

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20200317

古尔班通古特沙漠水文研究进展

金可, 卢阳, 周火明, 张乾柱, 胡月, 万丹, 闫建梅

(长江水利委员会长江科学院 重庆分院, 重庆 400026)

摘要:干旱沙漠区水资源是改善生态环境和促进动植物生存的关键。综合古尔班通古特沙漠研究成果, 分别对该沙漠气候特征、水分分布和水分来源、水分循环和生态水文过程等方面进行归纳, 指出现有研究存在的不足。在此基础上对古尔班通古特沙漠今后研究的方向和内容进行展望, 指出将该沙漠不同水体纳入整体研究, 以期丰富该沙漠生态水文机制和进一步探讨干旱区水文循环过程。

关键词:水分分布; 水分循环; 生态水文过程; 古尔班通古特沙漠

中图分类号: P56

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2022)01-0001-010

0 引言

干旱区气候干燥、降雨稀少、蒸发量大, 水资源严重匮乏, 是我国生态系统极为脆弱的地区^[1]。干旱沙漠地区水分在生态系统中扮演着重要的角色, 是水文循环的重要组成部分, 也是限制生态水文过程的主要因子, 更是制约植物生长、分布状况和抑制土壤沙漠化的关键因素^[2]。此外, 沙漠植被是水土流失和土地荒漠化的主要调控者, 区内水文循环是改善生态系统退化的直接驱动力^[3]。因此, 研究干旱区生态水文过程对指导生态环境保护和恢复意义重大。如何高效地管理和利用好干旱区, 尤其是沙漠区水资源, 是人类长期面临的挑战和重要的任务。

古尔班通古特沙漠地理位置特殊, 海洋湿气很难到达, 是我国北方沙漠重要组成部分^[1]。该沙漠降雨量和蒸发量反差巨大, 存在多种特有短命植物, 冬季存在稳定积雪覆盖, 春季雪融水对植物群落多样性和沙漠稳定性至关重要^[4]。与我国北方其它沙漠不同, 古尔班通古特沙漠降水较多、植被覆盖率较高, 其独特的生态水文过程, 吸引了大量学者的密切关注^[5-10]。该沙漠生态水文过程相对复杂, 可利用水源较多, 既有稳定降水、雪融水季节性补给, 也有地下水和凝结水贡献。此外, 沙漠周边存在乌伦古河和玛纳斯河等

地表径流, 同样具备补给沙漠的潜力。沙漠土壤水是联系降水、地表水和地下水的纽带, 可为植被提供重要水源, 对稳定沙丘和保水固土意义重大。因此, 古尔班通古特沙漠是研究干旱区生态水文过程的理想区域, 其独特的水文分布和水分循环, 能够为深入研究干旱区生态水文过程提供更多科学依据。

1 研究区地形地貌特征

古尔班通古特沙漠总面积达 $4.88 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是我国第二大沙漠, 也是我国最大的固定、半固定沙漠, 沙漠固定或半固定风沙土覆盖率达 95% 以上^[1]。沙漠地处亚欧大陆最深处的准噶尔盆地的中央(见图1), 西部为玛纳斯河, 北部为乌伦古河, 南部紧邻天山山脉, 主要由索布古尔布格莱沙漠、霍景涅里辛沙漠、德佐索腾艾里松沙漠和阔布北—阿克库姆沙漠四部分组成^[11]。沙漠内部主要由沙垄和沙丘链组成, 沙垄形态多样, 主要以梁窝状和树枝状为主, 高度 10~25 m, 垄间距 200~300 m^[12]。沙漠海拔范围为 300~600 m, 受西北风影响, 沙垄呈西北—东南走向。沙漠地表风沙土由中、细沙颗粒为主的松散物质组成。沙漠植被覆盖率高达 40~50%, 耐旱植物和短命植物种类超过 200 余种, 主要的优势植物包括梭梭、白梭梭、蛇麻黄和苦艾蒿等。

收稿日期: 2020-08-13

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2019413/CQ, CKSF2021464/CQ)

作者简介: 金可(1990—), 男, 陕西西安人, 博士, 中级工程师, 主要研究方向为水文地球化学和生态修复。E-mail: jin55669987@163.com

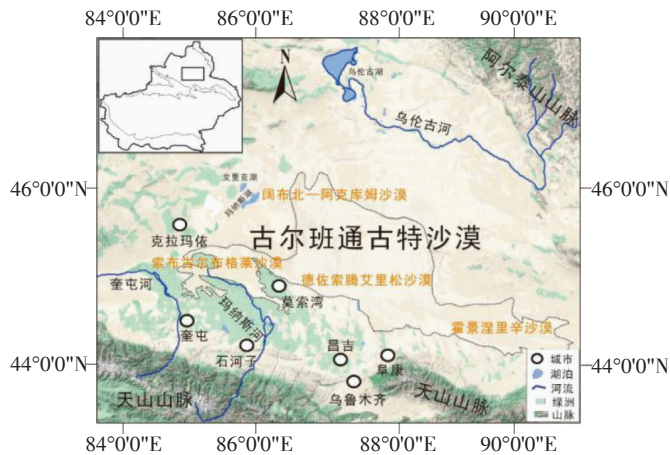


图1 古尔班通古特沙漠地理位置示意图

Fig.1 Location map of the Gurbantungut desert

2 气候时空变化特征

我国西北干旱区逐步呈现“暖湿化”特征,地面气温持续升高,大气降水增多,地表径流和湖泊水位均普遍上升^[13-14]。研究表明,新疆地区年平均气温和年降水量增加率分别为 $0.31\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $10.14\text{ mm}/10\text{ a}$,冬季降水速率和温度增率分别为 $10.2\%/10\text{ a}$ 和 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,气候整体向暖湿方向发展^[15]。新疆北部自1980年代中期以来,降水量明显增多,年际变化为 $6.09\%/10\text{ a}$,是西北干旱区年际变化最大的地区^[15-16]。准噶尔盆地是西北干旱区极端最高气温的暖中心,该地区气温升高趋势较为明显,年平均气温倾向率高达 $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ^[17-19]。受西北暖湿变化影响,位于准噶尔盆地南部边缘局部地区气候也随之改变,例如,石河子地区气温和降水均出现一定程度的突变,气候呈现出偏湿到偏干再到偏湿的变化特征^[20]。关于研究区暖湿化成因,已有研究可归纳为以下几点:(1)空气中水汽含量增加,全球变暖驱动水循环加快,降水量增多,为气候转型提供先决条件^[13];(2)寒潮活动减少,近地层风速减弱,夏季高温日数显著增多,导致气温增速高于地温^[21-22];(3)受北极涛动大气环流、太阳活动和人类活动等影响,气候变暖变湿成为干旱区的趋势^[23-24]。

古尔班通古特沙漠属于典型的温带干旱荒漠气候,夏季炎热干燥,冬季寒冷,昼夜温差较大。沙漠多年降水量为 140 mm ,沙漠腹地年降水量为 $70\sim 100\text{ mm}$ 。沙漠腹地降水量比周边多个气象站(克拉玛依、炮台、莫索湾、呼图壁和阜康等)偏少约30%,沙漠南缘年均降水量增加率为 $8\text{ mm}/10\text{ a}$,多年降水总量呈增加趋势,月平均降水量分布极不均匀^[5,25]。降雨分布

特征为夏季最多,秋季次之,冬季最少,降雨主要以小雨事件为主,但同样出现过极端暴雨情形,单日降水量达到 25 mm ,最长连续降水日达到 8 d ,最长连续无降水日为 44 d ^[5]。近期研究表明,西北干旱区年降雪量显著增加,冬季降雪约占全年降水总量的30%^[26],年极端降雪发生次数占总降雪次数的比例约3%,对年降雪总量的平均贡献可达25%^[27]。该沙漠积雪属低密度型的“干寒雪”,平均密度为 $0.14\sim 0.27\text{ g}/\text{cm}^3$,主要特征为低蒸发、高凝结,积雪受地形起伏影响不大,但受到沙漠植物梭梭影响较为明显^[4]。稳定积雪覆盖天数 $100\sim 160\text{ d}$,最大积雪厚度超过 20 cm ,依据雪深、雪密度、雪水当量和降雪变化特征,沙漠积雪期可分为积雪累计、积雪维持和积雪消融3个阶段,2月下旬至3月上旬为积雪融化期^[4,12]。沙漠年潜在蒸发量为 $2000\sim 2800\text{ mm}$,年潜在水面蒸发量为 $1700\sim 2200\text{ mm}$,沙漠积雪日均雪面蒸发率为 0.015 mm ,日最大蒸发率可达 0.3 mm ^[28]。年积温可达 $3000\sim 3500\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均气温 $6\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,1月份最冷,月平均气温为 $-22.7\sim 26.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,7月份温度最高,月平均温度 $25.5\sim 30.3\text{ }^{\circ}\text{C}$;极端最低气温为 $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$,出现在沙漠北部的福海,而极端最高气温为 $44\text{ }^{\circ}\text{C}$,出现在沙漠西部的克拉玛依^[29]。沙漠干燥度超过4,空气相对湿度平均为 $50\%\sim 60\%$,夏季(5—8月)相对湿度更是低于45%。年日照时数为 $2700\sim 3100\text{ h}$,无霜期超过 150 d ,平均风速为 $1.4\sim 2.7\text{ m/s}$,最大风速可达 20 m/s 。

气候变化将加剧干旱区水文循环和水资源分配的时空不均性,尽管气候时空变化科研成果丰硕,但目前和未来亟待解决的科学问题包括:(1)极端天气变化规律及其对水资源的影响;(2)区域气候变化与全球气候系统的内在关联性;(3)影响气候转型的环境因子需进一步量化研究。

3 沙漠水分分布和水文模拟

古尔班通古特沙漠主要水分包括降水、融雪水、土壤水、凝结水、地下水和植物水等。其中,降水、融雪水和土壤水是该沙漠植物生长的主要水源,凝结水和地下水对植物的贡献也不容忽视。此外,该沙漠南部存在大量城镇,沙漠边缘绿洲农垦耕地引水灌溉和人类生产活动对沙漠水分分布存在较大影响。区内有限的水资源大部分已被开发利用,总用水量优先分配于农业灌溉,用于生态和生活的水量相对较少^[30-32]。随着农业耕地增多,灌溉面积不断增大,水质

源开采过度,导致地下水位下降,生态用水面临巨大考验^[32-34]。人类活动也在不同程度破坏了沙漠生态环境,石油开发和沙漠公路建设等工程破坏了沙漠土层结构与土壤理化性质,造成地表扰动,影响土壤水分状况,对沙漠植被产生严重干扰^[35-37]。近几十年来,人类过度的放牧和滥采滥挖经济植物,不仅影响土壤种子库发育,也破坏了沙漠植物多样性^[38-39]。沙漠局部地区地下水开采过度,导致水质恶化,严重影响了梭梭生长发育^[34]。因此,该沙漠水资源分布和合理利用对沙漠生态健康发展尤为重要。

3.1 土壤分布与土壤水研究现状

沙漠土壤质地较粗,不同地貌部位土壤组份差异明显,沙丘迎风坡细沙与极细沙含量最高,粘土和粉砂多集中于垄间地和背风坡,垄顶则主要以中沙、粗沙和极细沙为主^[40]。风沙土粒度分布受沙垄地形影响显著,土壤粒径由小到大的顺序依次为垄间地、背风坡、迎风坡和垄顶^[40]。此外,沙漠土壤属性具有明显的区域梯度分布特征,土壤相对粒径和沙粒含量从西向东和从南向北呈现递减趋势^[41]。土壤粒度主要受植被盖度影响,沙丘表层细粒成分增加,土壤平均粒径随着沙源距离增大而减小^[42]。

沙漠土壤水分是植被发育最重要的制约因子,关于古尔班通古特沙漠土壤水空间分布、季节变化和蒸发入渗等方面的研究已取得了较多的成果^[43-45]。空间上,沙漠腹地土壤水分表现为垄间高于垄顶,坡下高于坡上^[9];时间上,春季(3—4月)为土壤水分的补给期,夏季(5—6月)为土壤水分的快速损耗期,冬季为土壤水分冻结滞水期^[9-10,46]。根据沙丘剖面土壤水分含量可将剖面自上而下依次分为活跃层(0~30 cm)、过渡层(30~60 cm)和稳定层(>60 cm)^[37,47]。沙漠流动沙丘上部各层含水量月变化尺度相对中下部各层更大,固定沙丘中部沙层含水量月变化最为显著^[48]。沙丘间地土壤含水量远高于迎风坡和背风坡,表层土壤水分变异程度呈现出丘间地最高、迎风坡和背风坡较低的特征^[49]。春季融雪后,沙丘表面融雪水在重力驱使下沿着难以透水的冻土层自坡上向坡下迁移,逐步形成土壤水分垄间最高、坡部次之和坡顶最少的分布格局^[50]。

沙漠土壤初始含水量较低,孔隙度较小,水分入渗和蒸发成为影响剖面水分分布的主要因素。沙丘土壤水分3—4月受到春季降雨和融雪水共同补给,呈现出增长的趋势,5—6月受到蒸发作用影响,开始逐步损失^[43]。季节性冻土入渗能力较大,积雪融化后以

垂直入渗的方式转化为土壤水^[8]。风沙土0~5 cm沙层的土壤含水量对土壤剖面的蒸发起决定性作用^[41],累计入渗量和湿润锋长度呈显著线性关系^[6]。强降雨影响沙丘水分再分配的最大深度约为80 cm^[51]。沙丘剖面土壤水分随着沙层深度增加而增加,土壤养分则随着沙层深度增大而减小^[52-53]。此外,空间上,沙漠土壤理化指标pH、电导率和硫酸根等从西南向东及北向南逐步递减,全氮、速效钾、速效磷和全磷等从西向东不断递增,有机质含量则从西北向东南逐步递减^[41]。

3.2 植物特征与植物水分利用研究现状

古尔班通古特沙漠植物无论在种类还是覆盖率上均具有其独特性,区内覆盖着不同的土壤生物结皮,对维持土壤稳定性和改善土壤营养分布至关重要^[54]。沙漠南缘心叶驼绒藜、梭梭、琵琶柴和沙拐枣等四种优势灌木对环境依赖性较强^[55]。沙漠短命植物种数和重要值随着经度增加而增加,随着纬度增加而减小,而长营养期草本和乔灌木类植物则与之截然相反^[56]。沙漠部分物种在资源利用方面有相同的趋势,但不同物种之间同样存在空间分离的现象^[57]。

植物水分来源是干旱沙漠植物生长的关键,也是沙漠地区水文循环不可分割的重要组成。植物可利用水分多源于根系吸水后由茎秆传输至叶片,植物叶片吸水同样能够利用小量级降水和凝结水^[58]。植物水分来源和不同时期可利用水源呈现出一定的规律性,同生境下植物可利用水源差异较大且随着季节变化呈现出不同的吸收模式^[59]。例如,沙漠优势植物梭梭4月主要利用浅层土壤水,5—9月利用地下水或土壤水^[60-61];降雨前梭梭主要吸收地下水,而降雨后则主要利用浅层土壤水^[62]。不同种类的植物对沙丘剖面沙层土壤水分的利用情况也存在差异,梭梭和白梭梭主要利用140~200 cm土层的水分,琵琶柴利用0~80 cm土层的水分,盐生假木贼和刺旋花则利用0~60 cm土层的水分^[63]。

3.3 雪融水和凝结水研究现状

古尔班通古特沙漠冬季积雪覆盖时间较长且厚度较大,降雪前土壤含水率较低,沙丘剖面未冻层土壤水对地表冻结层土壤水几乎没有补给,当积雪融化后,绝大部分通过垂直入渗的方式补给沙丘土壤^[44]。沙漠雪融水入渗可分为4个阶段,包括积雪层入渗、融雪层入渗、冻层入渗和未冻包气带入渗。沙漠区凝结水也是土壤水分不可忽视的潜在水源之一。凝结水主要产生在表层2 cm沙层,水汽主要来源于空气,凝结水形成条件主要包括适宜的相对湿度和土壤湿度,

土壤中细粒物质、苔藓和地衣等生物有利于凝结水的形成^[64-65]。沙漠昼夜温差较大,夜晚空气中的水分、表层土壤水分和植物水分遇冷形成露水,成为沙漠潜在的水源^[66]。

3.4 地下水研究现状

地下水是干旱区水资源重要组成部分,也是区内植物生存的重要水源之一。古尔班通古特沙漠地下水位从南缘到腹地逐渐加深,边缘水位5 m左右,腹地水位超过16 m^[53]。沙漠西部地下水位空间变异较大,水位范围为3.3~24.2 m,季节性变化也较为显著,最高水位出现在4月,最低水位则出现在7月^[34]。地下水类型包括松散岩类孔隙潜水和碎屑岩类孔隙裂隙承压水^[67]。研究表明,沙漠地下水主要受到蒸发浓缩影响,水化学类型以中高矿化度的Cl⁻型和Cl⁻-SO₄²⁻型为主^[68]。整体上,沙漠地下水水质较好,多年来水质变化不大,未出现明显的水质恶化现象,影响地下水环境最主要的因素是过度开采和蒸发作用^[69]。基于同位素示踪技术,沙漠地下水同位素季节变化较小,表明地下水存在稳定的水源补给^[70]。例如,霍景涅里辛沙漠地下水主要来源于山区冰雪融水和降水,潜水补给高程为1370 m,承压水补给高程为1650 m^[71]。此外,该沙漠浅层地下水主要受到融雪水和降水补给,成为沙漠腹地梭梭可利用水源^[60]。

3.5 水文模拟应用研究

水文模拟是解决水文过程和水分运移的重要手段,在干旱沙漠地区应用广泛,解决了众多生态水文过程中的重难点科学问题。学者们通过建立土壤水分特征曲线拟合模型、蒸发入渗模型、地下水流模型和同位素混合模型等对该沙漠水分分布特征和运移过程进行了深入地研究^[25,72-76]。例如,基于生态水文模型和土壤水分运移模型,学者们探索该沙漠固沙植被格局与水文过程相互作用机理,得出沙漠固沙植被与土壤水分存在明显的正反馈机制^[25]。基于Rodriguez-Iturbe模型模拟沙漠土壤水分动态运移过程,揭示了土壤水分动态对沙丘剖面生态水文的影响机理^[72]。土壤水分特征曲线Gardner模型和van Genuchten模型对揭示沙漠土壤水分分布规律效果显著,土壤水分入渗过程和运移规律等可利用Hydrus-1D/2D模型进行数值模拟^[73-74]。基于沙漠冻结融化过程中土壤水热耦合模型,模拟出沙丘各层土壤含水率和温度随着土层深度增大呈现出逐步减弱的趋势^[75]。模拟不同降水强度,揭示了生物结皮表观土壤碳通量对不同降雨量的

响应机制,得出最大降水量下,生物结皮表观土壤碳通量大于裸地^[76]。此外,通过同位素多元模型(Iso-Source),可以分析不同水源对植物生长的贡献比例,揭示植物水分利用情况^[61]。因此,水文模拟手段是研究古尔班通古特沙漠生态水文过程的重要技术手段之一。

目前,沙漠水分分布研究多集中于空间变化和季节性水分利用现状,对区域水分补给机制和内在水力联系研究尚有不足,今后研究工作应优先开展以下几个方面:(1)沙漠典型生境潜在水体之间的内在联系和转化机制;(2)植被生长不同阶段可利用水分补给机制和具体贡献比率;(3)局部水文循环规律及对沙漠生境的影响过程。

4 沙漠生态水文过程

尽管古尔班通古特沙漠存在多种水体,但并不是相互独立,其之间存在紧密的水力联系,形成该沙漠重要的水文系统。研究不同水分存储形式,对深入揭示该沙漠生态水文过程具有指导意义。

水分入渗和蒸发成为影响沙丘剖面土壤水分分布的主要因素,降水和融雪水是沙漠土壤水分的主要补给源。通常,沙丘表面会覆盖约30 cm的干沙层,对促进水分入渗和抑制湿沙层水分损失起到积极作用^[77]。小量级降雨对表层土壤水分有一定补给,而强降雨情形下能够透过干沙层补给到较深的沙层,成为剖面沙层土壤水分的有效补给来源^[51]。沙漠冬季积雪在春季融化后,绝大部分可转化为土壤水分^[12]。此外,表层土壤水分同样受到空气水分凝结后补给,凝结水成为表层土壤水分的潜在补给来源之一^[65]。因此,沙漠浅层土壤水分主要受到常规降雨和凝结水的补给,而深层土壤水分则来自融雪水和强降雨垂直入渗补给。

植物蒸散发是沙漠生态水文过程及水量转化的重要组成部分。植物蒸腾速率与大气温度、地表温度和光照强度有着明显的正相关关系,而与相对湿度呈负相关。植物水分蒸腾不仅受到气候条件限制,也受到自身生态特征影响。沙漠植物梭梭蒸腾速率日变化起伏较大,怪柳蒸腾速率日变化则呈现小幅度波动^[78-79]。梭梭不同生长阶段蒸发量差异显著,萌发期蒸散量逐月增大至峰值,生长期逐月减小,枯落期又逐步回升^[80]。植物茎干液流速率不仅受到气象因素影响,同时也受到土壤水分条件限制,直径越大的植物

耗水量越多^[81],沙漠原生梭梭维持正常生长的整个生育期总耗水量为95~117 mm^[82]。沙漠植物不仅存在水分损耗,同时也利用沙漠水资源维持自身生长需求。例如,不同降水强度的降雨和不同季节的降水对该沙漠植物起到截然不同的影响,<5 mm的降雨能够被部分植物吸收利用,5月份降雨对短命植物贡献最大^[6~7]。土壤沙层水分主要受到地下水水位波动和毛管上升水影响,沙漠建群种能够通过毛管水上升利用地下水^[83]。当降水发生后,植物可能增大对土壤水分的吸收,同时降低对地下水的吸收,也可能保持原先对土壤水和地下水的利用方式^[60~61]。地下水位和水质变化也关系到沙漠植物发育,地下水位超过8 m时梭梭种群出现衰退的趋势,当地下水位小于4 m时,地下水矿化度促使土壤表层盐分积累,从而降低了沙漠物种多样性^[66]。一些学者通过环境同位素技术,开展了古尔班通古特沙漠不同水源对植物生长影响和生态水文过程等相关研究^[60~61,70~71]。浅层土壤水、降水和融雪水存在相似的同位素组成,表明土壤水潜在补给水源为降水和融雪水^[70]。

沙漠生态水文过程是复杂且动态变化的,目前研究集中于沙漠代表区域或短暂周期,对深入认知沙漠生态水文循环存在一定不足。今后研究应建立长期动态监测系统,深入分析沙漠降雨时空分布特征与水汽来源,揭示土壤水分运移规律,确定融雪关键节点及影响因素,进一步研究蒸发入渗与植物蒸腾过程对水分传递和转化的影响机制,为该沙漠生态水文研究提供更多理论支撑。

5 问题和展望

5.1 问题

目前学者们针对古尔班通古特植物分布、水分存储形式和生态水文过程等多个方面开展了大量的研究,对该沙漠水文分布和水分循环有了较多的认识。但是,由于该沙漠地理位置特殊,冬季积雪覆盖时间较长等,样品采集和监测存在较大困难,对深入研究该沙漠水文循环存在以下不足:(1)大多研究集中在沙漠南缘,对其它典型生境区域研究欠缺,降雨数据主要来自沙漠周边气象站,未对沙漠腹地降水时空分布和季节变化特征进行深入研究;(2)沙丘剖面土壤水分是联系大气、地下水和植物水的纽带,不同水分存储形式和内在转化机制仍缺少关键数据支撑;(3)孤立或割裂古尔班通古特沙漠不同水体之间的联系,

未将多种水体纳入统一的整体,生态水文过程定量分析不同水体利用率和贡献度有待进一步加强。

5.2 展望

基于已有研究成果,今后对古尔班通古特沙漠生态水文研究应体现在以下几个方面。首先,研究方法上应用环境同位素和水文化学等示踪方法,建立该沙漠同位素水文模型,探索不同水分内在联系和转化过程。其次,系统采集沙漠典型地貌和不同生境降水、土壤水和地下水等样品,监测沙漠腹地降水,揭示连续强降雨入渗补给沙丘剖面土壤水分的过程和影响机制,阐明融雪过程、地下水位季节变化和植物水分利用条件等生态水文机理。最后,将沙漠降水、融雪水、土壤水、地下水和植物水分等纳入统一的系统,研究各个水分在该沙漠生态水文过程中的作用机制和转化规律,进一步丰富干旱区沙漠水文循环理论,为该沙区水资源合理利用、生态恢复和拟制沙漠化提供更多基础资料。

参考文献:

- [1] 朱震达, 吴正, 刘恕, 等. 中国沙漠概论[M]. 北京:科学出版社, 1980:1-107. (ZHU Zhenda, WU Zheng, LIU Shu, et al. An Outline of Chinese Deserts [M]. Beijing: Science Press, 1980:1-107. (in Chinese))
- [2] 董光荣. 中国沙漠形成演化气候变化与沙漠化研究[M]. 北京:海洋出版社, 2002:560-568. (DONG Guangrong. Study on climate Change and Desertification of Desert Formation and Evolution in China [M]. Beijing: Ocean Press, 2002:560-568. (in Chinese))
- [3] 赵文智, 程国栋. 干旱区生态水文过程研究若干问题评述[J]. 科学通报, 2001,46(22):1851-1857. (ZHAO Wenzhi, CHENG Guodong. Review on some problems of eco-hydrological process in arid areas [J]. Chinese Science Bulletin, 2001,46(22):1851-1857. (in Chinese))
- [4] 周宏飞, 周宝佳, 汤英, 等. 古尔班通古特沙漠季节性冻土入渗特征试验研究[J]. 干旱区地理, 2009,32(4):532-536. (ZHOU Hongfei, ZHOU Baojia, TANG Ying, et al. Experimental study on infiltration characteristics of seasonal frozen soils in Gurbantunggut Desert [J]. Arid Land Geography, 2009,32(4):532-536. (in Chinese))
- [5] 孙东霞, 杨建成. 古尔班通古特沙漠腹地与周边的降水特征分析[J]. 干旱区地理, 2010,33(5):769-774. (SUN Dongxia, YANG Jiancheng. Precipitation characteristics at the hinterland of Gurbantunggut Desert and surrounding areas [J]. Arid Land Geography, 2010,33(5):769-774. (in Chinese))
- [6] 王亚婷, 唐立松. 古尔班通古特沙漠不同生活型植物对小雨量降雨的响应[J]. 生态学杂志, 2009,28(6):1028-1034. (WANG Yating, TANG Lisong. Response of different life form plants in Gurbantunggut Desert to small rainfall events [J]. Chinese Journal of Ecology, 2009,28(6):1028-1034. (in Chinese))

- [7] 李巧梅, 曾勇, 孙钦明, 等. 决定古尔班通古特沙漠短命植物分布的关键因子是5月降水[J]. 生态学杂志, 2014,33(8):2038–2045. (LI Qiaomei, ZENG Yong, SUN Qinning, et al. Precipitation in May is a key factor to determinate the distribution of ephemeral plants in Gurbantunggut Desert [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014,33(8):2038–2045. (in Chinese))
- [8] 汤英. 古尔班通古特沙漠融雪水文过程试验与模拟[D]. 石河子:石河子大学, 2008. (TANG Ying. Experimenting and Modelling on the Snowmelt Hydrological Process in Gurbantunggut Desert of Xingjiang, China [D]. Shihezi: Shihezi University, 2008. (in Chinese))
- [9] 赵从举, 康慕谊, 雷加强. 古尔班通古特沙漠腹地土壤水分时空分异研究[J]. 水土保持学报, 2004,18(4):158–161. (ZHAO Congju, KANG Mui, LEI Jiaqiang. Space-time distribution of soil moisture in hinterland of Gurbantunggut Desert [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004,18(4):158–161. (in Chinese))
- [10] 杨艳凤, 周宏飞, 徐利岗. 古尔班通古特沙漠原生梭梭根区土壤水分变化特征[J]. 应用生态学报, 2011,22(7):1711–1716. (YANG Yanfeng, ZHOU Hongfei, XU Ligang. Dynamic variations of soil moisture in Haloxylon ammodendron root zone in Gurbantunggut Desert [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011,22(7):1711–1716. (in Chinese))
- [11] 李杨, 刘艳, 张璞, 等. 古尔班通古特沙漠NDVI时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2009,26(5):686–693. (LI Yang, LIU Yan, ZHANG Pu, et al. Research on the spatiotemporal change of NDVI in the Gurbantunggut Desert [J]. Arid Zone Research, 2009,26(5):686–693. (in Chinese))
- [12] 胡顺军, 陈永宝, 朱海. 古尔班通古特沙漠南缘融雪水土壤入渗量[J]. 应用生态学报, 2015,26(4):1007–1015. (HU Shunjun, CHEN Yongbao, ZHU Hai. Soil infiltration of snowmelt water in the southern Gurbantunggut Desert, Xinjiang, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015,26(4):1007–1015. (in Chinese))
- [13] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003,23(2):152–164. (SHI Yafeng, SHEN Yongping, LI Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China [J]. Quaternary Sciences, 2003,23(2):152–164. (in Chinese))
- [14] 任国玉, 袁玉江, 柳艳菊, 等. 我国西北干燥区降水变化规律[J]. 干旱区研究, 2016,33(1):1–19. (REN Guoyu, YUAN Yujiang, LIU Yanju, et al. Changes in precipitation over Northwest China [J]. Arid Zone Research, 2016,33(1):1–19. (in Chinese))
- [15] 吴秀兰, 张太西, 王慧, 等. 1961–2017年新疆区域气候变化特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020,14(4):27–34. (WU Xiulan, ZHANG Taixi, WANG Hui, et al. Characteristics of temperature and precipitation change in Xinjiang During 1961–2017 [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2020,14(4):27–34. (in Chinese))
- [16] 刘芸芸, 张雪芹, 孙杨. 全球变暖背景下西北干旱区雨季的降水时空变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2011,7(2):97–103. (LIU Yunyun, ZHANG Xueqin, SUN Yang. Spatiotemporal variations of rainy season precipitation in Northwest China arid region under global warming [J]. Advances in Climate change Research, 2011,7(2):97–103. (in Chinese))
- [17] 赵传成, 王雁, 丁永建, 等. 西北地区近50年气温及降水的时空变化[J]. 高原气象, 2011,30(2):385–390. (ZHAO Chuancheng, WANG Yan, DING Yongjian, et al. Spatial-temporal variations of temperature and precipitation in Northern China in recent 50 years [J]. Plateau Meteorology, 2011,30(2):385–390. (in Chinese))
- [18] 师银芳, 赵军. 中国西北干旱区极端气温的时空变化特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014,50(4):529–533. (SHI Yinfang, ZHAO Jun. Study on spatial-temporal characteristics of extreme temperature in arid areas of Northwest China [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2014,50(4):529–533. (in Chinese))
- [19] 商沙沙, 廉丽妹, 马婷, 等. 近54a中国西北地区气温和降水的时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2018,35(1):68–76. (SHANG Shasha, LIAN Lishu, MA Ting, et al. Spatiotemporal variation of temperature and precipitation in Northwest China in recent 54 years [J]. Arid Zone Research, 2018,35(1):68–76. (in Chinese))
- [20] 刘世薇, 周华荣, 梁雪琼, 等. 新疆石河子地区气候变化特征分析[J]. 干旱区农业研究, 2012,30(1):230–237. (LIU Shiwei, ZHOU Huarong, LIANG Xueqiong, et al. Study on the trend of climate change in Shihezi [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012,30(1):230–237. (in Chinese))
- [21] 符睿, 韦志刚, 文军, 等. 中国西北干旱区地—气温差变化成因分析[J]. 中国沙漠, 2010,30(6):1442–1449. (FU Rui, WEI Zhigang, WEN Jun, et al. Causes of variation of earth-air temperature difference in arid regions of Northwest China [J]. Journal of Desert Research, 2010,30(6):1442–1449. (in Chinese))
- [22] 范丽红, 崔彦军, 何清, 等. 新疆石河子地区近40a来气候变化特征分析[J]. 干旱区研究, 2006,23:334–338. (FAN Lihong, GUI Yanjun, HE Qing, et al. Analysis on the climate change characteristics in the Shihezi region, Xinjiang in recent 40 years [J]. Arid Zone Research, 2006,23:334–338. (in Chinese))
- [23] 闫炎, 赵昕奕, 周力平. 近50年中国西北地区干湿演变的时空特征及其可能成因探讨[J]. 干旱区资源与环境, 2010,24(4):38–44. (YAN Yan, ZHAO Xinyi, ZHOU Liping. The temporal and spatial characteristics of aridity and wetness variation in northwest China during recent 50 years and the factor analysis [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010,24(4):38–44. (in Chinese))
- [24] 张扬, 楚新正, 杨少敏, 等. 近56a新疆北部地区气候变化特征[J]. 干旱区研究, 2019,36(1):215–222. (ZHANG Yang, CHU Xinzheng, YANG Shaomin, et al. Climate change in North Xinjiang in recent 56 years [J]. Arid Zone Research, 2019,36(1):215–222. (in Chinese))
- [25] 王新军. 古尔班通古特沙漠固沙植被格局与水文过程的关系研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2017. (WANG Xinjun. Study on Relationship of Sand-Fixating Vegetation Pattern and Hydrological Process in Gurbantonggut Desert [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2017. (in Chinese))
- [26] 马荣, 张明军, 王圣杰, 等. 近50a西北干旱区冬季积雪日数变化

- 特征[J]. 自然资源学报, 2018,33(1):127–138. (MA Rong, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Variation characteristics of snow cover days in winter in arid region of Northwest China in last 50 years [J]. Journal of Natural Resources, 2018,33(1):127–138. (in Chinese))
- [27] 赵求东, 赵传成, 秦艳, 等. 中国西北干旱区降雪和极端降雪变化及未来趋势[J]. 冰川冻土, 2020,42(1):81–90. (ZHAO Qiudong, ZHAO Chuancheng, QIN Yan, et al. The change features and future trend of snowfall and extreme snowfall in the arid areas of Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1):81–90. (in Chinese))
- [28] 周宝佳. 古尔班通古特沙漠地区雪面蒸发—凝结试验研究[D]. 石河子:石河子大学, 2009. (ZHOU Baojia. Experimental Study on Snow Evaporation and Condensation in Gurbantunggut Desert [D]. Shihezi: Shihezi University, 2009. (in Chinese))
- [29] 杨瑞红. 古尔班通古特沙漠梭梭种群及群落动态特征和稳定性评价[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2017. (YANG Ruihong. The Research of Stability and Population & Community Dynamics of Haloxylon Ammodendron in Gurbantunggut Desert [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2017. (in Chinese))
- [30] 张汝山. 新疆玛纳斯河流域水资源合理配置研究[J]. 中国水运, 2014,14(4):221–222. (ZHANG Rushan. Research on rational allocation of water resources in Xinjiang Manas River Basin [J]. China Water Transport, 2014,14(4):221–222. (in Chinese))
- [31] 张正勇. 玛纳斯河流域产流区水文过程模拟研究[D]. 石河子:石河子大学, 2018. (ZHANG Zhengyong. Modeling Hydrological Processes in Main Runoff Generating Area of Manasi River Basin, Xinjiang [D]. Shihezi: Shihezi University, 2018. (in Chinese))
- [32] 李妙伶. 准噶尔盆地南缘主要荒漠灌木不同生境条件下的蒸腾耗水特征[D]. 石河子:石河子大学, 2011. (LI Miaoling. Transpiration Characteristics of Three Desert Shrubs under Different Habitats on the Southern Margin of the Junggar Basin [D]. Shihezi: Shihezi University, 2011. (in Chinese))
- [33] 杜玉娇. 莫索湾灌区地下水水位动态变化及数值模拟研究[D]. 石河子:石河子大学, 2013. (DU Yujiao. Research on Groundwater Level Dynamic Changes and Numerical Simulation in Mosuowan Irrigation Area [D]. Shihezi: Shihezi University, 2013. (in Chinese))
- [34] 曾晓玲, 刘彤, 张卫宾, 等. 古尔班通古特沙漠西部地下水位和水质变化对植被的影响[J]. 生态学报, 2012,32(5):1490–1501. (ZENG Xiaoling, LIU Tong, ZHANG Weibin, et al. Variations in groundwater levels and quality and their effects on vegetation in the western Gurbantunggut Desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012,32(5):1490–1501. (in Chinese))
- [35] 钱亦兵, 张立运, 吴兆宁. 工程行为对古尔班通古特沙漠植被的破坏及恢复[J]. 干旱区研究, 2001,18(4):51–55. (QIAN Yibing, ZHANG Liyuan, WU Zhaoning. Destruction and regeneration of the desert vegetation in the engineering activities in the Gurbantunggut Desert [J]. Arid Zone Research, 2001,18(4):51–55. (in Chinese))
- [36] 钱亦兵, 张立运, 雷加强, 等. 人为影响下古尔班通古特沙漠小尺度生态环境变化[J]. 干旱区资源与环境, 2003,17(6):82–88. (QIAN Yibing, ZHANG Liyuan, LEI Jiaqiang, et al. Eco-environmental change of the Gurbantunggut Desert in a small scale under the Human impact [J]. Arid Land Resources and Environment, 2003,17(6):82–88. (in Chinese))
- [37] 蒋进, 王雪芹, 雷加强. 古尔班通古特沙漠工程防护体系内土壤水分变化规律[J]. 水土保持学报, 2003,3:74–77. (JIANG Jin, WANG Xueqin, LEI Jiqiang. Soil moisture distribution in straw barrier system in Gurbantunggut Desert of Xinjiang, China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003,3:74–77. (in Chinese))
- [38] 吴涛, 王雪芹, 盖世广, 等. 春夏季放牧对古尔班通古特沙漠南部土壤种子库和地上植被的影响[J]. 中国沙漠, 2009,29(3):499–507. (WU Tao, WANG Xueqin, GAI Shiguang, et al. Effect of grazing in spring–summer on soil seed bank and vegetation in southern part of Gurbantunggut Desert [J]. Journal of Desert Research, 2009,29(3):499–507. (in Chinese))
- [39] 张立运, 陈昌笃. 论古尔班通古特沙漠植物多样性的一般特点[J]. 生态学报, 2002,22(11):1923–1932. (ZHANG Liyuan, CHEN Changdu. On the general characteristics of plant diversity of Gurbantunggut Sandy Desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002,22(11): 1923–1932. (in Chinese))
- [40] 钱亦兵, 吴兆宁, 杨海峰, 等. 古尔班通古特沙漠南部风沙土粒度分布的空间异质性[J]. 干旱区地理, 2009,32(5):655–661. (QIAN Yibin, WU Zhaoning, YANG Haifeng, et al. Spatial heterogeneity for grain size distribution of eolian sand soil in the southern Gurbantunggut Desert [J]. Arid Land Geography, 2009,32(5):655–661. (in Chinese))
- [41] 冯雷, 刘彤, 孙钦明, 等. 古尔班通古特沙漠南部土壤属性空间分布特征[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2015,33(3):287–293. (FENG Lei, LIU Tong, SUN Qinming, et al. Spatial distribution features of soil properties in Southern Gurbantunggut Desert [J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2015,33(3):287–293. (in Chinese))
- [42] 王永兵, 李亚萍. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭固沙林土壤粒度的分异规律[J]. 水土保持通报, 2020,40(3):75–80. (WANG Yongbin, LI Yaping. Soil particle size differentiation of Haloxylon Ammodendron sand break forest in Southern margin of Gurbantunggut Desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(3): 75–80. (in Chinese))
- [43] 朱海, 胡顺军, 陈永宝. 古尔班通古特沙漠南缘固定沙丘土壤水分时空变化特征[J]. 土壤学报, 2016,53(1):117–126. (ZHU Hai, HU Shunjun, CHEN Yongbao. Spatio-temporal variation of soil moisture in Fixed dunes at the southern edge of Gurbantunggut Desert[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016,53(1):117–126. (in Chinese))
- [44] ZHU H, HU S J, YANG J S, et al. Spatio-temporal variation of soil moisture in a fixed dune at the southern edge of the Gurbantunggut Desert in Xinjiang, China [J]. Journal of Arid Land, 2019,11(5):685–700.
- [45] 翟翠霞, 马健, 李彦. 古尔班通古特沙漠风沙土土壤蒸发特征[J].

- 干旱区地理, 2007,30(6):805–811. (ZHAI Cuixia, MA Jian, LI Yan. Soil evaporation of aeolian sandy soil in Gurbantunggut Desert [J]. Arid Land Geography, 2007,30(6):805–811. (in Chinese))
- [46] 陈钧杰, 蒋进, 付恒飞, 等. 古尔班通古特沙漠腹地土壤水分动态[J]. 干旱区地理, 2009,32(4):537–543. (CHEN Junjie, JIANG Jin, FU Hengfei, et al. Soil moisture variation in south Gurbantunggut Desert[J]. Arid Land Geography, 2009,32(4):537–543. (in Chinese))
- [47] 宋春武, 蒋进, 付恒飞, 等. 古尔班通古特沙漠人工林土壤水分及其影响因素[J]. 干旱区地理, 2009,32(5):704–710. (SONG Chunwu, JIANG Jin, FU Hengfei, et al. Soil moisture in plantation area and its affecting factors [J]. Arid Land Geography, 2009,32(5):704–710. (in Chinese))
- [48] 张世军, 张希明, 王雪梅, 等. 古尔班通古特沙漠边缘春秋沙丘水分状况初步研究[J]. 干旱区资源与环境, 2005,19(3):131–136. (ZHANG Shijun, ZHANG Ximing, WANG Xuemei, et al. The research on soil moisture of shifting dune and fixed dune at fringe of Gurbantunggut Desert [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005,19(3):131–136. (in Chinese))
- [49] 张建兵, 熊黑钢, 郭宇翔, 等. 古尔班通古特沙漠南缘春季沙丘不同部位表层土壤水分空间变异性研究[J]. 水土保持研究, 2010,17(2):125–130. (ZHANG Jianbing, XIONG Heigang, GUO Yuxiang, et al. Study on spatial variability of surface soil moisture in different positions of sand dunes in south Gurbantunggut Desert [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010,17(2):125–130. (in Chinese))
- [50] 秦艳芳, 陈曦, 周可法, 等. 古尔班通古特沙漠春季土壤含水量空间格局[J]. 干旱区地理, 2013,36(6):1041–1048. (QIAN Yanfang, CHEN Xi, ZHOU Kefa, et al. Spatial pattern of soil water content in spring of the Gurbantunggut Desert [J]. Arid Land Geography, 2013,36(6):1041–1048. (in Chinese))
- [51] 刘昊, 周宏飞, 刘翔. 强降雨条件下沙丘土壤水分运移特征分析[J]. 水土保持学报, 2015,29(2):157–163. (LIU Hao, ZHOU Hongfei, LIU Xiang. Analysis of soil moisture migration on sand dune under the condition of heavy rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015,29(2):157–163. (in Chinese))
- [52] 李从娟, 李彦, 马健. 古尔班通古特沙漠土壤化学性质空间异质性的尺度特征[J]. 土壤学报, 2011,48(2):302–310. (LI Congjun, LI Yan, MA Jian. Scale characteristics of spatial heterogeneity of soil chemical properties in Gurbantunggut Desert [J]. Acta Pedologica Sinica, 2011,48(2):302–310. (in Chinese))
- [53] 李从娟, 雷加强, 徐新文, 等. 古尔班通古特沙漠土壤水分与化学性质的空间分布[J]. 生态学报, 2014,34(15):4380–4389. (LI Congjun, LEI Jiaqiang, XU Xinwen, et al. Spatial pattern for soil water and chemical properties in Gurbantunggut Desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(15):4380–4389. (in Chinese))
- [54] WU M, ZHANG Y M, DOWNING A. Comparative study of nitrogenase activity in different types of biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert, Northwestern China [J]. Journal of Arid Environment, 2009,73:828–833.
- [55] 贾亚敏, 刘彤, 骆柳, 等. 古尔班通古特沙漠南缘主要灌木的空间分布格局[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2007,25(5):575–580. (JIA Yamin, LIU Tong, LUO Chen, et al. The comparative research on the spatial heterogeneity of main shrub vegetation in southern edge of Gurbantunggut Desert [J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2007,25(5):575–580. (in Chinese))
- [56] 刘忠权. 古尔班通古特沙漠南缘植被物种多样性及其分异研究[D]. 石河子:石河子大学, 2011. (LIU Zhongquan. Species Diversity and Spatial Variation of Plant Community in the Southern Part of the Gurbantunggut Desert [D]. Shihezi: Shihezi University, 2011. (in Chinese))
- [57] 孙园园, 刘彤, 刘尊驰, 等. 古尔班通古特沙漠南缘优势物种的种间关联特征[J]. 干旱区资源与环境, 2016,30(1):169–174. (SUN Yanyuan, LIU Tong, LIU Zhuchi, et al. Interspecific associations characteristics of dominant species in the southern Gurbantunggut Desert [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016,30(1):169–174. (in Chinese))
- [58] 郑新军, 李嵩, 李彦. 准噶尔盆地荒漠植物的叶片水分吸收策略[J]. 植物生态学报, 2011,35(9):893–905. (ZHENG Xinjun, LI Song, LI Yan. Leaf water uptake strategy of desert plants in the Junggar Basin, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(9):893–905. (in Chinese))
- [59] 周海, 郑新军, 唐立松, 等. 准噶尔盆地东南缘多枝怪柳、白刺和红砂水分来源的异同[J]. 植物生态学报, 2013,37(7):665–673. (ZHOU Hai, ZHENG Xinjun, TANG Lisong, et al. Differences and similarities between water sources of *Tamarix ramosissima*, *Nitraria sibirica* and *Reaumuria soongorica* in the southeastern Junggar Basin [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013,37(7):665–673. (in Chinese))
- [60] 戴岳, 郑新军, 唐立松, 等. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭水分利用动态[J]. 植物生态学报, 2014,38(11):1214–1225. (DAI Yue, ZHENG Xinjun, TANG Lisong, et al. Dynamics of water usage in *Haloxylon ammodendron* in the southern edge of the Gurbantunggut desert [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014,38(11):1214–1225. (in Chinese))
- [61] 傅思华, 胡顺军, 李浩, 等. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭(*Haloxylon ammodendron*)群落优势植物水分来源[J]. 中国沙漠, 2018,38(5):1024–1032. (FU Sihua, HU Shunjun, LI Hao, et al. Water sources of dominant plants in *Haloxylon ammodendron* community at the southern edge of Gurbantunggut Desert [J]. Journal of Desert Research, 2018,38(5):1024–1032. (in Chinese))
- [62] 闫珂, 杨广, 何新林, 等. 准噶尔盆地南缘梭梭水分来源与传输规律分析[J]. 干旱区资源与环境, 2020,34(5):201–208. (YAN Ke, YANG Guang, HE Xinlin, et al. Water sources and transport for *Haloxylon ammodendron* in southern margin of Junggar Basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020,34(5):201–208. (in Chinese))
- [63] 彭丽萍, 戴岳, 师庆东. 新疆准东荒漠区5种典型植物水分来源[J]. 干旱区研究, 2018,35(5):1146–1152. (PENG Liping, DAI Yue, SHI Qingdong. Water sources of five typical plant species in desert in the east Junggar Basin, Xinjiang [J]. Arid Zone Re-

- search, 2018,35(5):1146–1152. (in Chinese))
- [64] 陈荣毅. 古尔班通古特沙漠表层土壤凝结水水汽来源特征分析[J]. 中国沙漠, 2012,32(4):985–989. (CHEN Rongyi. Source of soil condensation water in the Gurbantunggut Desert [J]. Journal of Desert Research, 2012,32(4):985–989. (in Chinese))
- [65] 陈荣毅, 魏文寿, 王敏仲, 等. 古尔班通古特沙漠地表土壤凝结水形成影响因素分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2015,9(1):1–5. (CHEN Rongyi, WEI Wenshou, WANG Minzhong, et al. Factors effecting the total amount of condensation water formation on topsoil in the Gurbantunggut Desert [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2015,9(1):1–5. (in Chinese))
- [66] ZHANG J, ZHANG Y M, ALISON D, et al. The influence of biological soil crusts on dew deposition in Gurbantunggut Desert, Northwestern China [J]. Journal of Hydrology, 2009,379:220–228.
- [67] 王才川, 张革新, 周晓萌. 准噶尔盆地古尔班通古特沙漠地区水文地质特征及对石油开发的建议[J]. 河南科技, 2018,652(9):74–76. (WANG Caichuan, ZHANG Gexin, ZHOU Xiaomeng. The Hydro-geological characteristics of the Junggar Basin Gurbantunggut Desert and the significance to the Oil development [J]. Henan Science and Technology, 2018,652(9):74–76. (in Chinese))
- [68] 潘希哲, 王旭奎, 张鹏飞, 等. 新疆准噶尔盆地浅层地下水水化学类型特征及成因研究[J]. 地下水, 2020,42(3):21–22. (PAN Xizhe, WANG Xukui, ZHANG Pengfei, et al. Hydrochemical feature and factor of shallow groundwater in junggar basin, xinjiang [J]. Ground water, 2020,42(3):21–22. (in Chinese))
- [69] 魏征, 吴彬, 侯利军, 等. 古尔班通古特沙漠地下水水质现状及变化趋势分析[J]. 水资源与水工程学报, 2014,25(4):175–179. (WEI Zheng, WU Bin, HOU Lijun, et al. Analysis of groundwater quality status and change trend in Gurbantunggut desert [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2014,25(4):175–179. (in Chinese))
- [70] 李晖, 蒋忠诚, 周宏飞, 等. 准噶尔盆地降水、土壤水和地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 d 变化特征—以中国生态系统研究网络阜康站为例[J]. 水土保持研究, 2008,15(5):105–108. (LI Hui, JIANG Zhongcheng, ZHOU Hongfei, et al. Variation characteristics of oxygen and hydrogen stable isotope in precipitation, soil water and groundwater in the Junggar Basin: Taking Fukang station of Desert Ecology as a case [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008,15(5):105–108. (in Chinese))
- [71] 杜明亮, 吴彬, 胡钟林, 等. 霍景涅里辛沙漠地下水化学和同位素特征[J]. 中国沙漠, 2018,38(4):858–864. (DU Mingliang, WU Bin, HU Zhonglin, et al. Characteristics of hydrochemistry and isotopes of groundwater in the Hopenne Lee Sin desert and indicator effects [J]. Journal of Desert Research, 2018,38(4):858–864. (in Chinese))
- [72] 尹鑫卫, 郑新军, 李彦, 等. 古尔班通古特沙漠南缘固定沙丘坡面土壤水分动态随机模拟[J]. 应用生态学报, 2019,30(1):146–156. (YIN Xinyue, ZHENG Xinjun, LI Yan, et al. Hillslope-scale stochastic simulation of soil moisture dynamics in fixed dunes at the southern edge of Gurbantunggut Desert, China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019,30(1):146–156. (in Chinese))
- [73] 董义阳, 胡顺军, 赵成义, 等. 采用一维水平入渗测定古尔班通古特沙漠南缘丘间地风沙土渗透系数[J]. 干旱区地理, 2017,40(4):729–737. (DONG Yiyang, HU Shunjun, ZHAO Chenyi, et al. One-dimensional horizontal infiltration test for determining permeability coefficient of aeolian sandy soil in interdune at the southern edge of Gurbantunggut Desert [J]. Arid Land Geography, 2017,40(4):729–737. (in Chinese))
- [74] 汤英, 徐利岗, 张红玲, 等. HYDRUS-1D/2D 在土壤水分入渗过程模拟中的应用[J]. 安徽农业科学, 2011,39(36):22390–22393. (TANG Ying, XU Ligang, ZHANG Hongling, et al. Application of HYDRUS-1D/2D in process of soil water infiltration simulation [J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2011,39(36):22390–22393. (in Chinese))
- [75] 陈泉萌, 文方, 顾宗斌, 等. 季节性冻土的水热作用机制研究——以古尔班通古特沙漠南缘为例[J]. 灌溉排水学报, 2019,38(12):51–56. (CHEN Xiaomeng, WEN Fang, GU Zongbin, et al. Study on the hydrothermal mechanism of seasonal frozen soil: A case study about the Southern Margin of the Gurbantunggut Desert [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019,38(12):51–56. (in Chinese))
- [76] 吴林, 苏延桂, 张元明. 模拟降水对古尔班通古特沙漠生物结皮表观土壤碳通量的影响[J]. 生态学报, 2012,32(13):4103–4113. (WU Lin, SU Yangui, ZHANG Yuanming. Effects of simulated precipitation on apparent carbon flux of biologically crusted soils in the Gurbantunggut Desert in Xinjiang, Northwestern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012,32(13):4103–4113. (in Chinese))
- [77] 赵景波, 陈志青, 马延东, 等. 巴丹吉林沙漠沙山区高含量薄膜水与水分平衡研究[J]. 地理科学, 2017,37(6):960–966. (ZHAO Jingbo, CHEN Zhiqing, MA Yandong, et al. Film moisture with high content in sand layer and its movement in mega-dune of the Badain Jaran Desert. Scientia Geographica Sinica, 2017,37(6):960–966. (in Chinese))
- [78] 陈思, 何新林, 杨广, 等. 玛纳斯河流域荒漠植被单株茎干液流及光合蒸腾特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2014,9:23–27. (CHEN Si, HE Xinlin, YANG Guang, et al. Study of liquid flow and the characteristics of photosynthesis and transpiration of vegetation plant stems in Manasi River Basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2014,9:23–27. (in Chinese))
- [79] 王珊珊, 陈曦, 周可法, 等. 高光谱指数法用于确定多枝怪柳(Tamarix ramosissima)蒸腾速率[J]. 中国沙漠, 2014,34(4):1023–1030. (WANG Shanshan, CHEN Xi, ZHOU Kefa, et al. A preliminary study on the transpiration rate based on high spectral index method for Tamarix ramosissima in the southern periphery of the Gurbantunggut Desert [J]. Journal of Desert Research, 2014,34(4):1023–1030. (in Chinese))
- [80] 王泽锋, 胡顺军, 李浩. 古尔班通古特沙漠南缘丘间地梭梭群落蒸散特征[J]. 干旱区地理, 2018,41(6):163–169. (WANG Zefeng, HU Shunjun, LI Hao. Evapotranspiration characteristics of Haloxylon ammodendron community in interdune lowland at the southern edge of Gurbantunggut Desert [J]. Arid Land Geography, 2018,41(6):163–169. (in Chinese))

- [81] 李浩, 胡顺军, 王泽峰. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭茎干液流变化及其对环境因子的响应[J]. 干旱区地理, 2017,40(4):795–804. (LI Hao, HU Shunjun, WANG Zefeng. Dynamics and response of sap flow of *Haloxylon ammodendron* to environmental variables in the southern edge of the Gurbantunggut Desert [J]. Arid Land Geography, 2017,40(4):795–804. (in Chinese))
- [82] 孙鹏飞, 周宏飞, 李彦, 等. 古尔班通古特沙漠原生梭梭树干液流及耗水量[J]. 生态学报, 2010,30(24):6901–6909. (SUN Pengfei, ZHOU Hongfei, LI Yan, et al. Trunk sap flow and water consumption of *Haloxylon ammodendron* growing in the Gurbantunggut Desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010,30(24):6901–6909. (in Chinese))
- [83] 郑博文, 胡顺军, 周智彬, 等. 古尔班通古特沙漠南缘风沙土壤水分特征与毛管水最大上升高度[J]. 干旱区地理, 2020,1–11. (ZHENG Bowen, HU Shunjun, ZHOU Zhibin, et al. Maximum height of capillary rising water and characteristic of soil moisture in the southern edge of Gurbantunggut Desert [J]. Arid Land Geography, 2020,1–11. (in Chinese))

Research Progress on the Hydrology in the Gurbantunggut Desert

JIN Ke, LU Yang, ZHOU Huoming, ZHANG Qianzhu, HU Yue, WAN Dan, YAN Jianmei

(Chongqing Branch Institute, Changjiang River Scientific Research Institute, Chongqing 400026, China)

Abstract: Water resources are the key to improving the ecological environment and promoting the survival of animals and plants in arid desert areas. This paper summarized the climatic characteristics, water distribution, water sources, water cycle and ecological hydrological process after reviewing recent researches of the Gurbantunggut Desert, and pointed out the deficiencies of existing research in this desert. On the basis of the review, the future research directions and contents of the Gurbantunggut Desert have been prospected, and integrating the different water bodies for overall study with a view to enriching the mechanism of ecological hydrological in this desert and further exploring the hydrological cycle process in the arid areas is suggested.

Keywords: water distribution; water cycle; ecological hydrological process; Gurbantunggut desert

(上接第74页)

Study on Measures of Saltwater Intrusion Control in Modaomen Waterway Based on Disturbing the Bottom Salt Wedge

LI Bin¹, KONG Jun¹, YE Ronghui¹, LI Bao², LUO Feng³

(1. State Key Laboratory of Hydrology–Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Yangtze River Estuary Water Resource Survey Bureau, Hydrology Bureau, Changjiang Water Resources Commission, Shanghai 200136, China;

3. College of Harbor Costal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The optimal scheme of disturbing the bottom salt wedge to control the saltwater intrusion was studied based on the MIKE3. The results show that the concentration of the bottom saltwater could be effectively reduced by setting level jets in channel bottom, and there is an optimal water flow value and an optimal spray point. When water flow is less than the value, saltwater intrusion length decreases with the increase of flow. When water flow is more than the value, saltwater intrusion length increases with the increase of flow. The optimal water flow increases from neap tide to spring tide, and decreases with the increase of runoff. For example, when the runoff is 500 m³/s, the optimal water flow during neap, middle and spring tide is 20 m³/s, 20 m³/s and 25 m³/s respectively, and the reduced saltwater intrusion length is 3.82 km, 3.40 km and 1.18 km respectively. With the increase of runoff, the optimal position of spray point for the best effect of salt suppression gradually moves to the downstream. In view of the special runoff and tide environment in the Pearl River Estuary, disturbing the salt wedge has a good effect on controlling the saltwater intrusion during neap tide and middle tide, but poor in spring tide.

Keywords: saltwater intrusion; salt wedge; intrusion length; Modaomen waterway