

的自然环境特点,设计一套简单易行的补偿办法,把经济方面的钱款支持和政策上的指导结合起来,推动补偿资金真正用到需要的地方。特别关注参与生态保护和工程建设的各群体之间的沟通和协作,确定合适的补偿金额标准和监督管理的具体方式,提高补偿工作的公开程度和公平程度。合理使用现代科学技术手段来评估生态环境受到的破坏情况以及补偿措施带来的实际效果,以此来促进补偿机制不断完善,为保护生态安全和实现自然资源的长期利用打下坚实的基础。

## 5 协同发展与持续保障途径

### 5.1 绿色水电开发范式

绿色水电开发的关键在于达成水利水电工程建设与生态环境保护的和谐共存。于规划阶段,应当用生态优先为原则,整合流域整体生态功能布局,适当选点并完善工程设计,尽可能地守护生物栖息地与自然景观。于工程运行期间,借助采用生态调度技术,能高效调控水量、水质与流域生态需求之中的关系,保障河流生态系统的健全与平稳。

技术进步变成绿色水电开发关键推动力量。需要充分利用智能控制、海量数据分析还有生态模拟方法,来提高水电设施运转的精准化管理水平。还要建立完善环境监控和评价系统,能够快速了解工程运转对于生态环境带来的变化情况,给科学决定带来可靠依据。另外要大力推广生态恢复手段,比如人工湿地建造工作、鱼类迁徙通道规划方案等等,推动受到破坏的生态系统功能得到改善并且连接更加紧密。

政策引导和社会共识是绿色水电开发的重要依靠力量。创建多种参与方的利益协调机制,广泛收集政府、企业、科研单位以及相关利益群体的建议意见,建立公开透明的环境管理方式。增加公众宣传的力度,倡导环保发展观念,提高人们对水电开发带来的生态破坏责任意识。以上各种做法一起形成绿色水电开发的标准模式,为实现可持续发展提供可靠的实施基础。

### 5.2 生态安全与经济支撑机制

生态安全和经济支撑机制是让水利水电工程走向绿色化发展以及整个区域实现可持续发展的关键保障。想要保护好生态安全,必须把经济效益考虑进去,建立一个各方面都能协调发展的综合机制。要根据每个区域的生态特点来制定评估体系,提前判断和持续观察工程建设会不会破坏生态平衡,一旦发现问题就及时采取措施进行调整和处理。在经济支撑这个部分,需要利用好国家政策和科技进步,采用多种

方式提供资金帮助,比如发放财政补贴、减免相关税收、设立补偿基金等等,确保资金充足并且使用合理。

区域经济的发展必须跟生态保护目标结合在一起,创造一种全新的方式来设计一套依靠生态服务价值来进行评估的付费机制,把所有跟水利工程相关的各种利益群体都加入到生态保护资金补偿的具体安排里面。还要加大鼓励社会资本积极参与的优惠政策,吸引更多社会上的资金和资源投入到水利水电生态保护这个领域里面。从政策制定的角度来看,一定要依靠法律法规来作为根本保障,明确规定生态补偿的标准以及详细的执行细则,推动生态安全方面的各项措施变得更加规范和长期稳定。从技术研究的角度来看,需要开发出对生态环境影响小的工程设计方案和日常运行技术,这样既能有效降低对自然环境造成的损害,又能让整个工程在经济上获得更好的回报。依靠上面提到的各种机制的全面整合和完善,最终能够真正实现保护生态和发展经济之间的平衡状态,同时也让水利工程的运行具备长远并且可靠的稳定性。

## 6 结语

水利水电工程作为国家发展的重要基石,其建设对生态环境的影响不容忽视。本文通过深入分析水利水电工程对生态环境的具体影响及其作用机理,提出了构建生态补偿体系的构架,包括补偿主体界定、标准制定、机制运行与实施路径等,并探讨了协同发展与持续保障途径,如绿色水电开发范式、生态安全与经济支撑机制等。这些研究不仅丰富了水利水电工程生态环境保护的理论体系,更为实际工程操作提供了科学指导。未来,应继续加强相关研究,不断完善生态补偿机制,推动水利水电工程与生态环境的和谐共生,为实现可持续发展目标贡献力量。

### 参考文献

- [1] 任彪.水利水电工程建设对生态环境的影响[J].经济技术协作信息,2022,(01):0155-0157.
- [2] 肖辉.水利水电工程对生态环境的影响分析[J].建材与装饰,2021,17(25):167-168.
- [3] 郝梦琪.水利水电工程建设对生态环境的影响分析[J].科学大众:科技创新,2021,(10):238-238.
- [4] 李昆阳.水利水电工程建设对生态环境的影响研究[J].价值工程,2021,40(06):25-26.
- [5] 杨秀强.水利水电工程建设对生态环境的影响初探[J].现代物业:中旬刊,2023,(06):151-153.

# Chemical Characteristics and Origin Analysis of Geothermal Fluids in Chabuchar County, Xinjiang

Yubin Lei Xianzhong Jiang Shujian Chen Yalu Wang

Hydrological and Environmental Geology Survey Center, Geological Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi, Xinjiang, 830091, China

## Abstract

[Objective] To investigate the chemical characteristics and origin mechanisms of geothermal fluids in Chabuchar County, Ili River Valley, Xinjiang, and provide theoretical basis and technical support for the scientific development, cascade utilization, and sustainable protection of geothermal resources in the region. [Methods] Based on water sample test data from 3 geothermal exploration wells and 1 existing geothermal well in the study area, comprehensive methods such as total water chemistry analysis, radioactive detection, Shukarev classification, Langley-Ludwig diagrams, and geochemical temperature scale calculations were employed to systematically analyze the chemical composition, water chemistry types, recharge sources, and formation mechanisms of geothermal fluids. [Results] The water chemistry types of geothermal fluids in the study area are predominantly  $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}$  and  $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Na}$  types, with pH values ranging from 8.40 to 8.43, indicating weak alkalinity. Fluoride content ranges from 0.50 to 1.31 mg/L, silicic acid content from 26.62 to 29.12 mg/L, mineralization degree from 424 to 600 mg/L, and wellhead water temperature from 38.6 to 40.1°C, all meeting the concentration thresholds for therapeutic mineral water. Strontium (0.2–0.58 mg/L) and silicic acid content comply with the limits for natural mineral water for drinking. [Conclusion] The study area represents a basin subsidence-type medium-low temperature geothermal field (Type II-2) controlled by tectonic fractures, with heat sources derived from deep geothermal gradients (average 3.06°C/100m) and radioactive element decay. During deep circulation, geothermal fluids dissolve surrounding rock minerals through hydrothermal interactions and subsequently rise and concentrate along fracture structures. This geothermal water possesses multiple utilization values for both medical wellness and drinking.

## Keywords

chabuchar county; geothermal fluid; hydrochemical characteristics; genesis mechanism

## 新疆察布查尔县地热流体化学特征及成因分析

雷育宾 蒋显忠 陈书建 王亚璐

新疆维吾尔自治区地质局水文环境地质调查中心, 中国·新疆 乌鲁木齐 830091

## 摘要

【目的】查明新疆伊犁河谷察布查尔县地热流体化学特征与成因机制, 为该区地热资源的科学开发、梯级利用与可持续保护提供理论依据和技术支撑。【方法】基于研究区3眼地热勘探孔及1眼已有地热井的水样测试数据, 综合运用水化学全分析、放射性检测、舒卡列夫分类法、兰格利尔-路德维奇图解及地球化学温标计算等方法, 系统分析地热流体的化学组分、水化学类型、补给来源及其形成机理。【结果】研究区地热流体水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}$ 型和 $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Na}$ 型为主, pH值为8.40~8.43, 呈弱碱性; 氟含量0.50~1.31 mg/L、偏硅酸含量26.62~29.12 mg/L、矿化度424~600 mg/L、井口水温38.6~40.1°C, 均达到理疗矿水命名浓度; 锶(0.2~0.58 mg/L)和偏硅酸含量满足饮用天然矿泉水界限指标。【结论】研究区为受构造断裂控制的盆地沉压型中低温地热田(II-2型), 热源来自深部地温梯度(平均3.06°C/100m)与放射性元素衰变。地热流体在深循环过程中通过水岩作用溶解围岩矿物, 后沿断裂构造通道上升富集。该地热水兼具医疗康养与饮用开发等多重利用价值。

## 关键词

察布查尔县; 地热流体; 水化学特征; 成因机制

## 1 引言

地热资源作为一种清洁低碳、可循环利用的可再生能

源, 在供暖、医疗康养、旅游度假、农业养殖等领域具有重要战略价值[1-3]。察布查尔锡伯自治县位于新疆伊犁河谷中部, 地处伊宁凹陷中央拗陷带, 区域地质构造复杂, 断裂发育, 具备良好的地热资源成藏条件[4]。近年来, 当地虽已开展地热资源勘查并初步揭示了区域地热地质背景, 但针对地热流体化学特征及成因机制的系统研究仍显不足。

本文基于察布查尔县地热资源勘查所获取的水化学及

【作者简介】雷育宾(1982—), 女, 中国陕西富平人, 高级工程师, 从事水文地质、工程地质、环境地质、地质灾害、科技创新等方面的研究。

放射性测试数据,深入分析地热流体的化学组分特征与水化学类型演化规律,通过同位素示踪技术明确补给来源与循环路径,结合地质构造条件探讨地热流体形成机理,为区域地热资源的科学开发、梯级利用及可持续保护提供理论依据与技术支持。

## 2 研究区概况

研究区位于察布查尔锡伯自治县中部,地理坐标东经  $81^{\circ} 04' 40''$  -  $81^{\circ} 12' 34''$ , 北纬  $43^{\circ} 48' 12''$  -  $43^{\circ} 53' 36''$ , 总面积约  $70\text{km}^2$ , 涵盖察布查尔县城区、孙扎齐牛录乡、绰霍尔乡等区域。区内地形南高北低,地貌类型自南向北依次为山前冲洪积倾斜平原、伊犁河谷三级阶地、二级阶地、一级阶地及伊犁河谷,海拔高程  $500 \sim 770\text{m}$ , 地面坡降  $2\% \sim 20\%$ 。

研究区位于伊犁盆地伊宁凹陷中央坳陷带,基底为元古界-古生界变质岩及火山岩,盖层由中生界侏罗系、白垩系及新生界古近系、新近系和第四系组成。核心热储层为白垩系东沟组灰白色石英砂岩,埋深  $990 \sim 1208\text{m}$ , 厚度  $165 \sim 250\text{m}$ , 平均孔隙度  $19.2\%$ , 渗透率  $265\text{mD}$ , 属中孔中渗储层。

区域构造受北西向伊宁断裂、加格斯台断裂及东西向察1断裂、察2断裂控制,形成“两横两纵”的断裂构造格局。断裂带切割深度大、延伸远,为地热流体的深循环、富集及向上运移提供了良好通道,同时北东向次级断裂对地热流体起阻隔与导排作用,共同构成了区域地热成藏的构造条件。

研究区属大陆性北温带温和气候,多年平均气温  $7.9^{\circ}\text{C}$ , 年降水量  $231.39\text{mm}$  (集中于4-7月), 年蒸发量  $1339.5 \sim 1726.0\text{mm}$ 。区域主要河流为伊犁河,自东向西贯穿勘查区北部,多年平均径流量  $138.45 \times 10^8\text{m}^3$ , 为区域地下水补给提供了间接水源。浅层地下水水温  $11 \sim 18^{\circ}\text{C}$ , 水位埋深  $5 \sim 30\text{m}$ , 总体呈现南高北低的分布特征。

## 3 样品采集与测试方法

### 3.1 样品采集

在研究区3眼地热勘探孔及1眼已有地热井(DR1)共采集水样4组,采样点均位于白垩系东沟组热储层,井深  $1140 \sim 1250\text{m}$ , 井口水温  $38.6 \sim 40.1^{\circ}\text{C}$ 。采样严格按照《地

热流体样品的采集与保存规范》(NB/T10716—2021)执行,每组水样采集量不少于  $4000\text{mL}$ , 分别用于水化学全分析、放射性检测,采样后及时添加保护剂并密封,48小时内送样分析。

### 3.2 测试方法

水化学全分析:采用离子色谱法测定阴离子( $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 等),原子吸收分光光度法测定阳离子( $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等),离子选择电极法测定 $\text{F}^-$ ,钼蓝比色法测定 $\text{H}_2\text{SiO}_3$ ,检测精度符合《水质采样、样品的保存和管理技术规定》(HJ493-2009)要求。

放射性检测:总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 放射性检测依据《地下水水质检验方法》(DZ/T0064-1993)。

## 4 地热流体化学特征

### 4.1 基本化学组分特征

研究区地热流体主要化学组分测试结果见表1。由表可知,地热流体pH值介于  $8.40 \sim 8.43$  之间,总体呈弱碱性,无色无味,透明度良好。

阳离子中以 $\text{Na}^+$ 为主,含量  $136.4 \sim 190.95\text{mg/L}$ , 占阳离子总量的80%以上; $\text{Ca}^{2+}$ 含量  $4 \sim 21.1\text{mg/L}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ 含量  $0.85 \sim 4.9\text{mg/L}$ ,  $\text{K}^+$ 含量  $1.67 \sim 2.3\text{mg/L}$ , 阳离子总量  $142.97 \sim 219.3\text{mg/L}$ 。

阴离子以 $\text{HCO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 为主, $\text{HCO}_3^-$ 含量  $156.38 \sim 270.51\text{mg/L}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ 含量  $113.50 \sim 225.97\text{mg/L}$ ,  $\text{Cl}^-$ 含量  $37.44 \sim 60.08\text{mg/L}$ ,  $\text{F}^-$ 含量  $0.50 \sim 1.31\text{mg/L}$ , 阴离子总量  $363.9 \sim 556.6\text{mg/L}$ 。

特征组分中, $\text{H}_2\text{SiO}_3$ 含量  $26.62 \sim 29.12\text{mg/L}$ ,  $\text{H}_2\text{BO}_3$ 含量  $0.76 \sim 2.1\text{mg/L}$ , 总溶解固体(TDS)  $424 \sim 600\text{mg/L}$ , 总硬度(以 $\text{CaCO}_3$ 计)  $25 \sim 85\text{mg/L}$ , 属软水范畴。

### 4.2 水化学类型

采用舒卡列夫分类法,依据含量大于25%毫克当量的阴、阳离子组合划分水化学类型。结果显示,研究区地热流体水化学类型主要为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}$ 型(DR1、勘探1号孔、勘探3号孔)和 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3\text{-Na}$ 型(勘探2号孔),呈现明显的“钠质水”特征,反映了地热流体在深循环过程中与围岩发生强烈水岩相互作用,钠长石等硅酸盐矿物溶解导致 $\text{Na}^+$ 富集。

表1 研究区地热流体水化学基本特征一览表

样品编号	$\text{K}^+$ (mg/L)	$\text{Na}^+$ (mg/L)	$\text{Ca}^{2+}$ (mg/L)	$\text{Mg}^{2+}$ (mg/L)	$\text{Cl}^-$ (mg/L)	$\text{F}^-$ (mg/L)	$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/L)	$\text{HCO}_3^-$ (mg/L)	TDS (mg/L)	pH 值	$\text{H}_2\text{SiO}_3$ (mg/L)	$\text{H}_2\text{BO}_3$ (mg/L)	水化学类型
DR1	2.3	136.4	8.0	4.9	42.5	0.8	155.3	183.1	443.2	8.57	24.2	1.2	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}$
勘探1号孔	1.67	190.95	7.12	0.85	45.13	1.31	119.88	270.51	598	8.43	29.12	2.1	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}$
勘探2号孔	1.95	184.15	20.1	3.04	37.44	0.5	225.97	185.4	600	8.43	28.18	1.5	$\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3\text{-Na}$
勘探3号孔	1.76	139.61	12.84	1.71	60.08	0.6	113.50	156.38	424	8.40	26.62	0.76	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}$