



引文格式: 王斌, 张俊, 龙睿, 等. 40 年来新疆阿克苏河流域地下水水流场演化及成因模式[J]. 西北地质, 2024, 57(4): 252-261. DOI: 10.12401/j.nwg.2024019

Citation: WANG Bin, ZHANG Jun, LONG Rui, et al. Evolution and Genetic Pattern of Groundwater Flow Field in the Aksu River Basin of Xinjiang Over the Past 40 Years[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(4): 252-261. DOI: 10.12401/j.nwg.2024019

40 年来新疆阿克苏河流域地下水水流场演化及成因模式

王斌¹, 张俊^{2,3,*}, 龙睿^{2,3}, 余堃^{2,3}, 姜军^{2,3}, 杨炳超^{2,3}, 卢玉东^{1,4}

(1. 长安大学水利与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710119; 3. 中国地质调查局干旱半干旱区地下水与生态重点实验室, 陕西 西安 710119; 4. 长安大学, 旱区地下水水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 西北干旱内陆河流域经历了水土资源的大规模开发, 对区域地下水和生态环境产生重要影响, 但地下水长期演化机制认识尚不够清晰。本研究以新疆阿克苏河流域为典型区, 通过最新地下水位数据和历史数据对比, 分析流域地下水水流场和埋深时空变化历史过程、特征及成因模式, 探讨该区地下水长期演化与土地利用变化之间的关系, 揭示人类活动影响下的地下水演化机制。结果表明: 1979 年以来, 随着耕地面积增加, 区域地下水水流场经历了近天然状态到人类活动强烈影响的历史过程, 潜水位和承压水头均有不同程度下降, 局部地区承压水流向以及与潜水的补排关系发生改变。承压水主要依靠侧向径流补给, 但人工开采强度远远大于侧向补给量, 导致承压水头明显下降。以研究区中部英艾日克乡-喀拉塔勒镇一线为界, 北部地区潜水位和承压水水头降幅均大于南部地区, 原因在于土地利用变化造成地下水补排条件发生改变, 北部地区潜水水质较好, 被大量开采用于农业灌溉, 而南部因地下水水质较差, 以引用地表水灌溉为主, 地下水开采强度较低, 因此南部地下水下降不如北部地区明显。研究成果可为新疆阿克苏河流域及类似地区地下水的可持续开发利用与生态保护提供科学依据。

关键词: 阿克苏河流域; 地下水水流场演化; 土地利用变化; 地下水位

中图分类号: P641.6

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)04-0252-10

Evolution and Genetic Pattern of Groundwater Flow Field in the Aksu River Basin of Xinjiang Over the Past 40 Years

WANG Bin¹, ZHANG Jun^{2,3,*}, LONG Rui^{2,3}, YU Kun^{2,3}, JIANG Jun^{2,3}, YANG Bingchao^{2,3}, LU Yudong^{1,4}

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 3. Key Laboratory for Groundwater and Ecology in Arid and Semi-arid Areas, China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 4. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

收稿日期: 2023-09-27; 修回日期: 2023-12-14; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 第三次新疆综合科学考察项目(2022xjkk0300)、中国地质调查局项目(DD20190351、DD20221751)、国家自然科学基金项目(42302301)及陕西省自然科学基金基础研究计划(2022JQ-238)联合资助。

作者简介: 王斌(1998-), 男, 硕士, 主要从事水文地质研究。E-mail: 1506072957@qq.com。

* 通讯作者: 张俊(1982-), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事西北地区水文地质研究。E-mail: 36170038@qq.com。

Abstract: The arid inland river basin in the northwest has undergone large-scale exploitation of soil and water resources, which has had a significant impact on regional groundwater and ecological environment. However, the long-term evolution mechanism of groundwater remains unclear. This study takes the Aksu River Basin in Xinjiang as a typical area. By comparing the latest groundwater monitoring data with historical data, the historical process, characteristics, and genetic pattern of the spatiotemporal changes in groundwater flow field and burial depth in the basin are analyzed. The relationship between the long-term evolution of groundwater in the area and land use changes is explored, and the mechanism of groundwater evolution under the influence of human activities is revealed. The results indicate that since 1979, with the increase of farmland area, the regional groundwater flow field has experienced a historical process from a nearly natural state to a strong impact of human activities. Groundwater have decreased to varying degrees, and the direction of groundwater flow in local areas and the replenishment and discharge relationship with the groundwater have changed. Groundwater mainly relies on lateral runoff supply, but the intensity of manual mining is much greater than that of lateral supply, resulting in a significant decrease in groundwater table. Taking the line from Yingairike Township to Karatale Township in the central part of the research area as the boundary, the decrease in the groundwater table in the northern region was greater than that in the southern region, because land use change causes the change of groundwater recharge and discharge conditions. The groundwater quality in the northern region is good, and it is exploited in large quantities for agricultural irrigation, while in the southern region, surface water is mainly used for irrigation due to poor groundwater quality. The intensity of groundwater extraction is low, so the decline of groundwater in the south is not as obvious as that in the north. The research results can provide scientific basis for sustainable exploitation and ecological protection of groundwater in Aksu river basin and similar areas in Xinjiang.

Keywords: Aksu river basin; evolution of groundwater flow field; land use change; groundwater table

西北干旱内陆河流域水资源短缺, 制约了该地区社会经济可持续发展(陈亚宁, 2023), 区内降雨稀少, 蒸发强烈, 地表水资源无法满足用水需求, 地下水资源成为维系生活、生态、工业、农业的重要水源(Williams 1999; Rockstrom et al, 2009; Wang et al, 2021; 党学亚等, 2022; 胡顺等, 2022; 李文明等, 2022)。随着区域现代化进程加快和农业发展规模扩大, 土地利用变化显著改变了区域水文过程(罗先香等, 2003; 张俊等, 2021; 王璐晨等, 2023; 龙睿等, 2023), 尤其是水资源的大规模开发利用不仅改变了地下水时空分布特征(徐梦瑶等, 2012; 罗杰等, 2020; 刘伟朋等, 2021; 束龙仓等, 2022; 冯嘉兴等, 2023), 同时局部地下水位大幅下降, 引发植被退化和荒漠化加剧等诸多生态环境问题(陈亚宁等, 2004; 满苏尔·沙比提等, 2011; 郭宏伟等, 2017; 王浩等, 2020)。在西北地区, 针对地下水流场的演化机制已有大量研究, 如乌苏市地下水位变化主要受地下水开采量和地表水引水量影响(高宇阳等, 2019), 鄯善县地下水开采是地下水位变化的主导因素(陈泽等, 2023), 黑河流域中游地下水位变化主要由人为因素控制(王贞岩, 2019)。然而, 由于缺乏历

史时期地下水监测数据等因素, 限制了长时间尺度地下水位变化的根本驱动力研究。因此, 厘清长时间尺度地下水流场演化与土地利用变化间的响应关系, 可为今后区域水土资源协调发展提供因地制宜的科学基础。

新疆阿克苏河流域, 是典型的干旱内陆河流域。以20世纪90年代为界, 阿克苏河流域土地变化从前期的准平衡状态转变为后期的不平衡状态(周德成等, 2010), 尤其是耕地面积开始大幅度增加(满苏尔·沙比提等, 2011; 王涛等, 2017; 王志成等, 2018), 灌溉用水需求不断增大。引水渠与水库等水利工程的修建, 截留了上游来水量用于灌溉, 使得中下游河水入渗补给量减少(沈永平等, 2008; 周德成等, 2010)。同时, 由于中下游地区地表水不足以满足灌溉用水需求, 90年代后期地下水大量开采(张旭等, 2020; Huang et al, 2022), 造成流域内绿洲区地下水位的下降。因此, 40年来阿克苏河流域地下水流场经历了20世纪90年代前的近天然状态到90年代后的人类活动强烈影响的历史过程, 可作为地下水演化特征及成因分析的理想区域。

笔者选取阿克苏河流域平原土地利用变化较大

的绿洲区进行重点剖析,基于最新地下水统测数据和地下水监测数据,并与20世纪80年代近天然状态的地下水位历史数据对比,分析流域地下水流场和埋深时空变化历史过程、特征及成因模式,探讨人类活动影响下的地下水演化机制,为地下水的可持续开发利用与生态保护提供科学依据。

1 研究区概况

阿克苏河流域位于新疆中部、天山山脉中段南麓,为典型的干旱内陆河流域,地理位置处于E 79°55'~80°45'、N 40°36'~41°29'(图1)。研究区海拔高度为

1 040~1 180 m,北部多山区,地势呈NW向SE倾斜,地形平坦开阔,地处欧亚大陆腹地,四季分明,夏季干旱炎热,冬季寒冷,多年平均气温约为10℃,昼夜温差大;降水稀少,多年平均降水量为75 mm;蒸发强烈,年蒸发量为1 200~1 500 mm,属典型的暖温带干旱气候。阿克苏河是塔里木盆地北缘典型的大河之一,上游有托什干河和库玛拉克河两大支流,均起源于天山西南部,在阿克苏市西北部交汇形成阿克苏河。阿克苏河为冰川融雪水和降水混合补给型河流(Sun et al, 2016; 余斌等, 2021; 普拉提·苏力坦, 2023),年平均输入塔里木河干流水量为33.66亿m³,占塔里木河干流总水量的70%以上(满苏尔·沙比提等, 2011; 阿曼妮



图1 研究区示意图(a)及监测点分布图(b)

Fig. 1 Schematic diagram of the study area and monitoring sites distribution

萨·库尔班等, 2022)。阿克苏河流经途中被各级水利枢纽引入到各级渠系和农田, 通过沿途渗漏及农业灌溉等方式补给地下水。

流域内地形地貌主要为中低山区和堆积平原区, 地下水类型以松散层孔隙水为主, 含水层类型为第四系 $Qp_3 \sim Q_n$ 冲洪积松散堆积层潜水和承压水含水层, 岩性以砂砾石、中粗砂、细砂为主(图 2)。研究区自北向南由冲洪积倾斜平原区过度到冲积细土平原区, 岩性由粗变细, 由砂砾石转变为中粗砂、粉细砂和粉

土。在冲洪积倾斜平原内, 含水层为单一结构的第四系潜水, 单井涌水量大于 $5\,000\text{ m}^3/\text{d}$, 富水性强, 地下水循环条件好。到冲积细土平原地层发生变化, 在阿克苏市-佳木镇-五团以南一带, 含水层变为潜水、承压水双层多层结构, 上部孔隙潜水富水性强-贫乏等, 单井涌水量由 $1\,000 \sim 5\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 逐渐减少为 $10 \sim 100\text{ m}^3/\text{d}$, 下部承压水单井涌水量自北西南东, 由 $1\,000 \sim 5\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 逐渐减少为 $100 \sim 1\,000\text{ m}^3/\text{d}$, 地下水循环条件逐渐变差, 更新能力变弱, TDS 变高, 水质变差。

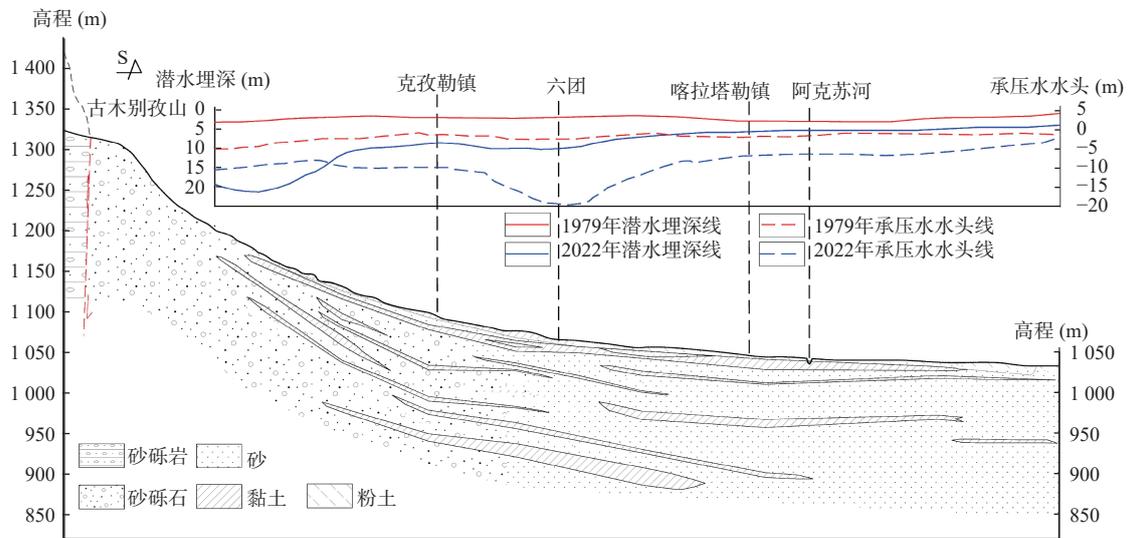


图2 研究区 A - A'水文地质剖面图

Fig. 2 A - A' South-north hydrogeological profile of Research area

自 20 世纪 90 年代起, 随着土地开发生产活动逐渐加强, 原先以地表水为主, 地下水为辅的农田灌溉用水结构已无法满足需要, 为了缓解用水矛盾, 区内开始大量开发利用地下水资源, 据统计, 1980~2018 年耕地面积增加 $2\,006.28\text{ km}^2$, 年增长率 1.26%, 其中 1980~1990 年耕地总面积基本不变, 1990~2018 年耕地面积增加 $2\,307.71\text{ km}^2$, 增大将近 1 倍。随之地下水开采量从 1998 年的 $0.23 \times 10^8\text{ m}^3$ 增加到 2017 年的 $2.97 \times 10^8\text{ m}^3$, 增大超过 10 倍。

2 数据来源与处理方法

本研究所选地下水历史数据来源于 1979 年中国人民解放军 00 九二五部队完成的《阿克苏地区 1:20 万区域水文地质普查报告》(潘一心, 1979) 及 5 幅 1:20 万综合水文地质图。潜水位信息主要提取自该报告和综合水文地质图中埋深分区以及民井、试坑和洛阳铲孔等水点埋深实测数据, 承压水头信息提取

自水文地质钻孔水位实测数据, 共包括潜水位 61 组和承压水点 38 组。同时, 根据 DEM 高程数据, 将各水点水位埋深数据换算成水位高程数据。现状水位数据, 采用中国地质调查局西安地质调查中心于 2022 年实测的 224 组地下水统测数据和国家地下水监测工程监测点 23 组, 包括潜水位 140 组、承压水点 107 组, 采用相同的 DEM 高程数据将水位埋深数据换算成水位高程数据, 以保证高程基准的一致性。

为研究分析研究区地下水水流场演化特征, 选择阿克苏河流域平原土地利用变化较大的绿洲区, 且历史和现状两期地下水点可同时覆盖的地区作为重点分析区。在重点分析区内, 根据 1979 年和 2022 年两期水位数据, 在 Arcgis 采用克里金插值法, 分别生成两期潜水和承压水水位(头)及埋深栅格数据, 并绘制相应水位等值线和埋深分区图。采用 Arcgis 栅格计算功能将两期地下水位栅格数据进行差值运算, 并生成 1979~2022 年潜水水位和承压水水头变幅图。1979 年地下水开采量少, 水位基本接近天然状态, 2022 年

水位数据选择开采量较少的高水位期,以减少年内水位变化对历史累计变幅的影响。

1980年和2018年土地利用类型来源于中国科学院地理科学与资源研究所发布的中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)。该数据是以美国陆地卫星 Landsat 遥感影像作为主要信息源,通过人工目视解译构建的中国国家尺度多时期土地利用/土地覆盖专题数据库。

3 研究结果

3.1 地下水场空间分布特征

3.1.1 1979年地下水场及埋深特征

由图3a中可看出,区内潜水水位高程1040~1170 m,由北到南逐渐降低。水力坡度由北到南逐渐变缓,约为0.57‰~1.12‰。地下水流向整体由北向南,与河流方向基本一致。区内潜水平埋深较浅,埋深1~3 m区间面积较大,占比超过70%。红旗坡农场-拜什吐格曼乡潜水平埋深3~10 m,英艾日克乡-巴格托拉克乡以南潜水平埋深小于1 m。

区内承压水头高程1030~1180 m之间,由北到

南逐渐降低。水力坡度由北到南逐渐变缓,约为0.42‰~1.44‰。承压水流向由北向南,与潜水流向基本一致。托普鲁克乡-古勒阿瓦提乡以南、英艾日克乡-喀拉塔勒镇以北承压水头比潜水位高,承压水越流补给潜水。喀拉塔勒镇以南承压水头与潜水位基本相同。

3.1.2 2022年地下水场及埋深特征

由图3b中看出,区内潜水水位高程1040~1180 m,地下水位空间分布及水力坡度与1979年基本相同。从潜水平埋深分区来看,埋深3~10 m区间面积较大,占比超过60%。红旗坡农场-拜什吐格曼乡潜水平埋深由1979年的3~10 m变为2022年的大于10 m,埋深变大;艾西曼湖潜水平埋深由1979年的小于1 m变为2022年的1~3 m,埋深变大。

区内承压水头高程1030~1180 m,由北到南逐渐降低。水力坡度由北到南逐渐变缓,约为0.41~1.54‰。承压水整体流向为SN向、EW向,与潜水流向不同。研究区内总体承压水头低于潜水位,潜水补给承压水。其中在古勒阿瓦提乡以南-喀拉塔勒镇东一带,承压水头由1979年1050~1080 m变为2022年的1020~1050 m,承压水流向由1979年的南北向

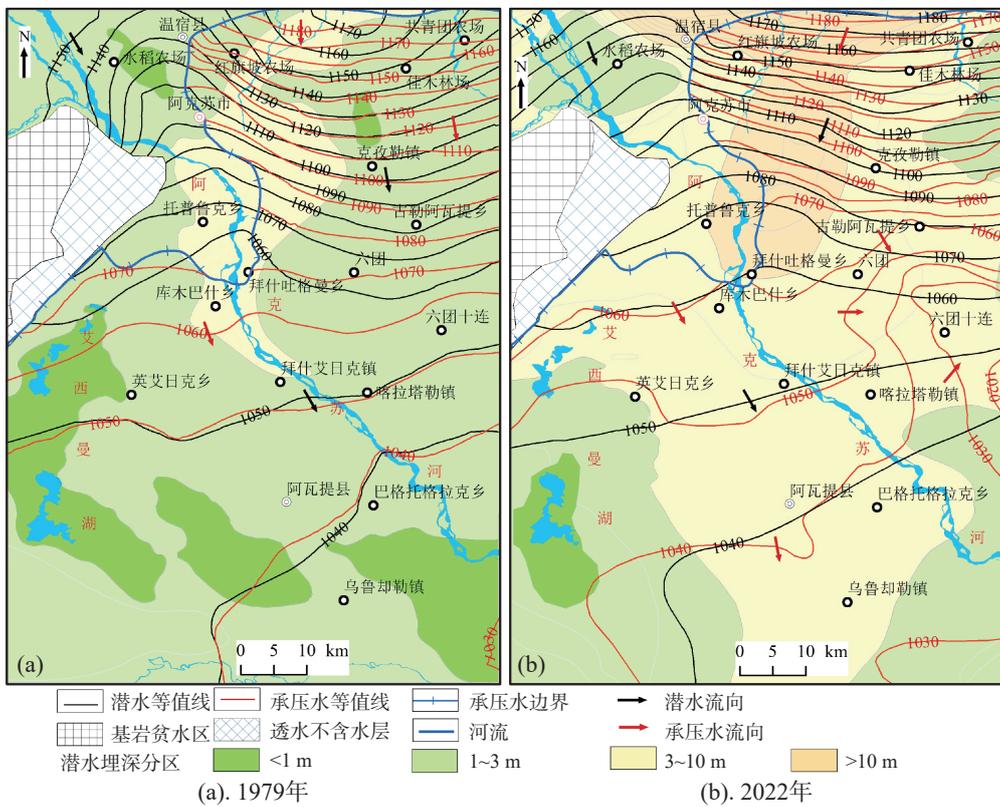


图3 1979~2022年地下水等值线及潜水平埋深图

Fig. 3 Groundwater level contour and diving burial depth from 1979 to 2022

变为2022年的EW向。承压水头在托普鲁克乡-古勒阿瓦提乡以南、英艾日克乡-喀拉塔勒镇以北相比2022年下降,且低于潜水水位,由1979年的承压水越流补给潜水变为2022年的潜水补给承压水。

3.2 1979~2022年地下水水流场演化

根据1979~2022年潜水水位变幅图(图4),潜水水位整体以下降为主,潜水埋深降幅1~3m的面积占比较大,超过40%,主要集中在1979年潜水埋深为1~3m的地段。潜水平降幅由北向南呈逐渐减小趋势,红旗坡农场以北,潜水平降幅明显,最大降幅达到38.18m;降幅超过10m的面积为259.31km²;降幅3~10m的面积为1382.96km²;降幅小于1m的面积为1477.95km²;此外艾西曼湖及阿克苏河下游潜水水位上升,增幅面积为265.13km²。

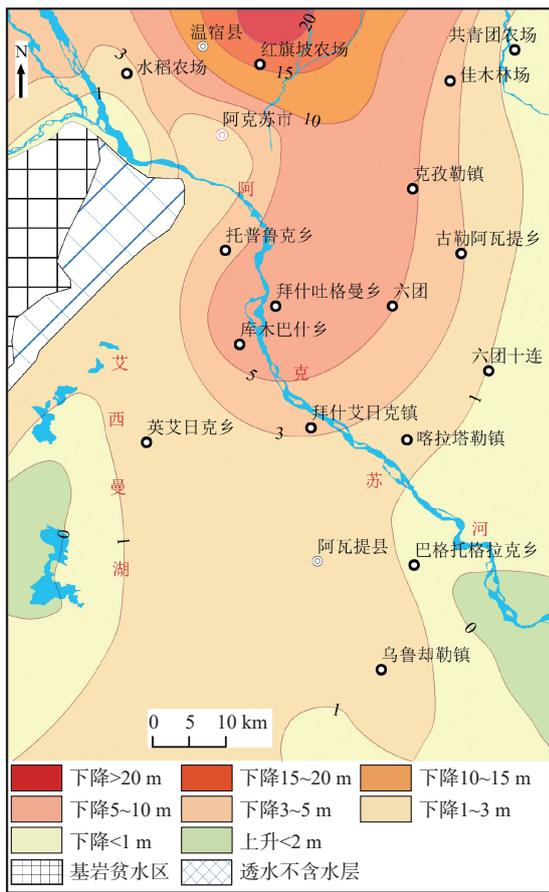


图4 1979~2022年潜水水位变幅图

Fig. 4 Variation of diving water level from 1979 to 2022

根据1979~2022年承压水水头变幅图(图5),承压水水头整体下降,以研究区中部英艾日克乡-喀拉塔勒镇为界,以北地区降幅大于3m,最大超过20m,以南地区降幅小于3m,且由北向南逐渐减小。其中在

六团十连一带降幅明显,最大降幅达到27.2m;降幅超过20m的面积为269.40km²;降幅10~20m的面积为490.40km²;降幅3~10m的面积为1456.23km²;降幅小于3m的面积为2513.62km²。

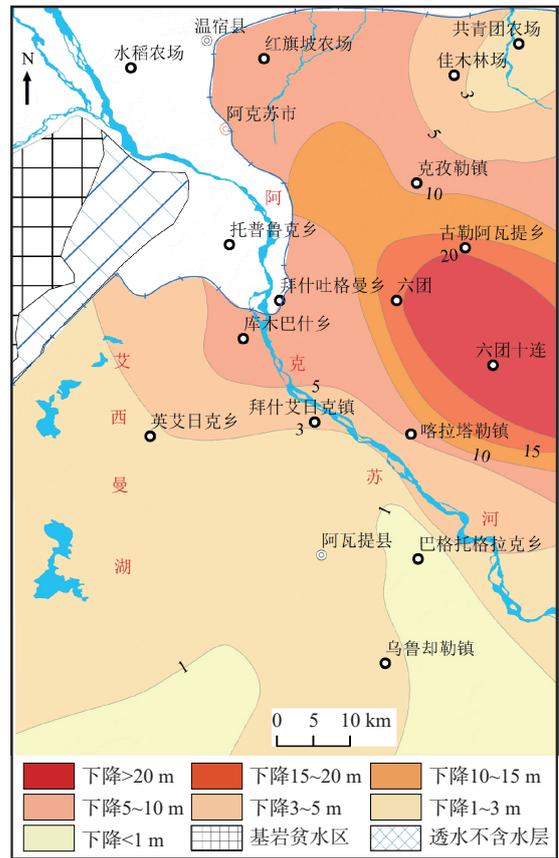


图5 1979~2022年承压水水头变幅图

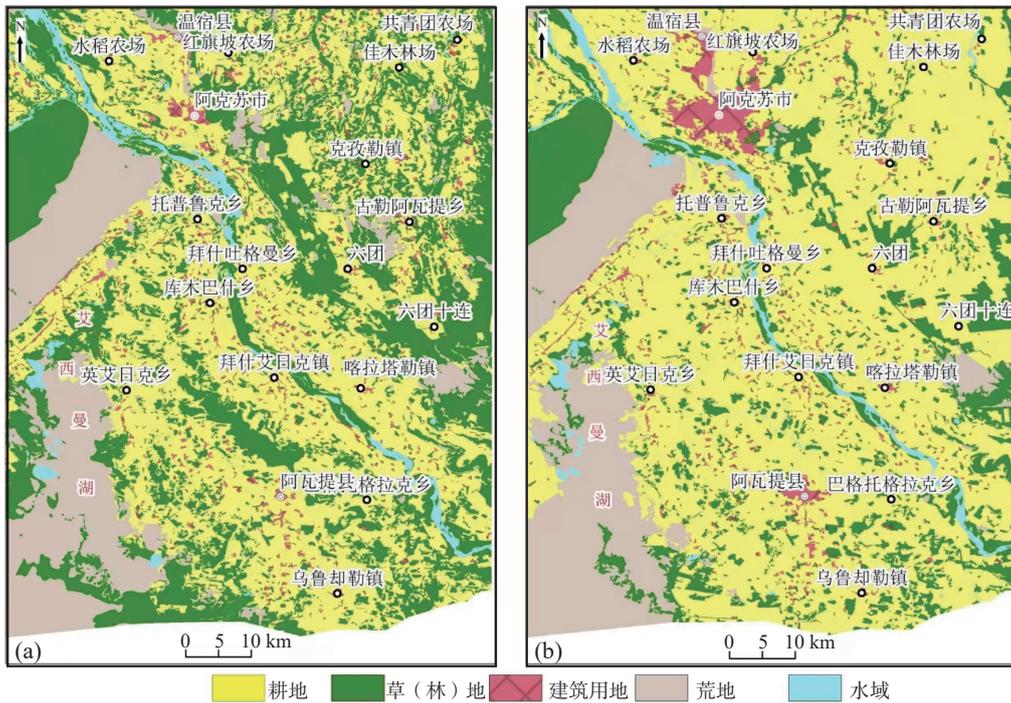
Fig. 5 Variation of confined water head from 1979 to 2022

地下水开采量的增加是地下水位下降的主要原因。据统计地下水开采量由1983年92万m³/a增加到2018年2.97亿m³/a,累计开采量约101亿m³/a。根据上述水位变幅计算,1979~2022年潜水累计储存量减少65.89亿m³/a,承压水累计储存量减少16.10亿m³/a,地下水总储存量累计减少81.99亿m³/a(根据《阿克苏地区1:20万区域水文地质普查报告》(潘一心,1979),给水度取0.0095,弹性释水系数取0.0021),占累计开采量的81%。

4 讨论

4.1 土地利用变化与地下水水流场演化关系

对比1980年(图6a)及2018年(图6b)遥感解译结果,耕地面积由1980年的2408.34km²增加到2018



a. 1980年土地利用类型图; b. 2018年土地利用类型图

图6 1980~2018年阿克苏河流域研究区土地利用类型图

Fig. 6 The distribution of land use in the Aksu River Basin from 1980 to 2018

年的 3 340.76 km², 增加面积为 932.42 km², 增幅为 38.72%; 草(林)地面积由 1980 年的 1 806.56 km² 减少到 2018 年的 859.37 km², 减少面积为 947.18 km², 降幅 52.43%。从不同土地利用类型面积变化可知, 1979~2022 年期间, 研究区草(林)地大量转化为耕地。

耕地面积增加对地下水位变化有重要影响。随着耕地面积增加, 研究区潜水和承压水均有不同程度下降。以研究区中部英艾日克乡-喀拉塔勒镇一线为界, 北部地区潜水水位和承压水水头降幅均大于南部地区。

北部地区由于耕地面积大幅增加, 灌溉用水需求相应大幅增大, 因此地下水被大量开采用于农业灌溉, 引起地下水位明显下降。尤其是承压水主要靠侧向径流补给, 补给条件较差, 承压水头下降更为明显, 并形成局部下降漏斗, 流向发生反转。

由于南部地下水水质较差, 农业灌溉以引用地表水灌溉为主, 地下水开采强度相对较低, 因此地下水下降不如北部地区明显。在艾西曼湖一带潜水位也出现下降, 但该区以荒地为主, 无耕地面积变化, 潜水位下降与农业灌溉无关, 主要是由于喀什噶尔河断流, 地表水补给量少, 引起潜水位下降, 并造成湖泊面积和草(林)地面积缩小(图6)。

4.2 地下水流场变化成因模式分析

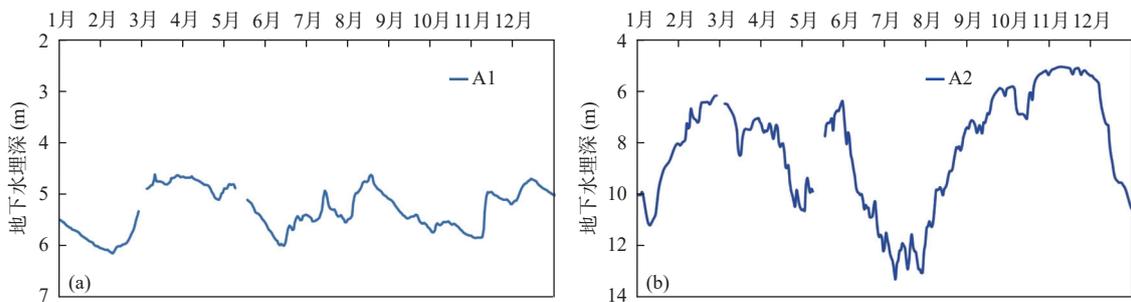
研究区属于干旱内陆盆地平原区, 降水稀少, 地下水主要靠地表水补给。土地利用变化通过改变用水结构和地表水空间分布格局, 使得地下水补排条件发生剧烈变化, 从而引起地下水流场演化和地下水动态类型的改变。由于潜水和承压水在补给排泄条件、水质以及地下水开发利用方式等方面的差别, 土地利用变化对潜水和承压水水位的影响也不尽相同。

研究区潜水补给项主要为河流、渠系和田间灌溉入渗补给 3 项, 排泄项主要为蒸发蒸腾、河道和人为开采排泄 3 项。从补给项变化看, 研究区 1979~2022 年耕地面积明显增大, 大量农业引水灌溉, 使得渠系和田间灌溉入渗补给大量增加而河流入渗补给减少。从排泄项变化看, 研究区潜水位埋深由 1979 年的 1~3 m 为主, 变为 2022 年的 3~10 m 为主, 地下水位下降, 潜水蒸发蒸腾排泄大幅减少, 同时研究区北部潜水水质好富水性强, 潜水人工开采用于灌溉, 研究区南部地下水水质较差, 开采较少, 主要以地表水灌溉为主。但因潜水位较浅造成土地盐渍化, 通过沟渠排水排盐人工调控降低潜水位(梁籍等, 2003)。根据研究区南部潜水位动态监测孔 A1(位置见图 1), 2 月

中旬春灌期、6~9月夏季农作物灌溉期和11月初冬灌期,渠系和田间灌溉入渗补给量大量增加,造成地下水水位上升,地下水动态类型表现为灌溉型,年内变幅1.52 m,地下水水位稳定在5 m左右(图7a),潜水蒸发蒸腾作用减弱,土壤表层积盐减轻,盐渍化土地改良。因此,绿洲区潜水水位下降并未引起明显生态问题,仅在艾希曼湖一带出现草(林)地退化。

承压水补给项主要为侧向径流和潜水越流补给两项,排泄项主要为侧向径流和人为开采排泄两项。从补给项变化看,该地区北部柯克亚河和台兰河的两条河流渗漏补给潜水,然后潜水通过侧向径流补给承压水,由于含水层渗透性差,侧向径流补给能力差、承压水更新能力弱。受大量引水灌溉影响,地表水被截流或直接引走,导致潜水渗漏补给减少,继而引起承

压水侧向径流补给减少。从排泄项变化看,随着耕地面积增大,地下水开采量增加,引起承压水排泄项的变化,排泄方式由侧向径流排泄转变为人工排泄为主。人类活动开采强度远远大于侧向径流补给,导致承压水头明显下降,尤其是研究区北部阿克苏河东侧六团十连一带承压水水头下降最明显。根据研究区北部承压水动态监测孔A2(图7b),6~8月为开采地下水灌溉的高峰期,承压水头处于低水位期,7月开采量最大导致水头降到全年最低点;9月随着灌溉期结束,开采量减少,水位迅速回升,地下水人为开采导致水位大幅度下降,地下水动态类型表现为开采型,年内变幅达8.28 m。研究区南部承压水水质较差,人工开采排泄较北部少,补排条件变化不大,水头降幅也较北部小。



a. 潜水埋深变化曲线; b. 承压水埋深变化曲线

图7 典型监测孔2022年年内地下水埋深变化曲线

Fig. 7 Annual variation of groundwater depth variation in typical monitoring holes in 2022

综上所述,研究区地下水水位变化的根本驱动力是土地利用变化,土地利用变化引起的地下水补排条件变化是地下水水位变化的直接原因。潜水水位下降,使得盐渍化土地改良是土地利用变化的正面效应;承压水因补给条件差表现为过度开采,引起区域地下水下降并形成地下水漏斗,是土地利用变化的负面效应。

5 结论

(1)40年来,受人类活动影响,阿克苏河流域地下水动力场发生改变,形成地下水水位下降区。潜水降幅由北向南呈逐渐减小趋势,红旗坡农场以北,降幅明显,最大降幅达到38.18 m;承压水降幅以研究区中部英艾日克乡-喀拉塔勒镇为界,以北地区降幅大于3 m,最大超过20 m,以南地区降幅小于3 m,且由北向南逐渐减小。

(2)土地利用变化是地下水水位变化的根本驱动力,随着耕地面积的快速扩张,潜水和承压水均有不同程度下降。

以研究区中部英艾日克乡-喀拉塔勒镇一线为界,北部地区潜水水位和承压水水头降幅均大于南部地区。北部地区由于耕地面积大幅增加,灌溉用水需求相应大幅增大,因此地下水被大量开采用于农业灌溉,引起地下水明显下降。南部地下水水质较差,农业灌溉以引用地表水灌溉为主,地下水开采强度相对较低,因此地下水下降不如北部地区明显。

(3)土地利用变化通过改变用水结构和地表水空间分布格局,使得地下水补排条件发生剧烈变化,从而引起地下水场演化和地下水动态类型的改变。潜水的渠系和田间灌溉入渗补给量增加,但河流入渗补给减少,同时人工开采增加,造成潜水位下降。承压水侧向径流补给减少,同时地下水开采量增加,造成承压水头明显下降。人工绿洲范围内地下水水位下

降,一方面对土壤盐渍化减轻有正面影响,但如果未来地下水位持续下降,将影响地下水资源的可持续利用。同时,地下水位下降可能引起人工绿洲外围区沙漠化、植被退化等问题。今后研究需加强人工绿洲与外围区地下水位动态的监测与预测工作,进一步深化土地利用变化条件下流域水平衡及其生态效应的定量研究。

参考文献(References):

- 阿曼妮萨·库尔班, 满苏尔·沙比提, 艾克旦·依萨克, 等. 近 19 年新疆阿克苏河流域耕地利用时空演变特征[J]. 中国水土保持科学, 2022, 20(3): 72-80.
- KUERBAN Amannisa, SHABITI Mansuer, YISAKE Aikedan, et al. Spatiotemporal evolution of arable land use in Aksu River Basin, Xinjiang in recent 19 years[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022, 20(3): 72-80.
- 陈亚宁, 李忠勤, 徐建华, 等. 中国西北干旱区水资源与生态环境变化及保护建议[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(3): 385-393.
- CHEN Yaning, LI Zhongqin, XU Jianhua, et al. Changes and Protection Suggestions in Water Resources and Ecological Environment in Arid Region of Northwest China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(3): 385-393.
- 陈亚宁, 徐宗学. 全球气候变化对新疆塔里木河流域水资源的可能性影响[J]. 中国科学, 2004, 34(11): 1047-1053.
- CHEN Yaning, XU Zongxue. The impact of global climate change on water resources possibility in Tarim River Basin, Xinjiang[J]. Science in China, 2004, 34(11): 1047-1053.
- 陈泽, 吴彬, 高凡, 等. 2011-2020 年新疆鄯善县地下水位时空动态变化规律[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 60-68.
- CHEN Ze, WU Bin, GAO Fan, et al. Spatial-temporal Dynamic Change Law of Groundwater Level in Shanshan County of Xinjiang Uygur Autonomous Region from 2011 to 2020[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 60-68.
- 党学亚, 张俊, 常亮, 等. 西北地区水文地质调查与水资源安全[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 81-95.
- DANG Xueyan, ZHANG Jun, CHANG Liang, et al. Hydrogeological Survey and Water Resources Security in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 81-95.
- 冯嘉兴, 蒙琪, 王茜. 黑河干流中游地区近 40 年来地下水环境变化特征及其成因[J]. 西北地质, 2023, 56(4): 243-253.
- FENG Jiaying, MENG Qi, WANG Xi. Characteristics and Causes of Groundwater Environment Changes in the Middle Reaches of the Heihe River in Recent 40 Years[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(4): 243-253.
- 郭宏伟, 徐海量, 赵新风, 等. 塔里木河流域最大灌溉面积与超载情况探讨[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2017, 56(2): 140-150.
- GUO Hongwei, XU Hailiang, ZHAO Xinfeng, et al. The maximum irrigation area and overload situations of the mainstream of Tarim river basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2017, 56(2): 140-150.
- 高宇阳, 杨鹏年, 阚建, 等. 人类活动影响下乌苏市地下水埋深演化趋势[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(10): 90-96.
- GAO Yuyang, YANG Pengnian, KAN Jian, et al. The Evolution Trend of Groundwater Level in Usu City under the Influence of Human Activities[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(10): 90-96.
- 胡顺, 凌抗, 王俊友, 等. 西北典型内陆流域地下水与湿地生态系统协同演化机制[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 22-31.
- HU Shun, LING Kang, WANG Junyou, et al. Co-evolution mechanism of groundwater and wetland ecosystem in a typical inland watershed in northwest China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 22-31.
- 李文明, 李健强, 徐永, 等. 西北生态地质调查研究进展与展望[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 108-119.
- LI Wenming, LI Jianqiang, XU Yong, et al. Progress and Prospects of Ecological Geological Survey in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 108-119.
- 罗先香, 杨建强. 中国西北干旱区水资源可持续利用对策研究[J]. 地域研究与开发, 2003(01): 73-76.
- LUO Xianxiang, YANG Jianqiang. Researches on the Questions and Countermeasures of Sustainable Utilization of Water Resources in the Northwest Area of China[J]. Areal Research and Development, 2003(01): 73-76.
- 龙睿, 张俊, 余堃等. 新疆孔雀河流域地下水演化及其生态效应[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 41-50.
- LONG Rui, ZHANG Jun, YU Kun, et al. Groundwater evolution and ecological effect in the Kongque River Basin, Xinjiang[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 41-50.
- 罗杰, 王文科, 段磊, 等. 银川平原地下水位变化特征及其成因分析[J]. 西北地质, 2020, 53(1): 195-204.
- LUO Jie, WANG Wenke, DUAN Lei, et al. Dynamic Analysis of Groundwater Level in Yinchuan Plain[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(1): 195-204.
- 刘伟朋, 崔虎群, 刘伟坡, 等. 三江平原地下水流场演化趋势及影响因素[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 10-17.
- LIU Weipeng, CUI Huqun, LIU Weipo, et al. An analysis of the evolution trend and influencing factors of the groundwater flow field in the Sanjiang Plain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(1): 10-17.
- 梁籍, 李颖, 张学红, 等. 阿克苏地区地下水资源与水盐调控分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003(2): 192-196.
- LIANG Ji, LI Ying, ZHANG Xuehong, et al. An analysis of Groundwater Resource and Water-Salt control in Akesu Area[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2003(2): 192-196.
- 满苏尔·沙比提, 胡江玲. 1957—2007 年阿克苏河流域绿洲耕地

- 变化及其河流水文效应[J]. 冰川冻土, 2011, 33(1): 182-189.
- SHABITI·Mansuer, HU Jiangling. Land Use Change in the Aksu River Basin in 1957-2007 and Its Hydrological Effect Analysis[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(1): 182-189.
- 潘一心. 阿克苏地区区域水文地质普查报告(1:20万)[R]. 新疆: 中国人民解放军九二五部队, 1979.
- 普拉提·苏力坦. 阿克苏河流域地下水埋深及矿化度变化规律浅析[J]. 地下水, 2023, 45(3): 70-72+92.
- SULITAN·Pilates. Analysis on the change law of groundwater depth and salinity in Aksu River Basin[J]. Ground Water, 2023, 45(3): 70-72+92.
- 束龙仓, 徐丽丽, 袁亚杰, 等. 三江平原典型区地下水水流场变化及主要影响因素分析[J]. 水利学报, 2022, 53(6): 644-654.
- SHU Longcang, XU Lili, YUAN Yajie, et al. Analysis of changes of groundwater flow field and its main influencing factors in typical areas of Sanjiang Plain[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(6): 644-654.
- 沈永平, 王国亚, 张建岗, 等. 人类活动对阿克苏河绿洲气候及水文环境的影响[J]. 干旱区地理, 2008(04): 524-534.
- SHEN Yongping, WANG Guoya, ZHANG Jiangang, et al. Human activity impacts on local climate and water environments of the Aksu River Oasis, South Xinjing[J]. Arid Land Geography, 2008(04): 524-534.
- 王璐晨, 韩海辉, 张俊, 等. 塔里木河流域土地利用及人类活动强度的时空演化特征研究[J/OL]. 中国地质, 2023(6): 1-24.
- WANG Luchen, HAN Haihui, ZHANG Jun, et al. Research on the response of land use change to human activities in the Tarim River Basin[J/OL]. Geology in China, 2023(6): 1-24.
- 王浩, 段磊, 王文科. 秦岭北麓地下水水位动态特征与影响因素[J]. 西北地质, 2020, 53(2): 280-288.
- WANG Hao, DUAN Lei, WANG Wenke. Dynamic Features of Groundwater Level in Northern Qinling and Its Influence Factors[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(2): 280-288.
- 王贞岩, 高宗军, 王姝, 等. 黑河流域中游地区地下水水位多年变化特征[J]. 水电能源科学, 2019, 37(4): 140-143.
- WANG Zhenyan, GAO zongjun, WANG Shu, et al. Variation Characteristics of Groundwater Level in the Middle Reaches of the Heihe River Basin[J]. Water Resource and Power, 2019, 37(4): 140-143.
- 王涛, 张超. 1998—2014年阿克苏河流域耕地景观时空变化研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2017, 37(2): 171-178.
- WANG Tao, ZHANG Chao. Spatial-temporal Change of Cultivated Land in Aksu River Basin During 1998-2014[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Science), 2017, 37(2): 171-178.
- 王志成, 李稚, 张辉, 等. 阿克苏河流域灌区土地利用变化对蒸散耗水的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(6): 79-85.
- WANG Zhicheng, LI Zhi, ZHANG Hui, et al. The Impact of Land Use Change on Evapotranspiration of the Irrigated Areas in Aksu Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(6): 79-85.
- 徐梦瑶, 梁秀娟, 王益良, 等. 三江平原地下水循环演化特征[J]. 人民黄河, 2012, 34(2): 63-65.
- XU Mengyao, LIANG Xiujuan, WANG Yiliang, et al. Evolution Characteristics of Groundwater Circulation in Sanjiang Plain[J]. Yellow River, 2012, 34(2): 63-65.
- 余斌, 李升, 王友年. 阿克苏河流域地表水与地下水转化关系研究[J]. 人民长江, 2021, 52(8): 56-62+70.
- YU Bin, LI Sheng, WANG Younian. Transformation of surface water and groundwater in Aksu River Basin[J]. Yangtze River, 2021, 52(08): 56-62+70.
- 张俊, 尹立河, 顾小凡, 等. 同位素水化学指示的新疆孔雀河流域地下水与地表水关系[J]. 西北地质, 2021, 54(1): 185-195.
- ZHANG Jun, YIN Lihe, GU Xiaofan, et al. Study on the Relationship Between Groundwater and Surface Water in Xinjiang Kongque River Basin Using Isotopes and Hydrochemistry method[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(1): 185-195.
- 张旭, 刘新华, 张桂林, 等. 新疆阿克苏河流域水资源承载力变化分析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(9): 44-47.
- ZHANG Xu, LIU Xinhua, ZHANG Guilin, et al. Analysis of Change of Water Resources Carrying Capacity in Aksu River Basin of Xinjiang[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(9): 44-47.
- 周德成, 罗格平, 尹昌应, 等. 近50a阿克苏河流域土地利用/覆被变化过程[J]. 冰川冻土, 2010, 32(2): 275-284.
- ZHOU Decheng, LUO Geping, YIN Changying, et al. Land Use/Cover Change of the Aksu River Watershed in the Period of 1960-2008[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(2): 275-284.
- Huang Jiuyu, Ge Yanyan, Li Sheng. Mixed-Unit-Model-Based and Quantitative Studies on Groundwater Recharging and Discharging between Aquifers of Aksu River[J]. Sustainability, 2022, 14(11): 1-16.
- Rockström J, Falkenmark M, Karlberg L, et al. Future water availability for global food production: The potential of green water for increasing resilience to global change[J]. Water Resources Research, 2009, 45(7): 1-16.
- Sun Congjian, Chen Yaning, Li Xingong, et al. Analysis on the streamflow components of the typical inland river, Northwest China[J]. Hydrological Sciences Journal, 2016, 61(5): 970-981.
- Williams, W. D. Salinisation: a major threat to water resources in the arid and semi-arid regions of the world[J]. Lakes & Reservoirs: Science, Policy and Management for Sustainable Use, 1999(4): 85-91.
- Wang Yanxin, Li Junxia, Ma Teng, et al. Genesis of geogenic contaminated groundwater: As, F and I[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2021, 51(24): 1-39.