

库尔勒干旱区水文地质特征与地下水开发利用探讨

罗珏坪*, 胡亚召#

四川省地质工程勘察院集团有限公司, 四川 成都

收稿日期: 2025年3月14日; 录用日期: 2025年5月8日; 发布日期: 2025年5月19日

摘要

基于水文地质勘查成果, 文章对新疆库尔勒干旱区地下水类型、富水性特征、水化学类型、补径排特征及地下水动态等水文地质条件进行了系统分析, 研究结果表明: 地下水类型主要为松散岩类孔隙水、基岩裂隙水和碳酸盐岩溶隙水; 地下水主要接受大气降雨、冰雪融水及山前侧向径流的补给, 顺地势由北东向南西径流, 于西尼尔水库或人工开采方式排出地表; 地下水水化学类型主要以 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 型为主, 其次为 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\text{-Na}$ 型, 通过地下水数值模拟分析, 地下水位整体处于下降趋势。文章从地下水开发、地表水-地下水联合调度、地下水保护及地下水监测等方面探讨了地下水资源可持续开发利用。研究成果可支撑研究区工程建设, 对合理开发利用与保护地下水资源具有重要的意义, 通过科学的水资源管理和生态保护措施, 实现经济与生态的协调发展。

关键词

库尔勒, 干旱区, 水文地质条件, 开发利用

Discussion on Hydrogeological Characteristics and Groundwater Development and Utilization in Korla Arid Area

Jueping Luo*, Yazhao Hu#

Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation Group Co. Ltd., Chengdu Sichuan

Received: Mar. 14th, 2025; accepted: May 8th, 2025; published: May 19th, 2025

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 罗珏坪, 胡亚召. 库尔勒干旱区水文地质特征与地下水开发利用探讨[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(5): 667-677.
DOI: 10.12677/ag.2025.155065

Abstract

Based on the results of hydrogeological exploration, this paper systematically analyzes the hydrogeological conditions such as groundwater types, water abundance characteristics, hydrochemical types, recharge and discharge characteristics and groundwater dynamics in Korla arid area, Xinjiang. The results show that the groundwater types are mainly loose rock pore water, bedrock fissure water and carbonate karst fissure water; The groundwater is mainly recharged by atmospheric rainfall, ice melt water and lateral runoff in front of the mountain. It flows from northeast to southwest along the terrain and is discharged to the surface in the Xinier Reservoir or by manual mining; The hydrochemical type of groundwater is mainly $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Na}$ type, followed by $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\cdot\text{Na}$ type. Through groundwater numerical simulation analysis, the groundwater level is in a downward trend as a whole. This paper discusses the sustainable development and utilization of groundwater resources from the aspects of groundwater development, surface water groundwater joint operation, groundwater protection and groundwater monitoring. The research results can support the engineering construction in the study area and have important significance for the rational development, utilization and protection of groundwater resources. Through scientific water resources management and ecological protection measures, the coordinated development of economy and ecology can be achieved.

Keywords

Korla, Arid Area, Hydrogeologic Condition, Development and Utilization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水资源是基础自然资源和战略性经济资源,是生态环境的控制性因素之一,同时又是国家综合国力重要组成部分。展望未来,水资源正日益影响全球的环境与发展[1]-[3]。我国水资源问题十分严重,随着我国经济社会的迅速发展,水资源匮乏和水污染等问题已经成为我国实施水资源可持续发展的制约因素[4]。西北干旱区作为我国水资源问题最严重的地区之一,人均水资源占有量少[5]。高蒸发排泄和低降水补给,使得西北干旱区生态系统甚为脆弱[6]。地下水资源在干旱区被视为“稀缺资源”,是绿洲的命脉[7]。

地下水资源的稳定供给对于国家安全和战略稳定具有重要意义。在干旱或半干旱区,地下水往往是唯一可靠的水源,对于保障当地居民的生活用水和工农业生产具有至关重要的作用。区域水文地质条件的认识不全面、不系统是阻碍水文地质研究的直接原因,因此加强对研究区的水文地质研究,探明富水性特征,对当地政府制定水资源配置与开发规划具有指导意义,也能为矿产资源勘查开发规划提供水文地质依据[8]。袁伟等[9]对新疆五彩湾某项目园区水文地质条件进行了分析,研究了地下水类型、富水性及补径排特征。苗琳[10]分析了内蒙古自治区额济纳旗七一山萤石矿水文地质特征,进一步研究了矿区地下水对矿床开采的影响。

研究区位于库尔勒市和尉犁县交界,库尔勒经济技术开发区东南侧,地处库鲁克塔格山西端山前倾斜平原上,地貌类型为山前冲洪积平原、风化剥蚀残丘及构造剥蚀低山。西部地形平坦宽阔,东部切割深度较大,地势总体呈东高西低,北高南低的趋势。属暖温带大陆性荒漠气候,冷热差异悬殊,年最低

气温-28℃，最高气温 40℃，平均气温 11.7℃，年平均降水量 58 mm，年平均蒸发量为 2726 mm。

本文通过新疆库尔勒干旱区水文地质特征研究，查明研究区地下水类型、富水性及补径排特征，为合理开发利用与保护地下水资源提供重要的支撑，通过科学的水资源管理和生态保护措施，实现经济与生态的协调发展。

2. 研究区地质背景

2.1. 地层岩性

研究区地层岩性主要有：第四系松散堆积层，包括全新统 - 上更新统洪积层(Q_{3-4}^{pl})，湖积层(Q_3^l)；震旦系特瑞艾肯群照壁山组(Zz)；爱尔基斯群北辛格尔塔格组(P_{tb})，辛格尔塔格组(P_{txn})，南辛格尔塔格组(P_{tn})，另外还分布深灰色片麻状花岗岩(r_2^c)。详见图 1 及表 1。

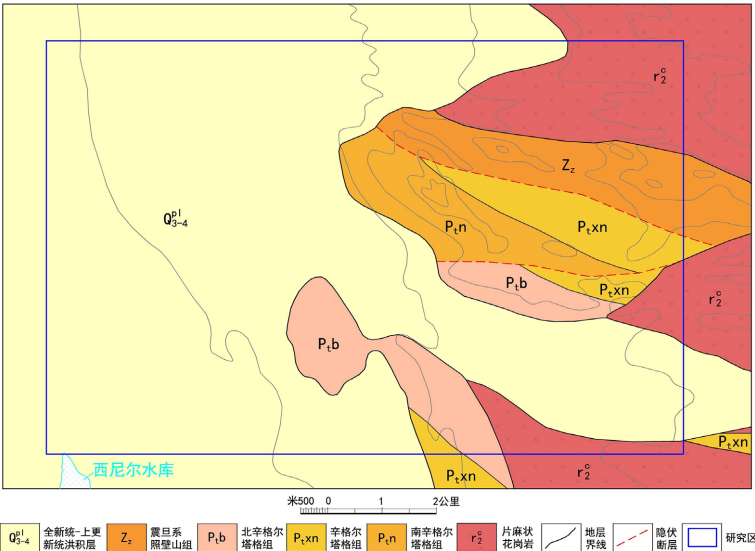


Figure 1. Geological map of the study area
图 1. 研究区地质图

Table 1. Stratum summary of the study area
表 1. 研究区地层简表

界	系	统	地层名称	地层代号	厚度(m)	岩性描述
新生代 元古界	第四系	全新统 - 上更新统	洪积	Q_{3-4}^{pl}	68~136	砾石、中砂、砾砂、粉质粘土。
	震旦系	特瑞艾肯群	照壁山组	Zz	230	深灰色、深绿色似冰碛岩、片岩。
			北辛格尔塔格组	P_{tb}	220	灰色结晶灰岩、淡灰色砂质灰岩、白云岩，及砂岩等。
			辛格尔塔格组	P_{txn}	645	上部深绿色石英缘泥石绢云母片岩、淡绿色泥岩、灰色钙质砂岩；下部淡灰色片理化绢云母粉砂岩及少量变质砂岩。
		爱尔基斯群	南辛格尔塔格组	P_{tn}	1075	灰绿色片岩、深灰色细砂岩、灰色细砾岩。

通过研究区环评水文地质勘查中物探测试及钻探验证, 地层垂向结构由上至下分别为角砾、粉质粘土、中砂、砾砂、细砂、粉质粘土、灰岩等(表 2、图 2)。

Table 2. Geophysical interpretation of rock resistivity
表 2. 物探解译岩性电阻率

岩性	厚度(m)	电阻率($\Omega\cdot m$)
角砾	2	220~680
粉质粘土	2.82~28	2.5~10
中砂	5.2~42	50~65
砾砂	10~65.7	100~250
细砂	4.8~93.6	15~27
粉质粘土	10~34.4	6~10
灰岩	>50	1000~1600

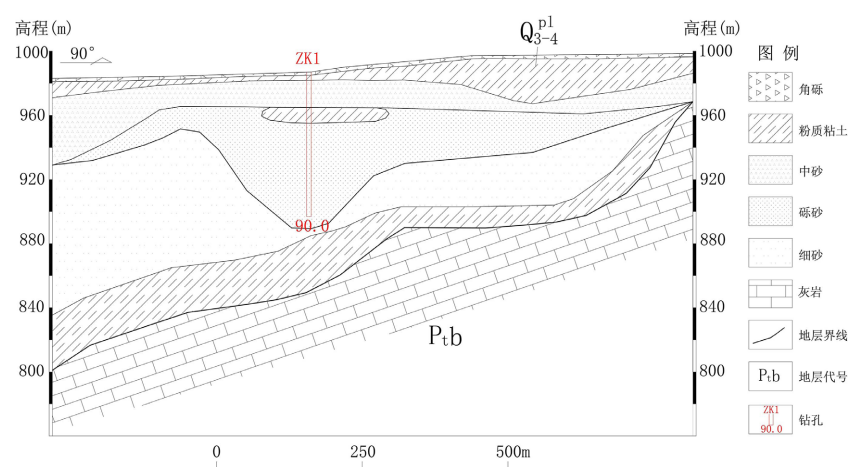


Figure 2. Geological profile map interpreted by geophysical exploration
图 2. 物探解译地质剖面图

2.2. 地质构造

区域上分为塔里木地台和南天山地向斜褶皱带两个构造单元, 它们以辛格尔深大断裂分开。断裂以北称南天山地向斜褶皱带, 断裂以南为塔里木地台。辛格尔深大断裂属岩石圈断裂, 是库尔勒深大断裂东端两条分支的北支, 与其南支一道分别于库鲁克塔格-星星峡断隆的北南两侧向东延伸, 为高角度逆断层, 倾向南, 倾角 70°~75°, 始于元古代末, 至今仍在活动。该断裂南盘为元古界灰绿色片岩和石英岩, 北盘为中生界碎屑岩; 破碎带宽超 40 m, 可见砖红色、杂色断层角砾岩、断层泥, 南侧岩石破碎, 北侧岩层被拖引褶曲。新构造运动具有长期性、持续性和继承性的特点, 尤其是在晚近期的新构造运动更显著频繁, 使构造形迹受破坏而复杂化。研究区处于塔里木地台构造单元, 周边构造形迹基本上呈北西西向展布, 以短轴褶皱及高角近东西向逆断层为主, 主要的断裂构造有博东逆冲断层和依格孜塔格逆冲断层(图 3), 均属于晚更新世活动断裂。其中, 博东逆冲断层走向北东东, 倾向南西, 倾角 80°左右; 依格孜塔格逆冲断层, 走向北西西, 倾向南东, 倾角 40°~47°。

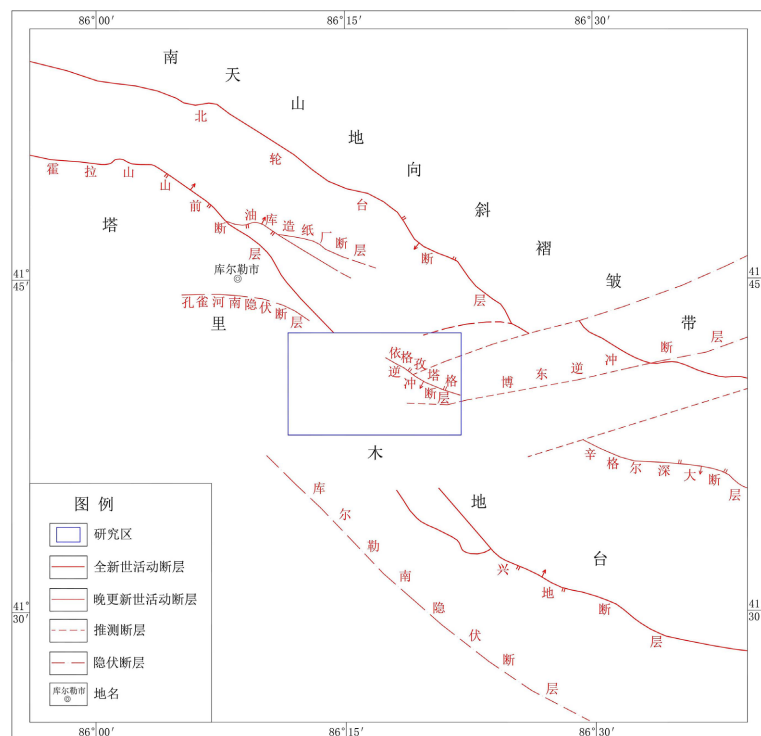


Figure 3. Geological structure map of the research area
图 3. 研究区地质构造图

3. 研究区水文地质条件

3.1. 地下水类型及富水性

研究区处于塔里木地台构造单元,水文地质条件遵循内陆干旱盆地的一般规律:从山前向盆地中心,地下水类型由单层结构的潜水过渡到多层结构的潜水-承压水,含水层结构由单层结构变为双层、多层结构。受地形地貌、地层岩性、补给径流条件影响,潜水埋深由山前 50~100 m 向盆地中心逐渐变浅,在浅埋带或水库、河流等低洼地带溢出地表。研究区位于库鲁克塔格山山前倾斜平原上,粉质粘土以透镜体形式存在,无稳定隔水顶板,均具有潜水埋藏特征。

根据地下水的赋存介质条件及水动力特征,地下水类型主要为松散岩类孔隙水、基岩裂隙水和碳酸盐岩溶隙水(图 4)。

1) 松散岩类孔隙水

主要分布在库鲁克塔格山山前倾斜平原上,由上更新统-全新统洪积层组成,地下水主要赋存于砾砂、中砂内孔隙中,其上部无稳定相对隔水层存在,包气带为粉砂、粉质粘土及中砂等,地下水具潜水性,属松散岩类孔隙水类型。

该类型地下水结构松散,渗透性较强,渗透系数 1~10 m/d,富水性中等,单井涌水量为 500~1000 m³/d,局部达到 2000 m³/d。根据钻孔揭露,含水层厚度在几米至几十米不等,为单一潜水含水层,水位埋深从北东山前向南西盆地方向逐渐变浅,抽水试验实测渗透系数为 1.58 m/d,单井涌水量为 537 m³/d。

2) 基岩裂隙水

主要分布在研究区东侧库鲁克塔格低中山区,主要地层为元古界震旦系特瑞艾肯群照壁山组(Zz)冰碛岩,爱尔基斯群辛格尔塔格组(P_{ixn})粉砂岩、砂岩,南辛格尔塔格组(P_n)细砂岩、细砾岩,以及片麻状

花岗岩(r_2^c)。构造作用及风化作用强烈, 构造裂隙和风化裂隙发育, 为地下水提供了储存空间和径流通道, 属基岩裂隙水类型。

研究区基岩裂隙水的富水性随岩性有一定差别, 层状岩类含水层富水性高于块状岩类。泉流量小于 0.5 L/s, 单井涌水量一般小于 100 m³/d。抽水试验实测渗透系数为 0.21 m/d, 单井涌水量为 96 m³/d。

3) 碳酸盐岩溶隙水

主要分布在研究区南侧构造侵蚀低山区, 赋存于元古界爱尔基斯群北辛格尔塔格组(P₁b)灰岩、白云岩地层。钻孔揭露浅部岩溶发育, 有 0.5~1.0 m 的溶洞, 未充填或局部充填粉质粘土, 钻进过程出现掉钻现象, 且漏水严重, 整体上地层透水性强, 为地下水赋存运移提供了有利的空间, 属碳酸盐岩溶隙水类型。根据区域水文地质资料, 该类型地下水水位埋深大, 单井涌水量小于 100 m³/d。

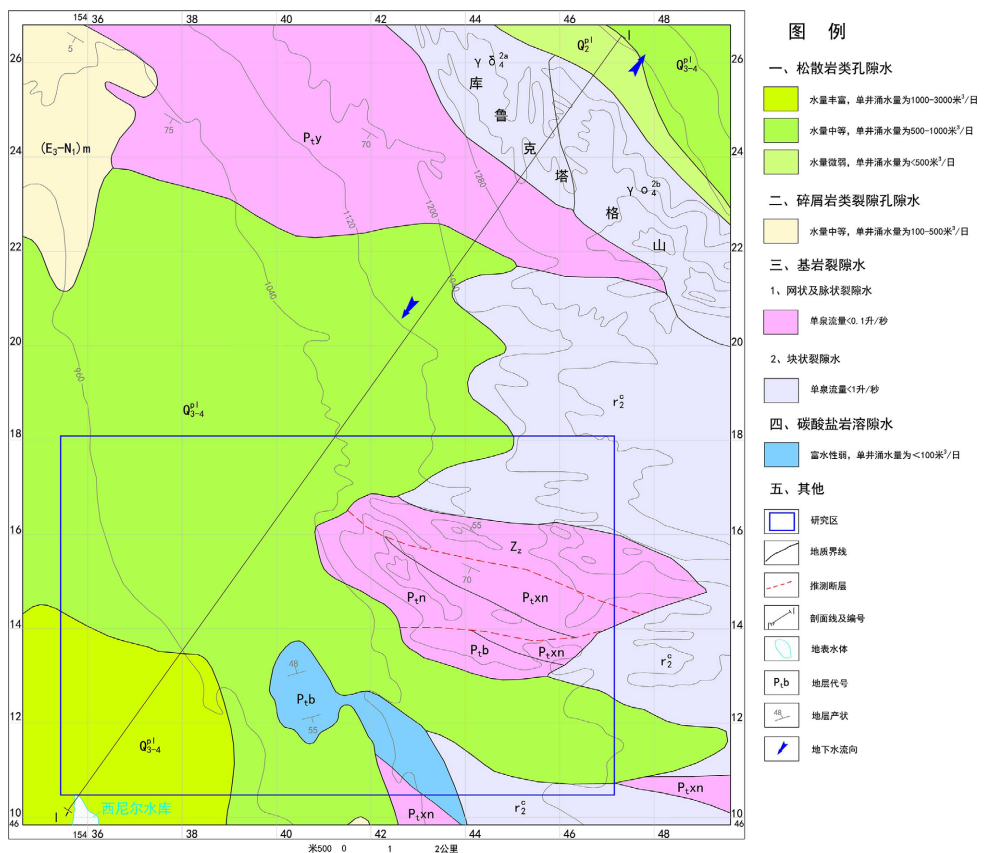


Figure 4. Hydrogeological map of the study area
图 4. 研究区水文地质图

3.2. 地下水补径排特征

地下水储存与分布主要受地形地貌、地层岩性、地质构造及气象条件的影响。气象条件、地貌和包气带岩性是影响地下水补给的重要条件, 地质构造和含水岩组结构及岩性是地下水储集的内在条件, 地貌和含水层岩性条件是影响地下水径流、排泄强弱的重要因素。研究区地下水主要接受大气降雨、冰雪融水及山前侧向径流的补给, 由北东向南西径流(图 5), 主要的排泄方式为侧向径流排泄及人工开采。

1) 地下水补给

研究区上游无常年地表水流, 地下水补给来源主要是大气降雨、冰雪融水和山前侧向径流等。

① 大气降雨

研究区降雨量较小, 年均仅 58 mm, 但降雨期较为集中, 一般山区降雨量相对较大, 大到暴雨易形成地表洪流, 部分通过孔隙、裂隙渗入地下, 其余沿地形向下游径流, 直接补给与其接触的山前倾斜平原区地下水。

② 冰雪融水

研究区冬季降雪量小, 主要分布在库鲁克塔格山, 集中在 12 月份至次年 2 月份, 通过冰雪融水不断补给地下水。

③ 侧向径流补给

主要位于库鲁克塔格山南侧山前, 山区地下水接受补给后, 沿地形地势向南西方向径流, 补给研究区地下水。

2) 地下水径流

研究区地下水类型以松散岩类孔隙水、基岩裂隙水和碳酸盐岩溶隙水为主, 地下水径流条件好, 水力联系密切, 上部无稳定隔水顶板存在, 具有统一的自由水面。总体地势北东高、南西低, 地下水顺地势由北东向南西径流, 水力坡度从山前向平原由陡变缓, 山前附近地下水水力坡度约 23‰, 平原区水力坡度约 5‰。

3) 地下水排泄

虽然研究区蒸发强烈, 但地下水位埋深基本大于极限蒸发深度, 地下水排泄方式主要为侧向径流排泄及人工开采。

① 侧向径流排泄

研究区西南侧的西尼尔水库是该区最低侵蚀基准面, 地下水接受补给后, 顺地势向下游运移, 于西尼尔水库排泄出地表。

② 人工开采

研究区周边有 20 余口地下水开采井, 用于工业、农业或生活用水, 日开采量达到上万方, 是地下水一个主要的排泄途径。

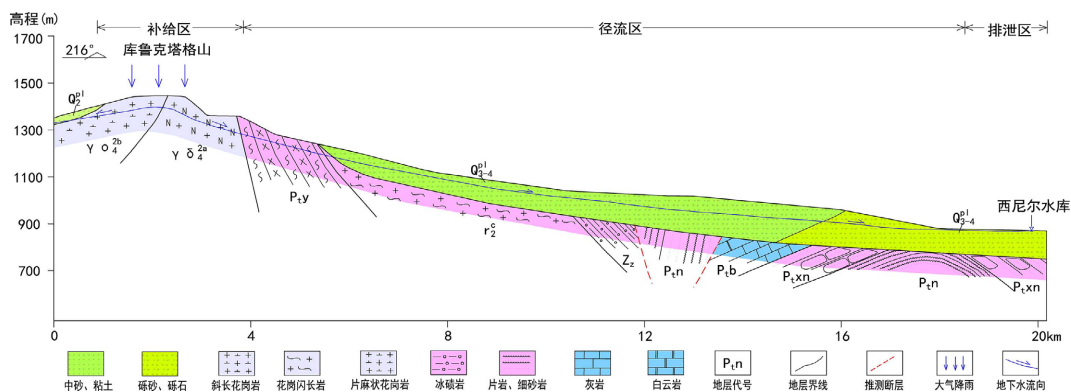


Figure 5. Schematic diagram of groundwater recharge and discharge in the study area
图 5. 研究区地下水补径排示意图

3.3. 地下水化学特征

本文采集 2 组地表水和 21 组地下水样品送至新疆维吾尔自治区分析测试研究院检测分析, 阳离子主要使用 ICP、光度法等方法进行分析检测, 阴离子主要使用离子色谱法、容量法等进行分析检测, 阴阳离

子检测结果平衡误差均 $\leq \pm 3\%$ 。

地下水的水化学特征受研究的地质状况、地形地貌、水文气象情况、含水层岩性等因素影响。通过地下水数理统计分析(表 3), pH 值 7.37~8.42, 平均 7.89, 属中性 - 弱碱性, 总硬度 113~1200 mg/L, 矿化度变化较大 492~3740 mg/L, 平均值 2111.29 mg/L, 标准差 5560.65 mg/L, 变异系数 263.38%。其中 COD 和游离 CO₂ 变异系数最大, 达到 556.62%~583.58%, 说明研究区空间变异性强, 局部受人为因素影响。

从水化学类型分析, 研究区地表水水化学类型为 SO₄·HCO₃·Cl-Na·Mg 型, 地下水水化学类型主要以 Cl·SO₄-Na 型为主, 其次为 SO₄·Cl-Na 型, 还分布有 Cl·HCO₃-Na 型、HCO₃·Cl-Na·Mg·Ca 型、Cl·SO₄·HCO₃-Na·Mg·Ca 型、SO₄·Cl-Na·Mg 型等(图 6)。

Table 3. Statistical table of chemical characteristics of groundwater

表 3. 地下水化学特征统计表

项目	最大值(mg/L)	最小值(mg/L)	均值(mg/L)	标准差(mg/L)	变异系数(%)
pH 值	8.42	7.37	7.89	1.31	16.58
K ⁺	29	5	12.29	29.52	240.15
Na ⁺	1045	92	575.17	1622.09	282.02
Ca ²⁺	221	17.3	126.72	336.86	265.84
Mg ²⁺	158	16.9	54.96	157.88	287.27
Cl ⁻	1240	84	652.42	2097.99	321.57
SO ₄ ²⁻	1140	63	630.04	1704.88	270.60
HCO ₃ ⁻	393	130	205.21	313.96	153.00
游离 CO ₂	13.4	0	3.17	17.66	556.62
COD _{mn}	12.4	0.8	2.38	13.87	583.58
氨氮	2.94	0.42	1.25	2.80	224.27
总硬度	1200	113	546.63	1375.17	251.57
总碱度	323	110	178.63	252.43	141.32
矿化度	3740	492	2111.29	5560.65	263.38

按照《地下水质量标准》评价, 地下水中 Cl⁻、SO₄²⁻、溶解性总固体、总硬度普遍超过Ⅲ类水标准。分析认为研究区降雨量小、蒸发强烈, 加之地下水径流缓慢, 导致地下水中多数离子含量增加或超标, 个别地下水中氨氮超标主要与人类经济活动有关。

3.4. 地下水控制及演化

Gibbs 图可以定性判断大气降水、岩石溶滤和蒸发浓缩对地下水化学组分的影响程度, 可以用来识别地下水的控制因素及演化过程[11]-[14]。本研究中地下水中 Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺)和 Cl⁻/(Cl⁻+ HCO₃⁻)的离子比率分别介于 0.60~0.86 和 0.42~0.86 之间(图 7)。多数水样点分布在蒸发结晶作用区, 表明研究区地下水水质主要受蒸发结晶作用的影响; 水样点远离大气降水作用区, 表明大气降水对研究区内地下水化学指标来源贡献很小。由于研究区内降水少, 日照时间长, 蒸发浓缩作用较强, 这是致使地下水中盐分不断积累的重要原因[15]。

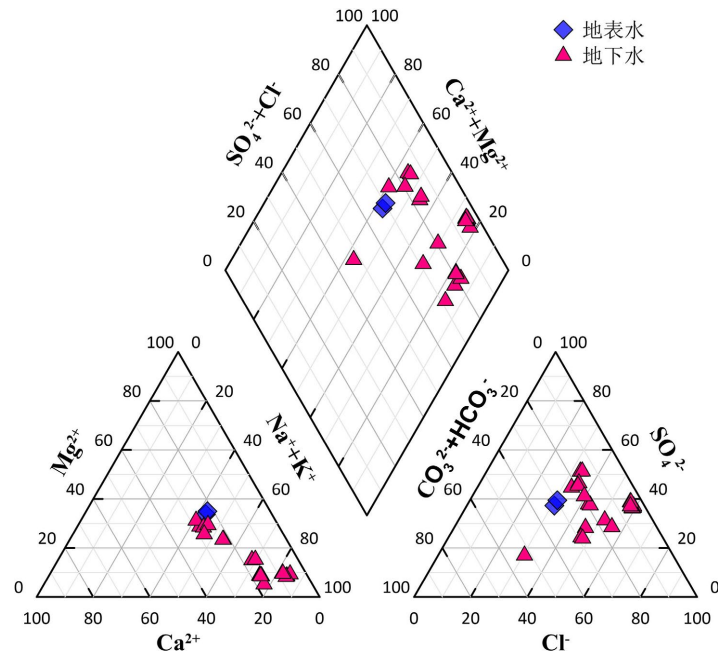


Figure 6. Piper diagram of chemical types of surface water and groundwater in the study area

图 6. 研究区地表水及地下水化学类型 piper 图

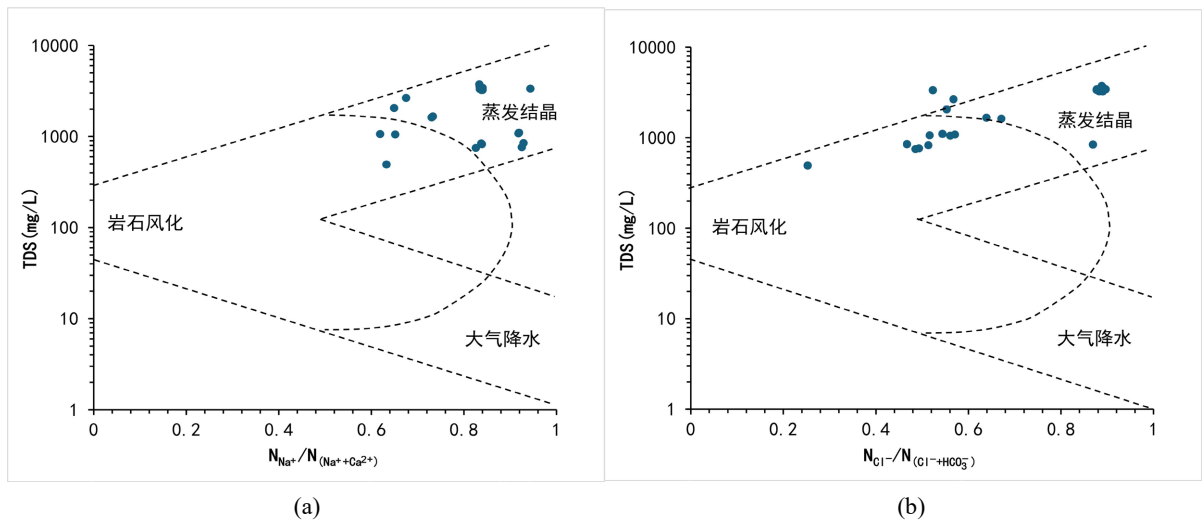


Figure 7. Gibbs diagram of groundwater in the study area

图 7. 研究区地下水 Gibbs 图

3.5. 地下水动态

地下水水位基本与补给时间有关, 表现为每年的 4 月水位下降到最低, 由于大气降雨和冰雪融水补给, 5 月开始上升, 至 7~8 月达最高, 而后逐渐下降, 这与山区降水补给基本一致。研究区属于渗入-蒸发型, 降水、融雪或地表水入渗引起水位抬升, 水质淡化, 随着水位升高蒸发加强, 水位又趋下降, 水质趋向盐化。通过 Visual Modflow 地下水数值模拟结果来看, 预测地下水水位整体处于下降趋势, 10 年后地下水水位最大降幅约 4 m 左右(图 8), 可为地下水管理及预测未来水位变化趋势提供依据。

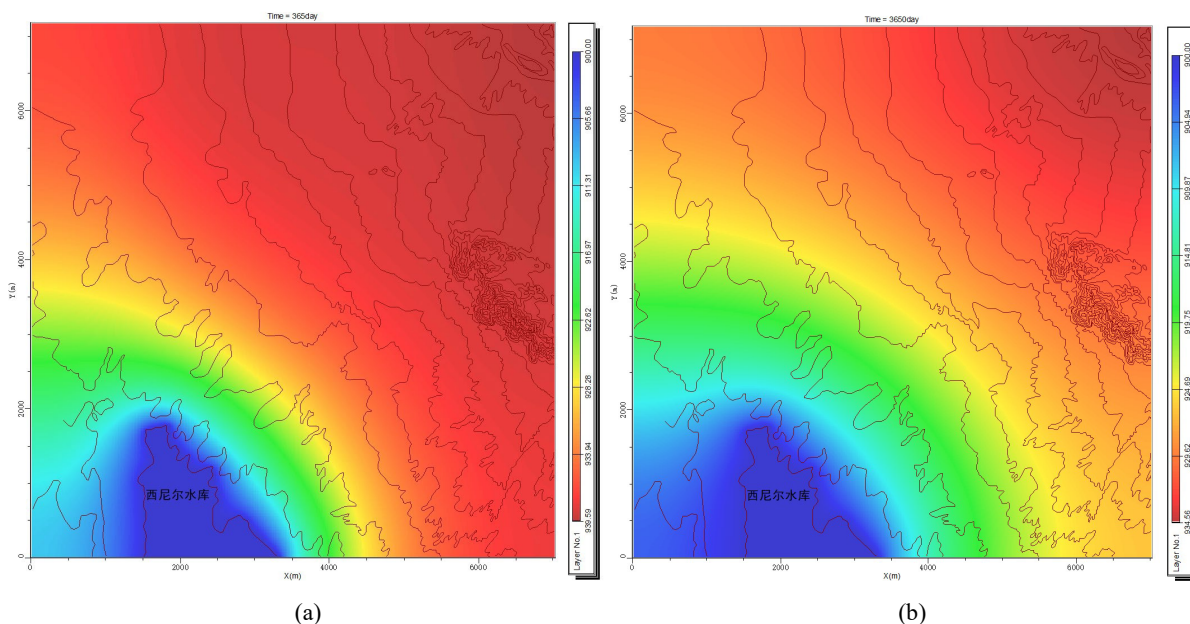


Figure 8. Isocontour map of simulated prediction of groundwater level in the study area after 1 and 10 years

图 8. 研究区模拟预测 1 年和 10 年后地下水位等值线图

4. 地下水开发利用探讨

干旱区地下水作为支撑生态安全和社会经济发展的战略性资源，其开发利用与保护需要秉持科学规划与可持续发展的原则。通过多维度协同管理，实现地下水资源开发与生态保护的动态平衡，为干旱区地下水可持续发展提供支撑。

1) 针对地下水过度开发可能导致植被破坏、土壤侵蚀和盐碱化等问题，应建立以生态承载力为核心的动态监测体系，严格划定开采红线并实施取水许可制度。

2) 地下水开发利用方面需推广节水灌溉技术、循环水利用系统及雨水收集设施，合理规划水资源的使用，减少对地下水的依赖，缓解地下水开采压力，确保不对生态环境造成不可逆的损害。

3) 利用库尔勒季节性洪水资源建设人工回灌工程，或结合水文地质条件开展人工回灌补给，通过地表水 - 地下水联合调度增强含水层恢复能力。

4) 地下水保护方面应建立生态补偿机制，对重要地下水溢出区或水源地实施封育保护，严格管控农业面源污染和工业废水排放，建立地下水污染风险分区，并逐步修复已受污染的地下水资源，保障地下水水质安全。

5) 通过地下水立体化监测网络，建立地下水位、水质、温度智慧化管理平台，融合遥感监测、数值模拟等技术，实现地下水资源量 - 质 - 生态的多维管控，确保干旱区水资源的合理开发与永续利用。

5. 结论

研究区位于库尔勒市和尉犁县交界，库尔勒经济技术开发区东南侧，地处库鲁克塔格山西端山前倾斜平原上，地貌类型为山前倾斜平原、风化剥蚀残丘及构造剥蚀低山。通过研究区水文地质勘查工作，对新疆库尔勒干旱区地下水类型、富水性特征、水化学类型、补径排条件及地下水动态等水文地质特征进行了系统分析，地下水类型主要为松散岩类孔隙水、基岩裂隙水和碳酸盐岩溶隙水，其中松散岩类孔隙水渗透系数 $1\sim 10\text{ m/d}$ ，富水性中等，单井涌水量为 $500\sim 1000\text{ m}^3/\text{d}$ ，局部达到 $2000\text{ m}^3/\text{d}$ ，基岩裂隙水泉流量小于 0.5 L/s ，单井涌水量一般小于 $100\text{ m}^3/\text{d}$ ，碳酸盐岩溶隙水地下水水位埋深大，单井涌水量小

于 $100 \text{ m}^3/\text{d}$ 。地下水主要接受大气降雨、冰雪融水及山前侧向径流的补给, 顺地势由东北向南西径流, 于西尼尔水库或人工开采方式排出地表; 地下水水化学类型主要以 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 型为主, 其次为 $\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$ 型。地下水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、溶解性总固体、总硬度普遍超过 III 类水标准, 分析认为研究区降雨量小、蒸发强烈, 加之地下水径流缓慢, 导致地下水中多数离子含量增加或超标。

研究区属于渗入-蒸发型, 降水、融雪或地表水入渗引起水位抬升, 水质淡化, 随着水位升高蒸发加强, 水位又趋下降, 水质趋向盐化。通过地下水数值模拟分析, 预测地下水位整体处于下降趋势。本文研究成果可支撑研究区工程建设, 为合理开发利用与保护地下水资源提供决策依据, 通过科学的水资源管理和生态保护措施, 实现经济与生态的协调发展, 保障干旱区地下水可持续开发利用。

参考文献

- [1] World Water Council (2000) World Water Vision 2025. Earthscan Publications Ltd.
- [2] 张利平, 夏军, 胡志芳. 中国水资源状况与水资源安全问题分析[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2): 116-120.
- [3] 杨松. 新疆孔雀河灌区地下水流场数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- [4] 廖文根, 李锦秀, 彭静. 我国水资源保护规划中若干量化问题的探讨[J]. 水力发电, 2002(5): 8-10.
- [5] 陈亚宁, 杨青, 罗毅, 等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 1-9.
- [6] 陈亚宁. 新疆塔里木河流域生态保护与可持续管理[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [7] 樊自立, 马映军. 干旱区水资源开发及合理利用的几个问题[J]. 干旱区研究, 2000, 17(3): 6-11.
- [8] 王芸. 吐鲁番市高昌区南部山区及山前洪积平原区水文地质条件[J]. 地下水, 2024, 46(5): 63-65.
- [9] 袁伟, 胡亚召, 王成锋. 新疆五彩湾某项目园区水文地质条件分析[J]. 地下水, 2014(1): 167-169.
- [10] 苗琳. 内蒙古自治区额济纳旗七一山萤石矿水文地质特征[J]. 甘肃科技, 2024, 40(8): 49-52.
- [11] 赵纳言, 周金龙, 姜凤, 等. 新疆提孜那甫河流域平原区地下水化学特征及其影响因素[J/OL]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024: 1-14. <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20250102.1023.002>
- [12] Gibbs, R.J. (1970) Mechanisms Controlling World Water Chemistry. *Science*, **170**, 1088-1090. <https://doi.org/10.1126/science.170.3962.1088>
- [13] 韩双宝, 周殷竹, 郑焰, 等. 银川平原地下水化学成因机制与组分来源解析[J]. 环境科学, 2024, 45(8): 4577-4588.
- [14] 李晓坚, 苏贺, 唐珏. 汾河流域地下水化学演化特征、控制因素及健康风险评估[J]. 人民黄河, 2025, 47(3): 97-103.
- [15] 李祥, 李全, 杨晓晨, 等. 新疆库拜地区地下水化学特征及其来源识别[J]. 地下水, 2025, 47(1): 22-25.