

黑龙江省地下水资源开发的生态环境效应及阈值分析

王洋^{1,2}, 那帅博宁^{1,2}, 赵剑^{1,2}, 徐磊^{1,2*}

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150086

2. 自然资源部哈尔滨黑土地地球关键带野外科学观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150086

DOI:10.61369/EAE.2025030001

摘 要 : 本文系统分析了黑龙江省地下水开发的现状, 揭示了地下水开发导致的生态环境效应。通过整合遥感解译、模型模拟 (如 MODFLOW) 等技术, 构建了包含自然生态与社会经济维度的评价指标体系, 结合层次分析法与熵权法确定综合权重, 对大庆、三江平原等典型区域进行生态环境效应定量评价。基于理论推导、历史数据和模型模拟, 识别了不同生态效应的阈值, 并通过多目标优化模型完成区域开发阈值综合评估。研究旨在为黑龙江省地下水资源的可持续发展提供科学依据, 平衡资源利用与生态保护的关系。

关 键 词 : 黑龙江省; 地下水资源开发; 生态环境效应; 阈值分析

Ecological Environmental Effects and Threshold Analysis of Groundwater Resource Development in Heilongjiang Province

Wang Yang^{1,2}, Na Shuaiboning^{1,2}, Zhao Jian^{1,2}, Xu Lei^{1,2*}

1. Harbin Comprehensive Survey Center for Natural Resources, China Geological Survey, Harbin, Heilongjiang 150086

2. Harbin Black Soil Earth Critical Zone Field Scientific Observation and Research Station, Ministry of Natural Resources, Harbin, Heilongjiang 150086

Abstract : This paper systematically analyzes the current status of groundwater development in Heilongjiang Province and reveals the ecological environmental effects caused by groundwater exploitation. By integrating technologies such as remote sensing interpretation and model simulation (e.g., MODFLOW), an evaluation index system encompassing both natural ecological and socioeconomic dimensions was constructed. The comprehensive weights were determined using a combination of the Analytic Hierarchy Process (AHP) and the Entropy Weight Method, enabling a quantitative assessment of ecological environmental effects in typical regions such as Daqing and the Sanjiang Plain. Based on theoretical derivation, historical data, and model simulations, thresholds for different ecological effects were identified, and a comprehensive assessment of regional development thresholds was conducted using a multi-objective optimization model. The study aims to provide a scientific basis for the sustainable development of groundwater resources in Heilongjiang Province, balancing the relationship between resource utilization and ecological protection.

Keywords : Heilongjiang Province; groundwater resource development; ecological environmental effects; threshold analysis

引言

目前国内外虽在地下水资源开发与生态环境保护领域开展了大量研究, 但针对黑龙江省独特地理环境、气候条件及社会经济发展模式下的地下水资源开发生态环境效应及阈值分析仍相对不足。如何在保障社会经济发展用水需求的同时, 科学评估地下水资源开发生态环境效应, 精准确定生态环境阈值, 实现地下水资源的合理开发与生态环境保护的协调统一, 成为亟待解决的重要课题。本文基于黑龙江省地下水资源开发现状, 系统分析其生态环境效应, 开展阈值研究, 以期为该省地下水资源的可持续利用与生态环境综合保护提供理论依据与实践指导。

一、黑龙江省地下水资源开发现状及生态环境问题

（一）黑龙江省地下水资源开发的主要方式

农业灌溉是地下水的一大用水大户，由于部分地区地表水供应不足或灌溉设施不完善，大量采用机井抽取地下水进行灌溉，以满足农作物生长的需水要求。例如在一些农田集中的区域，分布着众多深浅不一的农用机井。城市供水方面，地下水也占据一定比例。部分城市除了依靠地表水供水系统外，还会利用地下水作为补充水源，尤其是在一些远离大型地表水源地或供水系统尚未完全覆盖的区域，通过建设集中供水井来保障居民和工业用水。工业生产中，部分对水质有特定要求的企业，会自行开采地下水用于生产过程。比如某些化工企业、食品加工企业等，认为地下水水质相对稳定，能更好地满足其生产工艺对水质的需求。

（二）地下水开发引发的生态环境问题

在我国，尤其是北方干旱、半干旱地区，随着人口的增长和工农业、城市建设的迅速发展，地下水的开采量正在逐渐加入。目前我国北方多数的城市和平原地区，地下水已处于超采状态。大规模开发利用地下水资源过程，伴随着水资源造福于人类，取得巨大的社会、经济效益的同时，也带来了种种环境生态负效应^[1]。部分地区可能由于长期过量开采地下水，导致地下水位持续下降，形成了地下水降落漏斗。以大庆地区为例，因石油开采及工农业用水对地下水的大量抽取，地下水位下降明显，漏斗范围不断扩大。这不仅使得开采井单位出水量锐减，一些浅井甚至报废，还导致局部含水层被疏干，造成地下水源枯竭。长期过量开采地下水，降低了所开采含水层的水头压力，致使黏土（淤泥）质隔水层及含水层中黏土（淤泥）质透镜体被压缩，进而引发地面区域性下沉^[2]。

二、地下水资源开发生态环境效应识别与评价

（一）生态环境效应识别方法

在黑龙江省地下水资源开发生态环境效应识别中，可采用多种方法协同作业。通过广泛收集该省多年的水文地质资料、气象数据、土地利用变化资料、生态环境监测数据以及社会经济发展统计资料等，全面掌握地下水资源开发前后的各类信息。组织专业团队对黑龙江省不同区域进行实地勘查，重点关注地下水开采区、生态脆弱区以及出现明显生态环境问题的区域。实地观察地表植被变化、土壤状况、水体形态等，与当地居民交流了解地下水开采对其生产生活的影 响，获取第一手直观资料^[3]。遥感解译技术也是重要手段，利用高分辨率遥感影像，对比不同时期的土地利用类型、植被覆盖度、水体面积等信息，快速识别因地下水开发导致的生态环境变化。模型模拟方法则可以对生态环境效应进行定量分析，运用数值模型，如 MODFLOW 模型，结合黑龙江省地下水流场、含水层特性等参数，模拟不同地下水开采情景下地下水位变化、地面沉降趋势以及生态环境响应，预测未来可能出现的生态环境问题。

（二）生态环境效应评价指标体系构建

基于黑龙江省地下水资源开发的特点和生态环境问题，从自然生态和社会经济两个维度出发，构建全面的评价指标体系。自然生态维度包括地下水环境指标、土壤环境指标、植被与生物多样性指标等，地下水环境指标选取地下水位变化速率、地下水降落漏斗面积、地下水水质指标，这些指标能直观反映地下水开发对地下水资源自身的影响，例如地下水位变化速率可衡量地下水开采强度是否合理，矿化度和氯离子浓度可体现入侵或水质污染程度；土壤环境指标涵盖土壤盐渍化程度、土壤含水量、土壤 pH 值等，在黑龙江省西部，地下水超采引发的土壤盐渍化问题明显，土壤盐渍化程度指标可有效反映这一生态环境效应，而土壤含水量和 pH 值变化能体现地下水与土壤水之间的相互作用对土壤环境的影响；植被与生物多样性指标选取植被覆盖度、物种丰富度指数、濒危物种数量等，以三江平原湿地为例，地下水水位变化影响湿地植被生长，植被覆盖度和物种丰富度指数的变化能清晰展现湿地生态系统在地下水开发影响下的演变情况^[4]。社会经济维度设置农业灌溉用水效率、工业用水重复利用率、居民用水保障率等指标，用于评估地下水开发对社会经济发展的影响，判断水资源利用的可持续性。

（三）生态环境效应评价模型构建

运用层次分析法，将生态环境效应评价指标体系中的目标层、准则层和指标层构建层次结构模型，通过专家打分确定各指标的主观权重，体现专家对不同指标重要性的认知。再利用熵权法计算各指标的客观权重，根据指标数据的变异程度，从数据本身特征确定权重，避免主观因素干扰^[5]。将主观权重和客观权重通过线性组合的方式得到综合权重，使权重确定更加科学合理。将综合权重与各指标的标准化数据相结合，运用加权综合评价模型计算黑龙江省不同区域地下水资源开发生态环境效应的综合得分，得分越高表明生态环境效应越差，从而实现对生态环境效应的定量评价和区域间的对比分析。

三、地下水资源开发生态环境阈值分析

（一）生态环境阈值概念及确定方法

生态环境阈值是生态系统维持自身结构和功能稳定所能承受外界干扰的最大程度或临界值，对黑龙江省地下水资源开发而言，是判断地下水开采是否会引发不可逆生态环境问题的关键指标^[7]。当地下水位下降到特定程度，可能引发地面沉降、植被退化等严重后果，这个临界的水位下降值就是重要的生态环境阈值。通过理论推导法、历史数据分析法和模型模拟法可以确定生态环境阈值，理论推导法依据生态学、水文学原理，结合黑龙江省地质、水文地质条件，从理论计算生态环境阈值；历史数据分析法通过分析长期生态环境监测数据，寻找生态环境指标显著变化的转折点确定阈值；模型模拟法则利用系统动力学模型、生态 - 水文耦合模型等，模拟不同地下水开发强度下生态环境指标变化趋势，通过设置情景确定阈值，以此模拟不同开采量下地面沉降、土壤盐渍化等效应变化来明确相应阈值。

（二）基于不同生态环境效应的阈值分析

地下水环境方面，土壤环境上，西部松嫩平原地区土壤盐渍化问题明显，当土壤表层含盐量超过 0.3%，农作物生长受明显抑制，土壤生态系统退化，此为该地区土壤盐渍化的生态环境阈值；同时土壤含水量低于田间持水量的 60% 时，植被根系难以获取充足水分，易引发植被退化，该数值可作为土壤含水量阈值。植被与生物多样性方面，以三江平原湿地为例，当湿地植被覆盖度下降至 40% 以下，湿地生态系统的物质循环和能量流动被严重破坏，生物栖息地减少，物种丰富度降低，该值可作为湿地植被生态环境阈值；从生物多样性角度，某区域濒危物种数量占物种总数比例超过 5% 时，表明该区域生态系统处于高度危险状态，此比例可作为生物多样性保护阈值。

（三）区域地下水资源开发阈值综合评估

基于上述不同生态环境效应的阈值分析，采用多目标综合评价方法对黑龙江省区域地下水资源开发阈值进行综合评估。将地下水环境、土壤环境、植被与生物多样性等不同生态环境效应的阈值作为约束条件，构建区域地下水资源开发的多目标优化模型，并结合黑龙江省不同区域社会经济发展需求，在满足生态环境阈值约束的前提下，通过模型优化求解，确定各区域地下水资源的合理开发量，即区域地下水资源开发阈值^[9]。以哈尔滨市为

例，综合考虑城市供水、周边农业灌溉需求以及多方面生态环境阈值限制，经模型计算得出其地下水资源年合理开发量阈值。通过这种综合评估方式，能够在保障生态环境安全的基础上，实现黑龙江省地下水资源的科学合理开发与利用。

四、结束语

本文通过对黑龙江省地下水资源开发现状、生态环境效应及阈值的系统研究，明确了农业灌溉、城市供水和工业生产等开发方式引发的地下水位下降、地面沉降等问题，并构建了科学的生态环境效应评价体系，精准识别了不同生态效应的阈值，提出区域开发阈值综合评估方法。研究成果为黑龙江省制定地下水资源科学管理政策、优化开发布局提供了量化依据，对协调资源利用与生态保护、推动区域可持续发展具有重要现实意义。然而地下水资源系统与生态环境的相互作用复杂多变，未来仍需进一步深化长期动态监测与多学科交叉研究，完善阈值动态调整机制，同时结合气候变化与人类活动的影响，探索更精细化的地下水开发调控策略，为黑龙江省生态安全与水资源高效利用提供更全面的理论支撑与实践路径。

参考文献

- [1] 张立杰. 地下水资源可持续开发利用的综合技术体系 [J]. 东北林业大学学报, 2001, 29(4): 41-43. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5382.2001.04.012.
- [2] 李佳鸿. 黑龙江省水资源承载力评价及水资源优化配置研究 [D]. 东北农业大学, 2016.
- [3] 李代福, 陈建伟, 孙化江等. 黑龙江省地下水资源开发利用引起的环境问题及防治对策 [J]. 地下水, 2008, 30(4): 68-70. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1184.2008.04.024.
- [4] 孙化江, 李洪文, 叶凤等. 黑龙江省地下水资源开发利用引起的环境问题及防治对策 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2001, 12(2): 90-93. DOI: 10.3969/j.issn.1003-8035.2001.02.020.
- [5] 缪晓宇, 郭昂青. 黑龙江省松嫩平原地下水资源开发利用中主要问题及对策 [J]. 地质与资源, 2010, 19(2): 105-108, 133. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1947.2010.02.005.
- [6] 于汪洋, 杨森. 哈尔滨市地下水资源存在问题及对策 [J]. 水利科技与经济, 2011, 17(3): 61-62. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7175.2011.03.024.
- [7] 孙雷, 耿鸿江. 浅析哈尔滨市超采区变化情况 [J]. 黑龙江水利科技, 2018, 46(07): 143-146. DOI: 10.14122/j.cnki.hskj.2018.07.047.
- [8] 丛璐. 松嫩平原（黑龙江）地下水动态特征及超采区评价研究 [D]. 吉林大学, 2017.
- [9] 孙香泰, 孙博文. 黑龙江省松嫩平原地下水超采区分析研究 [J]. 黑龙江水利科技, 2016, 44(05): 1-4. DOI: 10.14122/j.cnki.hskj.2016.05.002.