https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.135



典型潜水层苯系物污染羽稳定性 主控因子及统计建模

王碧莲^{1,2},王明玉^{1*},庞云天¹

1. 中国科学院大学资源与环境学院,北京 101408

2. 中国科学院大学中丹学院,北京 100049

摘要:场地或区域地下水污染羽能否达到稳定及其稳定性特征直接决定自然衰减修复的可行性.本文构建了从上到下依次为潜水层、弱透水层、承压层的典型含水结构,模拟量化潜水层恒定源地下水污染羽迁移扩散,以污染羽稳定面积、稳定浓度和稳定所需时间为特征因子,充分考虑可能影响污染羽迁移扩散的水文地质和水化学参数.首先通过敏感性分析筛选出较敏感因子,然后利用正交试验进行主控因子识别,最后采用多元回归模型构建特征因子与主控因子的定量统计关系.结果表明,对污染羽特征因子具有广泛影响的主控因子为降解系数、弥散度、渗流速度和源浓度,特征因子与主控因子之间具有良好的统计关系,根据实际情况可选用不同主控因子数量表征的统计模型对特征因子进行预测,这将为基于自然衰减修复的场地或区域地下水污染优化控制与高效修复提供重要依据.
关键词:地下水污染;污染羽稳定性;数值模拟;正交设计;主控因子;多元统计回归模型;环境工程.
中图分类号: P641

Primary Controlling Factors and Statistical Modeling of Plume Stability for BTEX in Typical Phreatic Aquifers

Wang Bilian^{1,2}, Wang Mingyu^{1*}, Pang Yuntian¹

1. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China

2. Sino-Danish College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Whether the groundwater pollution plume of a contaminated site or a regional area can be stabilized and the stability characteristics of the plume would directly determine the feasibility of the natural attenuation restoration. In this study, a typical aquifer structure with a phreatic aquifer, an impermeable aquifer, and a confined aquifer from top to bottom was constructed to simulate the migration and diffusion of the constant source pollution plume of phreatic water. The stable area, stable concentration and starting stable time of the groundwater pollution plume were taken as characteristic variables. Firstly, the sensitive factors were identified from numerous influence factors through sensitivity analysis method. Secondly, orthogonal experiments were used to identify the main controlling factors. Finally, the multiple regression model was used to construct the quantitative statistical relationship for characteristic variables. The results show that the common primary controlling factors are the degradation

引用格式:王碧莲,王明玉,庞云天,2023.典型潜水层苯系物污染羽稳定性主控因子及统计建模.地球科学,48(9):3454-3465.

Citation: Wang Bilian, Wang Mingyu, Pang Yuntian, 2023. Primary Controlling Factors and Statistical Modeling of Plume Stability for BTEX in Typical Phreatic Aquifers. *Earth Science*, 48(9): 3454–3465.

基金项目:国家重点研发计划项目(Nos. 2019YFC1806205, 2020YFC1807100).

作者简介:王 碧 莲(1996一),女,硕士研究生,主要从事地下水环境及污染控制研究.ORCID:0000-0003-1914-391X.E-mail: 15829461450@163.com

^{*} 通讯作者:王明玉, E-mail: mwang@ucas. edu. cn

coefficient, dispersivity, seepage velocity and the source concentration. Moreover, there are adequate statistical relationships between the characteristic variables and the primary controlling factors. The statistical models characterized by different numbers of factors can be used to predict the characteristic variables. This study would provide an important basis for optimization of the site pollution control and effective remediation which are based on natural attenuation remediation.

Key words: groundwater pollution; pollution plume stability; numerical simulation; orthogonal design; primary controlling factor; multiple regression model; environmental engineering.

0 引言

随着产业结构调整和城市发展转型,场地或 区域土壤地下水污染问题日渐突出,风险管控和 工程修复需要综合应用于污染场地可持续修复治 理(李笑诺等,2022).其中监控自然衰减技术可 对污染物自然降解作用进行评估和预测,在设计 与实施基于风险管控的地下水污染防治方案中得 到了国际上的广泛应用(李元杰等,2018;沈晓 芳等,2021).而地下水污染羽能否达到稳定是决 定自然衰减修复可行性的基础,对污染羽稳定性 特征影响规律的探究及准确预测能够为地下 水污染风险评价和管控提供重要决策支持.

地下水污染羽是污染物随地下水移动从污染 源向周边移动和扩散时所形成的污染区域(马志飞 等,2012).污染物的迁移扩散分为机械迁移、物 理-化学迁移和生物迁移,迁移过程受多种因素影 响,包括与场地条件相关的水文地质参数、与污染 物特征相关的吸附和降解参数等(杨小芳等, 2015; 闫龑等, 2021). 在实际工作中,由于场地条 件复杂、野外调查难度大等原因,往往无法获取到 全面准确的参数值.提取主控因素能够揭示系统 过程的主要影响因子,进一步明确系统的形成机 制,使得实践工作中可以将有限的成本集中于主要 影响因子(王雨婷等, 2021; 朱沉静等, 2021),结合 好的预测模型能够为基于影响因子的评价与防治 工作提供科学依据(黄发明等, 2020).因此,查明 控制污染羽稳定后面积、平均浓度及所需时间等 稳定要素的关键影响因子,以及各要素与主控因 子的统计关系,具有重要理论与实际应用价值.

国内外学者利用数值模拟技术在地下水水流 及溶质运移影响因素方面开展了大量研究(翟远征 等,2011;郝静等,2015).Gedeon and Mallants (2012)研究了数值模型网格剖分精度对模拟结果 及耗费的影响,发现水文地质参数对地下水流结果 的影响比网格尺寸更敏感.Bou-Zeid and El-Fadel (2004)以某垃圾填埋场为例模拟垃圾渗漏运移,并对大量参数作敏感性分析,得出分配系数、源强、含水层渗透系数和弥散度对结果影响最敏感.李木子等(2014)利用敏感性分析方法探究了地下水溶质迁移数值模型中渗透系数、孔隙度、弥散度的敏感性.苏振兴等(2020)基于GMS数值模拟,分析了污染物在成层土中的迁移扩散过程及渗透系数、地下水位、污染物排放量、污染源浓度等对污染物迁移的影响规律.

本文在前人研究基础之上,对污染羽稳定性 特征因子进行分析及刻画.基于山东黄河冲积平 原某化工园区典型含水结构建立基准模型,充分 考虑可能会影响污染羽稳定性的水文地质参数 和水化学参数,首先通过简单敏感性分析筛选出 较为敏感的参数,然后利用正交试验方法对地 下水污染羽稳定性特征因子进行主控因子识 别,最后采用多元回归分析构建污染羽稳定性 特征因子与其主控因子的多元回归统计模型. 该研究可为基于自然衰减修复的场地或区域地 下水污染优化控制与高效修复提供参考依据.

1 模型构建及敏感因子选取

1.1 典型含水层系统及典型基准模型构建

为探究各参数对污染羽稳定性特征因子的敏 感性,以山东省西部黄河冲积平原典型含水层系统 为原型在GMS系统中建立典型基准数值模型,模 拟污染物在地下水中的迁移扩散.该典型系统含水 层主要为浅层、中层和深层,其中浅层和深层地下 水是淡水,中层含水层为咸水(马龙和冯超臣, 2014).浅层淡水的总埋深一般为60m左右,上层潜 水含水层厚度为5~15m,经弱透水层往下为承压 含水层.补给来源主要为大气降水,排泄方式为自 然蒸发和人工开采.气候类型为温带大陆性气候, 年平均降雨量约为646mm(肖蓓等,2019).整体上 地形较为平坦,平均海拔较低,地下水自西向东流.

因上层潜水含水层污染风险最大,本研究以上



| | 表 1 | 模型初 | 1始 | 参 | 数设 | 置 |
|--|-----|-----|----|---|----|---|
|--|-----|-----|----|---|----|---|

Table 1 Model initial parameters setting

| 参数名称 | 输入值 |
|------------------------------|---------|
| 降水入渗补给强度R(m/d) | 0.000 2 |
| 有效孔隙度P | 0.2 |
| 潜水含水层渗透系数 $K_w(m/d)$ | 50 |
| 弱透水层渗透系数 $K_{a}(m/d)$ | 0.008 |
| 承压水含水层渗透系数(m/d) | 50 |
| 潜水含水层厚度 $M_w(m)$ | 12 |
| 弱透水层厚度 $M_a(m)$ | 3 |
| 承压含水层厚度(m) | 5 |
| 潜水与承压水水头差ΔH _v (m) | 1 |
| 上游与下游水头差ΔH _h (m) | 5 |
| 降解系数 $D_g(1/d)$ | 0.005 |
| 吸附系数 $K_{d}(m^{3}/kg)$ | 0.000 1 |
| 污染源浓度 $C_0(mg/L)$ | 500 |
| 弥散度D(m) | 60 |
| 污染源面积 $A(m^2)$ | 900 |
| 污染源厚度占潜水含水层比值 | 0.25 |

注:表中污染物迁移相关系数参考 BIOSCREEN: Natural Attenuation Decision Support System. User's Manual (Newell *et al.*, 1996).

层潜水层作为研究对象,将典型含水系统从上到 下依次概化为潜水含水层、弱透水层、承压含水 层、隔水底板的典型水文地质概念模型,模型模拟 范围大小为长6000m,宽3000m,厚20m,水平 方向网格大小为10m×10m.设置场地西侧边界 为定水头边界,东侧为通用水头边界,二水头边界 水头差为6m.设置模型各层为均质各向同性,具 体渗透系数参考该研究区实际水文地质参数及经 验值赋值,模拟区内渗流场源汇项为降水入渗补 给,典型基准水文地质概念模型如图1所示.溶质 运移模拟情景设定为潜水含水层有一恒定污染 源,污染物为以苯系物为代表的易降解溶解态有 机物,其迁移转化过程包括对流、水动力弥散、 吸附和降解等.需要说明的是,含水层非均质 性对污染物迁移的影响实际上在本研究中可在 水动力弥散(机械弥散)参数中体现,非均质性 越强,弥散度越大.同时,对于不同苯系物的 物化性质差异,体现于降解与吸附2个过程中 的相应参数变化,而对流与水动力弥散(后者 通常以机械弥散为主)则与苯系物具体污染 组分无关.基准模型参数设置如表1所示.

1.2 典型基准模型污染物迁移规律

图 2 为基准模型地下水渗流场分布,在上下游 水头差的作用下形成了自西向东的稳定流场,潜水 含水层西侧水头为 20 m,东侧水头为 14 m.对污染 物进行 50年的模拟,得到污染羽迁移结果如图 3 所 示,着色区域表示污染物浓度大于 0.01 mg/L(苯的 三类地下水标准限值)的区域,即污染区域.污染物 在对流和弥散作用下向各个方向扩散,而后逐渐稳 定.水平方向上,污染物在对流作用下自西向东迁 移,同时在水动力弥散作用下于逆流和侧向对称区 域扩散,形成长轴较长的椭圆形污染羽;垂直方向 上,污染物经潜水含水层和弱透水层迁移至承压 水含水层,潜水层中扩散距离较承压层更远,表明 弱透水层对污染物的迁移具有一定的阻碍作用.







表 2 各参数变化情况下污染羽稳定性特征因子变化率

Table 2 The amplitude of pollution plume stable characteristic factors under different amplitudes of parameters

| | 稳定面积变化率 | | | 秳 | 急定浓度变化 | 率 | 稳定时间变化率 | | | |
|---------------|---------|--------|-------|--------|--------|-------|---------|--------|-------|--|
| 参数变幅 | 增大 50% | 减小 50% | 平均变化率 | 增大 50% | 减小 50% | 平均变化率 | 增大 50% | 减小 50% | 平均变化率 | |
| 降水入渗补 给强度 | 0.066 | 0.125 | 0.095 | 0.220 | 0.316 | 0.268 | 0.038 | 0.058 | 0.048 | |
| 有效孔隙度 | 0.271 | 0.267 | 0.269 | 0.226 | 0.006 | 0.116 | 0.135 | 0.423 | 0.279 | |
| 潜水含水 层厚度 | 0.253 | 0.220 | 0.236 | 0.097 | 0.084 | 0.091 | 0.077 | 0.115 | 0.096 | |
| 弱透水 层厚度 | 0.011 | 0.011 | 0.011 | 0.009 | 0.008 | 0.008 | 0.000 | 0.115 | 0.058 | |
| 潜水层渗 透系数 | 0.542 | 0.564 | 0.553 | 0.210 | 0.720 | 0.465 | 0.019 | 0.058 | 0.038 | |
| 弱透水层渗 透系数 | 0.004 | 0.026 | 0.015 | 0.002 | 0.018 | 0.010 | 0.019 | 0.000 | 0.010 | |
| 上下游 水头差 | 0.476 | 0.418 | 0.447 | 0.195 | 0.114 | 0.154 | 0.096 | 0.115 | 0.106 | |
| 潜水与承压 水头差 | 0.004 | 0.011 | 0.007 | 0.001 | 0.008 | 0.004 | 0.000 | 0.019 | 0.010 | |
| 降解系数 | 0.264 | 0.659 | 0.462 | 0.215 | 0.243 | 0.229 | 0.288 | 0.808 | 0.548 | |
| 吸附系数 | 0.004 | 0.011 | 0.007 | 0.003 | 0.010 | 0.007 | 0.269 | 0.154 | 0.212 | |
| 弥散度 | 0.297 | 0.341 | 0.319 | 0.141 | 0.313 | 0.227 | 0.192 | 0.019 | 0.106 | |
| 污染源浓度 | 0.377 | 0.385 | 0.381 | 0.089 | 0.188 | 0.138 | 0.154 | 0.038 | 0.096 | |
| 污染源面积 | 0.143 | 0.165 | 0.154 | 0.234 | 0.303 | 0.269 | 0.019 | 0.019 | 0.019 | |
| 源厚度与含 水层比值 | 0.136 | 0.114 | 0.125 | 0.053 | 0.284 | 0.169 | 0.058 | 0.019 | 0.038 | |

注:此表中变化率均为绝对值.

1.3 敏感因子选取

为对比分析不同参数对污染羽扩展影响的 敏感性,在基准模型参数值的基础上分别将其增 大和减小50%,同时保持其他参数不变,模拟至 污染羽稳定,以潜水含水层污染羽稳定性特征因 子即污染羽稳定面积、稳定平均浓度、稳定所需 时间为因变量对象,将参数变化后污染羽模拟结 果与基准模型进行对比,同时计算特征因子的变 化率,分析各参数对污染羽稳定性特征因子的影 响.其中污染羽面积指污染羽在潜水含水层的最 大面积,计算方法为潜水含水层单层浓度大于 0.01 mg/L的网格数与网格面积的乘积;污染羽 平均浓度为潜水含水层单位体积的污染量.

表 2 为各参数变化情况下污染羽稳定性特征 因子变化率的绝对值,图 4 为各参数增大和减小 50% 后污染羽特征因子的结果.对污染羽稳定面 积影响较大的因素为有效孔隙度、潜水层厚度、 潜水层渗透系数、上下游水头差、降解系数、弥散 度、污染源浓度、污染源面积、源厚度与含水层比 值;对污染羽稳定浓度影响较大的因素为降水 入渗补给强度、有效孔隙度、潜水层渗透系数、 降解系数、弥散度、污染源浓度、污染源面积与 源厚度占比;对污染羽稳定时间影响较大的因 素为有效孔隙度、降解系数、吸附系数、弥散度.

其中,有效孔隙度越大,污染羽稳定面积和稳 定所需时间越小,这是因为有效孔隙度增大,含水 层介质的储水量增大,则污染羽面积减小,同时稳 定时间缩短.潜水含水层厚度越大,则含水层污染 水渗流通量越大,进而稳定时间延长.潜水含水层 渗透系数越大,地下水流速越大,能够促进污染羽 迁移扩散,导致污染羽面积增大,稳定时间增长.上 下游水头差也即水力梯度,同样通过提高水流速度 而对污染羽迁移扩散起到促进作用.上下游水头差 和含水层渗透系数可共同体现为渗流速度(渗透系 数与水力梯度的乘积)的作用.降解系数表征了地 下水中微生物等降解污染物能力的大小,降解作用 越强,污染量、污染羽面积、稳定所需时间均越小. 吸附系数表征污染物吸附在固体表面的能力,吸附



Fig.4 Changes of pollution plume stable characteristic factors as the parameter changed

作用越强,污染羽越难达到平衡,故污染羽稳定时 间增长.水动力弥散表征在浓度梯度下单位面积通 过溶质质量的能力,弥散度越大,溶质迁移能力越 强,污染总量、污染羽面积、稳定所需时间都越大. 污染源浓度越大则源强越大,则污染羽面积、污染 羽浓度和稳定时间越大.污染源面积也是通过增 加源强来促进污染羽迁移扩散,尤其对污染羽面 积的促进作用更强.源厚度占比(污染源厚度占潜 水含水层厚度比例)表征了污染源污染深度,污染 源进入含水层越深,越促进污染羽的迁移扩散.

根据以上分析结果,笔者选取降解系数、吸附 系数、弥散度、源浓度、源面积、源厚度占比、渗流 速度、有效孔隙度为敏感因子,利用正交试验方 法,模拟各参数不同水平互相组合条件下污染羽 结果,并进行进一步的主控因子识别及规律探究.

2 正交试验设计与模拟结果分析

2.1 正交试验设计与模拟结果

正交试验是通过分析一部分试验的结果,了解 整体试验状况的一种数理统计方法,主要用于解决 多因素多水平的试验设计和统计分析问题(李木子 等,2014).正交设计的基本原理为利用规则的正 交表来安排试验,在全部因素的全部水平组合内, 挑选具有代表性的水平组合进行试验,通过对代表 性试验组合结果的分析,达到了解全部试验结果情 况的目的,具有高效、快速而经济的特点(徐超和叶 观宝,2004; 王帆和焦振华,2014;郝静等, 2015).正交设计的分析方法包括极差分析和方差 分析.极差为因素各水平结果平均值之间的差值, 极差越大代表因素水平改变对试验结果的影响程 度越大,极差最大的因素则为主要控制因素.极差 分析虽然简单方便,但无法检验因素影响的显著性.方差分析是在方差相同的条件下,检验各因素影响下结果的均值是否相等的统计分析方法, 通过将数据的总变差平方和分解成因素变差平 方和与随机误差平方和两部分,然后将因素与 随机误差的变差平方和相比并作F检验,利用 P值判断因素作用的显著性(倪恒等,2002).

通过前文分析,笔者共选取了 8 个对污染羽 扩散影响较大的参数,每个参数设置 5 个水平, 根据各参数的实际分布范围依次从高值到低值 取值.其中降解和吸附系数取值范围参考污染羽 模拟软件 BIOSCREEN 用户手册给出的参考值 (Newell *et al.*, 1996),源浓度最大值设置依据常 见苯系物的最大溶解度(甲苯 16~20 ℃溶解度 为 470 mg/L)(Lide, 1999),因素水平表如表 3 所示.采用L₅₀(5⁸)的正交表来设计试验方案(因 素水平组合),分别模拟不同参数水平组合下污 染羽的扩散直至稳定,并计算污染羽稳定性特 征因子.正交设计表和试验结果如表 4 所示.

2.2 极差分析

极差分析结果如表 5 所示, K1~K5 表示参数水平 1~5 的结果平均值, R 表示平均值的极差, R 越大表明影响作用越大.分析结果显示,各参数对污染羽稳定面积的影响作用从大到小依次为降解系数、渗流速度、弥散度、源厚度占比、吸附系数、源面积、源浓度、有效孔隙度. 各参数对污染羽稳定浓度的影响作用从大到小依次为源浓度、源厚度占比、降解系数、有效孔隙度、亦散度、渗流速度、源面积、吸附系数、有效孔隙度、弥散度、渗流速度、源面积、源浓度、渗流速度、源下生.

| 表 3 因素水平表 Table 3 Design of parameter levels | | | | | | | | | | |
|---|-------|------------|-----|--------|------------|-------|-------|------|--|--|
| ナマ | 降解系数 | 吸附系数 | 弥散度 | 源浓度 | 源面积 | 源厚度占比 | 渗流速度 | 有效 | | |
| 小十 | (1/d) | (m^3/kg) | (m) | (mg/L) | $(400m^2)$ | (%) | (m/d) | 孔隙度 | | |
| 1 | 0.002 | 0.000 01 | 10 | 10 | 1 | 0.2 | 0.005 | 0.10 | | |
| 2 | 0.005 | 0.000 05 | 30 | 50 | 2 | 0.4 | 0.020 | 0.15 | | |
| 3 | 0.01 | 0.000 10 | 60 | 100 | 3 | 0.6 | 0.050 | 0.20 | | |
| 4 | 0.05 | 0.000 50 | 100 | 200 | 4 | 0.8 | 0.100 | 0.30 | | |
| 5 | 0.1 | 0.001 0 | 200 | 500 | 5 | 1.0 | 0.200 | 0.40 | | |

表4 正交设计表及试验结果 Table 4 Orthogonal experimental design table and experimental results

| 皮凡 | 降解 | 吸附 | おお | 沥 <i>冰</i> 亩 | 派西和 | 源厚度 | 渗流 | 有效 | 稳定面积 | 稳定浓度 | 稳定时间 |
|----------|--------|--------|--------------|--------------|--------|--------|--------|--------|-----------------|--------------|--------------|
| 庁丂 | 系数 | 系数 | 孙 取 皮 | 你化良 | 你山你 | 占比 | 速度 | 孔隙度 | $(10^{3}m^{2})$ | (mg/L) | (a) |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 18.0 | 0.18 | 2.9 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 61.6 | 1.18 | 8.6 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 118.8 | 3.09 | 16.2 |
| 4 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 517.2 | 3.79 | 33.2 |
| 5 | 1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 2 006.0 | 8.10 | 68.2 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 60.8 | 9.38 | 3.6 |
| 7 | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 61.6 | 2.45 | 4.8 |
| 8 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 61.6 | 4 26 | 5.9 |
| 9 | 2 | 4 | 5 | 1 | 2 | - 3 | 4 | 5 | 125.2 | 0.42 | 16.6 |
| 10 | 2 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 368.0 | 1 44 | 9.1 |
| 11 | 3 | 1 | 3 | 5 | 2 | 4 | 4 | 1 | 72.0 | 15.2 | 0.6 |
| 12 | 3 | 2 | 4 | 1 | 3 | 5 | 5 | 2 | 65.2 | 0.66 | 0.6 |
| 13 | 3 | 3 | 5 | 2 | 4 | 1 | 1 | 3 | 22.4 | 0.51 | 1.2 |
| 14 | 3 | 4 | 1 | 3 | 5 | 2 | 2 | 4 | 4.4 | 0.90 | 1.2 |
| 15 | 3 | 5 | 2 | 4 | 1 | 3 | 3 | 5 | 4.8 | 11.21 | 1.2 |
| 16 | 4 | 1 | 1 | 2 | 5 | 3 | 5 | 3 | 207.6 | 1.70 | 2.4 |
| 17 | 4 | 2 | 5 | 3 | 1 | 4 | 1 | 4 | 57.6 | 2 43 | 2.4 |
| 18 | 4 | 3 | 1 | 4 | 2 | 5 | 2 | 5 | 8.0 | 23.40 | 2.0 |
| 19 | 4 | 4 | 2 | 5 | 3 | 1 | 3 | 1 | 41.6 | 3.03 | 12.4 |
| 20 | 4 | - | 3 | 1 | 4 | 2 | 4 | 2 | 68.0 | 0.40 | 85 |
| 21 | 5 | 1 | 5 | 4 | 3 | 2 | 4 | 3 | 48.0 | 3.76 | 0.4 |
| 22 | 5 | 2 | 1 | 5 | 4 | 3 | 5 | 4 | 16.0 | 48.35 | 0.5 |
| 23 | 5 | 3 | 2 | 1 | 5 | 4 | 1 | 5 | 6.8 | 3.05 | 0.3 |
| 24 | 5 | 4 | 2 | 2 | 1 | 5 | 2 | 1 | 7.2 | 3.58 | 1.0 |
| 25 | 5 | 5 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 6.4 | 0.25 | 1.0 |
| 26 | 1 | 1 | 1 | 4 | 5 | 1 | 3 | 2 | 72.2 | 12.20 | 0.5 |
| 20 | 1 | 2 | 2 | 5 | 1 | 5 | 4 | 2 | 359.2 | 5.41 | 15.6 |
| 20 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 5 | 4 | 248.0 | 0.46 | 0.2 |
| 20 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 5 | 90.8 | 1.24 | 20.3 |
| 20 | 1 | 4 5 | 4 5 | 2 | 4 | 2 | 1 | 1 | 702.2 | 1.24 | 114.5 |
| 21 | 1 | 1 | 2 | ວ 1 | 4 2 | ა ა | 2 | 1 | 14.4 | 1.34 | 2 1 |
| 20 | 2 | 1 | 2 | 1 | 4 | 3 | 2 | 5 | 20.4 | 1.20 | 2.1 |
| 3∠ 22 | 2 | 2 | 3 | 2 | 4 | 4 | 3 | 5 1 | 50.4 565.6 | 4.17 | 3.0 15.0 |
| 24 | 2 | 3 | 4 | 3 | 1 | 1 | 4 | 1 | 1 1 2 2 0 | 2.00 | 10.9 |
| 34 25 | 2 | 4 | 1 | 4 | 1 | 1 | 0 1 | 2 | 1 132.0 | 0.98 | 32.0 15.2 |
| 20 | 2 | 1 | 1 | ວ າ | 1 | 2 | | Г | 20.4 | 0.00 | 13.3 |
| 30 27 | 3 2 | 1 | 3 | 3 | 1 | 2 | 0 1 | 0 1 | 36.0 | 1.45 | 0.7 |
| 37 | 3 | 2 | 4 | 4 | 2 | 3 | 1 | 1 | 40.4 | 0.40 | 1.2 |
| 38 | 3 | 3 | D 1 | 0 1 | 3 | 4 | 2 | 2 | ∂7.Z | 24.96 | 1.8 |
| 39 | 3 | 4 | 1 | 1 | 4 | Э 1 | 3 | 3 | 10.4 | 1.90 | 3.6 |
| 40 | 3 | 5 | Z | Z | 5 | 1 | 4 | 4 | 19.Z | 0.54 | 3.9 |
| 41 | 4 | 1 | 4 | 5 | 4 | 1 | Z | 5 | 31.Z | 3.25 | 2.5 |
| 42 | 4 | 2 | 5 | 1 | 5 | 2 | 3 | 1 | 78.0 | 0.47 | 2.5 |
| 43 | 4 | 3 | 1 | 4 | 1 | 3 1 | 4 | 2 | 29.2 | 1.80 | 2.0 |
| 44 | 4 | 4 | 2 | 3 4 | 2 | 4 | 5 | 3 4 | 101.Z | 2.87 | 9.0 |
| 40 | 4 | Э 1 | 3 - | 4 | 3 0 | э г | 1 | 4 | 38.U | 10.95 | 10.0 |
| 40 | Э Г | 1 | D 1 | 4 | 2 | D 1 | 3 4 | 4 | 10.4 | 0.00 0.44 | 0.3 |
| 47 | о Г | 2 | 1 | 5 | 3 4 | 1 | 4 | Э 1 | 2.0 | 0.44 | 0.2 |
| 48 | 5 | 3 | Z | 4 | 4 | Z | 5 | 1 | 46.4 | 4.26 | 0.7 |
| 49 | 5 | 4 | 3 | 5 | 5 | 3 | 1 | 2 | 20.8 | 55.48 | 1.7 |
| 50 | 5 | 5 | 4 | | | 4 | 2 | 3 | 4.8 | 1.02 | 0.7 |

将参数水平作为横坐标(从小到大),该水平 下污染羽稳定性特征因子的平均值作为纵坐标, 绘制主效应图(图5),可以看出各参数与污染羽稳 定性特征因子的相关性大小有差异,这些参数在 控制变量的条件下(只改变自身大小)对污染羽的 影响是单调增大或减小的,说明在众多因素共同 作用的情况下,显著因子会影响不显著因子的作 用体现,不显著因子的影响作用会被弱化.对于污 染羽稳定面积而言,源面积、源厚度占比和有效孔 隙度对污染羽的影响有波动,说明这3个参数的 作用容易受其他更重要参数的干扰.同样的,对于 稳定浓度,在众多因素中,只有源浓度表现出稳 定、较强的影响作用,其他参数的影响都会受水平 组合的干扰.对于稳定时间,降解系数和吸附系数 均表现出非常强的相关性,同时也表明其他参数 的变化对降解系数和吸附系数的干扰作用较小.

2.3 方差分析

为准确估计各因素的误差大小,量化各参数对 特征因子的影响程度,笔者进一步采用方差分析方 法,对参数影响进行显著性检验.由分析结果(表6) 可知对污染羽稳定面积影响显著的因子为降解系



数、弥散度、渗流速度;对污染羽稳定浓度影响显 著的为源浓度、源厚度占比;对污染羽稳定所需时

| | | 降解系数 | 吸附系数 | 弥散度 | 源浓度 | 源面积 | 源厚度占比 | 渗流速度 | 有效孔隙度 |
|--------|-----|----------|------------|----------|----------|-----------------|----------|----------|--------|
| | K1 | 1 049.00 | 165.90 | 138.90 | 159.70 | 428.10 | 395.60 | 97.00 | 486.60 |
| 稳 定 | K2 | 611.50 | 194.50 | 194.00 | 234.20 | 191.40 | 130.80 | 238.40 | 393.60 |
| | K3 | 202.60 | 291.00 | 175.70 | 429.50 | 211.00 | 344.10 | 108.90 | 277.60 |
| | K4 | 85.00 | 527.70 | 421.70 | 493.90 | 376.50 | 337.10 | 451.40 | 246.70 |
| 町 | K5 | 42.20 | 811.20 | 1 060.00 | 673.00 | 783.30 | 782.70 | 1 094.60 | 585.80 |
| - | R | 1 006.80 | 645.30 | 921.10 | 513.30 | 591.90 | 651.90 | 997.60 | 339.10 |
| | 主次: | 降解系数 > | 渗流速度 > 弥 | 散度 > 源厚度 | ま占比 > 吸降 | 付系数 > 源 | 面积 > 源浓度 | 三有效孔隙 | 度 |
| 稳 | K1 | 3.701 | 5.343 | 9.787 | 0.982 | 3.235 | 1.209 | 9.842 | 4.050 |
| | K2 | 3.376 | 7.396 | 4.219 | 2.126 | 6.442 | 2.470 | 6.373 | 10.736 |
| | K3 | 5.074 | 6.883 | 9.721 | 2.473 | 5.083 | 13.310 | 4.565 | 2.951 |
| 此 | K4 | 6.571 | 7.419 | 2.717 | 8.181 | 7.735 | 7.115 | 3.441 | 7.799 |
| 依 | K5 | 12.524 | 4.205 | 4.802 | 17.484 | 8.751 | 7.142 | 7.025 | 5.710 |
| 皮 | R | 9.15 | 3.21 | 7.07 | 16.50 | 5.52 | 12.10 | 6.40 | 7.79 |
| 主 | 主次: | 源浓度 > 源 | 原厚度占比 > 降角 | 解系数 > 有效 | 女孔隙度 > 引 | 尔散度 > 渗 | 流速度 > 源面 | 「积 > 吸附系 | 《数 |
| | K1 | 31.15 | 2.50 | 9.76 | 3.76 | 5.93 | 6.37 | 6.78 | 19.53 |
| 私 | K2 | 13.77 | 3.99 | 5.79 | 9.39 | 6.48 | 7.26 | 13.99 | 6.37 |
| 梞 | K3 | 5.47 | 4.93 | 5.56 | 15.81 | 11.31 | 14.95 | 5.56 | 7.69 |
| 止 | K4 | 1.62 | 12.46 | 8.69 | 9.88 | 18.08 | 12.06 | 9.15 | 7.80 |
| 问 | K5 | 0.70 | 28.83 | 22.91 | 13.87 | 10.91 | 12.07 | 17.23 | 11.32 |
| 101 | R | 30.45 | 26.33 | 17.35 | 12.05 | 12.15 | 8.58 | 11.67 | 13.16 |
| - | 主次: | 降解系数> | 吸附系数>弥青 | 散度 > 有效孔 | 」隙度 > 源電 | ゴ 积 > 源浓 | 度 > 渗流速度 | >源厚度占 | i比 |

表 5 正交试验极差分析结果 Table 5 Range analysis results of the orthogonal experiment

| Table 6Variance analysis of influencing factors | | | | | | | | | | |
|---|-----------|------|---------|-----|------|---------|-------|-------|---------|--|
| | 稳定面积 | | | | 稳定浓度 | Ť | | 稳定时间 | | |
| 参数 | 均方 | F值 | 显著性 | 均方 | F值 | 显著性 | 均方 | F 值 | 显著性 | |
| 降解系数 | 1 830 318 | 5.93 | 0.004** | 139 | 2.15 | 0.119 | 1 593 | 10.00 | 0.000** | |
| 吸附系数 | 735 720 | 2.38 | 0.092 | 20 | 0.31 | 0.866 | 1 193 | 7.49 | 0.001** | |
| 弥散度 | 1 492 429 | 4.84 | 0.009** | 108 | 1.67 | 0.203 | 511 | 3.21 | 0.039* | |
| 源浓度 | 423 578 | 1.37 | 0.285 | 472 | 7.29 | 0.001** | 216 | 1.36 | 0.289 | |
| 源面积 | 568 692 | 1.84 | 0.167 | 47 | 0.73 | 0.583 | 238 | 1.50 | 0.248 | |
| 源厚度占比 | 565 024 | 1.83 | 0.169 | 228 | 3.51 | 0.029* | 131 | 0.82 | 0.530 | |
| 渗流速度 | 1 719 388 | 5.57 | 0.005** | 61 | 0.94 | 0.467 | 244 | 1.53 | 0.238 | |
| 孔隙度 | 201 315 | 0.65 | 0.633 | 96 | 1.49 | 0.250 | 286 | 1.80 | 0.176 | |

表6 影响因子方差分析

注:**表示P小于0.01,表明参数变化对结果有非常显著的影响,*表示P大于0.01且小于0.05,表明参数变化对结果有显著影响.

间影响显著的为降解系数、吸附系数、弥散度.方 差分析结果与极差分析结果具有较好的一致性.

整体上,稳定面积和稳定时间的主控因素具有 一定程度的一致性,主要表现为降解系数和弥散度 在影响稳定面积的同时影响着稳定时间,体现出降 解作用对污染羽稳定面积和稳定所需时间具有 重要的抑制作用,而水动力弥散作用对污染羽 迁移扩散具有较强的促进作用,表现为增大扩 散面积的同时延长稳定所需时间.稳定浓度的 主控因子主要为与源强相关的因子,体现了源 强大小对污染羽稳定浓度影响的重要性.

3 多元回归与统计模型

多元回归统计模型用于研究一个因变量与多 个自变量间的线性统计关系,利用最小二乘法来计 算预测模型系数(Li, 2011; 邵葆蓉等, 2020).本节 根据主控因素识别结果,选用对地下水污染羽稳 定性特征因子具有显著影响的参数为模型的自 变量 X,污染羽稳定面积(S)、稳定浓度(C)、稳 定所需时间(T)分别作为因变量 Y,利用 SPSS 软件做多元回归分析,得到污染羽稳定面积、稳 定浓度和稳定所需时间的预测统计模型,用于在 类似水文地质条件及污染情景下的污染羽稳定 性预测,同时利用标准回归系数进一步验证参 数的重要性和显著性.构建污染羽稳定性特征 因子和敏感参数的多元回归预测模型如下:

 $Y = C \times D_{g^{\beta_{1}}} \times K_{d^{\beta_{2}}} \times D^{\beta_{3}} \times C_{0^{\beta_{4}}} \times A^{\beta_{5}} \times r^{\beta_{6}} \times v^{\beta_{7}} \times P^{\beta_{8}}, \qquad (1)$

式中:Y为污染羽稳定性特征因子,即污染羽稳定面积(S,单位m²)、稳定浓度(C,单位mg/L)或稳定所

需时间 $(T, 单位年); D_g$ 为降解系数, $1/d; K_d$ 为吸附 系数, $m^3/kg; D$ 为弥散度, $m; C_0$ 为源浓度, mg/L; A为源面积, $m^2; r$ 为源厚度占比; v为渗流速度, m/d;P为有效孔隙度; C为常数项, $\beta_i(i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)$ 分别为自变量指数.

基于正交试验的结果,分别对污染羽稳定 面积、稳定浓度和稳定所需时间拟合,得到回 归方程如下:

对于稳定面积,得到回归方程:

$$T = 0.344 \times D^{-0.848} \times K^{0.0384}$$
(8)

$$I = 0.344 \times D_{\rm g} \longrightarrow K_{\rm d} \longrightarrow , \tag{8}$$

$$T = 1.478 \times D_{g}^{-0.848} \times K_{d}^{0.084} \times C_{0}^{0.151} \times D^{0.184} , \qquad (9)$$
$$T = 0.717 \times D_{g}^{-0.848} \times K_{d}^{0.384} \times C_{0}^{0.151} \times D^{0.184} ,$$

$$T = 0.504 \times D_{g}^{-0.848} \times K_{d}^{0.384} \times C_{0}^{0.151} \times D^{0.184} \times v^{0.222}, \qquad (11)$$

$$T = 3.086 \times D_{g}^{-0.848} \times K_{d}^{0.384} \times C_{0}^{0.151} \times D^{0.184} \times v^{0.222} \times A^{0.189} .$$
(12)

多元回归分析结果如表7所示,所构建 预测模型 R²均大于0.75,说明污染羽稳定性 特征因子与其控制因子具有较好的相关关

| Table 7 Results of multiple regression analysis | | | | | | | | | | |
|---|--|-----|--------|-----------------|-----------------|-----------|---------|-----------|-------|-------|
| | 因变量 | | | | * | 模型 | | | | |
| | | 参数 | (常量) | $\ln D_{\rm g}$ | $\ln v$ | lnD | lnP | | | |
| | $1 P^2 = 0.781$ | 系数 | -0.281 | -0.696 | 0.599 | 0.437 | -0.71 | | | |
| | K -0.701 | 显著性 | 0.667 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | | | |
| _ | | 参数 | (常量) | $\ln D_{\rm g}$ | lnv | lnD | lnP | $\ln C_0$ | | |
| | $2 D^2 - 0.81$ | 系数 | -1.17 | -0.696 | 0.599 | 0.437 | -0.71 | 0.199 | | |
| 稳定 | K = 0.01 | 显著性 | 0.094 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.08 | | |
| 面积- lnS | | 参数 | (常量) | $\ln D_{\rm g}$ | lnv | lnD | lnP | $\ln C_0$ | lnA | |
| | $3 D^2 - 0.825$ | 系数 | -1.17 | -0.696 | 0.599 | 0.437 | -0.71 | 0.199 | 0.352 | |
| | K = 0.825 | 显著性 | 0.163 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.006 | 0.032 | |
| - | | 参数 | (常量) | $\ln D_{\rm g}$ | lnv | lnD | lnP | $\ln C_0$ | lnA | lnr |
| | 4 = 0.020 | 系数 | -1.17 | -0.696 | 0.599 | 0.437 | -0.71 | 0.199 | 0.352 | 0.333 |
| | K = 0.839 | 显著性 | 0.023 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.004 | 0.026 | 0.034 |
| | | 参数 | (常量) | $\ln C_0$ | ln <i>r</i> | | | | | |
| 稳定 浓度 — ln <i>C</i> | $1 \qquad \qquad$ | 系数 | -1.353 | 0.693 | 1.230 | | | | | |
| | K = 0.750 | 显著性 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | | | | | |
| | 2 $R^2 = 0.772$ | 参数 | (常量) | $\ln C_0$ | $\ln r$ | $\ln v$ | | | | |
| | | 系数 | -1.822 | 0.693 | 1.230 | -0.146 | | | | |
| | | 显著性 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.043 | | | | |
| | | 参数 | (常量) | $\ln D_{\rm g}$ | $\ln K_{\rm d}$ | | | | | |
| | $1 P^2 = 0.800$ | 系数 | 1.066 | -0.848 | 0.384 | | | | | |
| | K = 0.055 | 显著性 | 0.014 | 0.000 | 0.000 | | | | | |
| _ | | 参数 | (常量) | $\ln D_{\rm g}$ | $\ln K_{\rm d}$ | $\ln C_0$ | | | | |
| | $2 D^2 = 0.017$ | 系数 | 0.391 | -0.848 | 0.384 | 0.151 | | | | |
| | K = 0.517 | 显著性 | 0.366 | 0.000 | 0.000 | 0.002 | | | | |
| - 稳定 | | 参数 | (常量) | $\ln D_{\rm g}$ | $\ln K_{\rm d}$ | $\ln C_0$ | lnD | | | |
| 心足 时间 lnT | $3 P^2 = 0.033$ | 系数 | -0.333 | -0.848 | 0.384 | 0.151 | 0.184 | | | |
| | K = 0.955 | 显著性 | 0.448 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.001 | | | |
| | | 参数 | (常量) | $\ln D_{\rm g}$ | $\ln K_{\rm d}$ | $\ln C_0$ | $\ln D$ | lnv | | |
| | $4 D^2 - 0.028$ | 系数 | -0.685 | -0.848 | 0.384 | 0.151 | 0.184 | 0.222 | | |
| | K = 0.938 | 显著性 | 0.136 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.04 | | |
| - | | 参数 | (常量) | $\ln D_{\rm g}$ | $\ln K_{\rm d}$ | $\ln C_0$ | lnD | lnv | lnA | |
| | $5^2 - 0.042$ | 系数 | 1.127 | -0.848 | 0.384 | 0.151 | 0.184 | 0.222 | 0.189 | |
| | ι — 0.945 | 显著性 | 0.023 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.033 | 0.036 | |

表7 多元回归分析结果

系,可以通过选择不同数目的参数对污染羽 稳定性特征因子进行可靠预测. 回 归 模 型 中,稳 定 面 积 德 宾 - 沃 森 检 验 值 为 1.135,稳 定 浓 度 德 宾 - 沃 森 检 验 值 为



Fig.6 Regression model residuals of stable area, stable concentration and stable time of pollution plume

2.283,稳定时间德宾-沃森检验值为1.327, 数据均满足独立性.参数P值均小于0.05, 模型具有统计学意义,在0.05检验水平上回 归模型具有显著意义.图6为回归模型标准 化残差的P-P图和散点图,标准化残差较好 地服从正态分布,且数据点均在3个标准差 之内,数据分布较均匀,无异常点,说明总 体效果较好,故判定所建立回归方程有效, 可用于污染羽稳定性特征因子的估算.

4 结论

本文构建了典型含水系统的数值模型及潜水 含水层恒定源污染情景,模拟污染羽迁移扩散.以 污染羽稳定面积、稳定浓度和稳定所需时间为特征 因子,研究各参数对特征因子的影响规律与定量统 计关系.基于本文研究情景的主要结论如下:

(1)在降解系数等参数的作用下,地下水污 染羽在一定时间后可达到稳定.根据正交试验 极差、方差分析与多元统计分析结果综合对比, 确定主控因子为:针对污染羽稳定面积,从大到 小依次为降解系数、弥散度、渗流速度、有效孔 隙度、源浓度、源厚度占比、源面积;针对污染羽 稳定浓度,依次为源浓度、源厚度占比、渗流速 度;针对污染羽稳定所需时间,依次为降解系 数、吸附系数、源浓度、弥散度、有效孔隙度、源 面积.总体上,除污染物源强外,地下水污染物 降解能力、弥散强度、渗流速度是对污染羽迁 移扩散具有广泛影响的重要因子.

(2)潜水含水层污染羽稳定性特征因子与其 主控因子具有良好的统计关系.针对污染羽稳定 面积、稳定浓度、稳定所需时间,分别构建出需要 4~7个、2~3个、2~6个参数的R²大于0.75的回 归统计模型,根据实际情况可用不同主控因子数 表征的统计模型,采用较少数目的控制因子即 能实现对污染羽稳定性特征因子的可靠评估.

(3)本文所提出的一套多方法融合与递进研究 方案,即首先建立典型基准数值模型,通过简单敏 感性分析筛选出较为敏感的参数,然后利用正交试 验方法,对地下水污染羽稳定性特征因子进行控制 因子识别,最后采用多元回归分析构建污染羽稳定 性特征因子与其主控因子的多元回归统计模型,不 仅为其他典型含水结构地下水系统中所关注层位 的地下水污染羽稳定性主控因子识别及统计预测 模型建立提供研究方法借鉴;还为一般污染场地或 区域地下水污染羽稳定性研究提供定性参考;并为 本文正交试验参数变化范围所覆盖的类似场地条 件地下水污染羽稳定性评价提供可参考量化模型.

References

- Bou-Zeid, E., El-Fadel, M., 2004. Parametric Sensitivity Analysis of Leachate Transport Simulations at Landfills. *Waste Management*, 24(7): 681-689. https://doi.org/ 10.1016/j.wasman.2004.03.004
- Gedeon, M., Mallants, D., 2012. Sensitivity Analysis of a Combined Groundwater Flow and Solute Transport

Model Using Local - Grid Refinement: A Case Study. *Mathematical Geosciences*, 44(7): 881-899. https:// doi.org/10.1007/s11004 - 012 - 9416 - 3

- Hao, J., Jia, Y. W., Zhang, Y. X., et al., 2015. Application of Orthogonal Experiment on Parameter Sensitivity Analysis of Groundwater Simulation. *Yellow River*, 37 (9): 66-68 (in Chinese with English abstract).
- Huang, F. M., Ye, Z., Yao, C., et al., 2020. Uncertainties of Landslide Susceptibility Prediction: Different Attribute Interval Divisions of Environmental Factors and Different Data - Based Models. *Earth Science*, 45(12): 4535-4549 (in Chinese with English abstract).
- Li, L., 2011. Quantifying TiO₂ Abundance of Lunar Soils: Partial Least Squares and Stepwise Multiple Regression Analysis for Determining Causal Effect. *Journal of Earth Science*, 22(5): 549-565. https://doi. org/ 10.1007/s12583 - 011 - 0206 - 5
- Li, M. Z., Zhai, Y. Z., Zuo, R., et al., 2014. Sensitivity Analysis of Parameters in Numerical Simulation of Solute Transport in Groundwater. South - to - North Water Transfers and Water Science & Technology, 12(3): 133-137 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. N., Chen, W. P., Lü, S. D., 2022. Advancement in Researches on Technical Systems and Modes for Risk Management and Control of Contaminated Sites at Home and Aborad. *Acta Pedologica Sinica*, 59(1): 38– 53 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. J., Wang, S. J., Zhang, M., et al., 2018. Research Progress of Monitored Natural Attenuation Remediation Technology for Soil and Groundwater Pollution. *China Environmental Science*, 38(3): 1185-1193 (in Chinese with English abstract).
- Lide, D. R., 1999. CRC Handbook of Chemistry and Physics. 80th Edition, CRC Press, Boca Raton.
- Ma, L., Feng, C. C., 2014. Analysis on Sustainable Utilization and Exploitation Potentiality of Shallow Groundwater Resources in Heze Yellow River Flood Plain Areas. *Shandong Land and Resources*, 30(2): 43-46 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Z. F., An, D., Jiang, Y. H., et al., 2012. Simulation on Contamination Forecast and Control of Groundwater in a Certain Hazardous Waste Landfill. *Environmental Science*, 33(1): 64-70 (in Chinese with English abstract).
- Newell, C. J., McLeod, R. K., Gonzales, J. R., 1996. BIO-SCREEN: Natural Attenuation Decision Support System. User's Manual Version 1.3. United States Environmental Protection Agency, Office of Research and De-

velopment, Washington D.C..

- Ni, H., Liu, Y. R., Long, Z. G., 2002. Applications of Orthogonal Design to Sensitivity Analysis of Landslide. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 21 (7): 989–992 (in Chinese with English abstract).
- Shao, B. R., Sun, J. C., Zhu, Y. Q., et al., 2020. Research on Gliding Distance Estimation of Loess Landslide Based on Multiple Regression: A Case Study of Tianshui Region, Gansu Province. *Geological Bulletin of China*, 39(12): 1993-2003 (in Chinese with English abstract).
- Shen, X. F., Wan, Y. Y., Wang, L. G., et al., 2021. Multiphase Flow Modeling of Natural Attenuation of Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Petroleum Contaminated Site. *Earth Science Frontiers*, 28(5): 90-103 (in Chinese with English abstract).
- Su, Z. X., Gao, W. S., Du, F. L., et al., 2020. Numerical Simulation and Parameter Sensitivity Analysis of Pollutant Migration in Stratified Soil. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 31(4): 53-62 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F., Jiao, Z. H., 2014. Application of Orthogonal Design in Sensitivity Analysis of Factors Influencing Landslide Stability. *Resources Environment & Engineering*, 28(4): 394-397 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. T., Li, J. X., Xue, X. B., et al., 2021. Similarities and Differences of Main Controlling Factors of Natural High Iodine Groundwater between North China Plain and Datong Basin. *Earth Science*, 46(1): 308-320 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, B., Cui, B. L., Jiang, B.F., et al., 2019. Spatial and Temporal Variations of Rainfall Erosivity in Different Topographic Regions of Shandong Province. *Journal of Earth Environment*, 10(3): 267-280 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C., Ye, G. B., 2004. Parameter Sensitivity Analysis of Numerical Model by Cross Test Design Technique. Hydrogeology and Engineering Geology, 31(1): 95-97 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Y., Wang, M. Y., Chen, J. P., et al., 2021. Lab Experiments and Numerical Simulations of 1, 2-DCA Remediation in Groundwater at Contaminated Sites. *Earth and Environment*, 49(3): 250-259 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. F., Wang, M. Y., Wang, L. Y., et al., 2015. Investigation of Key Controlling Factors and Numerical Simulation Uncertainty of the Groundwater Level Companying with Yongding River Ecological Restoration.

Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 32(2): 192–199 (in Chinese with English abstract).

- Zhai, Y. Z., Wang, J. S., Su, X. S., 2011. Sensitivity Analysis of Groundwater Numerical Simulation Using Orthogonal Experiment. *Geotechnical Investigation & Sur*veying, 39(1): 46-50 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, C. J., Li, J. X., Xie, X. J., 2021. Carbon and Sulfur Isotopic Features and Its Implications for Iodine Mobilization in Groundwater System at Datong Basin, Northern China. *Earth Science*, 46(12): 4480-4491 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 郝静, 贾仰文, 张永祥, 等, 2015. 应用正交试验法分析地下 水流模型参数灵敏度. 人民黄河, 37(9): 66-68.
- 黄发明, 叶舟, 姚池, 等, 2020. 滑坡易发性预测不确定性: 环境因子不同属性区间划分和不同数据驱动模型的影 响. 地球科学, 45(12): 4535-4549.
- 李木子, 翟远征, 左锐, 等, 2014. 地下水溶质迁移数值模型 中的参数敏感性分析. 南水北调与水利科技, 12(3): 133-137.
- 李笑诺, 陈卫平, 吕斯丹, 2022. 国内外污染场地风险管控 技术体系与模式研究进展. 土壤学报, 59(1): 38-53.
- 李元杰, 王森杰, 张敏, 等, 2018. 土壤和地下水污染的监控 自然衰减修复技术研究进展. 中国环境科学, 38(3): 1185-1193.
- 马龙,冯超臣,2014. 菏泽黄泛平原地区浅层地下水资源可 持续开发利用潜力分析.山东国土资源,30(2):43-46.
- 马志飞,安达,姜永海,等,2012.某危险废物填埋场地下水 污染预测及控制模拟.环境科学,33(1):64-70.
- 倪恒,刘佑荣,龙治国,2002.正交设计在滑坡敏感性分析

中的应用. 岩石力学与工程学报, 21(7): 989-992.

- 邵葆蓉,孙即超,朱月琴,等,2020.基于多元回归的黄土滑 坡滑动距离预测模型探讨——以甘肃天水地区为例. 地质通报,39(12):1993-2003.
- 沈晓芳, 万玉玉, 王利刚, 等, 2021. 基于多相流数值模拟的 某石油污染场地地下水中 VOCs 自然衰减过程识别及 能力评估. 地学前缘, 28(5): 90-103.
- 苏振兴,高文生,杜风雷,等,2020.成层土中污染物迁移数 值模拟及参数敏感性分析.地质灾害与环境保护,31 (4):53-62.
- 王帆, 焦振华 2014. 正交设计法在滑坡稳定性影响因素敏感 性分析中的应用. 资源环境与工程, 28(4): 394-397.
- 王雨婷,李俊霞,薛肖斌,等,2021.华北平原与大同盆地原 生高碘地下水赋存主控因素的异同.地球科学,46(1): 308-320.
- 肖蓓,崔步礼,姜宝福,等,2019.山东省不同地形区降雨侵 (独力时空变化特征.地球环境学报,10(3):267-280.
- 徐超, 叶观宝, 2004. 应用正交试验设计进行数值模型参数 的敏感性分析. 水文地质工程地质, 31(1): 95-97.
- 闫龑,王明玉,陈建平,等,2021.场地地下水1,2-二氯乙 烷污染的修复实验与数值模拟研究.地球与环境,49 (3):250-259.
- 杨小芳,王明玉,王丽亚,等,2015.永定河生态修复地下水 位主控因素与数值模拟预测不确定性.中国科学院大 学学报,32(2):192-199.
- 翟远征,王金生,苏小四,2011.正交试验法在地下水数值 模拟敏感性分析中的应用.工程勘察,39(1):46-50.
- 朱沉静,李俊霞,谢先军,2021.大同盆地地下水中碳硫同 位素组成特征及其对碘迁移富集的指示.地球科学, 46(12):4480-4491.