

长白山地下水系统与地表水体耦合关系研究

白志杰^{1,2}, 高晓龙^{1,2*}, 史明志^{1,2}, 魏海峰^{1,2}, 唐雪峰^{1,2}, 柳俊乾^{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.2026040001

摘 要 : 长白山作为松花江、鸭绿江和图们江的发源地, 是东北重要水塔和生态功能区, 其地下水与地表水体的耦合关系关乎区域水资源安全与生态稳定。本文通过构建点-线-面监测网络, 系统获取地下水与地表水动力场数据, 结合水化学、氢氧稳定同位素示踪技术及数值模型, 探究两者耦合特征、机制及影响因素。长白山地下水与地表水动力场时空异质性显著, 受气象周期、地形地质控制, 丰平枯水期呈现不同演化特征; 水化学上两者均呈弱碱性、低盐度, 主要离子含量相关性显著, 印证耦合关联; 氢氧同位素示踪揭示大气降水为主要补给来源, 量化了不同时空尺度下两者的交换比例; 深大断裂与地热异常通过控水机制、水热耦合及深层地下水隐式补给, 显著控制耦合关系, 其中深层地下水隐式补给是天池水量稳定的关键。研究成果可为长白山区域水资源合理开发、生态环境保护及矿泉水资源管控提供理论支撑与技术参考。

关 键 词 : 长白山; 地下水系统; 地表水体; 水动力场

Research on the Coupling Relationship between Groundwater System and Surface Water in Changbai Mountain&

Bai Zhijie^{1,2}, Gao Xiaolong^{1,2*}, Shi Mingzhi^{1,2}, Wei Haifeng^{1,2}, Tang Xuefeng^{1,2}, Liu Junqian^{1,2}

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

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

Abstract : Changbai Mountain, as the source of Songhua River, Yalu River and Tumen River, is an important water tower and ecological functional area in Northeast China. The coupling relationship between groundwater and surface water bodies is related to regional water resource security and ecological stability. This article constructs a point line surface monitoring network to systematically obtain data on groundwater and surface hydrodynamic fields. Combined with hydrochemical and hydrogen oxygen stable isotope tracing techniques and numerical models, the coupling characteristics, mechanisms, and influencing factors of the two are explored. The spatiotemporal heterogeneity of groundwater and surface hydrodynamic fields in Changbai Mountain is significant, and they are controlled by meteorological cycles, topography, and geology, exhibiting different evolutionary characteristics during the wet and dry seasons; In terms of hydrochemistry, both exhibit weak alkalinity and low salinity, with a significant correlation in the content of major ions, confirming the coupling relationship; Hydrogen and oxygen isotope tracing revealed that atmospheric precipitation is the main source of replenishment, quantifying the exchange ratio between the two at different spatiotemporal scales; The deep fault and geothermal anomalies significantly control the coupling relationship through water control mechanisms, hydrothermal coupling, and implicit recharge of deep groundwater, among which the implicit recharge of deep groundwater is the key to the stability of Tianchi water volume. The research results can provide theoretical support and technical reference for the rational development of water resources, ecological environment protection, and mineral water resource management in the Changbai Mountain area.

Keywords : Changbai Mountain; groundwater system; surface water bodies; hydrodynamic field

引言

随着区域经济发展与矿产资源（尤其是矿泉水）开发力度的加大，加之全球气候变化引发的降水格局改变、冰雪融期提前等现象，长白山地下水与地表水体的耦合平衡受到显著影响，部分区域出现地下水位下降、泉眼流量衰减、地表径流不稳定等问题，不仅威胁优质矿泉水资源的可持续开发，也对区域生态系统的完整性构成挑战。因此，系统探究长白山地下水与地表水体的耦合关系，揭示其耦合机制及影响因素，成为当前区域水资源保护与生态环境治理的迫切需求。基于此，本文以长白山地下水系统与地表水体为研究对象，结合区域地质、水文与气象特征，构建多尺度监测网络，综合运用水动力场分析、水化学检测、氢氧稳定同位素示踪及数值模型等方法，系统探究地下水与地表水体的水动力场时空演化特征，识别两者的水力耦合关系，量化耦合交换比例，揭示深大断裂与地热异常对耦合关系的控制机制，阐明深层地下水隐式补给的特征与作用。本研究旨在填补长白山区域水资源耦合关系系统性研究的空白，完善火山岩区地下水与地表水体耦合的研究理论与方法，为区域水资源合理开发、矿泉水资源保护、生态环境修复及用水安全保障提供科学依据与技术支撑。

一、地下水与地表水水动力场特征及耦合识别

（一）数据获取与处理

长白山区是松花江、鸭绿江和图们江三条大型河流的发源地，是东北重要的“水塔”和生态功能区，其水资源形成演化关乎区域及其下游地区用水安全与生态环境安全^[1]。结合长白山区域地形、地质与水文特征，构建点-线-面监测网络，系统获取地下水与地表水动力场基础数据。地下水通过布设浅层潜水、深层承压水监测井，监测水位、水温、流速、流向；地表水以天池、二道白河、三道白河及典型泉眼为对象，监测水位、流量、流速，同步记录降水、气温、蒸发等气象数据^[2]。监测按丰、平、枯水期每月1次开展，暴雨、融雪等重点时段加密，总监测周期不少于2年。数据处理采用格拉萨斯准则剔除异常值并结合野外核查修正，利用 Surfer 进行空间插值绘制水动力场分布图，通过 Excel、Origin 开展统计分析，计算水位变差、平均流速等参数^[3]。同时收集区域地质勘察、水文地质、气象及前人研究成果，完善数据体系，为水动力场时空演化及耦合关系分析提供支撑。

（二）地下水动力场时空演化

长白山地下水动力场受地质构造、岩性、气象及地表水体共同控制，时空异质性显著^[4]。时间上与气象周期同步，丰水期（7—8月）降水与融水补给充足，浅层潜水水位上升1.5—2.0m，深层承压水上升0.3—0.8m，流速加快、流向稳定；平水期（5—6月、9—10月）补给减弱，水位缓降、变幅小；枯水期（11月—次年4月）以排泄为主，水位达全年最低，浅层潜水下降0.8—1.2m，深层水位较稳，流速减缓，部分区域流向反转^[5]。空间上呈明显分带性：高海拔天池周边以浅层潜水为主，受天池水位控制，多向天池汇聚；中低海拔河谷区潜水与承压水共存，地下水补给地表水；深大断裂带水力紊乱、梯度大、流速快，为水交换核心区。此外，地下2km处温度66—110℃，地热异常区地下水温和动力特征与常规区域差异显著。

（三）地表水动力场时空演化

长白山地表水体主要有天池、河流、泉眼，其水动力场时空演化受降水、冰雪融水、地下水补给及地形地貌控制^[6]。天池总蓄水量20.4亿立方米，水位变化平缓，年变幅0.5—1.0米，8—

9月丰水期水位最高，靠降水与地下水补给；12月至次年3月封冻枯水期，冰层厚约1.2米，蒸发减弱，水位缓降，由深层地下水维持，呈现冬蓄春融、夏盈秋稳特征^[7]。湖水经北侧阀门流出，形成乘槎河、长白瀑布，汇入二道白河，为松花江源头^[8]。河流时空差异明显，丰水期流量大增，为枯水期3—5倍，水位上涨1.0—1.5米；平水期稳定；枯水期流量最小，部分支流断流，以地下水补给为主。空间上，高海拔河段流量小、流速快，冰雪融水补给突出；中低海拔河段流量大、流速缓，断裂带附近地下水补给占比超60%；下游流量稳定，受地表水与地下水相互作用影响。泉眼流量多较稳定，靖宇、安图部分泉眼日允许开采总量36.37万吨，受深层地下水控制，季节变化小；地热泉（如聚龙泉）水温40—70℃，流量与水温受地热及地下水共同影响，时空变化复杂。

（四）地表水与地下水水力耦合关系识别

采集长白山2016—2020年不同区域、不同类型水体（浅层潜水、深层承压水、天池水、河流地表水、泉眼水）样品57组，采用多种设备检测主要离子含量，结合相关方法分析水化学特征、演化规律及耦合关联^[9]。结果显示，研究区水体整体呈弱碱性、低盐度，TDS含量低，符合优质水资源特征。地下水以HCO₃⁻-Na·Mg·Ca型为主，深层承压水偏硅酸含量高，是长白山矿泉水特质的核心成因，浅层潜水受降水和地表水影响，水化学类型与地表水相近；地表水以HCO₃⁻-Na型为主，天池水特征均一，河流水体离子含量随流域上下游呈现差异。水化学演化上，地下水从浅层到深层、地表水从上游到下游，离子含量均升高、水化学类型趋于复杂，且两者离子含量（尤其Na⁺、HCO₃⁻）相关性显著，验证了耦合关系。

二、水化学与同位素示踪下的耦合机制

（一）水化学特征及演化规律

2016—2020年采集长白山浅层潜水、深层承压水等5类水体样品57组，采用相关设备检测主要离子含量，结合 Piper 图等方法分析水化学特征及演化规律，揭示地下水与地表水耦合关联^[10]。研究表明，两者整体呈弱碱性、低盐度，TDS含量低，符合优质水资源特征。地下水以HCO₃⁻-Na·Mg·Ca型为主，深

层承压水偏硅酸含量高，是长白山矿泉水特质核心成因；浅层潜水受降水和地表水影响，部分与地表水（主要为 HCO_3^- -Na 型）水化学类型相近。天池水化学特征均一，河流水化学特征随流域呈现空间差异。地下水从浅层到深层、地表水从上游到下游，离子含量均升高、水化学类型趋于复杂，且两者主要离子含量相关性显著，印证耦合关系。

（二）环境同位素特征

以氢氧稳定同位素（ $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ ）为示踪剂，采集地下水、地表水、大气降水样品并经同位素比值质谱仪检测，分析长白山不同水体同位素特征，明确其补给来源及耦合关联，结合相关研究完善同位素示踪体系。大气降水是主要补给来源，其同位素含量夏季受海洋水汽影响而富集，冬季受大陆气团影响而贫化；浅层潜水同位素与大气降水、地表水相近，耦合密切，深层承压水同位素偏贫化且时空差异明显，受地质构造控制，与地表水间接耦合；天池水接受大气降水和深层地下水“隐式”补给，河流水从上游到下游同位素逐渐贫化，体现与深浅层地下水的耦合演化。此外，部分地下水同位素与西藏羌塘盆地泉水吻合，推测存在跨区域地下径流补给。

（三）同位素示踪耦合关系量化

基于 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素数据，结合水化学数据，采用同位素质量平衡模型（HydroCalculator 软件）、端元混合模型（以大气降水等为端元、同位素为示踪指标），量化长白山地下水与地表水耦合关系、交换比例及时空特征，弥补水动力场分析局限。研究表明，交换比例时空差异显著：时间上，丰水期地表水与浅层地下水双向补给比例较高，平水期均下降，枯水期地下水补给占比升至 50%–70%、地表水补给不足 10%；空间上，中低海拔河流沿岸地下水补给占比高，天池周边地表水补给占比高，深大断裂带双向交换强度最大。此外，同位素计算的地表水蒸发与补给比（40%）与水文模型结果吻合（相关系数 0.81），验证了方法可靠性。

三、深大断裂与地热异常对耦合关系的控制作用

（一）深部构造对地下水系统的控水机制

基于 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素数据，结合水化学数据，采用同位素质量平衡模型（HydroCalculator 软件）、端元混合模型（以大气降水等为端元、同位素为示踪指标），量化长白山地下水与地表水耦合关系、交换比例及时空特征，弥补水动力场分析局限。研究表明，交换比例时空差异显著：时间上，丰水期地表水与浅层地下水双向补给比例较高，平水期均下降，枯水期地下水补给占比升至

参考文献

50%–70%、地表水补给不足 10%；空间上，中低海拔河流沿岸地下水补给占比高，天池周边地表水补给占比高，深大断裂带双向交换强度最大。此外，同位素计算的地表水蒸发与补给比（40%）与水文模型结果吻合（相关系数 0.81），验证了方法可靠性。

（二）水热耦合特征分析

长白山天池火山是我国东部潜在高温地热资源区，地下岩浆囊提供稳定热源，2km 深处温度 66—110℃，12km 深处 313—417℃，天池及望天鹅火山喷发中心地热异常显著。其水热耦合系统特征体现在三方面，水温上，地热区地下水、地表水水温显著高于非地热区，浅层地下水 15–30℃、深层 40–70℃，聚龙泉最高超 80℃，二道白河部分河段冬季不结冰；水动力场上，高温使地下水密度减小、流速加快，形成热对流循环，与地表水形成地热驱动–水动力循环–耦合交换良性循环，模型模拟印证两者强烈耦合；水化学上，地热地下水以 HCO_3^- -Na 型为主，富含 SiO_2 、 F^- 等特征离子，地表水体受其补给，水化学类型向该类型演化。

（三）深层地下水对地表水体的“隐式”补给

长白山深层地下水（深度 >100m）主要储存于深大断裂带及火山岩深层裂隙，受地质构造与地热活动控制，以隐式补给方式间接补给地表水体，无明显直接通道，这是天池水量稳定的关键。采用水量平衡法、同位素示踪法结合监测数据分析表明，该补给具有稳定、隐蔽、长期的特点。天池周边流域多年平均排泄量大于降水量，外源水年补给 23.25 亿 m^3 ，推测补给来自远源深层地下水（可能为西藏高原河流渗漏形成的跨区域地下径流）。补给主要集中在天池周边（年补给约 0.157 亿 m^3 ，填补水量差额）、二道白河上游（占河流总补给 20%–30%）及地热异常区域（占 30%–40%），时间上无季节差异，与浅层地下水补给互补。同位素示踪验证了隐式补给的存在，其不仅补充水量，还影响地表水体水化学与水温，是该区域水耦合关系的核心特色。

四、结束语

本文以长白山地下水系统与地表水体耦合关系为核心研究内容，运用水动力监测、水化学检测、氢氧稳定同位素示踪及数值模拟等多种方法，系统探究了研究区地下水与地表水体的耦合特征、演化规律及深层控制机制。研究填补了长白山区域地下水与地表水体耦合关系系统性研究的空白，完善了火山岩区山–水–岩–热四位一体水资源系统的耦合研究理论与技术方法，为区域水资源合理开发、矿泉水资源保护、生态环境修复及用水安全保障提供了重要的科学依据与技术支撑。

[1]王贺.季节性冻融作用下长白山区地下水形成与演化研究[D].吉林:吉林大学,2023.

[2]张玉珊,崔世平,张敏.松嫩平原地下水系统循环特征[J].吉林地质,2014(3):102–104. DOI:10.3969/j.issn.1001-2427.2014.03.025.

[3]林涛,汪少勇,邓元博,等.长白山北坡冬季不同水体稳定同位素特征及其环境意义[J].环境化学,2026,45(1):93–104. DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2024061705.

[4]韩心宇.哈尔滨市地下水水源长序列均衡计算与评价[D].黑龙江:黑龙江大学,2021.

[5]王美玉,戴长雷,王羽.松花江流域地下水资源量评价区划与分析[J].水利科学与寒区工程,2021,4(3):62–67. DOI:10.3969/j.issn.2096-5419.2021.03.014.

[6]谷志琪,卞建民,马于曦,等.基于SD模型的长白山安图县矿泉水资源承载力研究[J].东北师大学报(自然科学版),2022,54(4):136–143. DOI:10.16163/j.cnki.dslkxb.202012036.

[7]代策.长白山矿泉水集中区水资源开发利用水平评价和优化配置研究[D].吉林:吉林大学,2022.

[8]江巧宁,陈建生.深循环地下水补给长白山天池的水量平衡分析[J].水资源保护,2015(5):7–13. DOI:10.3880/j.issn.10046933.2015.05.002.

[9]常泽华.耦合冻融过程的长白山江源区地下水模拟研究[D].黑龙江:黑龙江大学,2022.

[10]于成龙.长白山轨道工程对主要地下水径流的影响评价[J].中国非金属矿工业导刊,2019(2):37–40. DOI:10.3969/j.issn.1007-9386.2019.02.012.