

塔克拉玛干沙漠地下水十大问题与展望：基于 60 年来的水文地质调查研究成果

尹立河^{1,2}, 张俊^{1,2}, 张鹏伟³, 顾小凡^{1,2}, 李小等¹

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 西安 710054; 2. 中国地质调查局干旱半干旱区地下水与生态重点实验室, 西安 710054; 3. 中国地质调查局乌鲁木齐自然资源综合调查中心, 乌鲁木齐 830057)

提要: 【研究目的】系统总结近 60 年来塔克拉玛干沙漠地下水的调查研究成果, 从地下水补给排泄、地下水水质与地下水循环等三个大方面总结主要的成果与认识, 指出目前调查研究的不足之处和需要解决的十大问题, 展望下一步的工作方向与重点任务。【研究方法】通过系统收集塔克拉玛干沙漠地下水相关的调查报告、学术论文, 结合国内外其他沙漠区的最新研究成果, 从地下水水量、水质及地下水循环等方面梳理调查研究进展。【研究结果】沙漠地下水的主要来源是绿洲区地下水侧向补给、降水入渗与河水入渗补给; 地下水的主要排泄方式是蒸散发, 还有少量的人工开采; 地下水贮存量巨大, 约有 80 多万亿立方米; 但目前补给量与排泄量的估算均有较大的不确定性。沙漠地下水的水质较差, 除个别地区小于 5g/L 外, 大部分地区在 5~10g/L; 在垂向上地下水水质具有上咸下淡的特点。地下水的区域运动规律是先从南向北流动, 至塔里木河冲积平原后折向东流, 地下水平均流速为 55.94 m/a。【结论】下一步建议针对本文提出的十大问题, 采用定量化的手段, 从更长的时间尺度对地下水的补给量、排泄量进行估算; 通过分层试验以及监测等技术获取更多的地下水循环信息, 系统研究地下水的循环规律, 提出沙漠区地下水循环的模式, 定量总结各个循环系统的特点; 进一步加大对沙漠区淡水寻找和高矿化地下水开发利用技术研发。

关键词: 地下水; 地下水补给; 地下水资源; 地下水循环; 回顾与展望; 塔克拉玛干沙漠

创新点: 1) 系统总结了 60 年来塔克拉玛干沙漠地下水的补给、排泄与循环以及水量、水质的调查研究进展, 梳理了取得的主要成果; 2) 指出了沙漠区地下水需要进一步调查研究的方向和十大科学问题。

Ten questions and visions of groundwater in the Taklimakan desert: Based on 60-year hydrogeological investigation and research

YIN Lihe^{1,2}, ZHANG Jun^{1,2}, ZHANG Pengwei³, GU Xiaofan^{1,2}, LI Xiaodeng¹

(1. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Groundwater and Ecology in Arid Regions of China Geological Survey, Xi'an 710054, China; 3. Urumqi Center on Integrated Natural Resources Survey of China Geological Survey, Urumqi 830057, China;)

Abstract: [Objective] A systematic review has been performed on groundwater investigation and research in the Taklimakan desert in recent 60 years, in order to summarize major achievements and understandings on groundwater recharge, discharge and circulation. The main shortcomings of current investigation and research as well as ten open questions were put forward and further study areas were pointed out. [Methods] Investigation reports and academic papers were systematically collected on groundwater in the Taklimakan desert for a comprehensive review on groundwater quality, quantity and circulation, in a combination with latest relevant achievements on desert groundwater from domestic and international hydrogeological communities. [Results]

基金项目: 陕西省创新能力支持计划 (2019TD-040) 及中国地质调查局项目 (DD20190351) 联合资助。

作者简介: 尹立河, 男, 1977 年生, 博士, 研究员, 主要从事旱区水文地质调查研究; E-mail: ylihe@mail.cgs.gov.cn

Groundwater in the desert originates from lateral groundwater flow from oases, precipitation and river water infiltration and groundwater is mainly consumed by evapotranspiration as well as a limited amount of human withdrawal. Groundwater storage is vast and at a level of 80 trillion m³. Currently, there is a great uncertainty in groundwater recharge and discharge estimation. Groundwater quality is poor in general as indicated by the total dissolved solids (TDS) spatial distribution where the majority of the desert has saline groundwater with TDS ranging from 5 to 10g/L, while only a small area with TDS less than 5 g/L. Vertically, groundwater quality is characterized by saline groundwater in deep and brackish groundwater in upper layers. Groundwater flows northward regionally and turns to flow eastward at the northern margin of the Tarim river fluvial plain, with a mean velocity of 55.94 m/a. **[Conclusions]** To solve these scientific question, in the future groundwater recharge and discharge should be quantified with more quantitative ways and longer time frame. Detailed data on groundwater circulation should be collected through the packer tests and monitoring in order to systematically study groundwater circulation patterns, put forward regional groundwater flow patterns and summarize quantitatively the features of each flow system. Identification of fresh water and techniques for utilizing high TDS groundwater in the desert should also be enhanced in the future investigation and research.

Key words: Groundwater; Groundwater recharge; Groundwater resources; Groundwater circulation; Review and outlook; Taklimakan desert;

Highlights: 1) Progresses on groundwater recharge, discharge and circulation as well as groundwater quality and quantity in the Taklimakan desert were systematically reviewed and major achievements were summarized. 2) The direction of investigation and research as well as ten open scientific questions on desert groundwater were put forward for future

About the first author: Yin Lih, male, born in 1977, Ph.D, professor, mainly engaged in hydrogeological survey and research in arid regions; E-mail: ylihe@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Innovation Capability Support Program of Shaanxi (2019TD-040) and China Geological Survey (DD20190351).

1 塔克拉玛干沙漠概况

塔克拉玛干沙漠地处塔里木盆地,总面积约 36.5 万平方千米,是我国面积最大的沙漠,也是世界著名的十大沙漠之一、世界第二大流动沙漠,是全球中纬度地区最大的沙漠(吴正, 2009)。它南依昆仑-阿尔金山,北靠天山,西起帕米尔高原,东至罗布泊,东西长约 1100 km,南北宽约 550 km,以近卵圆形展布在塔里木盆地中部(图 1)。从行政区上讲,沙漠全域分布在南疆,涉及喀什、和田等四地州的 32 个县(市)。塔克拉玛干沙漠至少在中更新世中期或是更早时期就形成了,晚更世以来,周边山体持续上升,湿润气候更难进入塔里木盆地,至末次冰期,沙漠几乎扩展到整个盆地,形成了现今沙漠的基本轮廓(国家林业局, 2018)。

塔克拉玛干沙漠地势总体上是西南高东北低,西南部沙漠边缘地带海拔 1100~1250 m,东部低洼处海拔 800~1000 m。除少数深入沙漠腹地的河流(如和田河、克里雅河等)、麻扎塔格和民丰北隆起等残丘高地外,塔克拉玛干沙漠其他地区均为沙丘所覆盖。沙漠物质的来源主要是山前冲洪积平原的松散沉积物,此外沙漠内局部出露的山地残丘及隆起高地的风化剥蚀物也为沙漠提供了一定的物质来源(钱亦兵等, 1991)。塔克拉玛干沙漠具有如下的特点:沙丘高大,最高达 200 m 以上;沙丘形态众多,包含复合新月形沙丘、复合型链状沙丘等;沙丘中以流动沙丘为主,占比达 76%。沙丘之下为冲积-湖积地层,是沙漠地下水的主要赋存层位,以粉沙、细沙为主,夹薄层亚砂土或亚粘土。

沙漠区呈现极端的干旱大陆性气候,主要的水汽来源于西风气流和西南季风气流,多年平均降水量 15~60 mm,从盆地周边向沙漠腹地呈环状递减。除春夏季的降雨外,冬季塔克拉

玛干沙漠也有降雪，如 2017 年塔中地区积雪日为 17 天（廖小荷等，2018）。沙漠年平均气温 10~20℃，潜在蒸发量可达 2100~3400mm/a。沙漠区土壤以风沙土为主，此外还有棕漠土、盐土等。沙漠中植物极为稀少，主要有超早生的灌木和以胡杨为主的河岸林，在沙丘洼地等地下水浅埋区也有芦苇等生长（刘加珍等，2004）。

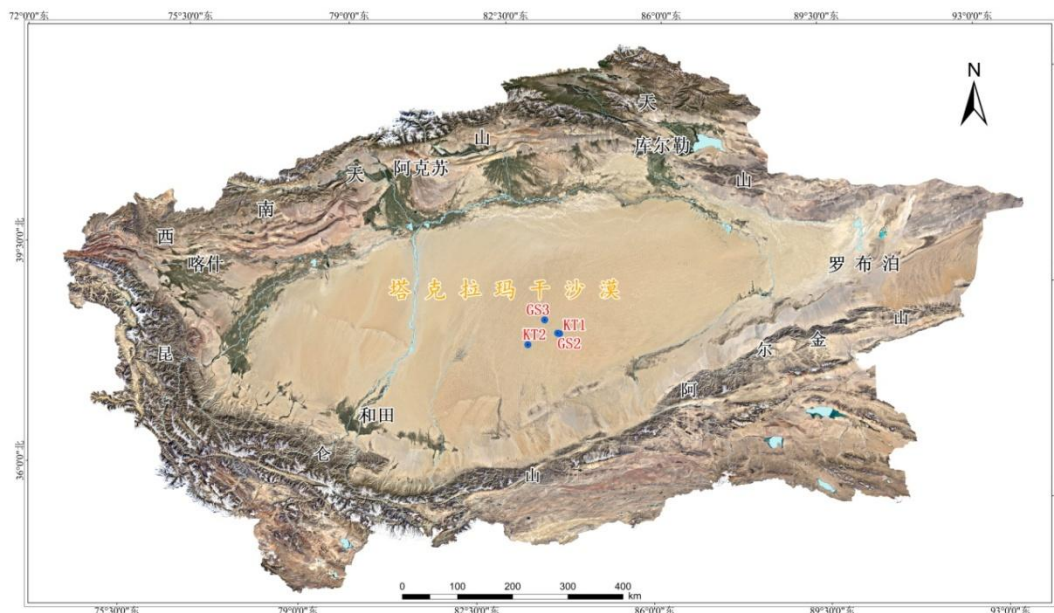


图 1 塔克拉玛干沙漠地理位置图以及沙漠中的水文地质深孔

Fig. 1 Location of the Taklamakan desert and deep hydrogeological boreholes

塔克拉玛干沙漠所处的塔里木盆地河流呈明显的向心水系(图 1)，是典型的内陆河流，山区降水、冰雪（冻土）融水和地下水是其主要的补给来源，总的地表径流量多年平均约 400 亿 m^3 。常年有水的河流约为 140 多条，能够流入沙漠的河流有 24 条，主要分布在叶尔羌河及其以东发源于昆仑山的各河流。这些河流出山后大量入渗补给地下水，成为沙漠区地下水的主要补给来源，如克里雅河由出山口至兰干水文站，32 千米内年径流损失量 4.6 亿 m^3 ，为出山口处径流量的 65%。对于一些短小河流，在平、枯水期，甚至流不到细土平原就渗失殆尽。

2 沙漠区水文地质调查研究历史

1959 年，中科院组建了沙漠科考队，同年受中科院委托地质部水文地质工程地质局组建了三个治沙水文地质队，正式开始了中国沙漠区水文地质调查研究工作。当时的主要任务是调查沙漠区的水文地质条件，查明沙漠地区地下水的形成条件和分布规律，探寻质、量俱佳的地下水资源，提出地下水开发利用的建议。在塔克拉玛干沙漠区，主要由第二治沙队承担调查任务，调查区包括沙漠南缘及和田河流域中游的于田-墨玉地区，分别开展了 1: 50 万和 1: 10 万区域水文地质调查，主要成果以系列论文形式集中反映在《治沙研究(第六号)》(中国科学院治沙队，1964)。通过对三年(1959~1961)工作的总结，大致掌握了沙漠区的水文地质特征，对沙漠区地下水埋深、水质有了初步认识，找到了一些重要水源。在这个时期，也对局部地区进行了大比例尺的水文地质调查，如在于田-墨玉绿洲区开展了 1: 5 万水文地质调查，对皮山治沙站及周边地区开展了 1: 2.5 万水文地质调查，对第四纪地质、地貌、地下水流场和水化学特征进行了调查研究(张贵祥，1960；耿鹤年等，1961)。

1962~1971 年的十年中，没有在沙漠区开展水文地质调查工作。1972~1982 年，开展了 1: 20 万水文地质普查工作，按标准图幅提交了区域水文地质普查报告和附图，部分工作区位于沙漠中。主要是采集了沙漠区的地下水样、测定了地下水埋深，在此基础上分析了地下

水的水化学特征、埋深及流场特征，初步研究了地表水与地下水的转化关系，但并未评价沙漠区的地下水资源量。

在 1982 年之前，水文地质调查工作仅限于沙漠边缘区。1988~1990 年开展的塔克拉玛干沙漠综合科考，部署了涵盖整个沙漠区的 1:100 万水文地质调查，填补了沙漠腹地水文地质调查的空白区，并首次绘制了覆盖整个沙漠区的水文地质图、水化学图、等水位线图等基础性图件。在这次科考中，第一次使用了同位素技术（采集了 61 组氦氧稳定同位素、56 组氦同位素）研究地下水的循环演化特征，其主要成果反映在《塔克拉玛干沙漠地区水资源评价与利用》专著中（中国科学院塔克拉玛干沙漠综合科学考察队，1993）。该成果主要对沙漠区的水化学特征及成因进行了分析，首次开展了沙漠区的地下水资源评价，利用同位素技术研究了地下水、地表水和降水的转化关系。

20 世纪 90 年代之后的水文地质工作大多是为沙漠地区油气资源的开发提供水源保障。在这一阶段，首次在沙漠腹地施工了多口水文地质深孔（图 1），对深部含水层有了更深入的认识。1993~1994 年完成了新疆塔中 4# 油田供水水文地质初步勘察报告，第一次在沙漠腹地施工了两口 400 米的深孔（赵忠贤等，1995）。在“西北地区水资源特别计划”的资助下，1996 年和 1997 年，在沙漠腹地相继施工了深达 653 米和 886 米的水文地质勘探孔，综合利用古地磁等技术重新厘定了第四系的底界（>630 米），并对第四系的沉积特征进行了分析，表明 95% 左右为砂，粘性土占比极少。据此推断沙漠区没有区域隔水层的存在，是一个完整的含水层，个别地段有弱承压现象（门国发等，1996；门国发等，1997）。这一时期的研究工作主要是查明沙漠南部地区古河道分布、地下水赋存特征与水质演化等，特别是将同位素与水化学结合起来分析地下水的循环演化机理（李文鹏等，1995；焦培新，1995；李文鹏等，2000）

进入 21 世纪后，围绕和田河气田和塔中 I 号凝析气田开展了 1:5 万水文地质调查，提交了相应的调查报告（刘娟等，2009；苏明磊，2014）。此外，沿沙漠公路开展了系列水文地质调查研究工作，主要是分析地下水化学特征与成因，分析地下水动态特征等（杨虎林，2008；魏亚平等，2016；范薇等，2019）。这一阶段最大的特点是提高了对地下水年龄的认识，以前主要是利用氦同位素揭示较年轻的地下水年龄，因此只能研究与降水、地表水关系密切的地下水循环。而对于年龄比较老的沙漠地下水，一直没有年龄的数据。 ^{14}C 测年技术在塔克拉玛干沙漠的应用比较晚，2011—2012 年为研究沙漠区的地下水碳汇，系统采集了上百件 ^{14}C 样品，第一次系统揭示了沙漠腹地浅层地下水年龄分布，发现沙漠腹地地下水的年龄可达几千年（Li 等，2015）。2019 年，中国地质调查局乌鲁木齐自然资源综合调查中心，在沙漠东北缘第一次采用了 ^{81}Kr 测年技术，在 230~400 m 层位发现了年龄为几十万年的地下水（数据未公开）。

3 主要进展与认识

本文按沙漠地下水的三大问题来梳理进展与认识。三大问题是沙漠地下水的补给与排泄、沙漠地下水水质和沙漠地下水循环问题。并由这三大问题派生出十个子问题，分别是地下水侧向补给、大气降水补给、地表水补给、凝结水补给、地下水排泄、水质的平面分布规律、水质的垂向分布规律、水质随时间的变化规律、地下水的区域循环和局部循环。

3.1 地下水补给与排泄

分析地下水的补给与排泄，评估地下水的资源量，是合理开发利用沙漠区地下水资源的基础。通过梳理前人研究成果，塔克拉玛干沙漠地下水的潜在补给源包括地下水侧向补给、大气降水补给、河水补给、凝结水补给等，前人一致认为：（1）侧向补给是地下水最主要的补给源；（2）沙漠区的河水与大气降水对地下水具有一定的补给作用，但补给量不大、补给范围有限；（3）凝结水的补给作用可忽略不计。但对于各补给项的定量计算比较少，只对地下水的侧向补给量进行过估算，降水补给量等其他补给来源还未进行过估算。沙漠地下水的

主要排泄方式是蒸散发，地下水的开采量比较少，现有的开采主要是用于沙漠公路绿化及支撑石油天然气的开采等。

3.1.1 问题 1：侧向补给

早在上世纪 60 年代，李宝兴等老一辈水文地质工作者就提出了沙漠区的地下水主要来自绿洲区的侧向径流（中国科学院治沙队，1964），但没有估算侧向补给量的大小。上世纪 90 年代，利用断面法第一次估算侧向补给量约为 1.9 亿 m^3/a （中国科学院塔克拉玛干沙漠综合科学考察队，1993）。据笔者对前人成果的梳理，这也是唯一一次对整个沙漠区侧向补给量的估算。几乎在同一时期，赵忠贤等（1995）在沙漠南缘安迪河流域对沙漠地下水的补给量进行了估算，估计每年约有 0.12 亿 m^3 的地下水从绿洲区补给沙漠地下水。对比这两次估算，含水层的厚度、水力梯度取值相差不大，主要的差别在于含水层渗透系数的取值。

3.1.2 问题 2：大气降水补给

大气降水对地下水是否有补给是有争议的，补给的时空分布与强度也不清楚。在早期的报告中，由于缺少沙漠区的气象资料，推断沙漠腹地降水稀少，且有常年不降雨的地方，因此认为降水对地下水几乎没有补给作用（中国科学院治沙队，1964）。随着气象观测资料的丰富和沙漠腹地地下水氡同位素的测定，对降水补给地下水这一问题的认识也在逐步深化。上世纪 80 年代末，随着沙漠腹地满西和塔中气象站的建设，降水的监测结果颠覆了过去认为沙漠地区降水很少或无降水的认识。据 1997~2017 年的降水监测结果，塔中地区多年平均降水量为 26.1mm，最高年降水为 2000 年的 45.2mm（周雪英等，2019）；而满西站年降水最高达 84.7mm（1988 年），并出现过一次降水在 30 分钟内达 20mm 的记录，地表出现了积水（李江风，1991）。除了夏季的降雨外，冬季沙漠中也会有降雪。如 2008 年 1 月卫星监测显示，南疆积雪面积约 75 万平方公里，沙漠积雪量突破了上世纪 80 年代有卫星监测数据的极值，丘间洼地处的积雪达 100~150mm（<http://news.sina.com.cn/c/2008-02-01/151214881427.shtml>）。此后 2012 年、2017 年和 2021 年也都在沙漠中观测到了降雪。如塔中气象站 2017 年观测到沙漠腹地冬季有积雪，积雪存在了 17 天才融化，平均厚度 20mm（廖小荷等，2018）。前人沿沙漠公路取样，发现裸露的水坑取样后均能检测到氡，也说明沙漠中确实有降水的存在（李文鹏等，2000）。

通过降水的监测据分析，沙漠中的地下水有可能获得降水的入渗补给，目前最直接的证据是沙漠地下水含氡，因为依据沙漠地区地下水的流速推测，侧向补给来的水都是在核爆之前的（范敬龙等，2009）。在 1988~1990 年的塔克拉玛干沙漠综合科考中，第一次发现了氡含量为 7~10TU 的地下水（陈炜，1991），证明了降水确实可以在一定的条件下补给地下水。在后续的研究中，更多的含氡地下水在沙漠中被发现（焦培新，1995；李文鹏等，1995；赵忠贤等，1995；李文鹏等，2000）。和塔克拉玛干沙漠一样，在世界其他的沙漠地下水中也检测到了氡，如撒哈拉沙漠和阿拉伯沙漠（Sultan 等，2000；Abouelmagd 等，2014）。对于降雨对沙漠地下水的补给机理，前人认为在较大的丘间洼地内地表由亚粘土等不透水层组成，暴雨时在地表形成径流，在低洼处汇集后入渗补给地下水（中国科学院塔克拉玛干沙漠综合科学考察队，1993；李文鹏等，2000）。

尽管前人都认为降水确实对沙漠地下水有补给，但一致认为补给量非常有限。原因包括：

（1）沙漠区沙层温度高，降雨多被蒸发。据塔中气象站观测数据，夏季沙丘下 5cm 处的最高温度达 50℃，地表温度更是高达 70℃以上（何清等，2011；李火青等，2016）。前人观测到降雨后，沙丘上形成雾气，应该就是降雨落到高温的地表而形成的水蒸汽（高钟，1987）。

（2）降水能够补给地下水的地域有限。前人认为只有地下水埋深较小时，降水才有可能补给地下水，据估计地下水浅埋区的面积不足塔克拉玛干沙漠的 30%（赵忠贤等，1995）；如若考虑只有满足地表有亚粘土且地下水又比较浅的条件降水才能补给地下水的话，这样的面积更是不足 0.0001%（中国科学院塔克拉玛干沙漠综合科学考察队，1993）。

3.1.3 问题 3：地表水补给

关于地表水对沙漠地下水的补给强度一直是个有争议的问题。上世纪 60 年代，发现地表水体附近的地下水水质较好，推断河水应该是对地下水具有补给作用（中国科学院治沙队，1964）。按照断面法，前人估算和田河水入渗补给量为 4.01~5.04 亿 m^3/a ，克里雅河的入渗量为 0.45~0.57 亿 m^3/a （中国科学院塔克拉玛干沙漠综合科学考察队，1993）。其他的小河流，只有在洪水期可到达沙漠边缘，很难对沙漠地下水有补给，因此河水对沙漠地下水的补给量约为 4.46~5.61 亿 m^3/a 。国外学者的研究也表明，美国主要的两个沙漠（Sonoran 沙漠和 Mojave 沙漠）的地下水也受到了短暂洪水或是季节性河水的补给（Izbicki 等，2002；Kampf 等，2016）。

但也有学者表示地表水入渗补给地下水的的作用并不显著。综合地下水水位、氢氧同位素和地下水水化学数据，表明对于季节性过水河床及其附近地区地下水水质较好，远离河床后迅速变差；氢氧同位素也表现出河流两侧绿洲内外截然不同的变化规律，表明地表水对地下水的补给范围一般几百米-几公里，而对于长年有水的塔里木河其对沙漠地下水的影响范围会大一些（陈炜，1992；杨鹏年等，2008）。河水入渗补给虽然从数据上看远大于侧向补给量，但大部分以蒸散的形式消耗于河岸两侧的绿洲区，还有一部分会在枯水期补给河水，前人认为其对绿洲外围沙漠地下水的实际贡献不大（耿鹤年等，1961；陈炜，1992；李文鹏等，2000）。

3.1.4 问题 4：凝结水补给

前人的研究表明沙漠夜间温度低，空气中的水汽在表面凝结，借重力作用有可能下移补给地下水。根据上世纪 60 年代治沙水文地质队的观测，认为在塔克拉玛干沙漠这样极端干燥的地区，其量极微，构不成对地下水的有效补给（中国科学院治沙队，1964）。前苏联一些学者在其他的沙漠中经过观测认为，这种凝结水不是来自大气中的水汽，而是土壤内部因蒸发而造成的水蒸汽，所以对地下水没有补给作用。1988~1990 年，新疆地矿局第一水文地质大队在

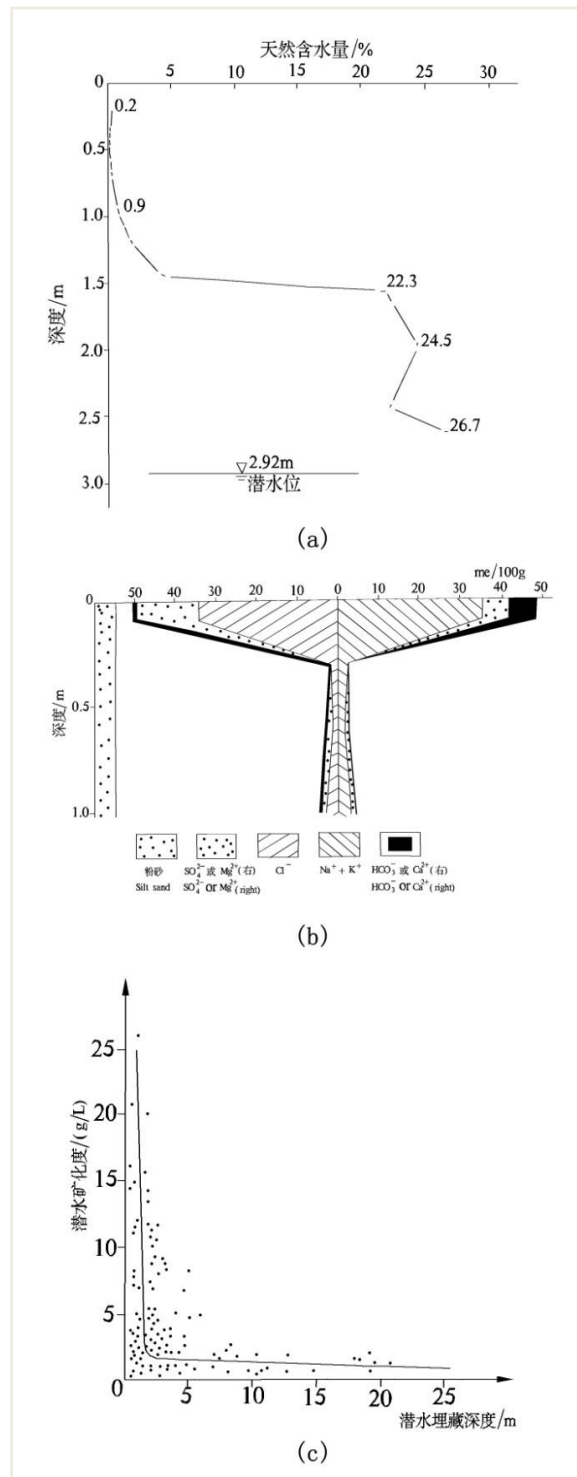


图 2 含水率剖面图 (a)、水化学剖面图 (b)、矿化度与地下水埋深关系图 (c)

Fig. 2 Soil moisture profile (a), chemical profile (b) and the relationship between TDS and depth to water table

塔里木河下游开展的试验表明，沙漠中确有凝结水存在，每年的凝结水量达 10.8mm，但这个结论并没有被广泛接受。主要因为蒸渗仪是用金属作的，由于金属的热传导性比土强得多，导致人为增加了凝结水量，使测量结果偏高（中国科学院塔克拉玛干沙漠综合科学考察队，1993）。总体来说，前人一致认为有凝结水的存在，对地下水的补给作用较小，但可以保护地下水，大大减少地下水的直接蒸发（李文鹏等，2000），但这一结论还需要更多的观测数据支持。

以上的补给项代表可更新的地下水资源量，除此之外，沙漠地下水还有一个巨大的储存量，据估计其量可达 81.6 万亿 m^3 （中国科学院塔克拉玛干沙漠综合科学考察队，1993）。但应该指出的是，从沙漠区已有的地下水年龄以及补给资源量看，沙漠地下水的更新能力较弱，且水质一般较差，不宜人类大规律开发利用。

3.1.5 问题 5：沙漠地下水的排泄

沙漠地区地下水的开采量相对比较小，开采量主要来自沙漠公路沿线绿化用的 108 口抽水井，开采时间大致半年左右，设计用水量约 560 万 m^3/a （范敬龙等，2009；杜虎林等，2012），此外还有油田、气田的生产、绿化用水，相对于沙漠区地下水的补给量与储存量，总体上用水量不大。

从以上可以看出，地下水的人工排泄量不大，最重要的排泄方式是天然排泄，即蒸散发。由于沙漠区潜在蒸散发极高，最高超过 3000mm/a，因此早期研究者认为地下水实际蒸散发量有可能也比较高。上世纪 80 年代，通过分析包气带的含水率与盐分割面，表明潜水位距地表 1.5m 左右时，毛细水可上升到达地表，受蒸发作用土壤中的含盐量呈现高脚杯状（图 2a、2b）（中国科学院塔克拉玛干沙漠综合科学考察队，1993）。蒸发极限是 1.5m 的结论有可能对整个塔里木盆地都是适用的，盆地南部潜水矿化度与地下水埋深的关系也表明，当地表水埋深小于 2m 时，地下水的矿化度显著升高（图 2c）（中国科学院治沙队，1964）。潜水蒸发极限的理论分析也表明，当地下水埋深大于 2m 时，蒸发变的比较微弱（胡顺军等，2008）。从近些年地下水的动态观测数据看，有可能蒸发极限深度比 1.5m 还要小，从图 3 中可以看出，对于地下水埋深小于 1m 的两个观测孔，地下水动态平稳，变幅极其微弱（年变幅只有几厘米），表明受到的蒸发消耗非常小（范敬龙等，2008；刘娟等，2009；）。

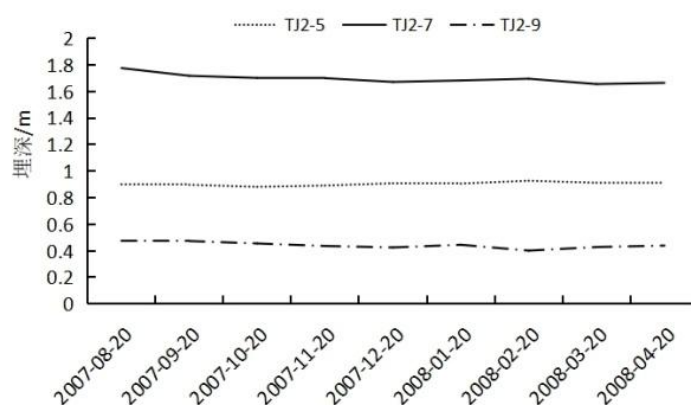


图 3 地下水浅埋区地下水动态图

Fig. 3 Groundwater regime at shallow water table areas

塔克拉玛干沙漠地下水的蒸发极限深度小的原因主要是和沙漠组成物质的粒径有关。表层物质的粒度分析表明，沙漠物质几乎全部由极细沙和细沙组成，粘土的成分极少（杨兴华等，2018；马倩雯等，2020），这就使得毛细上升高度也比较小，相应的造成了地下水的蒸发极限深度也比较小。沙漠区地下水埋深较小的地区主要是丘间洼地

(图 4), 分布面积不大, 前人推断应该小于沙漠区面积的 30% (赵忠贤等, 1994; 李文鹏等, 2000), 主要是分布在沙漠的北部、东部地区。

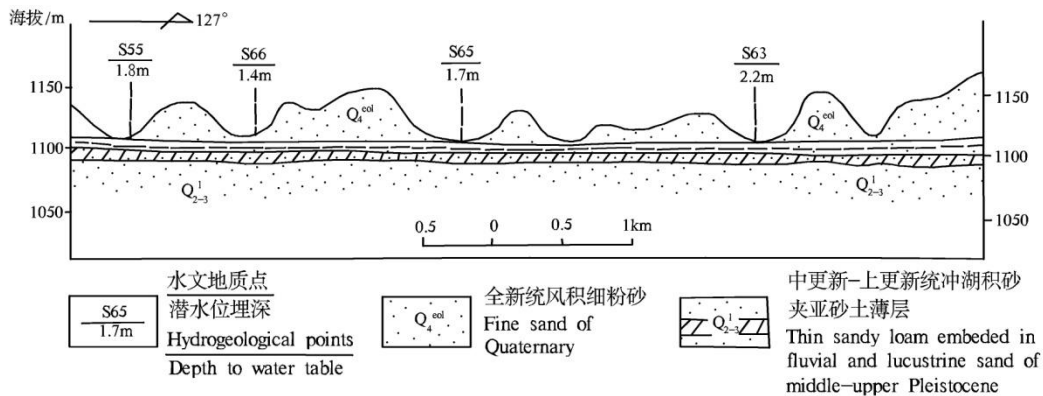


图 4 沙漠中典型水文地质剖面图

Fig. 4 Typical hydrogeological cross-section in the desert

3.2 沙漠地下水水质

3.2.1 问题 6: 平面分布规律

上世纪 60~90 年代, 在区域水文地质调查中, 采集了大量地下水水样, 分析了地下水水质的空间分布规律, 编制了覆盖整个沙漠区的地下水水化学图(中国科学院治沙队, 1964; 中国科学院塔克拉玛干沙漠综合科学考察队, 1993)。前人的研究成果发现, 季节性过水河道、古河道水质相对较好; 沙漠中除个别地区小于 5g/L 外, 大部分地区为 5~10g/L, 东部、北部地区普遍大于 10g/L, 最高可达数百 g/L。地下水的水化学类型, 主要是 Cl·SO₄-Na·Mg 型水、Cl·SO₄-Na 型水、Cl-Na 型水, 地下水中氟普遍超标。

季节性河流两侧一定范围内, 水质相对较好。一般垂直于河床由近至远由小于 1g/L 迅速增至 1~2g/L, 个别可以达到 3 g/L。古河道的地下水多为微咸水, 介于 1~4g/L 之间, 多为 2~3g/L。季节性河流和古河道附近的地下水水质较好的原因是得到了矿化度较低的河水补给, 因为河水矿化度一般小于 1g/L, 在丰水期更是普遍低于 0.5 g/L (朱秉启等, 2007; 杜虎林等, 2008)。应该说, 季节性河流和古河道附近是沙漠区最有可能发现淡水的地方, 虽然量可能不大, 但对于解决当地分散的居民用水具有重要意义。对于河水能在多大范围, 特别是在多大深度内影响地下水的水质, 由于缺少数据目前还不是很确定, 前人推断影响深度在 50~100m (李文鹏等, 2000)。

除河流外的广大沙漠区, 水化学分带性不强, 总体表现出南低北高、西低东高的特点, 这很可能和沙漠区地下水总体由西南向东北径流有关系 (尹立河等, 2021)。地下水水化学成分的形成机理主要是蒸发作用、蒸发岩等的溶解、阳离子交换 (朱秉启等, 2007; 魏亚平等, 2016; 范薇等, 2019)。前人认为蒸发岩等的溶解是水化学成分形成的主要原因, 其次为蒸发作用, 并指出即使在埋深只有 1~2m 的洼地内, 蒸发也最多贡献 30% (郝爱兵等, 2000)。

3.2.2 问题 7: 垂向分布规律

沙漠区的地下水水质在垂向上普遍存在上咸下淡的规律。早在上世纪 60 年代, 水化学的研究成果就发现埋深在 5 米以内的地下水矿化度较下部的高 (中国科学院治沙队, 1964)。随着勘查深度的加大, 发现这一规律在深孔中也存在 (赵忠贤等, 1995; 李文鹏等, 2000), 如 GS2 孔的表层潜水矿化度为 6.6 g/L, 而 219~382m 的矿化度为 3.4 g/L; 在如 KT1 的表层潜水矿化度为 4.6 g/L, 而 552~632m 的矿化度为 2.6 g/L (钻孔位置见图 1)。尽管地下水具有上咸下淡的普遍规律, 但也有例外, 如 KT2 孔 781~827m 处的新近

系地下水矿化度为 4.8 g/L, 表明新近系矿化度较第四系略有升高。这也表明地下水上咸下淡的现象只在一定的深度内存在, 当深部地下水的循环与沉积环境发生重大变化时, 这种规律就不复存在了。造成这种现象的原因主要是蒸发强度的差异造成的, 浅层地下水受到蒸发作用更强烈, 导致浅层水比深层水的矿化度高。

3.2.3 问题 8: 随时间的变化规律

沙漠区地下水水质随时间的变化规律研究的很少。目前只有在 KT1 孔进行过水质的连续监测 (2012 年 7 月至 2013 年 4 月, 间隔三个月), 通过监测结果来看, 矿化度介于 4.3~5.7 g/L 之间, 其中 7 月矿化度最高, 10 月之后矿化度变低并保持相对稳定 (苏明磊等, 2014)。从各个离子的变化来看, SO_4^{2-} 变化最大, 其次为 Cl 和 Na^+ 。从水质的变化规律可以看出, 地下水水质年内变化主要是受蒸发强度影响, 蒸发比较强烈的夏季矿化度高, 蒸发比较弱的冬季矿化度比较低。

3.3 沙漠地下水循环

3.3.1 问题 9: 区域循环

区域地下水的循环是指整个沙漠区地下水宏观的运动。上世纪 60 年代, 根据沙漠的地势推断浅层地下水的运动方向, 为由南向北及由西向东流动 (中国科学院治沙队, 1964)。上世纪 80 年代, 依据实测的地下水水位, 发现地下水先是由南向北流动, 至北边塔里木河冲积平原后折向东流。同时发现地下水水力梯度南部大、北部小、东北部最小, 表明越向下游渗流速度越慢 (中国科学院塔克拉玛干沙漠综合科学考察队, 1993)。最近完成了更加精细的地下水水位测定, 所反映出的流场特征基本与前人的一致 (尹立河等, 2021)。根据沙漠公路两侧地下水流速实测结果, 地下水的流速 21.02~204.98m/a, 平均流速 55.94 m/a (范敬龙等, 2009)。

以上对地下水循环规律的认识是基于浅层地下水的流场特征, 对于深部地下水的循环规律认识还非常有限。依据沙漠区几个深孔的资料, 从地层结构与深层地下水水位判断, 深部地下水的运移规律极可能与浅部相似。根据沙漠中 4 个最深的水文地质孔的岩芯编录, 水文地质结构基本都是由含水层组成, 隔水层很薄且不连续, 表明沙漠区是个巨厚的统一含水层 (图 5)。从深层与浅层地下水水位的对比看, 两者差别很小。如沙漠腹地的 KT1 孔, 50 米以上的浅层水水位埋深约 4.6m, 425~528m 水位埋深约 3.9m, 552~632 水位埋深约 3.8m (门国发等, 1996); 在如沙漠中最深的 KT2 孔表层水水位埋深 1.98m, 787~827m 水位埋深也是 1.98m (门国发等, 1997)。其他几个沙漠腹地的 400m 左右的水文地质孔也呈现出类似的特征, 即 219~383m 深度的水位埋深与浅层水基本一致 (赵忠贤等, 1995)。

虽然分层的水位相差不大, 但分层的水质具有明显的差异 (赵忠贤等, 1995; 门国发等, 1996; 门国发等, 1997)。地下水的年龄也具有明显的差异, 根据靠近塔里木河的分层地下水年龄数据, 表层的地下水年龄为几千年, 深部的地下水年龄高达几十万年 (数据未公开), 表明地下水具有不同的循环系统, 这些系统垂向交换不强烈, 以水平运动为主。同时需要指出的是, 不同层位的地下水氢氧同位素差别不大, 这与沙漠经历了多次的冷暖气候变化相矛盾 (李文鹏等, 2006), 其形成机理机制还需要深入研究。

3.3.2 科学问题 10: 局部循环

局部循环是指沙丘尺度的地下水循环, 相关的研究相对比较少。李文鹏等 (2000) 提出了一种浅循环的模式, 即由于差异蒸发造成的局部水流系统, 这种流动模式在实际观测中被证实。根据流向测定的结果, 丘间洼地 5.9m 以上水流方向与 8.9m 处的水流方向是相反的 (范敬龙等, 2009), 根据地下水水流系统理论, 有可能 5.9m-8.9m 是沙丘尺度的浅循环与下伏循环系统的分界深度。

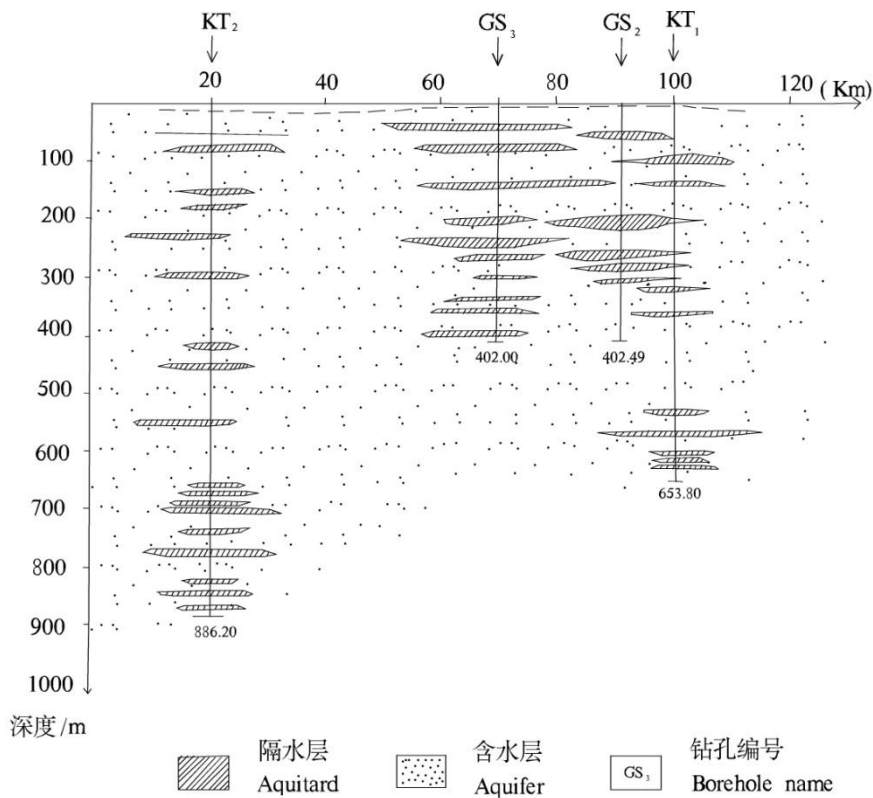


图 5 沙漠区含水层与隔水层空间展布图

Fig. 5 Spatial distribution of aquifer and aquitard in the desert

4 存在问题与建议

4.1 地下水补给

4.1.1 主要问题

(1) 地下水侧向补给。应该指出的是地下水侧向补给的计算精度还有较大的提升空间。前人也强调计算结果不是很准确，仅作为进一步研究的参考。结合最新的数据，前人计算结果最大的误差来源于含水层厚度的取值，已有的两次计算取值均在 300m 以内。随着沙漠腹地 KT2 的施工，表明第四系含水层的厚度远大于 300m (门国发等, 1997)，且基本均为含水层，隔水层占比很少。同时，随着中国地质调查局近年组织的大规模、高精度的地下水统测，已全面更新了塔里木盆地(含沙漠区)的地下水流场，水力梯度的取值也更加准确(尹立河等, 2021)。可以根据这些新资料，补充适当的物探工作探明含水层厚度的空间分布，更新地下水侧向补给量的计算结果。

(2) 降水对地下水的补给。降水对地下水的补给，前人主要是基于推断得出的结论，只有在沙漠北缘的肖塘地区有实际的观测数据(王学全等, 1998)。观测结果表明，当次降雨量为 17.2mm 时，1 个月后丘间洼地 55cm 处的降雨入渗量为 8.9mm。应该指出的是，上述的补给量应为地下水的潜在补给量，实际补给量应更小。尽管如此，笔者认为沙漠区降水对地下水的补给有可能比想象的要高，原因如下：

一是沙漠地区以短时间的暴雨为主，降水受蒸发的影响小，有利于补给地下水。研究表明以流动沙丘为主体的塔克拉玛干沙漠腹地，近地面层辐射增温比上部空气增温迅速，易于产生局部的热对流，形成短暂的对流雨或是雷阵雨，次降水量可能很大(何清等, 1998)。如沙漠边缘的若羌县 1981 年 7 月的一场特大暴雨，15 小时的降雨量达 73.5mm，是年平均降水量的 4.2 倍(中国科学院塔克拉玛干沙漠综合科学考察队, 1993)。塔中气象站的监测数

据也表明,沙漠降水极端性强,近21年来11次发生日降水量在12mm或者小时降水在6mm的极端强降水天气(周雪英等,2019)。塔克拉玛干沙漠的降雨特征和世界上其他沙漠是一致的,如埃及东部的阿拉伯沙漠的年均降水量为13mm,1994年的一次降雨就达到14.2mm(Gheith等,2002)。

二是沙漠夜间降水居多,有效避免了蒸用损耗。塔中气象站的降雨观测表明,降雨最大值出现在23:00,1997~2017年在这一时段累积降雨40.6mm;同时发现降雨频次最多的时刻是早上6:00,1997~2017年该时段共发生降雨21次(钟昕洁等,2016;周雪英等,2019)。以上的数据均表明,沙漠中的降雨多发生在蒸发强度较小的夜间,有利于入渗补给地下水。同时冬季的降雪融化也是发生在蒸发较弱的季节,前人也观测到了由于降雪融化导致的土壤含水率上升(廖小荷等,2018)。

三是应从更长的时间尺度研究沙漠区地下水的补给。现有的沙漠区地下水补给都是基于现今的气候来推断的,但塔克拉玛干沙漠大部分地区的地下水年龄大于1000年(Li等,2015),可能存在着更长历史时期(特别是历史上的暖湿期)的降水补给。其他沙漠的相关研究也证实这种可能性,如撒哈拉大沙漠的努比亚砂岩含水层的地下水是历史上比较湿润的时候补给的,补给期主要是古西风带盛行的最后一次冰期(Abouelmagd等,2014)。从前人众多的全新世塔克拉玛干沙漠气候变化的研究成果来看,历史上有很多时期比现在气候更为湿润(关有志等,1994;冯起等,1996;杨小平等,2021)。在全新世大暖期(距今7500~2500年),地层中出现了湖泊(静水)沉积物,表明当时气候比现在更湿润,地表水量丰富,湖泊广泛发育(杨小平等,2021)。虽然这之后,塔克拉玛干沙漠气候总体上变干,但仍有比较大的波动,大约在魏晋时期(距今约1800年)精绝古国深入沙漠近百公里,位于沙漠腹地克里雅河下游的喀拉墩古城距离现代绿洲200公里,都表明那时的气候远比现在湿润(殷晴,1987;熊黑钢等,2006)。基于沙漠地下水的年龄和历史上的气候变化,应该从更长的时间尺度研究地下水的补给,很可能存在几十、几百年一遇的极端降水,使地下水获得大量补给,中国主要沙漠降水导致的深层渗漏量监测结果也表明强降水事件对地下水的补给作用最强(冯伟等,2015)。

(3) 地表水补给。地表水对沙漠地下水的补给有可能比前人预想的大。除了对河两侧绿洲区的补给,河水对地下水的重要补给区是在河流末端的三角洲地区(李文鹏等,2000),在这些地区补给范围广、补给强度大。在尼雅河末端发现地下水的氡值高达44.62TU,矿化度只有1.57g/L,就表明了有较强的河水补给。2021年8月,新疆轮台县塔克拉玛干沙漠的北部边缘遭到了洪水的袭击,沙漠中有近300km²的面积被淹没,这次事件肯定对地下水有很强的补给作用。如果从更长的历史角度考察,特别是在历史上比较暖湿的时期,这种极端洪水事件发生的频率更大,对地下水的补给作用更强。

另外一个被忽视的补给是通过古河道对地下水的补给。发源于昆仑山的诸河流,在沙漠内多有古河道,据遥感解译沙漠地区至少有20多条古河道,现沙漠中呈带状分布的胡杨林大多与古河道有关(张鸿义等,1994;赵忠贤等,1995;李文鹏等,2000)。古河道附近的砂层颗粒较其他地方粗,其透水性也优于其他地方。同位素资料也表明,古河道附近的地下水氡值为12.7~45.9TU,表明有现代水的补给(中国科学院塔克拉玛干沙漠综合科学考察队,1993)。总体来讲,古河道附近的地下水水质相对较好,沙漠中发现的水质较好的地区,很可能与古河道有关。如在现今和田河以东近30公里外的沙漠腹地发现的矿化度只有1.6g/L的地下水,很有可能接收了古河道的补给(张明江等,2015)。

4.1.2 建议

(1) 降水对沙漠地下水的补给,分为次降水尺度和百(千)年尺度的补给。前人的研究表明,降水确实可以补给沙漠区的地下水(陈炜,1991;李文鹏等,1995),但是没有研究捕获到这种补给过程。可以选取水位埋深较小的丘间洼地,同步观测降水和

地下水动态,捕获地下水对降水补给的响应,计算次降水对地下水的补给量。在百(千)年尺度的降水补给方面,可以在高大的沙丘开挖厚层剖面,通过分析剖面上含水率、水化学和氢氧稳定同位素的变化,利用氯元素守恒法等确定古降水补给(Prudic, 1994; Ma 等, 2012)。

(2) 河水对地下水的补给。垂直于河流布设地下水监测剖面,监测不同深度、离河不同地点的地下水水位对河水位变化的响应,定量评价河水对地下水补给的深度、宽度和补给量,建立河水流量与地下水补给量的经验公式,估算河水对地下水的多年平均补给量。

(3) 沙漠区地下水补给量估算。目前对于整个沙漠区的地下水总补给量还尚不清楚,可以在降水和河水对地下水补给量估算的基础上,利用最新的数据计算绿洲对沙漠的侧向补给量,进而估算沙漠区的地下水总补给量。

4.2 地下水排泄

目前沙漠地下水的实际蒸散量计算尚无报道,考虑地下水埋深一般大于蒸发极限深度,因此垂直蒸散发排泄量不大。但沙漠区的地下水蒸散发消耗量到底是多少,时空变化的规律是什么,还需开展深入调查研究。未来主要是攻关河岸带、丘间洼地地下水蒸散发量的计算。监测不同水位埋深下的地下水动态,以是否有昼夜波动进一步厘定蒸发极限深度;对于有昼夜波动的监测孔,利用 White 方法计算实际蒸散发(王平等, 2018; Jobbágy 等, 2011),建立实际蒸散发与地下水埋深的关系,最后根据沙漠区实测的地下水埋深估算蒸散发量。

4.3 地下水水质

对于沙漠区的地下水水质的空间分布,还有一个问题没有得到很好的解决,就是与绿洲接壤的沙漠边缘地下水水质比绿洲区要好。通过分析细土平原与其相邻的下游沙漠区的地下水水质,发现沙漠区的地下水矿化度比上游细土平原低约 30% (赵忠贤, 1995; 李文鹏等, 2000)。因为地下水是从细土平原向沙漠运移,按水化学的演化规律下游区的水质应该比上游差。造成这种现象的原因可能是沙漠区的地下水是由细土平原地下水与深部运移来的地下水混合而成,而深部地下水由于没有受到蒸发影响水质较好,这就造成了沙漠区的地下水水质反而比上游的细土平原好(李文鹏等, 2000)。另外的原因可能是沙漠边缘的地下水埋深比细土平原大,如安迪尔一带为 8~10m,沙漠边缘区则为 10~15m (赵忠贤等, 1995),加之沙漠区的植被更少,导致蒸散发强度相应也要比细土平原区小很多,所以沙漠区水质相对较好。也有学者提出,造成这种现象的原因是沙漠区的蒸发作用将盐分带到了地表,所以沙漠区地下水的矿化度反而低于上游的细土平原(中国科学院塔克拉玛干沙漠综合科学考察队, 1993)。笔者更倾向于前两种解释,由于蒸发作用在细土平原区和沙漠区都存在,并且沙漠区的蒸用作用弱于细土平原区,所以第三种解释不够合理。

4.4 地下水循环

(1) 区域地下水循环。目前阻碍区域地下水循环研究的最大障碍是数据严重不足,目前在沙漠腹地施工的 4 口水文地质深孔只有水位和水质数据(赵忠贤等, 2005; 门国发等, 2006; 门国发等, 2007),缺少同位素特别是放射性同位素的数据。并且这些孔只取得了 1~2 层的地下水信息,基于以上有限的对区域地下水的循环认识还不够清晰。下一步可以沿地下水的流向,从南至北在沙漠腹地施工深孔,采用分层取样技术实测不同层位的水位、水质及同位素数据,特别是利用 C^{14} 、 Kr^{81} 等放射性同位素测定地下水年龄(Zhang 等, 2021),进一步深化深层水的形成、运移规律研究。

(2) 局部地下水循环。以典型沙丘为研究对象,从沙丘顶至丘间洼地布置监测剖面,获取不同部位水位、水质和同位素数据,研究由降水补给和蒸散发空间差异造成的

局部地下水循环, 确定局部循环系统的空间范围、垂向深度, 验证、完善已有的循环模式(李文鹏等, 2000)。

(3) 地下水的循环模式研究。在局部循环和区域循环的研究基础上, 提出沙漠区地下水循环的模式, 定量化总结各个循环系统的特点。

4.5 地下水开发利用

(1) 淡水与微咸水的寻找。寻找可直接饮用或是稍加处理就可以饮用的地下水一直是沙漠区水文地质工作的一个重点(中国科学院塔克拉玛干沙漠综合科学考察队, 1993; 李文鹏等, 2000)。现今发现的淡水体主要分布在河流两侧, 范围小且局限, 下一步重点利用物探、钻探等手段, 在石油开发等重点区及周边地区寻找深部淡水和微咸水, 进一步验证前人物探找水的相关成果(武毅等, 2004)。

(2) 高矿化地下水的开发利用。早在 20 多年前, 就有学者论证过利用苦咸水脱盐淡化与除氟技术等处理塔克拉玛干沙漠劣质地下水(中国科学院塔克拉玛干沙漠综合科学考察队, 1993), 随着近年来反渗透技术的快速发展, 可以利用该技术处理沙漠区的苦咸水供生活饮用(陈冬, 2021)。另外就是开发耐盐的植物, 利用高矿化地下水进行灌溉, 改善石油开发等重点区及周边地区的生态环境(赵振勇等, 2020)。

5 结论

(1) 沙漠地下水的主要来源是绿洲区地下水侧向补给、降水入渗、河水入渗补给与凝结水补给。除凝结水外, 其他补给源是否可有效补给地下水还具有争议。地下水主要消耗于蒸散发。除侧向补给量外, 塔克拉玛干沙漠区地下水的其他补给量、排泄量(包括降水入渗补给、地表水入渗补给、凝结水补给、地下水蒸散发)尚未估算, 其时空分布规律尚未查明。下一步应从更长的时间尺度研究降水、地表水对地下水的补给量, 开展更多的野外工作, 估算地下水侧向补给量、地下水蒸散发等水均衡项。

(2) 除河道外, 沙漠区地下水的水质一般较差, 大部分地区为 5~10g/L。但对于沙漠边缘地下水水质比绿洲区好等问题, 目前还有不同的观点, 需要进一步开展工作。在垂向上, 地下水普遍具有上咸下淡的规律。受监测数据的制约, 水质随时间的变化规律尚不十分清楚。

(3) 沙漠区地下水总体上由南向北及由西向东流动, 存在沙丘尺度的局部循环系统。由于缺少分层的水化学、同位素数据(特别是反映地下水年龄的同位素数据), 对不同级次的地下水循环模式尚不清楚。

References

- Abouelmagd A , Sultan M , Sturchio N C , et al. Paleoclimate record in the Nubian Sandstone Aquifer, Sinai Peninsula, Egypt[J]. Quaternary Research, 2014, 81(1):158-167.
- Gheith H , Sultan M . Construction of a hydrologic model for estimating Wadi runoff and groundwater recharge in the Eastern Desert, Egypt [J]. 2002, 263(1-4):36-55.
- Izbicki J A , Radyk J , Michel R L . Movement of water through the thick unsaturated zone underlying Oro Grande and Sheep Creek Washes in the western Mojave Desert, USA[J]. Hydrogeology Journal, 2002, 10(3):409-427.
- Jobb gy, E.G., Nosetto, M.D., Villagra, P.E. and Jackson, R.B. (2011), Water subsidies from mountains to deserts: their role in sustaining groundwater-fed oases in a sandy landscape. *Ecological Applications*, 21: 678-694.
- Kampf S K , Faulconer J , Shaw J R , et al. Rain and channel flow supplements to subsurface water beneath hyper-arid ephemeral stream channels[J]. Journal of Hydrology, 2016, 536:524-533.
- Li, Y., Wang, Y.-G., Houghton, R. A., and Tang, L.-S. (2015), Hidden carbon sink beneath desert, *Geophys. Res. Lett.*, 42(14), 5880– 5887, doi:10.1002/2015GL064222.

- Ma J , Wang Y , Zhao Y , et al. Spatial distribution of chloride and nitrate within an unsaturated dune sand of a cold-arid desert: Implications for paleoenvironmental records[J]. *Catena*, 2012, 96(1):68-75.
- National Forestry Administration. 2018. Atlas of Sandy Deserts in China [M]. Beijing: Science Press
- Prudic D E. Estimates of percolation rates and ages of water in unsaturated sediments at two Mojave Desert sites, California-Nevada[M]. US Geological Survey, 1994.
- Sultan, M., Sturchio, N., Gheith, H., Hady, Y.A. and El Anbeawy, M. (2000), Chemical and Isotopic Constraints on the Origin of Wadi El-Tarfa Ground Water, Eastern Desert, Egypt. *Groundwater*, 38: 743-751.
- Zhang, J., Wang, X.-S., Yin, L., Wang, W., Love, A., Lu, Z.-T., et al. (2021). Inflection points on groundwater age and geochemical profiles along wellbores light up hierarchically nested flow systems. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL092337. <https://doi.org/10.1029/2020GL092337>.
- Chen Dong. 2021. Reverse osmosis membrane and its application in water treatment[J].*Shandong Chemical Industry*, 50(18):269-270(in Chinese with English abstract).
- Chen Wei. 1992.The ground water environment isotope analysis for Taklimakan desert[J]. *Arid Land Geography*, (01):17-24(in Chinese with English abstract).
- Chinese Academy of Sciences Sand Control Team. 1964. Studies on sand control (No.6) [M]. Beijing: Science Press, 131-213(in Chinese).
- Du Hulin, Bao Zhongwen, JinXiaojun, Zhou Hongwei, Sun Shupeng, Yan Ruosen, Wu Tianchang. 2012. Water use efficiency of shelterbelt along the Tarim desert highway under drip irrigation[J]. *Journal of Desert Research*, 32(2):359-363(in Chinese with English abstract).
- Du Hulin, Gao Qianzhao, XiongQiangguo, Ma Zhenwu, Ban Xinan, Zhou Hongwei, Feng Qi, Yu Hongbo, Peng Xiaoyu. 2007. Distribution of surface and underground water resources in south region to Tarim desert oil field[J].*Journal of Desert Research*, 27(4): 698-403(in Chinese with English abstract).
- Du Hulin, Xiao Honglang, Zheng Wei, Zhou Hongwei, Sun Shupeng, Gao Qianzhao, QiuYongzhi, Xu Bo, Wang Xiangyu. 2008. Chemical characteristics of surface water and groundwater in south of Tarim desert oilfield[J]. *Journal of Desert Research*, 28(2):388-394(in Chinese with English abstract).
- Fan Jingling, Xu Xinwen, Lei Jiaqiang, Zhao Jingfeng, Li Shengyu, Wang Haifeng, Zhang Jiangguo, Zhou Hongwei. 2008. Spatial and temporal variation of groundwater level along the Tarim desert highway and its influence factor analysis[J].*Chinese Science Bulletin*, (S2):43-51(in Chinese).
- Fan Jingling, Xu Xinwen, Lei Jiaqiang, Zhao Jingfeng, Wang Luhai. 2009. Spatial variability and distribution of groundwater along the Tarim desert highway[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 23(10):137-142(in Chinese with English abstract).
- Fan Jingling, Xu Xinwen, Lei Jiaqiang, Zhao Jingfeng, Wang Luhai. 2009. Measuring the velocity and direction of groundwater along Tarim desert highway[J].*Geotechnical Investigation & Surveying*, 37(8):51-55(in Chinese with English abstract).
- Fan Wei, Zhou Jinlong, Zeng Yanyan, Zhou Yinzhu, Chen Yunfei, Li Ling, Hou Jun. 2019. Hydrochemical characteristics of shallow groundwater along the Tarim desert highway[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 17(2): 157-165(in Chinese with English abstract).
- Feng Qi, Chen Guangting, Zhu Zhenda. 1996. An evolution of Holocene environment in the north of Taklimakan desert(I)[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 16(2):238-244(in Chinese with English abstract).
- Feng Wei, Yang Wenbin, Tang Jinnia, Li Wei, Dang Hongzhong, Liang Hairong, Zhang Zhishan. 2015. Deep soil water infiltration and its dynamic characteristics in Chinese desert[J]. *Journal of Desert Research*, 35(5):1362-1370(in Chinese with English abstract).
- Gao Zhong. 1987. Fun desert water science[M]. Yinchuan: Ningxia People's Publishing House (in Chinese).
- GengHenian, Zheng Zuodong, Wang Tonglu. 1961. Preliminary hydrogeological investigation report of the

- irrigation area in the middle of Hotan river[R]. The Second Brigade of Hydrogeology and Engineering Geology Bureau, Ministry of Geology (in Chinese).
- Guan Youzhi, Li Zhizhong. 1994. Element distribution in the Holocene stratum and palaeoclimate in the northern part of Taklimakan desert[J]. *Arid Land Geography*, 17(3):19-26(in Chinese with English abstract).
- Hao Aibing, Li Wenpeng, Liang Zhiqiang. 2000. A method for determining the contribution of dissolved filtration and evapotranspiration to groundwater salinity in inland drylands using TDS and $\delta^{18}\text{O}$ [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 27(1):4-6(in Chinese with English abstract).
- He Qing, Jin Lili, Yang Xinhua, Ali Mamtimin. 2011. Relationships between UV radiation and meteorological factors in the Tazhong region of the Taklimakan desert[J]. *Arid Zone Research*, 28(6):901-912(in Chinese with English abstract).
- He Qing, Xiang Ming. 1998. Analysed on a heavy precipitation in the hinterland of Taklimakan desert[J]. *Arid Zone Research*, 15(1):15-20(in Chinese with English abstract).
- Hu Shunjun, Lei Jiaqiang, Xu Xinwen, Song Yudong, Tian Changyan, Chen Xiaoping. 2008. Maximum evaporation intensity of groundwater in sandy soil in the Taklimakan desert[J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(z2): 107-111(in Chinese with English abstract).
- Jiao Peixin. 1995. Groundwater formation and distribution pattern in Taklamakan desert and its development and utilization conditions[J]. *Groundwater*, (3):97-101(in Chinese with English abstract).
- Li Huoqing, Wu Xinqing, Ali Mamtimin, Huo Wen, Yang Xinhua, He Qing, Liu Yongqiang. 2016. Comparison of the different methods to estimate soil thermal diffusivity, temperature and heat flux in sub-surface of Taklimakan desert[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 47(4):805-813(in Chinese with English abstract).
- Li Jiangfeng. 1991. *Climate of Xinjiang* [M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- Li Wenpeng, Hao Aibing, Liu Zhenying. 2000. *Groundwater development prospect study in Tarim Basin* [M]. Beijing: Geological Press (in Chinese).
- Li Wenpeng, Jiao Peixin, Zhao Zhongxian. 1995. Groundwater chemistry and environmental isotope hydrogeology in the Taklamakan Desert hinterland[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 22(4):22-24(in Chinese with English abstract).
- Li Yan, Wang Yugang, Houghton R, Tang Lisong. 2015. Hidden carbon sink beneath desert[J]. *Geophysical Research Letters*, 42(14): 5880-5887.
- Liao Xiaohe, He Qing, Jin Lili, Yang Xinhua, Ali Mamtimin, Huo Wen, Yang Fan. 2018. Change of surface Albedo, soil temperature and moisture under snow cover in the hinterland of Taklimakan desert in winter[J]. *Journal of desert research*, 38(2):393-400(in Chinese with English abstract).
- Liu Jiazhen, Chen Yanning, Li Weihong, Chen Yapeng. 2004. Analysis on the distribution and degraded succession of plant communities at lower reaches of Tarim River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 24(2):379-383(in Chinese with English abstract).
- Liu Juan, Zhao Zhijiang. 2009. Detailed hydrogeological investigation report on Hotan river gas field water supply source in Moyu county, Xinjiang[R]. Xinjiang Geological Engineering Survey Institute(in Chinese).
- Ma Jinzhu, Wang Yunquan, Zhao Yanping, Jin Xin, Ning Na, Edmunds W, Zhou Xiangyang. 2012. Spatial distribution of chloride and nitrate within an unsaturated dune sand of a cold-arid desert: Implications for paleoenvironmental records[J]. *Catena*, 96: 68-75.
- Ma Qianwen, Lai Fengbing. 2020. Grain size characteristics of populus euphratica sandpile on the west side of Hotan river in the Taklimakan desert[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 14(6):114-120(in Chinese with English abstract).
- Men Guofa, Li Yongzhi. 1996. Comprehensive study report on the hydrogeological investigation of hole KT1 in the Tazhong region of the Taklimakan desert, Xinjiang[R]. Xinjiang Hydrogeology and Engineering Geology

- Survey Institute(in Chinese).
- Men Guofa, Li Yongzhi. 1997. Comprehensive study report on the hydrogeological investigation of hole KT2in the Tazhong region of the Taklimakan desert, Xinjiang[R]. Xinjiang Hydrogeology and Engineering Geology Survey Institute(in Chinese).
- National Forestry Administration. 2018. Atlas of Sandy Deserts in China [M]. Beijing: Science Press.
- Prudic D.1994. Estimates of percolation rates and ages of water in unsaturated sediments at two Mojave Desert sites, California-Nevada[M]. US Geological Survey.
- Qian Yibing, Ishii T, Mizuno K. 1991. A preliminary study on the origin of sand in the Hotan river basin of the Taklamakan desert[J].Arid Zone Research,8(4):48-51(in Chinese with English abstract).
- State Forestry Administration. 2018. Desert Atlas of China [M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- SuMinglei, Chu Hongkuan, Liu Liang, Wang Yong, Lai Zengzheng. 2014. Detailed Hydrogeological Investigation Report on Water Supply Source for the Ground Construction Project of Block Zhonggu 8-43 in the Tazhong Region of the Taklimakan DesertNo.I Condensate Gas Field, Xinjiang[R]. Xinjiang Geological Engineering Survey Institute(in Chinese).
- The Taklamakan Desert Integrated Scientific Expedition of the Chinese Academy of Sciences. 1993. Evaluation and utilization of water resources in the Taklamakan Desert [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Wang Ping, Zhang Xuejing, Wang Tianye, Pozdniakov S. 2018. A review of the White method for the estimation of evapotranspiration from phreatophytes in arid areas[J]. Progress in Geography, 37(9):1159-1170(in Chinese with English abstract).
- Wang Xuequan, Gao Qianzhao. 1998. The precipitation infiltration and runoff recharging experiment observation in the Taklimakan desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 12(4):112-118(in Chinese with English abstract).
- Wei Yapping, Fan Jingling, Xu Xinwen, JinXiaojun, Zhou Hongwei. 2016. Hydrogeochemical modelling of groundwater chemical evolution from southern margin to hinterland of the Taklamakan desert[J]. Journal of desert research, 36(3):798-804(in Chinese with English abstract).
- Wu Yi, Guo Jianqiang. 2004. The effect of audiomagnetotelluric sounding prospecting for detecting hydrogeological characteristic in Takelamgan desert[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 1(3):269-273(in Chinese withEnglish abstract).
- Wu zheng. 2009. Deserts and their management in China [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- XiongHeigang, Han Chunxian. 2006. The relationship between traffic line change and the environment of southern Tarim basin in historical period[J]. Human Geography, 21(6):40-44(in Chinese with English abstract).
- Yang Pengnian, Deng Mingjing, Li Xia, Dong Xinguang. 2008. Respond width of groundwater level after conveying stream water to the lower reaches of the Tarim River, Xinjiang— a case study along the Yengisu section in the lower reaches of Tarim river[J]. Arid Zone Research,25(3):331-335(in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaoping, Du Jinhua, Liang Peng, Zhang Deguo, Chen Bo, Patrick R, Zhang Feng, Li Hongwei, Wang Xulong. 2021. Palaeoenvironmental changes in the central part of the Taklamakan desert, northwestern China since the late Pleistocene[J]. Chinese Science Bulletin, 66(24):3205-3218(in Chinese with English abstract).
- Yang Xinghua, Kang Yongde, Zhou Chenglong, Huo Wen, Yang Fan, Pan Honglin, Meng Lu, He Qing. 2020. Characteristics of soil particle size distribution and its effect on dust emission in Taklimakan Desert[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 36(5):167-174(in Chinese with English abstract).
- Yin Lihe, Zhang Jun, Wang Zhe, Dong Jiaqiu, Chang Liang, Li Chunyan, Zhang Pengwei, Gu Xiaofan, NieZhenlong. 2021. Groundwater circulationpatterns and its resources assessment of inland river catchments

- in northwestern China[J]. *Geology in China*, 48(4): 1094-1111(in Chinese with English abstract).
- Yin Qing. 1987. A historical study of water system changes and the rise and fall of Oasis in Hotan river—the two north-south routes through the Taklamakan desert[J]. *Social Sciences in Xinjiang*, (5):79-91(in Chinese).
- Zhang Guixiang. 1960. Report on the geological-hydrological investigation of the station area in Pishan County, Xinjiang [R]. The Second Brigade of Hydrogeology and Engineering Geology Bureau, Ministry of Geology (in Chinese).
- Zhang Hongyi, Xu Fenglin. 1994. Ancient river courses and ground water in Taklimakan desert[J]. *Xinjiang Geology*, (3):249-258(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jun, Wang Xusheng, Yin Lihe, Wang Wenke, Love A, Lu Zhengtian, Jiang Wei, Yang Guomin, Xie Yueqing, Wang Xiaoyong, Sun Fangqiang, Tang Xiaoping, Hou Guangcai, Pang Zhonghe. 2021. Inflection points on groundwater age and geochemical profiles along wellbores light up hierarchically nested flow systems[J]. *Geophysical Research Letters*, 48(16): e2020GL092337.
- Zhang Mingjiang, Zhang Zhongyi. 2015. Perception of hydrogeological conditions of the water source of Hotan gas field in the northern part of Mazatag Mountain in the Taklamakan desert hinterland[J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 38(2):10-13(in Chinese).
- Zhao Zhenyong, Tian Changyan, Zhang Ke, Wang Li. 2020. Biological improvement of saline land and comprehensive utilization of saline plant resources[J]. *High-Technology and Industrialization*, (9):64-66(in Chinese).
- Zhao Zhongxian, Li Wenpeng. 1995. Preliminary hydrogeological survey of water supply in the Tazhong 4# oilfield of the Taklimakan desert in Xinjiang[R]. Xinjiang Water Resources Department of Industry and Mining, Petroleum Water Supply Management General Station and Geological Survey Branch of Survey and Design Institute of Xinjiang Construction Corps (in Chinese).
- Zhong Xinjie, Gao Yuxing, Ma Kai, Zhang Aiqiang, Zhou Chenglong. 2016. Analysis of rainfall variation in hinterland of Taklamakan desert[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 36(6):303-307(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xueying, Jia Jian, Liu Guoqiang, Wang Fang, QiuHuimin, Sun Huaiqin. 2019. Characteristics of precipitation at hinterland of Taklimakan desert, China[J]. *Journal of Desert Research*, 39(1), 187-194(in Chinese with English abstract).
- Zhu Bingqi, Yang Xiaoping. 2007. Chemical characteristics and its causes of natural water bodies in the Taklamakan desert [J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(13):1561-1566(in Chinese).

附中文参考文献

- 陈冬. 2021. 反渗透膜及在水处理中的应用[J]. *山东化工*, 50(18):269-270.
- 陈玮. 1992. 塔克拉玛干沙漠地下水环境同位素研究[J]. *干旱区地理*, (01):17-24.
- 杜虎林, 鲍忠文, 金小军, 周宏伟, 孙书澎, 阎若森, 吴天长. 2012. 塔里木沙漠公路防护林滴灌水分利用效率分析[J]. *中国沙漠*, 32(2):359-363.
- 杜虎林, 肖洪浪, 郑威, 周宏伟, 孙书澎, 高前兆, 邱永志, 许波, 汪祥余. 2008. 塔里木沙漠油田南部区域地表水与地下水水化学特征[J]. *中国沙漠*, 28(2):388-394.
- 杜虎林;高前兆;熊建国;马振武;班兴安;周宏伟;冯起;余洪波;彭晓玉. 2007. 塔里木沙漠油田南部区域地表水与地下水资源分布特征[J]. *中国沙漠*, 27(4):698-403.
- 范敬龙, 徐新文, 雷加强, 赵景峰, 李生字, 王海峰, 张建国, 周宏伟. 2008. 塔里木沙漠公路沿线地下水位的时空变化及其影响因素分析[J]. *科学通报*, (S2):43-51.
- 范敬龙, 徐新文, 雷加强, 赵景峰, 王鲁海. 2009. 塔里木沙漠公路沿线地下水空间变异性及分布规律研究[J].

- 干旱区资源与环境, 23(10):137-142.
- 范敬龙, 徐新文, 雷加强, 赵景峰, 王鲁海. 2009. 塔里木沙漠公路沿线地下水流速流向测定[J]. 工程勘察, 37(8):51-55.
- 范薇, 周金龙, 曾妍妍, 周殷竹, 陈云飞, 李玲, 侯珺. 2019. 塔里木沙漠公路沿线浅层地下水化学特征[J]. 南水北调与水利科技, 17(2): 157-165.
- 冯起, 陈广庭, 朱震达. 1996. 塔克拉玛干沙漠北部全新世环境演变(I) [J]. 环境科学学报, 16(2):238-244.
- 冯伟, 杨文斌, 唐进年, 李卫, 党宏忠, 梁海荣, 张志山. 2015. 中国沙漠(地)深层渗漏量及动态特征[J]. 中国沙漠, 35(5):1362-1370.
- 高钟. 1987. 趣味的沙漠水科学[M]. 银川:宁夏人民出版社.
- 耿鹤年, 郑作栋, 王同禄. 1961. 和田河中游灌溉区水文地质初步勘察报告[R]. 地质部水文地质工程地质局第二大队.
- 关有志, 李志中. 1994. 塔克拉玛干沙漠北部全新世地层中的元素分布与古气候[J]. 干旱区地理, 17(3):19-26.
- 国家林业局. 2018. 中国沙漠图集[M]. 北京: 科学出版社.
- 郝爱兵, 李文鹏, 梁志强. 2000. 利用 TDS 和 $\delta^{18}O$ 确定溶滤和蒸发作用对内陆干旱区地下水咸化贡献的一种方法[J]. 水文地质工程地质, 27(1):4-6.
- 何清, 金莉莉, 杨兴华, 艾力·买买提明. 2011. 塔中紫外辐射与气象要素的关系[J]. 干旱区研究, 28(6):901-912.
- 何清, 向鸣. 1998. 塔克拉玛干沙漠腹地一次强降水天气分析[J]. 干旱区研究, 15(1):15-20.
- 胡顺军, 雷加强, 徐新文, 宋郁东, 田长彦, 陈小兵. 塔克拉玛干沙漠风沙土潜水极限蒸发强度的理论分析. 科学通报, 2008(S2):107-111.
- 焦培新. 1995. 塔克拉玛干沙漠地下水形成分布规律及其开发利用条件[J]. 地下水, (3):97-101.
- 李火青, 吴新萍, 买买提艾力·买买提依明, 霍文, 杨兴华, 何清, 刘永强. 2016 塔克拉玛干沙漠地表浅层土壤热扩散率、温度和热通量计算方法的比较研究[J]. 土壤通报, 47(4):805-813.
- 李江风. 1991. 新疆气候[M]. 北京:中国气象出版社.
- 李文鹏, 郝爱兵, 刘振英. 2000. 塔里木盆地地下水开发远景区研究 [M]. 北京:地质出版社.
- 李文鹏, 焦培新, 赵忠贤. 1995. 塔克拉玛干沙漠腹地地下水化学及环境同位素水文地质研究[J]. 水文地质工程地质, 22(4):22-24.
- 廖小荷, 何清, 金莉莉, 杨兴华, 买买提艾力·买买提依明, 霍文, 杨帆. 2018. 塔克拉玛干沙漠腹地冬季积雪下垫面地表反照率及土壤温湿度变化特征[J]. 中国沙漠, 38(2):393-400.
- 刘加珍, 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏. 2004. 塔里木河下游植物群落分布与衰退演替趋势分析[J]. 生态学报, 24(2):379-383.
- 刘娟, 赵志江. 2009. 新疆墨玉县和田河气田水源地供水水文地质详查报告[R]. 新疆地质工程勘察院.
- 马倩雯, 来风兵. 2020. 塔克拉玛干沙漠和田河西侧胡杨沙堆粒度特征 c 沙漠与绿洲气象, 14(6):114-120.
- 门国发, 李永智. 1996. 新疆塔克拉玛干沙漠塔中 KT1 号孔水文地质勘查综合研究报告[R]. 新疆水文地质工程地质勘察院.
- 门国发, 李永智. 1997. 新疆塔克拉玛干沙漠塔中 KT2 号孔水文地质勘查综合研究报告[R]. 新疆水文地质工程地质勘察院.
- 钱亦兵, 石井武政, 水野清秀. 1991. 塔克拉玛干沙漠和田河流域沙漠沙物质来源初探[J]. 干旱区研究, 8(4):48-51.
- 苏明磊, 褚宏宽, 刘亮, 王勇, 赖增铮. 2014. 新疆塔中 I 号凝析气田中古 8-中古 43 区块地面建设工程水源地供水水文地质详查报告[R]. 新疆地质工程勘察院.
- 王平, 张学静, 王田野, Pozdniakov S. 2018. 估算干旱区地下水依赖型植物蒸散发的 White 法评述[J]. 地理科学进展, 37(9):1159-1170.

- 王学全, 高前兆. 1998. 塔克拉玛干沙漠降水入渗和径流补给试验观测 [J]. 干旱区资源与环境, 12(4):112-118.
- 魏亚平, 范敬龙, 徐新文, 金小军, 周宏伟. 2016. 塔克拉玛干沙漠南部地下水化学演化模拟 [J]. 中国沙漠, 36(3):798-804.
- 吴正. 2009. 中国沙漠及其治理 [M]. 北京: 科学出版社.
- 武毅, 郭建强. 2004. 塔克拉玛干沙漠水文地质特征的音频大地电磁测深法勘查效果 [J]. 工程地球物理学报, 1(3):269-273.
- 熊黑钢, 韩春鲜. 2006. 历史时期塔里木盆地南缘交通线路变迁与环境的关系 [J]. 人文地理, 21(6):40-44.
- 杨鹏年, 邓铭江, 李霞, 董新光. 2008. 塔里木河下游间歇输水地下水响应宽度——以塔里木河下游英苏断面为例 [J]. 干旱区研究, 25(3):331-335.
- 杨小平, 杜金花, 梁鹏, 张德国, 陈波, Patrick R, 张峰, 李鸿威, 王旭龙. 2021. 晚更新世以来塔克拉玛干沙漠中部地区的环境演变 [J]. 科学通报, 66(24):3205-3218.
- 杨兴华, 康永德, 周成龙, 霍文, 杨帆, 潘红林, 孟露, 何清. 2020. 塔克拉玛干沙漠土壤粒度分布特征及其对粉尘释放的影响 [J]. 农业工程学报, 36(5):167-174.
- 殷晴. 1987. 和田水系变动和绿洲兴衰的历史考察——兼述穿越塔克拉玛干沙漠的两条南北通道 [J]. 新疆社会科学, (5):79-91.
- 尹立河, 张俊, 王哲, 董佳秋, 常亮, 李春燕, 张鹏伟, 顾小凡, 聂振龙. 2021. 西北内陆河流域地下水循环特征与地下水资源评价 [J]. 中国地质, 48(4):1094-1111.
- 张贵祥. 1960. 新疆皮山县治沙站地质-水文地质调查报告 [R]. 地质部水文地质工程地质局第二大队.
- 张鸿义, 许风林. 1994. 塔克拉玛干沙漠中的古河道与地下水 [J]. 新疆地质, (3):249-258.
- 张明江, 张忠焱. 2015. 对塔克拉玛干沙漠腹地麻扎塔格山北部和田气田水源地水文地质条件的认识 [J]. 新疆有色金属, 38(2):10-13.
- 赵振勇, 田长彦, 张科, 王黎. 2020. 盐碱地生物改良与盐生植物资源综合利用 [J]. 高科技与产业化, (9):64-66.
- 赵忠贤, 李文鹏. 1995. 新疆塔中 4# 油田供水水文地质初步勘查 [R]. 新疆水利厅工矿、石油供水管理总站、兵团勘测设计院地质勘察分院.
- 中国科学院塔克拉玛干沙漠综合科学考察队. 1993. 塔克拉玛干沙漠地区水资源评价与利用 [M]. 北京: 科学出版社.
- 中国科学院治沙队. 1964. 治沙研究 (第六号) [M]. 北京: 科学出版社, 131-213.
- 钟昕洁, 高宇星, 马凯, 张爱强, 周成龙. 2016. 塔克拉玛干沙漠腹地降雨特征分析 [J]. 水土保持通报, 36(6):303-307.
- 周雪英, 贾健, 刘国强, 王芳, 仇会民, 孙怀琴. 2019. 1997—2017 年塔克拉玛干沙漠腹地降水特征 [J]. 中国沙漠, 39(1), 187-194.
- 朱秉启, 杨小平. 2007. 塔克拉玛干沙漠天然水体的化学特征及其成因 [J]. 科学通报, 52(13):1561-1566.