基于淋滤试验的武汉市某化工厂地下水质量评价研究

王芮琼[1] 熊启华[1] 郭 昆[1] 刘正平[1] 季怀松[2]

1.湖北省地质环境总站 湖北武汉 430034;

2.中国地质大学 湖北武汉 430074

【摘 要】化工污染场地地下水污染调查评价是场地污染调查与修复的重要组成部分。本文以武汉市某化工污染场地为研究对象，通过开展样品采集和土柱淋滤实验，采用单指标评价法和综合污染指数法对场地污染进行评价，探讨污染物空间分布特征。结果表明：场地地下水和土壤均受到严重污染综合污染评价为极重污染；污染物空间差异分布大，浅层土壤污染总体比深层严重；修复处理后回填的土壤受到了二次污染。该研究为场地地下水污染调查评价提供了参考，为化工生产场地的污染防治和拆除搬迁后的土地再利用提供了科学依据。

【关键词】地下水质量评价；地下水污染；土柱淋滤试验；质量评价

近几年，环境问题得到政府的重视以及国民的广泛关注，很多省市对产业结构进行升级，或对城市已建成区域全面实施“退二进三”，大批化工企业被关停或搬迁[1-3]。研究表明，地下水水质不仅由补给水水质、地下水流速、含水层岩性、与其他类型含水层的相互作用等自然过程决定，还由工业、农业、污染排放等改变水循环的人为活动决定[4]。然而，工业生产过程会产生大量的废水和废渣，这些废渣多数可能含有有毒物质，如果不对废渣进行处理，直接堆放在土壤表层，当土壤表面的有毒物质向含水层渗漏时，地下水可能受到严重污染。地下水一旦被污染，恢复水质难度较大，需要很长时间的恢复周期[5]。

化工厂场地位于汉江一级阶地上，地势平坦开阔。阶地由第四系全新统（Q_4）粘土、粉细砂及含砾中粗砂组成。该场地总占地面积约6.94×10^4 ㎡，化工厂于20世纪50年代建立，在生产期间其主要生产医药原料、中间体、医药制剂及其衍生产品，直至2015年停产搬迁，场地现已拆迁平整，目前正在进行土壤污染修复（图1）。

1 材料与方法

1.1 样品采集与检测项目

1.1.1 布点采样

本次场地污染调查按照生产区布点原则确定地下水和土壤采样点。根据污染源分析及场地内原有各厂区分布情况结合导则布点要求，确定采样点。共设置采样点位8个，5个点位制成监测井作为地下水采样点（其中两个研究区外部的监测井CG1 和CG2为空白对照点位）；土壤采样点3个（点号为YD1、YD2、YD3），YD2和YD3样品量均为1个（0~50cm），YD1点位的样品量为4个（0~50cm、50~100cm、100~200cm、200~300cm）；土壤样品采样量共6个，地下水样品量7个。各采样点平面分布图和点位信息见图1和表1。

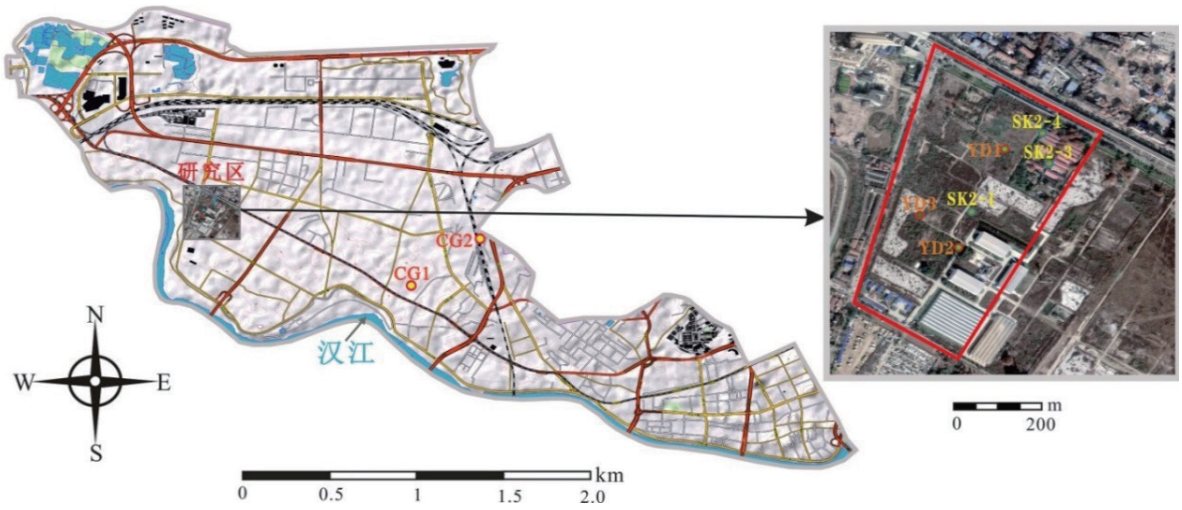

图 1 场地位置及采样点平面分布图

表1　场地地下水和土壤采样点信息

点号	点位描述
水样点	
SK2-1	化工厂生产厂房区域，该点旁有一淤泥池，淤泥池散发臭味。
SK2-3	非化工厂生产区。
SK2-4	非化工厂生产区。
CG1	CG1长观孔位于汉江北岸。
CG2	CG2长观孔位于汉江北岸，且位于CG1号长观孔的北部。
土样点	
YD1	位于研究区化工厂中心的土壤，用于研究垂向上的污染物分布特征。
YD2	位于研究区化工厂外，取表层土壤，用于平行对比场地内外污染情况。
YD3	场地内进行修复处理后填回原位的土壤，用于检验污染土壤修复处理后的效果。

1.1.2　检测项目

（1）2018年取自研究区内的3口监测井水样全分析测试项目为46项，包括：色、嗅和味、浑浊度、肉眼可见物、pH、总硬度、溶解性总固体、硫酸盐、氯化物、铁、锰、铜、锌、氰化物、氟化物等。

（2）土柱淋滤实验淋滤液分析测试项目为27项，包括：铝、硼、钡、铍、铋、镉、钴、铬（六价）、铜、铁、锂、镁、pH等。样品检测依据国家相关标准进行。

1.2　土柱淋滤试验

1.2.1　实验装置

实验材料取内径5cm，高度30cm的有机玻璃柱，土柱进水口连接有马氏瓶和蠕动泵作为供水装置，可实现补给流速的控制，以形成稳定流场，土柱底部开有一直径5mm的小孔，小孔连接有硅胶管用于接收淋滤液。

1.2.2　实验步骤

（1）实验开始前，分别将采集的6组土样装入土柱，轻轻捣实，为防止蒸馏水不均匀下渗以及土壤堵塞出水口，在进水口以及出水口均装填5cm厚的石英砂。石英砂与土壤各层之间用孔径1mm的尼龙网做间隔，以保证水流渗流通畅，淋滤液匀速下渗。

（2）土样装填完成后，用蒸馏水从土柱淋滤管底部进入，排出土柱中的空气，使全部土柱的土壤浸入水中进行饱和，待一定时间后，在土柱管上部由供水装置对其进行淋滤，从土柱管的底部用水样瓶接取淋滤液。淋滤实验采用蒸馏水昼夜连续进行，当淋滤液测得的电导率值接近稳定时，停止实验。

（3）每次从淋滤液中提取50mL，测定pH和电导率，随后将淋滤液送检，获取检测值，统计受污染指标，计算各组分析出质量，绘制浓度和析出质量随时间的变化曲线。

1.3　水质分类及评价方法

1.3.1　质量分类

依据《地下水质量标准（GB/T14848-2017）》，参照生活饮用水、工业、农业等用水质量要求，根据各组分含量高低，分为五类。即：I、II、III、IV、V类，其中V类最差。

1.3.2　评价方法

（1）单指标评价法：按指标值所在的指标限制区间确定地下水质量类别，不同地下水质量类别的指标限值相同时，从优不从劣；确定评价结果时从劣不从优，用各指标中评价等级最差指标的级别作为整个地下水样品的评价结果，并指出最差类别的指标。

（2）综合污染指数法：地下水污染评价反映地下水受人类活动影响的污染程度，污染指数法是当前地下水污染评价中最常用的评价方法，常用于评价土壤、大气和水的污染：

$$P_{ki}=\frac{C_{ki}-C_0}{C_{III}} \quad (1)$$

式中：P_{ki}表示k水样第i个指标的污染指数；C_{ki}表示k水样第i个指标的实际测试值；C_0表示k水样第i个指标的背景值，本文无背景值，故以《地下水质量标准（GB/T14848-2017）》中的III类指标限值作为参照值；C_{III}表示k水样第i个指标在《地下水质量标准》中的III类指标限值。

根据污染指数分级标准对照划分污染等级，得出各水样污染等级划分结果（表2），对单个指标污染评价完成并依次划分好等级后，对各水样单个指标污染等级做比对，将其中污染等级最高的等级划分结果作为该水样的地下水污染综合评价结果。

表2　污染指数分级标准

污染类别	未污染	轻污染	中污染	较重污染	严重污染	极重污染
污染分级	I	II	III	IV	V	VI
指数范围	$P_{ki}\leq 0.2$	$0<P_{ki}\leq 0.2$	$0.2<P_{ki}\leq 0.6$	$0.6<P_{ki}\leq 1.0$	$1.0<P_{ki}\leq 1.5$	$P_{ki}>1.5$

2　淋滤实验无机组分迁移规律

土壤的渗透性能一般由渗透系数来表示，渗透系数可表征土壤的防渗性能。其计算公式如下：

$$K=QL/Aht \quad (2)$$

式中：K为渗透系数，cm/s；Q为定时间通过土壤样品的总水量，mL；L为土柱高度，cm；A为土柱的截面积，cm^2；h为作用于土柱的水头，cm；t为试验时间，s。

经计算，土柱平均流量和渗透系数区间值分别为1.56~169.99mL/d、0.06~13.84cm/d。对比6组淋滤实验平均流量和渗透系数可知，YD2的平均流量和渗透系数最大，其淋滤速度最快，YD3次之，而YD1的淋滤速度最慢，渗透系数分别约为YD3的3倍、YD1不同层位下的72~230倍，各土柱渗透系数差异较大，主要与土壤性质有关，该结果初步表明YD1的防渗性能最好，YD2的防渗性能最差。

据淋滤液样品水化学测试结果，对初次接收到的淋滤液中离子浓度较高的硫酸盐、硝酸盐、氯化物进行析出能力

比较，通过计算不同时间段无机组分的浓度与所对应的淋滤液体积的乘积之和，可得出不同土柱中不同组分的析出质量曲线（图2）。该曲线可表征不同取样点土壤的析出能力大小，通过比较后得出：

2.1同一试验条件下，YD2土柱中的硫酸盐、硝酸盐、氯化物均最先析出，其次是YD3土柱，而YD1析出最慢；析出速度与析出质量差异较大，相同土柱不同组分的析出能力差异也较大（图5）。

2.2氯化物：根据氯化物的析出质量曲线可以看出，YD2m和YD3号土柱的析出质量曲线基本重合（图5a），表明两者氯化物析出能力差异较小。在相同时间下，YD1土柱的氯化物析出质量曲线明显高于YD2m和YD3，表明该点位土壤中的氯化物浓度高，其析出能力也强。空间上氯化物析出能力大小分别为：YD1>YD2≈YD3；垂向上YD1号点为：2m> 1m> 2.8m>0m。

2.3硝酸盐：不同取样深度下，YD1-1m、YD1-2m和YD1-2.8m土柱的析出质量曲线基本重合（图5b），表明三者析出能力差异小。析出质量最高的为YD1-0m，而YD3次之。空间上氯化物析出能力大小分别为：YD1>YD3>YD2；垂向上YD1号点为：0m析出能力最强，1、2、2.8m析出能力差异小。

2.4硫酸盐： YD1-0m的最终析出质量明显大于其他点位的，空间上析出能力大小分别为：YD1>YD2≈YD3；YD1号点垂向上为： 0m> 1m> 2.8m>2m。（见图2）

3 水质评价及污染物空间分布特征

3.1 监测井水质评价

对2018年场地内采取的3组水样进行46项指标测试，依据单指标评价法对各项指标进行评价。采用最差指标的级别作为整个地下水样品的评价结果，SK2-1、SK2-3、SK2-4中的地下水均为V类水，其中SK2-1水样显示有26.1%的指标达到了V类水标准，占比约为SK2-3、SK2-4的4倍和12倍；SK2-1、SK2-3、SK2-4中达到III类及III类以上的指标占比分别为30.5%、21.7%和13.0%；而I、II类水质指标占比最大的是SK2-4，达86.9%。

另外，利用式（1）分别计算取自SK2-1和两个空白对照点位CG1、CG2不同时段水样中的6项无机组分（pH、硫酸盐、氯化物、硝酸盐、总硬度、溶解性总固体）的污染指数P_{ki}。对无机组分单个指标污染指数进行对比后发现（表3），取自2018年SK2-1的水样中氯化物、总硬度、溶解性总固体污染指数均大于1.5，污染类别均为极重污染，即SK2-1中的地下水污染综合评价结果为极重污染；CG1中的6项无机组分污染指数均小于0.2，污染类别均为未污染，综合评价结果为未污染；CG2中的有五项无机组分污染指数小于0.2，总硬度污染指数在0.2~0.6之间，综合评价结果为中污染。继续对比SK2-1监测井2018年7月、2019年5月和10月6项无机组分的污染指数，2018年的污染程度明显比2019年严重，且2019年综合污染类别出现反弹，由中污染向较重污染变化。（见表3）

3.2 淋滤液水质评价

对淋滤液中各无机组分最大浓度进行统计分析（图7），在27项测试指标中选取《地下水质量标准（GB/T14848-2017）》中具有评价等级的16项无机指标（铝、硼、钡、铍、钴、铬、铜、铁、锰、锌、氟化物、氯化物、亚硝酸盐、硝酸盐、硫酸盐、pH）按单指标评价及综合污染指数法评价。

3.2.1单指标评价结果显示：YD2 和YD3的淋滤液分别有2项指标达到V类水标准；YD1-0m、1m、2.8的淋滤液分别

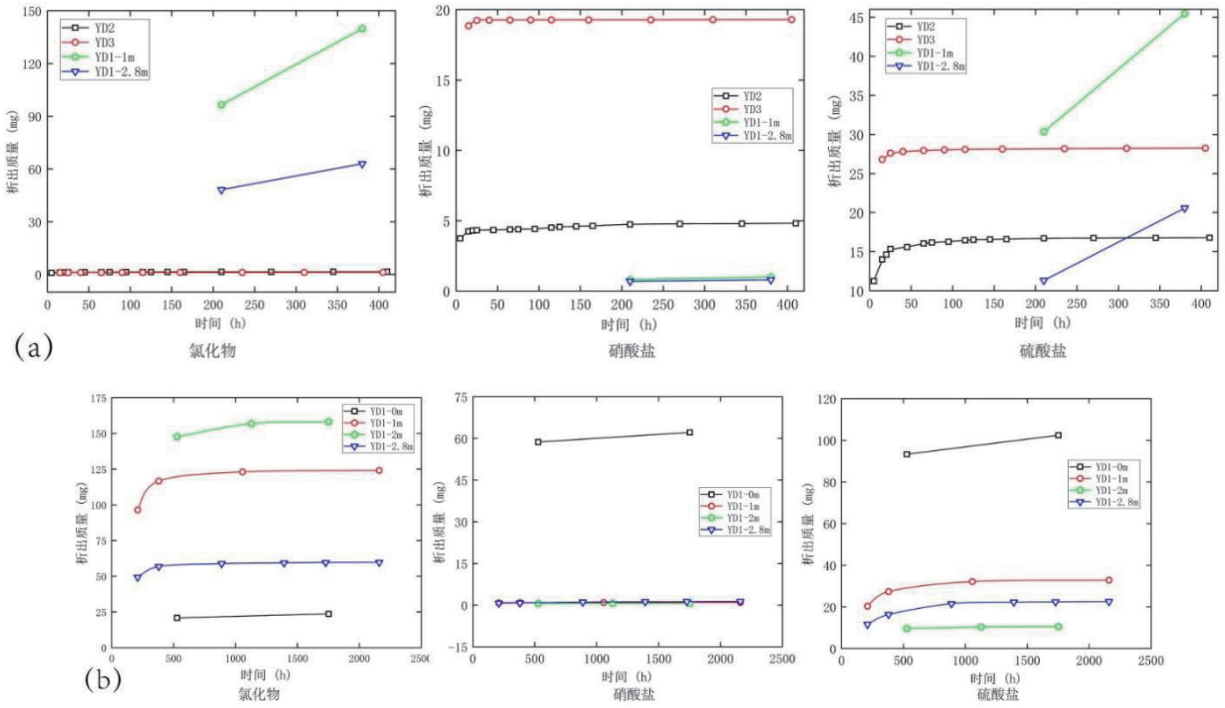

图 2 淋滤实验硫酸盐、硝酸盐、氯化物析出质量随时间的变化曲线

表3　地下水无机组分单个指标检测值及污染指数对比

取样点	取样时间	pH	硫酸盐	硝酸盐	氯化物	总硬度	TDS	综合评价结果
SK2-1	2018.07	7.39（I）	142.0（I）	0.14（I）	1930（VI）	1880（VI）	5410（VI）	极重污染
SK2-1	2019.05	7.71（I）	192.2（I）	2.87（I）	82.36（I）	544（III）	993（I）	中污染
SK2-1	2019.10	7.61（I）	159.0（I）	3.81（I）	206.0（I）	736（IV）	1335（III）	较重污染
CG1	2018.07	7.57（I）	11.02（I）	ND（I）	23.83（I）	431（I）	512（I）	未污染
CG2	2018.07	7.36（I）	16.49（I）	ND（I）	26.85（I）	579（III）	649（I）	中污染

有4项、3项、2项指标达到V类水标准；YD1-2m无指标达到V类，其最差水质类型为IV类。据受污染指标数量可知YD1-0m的淋滤液污染最为严重。

3.2.2综合污染指数法评价结果显示（表4）：在16项评价指标中，各土柱淋滤液的最大污染等级均为VI等，综合评价结果为极重污染，受污染最严重的指标主要为硝酸盐和硫酸盐。而YD1-0m有5项指标达到最大污染等级VI，最大污染指数P_{ki}为62.15，指标类型为硝酸盐，表明YD1-0m污染最为严重，其次是YD1-1m，该结果与单指标评价结果一致。

表4　不同土柱16项检测项目污染分级数量统计

取样点/层位	I	II	III	IV	V	VI	指标（最大P_{ki}）	综合评价结果
YD2	13		1			2	硝酸盐（4.15）	极重污染
YD3	13		1		1	1	硝酸盐（17.85）	极重污染
YD1-0m	10			1		5	硝酸盐（62.15）	极重污染
YD1-1m	10			2		4	氯化物（17.38）	极重污染
YD1-2m	15					1	氯化物（8.79）	极重污染
YD1-2.8m	14					2	氯化物（9.71）	极重污染

3.3　污染物空间分布特征

结合前文对水质类型及污染物的确定，通过对各采样污染物进行空间上的对比分析可获取研究区污染物空间分布特征：

3.3.1　就整体而言，该场地内SK2-1、SK2-3、SK2-4监测井中的地下水均存在不同程度的污染，其中SK2-1中的地下水受污染指标最多，污染最为严重。进一步分析可知，由于SK2-1监测井位于化工厂生产中心区域，其受污染的可能性也最大，而SK2-3和SK2-4离化工厂生产区有一定的距离，研究区内地下水污染程度在空间上表现为SK2-1> SK2-3> SK2-4。

3.3.2 对淋滤液中各无机组分最大浓度进行统计分析，同时选取浓度较高的硫酸盐、硝酸盐、氯化物进行对比，可得出修复处理后的土壤效果以及污染物垂向和空间上的分布特征。在空间分布和垂向上浓度数据看来场地浅层土壤污染总体较为严重。

3.3.3 YD3的污染物浓度整体高于YD2，表明修复处理后回填的土壤也受到了不同程度的二次污染，因此在修复处理过程中，回填后的土壤应进行适当的污染防护。

4　结论

本文以武汉市某化工污染场地为研究对象，通过开展样品采集和土柱淋滤实验，采用单指标评价法和综合污染指数法对场地污染进行了评价，探讨了污染物空间分布特征。结果表明：

4.1从实验结果看，不同土柱渗透系数差异较大，不同点位土壤的同一组分析出能力差异也较大，YD2的平均流量和渗透系数最大，其淋滤速度最快，YD3次之，YD1的淋滤速度最慢。即YD1的防渗性能最好，YD2的防渗性能最差。

4.2研究场地地下水和土壤均受到严重污染，其污染程度明显高于生产区外围，地下水及淋滤液水质评价结果均为劣V类水，综合污染评价结果为极重污染，淋滤液受污染最严重的指标主要为硝酸盐、硫酸盐及氯化物。

4.3土壤污染呈现出YD1号点的污染较YD2、YD3更严重的空间分布特征，污染物在场地内的空间分布差异大；场地浅层土壤污染总体上比深层严重；修复处理后回填的土壤受到了二次污染，建议在修复处理过程中，对回填后的土壤应进行适当污染防护。

参考文献：

[1]陈宏,刘翔,卢欣，等.某化工污染场地土壤与地下水污染特征分析[J].油气田环境保护.2017，27(01)：21-24.

[2]董敏刚，张建荣，罗飞，等.我国南方某典型有机化工污染场地土壤与地下水健康风险评估[J]. 土壤. 2015，47(01)：100-106.

[3]李定龙，徐冉，吕浩，等.某典型化工污染场地土壤修复方案研究[J]. 环境污染与防治. 2015，37(07)：94-100.

[4]Wu H, Chen J, Qian H, et al. Chemical Characteristics and Quality Assessment of Groundwater of Exploited Aquifers in Beijiao Water Source of Yinchuan, China: A Case Study for Drinking, Irrigation, and Industrial Purposes[J]. Journal of Chemistry. 2015, 2015: 726340.

[5]张小斌，史东娜.场地环境初步调查及评估方法探究——以江苏省某化工企业原址地块为例[J]. 污染防治技术. 2018，31(06)：30-33.