

基于GIS的区域地下水脆弱性评价研究

侯 伟

山东省地质测绘院 山东 济南 250011

摘 要：随着社会经济的快速发展和人口的不断增长，地下水资源的合理开发与保护面临着严峻挑战。区域地下水脆弱性评价作为地下水资源管理的重要基础工作，对于识别地下水系统面临污染的风险程度、制定科学有效的保护措施具有重要意义。地理信息系统（GIS）以其强大的空间数据管理和分析功能，为区域地下水脆弱性评价提供了有力的技术支持。本文深入探讨了基于GIS的区域地下水脆弱性评价的理论基础、评价方法、关键技术，分析了当前研究存在的问题，并对未来的研究方向进行了展望，旨在为推动区域地下水脆弱性评价的发展和应用提供参考。

关键词：GIS；区域地下水；脆弱性评价

1 引言

地下水作为重要的水资源，在保障居民生活用水、农业灌溉和工业生产等方面发挥着不可替代的作用。然而，随着人类活动的加剧，如工业废水排放、农业面源污染、垃圾填埋等，地下水面临着日益严重的污染威胁。一旦地下水受到污染，其治理难度大、周期长、成本高，将对生态环境和人类健康造成长期的不良影响。因此，准确评价区域地下水的脆弱性，提前识别潜在的污染风险区域，对于制定针对性的保护策略、保障地下水资源的可持续利用至关重要。地理信息系统（GIS）是一种用于采集、存储、管理、分析和显示地理空间数据的计算机系统。它能够将与地下水相关的空间数据和非空间数据进行有效整合，通过空间分析、模型模拟等手段，直观地展示地下水脆弱性的空间分布特征，为地下水资源的科学管理提供决策依据。

2 基于GIS的区域地下水脆弱性评价方法

2.1 指数法

基于GIS的区域地下水脆弱性评价方法中，指数法是应用最广泛的一种方式，它通过量化影响地下水脆弱性的各项因素并赋予相应权重来计算地下水脆弱性指数。其中，DRASTIC模型是一种经典的地下水脆弱性评价方法，由美国环保局提出，考虑了7个关键因素：地下水埋深、净补给量、含水层介质、土壤介质、地形、包气带介质和水力传导系数。这些因素根据其特性被划分为不同等级，并分配相应的分值和权重，最终通过加权求和得到DRASTIC指数，用于划分地下水脆弱性等级为低、中、高、极高。

地下水埋深越浅，污染物越容易进入地下水中；净补给量大意味着污染物可能随着水流快速扩散；含水层介质如砂砾石渗透性好，会增加污染物迁移速度；土壤

介质对污染物有一定的过滤作用，但不同类型土壤效果不一；地形坡度影响地表径流的速度和方向，从而影响污染物输入；包气带介质通过吸附、降解等过程影响污染物进入地下水的数量；水力传导系数越大，表明污染物迁移越快。每个因素的具体参数根据实际情况确定区间和分值。

考虑到DRASTIC模型在不同地区的局限性，学者们提出了改进的DRASTIC模型，以适应当地的地质、水文地质条件及污染源特征。改进措施包括调整或新增评价因素，例如将土地利用类型和污染源分布纳入考量^[1]。不同的土地利用类型（工业用地、农业用地、居民用地）对地下水的影响各异，因此需要根据不同类型的潜在污染程度赋予权重和分值。

2.2 过程模拟法

过程模拟法是一种基于物理机制的地下水脆弱性评价方法，通过建立地下水流动和污染物迁移转化的数学模型，模拟污染物在地下水系统中的运动过程，从而科学评估地下水的脆弱性。常用的地下水流动模型包括MODFLOW，该模型以达西定律和质量守恒原理为基础，将研究区域离散为若干网格单元，每个单元具有均匀的水文地质参数，如渗透系数、给水度及边界条件（定水头或定流量边界），通过数值求解流动方程获得各单元的水头值，进而生成地下水的流场图，反映地下水流动方向与速度。在此基础上，结合污染物迁移转化模型（如MT3DMS），可进一步模拟污染物在地下水中的浓度变化。污染物迁移受多种过程影响，主要包括：对流作用（随地下水流迁移）、弥散作用（因流速差异导致的空间扩散）、吸附作用（污染物被含水层颗粒吸附滞留）以及降解作用（由微生物、化学或物理因素引起的分解）。吸附过程可通过线性、Freundlich或

Langmuir等温线进行描述，而降解速率则依赖于污染物性质和环境条件（如温度、pH、溶解氧等）。通过耦合流动与迁移模型，可以模拟不同污染源情景（如工业废水泄漏、农业面源污染等）下污染物的迁移路径、扩散范围及其浓度变化，从而定量评估地下水遭受污染的可能性和风险程度。

2.3 统计方法

统计方法是地下水脆弱性评价中一种重要的数据驱动型方法，通过分析地下水水质数据与各类影响因素之间的统计关系，建立数学模型来评估地下水的脆弱性。常用的方法包括多元统计分析和逻辑回归分析等。多元统计分析中的主成分分析（PCA）和因子分析（FA）可用于降维处理，提取影响地下水脆弱性的关键因子。主成分分析通过线性变换将多个相关变量转化为少数几个互不相关的主成分，保留原始数据的主要信息，帮助识别如地下水埋深、土壤质地、土地利用类型等主要影响因素；因子分析则进一步挖掘变量背后的潜在公共因子，揭示各因素之间的内在联系，辅助确定对地下水脆弱性起主导作用的环境变量^[2]。此外，逻辑回归分析是一种广泛应用于分类预测的统计模型，能够建立地下水是否受污染与多种影响因素之间的概率关系。其模型表达式为：

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

其中，P表示地下水受污染的概率，X1, X2, …, Xn为影响因素，β0, β1, …, βn为模型参数，通常通过最大似然估计法进行求解。在实际应用中，可根据计算得到的污染概率划分脆弱性等级，例如当P > 0.5时划分为高脆弱性，P < 0.3时为低脆弱性。该方法具有较强的解释性和预测能力，适用于大样本数据支持下的区域地下水脆弱性定量评估。

3 基于GIS的区域地下水脆弱性评价的关键技术

3.1 空间数据采集与处理

基于GIS的地下水脆弱性评价需要收集多种类型的空间数据，包括地质图、水文地质图、地形图、土地利用图、土壤类型图等。这些数据可以通过实地调查、遥感解译、相关部门获取等途径收集。同时，还需要收集相关的非空间数据，如气象数据、水文数据、污染源数据等。对采集到的数据进行预处理，包括数据的格式转换、投影变换、坐标校正等，确保数据能够在GIS平台上准确叠加和分析。对于遥感数据，需要进行辐射校正、几何校正等处理，提高数据的精度和质量。

3.2 空间分析技术

缓冲区分析用于确定污染源周围一定范围内的区域，评估污染源对地下水的潜在影响范围。例如，以垃圾填埋场、加油站等污染源为中心，建立不同半径的缓冲区，分析缓冲区内的地下水脆弱性特征。叠加分析是将多个图层进行空间叠加，综合各图层的信息进行新的分析。在地下水脆弱性评价中，可以将不同影响因素的图层（如地下水埋深图层、含水层介质图层等）进行叠加，根据各因素的权重计算得到地下水脆弱性指数图层。栅格计算是对栅格数据进行数学运算的过程。在基于GIS的评价中，常常需要将各影响因素的栅格数据按照一定的公式进行计算，得到最终的脆弱性评价结果栅格图层。

3.3 模型构建与可视化

根据选择的评价方法，在GIS平台上构建相应的评价模型。对于指数法模型，可以通过GIS的属性表操作和字段计算功能实现各因素分值和权重的计算；对于过程模拟法模型，需要将地下水流动模型和污染物迁移转化模型与GIS进行集成，实现数据的交互和模型的运行。GIS具有强大的可视化功能，可以将评价结果以地图、图表等形式直观地展示出来。通过绘制地下水脆弱性等级分布图，可以清晰地看到不同区域地下水脆弱性的空间差异，为决策者提供直观的决策依据。同时，还可以制作专题地图，展示各影响因素的空间分布特征，有助于深入分析地下水脆弱性的成因。

4 当前研究存在的问题

4.1 评价因素选择和权重确定的主观性

在基于GIS的区域地下水脆弱性评价中，评价因素的选择和权重的确定对评价结果具有重要影响。然而，目前的研究中，评价因素的选择往往依赖于研究者的经验和专业知识，存在一定的主观性。不同研究者可能选择不同的评价因素，导致评价结果缺乏可比性。同时，权重的确定方法也多种多样，如专家打分法、层次分析法等，这些方法在应用过程中也容易受到主观因素的影响，使得权重值不能准确反映各因素对地下水脆弱性的实际贡献程度。

4.2 模型的不确定性

无论是指数法模型还是过程模拟法模型，都存在一定程度的不确定性。指数法模型中，各因素的分值划分和权重确定缺乏统一的标准，不同地区和不同研究之间的差异较大。过程模拟法模型则需要大量的参数输入，而这些参数往往难以准确获取，存在一定的误差^[3]。此外，模型对地下水系统的简化处理也可能导致模拟结果与实际情况存在偏差。

4.3 数据获取和更新的困难

基于GIS的评价需要大量的空间数据和非空间数据支持。然而,在实际应用中,数据的获取往往存在困难。一些基础数据,如详细的地质、水文地质数据,可能由于调查成本高、技术手段有限等原因而缺乏。此外,数据的更新也不及时,导致评价结果不能准确反映当前地下水系统的实际情况。特别是对于一些快速发展的地区,土地利用变化、污染源分布等情况频繁变动,数据更新滞后将严重影响评价结果的可靠性。

4.4 多尺度评价研究的不足

地下水系统具有明显的尺度特征,不同尺度下的地下水脆弱性评价需要考虑的因素和采用的方法可能存在差异。目前的研究大多集中在某一特定尺度上,缺乏对多尺度评价的系统研究。在实际应用中,往往需要将不同尺度的评价结果进行综合分析,以制定更科学合理的保护策略。然而,由于多尺度评价研究的不足,目前还难以实现不同尺度评价结果的有效衔接和整合。

5 未来研究方向展望

5.1 加强评价方法的优化和集成

针对评价因素选择和权重确定的主观性问题,未来研究可以探索更加客观、科学的方法。例如,利用机器学习算法,通过对大量样本数据的学习,自动确定评价因素和权重。同时,将不同的评价方法进行集成,发挥各种方法的优势,提高评价结果的准确性和可靠性。例如,将指数法与过程模拟法相结合,先用指数法进行初步评价,确定潜在的高脆弱性区域,再利用过程模拟法对这些区域进行详细模拟,深入分析污染物的迁移转化过程。

5.2 降低模型不确定性

为了提高模型的准确性,需要加强对模型不确定性的研究。一方面,通过开展更多的野外试验和室内实验,获取更准确的模型参数,减少参数不确定性对模拟结果的影响。另一方面,采用敏感性分析、不确定性分析等方法,评估模型输入参数和模型结构对输出结果的影响程度,为模型的改进和优化提供依据。此外,还可以开发基于多模型集成的评价方法,综合考虑不同模型的模拟结果,降低单一模型的不确定性。

5.3 完善数据获取和更新机制

建立完善的数据获取和更新机制是保障基于GIS的区

域地下水脆弱性评价有效开展的关键。政府相关部门应加大对基础数据调查和收集的投入,建立统一的数据平台,实现数据的共享和交流^[4]。同时,利用遥感技术、物联网技术等现代信息技术手段,实时获取地下水水位、水质等动态数据,及时更新评价所需的数据。此外,还应加强对数据质量的管理和控制,确保数据的准确性和可靠性。

5.4 开展多尺度评价研究

未来研究应加强对多尺度地下水脆弱性评价的关注。建立不同尺度之间的联系和转换方法,实现从微观到宏观、从局部到整体的评价。例如,在小尺度上,详细研究污染源周边地下水的脆弱性特征;在中尺度上,分析区域地下水系统的脆弱性空间分布规律;在大尺度上,考虑气候变化、人类活动等宏观因素对地下水脆弱性的影响。通过多尺度评价研究,为不同层次的地下水管理提供科学依据。

结语

基于GIS的区域地下水脆弱性评价是保障地下水资源可持续利用的重要手段。通过将GIS技术与多种评价方法相结合,能够综合考虑各种影响因素,直观展示地下水脆弱性的空间分布特征,为地下水资源的科学管理提供有力支持。然而,当前的研究还存在评价因素选择和权重确定主观性强、模型不确定性大、数据获取和更新困难以及多尺度评价研究不足等问题。未来需要加强评价方法的优化和集成、降低模型不确定性、完善数据获取和更新机制以及开展多尺度评价研究,不断提高区域地下水脆弱性评价的水平和应用效果,为保护地下水资源、维护生态环境安全和人类健康做出更大贡献。

参考文献

- [1]黄勇,王大庆,丁志斌,等.地下水脆弱性评价研究现状及展望[J].节能,2023,42(09):84-88.
- [2]李朗,戈弋,何伟.基于GIS与DRASTIC模型的苏北黄泛平原典型区域地下水脆弱性评价[J].地下水,2023,45(04):30-33.
- [3]唐学芳,吴勇,陈晶,等.基于DRASTIC-GIS模型的成都典型区域地下水脆弱性评价[J].环境监测管理与技术,2020,32(06):28-32.
- [4]李平平.基于GIS与DRASTIC模型的玉门市地下水脆弱性评价[J].地下水,2023,45(06):77-79+114.