

松嫩平原（黑龙江段）地下水动态变化与气候响应机制分析

徐磊^{1,2}, 赵剑^{1,2}, 那帅博宁^{1,2}, 王洋^{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/WCEST.2025020002

摘要： 松嫩平原（黑龙江段）作为中国重要农业与生态区域，其地下水动态变化受气候与人类活动双重驱动，呈现复杂特征。地下水位年内具有春降夏升的季节性波动，年际呈持续下降趋势，西北扇形地区等区域水位降幅显著；地下水量补给以降水入渗和河流侧渗为主，排泄受蒸发与人工开采主导，但补给排泄机制的定量分析及地貌单元差异研究不足；地下水水质受农业与工业活动影响，常规指标时空变异明显，硝酸盐、重金属等可能存在污染问题。气候因素中，降水的季节与年际变化影响补给量，蒸发通过浓缩效应改变水质，气温波动加速蒸发并影响水文循环，三者相互作用加剧地下水时空分布不均。人类活动如农业灌溉、城市开采及土地利用转变进一步干扰地下水系统，导致漏斗形成、污染加剧。未来需强化长期监测、定量分析及多要素关联研究，以支撑水资源可持续管理。

关键词： 松嫩平原（黑龙江段）；地下水动态变化；气候响应机制

Analysis of Groundwater Dynamic Changes and Climate Response Mechanisms in the Songnen Plain (Heilongjiang Section)

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

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

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

Abstract： The Songnen Plain (Heilongjiang section), as an important agricultural and ecological region in China, experiences complex groundwater dynamic changes driven by both climate and human activities. The groundwater level exhibits seasonal fluctuations, decreasing in spring and increasing in summer, and shows a continuous downward trend inter-annually. Significant water level declines are observed in regions such as the northwest fan-shaped area. Groundwater recharge is primarily through precipitation infiltration and river lateral seepage, while discharge is dominated by evaporation and artificial extraction. However, quantitative analysis of recharge and discharge mechanisms and research on differences in geomorphic units are inadequate. Groundwater quality is influenced by agricultural and industrial activities, with noticeable spatiotemporal variations in routine indicators. Potential pollution issues may exist, such as nitrate and heavy metal contamination. Among climatic factors, seasonal and inter-annual variations in precipitation affect recharge volume, evaporation alters water quality through a concentration effect, and temperature fluctuations accelerate evaporation and influence the hydrologic cycle. The interaction of these three factors exacerbates the uneven spatiotemporal distribution of groundwater. Human activities, such as agricultural irrigation, urban extraction, and land use changes, further interfere with the groundwater system, leading to the formation of funnels and increased pollution. Long-term monitoring, quantitative analysis, and multi-factor correlation studies are needed to support sustainable water resources management in the future.

Keywords： Songnen Plain (Heilongjiang section); dynamic change of groundwater; climate response mechanism

引言

松嫩平原（黑龙江段）地处中国东北，地理坐标介于东经123°40′至127°30′与北纬44°30′至49°15′之间，西接大兴安岭，东邻小兴安

岭，南至松花江干流，北抵黑龙江省界，面积约10.32万平方公里。其作为东北亚内陆平原核心，是中国重要粮食基地，也是多种生态系统交汇区。地下水是该区域生态系统的重要部分，支撑生态平衡与经济发展，为湿地、农业、工业等提供水源。但因气候变化和人类活动，地下水动态变化复杂，影响水资源利用和生态稳定。因此，研究其地下水动态变化及气候响应机制，对区域可持续发展意义重大。

一、相关概述

（一）松嫩平原（黑龙江段）地下水动态变化现状

松嫩平原作为我国重要农业和生态区，地下水动态变化研究虽取得进展，但仍存不足。该区域地处温带大陆性季风气候区，四季分明且干湿分布不均，多年平均气温为1~4℃，多年平均降水量在400~500 mm之间，降水时空分布不均匀，年蒸发量约为1200~1600 mm，蒸发量年际、年内变化波动较大。区域内水资源总量为228亿 m³，地下水资源量为115亿 m³，地表水资源量为157亿 m³。地下水位方面，20世纪60年代以来受气候与人类活动影响，呈现空间异质性和时间变异特征。西北扇形地潜水水位持续下降，局部等水位线向山前推移并大幅下降；低平原区水位季节性波动显著，但年际变化趋势因缺乏长期数据整合而研究薄弱^[2]。地下水量研究聚焦补给与排泄机制，西部山前平原补给充足，中部低平原较差，排泄以人工开采和蒸发为主，农业和城市用水导致局部水位下降，但定量分析及地貌单元差异研究不足^[3]。地下水水质问题渐受关注，常规指标时空变化明显，农工业活动致部分地区污染，然污染物迁移规律及气候关联研究尚浅。总体而言，现有研究需强化长期数据整合、定量分析及多要素关联，以支撑区域水资源可持续管理。

（二）气候对地下水影响的相关理论

气候因素对松嫩平原地下水动态变化起关键作用。降水作为主要补给源，其季节分配和强度直接影响补给量。夏季降水集中且强度大，有效补给地下水；冬季降水少且多为固态，补给效果弱。年际变化导致水位波动，丰水年水位上升，枯水年下降。蒸发是重要排泄途径，春夏季蒸发量大，低平原区地势平坦、水位埋藏浅，蒸发显著影响水位并导致水质浓缩^[4]。气温波动改变水文循环，升高时加速蒸发、减少入渗，增加人工开采需求，同时影响微生物活动和化学反应速率，间接影响水质。气候因素相互作用形成复杂机制，研究其综合作用对理解地下水系统运行规律至关重要。

二、松嫩平原（黑龙江段）地下水动态变化特征

（一）地下水位变化

松嫩平原（黑龙江段）地下水位变化兼具显著季节性 with 长期下降趋势。年内变化受气候、地貌及人类活动影响，呈现春降夏升规律，春季气温回升快、蒸发强，西部低平原区4~5月水位迅速下降至枯水期；6月后降水增多，水位回升，8—10月达年内峰值，低平原区响应明显。东部高平原因地势高、埋藏深，水位变幅较小。气象要素为年内波动主因，农业灌溉与城市用水加剧变化幅度。

年际层面，地下水位持续下降，近几十年尤为显著。自20世纪60年代起，西北扇形地潜水水位不断降低，1984—2003年160m等水位线向山前推移6~9km，降幅3~5m；1998年以来，年均下降0.75m，局部乡镇达0.15~0.30m/a。气候变化致降水减少、气温升高，削弱补给能力；农业扩张、城市用水增加引发超采，形成并扩展地下水漏斗，土地利用变化亦打破动态平衡^[5]。未来若气候与人类活动干扰持续，水位下降或加剧，威胁生态安全与经济发展，需采取调控措施保障水资源可持续利用。

（二）地下水量变化

松嫩平原（黑龙江段）地下水的补给与排泄受多重因素驱动，动态变化关乎水资源平衡。补给方面，降水入渗为主要来源，但近年降水模式改变致补给量波动，西部降水量减少使补给下降。河流侧渗在河谷漫滩和低平原区作用显著，受河流水位制约。农业区灌溉回归补给贡献大，但灌溉方式影响补给效率。土地利用变化（如湿地、旱田转水田）亦重塑补给格局^[6]。排泄方面，蒸发在低平原区水位浅而显著，气候决定蒸发强度；人工开采在农灌和城市供水区攀升，导致漏斗区失衡加剧；地下水径流东部、中部高平原径流弱，排泄量低，河谷漫滩则相反。气候变化与人类活动（灌溉、开采）是核心驱动因素，深入研究其规律对水资源管理至关重要，需平衡补给与排泄以维护生态安全。

（三）地下水水质变化

松嫩平原（黑龙江段）地下水水质变化问题，影响水资源利用。常规指标中，pH值总体中性至弱碱性，但哈尔滨、大庆等超采区因水位下降引发氧化还原反应，pH值降低。TDS含量中部低平原区较高，受径流缓慢和蒸发浓缩影响；东部高平原区补给充足、径流活跃，TDS较低。主要离子浓度方面，农业区Cl⁻、SO₄²⁻、Na⁺因化肥农药使用升高，城市周边NO₃⁻和NH₄⁺受工业废水、生活污水影响显著上升，反映水质动态与环境健康风险^[7]。

三、气候因素对松嫩平原（黑龙江段）地下水动态变化的影响

（一）降水的影响

松嫩平原（黑龙江段）地下水补给与水位波动受降水时空分布及强度显著影响，并受地貌、水文等多因素制约。降水季节性差异显著，夏季集中、冬季稀少，导致补给量季节性波动。东部高平原地势高、渗透性强，降水入渗效率高；西部低平原地形平坦、水位浅，蒸发强，补给效率低。低平原区6~8月降水集中形成丰水期，高平原侧向径流补给强，降水直接补给较弱。

降水强度方面，高强度降水易形成地表径流，降低补给效率，而低强度持续降水更利于稳定补给。年际变化上，丰水年入

渗量增加致水位上升，枯水年反之，农业灌溉区尤为敏感。监测显示降水量呈下降趋势，西部尤为明显，削弱补给能力，如西北扇形地1984—2003年水位显著下降。年内变化表现为春旱蒸发致水位下降，夏汛回升。但降水与水位关系复杂，近江区江水侧渗缓解降水不足，开采区人工抽取削弱降水主导作用。高平原区因侧向径流存在明显滞后效应，需结合地貌与水文地质条件深入分析。

（二）蒸发的影响

蒸发强度对松嫩平原（黑龙江段）地下水系统具有显著影响，且在地貌与气候差异下呈现复杂变化。作为地下水排泄的关键驱动力，蒸发强度的时空动态深刻影响区域水文过程。西部低平原区气候干旱，春、秋蒸发峰值导致地下水排泄量激增，水位快速下降；东部高平原区湿度较高、蒸发较弱，排泄量相对平稳。气象因素（气温、风速、湿度）协同作用，高温低湿环境进一步增强蒸发效应。

地貌特征加剧这种差异：低平原区水位埋藏浅，蒸发直接作用于潜水层；高平原区水位深，蒸发影响衰减。蒸发对水位和水质的影响具有双重性——季节性波动显著，春、秋强蒸发引发水位大幅下降，夏季虽蒸发高但降水补给使水位回升，加剧水资源时空不均^[8]。水质方面，蒸发浓缩提升溶解性总固体（TDS）浓度，西部局部TDS超标，盐分累积改变微生物群落结构，并促进硫酸盐还原等反应，进一步恶化水质。

（三）气温的影响

气温波动对松嫩平原（黑龙江段）地下水系统的影响贯穿水文循环各环节，并与气候变暖紧密关联。近60年来，区域气温累计上升约2℃，显著改变水文循环格局。升温直接加剧蒸发，导致地表水和土壤水分散失，降水入渗量减少，削弱补给能力；同时改变降水模式，虽强度增加但频率下降，地表径流增多而入渗效率降低。春季升温使积雪提前融化，部分融水未及入渗即形成径流，进一步减少补给。此外，升温增强植被蒸腾，农业灌溉需水增加，加剧地下水开采，间接改变排泄动态。

水位变化方面，蒸发与蒸腾加剧直接导致地下水位下降，如西北扇形地1998—2004年水位以0.75米/年速度下降，高温年份降水不足与蒸发增强共同作用使水位持续走低。水质影响则呈现

复杂连锁反应：升温促进微生物代谢，加速有机物分解；同时催化硝酸盐还原等反应，导致硝酸盐浓度下降并生成亚硝酸盐等有害物质，威胁水质安全^[9]。

（四）气候因素相互作用对地下水的影响

降水、蒸发与气温等气候要素间存在着微妙且深远的相互影响，它们共同对松嫩平原（黑龙江段）的地下水动态变化起着决定性作用。研究表明，这些气候因素并不是孤立存在的，它们通过复杂的水文循环过程紧密相连，共同影响着地下水的补给、排泄及其动态变化特征。例如，降水量的增加通常会提升土壤湿度，进而降低蒸发强度；然而，在气温较高的环境下，即便降水量有所增加，蒸发作用仍可能十分强烈，使得地下水位难以实现有效回升。

此外，这些气候要素的相互作用还呈现出明显的季节性变化特征。在夏季，降水集中且气温较高，导致蒸发强度增加，但通常充足的降水补给量能够弥补蒸发带来的损失，从而使地下水位整体呈现上升趋势。而在春季和秋季，降水量较少且气温波动较大，蒸发作用占据主导地位，进而引发地下水位下降。这种季节性的变化进一步加剧了地下水资源在时间和空间分布上的不均衡性。值得注意的是，气候因素相互作用的叠加效应也深受人类活动的影响^[10]。例如，在农业灌溉区，气温的升高增加了作物的需水量，进而导致地下水开采量的增加；同时，降水量的减少进一步削弱了地下水的补给能力，形成了所谓的“双刃剑”效应。

四、结束语

松嫩平原（黑龙江段）地下水动态受气候与人类活动双重影响。年内水位呈春降夏升波动，年际持续下降，西北扇形地降幅达3～5米。目前补给排泄机制定量研究及地貌单元差异分析尚存空白。气候方面，降水补给、蒸发影响水位水质，气温波动干扰水文循环与化学过程，三者与人类活动（灌溉、开采）叠加加剧水资源时空不均。人类活动进一步失衡：漫灌与城市化开采引发水位下降及漏斗，污水排放污染水质，土地利用转变削弱补给并加重盐渍化。未来需整合监测数据，深化定量与多因素关联研究，优化管理，强化污染管控与生态修复，保障地下水系统可持续。

参考文献

- [1]王露露,王天亮,高斌,等.松嫩平原土地盐碱化时空动态变化及影响因素分析[J].灌溉排水学报,2023,42(04):108-115.DOI:10.13522/j.cnki.ggps.2022339.
- [2]刘强,郭晓东,王长琪,等.松嫩平原环境演变及其对地下水资源影响[J].地质论评,2024,70(S1):205-207.DOI:10.16509/j.georeview.2024.s1.105.
- [3]杨庆庆.松嫩平原第四系高平原中更新统承压水2020年水位动态分析[J].黑龙江国土资源,2021(10):33-33.
- [4]刘波,樊成芳,束龙仓,等.气候变化与人类活动对三江平原典型区地下水埋深影响预估[J].灌溉排水学报,2022,41(08):63-69.DOI:10.13522/j.cnki.ggps.2021381.
- [5]刘静,宋梦林,臧超,等.松辽平原地下水埋深变化及关键影响因子分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2021,42(02):58-65.DOI:10.19760/j.newu.zk.2021022.
- [6]邱亚婷,陈娟,束龙仓,等.三江平原典型区地下水位对降水及河水位变化的响应[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(06):1076-1083+1127.DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0106.
- [7]李明乾,肖长来,梁秀娟,等.变化环境下地下水埋深动态特征及驱动因素分析[J].水利水电技术,2018,49(11):1-7.DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2018.11.001.
- [8]束龙仓,殷晓然,袁亚杰,等.三江平原典型区河水与地下水水量交换的时空变化规律分析[J].水利学报,2021,52(10):1151-1162.DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20210509.
- [9]于丽丽,唐世南,丁元芳,等.东北地区地下水超采情况及对策建议[J].水利规划与设计,2019,(04):37-40+96.
- [10]徐德兰,郭长林.黑龙江地质环境特征与主要地质灾害[J].中国地质灾害与防治学报,2011,22(03):101-105+118.DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2011.03.023.