

页岩油气开发影响下的地下水污染风险 评价方法综述

张宏程¹, 代朝猛¹, 游学极¹, 李 质¹, 李继香², 张亚雷³

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 中国科学院 上海高等研究院, 上海 200120; 3. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 水平钻井与水力压裂等原位开采技术的应用引发了世界页岩油气开采的热潮, 但由此可能造成的地下水污染风险导致公众的强烈担忧。对页岩油气开发造成地下水污染的主要途径与风险评价方法进行了综述。在已有研究的基础上, 首先介绍了页岩油气开发造成地下水污染的特征污染物、污染途径与迁移驱动力, 然后综述了页岩油气开发影响下的地下水污染风险主要评价方法, 指出了指数叠加法、过程模拟法和统计方法在页岩油气开发场景中的研究现状与发展方向, 最后对页岩油气开发影响下的地下水污染评价方法的后续研究方向进行了展望。

关键词: 页岩油气; 地下水污染; 污染途径; 风险评价

中图分类号: P641.8

文献标志码: A

Review on Groundwater Contamination Risk Assessment Methods in Shale Oil and Gas Development

ZHANG Hongcheng¹, DAI Chaomeng¹, YOU Xueji¹,
LI Zhi¹, LI Jixiang², ZHANG Yalei³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200120, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The application of in-situ extraction techniques such as the horizontal drilling and hydraulic fracturing sparked a global shale oil and gas extraction boom, but the potential risk of the groundwater contamination has raised significant concerns among the public. In this paper, we review main pathways and risk assessment methods of the groundwater contamination associated with the shale oil and gas development.

Building upon the existing research, the characteristic pollutants, contamination pathways and migration driving forces of the groundwater contamination in the shale oil and gas development are presented. Subsequently, the principal assessment methods of the groundwater contamination risk caused by the shale oil and gas development are summarized, and the research status and future directions of the index-based method, process-based method and statistical method within the shale oil and gas landscape are discussed. Finally, potential areas for future research are outlined.

Keywords: shale oil and gas; groundwater contamination; contamination pathways; risk assessment

页岩油气是一类赋存于富有机质泥页岩及其夹层中的非常规油气资源。随着水平钻井与水力压裂技术的应用, 页岩油气资源的大规模商业化开发在经济上变得可行, 但由此可能造成的地下水污染风险逐渐引起人们的担忧^[1]。页岩油气开发造成地下水污染的可能途径有: ①地表下渗; ②沿致密储层及其上覆岩层中自然形成(断层、裂隙等)或人为制造(页岩油气井等)的优先路径向上迁移或横向扩散^[2]。开发场地中的地下水实际上面临着来源于地表与原位污染行为的双向威胁, 因此有必要进行预先的风险管控举措以控制可能产生的公众健康与环境问题。地下水污染风险评价是地下水污染风险管控的核心, 可为管控决策提供依据, 是控制或减少污染的主动手段之一, 也是确定地下水管理制度的关键标准之一^[3], 有助于更好地保障地下水资源的安全。

收稿日期: 2023-01-10

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFE0114900); 国家自然科学基金(52270164); 上海市科技创新行动计划(21230712100, 19230742400)

第一作者: 张宏程, 博士生, 主要研究方向为地下水污染治理。E-mail: 2211149@tongji.edu.cn

通信作者: 代朝猛, 研究员, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为地下水安全保障理论与技术。

E-mail: daichaomeng@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

地下水污染风险的定义可以追溯至 20 世纪 60 年代法国学者 Margat 提出的地下水脆弱性概念^[4],随后被延伸为固有脆弱性与特殊脆弱性,分别指风险中的地层固有自然属性层面与污染源层面,后者又衍生出污染负荷概念,强调污染源分布大小、迁移特征、危害程度等(即负荷大小)对风险大小的影响^[5-7]。目前,地下水污染风险可以由污染危害与污染损害表征,前者表示潜在污染负荷产生及造成地下水污染的可能性,后者表示自然系统或人类社会由此遭受的被破坏趋向^[3]。污染危害由潜在污染负荷与含水层固有脆弱性共同定义,而污染危害与污染损害又共同定义了地下水污染风险。虽然地下水污染风险内涵已趋于完善,但鉴于数据局限性、地区特异性、目标导向性等因素,评价研究往往侧重于内涵的某一具体层面。当前,地下水污染风险评价方法主要有指数叠加法与过程模拟法^[6-8]。统计方法(回归模型等)通常辅助其他方法,为进一步探讨污染水平的不确定性提供了可能^[9]。

页岩油气开发影响下的地下水污染风险评价研究主要在 2010 年后展开,延续了传统地下水污染研究对风险的内涵解释与主要评价方法。传统地下水污染研究通常关注由地表污染行为导致的浅层地下水污染风险,如经典指标模型 DRASTIC^[10]、GOD^[11]等均采用地表至地下的评价视角。页岩油气开发中双向污染途径决定了地表与原位污染行为导致的地下水污染风险均需受到重视,评价亦需具备由下至上的视角^[12-13]。同时,不完整的数据集阻滞了评价研究的进一步发展。页岩油气开发的规模性亦对区域尺度的评价研究提出了新的要求。然而,当前尚缺乏页岩油气开发影响下的地下水污染风险评价研究的系统性综述,亟需开展针对性梳理工作。

本文首先对页岩油气开发造成地下水污染的特征污染物、污染途径与迁移驱动力进行了介绍,然后综述了页岩油气开发影响下的地下水污染风险主要评价方法,讨论了指数的叠加法、过程模拟法和统计方法在页岩油气开发场景中的研究现状与发展方向,最后展望了后续研究方向。

1 页岩油气开发影响下的地下水污染过程

污染过程识别是风险评价的基础。页岩油气全周期开发过程主要包括场地预处理、钻井、压裂与采油采气等阶段。深部地层开发作业激发的污染路径

与迁移驱动力以及管理不当、施工缺陷与开发事故等人为失误,均为压裂液、产出水等特征污染物致污地下水提供了可能。

1.1 特征污染物

特征污染物分为气相、液相与固相污染物。气相污染物主要指开发过程中产生的游离烃类气体,以甲烷为主,可通过裂缝、断层及泄漏油气井等途径进入地下水,并引发如盐碱化等水质变化^[1,12,14-16]。液相污染物包含压裂液和产出水。为了保障水力压裂作业的正常进行,前者主要由水(质量分数为 98.0%~99.5%)与少量化学添加剂(支撑剂、减摩剂、胶凝剂、氧清除剂、生物杀菌剂与表面活性剂等)构成^[1,12]。后者主要由高盐卤水组成,混杂着因压裂而从岩层中释放的页岩油气、重金属、有机物和天然放射性核素(NORMs)等^[14,17]。固相污染物主要指在场地预处理阶段与钻井阶段产生的固体材料废物、钻屑与页岩废渣,在施工作业与地表管理不当的情况下,固相污染物将对地下水造成持续污染。此外,若开发场地存在常规油气储层,则也可能因水力压裂等作业的影响而形成新的污染源。

1.2 污染途径

页岩油气开发影响下的地下水污染途径如图 1 所示。地表污染物的储藏不当、处理不当、运输事故等人为失误所引发的污染泄漏事故通常被认为是造成浅层地下水污染的主要原因。土壤下渗与地表水-地下水交换过程是最主要的污染途径^[18-19]。

污染物原位迁移途径的形成是由于储层与含水层间存在水力连续性,即深层污染物向含水层迁移的通道。一般来说,如果岩层中没有薄弱处,缺乏能使污染物快速扩散的优先路径,污染物长距离的纵向迁移就被认为是不可能的^[2,13],污染物迁移至地表可能需要数万年^[20]。水力压裂作业与井结构失效等均可能诱发优先路径产生。

(1)地层构造运动、地下水溶蚀作用等自然过程均可导致岩层出现薄弱处,形成断层、裂缝和洞穴等。水力压裂作业及其引发的微型地震可能激活封闭的自然裂缝和断层,为油气和其他污染物的向上迁移创造了通道^[21]。

(2)水力裂缝结合自然路径(断层等)形成长距离通道。水力压裂作业将诱导裂缝产生并可能连通含水层^[22],但由于水力裂缝垂向延伸长度较短,超过 350 m 的概率小于 1%^[23],因此单独同含水层连接可能性较小。若水力裂缝同自然路径相结合,则将形成高风险的长距离通道^[24]。

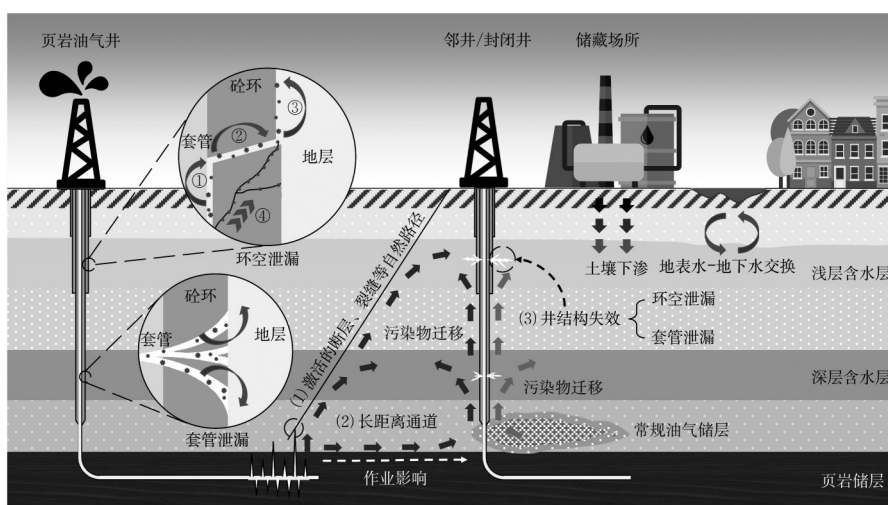


图1 页岩油气开发影响下的地下水污染途径

Fig.1 Groundwater contamination pathways in shale oil and gas development

(3)井结构失效所形成的低阻力通道。在施工缺陷、井内压力过高、压裂诱发轻型地震等影响下,井的完整性可能遭到破坏,形成套管泄漏或环空泄漏^[19,25]。套管泄漏是指井壁中的套管结构出现破裂、腐蚀或其他损坏,从而使污染物通过套管直接渗入地层。环空是套管与井壁间的空间,通常采用水泥封隔以阻止污染物进入地层。水泥封隔失效将导致环空泄漏,主要形式为^[1]:①沿套管与砾环间的空隙;②沿水泥内裂缝;③沿砾环与地层间的空隙;④沿水泥内部。水力裂缝可与结构缺陷处连通,进一步增加泄露风险。同时,上覆岩层的压裂为污染物迁移至邻井与封闭废弃井提供了可能,同时邻井和废弃井完整性也可能因压裂作业而破坏,为深层污染物进入含水层创造了新的通道^[21]。

1.3 迁移驱动力

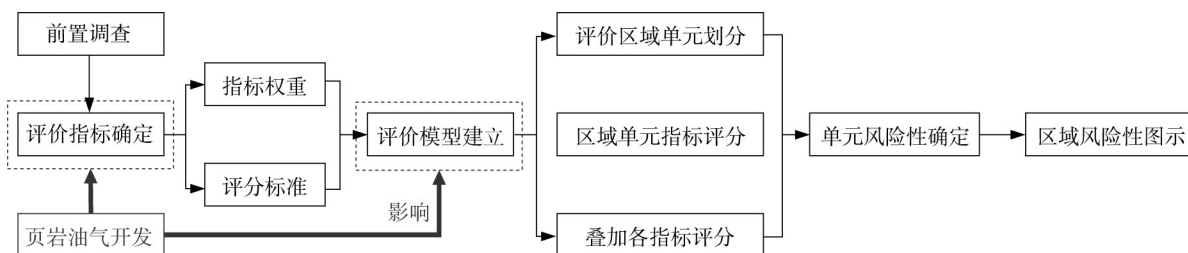
地层深部流体密度高且垂向水头梯度小,向上迁移较为困难。然而,储层增产技术造成井下压力或温度的变化可以提供额外的驱动力^[13]。模拟结果表明,水力压裂将促使储层污染物在时间与空间维度上更易侵入受体(地下水层或取水系统)^[26-28]。Brownlow等^[27]发现,水力压裂后的储层压力通常高

于初始储层压力约15 MPa。Myers^[28]指出,水力压裂条件下的污染物传播时间可减少一个甚至多个数量级。在Wilson等^[26]的模拟中,最坏预期下污染物仅需130年便可侵入地下水。这表明页岩油气开发引起的驱动力因素是不可忽视的。压裂液与产出水向上迁移的动力主要有补给区至排泄区的势能差(与地形驱动流相关的向上水力梯度)、页岩储层超压及压裂液注入增加的压力差以及压裂液与地层水因浓度差异而产生的密度差^[29]。游离烃类气体自身的浮力通常足以驱向地表^[19]。

2 页岩油气开发影响下的地下水污染风险评价方法

2.1 指数叠加法

指数叠加法是最常用的评价方法。将污染危害与损害因素定性或半定量化为指标,为不同的指标分配权重并评分,最后将这些指标评分相叠加以提供可表征地下水污染风险的指数。指数叠加法评价流程如图2所示。

图2 指数叠加法评价流程^[3]Fig.2 Process of index-based method^[3]

2.1.1 评价指标

页岩油气开发影响下地下水污染途径的双向性特征决定了风险评价不应局限于包气带-含水层系统,应纳入深部地层中污染物迁移的水文地质与驱动力因素,即包含地质背景、岩石序列的岩石学和流变学性质、预先存在的裂缝和断层网络、地层压力属性以及污染源和地下水受体之间的距离等参数。

(1)污染源(页岩储层)与含水层的垂直分离。“垂直分离”术语当前并没有公认的定义,一般情况下,通常描述含水层底部与页岩储层顶部的垂直距离^[30]。在不同假设情景下,许多模拟研究将该参数对地下水污染风险水平的影响进行了定量分析,证实了该因素的重要性^[26,28,30-34]。Reagan等^[31]发现,当垂直距离翻倍时,页岩气突破至含水层的时间将增加一个数量级。Loveless等^[30]应用英国国家地质模型评估了英国国家范围内页岩单元与含水层垂直距离的空间变化,此参数在空间分布上存在巨大差异。该研究进一步强调了纳入特定站点信息的重要性,包含已知的地震与钻孔数据,有助于垂直距离的确定与具体地点的风险评价^[30]。

(2)裂缝与断层网络。水力裂缝与断层可能为污染物向上迁移提供了一个低阻力通道(如图2中(1)、(2)途径),这一因素通常表征为断层/裂缝与污染源/受体间的距离、断层/裂缝的渗透性、断层类型与泥沙比等。Wang等^[35]分析了压裂产生的主裂缝与次生裂缝孔径对压裂液迁移的敏感性。结果表明,孔径越大越有利于压裂液迁移。Taherdangkoo等^[36]的模拟结果表明,废弃井的空间特性及废弃井与水力裂缝的距离是影响压裂液垂流的最重要因素,当废弃井与水力裂缝的距离为5、10 m时,压裂液向上迁移的流量分别比标准情况(井与水力裂缝相交)下降低了3.6倍和7.2倍。

同时,页岩油气开发技术特征指标,如油气井完整性、特征污染物管理与排放等都应纳入评价。

2.1.2 评价模型

页岩油气开发导致的地表污染被认为是浅层地下水致污最主要的原因。此类问题中,页岩油气开发影响下的地下水污染评价研究采用由地表至地下的评价视角,依托经典评价模型如DRASTIC、OCP展开。刘兆彬^[37]采用OCP模型与特征污染物毒性、迁移性和降解性指标,结合地理信息系统软件ArcGIS对页岩油气开采岩溶区的浅层地下水污染风险进行评价。张虹等^[38]采用OCP模型与地理信息系统(GIS),结合工业污染源负荷空间分布特征,

完成了重庆市页岩气开采浅层地下水污染风险评价。Holding等^[39]结合DRASTIC模型与交通廊道分布,绘制了加拿大页岩气开发区的地下水固有与特殊脆弱性图。腾彦国等^[8]与Machiwal等^[9]总结了经典评价模型的评价指标与应用特征。上述评价过程在页岩油气开发场景中的应用受到限制,评价中主控因素是浅部地层自然属性,对页岩油气开发因素的考虑较少。李绍康^[40]通过分析页岩气开发过程中地下水环境产污节点、污染途径、污染因子与污染强度,识别了页岩气开发地下水污染风险个性指标,构建了页岩气开发地下水环境综合污染风险评价模型。该模型可较为全面地评价页岩气工业对地下水的综合污染风险,但仅适用于浅层供水含水层。

页岩油气开发中地下水原位污染与深层地下水面临的威胁亦需受到关注。Wang等^[41]构建了GFDKOWQ模型,可适用于油田原位污染对承压水层的风险评价。虽然Wang等^[41]并未提及GFDKOWQ模型与页岩油气开发场景的关联,但另一项研究讨论了GFDKOWQ模型在该场景的适用性^[42]。辜海林等^[43]在DRASTIC模型的基础上建立了页岩气开采井区和回注井区的地下水脆弱性评价模型DIRTEV和DIRWOCT,已应用于四川省泸州市某页岩气开采井区。芦红等^[29]结合“源-途径-驱动力-受体”概念模型,构建了页岩气开发中深部脆弱性评价模型(DVI模型),已应用于贵州省东北部某研究区。

对于页岩油气开发中复杂且多变的地下水污染问题,构建一种泛适用的风险评价工具十分重要。Veiguela等^[44]基于健康、安全、环境的筛选和排序框架,从自然层面与技术层面建立了广泛的评价指标体系,以此为基础构建了一种适用于页岩油气资源的风险评价工具。当完成对不同类型场景的验证后,该风险评价工具能够对不同地点的风险进行归类,并确定其中的关键风险^[44]。Loveless等^[13]构建了一种评价地下油气开采中地下水脆弱性的方法,考虑了多重屏障、低渗透单元、完整地质序列等方面的影响,进一步充实了潜在受体的风险评估。根据概念模型与污染特征建立广泛的指标体系,并允许在不同场景中使用不同的参数组合,该风险评价工具的优点在于能够考虑不同污染特征的动态变化,根据地区特性进行调整^[13]。然而,这也意味着该风险评价工具需要持续的改进和验证,以保持其在不断变化环境中的适应性和准确性。

2.1.3 总结与未来发展方向

随着对页岩油气开发影响下的地下水污染途径的深入理解,相关研究已逐渐偏向地下水原位污染评价,深层地层水文地质属性与页岩油气提取技术特征逐步受到关注,由下至上的评价视角受到重视。目前,多数研究以建立固定参数的评价模型为主,这一一定程度上受传统评价思路的影响(如经典评价模型 DRASTIC),因此限制了评价方案的可转用性。Veiguela 等^[44]和 Loveless 等^[13]提供了一个新的解决方向,即建立易于评价的动态可迭代工具,强调在不同场景评价中对关键参数的识别与选择,更适用于具有复杂地理、地质、水文地质与污染特征的场景。

指标叠加法本质上是主观定性的,普遍缺乏评价结果的验证过程,其评价的有效性常常受到质疑。结合指标模型与物理模型的混合方法能够提升评价结果的有效性^[9]。Rosales-Ramirez 等^[45]通过数值模拟验证了 DRASTIC 模型中 D 、 I 、 C 参数(地下水埋深、包气带介质、含水层水力传导系数)的有效性,并成功地将基于过程的物理信息融入指标参数中。未来可能的发展方向有:①基于页岩油气开发过程中可能出现的新场景与新技术,开发进一步的指标(如表征水力压裂导致孔隙度变化的相关指标);②纳入一定的定量验证过程,如结合数值模拟技术,以提升指标叠加法评价指标与结果的可靠性;③进一步发展易于评价的动态可迭代工具,如结合 GIS 扩展其在不同水文地质条件下的适用性。

2.2 过程模拟法

过程模拟法是一类通过数值模型或解析模型完成对污染物迁移过程中对流、扩散、吸附、降解、衰变等的求解,实现潜在污染物时空分布的预测,并表征地下水污染风险程度的方法。相关研究通常围绕由上至下的评价视角,假设已知污染源位置、泄漏属性并建立理想传输模拟域条件,模拟污染物从地表污染源至含水层的正向迁移过程,量化污染物的迁移路径、迁移时间与浓度水平,并与预设阈值相比较,进而表征地下水污染风险程度^[46-48]。这些研究通常在小空间尺度下进行,对于短期、局部的污染事件有较高的精度^[7]。过程模拟法面临两大挑战:①数据可用性挑战,由于对详细的地质、水文地质和污染源等数据的依赖,因此数据的稀缺性或获取难度限制了该方法在不同场景中的适用性和精度;②大空间尺度应用挑战,当该方法应用到大范围区域时,过程复杂性、空间分辨率与计算能力之间的矛盾将难以解决。近期的研究侧重于开发新的模拟方法,如捕

获概率法、指标映射法和元模型法,这些方法为尝试解决以上挑战提供了新的思路。

2.2.1 捕获概率法

捕获概率(CP)定义为某一地点的一团水在规定时间内抵达受体的概率^[49]。CP法涉及一个逆向过程,即通过求解控制传输方程的伴随形式,获取感兴趣受体(如水井)在指定时间范围内的概率捕获区^[50]。Soriano 等^[51]采用 CP 法量化了饮用水井对页岩油气开发释放的水相污染物的脆弱性。以水井为核心进行了逆向模拟,获取了水井的概率捕获区,通过确定捕获区内页岩油气井数量量化脆弱性,如图3所示^[51]。CP法的优势在于逆向模拟的思路,从受体的视角进行逆向传输模拟,无须具备详细的污染源信息,从而规避了页岩油气开发中复杂、未知泄漏特性数据获取的难题。CP法适用于多污染源场景,并考虑了地下水流动方向的影响,这有助于确定水井保护区和基流贡献区,从而服务于管控设施的设计。

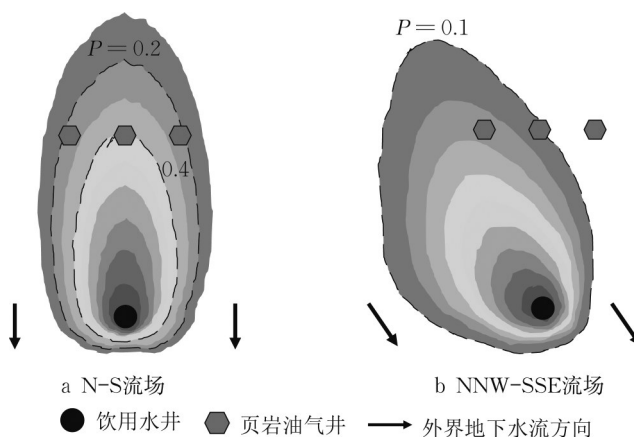


图3 2种场景下水井的概率捕获区平面示意图^[51]

Fig.3 Capture probability plume for a drinking water well in plan view under two scenarios^[51]

2.2.2 指标映射法

为了权衡大尺度模拟中面临的过程复杂性、空间分辨率与计算能力之间的矛盾,一类通过指标参数映射模拟信息的方法被提出。Rosales-Ramirez 等^[45]采用 DRASTIC 模型中的 D 、 I 、 C 参数为加拿大 162 000 km² 的区域绘制了脆弱性图,并将 D - I - C 组合用作矩形区域(0.16 km²)内废水泄漏迁移物理模型的参数值,将迁移时间与距离等结果同 D - I - C 图示相匹配,从而为整个区域提供了基于过程的信息。Mallants 等^[52]采用了相似方法,将页岩油气污染物在非饱和区与饱和区迁移与衰减关系转化为稀释系数(DF 参数),导出了不同土壤类型中 DF 参数关于地

下水埋深与孔隙流速的数学关系,从而绘制出澳大利亚 2 个区域(面积分别为 28 000 km² 与 139 000 km²)的 DF 参数分布图。以上 2 种方法均将小区域范畴内的模拟与指标参数建立经验关系,将基于过程的物理信息通过指标参数映射至大尺度内,从而规避了繁重的计算负担。然而,以上 2 种方法均假设污染物沿着理想的径向对称轨迹迁移,未考虑地下水流动方向,这在一定程度上限制了模拟的准确性。

2.2.3 元模型法

元模型法集成了物理建模与机器学习的思想,机器学习模型从物理模型中学习输入-输出的功能关系。该类方法从物理模型中强化科学理论,并保留数据驱动的机器学习模型的计算效率与可伸缩性^[53],已被证明可以学习可推广的关系,并成功地对训练数据集未涵盖的情况进行预测^[54]。这说明元模型是研究大型未监测地区、未来情景和罕见事件的潜在工具^[55]。Soriano 等^[55]基于捕获概率理念,采用元模型法成功预测了基于物理过程的地下水流动与传输模型,证实了该方法在大空间尺度上(2 900 km²)预测地下水井的脆弱性是可行的。Soriano 等^[56]采用一种更为高效的集成建模方法,结合水文模型与粒子追踪,通过粒子轨迹与固定位置相交的实现数确定风险程度。该方法完成了对美国 104 000 km²区域浅层地下水对页岩气井泄漏的脆弱性评价,突出了元模型的空间可转移性^[56]。

2.2.4 总结与未来发展方向

目前,相关研究集中于探讨页岩油气开发地表污染行为对地下水的影响。地下水污染风险程度的判别标准主要有 2 种:①污染物抵达地下水面的可能(迁移时间与浓度水平)^[45-47,52];②污染源与水源系统(如水井)的接近程度^[51,55-56]。后者考虑了页岩油气井与水源系统间的实际距离,因此更易转化为区域尺度下的地下水污染风险,并服务于管控措施的设计(如水井后退距离制定)。

过程模拟法的缺点在于数据可用性有限以及需处理问题的复杂性与不确定性。基于稳态流动与理想均匀介质假定,采用指标参数映射物理过程(如 DF 参数^[52]),在一定程度上克服了这一缺点。逆向模拟思路则从另一角度规避了页岩油气开发中泄漏特征数据稀缺的问题^[51]。

近年来,鉴于页岩油气开发的规模性,大空间尺度模拟研究备受关注,主要研究思路有:①在大尺度空间中以连续的网格逐网格进行分析^[45,52];②集成

物理建模与机器学习的理念,通过机器学习模型获取可推广的关系,实现在大尺度空间中的预测^[55-56]。两者均通过设定预测因子(指标参数)的方式解释土壤介质的异质性,弥补数据的不足,并权衡计算能力,如 Soriano 等^[56]基于距最近上梯度气井的反距离等因子,实现了元模型对原始训练区域之外的预测。此外,应用随机过程解释水文地质条件的变化,结合物理模型与 GIS 处理空间复杂性与变异性,都可为页岩油气开发中地下水污染风险评价大尺度模拟提供可靠的见解,但仍需进一步研究^[52,57-58]。

页岩油气开发影响下的地下水原位污染风险评价仍待进一步研究。迄今为止,在页岩油气开发场景下的原位建模研究集中于压裂液与地层盐水从深层目标页岩向浅层含水层的垂直迁移上,重在基于不同的假设情景,对污染物可能的传输机制进行阐明,并明确其中重要参数的影响(敏感性分析)^[28,31,35,59-60]。图 1 所示的地下污染途径主要来源于建模研究的结果。相关研究并不是为风险评价专门设计的,尚缺乏足够的实例验证其在实地评价研究中的适用性,仅从建模角度,在污染示踪、模拟情景、污染途径、迁移驱动力、污染受体等的设定上提供了巨大的价值^[31]。基于污染风险的内涵可为风险水平提供一个度量方法,如 Lu 等^[61]基于可靠性-恢复性-脆弱性理论构建的气体迁移指标。页岩地层、页岩井、水力压裂过程和水力裂缝性质公开数据的缺失是进行稳定建模与评价研究的主要障碍。Edwards 等^[62]整理的 Marcellus、Barnett 和 Horn River 页岩水-气多相流建模相关数据可提供参考,但仍需进行长周期且精密的地下环境监测措施。此外,综合描述页岩油气开发地下水地表与原位污染风险评价的模拟方法仍待进一步研究。

2.3 统计方法

在计算机技术的推动下,统计方法开始被用于地下水污染风险评价研究,从概率角度分析并解释数据,处理实测数据的不确定性,从而提供了一种评价和预测污染风险的有效方式^[9]。目前,模糊逻辑、机器学习等方法已被应用于页岩油气开发影响下的地下水污染风险评价研究中。

模糊逻辑与模糊集理论允许使用多类型信息(如语言数据、专家意见和概率数据)评价风险,从而量化由于实测数据缺乏而被忽略的污染路径。Milton-Thompson 等^[63]基于模糊逻辑建立了一种水力压裂井失效破坏中的地下水污染风险评价方法,在水泥破坏数据缺乏的情况下,采用模糊故障树成

功评估了水泥失效状态。这类方法不需要大量历史数据便可应用于新的水力压裂场景,但Milton-Thompson等^[63]强调,这类方法仍需扩展适用范围,针对其他井失效状态的应用也需进一步研究。同时,模糊逻辑可用于解决指标模型权重的不确定性问题,减少权重设置时的主观因素干扰。李绍康^[40]通过模糊层次分析法与熵权法确定了页岩气开发地下水环境综合污染风险评价模型的权重。辜海林等^[43]依据各参数对地下水的影响程度,采用模糊综合矩阵法确定了DIRTEV模型和DIRWOCT模型的指标权重。

机器学习的主要目标是使计算机能够从数据中学习,并通过这种学习进行预测或决策。机器学习模型具备较高的计算效率与可伸缩性,但作为数据驱动方法,其所需的大量数据可能是昂贵且难以获取的。元模型法采用物理模型生成大量输出数据,并使用这些数据训练机器学习模型,有效克服了这一挑战,更多细节可见2.2.3节^[55,56]。

目前,在页岩油气开发影响下的地下水污染风险评价研究仍有很大空间探索统计方法的潜力,回归模型、贝叶斯方法与人工智能模型(模糊逻辑、机器学习等)均可作为复杂耦合数据分析问题提供可靠的见解。统计方法本质是数据密集型的,同样强调了页岩油气行业监测体系与全面数据库构建的迫切需求。

3 结论

(1)数据的可用性和质量对页岩油气开发影响下的地下水污染风险评价至关重要,因此需要构建全面的页岩油气行业监测体系和数据库,不仅包括页岩地层数据、油气井结构与损伤、水力裂缝性质、开发作业工序等信息,还应包含环境基线数据,以更好地评价页岩油气开发活动对地下水的污染风险。

(2)指标叠加法特别适用于数据有限与需要快速评价的情况。这类方法本质上是主观定性的,其评价的准确性遭到质疑,而且可能难以捕捉和描述复杂地下水系统。在评价中纳入一定的定量验证过程,如结合指标法与物理模型,已被证明能够提升评价结果的可靠性。动态可迭代评价工具为进一步描述页岩油气开发影响下的地下水污染复杂问题提供了可能。这类评价工具仍需进一步发展,如结合GIS以提升其在不同场景中的适用性与可靠性。

(3)过程模拟法是典型的定量方法,提供了污染

物传输的过程信息,并有助于资源和水源的保护。近期研究提出的捕获概率法、指标映射法和元模型法为应对过程模拟法面临的数据可用性挑战与大空间尺度应用挑战提出了新的思路。前者的关键仍在于全面、公开数据库的建设,后者的关键在于对空间复杂性的合理考虑,随机过程法与GIS或许能够提供进一步的见解。此外,仍需加强过程模拟法在页岩油气开发地下水原位污染问题中的研究,尚缺乏足够的实例验证其在实地评价研究中的适用性。

(4)页岩油气开发影响下地下水污染风险评价的多方法联合应用研究仍存在欠缺。一类组合评价方法(如指标叠加-过程模拟、指标叠加-过程模拟-统计方法等)可提升评价结果可靠性。在此基础上,进一步探索评价方法同GIS、地下环境监测技术与环境基线技术等的兼容性,以提供进一步的见解。

作者贡献声明:

张宏程:搭建论文逻辑框架,查找和筛选文献,整理并提炼关键内容与创新点,撰写初稿,完成后续修改工作。

代朝猛:制定论文整体思路,对论文结构提供方向性指导,全文审阅。

游学极:对论文内容与结构进行完善和优化。

李 质:对论文内容和结构提出建设性建议,优化论文整体架构。

李继香:对论文提出指导性建议。

张亚雷:对论文提出指导性建议。

参考文献:

- [1] VIDIC R D, BRANTLEY S L, VANDENBOSSCHE J M, *et al.* Impact of shale gas development on regional water quality [J]. *Science*, 2013, 340(6134): 1235009.
- [2] LEFEBVRE R. Mechanisms leading to potential impacts of shale gas development on groundwater quality [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2017, 4(1): e1188.
- [3] MASSONE H E, BARILARI A. Groundwater pollution: a discussion about vulnerability, hazard and risk assessment [J]. *Hydrogeology Journal*, 2020, 28(2): 463.
- [4] MARGAT J. Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution [R]. Orléans: Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 1968.
- [5] 张丽君. 地下水脆弱性和风险性评价研究进展综述 [J]. *水文地质工程地质*, 2006, 33(6): 113.
ZHANG Lijun. Review on groundwater vulnerability and risk assessment [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2006, 33(6): 113.
- [6] 孙才志, 陈相涛, 陈雪姣, 等. 地下水污染风险评价研究进展 [J]. *水利水电科技进步*, 2015, 35(5): 152.
SUN Caizhi, CHEN Xiangtao, CHEN Xuejiao, *et al.* Recent

- advances in groundwater contamination risk assessment [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015, 35(5): 152.
- [7] GOYAL D, HARITASH A K, SINGH S K. A comprehensive review of groundwater vulnerability assessment using index-based, modelling, and coupling methods [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 296: 113161.
- [8] 滕彦国, 苏洁, 翟远征, 等. 地下水污染风险评价的迭置指数法研究综述[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(10): 1140.
- TENG Yanguo, SU Jie, ZHAI Yuanzheng, *et al.* A review on the overlay and index method for groundwater pollution risk assessment [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(10): 1140.
- [9] MACHIWAL D, JHA M K, SINGH V P, *et al.* Assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution: current status and challenges [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 185: 901.
- [10] ALLER L, LEHR J H, PETTY R, *et al.* DRASTIC: a standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic settings [J]. *Journal of the Geological Society of India*, 1987, 29(1): 23.
- [11] IBE K M, NWANKWOR G I, ONYEKURU S O. Assessment of ground water vulnerability and its application to the development of protection strategy for the water supply aquifer in Owerri, southeastern Nigeria [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2001, 67(3): 323.
- [12] SOEDER D J, SHARMA S, PEKNEY N, *et al.* An approach for assessing engineering risk from shale gas wells in the United States [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2014, 126: 4.
- [13] LOVELESS S E, LEWIS M A, BLOOMFIELD J P, *et al.* A method for screening groundwater vulnerability from subsurface hydrocarbon extraction practices [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 249: 109349.
- [14] VENGOSH A, JACKSON R B, WARNER N, *et al.* A critical review of the risks to water resources from unconventional shale gas development and hydraulic fracturing in the United States [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(15): 8334.
- [15] PINTI D L, GELINAS Y, MORITZ A M, *et al.* Anthropogenic and natural methane emissions from a shale gas exploration area of Quebec, Canada [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 566: 1329.
- [16] MCINTOSH J C, HENDRY M J, BALLENTINE C, *et al.* A critical review of state-of-the-art and emerging approaches to identify fracking-derived gases and associated contaminants in aquifers [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(3): 1063.
- [17] 陆争光, 高鹏, 马晨波, 等. 页岩气采出水污染及处理技术进展[J]. *天然气与石油*, 2015, 33(6): 90.
- LU Zhengguang, GAO Peng, MA Chenbo, *et al.* Technical progress of shale gas produced water contamination and treatment [J]. *Natural Gas and Oil*, 2015, 33(6): 90.
- [18] WILSON M P, WORRALL F, CLANCY S A, *et al.* Compartmentalization and groundwater-surface water interactions in a prospective shale gas basin: assessment using variance analysis and multivariate statistics on water quality data [J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34(15): 3271.
- [19] WISEN J, CHESNAUX R, WENDLING G, *et al.* Assessing the potential of cross-contamination from oil and gas hydraulic fracturing: a case study in northeastern British Columbia, Canada [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 246: 275.
- [20] LI W, DONG Z, WANG C. Risk assessment for groundwater contamination from hydraulic fractured shale to aquifers [C]// Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. Abu Dhabi: OnePetro, 2017: SPE-188585-MS.
- [21] FARES A. Emerging issues in groundwater resources [M]. Cham: Springer, 2016.
- [22] LAVOIE D, RIVARD C, LEFEBVRE R, *et al.* The Utica shale and gas play in southern Quebec: geological and hydrogeological syntheses and methodological approaches to groundwater risk evaluation [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2014, 126: 77.
- [23] DAVIES R J, MATHIAS S A, MOSS J, *et al.* Hydraulic fractures: how far can they go? [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 37(1): 1.
- [24] HAMMACK R, HARBERT W, SHARMA S, *et al.* An evaluation of fracture growth and gas/fluid migration as horizontal Marcellus shale gas wells are hydraulically fractured in Greene County, Pennsylvania [R]. Pittsburgh: National Energy Technology Laboratory, 2014.
- [25] HOLLOWAY M D, RUDD O. Fracking: the operations and environmental consequences of hydraulic fracturing [M]. New York: John Wiley & Sons, 2013.
- [26] WILSON M P, WORRALL F, DAVIES R J, *et al.* Shallow aquifer vulnerability from subsurface fluid injection at a proposed shale gas hydraulic fracturing site [J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(11): 9922.
- [27] BROWNLOW J W, JAMES S C, YELDERMAN J C. Influence of hydraulic fracturing on overlying aquifers in the presence of leaky abandoned wells [J]. *Groundwater*, 2016, 54(6): 781.
- [28] MYERS T. Potential contaminant pathways from hydraulically fractured shale to aquifers [J]. *Groundwater*, 2012, 50(6): 872.
- [29] 芦红, 王丽, 杨鑫鑫, 等. 水力压裂对地下水影响的深部脆弱性评价[J]. *地球科学*, 2019, 44(9): 2920.
- LU Hong, WANG Li, YANG Xinxin, *et al.* Deep vulnerability assessment of hydraulic fracturing effect on groundwater [J]. *Earth Science*, 2019, 44(9): 2920.
- [30] LOVELESS S E, BLOOMFIELD J P, WARD R S, *et al.* Characterising the vertical separation of shale-gas source rocks and aquifers across England and Wales (UK) [J].

- Hydrogeology Journal, 2018, 26(6): 1975.
- [31] REAGAN M T, MORIDIS G J, KEEN N D, *et al.* Numerical simulation of the environmental impact of hydraulic fracturing of tight/shale gas reservoirs on near-surface groundwater: background, base cases, shallow reservoirs, short-term gas, and water transport [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(4): 2543.
- [32] JABBARI N, AMINZADEH F, DE BARROS F P J. Hydraulic fracturing and the environment: risk assessment for groundwater contamination from well casing failure [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2017, 31(6): 1527.
- [33] BIRDSELL D T, RAJARAM H, DEMPSEY D, *et al.* Hydraulic fracturing fluid migration in the subsurface: a review and expanded modeling results[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(9): 7159.
- [34] GASSIAT C, GLEESON T, LEFEBVRE R, *et al.* Hydraulic fracturing in faulted sedimentary basins: numerical simulation of potential contamination of shallow aquifers over long time scales [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(12): 8310.
- [35] WANG L, DONG Y, ZHANG Q, *et al.* Numerical simulation of pressure evolution and migration of hydraulic fracturing fluids in the shale gas reservoirs of Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 588: 125082.
- [36] TAHERDANGKOO R, TATOMIR A, ANIGHORO T, *et al.* Modeling fate and transport of hydraulic fracturing fluid in the presence of abandoned wells [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2019, 221: 58.
- [37] 刘兆彬. 岩溶区页岩气开采浅层地下水污染风险评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- LIU Zhaobin. Risk assessment of shallow groundwater pollution under shale gas extraction in Karst area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- [38] 张虹, 张代钧, 卢培利. 重庆市页岩气开采的浅层地下水污染风险评价[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(4): 2016.
- ZHANG Hong, ZHANG Daijun, LU Peili. Primary assessment of shallow ground water pollution risk for shale gas exploitation in Chongqing [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(4): 2016.
- [39] HOLDING S, ALLEN D M, NOTTE C, *et al.* Enhancing water security in a rapidly developing shale gas region [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2017, 11: 266.
- [40] 李绍康. 页岩气开发对地下水环境污染及评价模型研究[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2018.
- LI Shaokang. Study on the groundwater environment pollution affected by shale gas development and its evaluation model[D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2018.
- [41] WANG Z, WU Q, ZHANG Y, *et al.* Confined groundwater pollution mechanism and vulnerability assessment in oilfields, North China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(6): 1547.
- [42] ESTERHUYSE S. Developing a groundwater vulnerability map for unconventional oil and gas extraction: a case study from South Africa[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(17): 626.
- [43] 辜海林, 岳晓晶, 陈鸿汉, 等. 页岩气开采区地下水脆弱性评价模型[J]. *水资源保护*, 2018, 34(5): 57.
- GU Hailin, YUE Xiaojing, CHEN Honghan, *et al.* Assessment model of groundwater vulnerability in shale gas exploitation area [J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(5): 57.
- [44] VEIGUELA M, HURTADO A, EGUILIOR S, *et al.* A risk assessment tool applied to the study of shale gas resources [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 571: 551.
- [45] ROSALES-RAMIREZ T Y, KIRSTE D, ALLEN D M, *et al.* Mapping the vulnerability of groundwater to wastewater spills for source water protection in a shale gas region [J]. *Sustainability*, 2021, 13(7): 3987.
- [46] FLETCHER S M. Risk assessment of groundwater contamination from hydraulic fracturing fluid spills in Pennsylvania [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2012.
- [47] DAKHEEL ALMALIKI A J, BASHIR M J K, LLAMAS BORRAJO J F. Appraisal of groundwater contamination from surface spills of fluids associated with hydraulic fracturing operations[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 815: 152949.
- [48] 张鑫. 基于过程模拟法的地下水污染风险评价[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- ZHANG Xin. Groundwater pollution risk assessment based on process simulation method [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [49] MOLSON J, FRIND E. On the use of mean groundwater age, life expectancy and capture probability for defining aquifer vulnerability and time-of-travel zones for source water protection [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2012, 127(1/4): 76.
- [50] NEUPAUER R M, WILSON J L. Numerical implementation of a backward probabilistic model of ground water contamination [J]. *Groundwater*, 2004, 42(2): 175.
- [51] SORIANO M A, SIEGEL H G, GUTCHESS K M, *et al.* Evaluating domestic well vulnerability to contamination from unconventional oil and gas development sites [J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(10): e2020W.
- [52] MALLANTS D, DOBLE R, BEIRAGHDAR Y. Fate and transport modelling framework for assessing risks to soil and groundwater from chemicals accidentally released during surface operations: an Australian example application from shale gas developments[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 604: 127271.
- [53] LIANG J, LI W, BRADFORD S A, *et al.* Physics-informed data-driven models to predict surface runoff water quantity and quality in agricultural fields[J]. *Water*, 2019, 11(2): 200.
- [54] FIENEN M N, NOLAN B T, FEINSTEIN D T. Evaluating the sources of water to wells: three techniques for

- metamodeling of a groundwater flow model[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 77: 95.
- [55] SORIANO M A, SIEGEL H G, JOHNSON N P, *et al.* Assessment of groundwater well vulnerability to contamination through physics-informed machine learning[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(8): 84013.
- [56] SORIANO M A, DEZIEL N C, SAIERS J E. Regional scale assessment of shallow groundwater vulnerability to contamination from unconventional hydrocarbon extraction[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(17): 12126.
- [57] SINKEVICH M G, WALTER M T, LEMBO A J, *et al.* A GIS-based ground water contamination risk assessment tool for pesticides[J]. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 2005, 25(4): 82.
- [58] DOBLE R, MALLANTS D, AGHBELAGH Y B, *et al.* Potential impacts of shale and tight gas developments on unconfined aquifers: a chemical screening framework[J]. *The APPEA Journal*, 2021, 61(2): 389.
- [59] 芦红. 水力压裂对地下水影响的数值模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- LU Hong. Numerical investigation of potential impacts of hydraulic fracturing on groundwater environment[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [60] 韩嘉琛. 页岩气开采引起的地下水污染物溶质运移研究: 以长宁地区为例[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2022.
- HAN Jiachen. Research on solute transport of groundwater pollutants caused by shale gas exploitation: taking Changning area as an example[D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2022.
- [61] LU H, KANG Y, LIU L, *et al.* Comprehensive groundwater safety assessment under potential shale gas contamination based on integrated analysis of reliability-resilience-vulnerability and gas migration index[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 578: 124072.
- [62] EDWARDS R W J, CELIA M A. Shale gas well, hydraulic fracturing, and formation data to support modeling of gas and water flow in shale formations[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(4): 3196.
- [63] MILTON-THOMPSON O, JAVADI A A, KAPELAN Z, *et al.* Developing a fuzzy logic-based risk assessment for groundwater contamination from well integrity failure during hydraulic fracturing[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 769: 145051.

(上接第 1710 页)

- [4] 李强,毛江鸿,黄铭枫. 结合台风全路径模拟的混合气候极值风速估计[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(23): 84.
- LI Qiang, MAO Jianghong, HUANG Mingfeng. Mixed climatic extreme wind speed estimation combined with typhoon full-path simulation[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(23): 84.
- [5] VICKERY P J, SKERLJ P F, TWISDALE L A. Simulation of hurricane risk in the U.S. using empirical track model[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2000, 126(10): 1222.
- [6] POWELL M, SOUKUP G, COCKE S, *et al.* State of Florida hurricane loss projection model: atmospheric science component[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2005, 93(8): 651.
- [7] LI S H, HONG H P. Observations on a hurricane wind hazard model used to map extreme hurricane wind speed[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2014, 141(10): 04014238.
- [8] LI S H, HONG H P. Typhoon wind hazard estimation for China using an empirical track model[J]. *Natural Hazards*, 2016, 82(2): 1.
- [9] EMANUEL K A. The maximum intensity of hurricanes[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1988, 45(7): 1143.
- [10] BATTS M E, SIMIU E, RUSSELL L R. Hurricane wind speeds in the United States[J]. *Journal of the Structural Division*, 1980, 106: 2001.
- [11] 王晓芳,李红莉,王金兰. 登陆我国热带气旋的气候特征[J]. *暴雨灾害*, 2007(3): 251.
- WANG Xiaofang, LI Hongli, WANG Jinlan. Climatic characteristics of tropical cyclones landing in China[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2007(3): 251.
- [12] 李强. 混合气候极值风速估计和高层建筑风致响应分析模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- LI Qiang. Study on mixed climate extreme wind speed estimation and wind-induced response analysis model of high-rise buildings[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [13] 王彦俊. 中国近海热带气旋路径集合数据集(1945—2021) [DB/OL]. [2022-05-10]. <http://msdc.qdio.ac.cn>.
- WANG Yanjun. Tropical cyclone track dataset off the coast of China (1945—2021) [DB/OL]. [2022-05-10]. <http://msdc.qdio.ac.cn>.
- [14] SHEN W. Does the size of hurricane eye matter with its intensity? [J]. *Geophysical Research Letters*, 33(18): 18813.
- [15] KNAPP K R, VELDEN C S, WIMMERS A J. A global climatology of tropical cyclone eyes. [J]. *Monthly Weather Review*, 2018, 146(7): 2089.
- [16] LANDER M A. A tropical cyclone with a very large eye [J]. *Monthly Weather Review*, 1999, 127(1): 137.