

DOI:10.19948/j.12-1471/P.2023.04.06

基于逻辑回归分析的焦化行业地下水有机污染物 分布特征及影响因素研究

李红超,单强*,马丙太,赵德刚

(河北省地质资源环境监测与保护重点实验室,石家庄 050000)

摘要:焦化厂生产过程产生的多环芳烃等有机污染物对环境特别是对土壤和地下水造成严重危害。为了明确焦化企业在不同水文地质条件下,对地下水的影响程度,本文利用逻辑回归分析方法对河北某市25家焦化企业连续三年的地下水有机污染物监测数据进行分析研究,结果表明:(1)在300组地下水样品中检出率最高的指标为菲、芴、萘等二环芳烃,苯及氯代烃;(2)通过对企业污染源特征、入渗途径、水文地质条件、取样时间四大方面15个指标进行逻辑回归分析发现,焦化行业地下水中苯系物检出率的主要影响因素是企业所处水文地质单元,地下水水力坡度和水位埋深越小的区域,苯系物检出率越高;多环芳烃类污染物检出率与包气带中粘性土厚度成正相关;氯代烃污染与企业生产年限成正相关。本次研究成果结合焦化企业所在水文地质条件、生产工艺等特征可定性分析焦化场地地下水污染特征,也可用于指导新建焦化场地选址。

关键词:焦化;地下水有机污染;逻辑回归;影响因素

中图分类号:X523

文献标识码:A

文章编号:2097-0188(2023)04-0047-08

炼焦工序包括备煤、装煤、煤的高温干馏、推焦、熄焦、破碎筛分、荒焦炉煤气净化、化学品回收(包括焦油、粗苯的精加工、脱硫)及废水处理等多个环节,是钢联合企业中产生污染最严重的生产单元之一^[1-3]。中国是世界焦炭生产大国,焦炭产量和出口量日益增加,已成为全球焦炭的生产和供应中心^[4]。随着经济飞速发展,环境污染问题日趋严重,2008年国家修订《焦化行业准入条件》,许多焦化厂被迫停止生产或搬离原址,但其对地下水和土壤造成的污染却依然存在^[4-9]。

逻辑回归分析是采用一定的数学表达式来描述一个或几个变量的变化对另一个变量的影响程度^[10-11],可以准确计量各变量之间的相互关系,达到良好的预测效果^[12]。回归分析在环境领域的研究已出现在大气污染、地表水水质等方面^[13-14]。

本研究以河北某市25家焦化企业连续三年所排放地下水为研究对象,采用逻辑回归分析方法,对地下水有机污染物的影响因素和分布特征进行分析,明确焦化行业对地下水污染的主要影响因素,以期

为焦化行业地下水环境管理提供指导意见。

1 研究区概况与取样分析

1.1 研究区概况

研究区属温带大陆性季风气候,年均气温10~11℃,多年平均降水量570~640 mm,地域差异大,总体上由北向南逐渐减少。本区地势北高南低,北部为低山丘陵区,向南依次为冲洪积、海湖积平原。地质构造上本区处于燕山褶皱带东段和黄骅拗陷带交接处,是一个构造运动异常活跃的地区。区内广泛分布有元古界变质岩、太古界沉积岩及新生界松散沉积岩类地层,构造裂隙水、孔隙水和岩溶水在相应的水文地质单元内赋存,相互之间联系密切。研究区水文地质单元分为山区水文地质单元和平原水文地质区两个大区,其中平原水文地质区可分为冲积倾斜平原水文地质单元和滨海平原水文地质亚区^[15-16](表1)。其中山区水文地质单元以基岩裂隙水、第四系孔隙水为主,局部赋存碳酸岩类裂隙水,主要接受大气降水补给,地下水埋深较浅,水岩作用

收稿日期:2023-05-25

资助项目:中央水污染防治资金“唐山市海子沿水源补给区地下水环境监测自然衰减风险管控项目(TSHRZB2021-30)”

作者简介:李红超(1988-),女,硕士研究生,就读于中国地质大学(北京),高级工程师,主要研究方向为地下水环境,E-mail:lihongchao1988@163.com。

*通讯作者:单强(1984-),高级工程师,从事水文地质、地下水污染防治相关工作,E-mail:15102533329@163.com。

表1 研究区水文地质条件
Table 1 Hydrogeological conditions of the study area

水文地质分区		分布区域	环境水文地质条件简述
大区	亚区		
山区水文地质单元(II)	冲积倾斜平原水文地质单元(I ₁)	山间盆地,分散于研究区北部局部地区	分布在山前丘陵前缘开阔地带,地下水以第四系现代冲积层潜水为主,含水层岩性主要为砂、砂砾石、砂卵石层、地下水丰富,埋藏较浅,地下水水力坡度较大
	冲积海积平原水文地质单元(I ₂)	基岩山区主要分布于研究区北部	地下水以裂隙孔隙潜水为主,富水性较弱,受地质构造影响较大
平原水文地质区	冲积倾斜平原水文地质单元(I ₁)	研究区中南部	地下水为全淡水区,含水层颗粒较粗,由砂砾石、砂含卵石组成,富水性强,水质良好,一般为单一结构类型的重碳酸盐
	冲积海积平原水文地质单元(I ₂)	研究区南部	地下水为咸水分布区,含水层颗粒较细,由细砂、粉砂、局部粗砂组成,由于咸水广布,咸水体厚度因地而异,致使淡水含水层变化复杂。由于含水层颗粒细,渗透条件差,侧向迳流缓慢,地下水以垂直排泄为主

强烈,地下水水力坡度较大,流速快。平原区水文地质单元以第四系孔隙水为主,根据沉积物的岩性特征以及水文地质条件,在研究区可以划分出四个含水层组:第Ⅰ含水层组,底界埋深10~30 m,位于地表及浅部地段,直接接受大气降水补给和蒸发排泄,水循环条件好,为垂直强烈循环交替带;第Ⅱ含水层组底界埋深40~200 m,间接接受大气降水补给,水循环条件较好,为较强烈循环交替带;第Ⅲ含水层组底界埋深60~420 m,地下水具承压性,径流条件较差,为较差循环带;第Ⅳ含水层组底界埋深350~550 m,地下水具承压性,径流条件差,为弱循环带^[17]。

作为研究对象的25家焦化行业企业分散于不同的水文地质区,对于研究不同水文地质单元中地下水有机污染物的分布特征具有一定的意义。本次研究所选取的25家焦化企业均设有一眼专门的地下水环境监测井,建井工作严格按《地下水环境监测井建井技术指南》进行,其取水层位为第一层潜水含水层(表2)。

1.2 样品采集及测试

本次研究所需地下水样品采集工作始于2018年,每3、6、9、11月份进行采集,持续3个水文年,共采集样品300组,对每组样品均进行54项有机组分的检测。样品采集于各焦化企业监测井,采集过程、保存和管理严格按照《地下水样品采集技术指南》和《水质采样样品的保存和管理技术规定》进行。

1.3 质量控制与数据分析

1.3.1 质量控制

地下水样品采集结束后24 h内即送往实验室化验,本次实验室检测项目分析方法参照 USEPA 8270D,分析仪器为气相色谱-质谱连用仪(GC/MS2010Plus),检测方法以《生活饮用水标准检验方

法》(GB/T 5750.8-2006)为依据,地下水样品的实验室检测分析严格按照《地下水样品分析技术指南》进行。

1.3.2 数据分析

在300组水样中,均未检出指标共22项,分别为1,1,1-三氯乙烷、四氯化碳、溴二氯甲烷、一氯二溴甲烷、溴仿、1,3-二氯苯、1,4-二氯苯、1,2-二氯苯、1,2,4-三氯苯、苯并[a]蒽、二苯并[a,h]蒽、六氯苯、α-六六六、β-六六六、γ-六六六、δ-六六六、p,p'-DDE、p,p'-DDD、o,p'-DDT、p,p'-DDT、总六六六、总滴滴涕(表3)。

检出指标32项,本次对检出有机物均做了检出点数、检出率、检出值的范围、超标点数和超标率的计算(表3),其中:

$$\text{检出率}(\%) = \frac{\text{检出样品数}}{\text{检测样品总数}} \quad (1)$$

$$\text{超标率}(\%) = \frac{\text{超标样品数}}{\text{检测样品总数}} \quad (2)$$

$$\text{超标倍数} = \frac{\text{超标点某指标的含量}}{\text{III类水标准值}} \quad (3)$$

公式3中III类水标准值取自地下水国标(GB/T 14848-2017)。本次检出的32种有机指标的检出率在1.35%~70.27%之间,检出率最高的指标为菲,其他检出率较高的指标为茚、萘、蒽、二氯甲烷、1,2-二氯丙烷、萘烯、萘、苊、苯、蒽。菲的浓度范围为10.8~4 337 ng/L;茚的浓度范围为10.2~1 177 ng/L;萘的浓度范围为13.8~17 013 ng/L,说明焦化企业地下水已经受到一定程度的有机污染。根据《地下水质量标准(GB/T 14848-2017)》III类水标准,1,2-二氯乙烷、苯、1,2-二氯丙烷三项超标,超标率分别为1.35%、10.81%、1.35%(表3)。

2 结果分析

2.1 地下水有机污染特征

本研究中检出率超过20%的有11项指标,其中

表2 焦化企业基本概况
Table 2 Basic overview of coking enterprises

水文地质单元	企业 编号	生产 年限/a	年产量 /(t/a)	生产 工艺	年平均降 雨量/mm	包气带性质		
						总厚 度/m	包气带岩性	其中粘性 土厚度/m
山区水文 地质单元	A1	13	420	湿熄焦	633.51	3.4	粉土含砂	0
	A2	15	70	湿熄焦	633.51	3.4	粉土含砂	0
	A3	15	100	湿熄焦	630.34	3.2	细砂	0
	A4	15	80	湿熄焦	630.34	1.6	细砂、粉土、粗砂	0
	B1	15	330	干熄焦	633.51	4.4	粉质黏土	3
	B2	15	170	湿熄焦	633.51	30.7	粉土含砂	0
	B3	17	60	湿熄焦	633.51	13.5	粉土含砂、砂砾石	2.8
	B4	20	60	湿熄焦	633.51	20.3	细砂	0
平原 水文 地质 区	C1	15	110	湿熄焦	562.22	9	粉土、细砂、粉质黏土	1.5
	C2	15	60	湿熄焦	562.22	9.2	细砂	0
	C3	15	60	湿熄焦	562.22	12.3	粉质黏土	10.3
	C4	13	170	湿熄焦	562.22	6.5	细砂、粉质黏土	2.1
	C5	15	110	湿熄焦	562.22	13	粉土、细砂、粉质黏土	3.9
	C6	10	60	湿熄焦	562.22	7.5	粉质黏土	5.5
	C7	10	110	湿熄焦	571.61	5.2	粉砂	4.81
	C8	14	175	湿熄焦	575.35	3.1	粉质黏土	2.2
	C9	16	55	湿熄焦	575.35	2.67	粉细砂	0
	C10	15	70	湿熄焦	575.35	6.1	粉质黏土	3.1
	C11	22	130(停)	干熄焦	642.29	18.1	粉砂、粉细砂	5
	D1	11	207	湿熄焦	574.42	2.5	粉细砂、粉土	0.5
	D2	14	60	湿熄焦	574.42	2.5	粉粘、粉细砂	1.6
	D3	14	100(停)	湿熄焦	574.42	3.2	粉细砂、粉粘	1
	D4	9	60(停)	湿熄焦	574.42	1.2	粉细砂、粉土	0
	D5	9	420	湿熄焦	570.35	1.2	粉细砂	0
	D6	14	120	湿熄焦	587.58	3.1	粉细砂	0

8项为多环芳烃类,多环芳烃是焦化生产过程中的主要污染物(表3)。在焦炭生产过程中,炽热的焦炭从炭化室推出与空气骤然接触会产生CO、CO₂、C_xH_y等污染物,同时煤是一种“不清洁”能源,普遍含有氯元素,在湿式熄焦的生产工艺中,红热的焦炭与水、空气直接接触,产生烃类化合物^[19]。

在本次调查中,二氯甲烷(37.84%)、1,2-二氯丙烷(31.08%)检出率均超过30%,1,2-二氯乙烷、1,2-二氯丙烷均超过地下水Ⅲ类水质标准,建议在以后的监测中,应对1,2-二氯乙烷、1,2-二氯丙烷、二氯甲烷加以重点监测与分析,并对可能产生的污染源、生产工艺做详细的调查研究。

2.2 不同水文地质单元有机污染物分布特征

研究区25家焦化企业中,位于冲积倾斜平原水文地质单元内共11家,山区水文地质单元内共8家,冲积海积平原水文地质单元内共6家。分别针对三个地质单元内的有机污染物按照公式(1)~(3)计算其检出点数、检出率、检出值的范围、超标点数和超标率,在计算过程中,检测总样品数为在该水文地质单元内的检测样品总数。本次系统分析了检出率超

过20%的有机污染物(表4),和13种被检出的多环芳烃浓度平均值分布情况(图1)。

(1)山区水文地质单元

在山区水文地质单元(包括基岩山区和山间盆地),其中,氯乙烯、反式1,2-二氯乙烯、苯乙烯共3项均未检出,其他指标共29项,有不同程度的检出,检出率在4.17%~41.67%之间,检出率超过30%的有机物依次为二氯甲烷、菲、三氯甲烷、1,2-二氯丙烷4种(表4)。其中,检出率最高的指标为二氯甲烷,浓度范围为2.56~6.84 mg/L,未出现超标指标。在该水文地质单元中,检出率超过30%的有机物中多环芳烃1种,氯代烃3种,其中,多环芳烃平均检出率为30.83%,氯代烃平均检出率30.21%。

(2)冲积倾斜平原水文地质单元

在该水文地质单元中,均未检出的指标共10项,分别为氯乙烯、反式1,2-二氯乙烯、顺式1,2-二氯乙烯、四氯乙烯、氯苯、屈、苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽、茚并[1,2,3-cd]芘、苯并[g,h,i]花。其他22项指标,均有不同程度的检出,检出率在3.03%~78.79%之间(表4)。其中,检出率最高的指标为菲,浓度范围为13.3

表3 研究区地下水有机污染物检出情况统计表
Table 3 Statistical of organic pollutants detected in groundwater in the study area

水样编号	监测因子	III类标准值	最大值	最小值	检出点数	检出率/%	超标个数	超标率/%	最大超标倍数
挥发性有机污染物	氯乙烯	5.0	1.7	1.7	1	1.35	0	0	
	1,1-二氯乙烯	30.0	0.58	0.3	4	5.41	0	0	
	二氯甲烷	20.0	6.84	0.5	28	37.84	0	0	
	反式1,2-二氯乙烯	50.0	0.63	0.63	1	1.35	0	0	
	顺式1,2-二氯乙烯	50.0	1.87	0.37	4	5.41	0	0	
	三氯甲烷	60.0	1.64	0.23	13	17.57	0	0	
	1,2-二氯乙烷	30.0	131	0.33	11	14.86	1	1.35	4.37
	苯	10.0	312.8	0.3	21	28.38	8	10.81	31.28
	三氯乙烯	70.0	10.9	0.21	9	12.16	0	0	
	1,2-二氯丙烷	5.0	16.8	0.2	23	31.08	1	1.35	3.36
	甲苯	700.0	19.3	0.4	9	12.16	0	0	
	1,1,2-三氯乙烷	5.0	3.04	0.37	8	10.81	0	0	
	四氯乙烯	40.0	0.36	0.28	3	4.05	0	0	
	氯苯	300.0	0.39	0.19	4	5.41	0	0	
	乙苯	300.0	18.8	0.86	7	9.46	0	0	
	间、对二甲苯	500.0	21.6	0.4	7	9.46	0	0	
挥发性有机污染物	苯乙炔	20.0	12.4	0.67	6	8.11	0	0	
	邻二甲苯	500.0	16.6	0.48	9	12.16	0	0	
	萘	100 000.0	17 013	13.8	41	55.41	0	0	
	萘烯	/	838	10	23	31.08	0	0	
	萘	/	12 417	10	22	29.73	0	0	
	苈	/	1 177	10.2	43	58.11	0	0	
	菲	/	4 337	10.8	52	70.27	0	0	
	蒽	1 800 000.0	1 228	10.1	20	27.03	0	0	
	荧蒽	240 000.0	776	10	34	45.95	0	0	
	苈	/	439	10.2	22	29.73	0	0	
	屈	/	14.4	14.4	1	1.35	0	0	
	苯并[b]荧蒽	4 000.0	30.8	30.8	1	1.35	0	0	
	苯并[k]荧蒽	/	10.8	10.8	1	1.35	0	0	
	苯并[a]苈	500.0	20.5	2.146	4	5.41	0	0	
	茚并[1,2,3-cd]苈	/	21.7	21.7	1	1.35	0	0	
	苯并[g,h,i]花	/	16.7	16.7	1	1.35	0	0	

~4 337 ng/L。在该水文地质单元中,检出率超过30%的有机物中多环芳烃7种,氯代烃2种。

(3) 冲积海积平原水文地质单元

在该水文地质单元中,1,1-二氯乙烯、四氯乙烯、氯苯、屈、苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽、茚并[1,2,3-cd]苈、苯并[g,h,i]花共8项指标均未检出,其他指标共24项,有不同程度的检出,检出率在5.883%~94.12%之间,检出率超过30%的有机物依次为苈、菲、萘、荧蒽、苯、萘烯、萘,共7种,其中,检出率最高的指标为苈(94.12%),浓度范围为13.9~1 177 ng/L。在该水文地质单元中,检出率超过30%的有机物中多环芳烃6种,苯系物1种,其中,多环芳烃平均检出率为64.71%,苯的检出率为58.58%。

山区水文地质单元含水层类型多为基岩裂隙水,地下水与大气连通性较差,埋深一般较深(5~20

m)。冲积海积平原区为松散岩类孔隙水,浅层地下水埋深浅(1.5~3.5 m),与地表的能量交换频繁,而冲积倾斜平原水文地质单元介于两者之间^[19-20]。二氯甲烷等氯代烃容易被淋溶到地下水中,并在地下水中易迁移,但由于二氯甲烷等具有很强的挥发性,当水位埋深较大时,不易挥发,容易在地下水中累积,即山区水文地质单元中,氯代烃为检出率较高,为该区域的主要有机污染物,其次为冲积倾斜平原区和冲积海积平原区。由此可见,位于在地下水埋深较大、与大气连通性差的区域,氯代烃类污染物也需要作为焦化企业重点关注的污染物之一^[21-22]。

3 地下水有机污染影响因素分析

3.1 逻辑回归分析

对于地下水污染事件而言,所要回归的随机变量为污染发生的概率 P_i , P_i 的取值范围为 $[0, 1]$ 。而地下水是否污染并非连续变量,假设受污染时 $P_i = 1$, 未受污染时 $P_i = 0$, 此时因变量为分类变量,因此一般的多元线性回归不再适用于此类变量之间相互关系的分析,需要将 P_i 转换成 $P_i = 1$ 的比例作为回归分析的因变量。而逻辑回归分析可解决此类问题,采用该分析方法能够确定在自变量 X_n 的作用下分类因变量 Y 发生的概率。假设 P 为模型响应概率,则逻辑回归模型可表示为如下形式:

$$P = \frac{e^{(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n)}}{1 + e^{(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n)}}$$

其中: P 为某种有机污染物是否检出; β_0 为截距; β_i 为逻辑系数; X_i 为组成的样品,即事件是否发生的观测值。

本研究中的逻辑回归模型是利用统计分析软件SPSS中的二元 Logistic 回归分析操作完成^[23]。通过逻辑回归模型计算得到逻辑回归系数后,为比较不同自变量对因变量的影响程度或作用大小,需要对回归系数进行标准化,标准化回归系数的绝对值越大,可认为它对因变量的影响就越大。标准化方法参考 Menard S(2002)中的方法^[24]。

本文采用多元逻辑回归分析方法对焦化企业有

表 4 不同水文地质单元有机污染物的检出情况统计表
Table 4 Statistical table of organic pollutants detected in different hydrogeological units

分区	检测项目	单位	最大值	最小值	检出 点数	检出 率	超标 个数	超标 率	最大超 标倍数
冲积倾 斜平原 水文地 质单元	菲	ng/l	4 337	13.3	26	78.79	0	0.00	
	萘	ng/l	12 786	13.8	20	60.61	0	0.00	
	芴	ng/l	661	10.2	20	60.61	0	0.00	
	荧蒽	ng/l	776	13	17	51.52	0	0.00	
	二氯甲烷	μg/l	6.71	0.5	13	39.39	0	0.00	
	1,2-二氯丙烷	μg/l	16.8	0.2	13	39.39	1	3.03	3.36
	茈	ng/l	439	10.3	13	39.39	0	0.00	
	蒽	ng/l	1 228	10.1	11	33.33	0	0.00	
山区水 文地质 单元	茈	ng/l	12 417	10.4	10	30.30	0	0.00	
	二氯甲烷	μg/l	6.84	0.56	10	41.67	0		
	菲	ng/l	232	10.8	10	41.67	0		
	三氯甲烷	μg/l	1.64	0.56	8	33.33	0		
冲积海 积平原 水文地 质单元	1,2-二氯丙烷	μg/l	1.87	0.23	8	33.33	0		
	芴	ng/l	1 177	13.9	16	94.12	0	0	
	菲	ng/l	1 022	11.1	16	94.12	0	0	
	萘	ng/l	17 013	19.4	15	88.24	0	0	
	荧蒽	ng/l	75.3	10	11	64.71	0	0	
	苯	μg/l	42.4	0.32	10	58.82	3	16.65	4.24
	茈烯	ng/l	838	10	10	58.82	0	0	
	茈	ng/l	1 025	10	10	58.82	0	0	

机污染指标检出情况的原因进行分析。由于天然条件下,地下水中不存在有机物,因此在本文中,以保守研究为前提,若有机指标检出则判定该井位地下水为污染。由于本研究检出的有机污染物种类较多,因此本次将有机污染物划分为3个主要类型,分别为氯代烃、苯系物、多环芳烃,某类别中有一项指标检出即判定该类别有检出。另外,焦化厂地下水有机污染成因复杂,影响因素众多,本文分别从企业

污染源特征、入渗途径、水文地质条件、时间因素四个方面确定七类影响因素,其中时间因素是指不同年份、不同季度对取样结果影响,上述共15个评价指标,运用逻辑回归的方法,分析影响地下水有机污染物检出的关键因素^[25-27]。评价指标统计结果见表5。

3.2 结果分析

将15项评价指标进行逻辑回归与逐步回归分析后,得到结果见表6。结果显示焦化行业地下水污染的影响因素主要受生产年限、年产量、是否停产、生产工艺、包气带厚度、粘性土厚度、所处水文地质单元、含水介质类型、取样时间9个指标影响,不同污染物类型的主要影响因素不同^[28-29]。

焦化行业厂区范围内地下水检出氯代烃的主要影响因素有生产因素和包气带。其中,主要受到生产年限影响,生产年限越长,氯代烃检出率越高;其次受到是否停产影响,由检出率与是否停产成负相关看出,停产后,氯代烃检出率下降;最后受到包气带因素影响,包气带越厚,检出率越低。

焦化行业厂区范围内地下水检出苯系物的主要影响因素有生产因素、包气带和水文地质单元,其中焦化企业所处水文地质单元对苯系物的检出率影响最大。首先,在冲积倾斜平原水文地质单元和冲积海积平原水文地质单元中苯系物更易检出,分析原因可能是该类型水文地质单元较其他单元地下水水

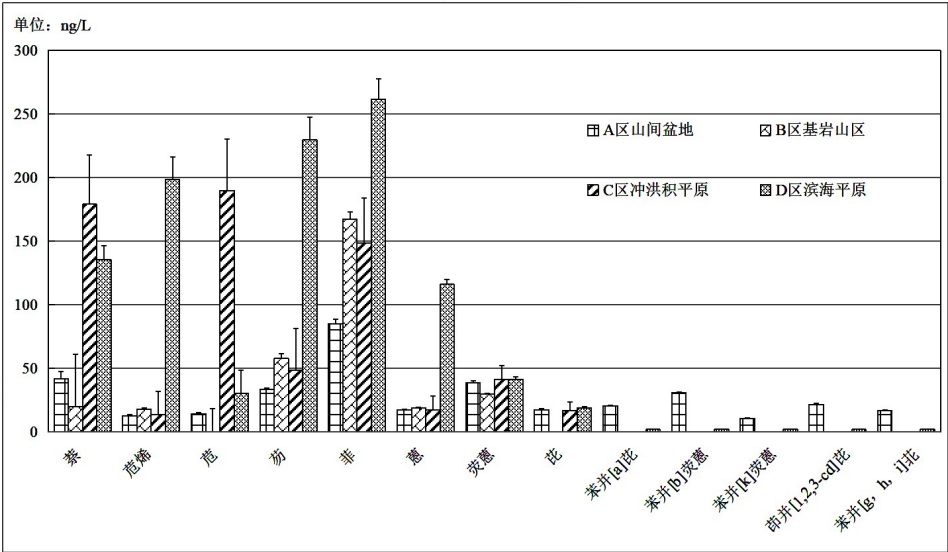


图 1 不同水文地质单元内 PAHs 检出浓度
Fig.1 Concentration of PAHs detected in different hydro-geological units

表5 逻辑回归分析指标一览表

Table 5 List of logistic regression analysis indicators

影响因素	所属类别	指标
企业污染源特征	生产因素	生产年限
		年产量
		是否停产
		生产工艺
入渗途径	包气带	包气带厚度
	气象	粘性土厚度
		年均降水量
水文地质条件	含水介质类型	孔隙水
		裂隙水
	地下水类型	潜水
		承压水
	水文地质单元类型	冲积倾斜平原水文地质单元
		山区水文地质单元
		冲积海积平原水文地质单元
其他	时间因素	不同季度取样

力坡度较小、地下水流速较慢,污染物一旦进入地下水中难以稀释和扩散,此外,该类型水文地质单元地下水埋深相对较小,这与包气带厚度越大,苯系物检出率越低的结论一致;其次,苯系物检出率受到生产年限影响,生产年限越长,苯系物检出率越高;再次,苯系物检出率还受到生产工艺影响,湿熄焦工艺下更容易检出;最后,苯系物检出率与包气带厚度呈负相关,包气带越厚,检出率越低。

对于多环芳烃类污染物^[30-31],与生产因素不相关,主要与时间因素(取样时间)、包气带、和含水介质类型有关。在连续三年监测过程中,取样时间越晚,多环芳烃检出率越低,分析原因是由于在开展该项工作后,随着该市加强了执法检查,督导各焦化厂开展地下水环境状况调查,各焦化企业环保意识逐渐加强。另外,多环芳烃类污染物主要受到粘性土厚度影响,结果显示粘性土厚度大,检出率越低,说明粘性土对多环芳烃类污染物具有很好的阻滞作用。

4 结论与建议

本研究以河北某市焦化企业地下水为研究对象,利用25家焦化企业连续三年有机污染指标水质检测结果采用逻辑回归分析法,对地下水有机污染物的分布特征和影响因素进行分析。结果显示,在焦化企业地下水有机污染指标检出率最高的指标为菲、芴、萘等二环芳烃,苯,及氯代烃。通过逻辑回归分析方法得出,焦化行业地下污染的影响因素主要有生产年限、年产量、是否停产、生产工艺、包气带厚度、粘性土厚度、所处水文地质单元、含水介质类

表6 不同类型污染物检出率与影响因素的逻辑回归分析结果

Table 6 Logistic regression analysis results of detection rates and influencing factors of different types of pollutants

有机污染检出 物种类	数量	影响因素		逻辑回 归系数	显著 性	标准 化系 数
		因子	所属类型			
氯代烃	119	生产年限	生产因素	0.32	0	0.52
		是否停产		-2.38	0	-0.49
		包气带厚度	包气带	-0.10	0	-0.39
		生产年限	生产因素	0.243	0.001	0.39
苯系物	98	生产工艺		1.927	0.001	0.29
		包气带厚度	包气带	-0.093	0.006	-0.36
		水文地质单元	水文地质单元 类型	0.919	0.029	0.63
		冲积倾斜平原				
		水文地质单元		0.951	0.005	0.65
		冲积海积平原				
多环芳烃	175	取样时间	时间因素	-0.095	0.009	-0.18
		粘性土厚度	包气带	0.177	0.000	0.24
		含水介质	含水介质类型	1.098	0.013	0.22
		含水介质类型				

注:显著性比较方法为:P值法

型、取样时间9个指标,焦化行业地下水中苯系物检出率的主要影响因素是企业所处水文地质单元,地下水水力坡度和水位埋深小的区域,苯系物检出率越高;多环芳烃类污染物检出率与包气带中粘性土厚度成正相关;氯代烃污染与企业生产年限成正相关。若新建或迁建焦化企业时,应选择包气带厚度大粘性土层厚占主要的的孔隙水水文地质单元内,从而将焦化行业对地下水的影响降到最小。

参考文献:

- [1] 郝雅琼,周奇,杨玉飞,等.炼焦行业危险废物精准管控关键问题与对策[J].环境工程技术学报,2021,11(05):1004-1011.
- [2] 楼春,钟茜.焦化厂场地土壤污染分布特征分析[J].中国资源综合利用,2019,37(04):177-179.
- [3] 蒋慕贤,葛宇翔,郭赞.焦化场地典型污染物分布特征研究进展[J].环境与发展,2016,28(06):50-54.
- [4] 贾晓洋,姜林,夏天翔,等.焦化厂土壤中PAHs的累积、垂向分布特征及来源分析[J].化工学报,2011,62(12):3525-3531.
- [5] 张亦弛,于玲红,王培俊,等.某焦化生产场地典型污染物的垂向分布特征[J].煤炭学报,2012,37(7):1211-1218.
- [6] 赵丹,廖晓勇,阎秀兰,等.不同化学氧化剂对焦化污染场地多环芳烃的修复效果[J].环境科学,2011,32(3):849-856.

- [7] 卢晓霞,李秀利,马杰,等.焦化厂多环芳烃污染土壤的强化微生物修复研究[J].环境科学,2011,32(3):864-869.
- [8] 李合莲,陈家军,吴威,等.焦化厂土壤中多环芳烃分布特征及淋洗粒级分割点确定[J].环境科学,2011,32(4):1154-1158.
- [9] 何晓群,刘文卿.应用回归分析[M].北京:中国人民大学出版社,2015.
- [10] CHENINI I, MSADDEK H M. Groundwater recharge susceptibility mapping using logistic regression model and bi-variate statistical analysis[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2020, 53(2), 167-175.
- [11] PARK S, HAMM S, JEON H, et al. Evaluation of Logistic Regression and Multivariate Adaptive Regression Spline Models for Groundwater Potential Mapping Using R and GIS [J]. Sustainability, 2017, 9(7).
- [12] OANH NGUYEN THI KIM, KETSIRI LEELASAKULTUM. Analysis of meteorology and emission in haze episode prevalence over mountain bounded region for early warning[J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(11): 2261-2271.
- [13] LI X J, CHENG Z W, YU Q B, et al. Water quality prediction using multimodal support vector regression: case study of Jialing River, China[J]. Journal of Environmental Engineering, 2017, 143(10): 04017070.
- [14] MOUIGNI BARAKA NAFOUANTI, JUNXIA LI, et al. Prediction on the fluoride contamination in groundwater at the Datong Basin, Northern China: Comparison of random forest, logistic regression and artificial neural network, Applied Geochemistry[J]. Applied Geochemistry, 2021(132): 105054.
- [15] 张卓,柳富田,陈社明,等.滦河三角洲高氟地下水分布特征、形成机理及其开发利用建议[J].中国地质,2023, 50(03):887-896.
- [16] 杨会峰,孟瑞芳,李文鹏,等.海河流域地下水资源特征和开发利用潜力[J].中国地质,2021,48(04):1032-1051.
- [17] 张兆吉,费宇红,郭春艳,等.华北平原区域地下水污染评价[J].吉林大学学报(地球科学),2012,42(05):1456-1461.
- [18] 侍玉苗.煤及煤与废塑料共热解焦炭气化过程中氯的变化规律与脱氯研究[D].山东科技大学,2007.
- [19] 张千千,邢锦兵,王慧玮,等.河北省某大型焦化厂地下水中多环芳烃的污染特点、源解析及生态风险评价[J].环境科学,2023,44(02):807-815.
- [20] 李立伟,傅大庆.某焦化厂地下水污染特征研究[J].资源信息与工程,2019,34(03):154-155.
- [21] 陈旭东.唐山某焦化厂地下水污染规律研究[D].河北地质大学,2018.
- [22] 王东.焦化场地地下水基础环境调查与评价[D].华北理工大学,2017.
- [23] Lemeshow S, Hosmer D W. Applied Regression Analysis [M]. New York: Wiley, 1989.
- [24] Menard S. Applied Logistic Regression Analysis[M]. Thousand Oaks, CA: Sage Publications, Inc., 2002.
- [25] 马晋,何鹏,杨庆,等.基于回归分析的地下水污染预警模型[J].环境工程,2019,37(10):211-215.
- [26] 田西昭,宫志强,袁子婷,等.冀东某在产焦化厂土壤和地下水特征污染物分布及成因分析[C]//中国环境科学学会环境工程分会.中国环境科学学会2021年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场论文集(一).
- [27] 刘磊,王宇峰,李凯琴,等.华北某焦化厂退役场地及其周边地下水环境调查与风险评估[J].科技创新导报, 2019, 16(16):128-134+136.
- [28] 杜恒.焦化厂地块土壤污染状况分析[J].能源与环保, 2022, 44(04):45-51.
- [29] 常允新,王振涛,秦鹏.莱芜市南冶拟建焦化项目对地下水环境影响分析[J].山东国土资源,2007(03):4-6+10.
- [30] 王佩,蒋鹏,张华,等.焦化厂土壤和地下水中PAHs分布特征及其污染过程[J].环境科学研究,2015,28(05):752-759.
- [31] 孟祥帅.我国北方某典型钢铁企业场地多环芳烃(PAHs)污染特征研究[D].中国地质大学(北京),2020.

Study on distribution characteristics and influence factor of groundwater organic pollutants in coking industry based on logistic regression analysis

LI Hongchao, SHAN Qiang, MA Bingtai, ZHAO Degang

(Hebei Key Laboratory of Geological Resources and Environment Monitoring and Protection, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Organic pollutants such as Polycyclic aromatic hydrocarbon produced in the production process of coking plants cause serious harm to the environment, especially to soil and groundwater. In order to determine the degree of influence of coking enterprises on groundwater under different hydrogeological conditions, this article uses logistic regression analysis to analyze and study the monitoring data of organic pollutants in groundwater from 25 coking enterprises in a certain city of Hebei Province for three consecutive years. The results show that: (1) the indicators with the highest detection rate in 300 groups of groundwater samples are Phenanthrene, Fluorene, Naphthalene and other Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Benzene and Chlorinated hydrocarbons; (2) Through logistic regression analysis of 15 indicators including pollution source characteristics, infiltration pathways, hydrogeological conditions and sampling time, it was found that the main influencing factors for the detection rate of Benzene series compounds in groundwater in the coking industry are the hydrogeological unit in which the enterprise is located. In areas with small groundwater hydraulic slope and burial depth, the higher the detection rate of Benzene series compounds; The detection rate of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon pollutants is positively correlated with the thickness of cohesive soil in the aeration zone; Chlorinated hydrocarbon pollution is positively correlated with the production years of enterprises. The research results can qualitatively analyze the groundwater pollution characteristics of coking sites based on the hydrogeological conditions and production processes of the coking enterprise, and can also be used to guide the selection of new coking site locations.

Key words: coking industry; groundwater organic pollutants; logistic regression; influencing factor

(上接27页)

Research on construction of technical standard system for mineral geology based on six-dimensional structure model

WANG Jiasong, WANG Liqiang, ZHENG Zhikang

(Tianjin Center, China Geological Survey (North China Center of Geoscience Innovation), Tianjin 300170, China)

Abstract: The standard system is the scientific basis for the planning and deployment of medium- and long-term standardization work of mineral geology. In this paper, a six-dimensional structural model is used to construct a technical standard system for mineral geology. The technical standard system includes 162 technical standards of 13 sub-categories in four categories: mineral geological survey, mineral geological exploration, conservation and comprehensive utilization of mineral resources, and national survey of mineral resources. It comprehensively matches the investigation and evaluation of energy and strategic mineral resources, the new round of prospecting breakthrough strategic actions and the national mineral resources national situation survey. Based on the dimensional analysis of the model, suggestions for system improvement such as strengthening the layout of general standards, improving the integration of standards, and optimizing the pattern of standard configuration are put forward.

Key words: mineral geology; technical standard; standard system; six-dimensional structure model; mineral geological survey