~13.8	360	0	0	0	0
As	3.5~30.4	360	0	0	0	0

### 3.5 各重金属含量之间的相关性与主成分分析

针对重金属含量之间的相关性分析,可以进一步推导出重金属的来源是否一致;如果不同重

金属之间具有显著的相关性,则说明相同来源的可能性较大,反之亦然<sup>[20]</sup>。本研究区域的重金属之间的相关性分析结果见表 6。

表 6 重金属含量之间相关性分析

特征参数	Cu	Zn	Ni	Cr	Cd	Pb	As
Cu	1	—	—	—	—	—	—
Zn	0.178	1	—	—	—	—	—
Ni	0.222	0.169	1	—	—	—	—
Cr	0.218	0.061	0.407	1	—	—	—
Cd	0.225	0.065	0.433	0.990	1	—	—
Pb	0.360	0.112	0.131	-0.046	-0.043	1	—
As	0.122	-0.044	-0.042	-0.006	-0.006	0.237	1

由表 6 可知,研究区域研究区域土壤中重金属内的土壤样品中,Cd 和 Cr 含量具有显著的相关性,这说明来自同一污染源的概率较大。Cd 和

Cr 均与 Ni 呈现一定的相关系数,三种金属可能存在一定的污染原;其余重金属含量之间无显著相关性,来源应该不同。



表7 研究区域土壤中重金属主成分分析及因子特征值

特征参数	主成分			旋转主成分		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3
Cu	0.470	0.584	-0.069	0.269	0.656	0.253
Zn	0.237	0.289	-0.738	0.032	0.180	0.807
Ni	0.662	0.050	-0.211	0.581	0.169	0.343
Cr	0.908	-0.292	0.183	0.970	-0.011	-0.043
Cd	0.921	-0.273	0.168	0.975	0.007	-0.022
Pb	0.158	0.800	0.046	-0.071	0.806	0.114
As	0.029	0.513	0.638	-0.023	0.624	-0.529
特征值	2.413	1.490	1.064	2.308	1.530	1.129
方差贡献率/%	34.466	21.286	15.205	32.978	21.854	16.125
累积贡献率/%	34.466	55.752	70.957	32.978	54.832	70.957

主成分分析主要是针对土壤中重金属含量的信息进行收集和分类提取,借助因子分析,使得多个变量进行简化,消除样品空间上的多元性,从而有效推导重金属的来源。在土壤的形成过程中,各种重金属之间可能存在一定的组合特征,采用成分分析方法,能较好的分析这些特征<sup>[21]</sup>。7种重金属主成分分析结果如表7所示,根据特征值的结果,提取了3个特征值大于1的成分,主成分的累积贡献率为70.96%。主成分分析已经能够反馈大部分的样品信息及污染情况。

在主成分F1中,Ni、Cr、Cd、Cu具有较高的负荷因子,Ni和Cr是土壤母质形成过程中的重要元素,主要受到成土母质的影响<sup>[20]</sup>;Pb和Zn的负荷因子均较低,这两种元素的地球化学性质极为相似,一般具有同源性;由此可以说主成分F1主要反应了自然源的污染。在主成分F2中,As、Cu、Pb具有较高的负荷因子,在主成分F3中,As具有较高的负荷因子。

### 3.6 重金属的来源解析

#### 3.6.1 自然累积

本研究区域土壤主要为盐碱土和潮土,盐碱土主要分布在黄河两岸及黄河故道两侧黄泛平原区中地势较高的部位,地下水位较浅,具有重金属累积的地形与水文条件,呈带状分布。土体特征是腐殖层下为碱化层,呈柱状或棱柱状构造<sup>[14]</sup>。在研究区域中,Cr含量高于河南省背景值1.6倍,Ni和Cr受土壤母质影响,具有同源效应。

#### 3.6.2 油田开发

油田开发过程中除了石油烃等有机污染外,在原油中和石油开采过程中带来的重金属元素对土壤环境也会造成一定的危害。研究资料表明,

原油中含有的金属元素可以达到几十种<sup>[22-23]</sup>。采油井站的土壤重金属污染主要是日常生产过程中原油的“跑、冒、滴、漏”和原油井喷事故造成。此外,油气井生产套管的损坏也可能造成原油在底层深处的泄露,造成直接或者间接的环境风险。钻井过程的重金属污染主要是钻井液造成的。钻井液主要由化学处理剂、固体添加剂和基本溶剂组成,成分复杂。铁铬盐、磺化褐煤等多种化学添加剂是重金属Cr的主要来源<sup>[23]</sup>。钻井过程中可能会发生钻井液漏失现象;废弃钻井液的不合理处置也会对周边土壤环境造成直接影响。输油、注水管线由于长期腐蚀、人为因素或者地质灾害可能会造成破裂,继而引起运输介质的泄漏事件,对农田土壤造成直接的环境风险。

总之,油田开发建设中土壤重金属含量影响最大的是落地原油、含油废水、钻井泥浆和油田化学品等。这些污染物都含有一定的重金属元素,在一定程度上能使得土壤的物理结构性能变差,土壤板结变硬继而失去种植能力。随着油田地质板块长期开发,原油含水率不断攀升,可能会对当地的地下水位造成影响,使得土壤次生盐渍化<sup>[24]</sup>,继而失去种植价值。

#### 3.6.3 农业生产和居民生活

农业生产过程中的农药化肥的大量使用也会造成重金属的累积。研究表明,常用化肥过磷酸钙中Cu、Zn、Pb、Cd含量高于钙镁磷肥,与生产原料磷矿石成分和生产工艺有关,过磷酸钙是通过酸法分解磷矿石制成,而钙镁磷肥是通过高温加热分解磷矿石制成,后者在高温煅烧过程中会挥发掉部分重金属。受制于生产原料,尿素和氯化钾含有一定的Pb、Cd。堆肥是利用一种或多种的

有机废弃物通过堆积高温和发酵而制成的肥料,从现有数据值看来,堆肥中 Cu、Zn、Pb 的含量普遍相对较高<sup>[25]</sup>。

大量研究表明施肥后土壤中 Cd 含量增加,最高增加 0.73 mg/kg。据估计,84.6%的研究表明施肥后可降低土壤中 Cu 含量,而 80%和 69.2%的研究结果表明施肥后土壤 Cd 和 Pb 的含量明显增加<sup>[25]</sup>。本研究区域中 Cd 来自农业生产的概率较大。

此外,居民生活对土壤中重金属含量的影响也不容忽视,经调查走访,研究区域内农田存在居民生活垃圾填埋、焚烧和生活废水直排现象,这些都能进一步促进重金属在土壤中的累积<sup>[26]</sup>。

根据负荷因子分析及上文其他统计结果,研究区域土壤第一主成分的贡献率较高,重金属 Ni、Cr、Cd 的含量存在一定的相关性,主要来源可能与自然累积有关,As、Cu、Pb 等重金属元素受人类活动影响(油田开发、农业生产和当地居民的生活污染),重金属来源与累积途径如图 3 所示。

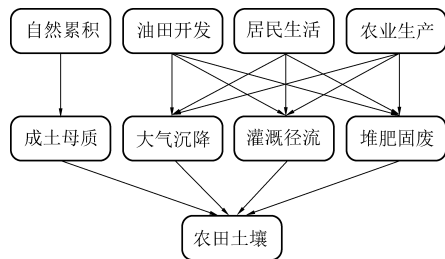


图 3 中原油田井场周边土壤重金属来源与累积途径

## 4 结论

(1)研究区土壤重金属的空间分布具有显著的特征,Zn、Cr 含量的平均值是河南省土壤背景值的 1~2 倍,存在积累效应,其余重金属含量均低于河南省背景值。所有元素的变异系数均小于 1,属于轻微变异性,但是所有元素的 Kolmogorov-Smirnov 检验结果均为显著 ( $P < 0.05$ ),为非正态分布,表明该区域土壤受农业生产活动和周边石油开采等人类活动的轻微影响。

(2)研究区土壤重金属存在潜在生态风险,总体处于轻微水平。其中 Cd 风险指数范围为 18.1~69.6,存在轻微至强生态风险,轻微风险占 96%,为该研究区域土壤的主要生态危害元素。

(3)研究区具有重金属累积的地形与水文条件,土壤重金属 Ni、Cr、Cd 的含量存在一定的相关性,与自然累积有关,As、Cd、Cu 重金属可能受到油田开发、农业生产和当地居民的生活污染影响。

(4)总体来说,研究区土壤重金属含量都处于清洁范畴,仅 0.3% 的检测结果超过风险筛选值 (GB15618—2018)。受自然积累和人类活动影响,虽然 Cr、As、Cd 存在一定的潜在生态风险,但是研究区的土壤环境质量总体处于安全水平。

## 参考文献

- [1] 李沉蔚. 黄河三角洲石油烃污染背景下重金属的迁移富集规律研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2019: 27-33.
- [2] E. G. Carls, D. B. Fenn, S. A. Chaffey. Soil contamination by oil and gas drilling and production operations in Padre Island National Seashore, Texas, U. S. A. [J]. Journal of Environmental Management, 1995, 45: 273-286.
- [3] C. Oprea, O. Maslov, M. Gustova, et al. IGAA and XRF methods used in oil contamination research [J]. Vacuum, 2009, 83: 162-165.
- [4] 潘丽娟, 叶艳, 张警文, 等. 西北油田塔里木地区水基钻井液体系环保控制指标研究 [J]. 石油与天然气化工, 2018, 47 (4): 107-112.
- [5] 山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 等. 陕北原油污染土壤不同层次重金属含量及分布特性分析 [J]. 环境污染与防治, 2014, 36 (3): 20-25.
- [6] J. Krzyzanowski. Environmental pathways of potential impacts to human health from oil and gas development in northeast British Columbia, Canada [J]. Environmental Reviews, 2012, 20: 122-134.
- [7] M. Onojake, O. Frank. Assessment of heavy metals in a soil contaminated by oil spill: A case study in Nigeria [J]. Journal of Chemical Ecology, 2013, 29: 246-254.
- [8] M. Nie, N. Xian, X. Fu, et al. The interactive effects of petroleum-hydrocarbon spillage and plant rhizosphere on concentrations and distribution of heavy metals in sediments in the Yellow River Delta, China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 174: 156-161.
- [9] V. Antoniadis, B. Alloway. The role of dissolved organic carbon in the mobility of Cd, Ni and Zn in sewage sludge-amended soils [J]. Environment Pollution, 2002, 117: 515-521.
- [10] 周际海, 唐嘉婕, 郜茹茹, 等. 土壤水分含量对石油污染土壤微生物活性的影响 [J]. 南昌工程学院学报, 2019, 38 (6): 1976-1982.
- [11] 姚炎红, 王明霞, 左小虎, 等. 典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响 [J]. 环境工程, 2016, 37 (12): 4750-4759.
- [12] 邓振山, 田晓娟, 贺晓龙, 等. 陕北油田原油污染土壤的生物修复试验研究 [J]. 环境工程, 2016, 34 (S1): 993-996.
- [13] 安玉姿. 土壤石油污染的危害与修复 [J]. 中国资源综合利用, 2017, 35 (5): 72-73.
- [14] 刘继朝. 中原油田石油污染土壤生物修复技术研究 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2009: 19-20.
- [15] 常瑛, 李彦荣, 施志国, 等. 基于内梅罗综合污染指数



- 的农田耕层土壤重金属污染评价 [J]. 安徽农业科学, 2019, 47 (19): 63-67+80.
- [16] 倪晓坤, 封雪, 于勇, 等. 典型固废处理处置场周边土壤重金属污染特征和成因分析 [J]. 农业环境科学学报, 2019, 38 (9): 2146-2156.
- [17] 陈莹. 陕西西部矿区土壤重金属污染与生态风险评价 [J]. 环境与发展, 2017, 29 (7): 35-36.
- [18] 古德宁, 李光明, 刘晓玲, 等. 濮阳工业园区土壤重金属分布研究 [C]. 中国环境科学学会学术年会论文集 (第九章), 2014: 6215-6219.
- [19] 孟敏, 杨林生, 韦炳干, 等. 我国设施农田土壤重金属污染评价与空间分布特征 [J]. 生态与农村环境学报, 2018 (11): 1019-1026.
- [20] 孙德尧, 薛忠财, 韩兴赵, 等. 冀北山区某矿区周边耕地土壤重金属污染特征及生态风险评价 [J]. 生态与农村环境学报, 2020 (2): 242-249.
- [21] 崔闪闪, 刘庆, 王静. 滨海开发带土壤重金属分布特征及来源分析 [J]. 土壤, 2019 (2): 352-358.
- [22] 张箐. 油田污染土壤的植物适应性及修复治理 [J]. 化学工程师, 2016, 30 (6): 30-33.
- [23] 傅晓文. 盐渍化石油污染土壤中重金属的污染特征/分布和来源解析 [D]. 济南: 山东大学, 2014: 19-23.
- [24] 郑明喜. 黄河三角洲石油污染的水土环境效应研究 [D]. 济南: 济南大学, 2012: 17-31.
- [25] 王美. 长期施肥对土壤及作物产品重金属累积的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2014: 5-9.
- [26] 周传斌, 徐琬莹, 曹爱新. 城市生活垃圾代谢的研究进展 [J]. 生态学报, 2014 (1): 33-40.