

# 废弃农药用地土壤和地下水污染与评价

徐彦龙<sup>1</sup>, 史学儒<sup>2</sup>, 彭安琪<sup>1</sup>, 梅 瑜<sup>1\*</sup>, 吕伯昇<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>浙江树人大学生物与环境工程学院, 浙江 杭州

<sup>2</sup>浙江工业大学环境学院, 浙江 杭州

<sup>3</sup>浙江工业大学膜分离与水科学技术研究院, 浙江 杭州

Email: 1790304941@qq.com, \*zjhzlbs@163.com, \*imy1220@163.com

收稿日期: 2021年5月27日; 录用日期: 2021年6月29日; 发布日期: 2021年7月12日

## 摘 要

采用单因子指数法和内梅罗指数法对位于华东地区中部的农药厂地块土壤和地下水污染状况进行了调查研究, 旨在为治理农药厂地块土壤有机物污染提供理论依据。结果表明, 土壤有机物超标点位8个, 主要沿地块四周分布。单因子指数法评价表明各检测到的有机物污染程度为毒杀芬 > p,p'-滴滴涕 > 四氯化碳 > 氯仿 >  $\alpha$ -六六六。内梅罗指数评价表明, 厂区北部循环水池北侧S38、西北部盐酸精制车间S18和西部双氧水贮罐区S10的综合污染指数为3270.69、69.90和4.05, 受污染最为严重, 主要沿地块四周分布, 与地下水总体流向由地块中部向四周流动一致。地下水有机物超标点位19个, 西北角成品仓库点位未超标。单因子指数法评价表明各检测到的有机物污染程度为二氯甲烷 > 挥发性酚 > 甲苯 > 4-氯苯胺 > 四氯化碳 > 敌草隆 > 氯苯 > 草甘膦 > 1,2-二氯丙烷 > 4-硝基苯胺 > 1,3,5-三甲基苯。内梅罗指数评价表明, 西南角硫酸亚铁车间W5点位、厂区东部生化池W19点位、西北部草甘膦车间W7点位、厂区西部草甘膦缩合车间W3-2点位、东部污泥池浓缩池W18-2点位和北部制氮制氧车间W9点位的综合污染指数达到1490.57、192.30、77.01、74.86、74.61和72.66, 污染严重。其余点位也受到不同程度的污染, 仅西北角成品仓库1点位未超标。

## 关键词

农药用地, 地块调查, 单因子指数法, 内梅罗指数, 污染评价

## Investigation and Assessment of Pollution Situation of Soil and Groundwater in Abandoned Pesticides Sites

\*通讯作者。

文章引用: 徐彦龙, 史学儒, 彭安琪, 梅瑜, 吕伯昇. 废弃农药用地土壤和地下水污染与评价[J]. 土壤科学, 2021, 9(3): 106-123. DOI: 10.12677/hjss.2021.93014

Yanlong Xu<sup>1</sup>, Xueru Shi<sup>2</sup>, Anqi Peng<sup>1</sup>, Yu Mei<sup>1\*</sup>, Bosheng Lv<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang Shuren University, Hangzhou Zhejiang

<sup>2</sup>College of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang

<sup>3</sup>Institute of Membrane Separation and Water Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang

Email: 1790304941@qq.com, \*zjhzlbs@163.com, \*imy1220@163.com

Received: May 27<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jun. 29<sup>th</sup>, 2021; published: Jul. 12<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

The single factor index and Nemerow index were used to investigate the soil and groundwater pollution of a pesticide factory in Central part of East China, in order to provide a theoretical basis for the treatment of soil organic pollution. The results showed that there were 8 exceeding standard points of soil organic matter, mainly distributed around the plot. The single factor index method indicated that the pollution degree of each detected organic matter in soil samples was Toxaphene > p,p'-DDT > Carbon Tetrachloride > Chloroform >  $\alpha$ -benzex. Nemerow index evaluation showed that the comprehensive pollution index of S38 in the north of the circulating pond, S18 in the northwest of hydrochloric acid refining workshop and S10 in the west of hydrogen peroxide storage tank area were 3270.69, 69.90 and 4.05, which were the most seriously polluted, mainly distributed around the plot, consistent with the general flow of groundwater from the middle to the surrounding area. There were 19 points of groundwater organic matter exceeding the standard, and the finished product warehouse in northwest corner did not exceed the standard. The single factor index method showed that the pollution degree of organic pollution detected was Dichloromethane > Volatile phenol > Toluene > 4-chloroaniline > Carbon tetrachloride > Diuron > Chlorobenzene > Glyphosate > 1,2-dichloropropane > 4-nitroaniline > 1,3,5-trimethylbenzene. Nemerow index evaluation showed that, the comprehensive pollution indexes at W5 of ferrous sulfate workshop in the southwest corner, W19 of biochemical pond in the east of the plant, W7 of glyphosate workshop in the northwest, W3-2 of glyphosate condensation workshop in the west of the plant, W18-2 of sludge pond concentration tank in the east and W9 of nitrogen and oxygen production workshop in the north reached 1490.57, 192.30, 77.01, 74.86, 74.61 and 72.66, which were seriously polluted. The rest of the points were also polluted to varying degrees, only one point in the northwest corner did not exceed the standard.

## Keywords

Pesticide Land, Site Investigation, Single Factor Index, Nemerow Index, Pollution Assessment

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着华东地区中部产业结构调整优化的深入推进和城镇化建设进程的不断加快,大量企业被关停并转、破产或搬迁,腾出的工业企业地块作为城市建设用地被再次开发利用,人多地少的矛盾特别突出[1]。

一些企业遗留地块的土壤和地下水可能受到污染,存在环境安全隐患,土壤质量恶化加剧,已经影响到“美丽中国”建设和可持续发展的战略目标的实现,未来将面临更为严峻的挑战[2]。而土壤是生态和社会可持续发展的物质基础,是人类生存、兴国安邦不可或缺、不可替代、不可再生的战略资源[3] [4]。目前,国内外有关土壤污染的研究主要集中在土壤重金属污染评价[5] [6]、污染特征[7]、污染机制[8]、生态修复[9] [10]等。张云芸等人[2]采集了 67 个浙江省典型代表性农田土壤表层,对农田土壤重金属污染及生态风险进行了评价,发现了土壤重金属环境存在轻微生态风险。韩丰磊等人[11]采用单因子指数法和内梅罗指数法对某废弃石化地块土壤和地下水的污染状况进行了监测和评估,为石化地块污染修复、土地利用决策提供了决策依据。Cheng 等人[1]采集了浙江省 908 个农作物土壤样品,进行土壤中重金属检测,发现 14.65%的样品中存在重金属超标问题。而针对农药用地土壤和地下水的污染评价较为少见,针对地块的有机物污染状况和评价也较为少见。本研究针对华东地区中部某废弃农药用地进行土壤和地下水污染状况调查和评价。

研究选取典型的某农药厂搬迁后厂址进行污染调查。该厂处于华东地区中部,三面环绕小山丘,面积 211 亩,该农药厂生产历史悠久,到 2017 年 12 月停产历时 52 年,用地类型为工业用地。该厂不同时期产品方案各不相同,产品种类印证了我国农药发展历程,历经建厂早期计划经济的有机氯类农药(六六六、滴滴涕、毒杀芬、杀虫脞)、中期改革开放的有机磷类农药(甲胺磷、氧化乐果)、后期深化改革开放的低毒有机磷类杀虫剂及草甘膦除草剂发展轨迹,生产产品基本涵盖了我国不同时期主要的农药产品种类。厂区中部、东北部、东南部为生产车间,东南侧为废水处理站、循环水池及应急水池等,西部灌装区,东北侧固废暂存场所。2020 年 1 月完成拆除工作,2020 年 5 月开展地块调研工作。通过调查土地使用状况、工厂三废情况、污染源类型、厂区周边生态环境、敏感目标、污染源和污染物等,采集土壤和地下水样,选取评价因子,进行单因子指数法[12]和内梅罗指数法的污染评价[13],对农药类企业进行污染物的有效防范及地块调查工作提供指导性建议,为未来地块土壤和地下水修复的决策提供依据。

## 2. 监测与评价方法

### 2.1. 样品采集

土壤采样采用系统布点法和专业判断法相结合的布点方法,采样方法根据国家标准方法,以  $40 \times 40$  m 网格进行布点,并选择潜在污染最大的区域进行布点,计划地块内共布设 91 个土壤监测点位。地下 3 m 以内土壤的采样间隔为 0.5 m, 3~6 m 采样间隔为 1 m, 6~12 m 采样间隔为 1 m 至 2.0 m。地下水采样根据监测布点原则,系统布点法与专业判断布点法相结合的布点方法,以  $80 \times 80$  m 网格进行布点,在网格内通过专业判断布点法,选择潜在污染最大的区域进行布点,计划在地块内共布设 22 个地下水监测点位。各地下水采样点位分别布设两口地下水井,一口建浅井,建井深度至少达到地下水水位以下 3 m,另一口建深井,计划地下水钻探深度为达到基岩。背景对照监测点通过判断水流流向趋势、资料收集等,设置于地块外部区域外,土壤共布点 12 个,地下水布点 2 个。采样点如图 1 所示。

### 2.2. 分析项目与方法

监测项目为 GB36600-2018《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》45 项基本项目;行业典型污染特征物;根据 HJ25.1-2019《建设用地土壤污染状况调查技术导则》附录等,持久性有机污染物、农药为必测项目;生产历史涉及的主要产品、原辅材料及其环境衍生物,土壤检测项目共 98 项,地下水检测项目 100 项。

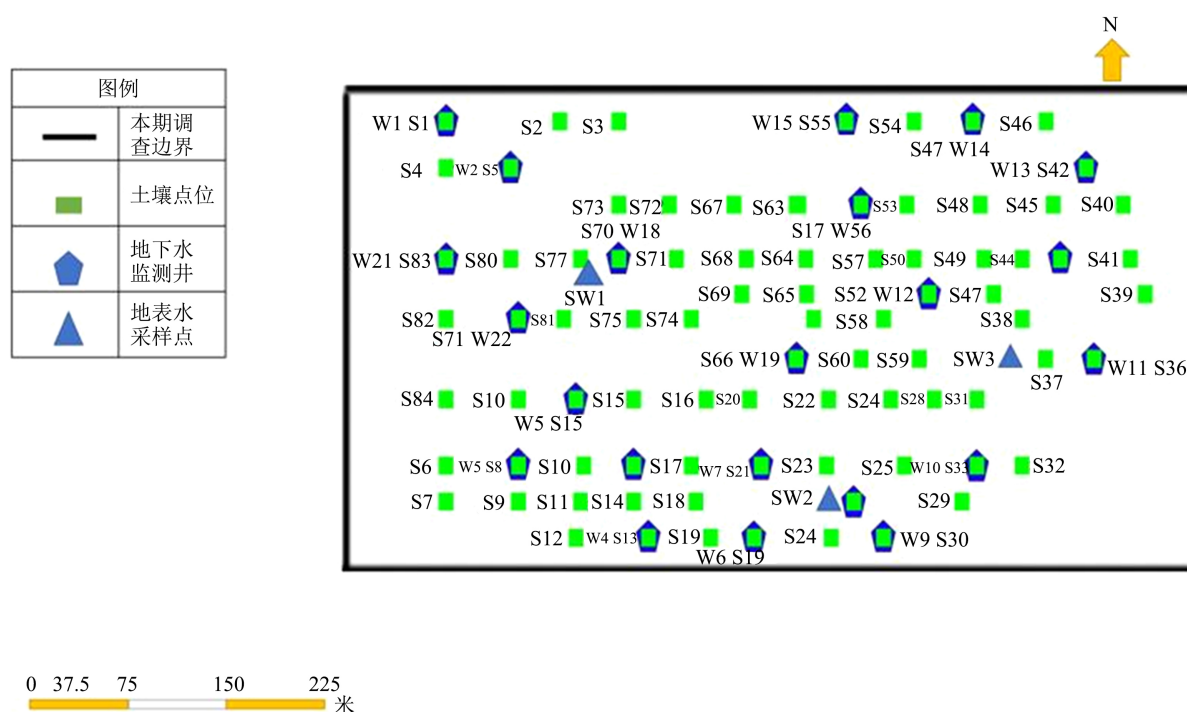


Figure 1. Sampling point distribution  
图 1. 采样点分布

## 2.3. 评价方法及评价标准

### 2.3.1. 评价方法

评价方法采用单因子指数法和内梅罗指数法。单因子指数( $P_i$ )如(1)所示[11] [14]:

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

式中  $P_i$  为污染物  $i$  的单因子指数;  $C_i$  为调查点位污染物  $i$  的浓度;  $S_i$  为污染物的评价标准。

内梅罗污染指数( $P_N$ )如(2)所示[15] [16]:

$$P_N = \sqrt{\frac{(P_{\max})^2 + (P_{\text{iave}})^2}{2}} \quad (2)$$

式中  $P_N$  为土壤中多种污染物综合污染指数;  $P_{\text{iave}}$  为调查点位土壤污染中样品单因子污染指数  $P_i$  的平均值;  $P_{\text{imax}}$  为调查点样品中单因子污染指数  $P_i$  的最大值, 各个污染物因素为影响最后综合污染指数的因素。

### 2.3.2. 评价标准

地块用地未来规划属第二类用地, 土壤采用 GB36600-2018《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》第二类用地筛选值标准; 原厂废水处理站出水达到 GB8978-1996《污水综合排放标准》新扩改一级标准后排入工业园区市政污水管网, 因此地下水采用 GB/T14848-2017《地下水质量标准》III类标准; 地表积水采用 GB8978-1996《污水综合排放标准》新扩改一级标准[17]。有机物污染等级划分依据是通过式(1)和(2)计算后, 与单因子指数和内梅罗指数标准对比, 确定有机物污染水平。有机物污染等级标准见表 1。

**Table 1.** Classification standard of soil pollution**表 1.** 土壤有机物污染分级标准

等级划分 Level	单因子污染指数 Single factor index	内梅罗指数 Nemerow index	污染等级 Pollution degree	污染水平 Pollution level
1	$P_i \leq 0.7$	$P_N \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P_i \leq 1.0$	$0.7 < P_N \leq 1.0$	警戒限	尚清洁
3	$1.0 < P_i \leq 2.0$	$1.0 < P_N \leq 2.0$	轻污染	土壤开始受到污染
4	$2.0 < P_i \leq 3.0$	$2.0 < P_N \leq 3.0$	中污染	土壤受中度污染
5	$P_i > 3.0$	$P_N > 3.0$	重污染	土壤受污染已相当严重

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 土壤的检测结果及讨论

##### 3.1.1. 土壤污染状况

土壤中各污染物检测结果见表 2。厂区内土壤 pH 值为 6.57~8.51; 7 种重金属除铬(六价)未被检出外, 6 种重金属(砷、镉、铜、铅、汞、镍)均被检出, 且均能满足 GB36600-2018《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准(试行)》第二类用地筛选值; 35 种挥发性有机物 26 种被检出, 其中 2 种 VOCs 污染物(四氯化碳、氯仿)不能满足 GB36600-2018《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准(试行)》第二类用地筛选值或其他风险筛查限值规定要求, 超标倍数 0.03~7.86 倍, 最大超标倍数为 S10 (7.0~7.5 m) 样品四氯化碳, 受污染最大深度为 S31 (9.0~10.0 m) 样品四氯化碳 0.03 倍; 27 种半挥发性有机物 20 种被检出, 均能满足 GB36600-2018《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准(试行)》第二类用地筛选值或其他风险筛查限值规定要求; 25 种有机农药及其他特征污染物 16 种被检出, 其中 4 种有机农药类( $\alpha$ -六六六、滴滴涕、狄氏剂、毒杀芬)不能满足 GB36600-2018《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准(试行)》第二类用地筛选值或其他风险筛查限值规定要求, 超标倍数 0.40~4561.50 倍, 最大超标倍数为 S38 (0.5~1.0 m) 样品毒杀芬, 受污染最大深度为 S16 (3.0~4.0 m) 样品  $\alpha$ -六六六 0.40 倍、狄氏剂 0.73 倍; 石油烃(C10-C40)均能满足 GB36600-2018《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准(试行)》第二类用地筛选值。12 个背景对照点 17 个土壤样品中共有 23 种检测污染物被检出(6 种重金属、13 种 SVOCs、2 种有机农药及其他特征污染物、石油烃和 pH), 仅 BJS3 (0.0~0.5 m) 毒杀芬超标, 最大超标倍数 349.00 倍, 位于地块东侧最近红线 240 m 处, 其余均能满足 GB36600-2018《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准(试行)》第二类用地筛选值或其他风险筛查限值规定要求。

**Table 2.** Determination results of monitoring indices in soil**表 2.** 土壤监测指标监测结果

序号	检测项目	对照点检出范围	地块内检出范围	送检数	检出数	检出率	筛查标准	超标数	超标率	超标点位	超标点浓度	超标倍数
<b>重金属</b>												
1	砷	2.39~31.3	0.95~51.5	398	398	100%	60	0	0%	/	/	/
2	镉	0.03~0.24	0.01~2.11	398	398	100%	65	0	0%	/	/	/
3	铜	11~36	4~1740	398	398	100%	18,000	0	0%	/	/	/
4	铅	23.7~60.1	12~180	398	398	100%	800	0	0%	/	/	/
5	汞	0.051~0.471	0.008~0.329	398	398	100%	38	0	0%	/	/	/
6	镍	9~43	6~118	398	398	100%	900	0	0%	/	/	/

Continued

挥发性有机物												
										S10 (5.0~6.0 m)	6.41	1.29
										S10 (7.0~7.5 m)	24.8	7.86
7	四氯化碳	$<1.3 \times 10^{-3}$	0.006~24.8	398	30	7.54%	2.8	5	1.26%	S15 (5.0~6.0 m)	5.92	1.11
										S16 (5.0~5.5 m)	3.17	0.13
										S31 (9.0~10.0 m)	2.87	0.03
8	氯仿	$<1.1 \times 10^{-3}$	0.002~1.99	398	28	7.04%	0.9	1	0.25%	S22 (1.5~2.0 m)	1.99	1.21
9	氯甲烷	$<1.0 \times 10^{-3}$	0.0054~0.0656	398	6	1.51%	37	0	0%	/	/	/
10	1,2-二氯乙烷	$<1.3 \times 10^{-3}$	0.0023~0.912	398	11	2.76%	5	0	0%	/	/	/
11	二氯甲烷	$<1.5 \times 10^{-3}$	0.0073~74.4	398	16	4.02%	616	0	0%	/	/	/
12	1,1,1,2-四氯乙烷	$<1.2 \times 10^{-3}$	0.0148	398	1	0.25%	10	0	0%	/	/	/
13	1,1,2,2-四氯乙烷	$<1.2 \times 10^{-3}$	0.0113~0.0279	398	4	1.01%	6.8	0	0%	/	/	/
14	四氯乙烯	$<1.4 \times 10^{-3}$	0.0187~0.125	398	3	0.75%	53	0	0%	/	/	/
15	1,1,2-三氯乙烷	$<1.2 \times 10^{-3}$	0.0151~0.199	398	2	0.50%	2.8	0	0%	/	/	/
16	三氯乙烯	$<1.2 \times 10^{-3}$	0.0075~0.522	398	5	1.26%	2.8	0	0%	/	/	/
17	苯	$<1.9 \times 10^{-3}$	0.0022~0.0222	398	30	7.54%	4	0	0%	/	/	/
18	氯苯	$<1.2 \times 10^{-3}$	0.0015~3.83	398	101	25.38%	270	0	0%	/	/	/
19	1,2-二氯苯	$<1.5 \times 10^{-3}$	0.0062~0.0613	398	10	2.51%	560	0	0%	/	/	/
20	1,4-二氯苯	$<1.5 \times 10^{-3}$	0.0069~0.123	398	6	1.51%	20	0	0%	/	/	/
21	乙苯	$<1.2 \times 10^{-3}$	0.0028~0.0551	398	11	2.76%	28	0	0%	/	/	/
22	苯乙烯	$<1.1 \times 10^{-3}$	0.0059~0.0215	398	3	0.75%	1290	0	0%	/	/	/
23	甲苯	$<1.3 \times 10^{-3}$	0.0013~40.1	398	69	17.34%	1200	0	0%	/	/	/
24	间二甲苯	$<1.2 \times 10^{-3}$	0.0014~0.0605	398	20	5.03%	570	0	0%	/	/	/
	对二甲苯	$<1.2 \times 10^{-3}$	0.0021~0.1140	398	15	3.77%		0	0%	/	/	/
25	邻二甲苯	$<1.2 \times 10^{-3}$	0.0016~0.7140	398	13	3.27%	640	0	0%	/	/	/
26	异丙苯	$<1.2 \times 10^{-3}$	0.0066~0.4360	398	7	1.76%	270	0	0%	/	/	/
27	正丙苯	$<1.2 \times 10^{-3}$	0.0014~0.2210	398	7	1.76%	260	0	0%	/	/	/
28	1,2,4-三甲苯	$<1.3 \times 10^{-3}$	0.0042~1.280	398	20	5.03%	220	0	0%	/	/	/
29	1,3,5-三甲苯	$<1.4 \times 10^{-3}$	0.0019~0.1650	398	20	5.03%	180	0	0%	/	/	/
30	2-氯甲苯	$<1.3 \times 10^{-3}$	0.0018~0.5370	398	19	4.77%	910	0	0%	/	/	/
31	4-氯甲苯	$<1.3 \times 10^{-3}$	0.0017~0.0478	398	3	0.75%	250	0	0%	/	/	/
32	1,2,4-三氯苯	$<0.3 \times 10^{-3}$	0.0038~0.2510	398	9	2.26%	101	0	0%	/	/	/
半挥发性有机物												
33	硝基苯	$<0.09$	6.02	398	1	0.25%	76	0	0%	/	/	/
34	苯并[a]蒽	0.07~0.22	0.06~0.22	398	15	3.77%	15	0	0%	/	/	/
35	苯并[a]芘	0.04~0.32	0.04~0.27	398	14	3.52%	1.5	0	0%	/	/	/
36	苯并[b]荧蒽	0.28	0.07~0.23	398	4	1.01%	15	0	0%	/	/	/
37	苯并[k]荧蒽	0.04~0.21	0.05~0.18	398	9	2.26%	151	0	0%	/	/	/
38	蒽	0.04~0.36	0.04~0.21	398	9	2.26%	1293	0	0%	/	/	/



## Continued

39	二苯并[a,h]蒽	0.05	0.06	398	2	0.50%	1.5	0	0%	/	/	/
40	茚并[1,2,3-cd]芘	0.09~0.17	0.08~0.16	398	7	1.76%	15	0	0%	/	/	/
41	萘	<0.03	0.09~0.66	398	2	0.50%	70	0	0%	/	/	/
42	2,4-二氯酚	<0.07	0.14	398	1	0.25%	843	0	0%	/	/	/
43	邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯	0.5	0.1~0.5	398	24	6.03%	121	0	0%	/	/	/
44	2,4-二硝基苯酚	<0.1	0.9~1.0	398	2	0.50%	562	0	0%	/	/	/
45	4-甲基苯酚	<0.1	0.2	398	1	0.25%	1406	0	0%	/	/	/
46	菲	0.03~0.11	0.03~2.08	398	8	2.01%	7578	0	0%	/	/	/
47	荧蒽	0.07~0.47	0.11~0.46	398	6	1.51%	10,000	0	0%	/	/	/
48	芘	0.06~0.41	0.05~0.39	398	9	2.26%	7578	0	0%	/	/	/
49	苯并[g,h,i]芘	0.06~0.21	0.06~0.19	398	8	2.01%	7578	0	0%	/	/	/
50	邻苯二甲酸二丁酯	0.1	0.1~0.4	398	4	1.01%	10,000	0	0%	/	/	/
51	2-甲基萘	<0.08	0.12~1.76	398	3	0.75%	1062	0	0%	/	/	/
52	4-氯苯胺	<0.09	0.13~1.68	398	5	1.26%	9	0	0%	/	/	/
<b>有机农药类及其他特征污染物</b>												
53	$\alpha$ -六六六	<0.03	0.42	398	1	0.25%	0.3	1	0.25%	S16 (3.0~4.0 m)	0.42	0.40
54	$\beta$ -六六六	<0.03	0.85	398	1	0.25%	0.92	0	0%	/	/	/
55	$\gamma$ -六六六	<0.03	1.40	398	1	0.25%	1.9	0	0%	/	/	/
56	p,p'-滴滴伊	0.12~0.24	0.12~3.30	398	12	3.02%	7.0	0	0%	/	/	/
57	o,p'-滴滴涕	<0.05	0.08~0.73	398	5	1.26%	6.7	0	0%	/	/	/
58	p,p'-滴滴滴	<0.03	0.03~6.91	398	13	3.27%	7.1	0	0%	/	/	/
59	六氯苯	<0.03	0.15	398	1	0.25%	1	0	0%	/	/	/
60	$\delta$ -六六六	<0.05	0.31	398	1	0.25%	1.2	0	0%	/	/	/
61	狄氏剂	<0.02	0.19	398	1	0.25%	0.11	1	0.25%	S16 (3.0~4.0 m)	0.19	0.73
62	草甘膦	<0.02	0.02~128	398	225	56.53%	10,000	0	0%	/	/	/
63	毒杀芬	560	80.2~7300	398	4	1.01%	1.6	4	1.01%	S38 (0.5~1.0 m)	7300	4561.50
										S61 (1.5~2.0 m)	80.2	49.13
										BJS3 (0.0~0.5 m)	560	349.00
64	敌草隆*	$<1.0 \times 10^{-3}$	0.0034~12.3	398	46	11.56%	1600	0	0%	/	/	/
65	甲基对硫磷	<0.95	37.8	398	1	0.25%	74	0	0%	/	/	/
66	甲醛	<0.02	2.19~10.3	398	20	5.03%	30	0	0%	/	/	/
67	$\alpha$ -硫丹	<0.02	0.56	398	1	0.25%	1687	0	0%	/	/	/
68	黄磷*	$<2.50 \times 10^{-3}$	0.0161~0.0322	398	4	1.01%	/	/	/	/	/	/
<b>其他</b>												
69	石油烃(C <sub>10</sub> -C <sub>40</sub> )	<6.00~151	6.19~1670	398	207	52.01%	4500	0	0%	/	/	/
70	pH(无量纲)	7.56~8.47	6.57~8.51	398	398	100%	/	/	/	/	/	/

注: 除注明外单位均为 mg/kg, /为未超标。

### 3.1.2. 地下水污染状况

地下水污染检测结果如表 3 所示。根据检测分析,地块内地下水 22 个采样点位 30 个样品 13 种常规化学指标除氰化物未被检出外,其余 12 种常规化学指标均难以全面满足 GB/T14848-2017《地下水质量标准》III 类限值规定要求;7 种重金属除铬(六价)、汞未被检出外,5 种重金属(砷、镉、铜、铅、镍)均被检出,且均不能满足 GB/T14848-2017《地下水质量标准》III 类限值规定要求,超标倍数 0.10~130.00 倍,最大超标倍数为 W15 样品铜;32 种挥发性有机物 22 种被检出,其中 6 种 VOCs 污染物(四氯化碳、二氯甲烷、1,2-二氯丙烷、氯苯、甲苯、1,3,5-三甲基苯)不能满足 GB/T14848-2017《地下水质量标准》III 类限值或其他风险筛查限值规定要求,超标倍数 0.02~2099.00 倍,最大超标倍数为 W5 样品四氯化碳;25 种半挥发性有机物 18 种被检出,其中 2 种 SVOCs 污染物(4-氯苯胺、4-硝基苯胺)不能满足 GB/T14848-2017《地下水质量标准》III 类限值或其他风险筛查限值规定要求,超标倍数 0.10~104.14 倍,最大超标倍数为 W18-2 样品 4-氯苯胺;21 种有机农药类及其他特征污染 2 种被检出,其中 2 种有机农药类(敌草隆、草甘膦)不能满足 GB/T14848-2017《地下水质量标准》III 类限值或其他风险筛查限值规定要求,超标倍数 0.48~22.57 倍,最大超标倍数为 W9-2 样品草甘膦;石油类全部被检出,最大 0.04 mg/L,均能满足 GB/T14848-2017《地下水质量标准》III 类限值规定要求。2 个地下水样品仅主要常规化学指标 pH、挥发性酚类、耗氧量、硫化物、总磷难以全面满足 GB/T14848-2017《地下水质量标准》III 类限值规定要求,南侧背景对照点地下水样品 pH6.01、挥发性酚类 0.0058 mg/L、耗氧量 3.99 mg/L、硫化物 0.041 mg/L、总磷 0.03 mg/L,北侧背景对照点地下水样品 pH5.53、挥发性酚类 0.0038 mg/L、耗氧量 1.97 mg/L、硫化物 0.048 mg/L、总磷 12.7 mg/L。

**Table 3.** Determination results exceeding standard values of monitoring indices in groundwater

**表 3.** 地下水监测指标超标情况

序号	检测项目	对照点检出范围	地块内检出范围	送检数	检出数	检出率	筛查标准	超标数	超标率	超标点位	超标点浓度	超标倍数
常规指标(单位:除注明外均为 mg/L)												
1	色度(度)	10	5~2000	31	22	70.97%	15	15	48.39%	W2	2000	132.33
										W2-2	1500	99.00
										W3	40	1.67
										W3-2	175	10.67
										W5	20	0.33
										W7	80	4.33
										W9-2	20	0.33
										W11	80	4.33
										W13	125	7.33
										W14	25	0.67
										W16-2	25	0.67
										W18	40	1.67
										W18-2	35	1.33
W19	35	1.33										
W21-2	20	0.33										
2	浑浊度(NTU)	<1	6~150	32	6	18.75%	3	6	18.75%	W2	30	9.00
										W7	25	7.33
										W9	80	25.67
										W16-2	6	1.00
										W18	150	49.00
W19	75	24.00										



## Continued

											W2-2	6.47	/
											W3-2	6.06	/
											W4	5.78	/
											W5	6.18	/
											W8	8.63	/
											W9	5.93	/
											W11	6.24	/
											W12	3.69	/
											W13	5.34	/
											W15	6.14	/
3	pH(无量纲)	5.53~6.01	2.93~8.63	32	32	100%	6.5~8.5	20	62.50%		W17	4.74	/
											W17-2	5.58	/
											W19	6.31	/
											W19-2	5.94	/
											W20	5.91	/
											W21	2.93	/
											W21-2	3.57	/
											W22	3.39	/
											BJW1	6.01	/
											BJW2	5.53	/
											W6	434	0.74
											W13	381	0.52
4	硫酸盐	12.3~24.1	6.53~1140	32	32	100%	250	5	15.62%		W15	425	0.70
											W21	522	1.09
											W21-2	1140	3.56
											W2	381	0.52
											W2-2	401	0.60
											W3-2	368	0.47
											W7	1390	4.56
											W9	362	0.45
											W12	2680	9.72
											W13	1770	6.08
											W15	38800	154.20
											W16	3480	12.92
5	氯化物	2.74~13.4	33.4~38,800	32	32	100%	250	18	56.25%		W16-2	1180	3.72
											W18	705	1.82
											W18-2	1160	3.64
											W19	959	2.84
											W19-2	682	1.73
											W20	916	2.66
											W21	664	1.66
											W21-2	983	2.93
											W22	715	1.86

Continued

											W2-2	0.0026	0.30
											W3-2	0.192	95.00
											W5	0.196	97.00
											W6	0.0051	1.55
											W7	0.0217	9.85
											W8	0.0038	0.90
											W9	0.0457	21.85
											W9-2	0.0025	0.25
											W13	0.0414	19.70
											W14	0.0892	43.60
6	挥发性酚类	0.0038~0.0059	0.0012~0.542	32	32	100%	0.002	22	68.75%		W15	0.122	60.00
											W16	0.124	61.00
											W16-2	0.0303	14.15
											W17	0.0304	14.20
											W17-2	0.101	49.50
											W19	0.542	270.00
											W20	0.0025	0.25
											W21	0.0069	2.45
											W21-2	0.0023	0.15
											W22	0.0044	1.20
											BJW1	0.0058	1.90
											BJW2	0.0038	0.90
											W2	317	104.67
											W2-2	351	116.00
											W3	32.3	9.77
											W3-2	106	34.33
											W4	3.14	0.05
											W5	20.8	5.93
											W6	29.4	8.80
											W7	123	40.00
											W8	6.26	1.09
											W9	16.8	4.60
											W9-2	61.5	19.50
											W11	20.7	5.90
											W12	4.30	0.43
											W13	82.1	26.37
7	耗氧量	1.97~3.99	2.46~629	32	32	100%	3.0	29	90.62%		W14	11.7	2.90
											W15	629	208.67
											W16	130	42.33
											W16-2	16.3	4.43
											W17	5.10	0.70
											W17-2	7.42	1.47
											W18	30.1	9.03
											W18-2	36.4	11.13
											W19	20.2	5.73
											W19-2	7.10	1.37
											W20	22.5	6.50
											W21	37.8	11.60
											W21-2	111	36.00
											W22	3.99	0.33
											BJW1	3.99	0.33

## Continued

											W1	0.773	0.55
											W2	366	731.00
											W2-2	298	595.00
											W3	1.77	2.54
											W3-2	27.6	54.20
											W4	2.58	4.16
											W5	42.3	83.60
											W6	15.6	30.20
											W7	81.4	161.80
											W9	18.7	36.40
											W9-2	25.8	50.60
											W11	39.5	78.00
8	氨氮	0.067~0.170	0.161~366	32	32	100%	0.50	26	81.25%		W12	13.7	26.40
											W13	117	233.00
											W14	9.44	17.88
											W15	309	617.00
											W16	139	277.00
											W16-2	33.1	65.20
											W18	56.7	112.40
											W18-2	56.7	112.40
											W19	19.8	38.60
											W19-2	17.1	33.20
											W20	53.6	106.20
											W21	37.0	73.00
											W21-2	77.9	154.80
											W22	21.4	41.80
											W1	0.048	1.40
											W2-2	0.023	0.15
											W3	0.035	0.75
											W3-2	0.029	0.45
											W4	0.046	1.30
											W5	0.024	0.20
											W6	0.035	0.75
											W7	0.028	0.40
											W8	0.045	1.25
											W9	0.026	0.30
											W9-2	0.060	2.00
											W10	0.032	0.60
											W11	0.044	1.20
9	硫化物	0.041~0.048	0.012~0.06	32	31	96.88%	0.02	28	87.50%		W13	0.037	0.85
											W14	0.032	0.60
											W15	0.040	1.00
											W16	0.047	1.35
											W16-2	0.041	1.05
											W17	0.028	0.40
											W17-2	0.049	1.45
											W18	0.060	2.00
											W18-2	0.040	1.00
											W19-2	0.058	1.90
											W21	0.034	0.70
											W21-2	0.024	0.20
											W22	0.037	0.85
											BJW1	0.041	1.05
											BJW2	0.048	1.40

## Continued

										W5	1.63	0.63
10	亚硝酸盐氮	0.067	0.021~5.95	32	17	53.12%	1.00	4	12.50%	W8	1.10	0.10
										W9-2	1.06	0.06
										W15	5.95	4.95
11	硝酸盐氮	0.088~0.145	0.057~49.2	32	30	93.75%	20.0	2	6.25%	W12	49.2	1.46
										W14	30.8	0.54
										W2	83.1	414.50
										W2-2	105	524.00
										W3	16.9	83.50
										W3-2	3.88	18.40
										W5	7.43	36.15
										W6	17.9	88.50
										W7	35.9	178.50
										W8	0.56	1.80
										W9-2	28.6	142.00
12	总磷	0.03~12.7	0.03~105	32	32	100%	0.2	19	59.38%	W10	0.86	3.30
										W11	10.3	50.50
										W13	14.9	73.50
										W16-2	1.86	8.30
										W18-2	13.6	67.00
										W19	0.66	2.30
										W20	9.71	47.55
										W21	3.43	16.15
										W21-2	7.98	38.90
										BJW2	12.7	62.50
<b>重金属(单位: mg/L)</b>												
13	铜	<0.04	0.13~131	32	3	9.38%	1.00	1	3.13%	W15	131	130.00
14	砷	<0.0003	0.0006~0.0167	32	17	53.12%	0.01	1	3.13%	W7	0.0167	0.67
15	镉	<0.00005	0.00006~0.262	32	18	56.25%	0.005	2	6.25%	W15	0.262	51.40
										W16	0.00963	0.93
										W2	0.0148	0.48
										W2-2	0.0166	0.66
										W12	0.505	49.50
16	铅	0.0001	0.00012~0.505	32	20	62.50%	0.01	6	18.75%	W15	0.0136	0.36
										W16	0.0352	2.52
										W20	0.0545	4.45

## Continued

										W1	0.030	0.50
										W3-2	0.094	3.70
										W5	0.064	2.20
										W7	0.082	3.10
										W11	0.022	0.10
17	镍	<0.007	0.007~1.97	32	14	43.75%	0.02	11	34.38%	W12	0.053	1.65
										W15	1.97	97.50
										W16	0.216	9.80
										W20	0.044	1.20
										W21	0.080	3.00
										W21-2	0.116	4.80
挥发性有机物(单位: $\mu\text{g/L}$ )												
18	氯仿	4.3~4.4	3.8~36.3	32	12	37.50%	60	0	0%	/	/	/
19	四氯化碳	<1.5	18.1~113	32	2	6.25%	2.0	2	6.25%	W3-2	18.1	8.05
										W12	113	55.50
20	苯	<1.4	1.7~6.3	32	6	18.75%	10.0	0	0%	/	/	/
21	甲苯	<1.4	2.1~72,800	32	11	34.38%	700	1	3.13%	W3-2	72,800	103.00
										W5	42,000	2099.00
22	二氯甲烷	<1.0	3.7~42,000	32	6	18.75%	20	3	9.38%	W16-2	30.5	0.53
										W21-2	61.9	2.10
23	1,2-二氯乙烷	<1.4	1.8~2.7	32	3	9.38%	30.0	0	0%	/	/	/
										W3-2	30.6	5.12
24	1,2-二氯丙烷	<1.2	4.7~30.6	32	4	12.50%	5.0	3	9.38%	W4	11.3	1.26
										W5	5.1	0.02
25	1,1-二氯乙烯	<1.2	8	32	1	3.13%	30.0	0	0%	/	/	/
26	顺-1,2-二氯乙烯	<1.2	5.7	32	1	3.13%	50.0	0	0%	/	/	/
27	三氯乙烯	<1.2	8.7	32	1	3.13%	70.0	0	0%	/	/	/
28	四氯乙烯	<1.2	9.1	32	1	3.13%	40.0	0	0%	/	/	/
29	氯苯	<1.0	1.2~9130	32	13	40.62%	300	1	3.13%	W16	9130	29.43
30	邻二甲苯	<1.4	124~243	32	2	6.25%	500	0	0%	/	/	/
	间二甲苯	<2.2	5.3	32	1	3.13%		0	0%	/	/	/
31	乙苯	<0.8	3.3~15.6	32	2	6.25%	300	0	0%	/	/	/
32	1,2-二氯苯	<0.8	1.1~13.7	32	7	21.88%	1000	0	0%	/	/	/
33	苯乙烯	<0.6	1.4~4.1	32	2	6.25%	20.0	0	0%	/	/	/
34	氯甲烷	<0.65	25.9~156	32	2	6.25%	190	0	0%	/	/	/
35	1,1,2,2-四氯乙烷	<1.1	7.9	32	1	3.13%	600	0	0%	/	/	/
36	1,2,4-三甲基苯	<0.8	3.9~5.3	32	4	12.50%	15	0	0%	/	/	/
37	1,3,5-三甲基苯	<0.7	3.8~347	32	7	21.88%	120	2	6.25%	W17	347	1.89
										W17-2	338	1.82
38	2-氯甲苯	<1.0	11.1	32	1	3.13%	240	0	0%	/	/	/
39	4-氯甲苯	<0.9	14.6	32	1	3.13%	250	0	0%	/	/	/

## Continued

半挥发性有机物(单位: $\mu\text{g/L}$ )												
40	萘	0.055	0.127~8.38	32	8	25.00%	100	0	0%	/	/	/
41	荧蒽	<0.005	0.076~1.7	32	5	15.62%	240	0	0%	/	/	/
42	苯并[b]荧蒽	<0.004	0.169	32	1	3.13%	4.0	0	0%	/	/	/
43	2,4,6-三氯酚	<1.2	16.7~19.7	32	2	6.25%	200	0	0%	/	/	/
44	2-氯酚	<1.1	12.3~36.7	32	4	12.50%	2200	0	0%	/	/	/
45	苯并[a]蒽	<0.012	0.21	32	1	3.13%	4.80	0	0%	/	/	/
46	苯并[k]荧蒽	<0.004	0.661~1.54	32	2	6.25%	48	0	0%	/	/	/
47	蒽	<0.005	0.15	32	1	3.13%	480	0	0%	/	/	/
48	二苯并[a,h]蒽	<0.003	0.04	32	1	3.13%	0.48	0	0%	/	/	/
49	4-甲基苯酚	<2.0	2.2~50.5	32	2	6.25%	1900	0	0%	/	/	/
50	2,4-二氯酚	<1.1	28.6~120	32	3	9.38%	1300	0	0%	/	/	/
51	2-甲基萘	<1.6	3.3	32	1	3.13%	36	0	0%	/	/	/
52	芘	<0.016	0.153~0.338	32	2	6.25%	120	0	0%	/	/	/
53	邻苯二甲酸二丁酯	<4.0	2.5~10.6	32	3	9.38%	900	0	0%	/	/	/
										W3-2	3.70	9.00
54	4-氯苯胺	<1.8	3.7~38.9	32	3	9.38%	0.37	3	9.38%	W9	37.8	101.16
										W18-2	38.9	104.14
										W3-2	4.2	0.10
55	4-硝基苯胺	<1.8	4.2~11.5	32	2	6.25%	3.8	2	6.25%	W9	11.5	2.03
56	2,4-二硝基苯酚	<3.4	65.8~69.1	32	2	6.25%	900	0	0%	/	/	/
57	菲	0.510	0.154~1.24	32	4	12.50%	5	0	0%	/	/	/
有机农药类及其他特征污染物(单位: $\mu\text{g/L}$ )												
										W2	2260	2.23
										W2-2	3280	3.69
										W6	3240	3.63
58	草甘膦	2.0	2.0~16,500	32	24	75.00%	700	7	21.88%	W7	3040	3.34
										W9-2	16,500	22.57
										W11	1390	0.99
										W13	6070	7.67
										W8	53.4	0.48
										W14	225	5.25
59	敌草隆*	<0.02	2.95~255	32	8	25.00%	36	4	12.50%	W21	154	3.28
										W21-2	157	3.36
其他(单位: $\text{mg/L}$ )												
60	石油类	0.03	0.02~0.04	32	32	100%	0.05	0	0%	/	/	/

注: /为未超标。



## 3.2. 土壤与地下水评价

### 3.2.1. 土壤污染评价

土壤单因子指数和内梅罗指数评价选取四氯化碳、 $\alpha$ -六六六、狄氏剂、p,p'-滴滴涕、氯仿和毒杀芬六个有机物评价因子。根据式(1)和(2)计算得到的土壤样品检测因子的单因子指数和内梅罗指数结果见表4。未在表中的点位污染水平为清洁。单因子指数评价结果表明,毒杀芬污染最严重,S38(0.5~1.0 m)点位的土壤单因子指数  $P_i$  达到 4562.50,位于北部循环水池北侧。S18 点位(盐酸精制车间)和 S61 点位(三氯化磷贮罐位置)的毒杀芬单因子指数分别为 20.60 和 50.13。p,p'-滴滴涕单因子指数在 S18 达到 20.60。四氯化碳在 S10 点位(双氧水贮罐区),土样深度为 7.0~7.5 m 时,单因子指数  $P_i$  达到 8.86,为重度污染。四氯化碳 S15 点位(异丙胺盐车间)达到中度污染,S16(二甲胺贮罐)和 S31 点位(二乙醇胺贮罐区)达到轻度污染。 $\alpha$ -六六六,狄氏剂为轻度污染。内梅罗综合污染指数评价结果可知,S38、S18、S61 和 S10 点位的综合有机物污染指数为 3270.69、69.90、35.96 和 4.05,为重度污染。S15、S16 和 S22 点位的有机物污染等级为轻污染,表明土壤已经开始受到污染。土壤超标点位 8 个,主要沿地块四周分布,与地下水总体流向由地块中部向四周流动一致。地块内曾承载过我国早期计划经济时代典型代表六六六、滴滴涕、毒杀芬等有机氯类农药的生产经营活动,难免跑冒滴漏随大气降水渗入土壤环境。

**Table 4.** Evaluation results of some soil monitoring factors

**表 4.** 土壤部分监测因子评价结果

点位	污染物单因子指数 $P_i$						内梅罗指数 $P_N$
	四氯化碳	$\alpha$ -六六六	狄氏剂	p,p'-滴滴涕	氯仿	毒杀芬	
S10	5.58	/	0.18	/	0.9	1.0	4.05
S15	2.11	/	0.18	/	0.75	/	1.53
S16	1.13	1.4	1.73	/	0.005	/	1.32
S18	0.002	/	0.18	20.60	0.26	96.88	69.90
S22	0.06	/	0.18	/	2.21		1.59
S31	1.03	/	0.18	/	0.002		0.74
S38	0.54	/	0.18	/	0.002	4562.50	3270.69
S61	0.37	/	0.18	/	0.88	50.13	35.96

注: / 为未检出。

### 3.2.2. 地下水污染评价

根据式(1)计算得到的地下水样各检测因子的单因子指数和内梅罗污染指数见表5。W7(草甘膦车间)、W5、W3-2(草甘膦缩合车间,深井)、W17-2(双氧水车间,深井)、W17 点位(双氧水车间,浅井)挥发性酚类单因子指数  $P_i$  为 108.5、98、96、50.5 和 15.2,污染严重。W5 点位(硫酸亚铁车间)的二氯甲烷单因子指数达到 2100,污染严重。草甘膦检出率高,在 W9-2 点位(制氮制氧车间东侧,深井)中  $P_i$  达到 23.58。甲苯在 W3-2 点位处,  $P_i$  为 104,达到严重污染。四氯化碳在 W3-2 和 W12 点位(气流破碎车间)  $P_i$  为 18.1 和 40.36,污染严重。1,2-二氯丙烷在 W3-2 点位,  $P_i$  为 6.12,污染严重。4-氯苯胺在 W3-2、W9 和 W18-2(污泥浓缩池北侧)点位,  $P_i$  为 10、102.16 和 105.14,污染严重。4-硝基苯胺在 W3-2 和 W9,  $P_i$  为 3.12,污染严重。敌草隆在 W14  $P_i$  为 6.24,污染严重。氯苯检出率高,W16(烘干车间)点位的  $P_i$  为 30.43。1,3,5-三甲基苯在 W17 和 W17-2 点位为中度污染。4-硝基苯胺在 W3-2 点位为中度污染,在 W9 点位为严重污染。内梅罗综合指数  $P_N$  表明,W3-2、W5、W6、W7、W9、W9-2、W12、W13、W14、W16、W16-2、

W17、W17-2、W18-2、W19、W21 和 W21-2 点位有机物污染严重,  $P_N$  均大于 3, 其中, W5 的  $P_N$  达到 1490.57。W2 为中度污染, W4、W8、W11 和 W22 点位为轻度污染。该地块厂区西侧仓库区域地下水流向大致为自东向西, 厂区内地下水流向大致为自西向东流, 即地下水总体流向由地块中部向四周流动, 依次以向东与向西流动水力梯度较大, 为地下水主要流动方向, 向东往低洼地和应急水池区域流动。地下水超标点位 19 个, 仅西北角成品仓库 1 个点位未超标。草甘膦、乙酰氯、敌草隆、光气等生产过程中产生的离心废水、沉淀废水、碱洗废水、洗涤废水车间卫生废水及精馏尾气、乙酰化尾气、烘干尾气、氯化尾气等都成为污染来源。这些污染物质均属极难降解高毒有机氯类农药, 半衰期长, 结构稳定, 残留期长, 同时含氯有机物、甲苯难溶于水甚至不溶于水, 致使地块内遭受较大程度的污染。固废的磷渣类物质虽然固废仓库, 地面为混凝土硬化, 未发生泄漏事故, 但不排除“跑冒滴漏”对土壤和地下水的污染。

**Table 5.** Evaluation results of some groundwater monitoring factors

**表 5.** 地下水部分监测因子评价结果

点位	污染物单因子指数 $P_i$											内梅罗指数 $P_N$
	挥发性酚	二氯甲烷	草甘膦	甲苯	四氯化碳	1,2-二氯丙烷	4-氯苯胺	4-硝基苯胺	敌草隆	氯苯	1,3,5-三甲基苯	
W2	0.06	/	3.23	0.15	/	/	/	/	/	/	/	2.29
W2-2	1.3	/	4.69	0.38	/	0.94	/	/	/	/	/	3.34
W3-2	96	/	0.85	104	18.1	6.12	10	1.10	/	0.04	/	74.86
W4	0.15	0.19	0.56	0.57	/	2.26	/	/	/	/	/	1.61
W5	98	2100	0.85	0.003	/	1.02	/	/	/	0.04	/	1490.57
W6	2.55	0.19	4.63	0.003	/	/	/	/	/	/	/	3.30
W7	108.5	0.19	4.34	0.003	/	/	/	/	0.08	0.04	/	77.01
W8	0.19	/	0.98	/	/	/	/	/	1.48	/	/	1.06
W9	22.85	/	0.78	/	/	/	102.16	3.12	/	/	/	72.66
W9-2	1.3	/	23.58	/	/	/	/	/	/	/	/	16.74
W11	0.54	/	1.99	0.003	/	/	/	/	/	0.05	/	1.42
W12	0.06	/	0.003	0.68	40.36	/	/	/	/	0.05	/	28.64
W13	20.7	/	8.68	0.003	/	/	/	/	/	0.90	/	14.75
W14	61	/	0.002	/	/	/	/	/	6.24	0.95	0.03	43.32
W16	62	/	0.002	/	/	/	/	/	/	30.43	0.90	44.18
W16-2	15.15	1.53	0.002	/	/	/	/	/	/	0.90	0.85	10.77
W17	15.2	/	0.002	0.003	/	/	/	/	/	0.90	2.89	10.81
W17-2	50.5	/	0.004	/	/	/	/	/	/	0.85	2.82	35.85
W18-2	0.85	/	0.56	/	/	/	105.14	/	/	0.25	0.56	74.61
W19	271	/	0.15	/	/	/	/	/	0.87	/	0.43	192.30
W20	1.25	/	0.002	/	/	/	/	/	0.95	/	/	0.89
W21	3.45	/	0.002	/	/	/	/	/	36.08	/	/	25.62
W21-2	1.15	3.10	0.002	/	/	/	/	/	4.35	/	/	3.12
W22	2.2	/	0.002	/	/	/	/	/	/	0.04	/	1.56

注: /为未检出。

## 4. 讨论

随着社会经济的发展,土壤和地下水的污染日趋严重,因此,改善土壤及地下水污染状况已迫在眉睫,而采用合理的评价方法,合适准确地反映土壤和地下水质量,是解决这一问题的基础。目前土壤和地下水污染评价的大部分文献研究了地块的重金属污染评价。少量的研究有机物污染评价文献中由于各种因素制约,对地块和地下水中的有机物指标选择也非常有限。本研究以华东地区中部某废弃农药用地为研究对象,采用单因子指数法和内梅罗综合指数法进行土壤和地下水污染,根据 GB36600-2018 和 HJ25.1-2019 提供的参数标准,对土壤检测项目达到 98 项,地下水检测项目 100 项。

## 5. 结论

土壤和地下水中有机的单因子指数法和内梅罗综合指数法表明,该农药厂土壤地块受到了不同程度的污染,污染严重的区域分布在地块四周,与地下水总体流向由地块中部向四周流动一致。地块的五十多年的化工农药生产经营、污染物处理处置等活动,是造成土壤超标的主因,特别是早期生产的六六六、滴滴涕和毒杀芬等有机氯农药的生产经营活动,均属极难降解高毒有机氯农药,随大气降水渗入土壤环境,这些有机物不溶于水、半衰期长和残留期长,致使地块内遭受较大程度污染。建议尽快进行建设用地风险评估工作,进一步明确污染范围及深度,早日采取相应的风险管控和修复措施,避免污染物进一步扩散,切实使地块内外土壤和地下水环境质量得以有效改善。

## 基金项目

浙江省自然科学基金基础公益研究项目(LGF20B070004)资助。

## 参考文献

- [1] Cheng, J.L., Shi, Z. and Zhu, Y.W. (2007) Assessment and Mapping of Environmental Quality in Agricultural Soils of Zhejiang Province, China. *Journal of Environmental Sciences*, **19**, 50-54. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(07\)60008-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60008-4)
- [2] 张云芸, 马瑾, 魏海英, 等. 浙江省典型农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2019, 28(6): 1233-1241.
- [3] 李笑莹, 张学雷, 任圆圆. 中国中东部样区土壤、地形与耕地空间分布多样性特征[J]. 土壤通报, 2020, 51(2): 289-299.
- [4] 钟重, 张弛, 冯一帆, 等. 中国污染土壤再利用的环境管理思路探讨[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(1): 115-120.
- [5] 冯康宏, 范缙, 等. 基于生物可给性的某冶炼厂土壤重金属健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2021, 41(1): 442-450.
- [6] Sun, Y.M., Li, H., Guo, G.L., et al. (2019) Soil Contamination in China: Current Priorities, Defining Background Levels and Standards for Heavy Metals. *Journal of Environmental Management*, **251**, Article ID: 109512. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109512>
- [7] Rodrigues, S.M., Cruz, N., Carvalho, L., et al. (2018) Evaluation of a Single Extraction Test to Estimate the Human Oral Bioaccessibility of Potentially Toxic Elements in Soils: Towards More Robust Risk Assessment. *Science of the Total Environment*, **635**, 188-202. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.063>
- [8] Du, H.L., Yin, N.Y., Cai, X.L., et al. (2020) Lead Bioaccessibility in Farming and Mining Soils: The Influence of Soil Properties, Types and Human Gut Microbiota. *Science of the Total Environment*, **708**, Article ID: 135227. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135227>
- [9] 苗旭锋, 肖细元, 郭朝晖, 等. 矿冶区重金属污染土壤肥力特征及生态修复潜力分析[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(7): 115-119.
- [10] Fan, J., Zhao, L., Kan, J.H., et al. (2020) Uptake of Vegetable and Soft Drink Affected Transformation and Bioaccessibility of Lead in Gastrointestinal Track Exposed to Lead-Contaminated Soil Particles. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **194**, Article ID: 110411. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110411>
- [11] 韩丰磊, 李婷, 孙慧, 等. 废弃石化用地土壤和地下水污染调查与评估[J]. 土壤通报, 2020, 51(5): 1238-1245.

- 
- [12] 薛志斌, 李玲, 张少凯, 等. 内梅罗指数法和复合指数法在土壤重金属污染风险评估中的对比研究[J]. 中国水土保持科学, 2019, 16(1): 119-125.
- [13] 郭欣, 姚苹, 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.
- [14] 罗孝芹, 张强, 陈丽影, 等. 基于单因子指数法的贵阳市南明河上游区综合水质评价[J]. 地下水, 2016, 38(1): 80-82.
- [15] 陈朋, 王家鼎, 袁亮, 等. 修正内梅罗指数法和模糊综合评判法在凤凰镇地下水水质评价中的应用[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 165-170.
- [16] 康小兵, 刘庆贺, 李科, 等. 修正内梅罗指数法在小型污染场地中的应用[J]. 环境保护科学, 2019, 45(1): 111-115.
- [17] 中国地质调查局. 场地土壤和地下水污染调查与风险评价技术要求[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014: 1-11.