



冰川冻土
Journal of Glaciology and Geocryology
ISSN 1000-0240, CN 62-1072/P

《冰川冻土》网络首发论文

题目: 1990年以来天山乌鲁木齐河上游水资源研究进展
作者: 刘燕, 刘友存, 焦克勤, 韩添丁, 边晓辉, 丁倩倩
收稿日期: 2019-01-19
网络首发日期: 2019-06-06
引用格式: 刘燕, 刘友存, 焦克勤, 韩添丁, 边晓辉, 丁倩倩. 1990年以来天山乌鲁木齐河上游水资源研究进展[J/OL]. 冰川冻土.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1072.P.20190605.1721.004.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.1007

LIU Yan, LIU Youcun, JIAO Keqin, et al. Advances on water resources research in the upstream of Urumqi River since 1990[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, in press. [刘燕, 刘友存, 焦克勤, 等. 1990年以来天山乌鲁木齐河上游水资源研究进展[J]. 冰川冻土, 待刊.]

1990 年以来天山乌鲁木齐河上游水资源研究进展*

刘燕¹, 刘友存¹, 焦克勤², 韩添丁², 边晓辉³, 丁倩倩³

(1.江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000; 2.中国科学院 西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000; 3.江西理工大学 建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要:天山乌鲁木齐河是我国西北地区典型的降水、冰川和地下水综合补给的内陆河, 对其水资源的研究不仅是西北寒区旱区水环境和水资源研究的热点, 而且对区域生态环境改善和经济可持续发展具有重要意义。因此, 乌鲁木齐河水文水资源的研究内容十分广泛, 并取得了很多高水平的学术成果。本文从高山区气候变化与冰冻圈的相互影响; 山区降水变化与径流的相互影响; 出山口径流对气候变化的响应以及洪灾、致灾因子分析; 流域内同位素、树轮气候和水环境研究等四个方面总结了相关研究。得出如下结论: (1) 乌鲁木齐河上游气温趋于暖湿。气温的升高很大程度上受冬季气温大幅度升高影响, 气温对高山区冰川积雪的影响要大于降水; 冬季负积温也加快了冻土的消融; 气温和降水的变化导致乌鲁木齐上游河段冰川后退加速, 积雪融化、雪线上升, 冻土活动层增厚。(2) 乌鲁木齐河流域降水量和降水变化速度具有明显的垂直特征, 在中高山地区降水量和降水变率较大; 山区降水还具有年代际特征, 20 世纪 90 年代以来, 山区降水量呈现增加趋势并促进了山区径流量的增加。(3) 降水量和冰川融雪量的增加, 很大程度上加大了乌鲁木齐河流域山区的径流量, 使得出山口区域洪水灾害的发生频率增加。(4) 同位素分析的运用对探索径流形成和转化的机理具有重要意义。树轮研究为乌鲁木齐河流域气候变化序列的重建提供了技术手段。今后, 乌鲁木齐河水资源承载力、水循环过程和水污染问题, 是区域实现生态环境建设和可持续发展的重要研究内容。

关键词:冰川; 水文水资源; 乌鲁木齐河; 天山

中图分类号: P343.6/TV211 **文献标志码:** A

0 引言

随着全球气候变化, 水循环的加剧促使水资源的分布和数量在时间和空间上进行了重新分配, 尤其对于深处大陆腹地的河流, 水资源形成、分布及循环过程无不受其特殊的地理位置和独特的地貌格局影响^[1-2], 进而影响生态系统和经济系统。脆弱的生态环境使得乌鲁木齐河流域的水资源受气候变化影响十分显著, 成为不少学者关注的区域。杨大庆等^[3-5]经过长期的努力, 对乌鲁木齐河源地区的冰川积累量、雪密度和固态降水进行了测量并总结了一系列的计算方法, 取得了十分重要的研究成果。20 世纪 80、90 年代, 杨壮娘等^[6]基于祁连山和天山多年的实测资料, 以水量平衡为基础构建了冰川融水径流估算方式, 在国内外冰川和水文学界广泛应用。康尔泗^[7]利用乌鲁木齐河 1 号冰川能量平衡的观测和常规气象站的资料, 建立了冰川消融参数化能量平衡模型。之后, 刘铸等^[8]深化和拓展了水量平衡法, 将水量平衡法应用于计算冰川物质平衡值, 并发现在长时间尺度上计算的冰川物质平衡值更准确, 较好地联系起了水量平衡法和冰川的物质平衡值。在大批勤恳工作的学者共同努力下, 乌鲁木齐河流域水资源研究取得了丰硕的成果。

自 1987 年以来, 新疆气候出现了转向暖湿的强劲信号^[9], 各地气候主要表现为气温升高和降水增多^[10], 其中北疆地区尤为显著。而对于天山北坡高山地区的冰冻圈, 冰川对气温变化的响应更加敏感。乌鲁木齐河流域是典型的冰川补给型河流, 其上游为产流区, 气候的暖湿变化趋势促使乌鲁木齐河流域水资源在短期内得到了补给, 满足了中下游地区生产生活用水的需求。但从发展的角度来看, 气温升高促使冰冻圈(冰川、积雪和冻土等)的消融和融化, 即使降水量增加可在一定程度上补给冰川, 但是这也难以掩盖冰川厚度持续减薄的事实^[11]。一旦冰川消融殆尽, 那么冰川对河流的调节能力也将消失, 水资源将直接遏制地区

收稿日期: 2019-01-19; **修订日期:** 2019-06-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471001; 41861002; 41771040); 江西省自然科学基金项目(20181BAB203026); 江西省创新创业高层次人才“千人计划”创新人才(青年类)项目; 江西理工大学“清江学者”拔尖人才科研启动项目(JXUSTQJB2017002)资助

作者简介: 刘燕(1993-), 女, 湖南岳阳人, 2017 年在赣南师范大学获学士学位, 现为江西理工大学在读硕士研究生, 从事水文水资源和全球变化研究。E-mail: ly2017lhye@126.com

通信作者: 刘友存, E-mail: liuyoucun@126.com.

生态环境建设和经济发展。

乌鲁木齐河发源于中天山北坡天格尔 II 峰的一号冰川, 是天山北坡水系中重要的水资源流域。由于流域内山高坡陡, 生态格局、气候分布具有明显的垂直地带性^[12]。本文主要论述乌鲁木齐河流域上游产流区, 即高山区冰雪、冻土和中低山寒温区水资源的研究进展。

1 高山区研究

自乌鲁木齐河河源冰川和水文气象观测站建立以来, 众多学者通过对有关数据的分析研究, 在气候与冰川变化关系方面取得了很多引人注目的研究成果。研究角度从气候变化对冰川和水文影响的研究, 已转向冰川和水文对气候变化响应和反馈的研究。研究视角的转变意味着对气候与冰川变化的关系有了更深一步的探索。

1.1 气候变化对冰川、积雪和冻土的影响

冰川对于气候的变化具有敏感的指示作用, 而气候又是影响我国西北内陆地区冰川、积雪融化的主要因素。近几十年关于西北地区的气候变化主要存在暖干和暖湿两种说法, 无论哪种说法, 都认为我国西北地区气温呈升高趋势。乌鲁木齐河作为西北内陆河, 其水源补给的重要组成部分是冰川和积雪融水, 气温的升高往往会加速冰川和积雪的融化, 短时间内会增加河流的径流量, 同时, 温度的升高也会使得活动冻土层增厚。作为我国西北内陆区的一条典型内流河, 气候对乌鲁木齐河流域内冰川积雪融化的影响特别显著。王宗太^[13]认为自小冰期至 20 世纪末, 西北地区西部的气温升高, 降水减少, 并预测到 21 世纪 30 年代气候趋于暖干; 杨新元等^[14]根据 1960-1993 年大西沟气象站的气象和降水资料, 运用趋势计算法证实了夏季气温升高和降水减少导致冰川减薄。即 1960-1990 年, 夏季平均气温上升了 0.14 °C, 年降水量减少 17 mm, 而 1 号冰川同期每年减薄平均 140 mm 水层, 根据趋势分析, 冰川厚度减薄持续增大。但 20 世纪 90 年代以后, 我国西北地区气候趋于暖干的结论逐渐被趋于暖湿替代。1985 年前后高山区气候变化与冰川状况的对比, 得知 1985 年以后气温和降水有明显升高的趋势, 证实天山地区气候由暖干转向暖湿^[14]。物质平衡年内冰川积累和消融量的增加同样证明天山地区气候由暖干转为暖湿^[15]。同时, 在气候转向暖湿的过程中, 冰川物质平衡、冰川面积、冰川运动速度自 90 年代以来具有明显的变化, 进一步描述了气候变化对冰川的影响。气温的升高可导致冰川融水的增加, 而降水的增多却有利于冰川积累。姚红兵等^[16]对 1 号冰川变化进行的分析研究, 指出近 50 年来, 1 号冰川区气温升高和降水增加明显, 增温幅度高于全球平均升温率。虽然降水也有增加, 但冰川对气温的敏感性强于降水, 因此, 1 号冰川在 1962-2012 年先是缓慢退缩后是快速退缩, 特别在 1994 年后退缩速度又有加快。同时, Kong 等^[17]对导致 1 号冰川变化因素(气温和降水)的影响权重进行了具体分析, 也得出控制 1 号冰川径流趋势的主要因素是温度而不是降水。1 号冰川的夏季气温和降水都不利于冰川的物质平衡, 但是对径流变化短期内产生积极作用^[18]。其中, 消融期的气温对 1 号冰川的影响尤为显著, 夏季气温是控制冰川物质平衡和径流变化的主要因素^[19]。在气候变暖的影响下, 1962-2006 年的 44 年间乌鲁木齐河源 1 号冰川冰储量亏损了 24.4%^[20]。

除冰川融水外, 积雪融水也是乌鲁木齐河上游重要的水量来源。积雪变化主要受山区太阳辐射量的影响, 根据 MODIS 积雪数据分析可得, 天山的积雪最大面积一般出现在 1 月份, 最小面积为同年 7 月^[21]。此外, 气温和降水也深刻的影响着积雪的变化, 乌鲁木齐河上游积雪面积对气温的敏感性也明显强于降水^[22]。杨针娘^[23]对我国西部雪线高度与气温、降水的关系得到的经验公式表明气温降低 0.5 °C 与降水量增加 144 mm 对雪线的高度影响是等效的。

气候变化对冻土的影响也具有一定的特征, 全球变暖的大背景下, 近 50 年来, 我国西北地区气温上升趋势显著, 年均和季节增温都显著高于全国, 影响冻土层消融^[24]。近 50 年来, 新疆平均冻土深度和最大冻土层均呈明显下降趋势, 气温、地温的上升对应着冻土深度减小, 50 年来北疆平均冻土深度减小了约 10 cm, 最大冻土深度比平均冻土深度下降更快, 北疆下降速度为 16 cm·(10a)⁻¹^[25]。冬季负积温也是气候变化的一个指标, 其对冰川冻土区的指示尤为明显, 随着天山地区冬季负积温的减少, 最大冻土深度也减小, 局部区域最大冻土深度递减率甚至达 -8.0~-18.9 cm·(10a)⁻¹^[26]。

1.2 冰川、冻土和积雪对气候变化的响应

冰冻圈对气候变化的响应主要体现在冰川、多年冻土和积雪的变化上, 继而是高山区水资源的变化。通过冰冻圈的变化事实, 进一步揭示其对气候变化反馈的机理。可体现在三个方面: (1)冰川变化模拟和预测; (2)冻土退化对气候变化的响应; (3)融雪径流预测。

在全球气候变暖的背景下, 1 号冰川从曾经的双冰斗-山谷冰川, 于 1993 年退缩分离成为两条完全独立的冰川^[27]。冰川随气候发生的变化使得越来越多学者关注冰川变化的模拟和预测。冰川变化的模拟和预测不仅为冰川资源的保护利用提供依据和建议, 而且对西北干旱区的生态保护和经济社会发展意义重大。Zhang 等^[28]将 1966-2095 年的 1966-1995 年、2016-2045 年、2066-2095 年三个时间段分别作为基础时期、近

期未来和远期未来,用 GCM 模型模拟和预测了乌鲁木齐河 1 号冰川变化,冰川消融量在 2016-2045 年期间达到峰值,而在 2066-2095 年消融量迅速下降。叶佰生等^[29]通过设定 4 种气候变化方案,利用冰川动力模型对 1 号冰川东支进行模拟,如果气候维持 1958-1988 年期间的状态,在忽略冰川冷冻作用下,冰川稳定长度约为 1 700 m,若考虑其冰冻作用变化,约为 1 600 m;如果未来气温升高 1 °C,则其东支冰川退缩为 300 m 长的悬冰川。除此以外,作者从冰川物质平衡的角度,结合康兴成^[30]的预测方法,推测 1 号冰川至少还将退缩 20~30 a。之后,段克勤等^[31]通过线性分析创建了一个气候变化的情景,即 2010-2070 年期间,1 号冰川高山区气温增长速率为 0.17 °C·(10a)⁻¹,在不考虑降水量变化情况下,进行 1 号冰川变化数值模拟,预测了 2010-2070 年间冰川变化趋势。由于小冰川对气候变化的响应更为灵敏,乌鲁木齐河源地区的悬冰川消退最迅速^[32]。目前,乌鲁木齐河源地区冰川的持续衰退最终会导致冰川的消失,即大大减少甚至消除径流,将严重影响生态环境的修复以及依赖于冰川融水生存的居民和动植物^[33]。

气候变化对多年冻土的影响是间接潜在的,而冻土对气候变化的反馈过程是缓慢渐进的。即使冻土变化难以从直观的监测中得到,但冻土的退化事实却不容置疑。乌鲁木齐河上游 2007 年的冻土活动层厚度比 1992 年增加了 0.35 m,而 2007 年的活动层厚度最大(1.6 m);2008 年冻土变化深度比 1993 年深 2 m,达到 12 m;年平均地温由 1993 年的-1.62 °C 升至 2008 年的-1.0 °C^[34]。Liu 等^[35]基于 60 m 钻孔深度的地温测量数据和气温降水数据,探讨了 1992-2011 年乌鲁木齐河源地区冻土活动层最大厚度的变化。在 2009 年和 2011 年冻土活动层厚度达到最大,比 1992 年增加了 0.45 mm。另外,多年冻土层的温度自 1992-2011 年上升了 0.6 °C,而多年冻土层的基座在 1992-2011 年上移了 14 m。研究结果都表明,全球气候背景下冻土也在变暖。虽然冻土退化对水资源的影响存在滞后,短期内影响不甚明显,但在长时段内影响无疑^[36]。

随着研究工作的不断深入,融雪径流模型及模拟预测的方法也在不断更新。20 世纪 90 年代,融雪径流的估算方法主要有:(1)对比观测实验法;(2)流量和气温相关法;(3)冰川径流模数法;(4)热量平衡法^[14]。随着观测数据的积累,施雅凤等^[12]运用复回归模型模拟和预测了 1 号冰川融水的年径流量。之后,伴随 3S 技术在水文研究中的应用,融雪径流模型得到了进一步的发展,主要类型分为经验性模型和物理性模型。经验性模型的主要代表为 SRM 模型,怀宝娟等^[37]运用 SRM 模型研究了乌鲁木齐河流域高山区融雪径流。穆艾塔尔·赛地等^[38]利用相关水文气象资料和冰雪遥感数据选取天山北坡的三个流域,应用 SRM 模型进行模拟,证明 SRM 模型在干旱地区模拟的可行性和优势。物理性模型体现的是融雪径流过程,其需要精确的数据进行描述,例如, SHE 模型, IHDM 模型, SWAT 模型等。高山区融雪径流模型和预测的进一步精准对中下游地区水资源的合理开发和利用具有重要意义。

2 山区研究

降水是形成水资源的过程之一。降水量的变化在乌鲁木齐河流域具有明显的时空变化。高山区降水数据欠缺通常导致对高山区降水方面的研究较少。然而降水对山区影响较为明显,降水变化特征及其对径流影响、降水量模型及预测方面的研究成果比较多。由于降水量的变化对气候特征以及生态环境有着重要影响,因此,对山区降水方面需要进一步深入研究。

2.1 降水变化及其对径流的影响

随着气候的变化,特别是 20 世纪 80 年代中后期,西北地区气候由暖干转向暖湿,其降水量也有明显的变化,而降水是径流增加的直接来源。乌鲁木齐河的降水产流区主要位于山区,气温变化影响高山区冰冻圈的融水径流,而在山区降水的作用明显^[39]。乌鲁木齐河源区海拔和降水量存在密切的联系,山区的降水量高于山前平原的降水量,也高于高山区^[40],在海拔 1 900~2 200 m 的乌鲁木齐河流域中山带出现的最大降水量为 550~600 mm。随着海拔的不断上升,降水量出现一定程度的减少,到 3 500 m 以上的高山区,年降水量少于 450 mm^[41]。不仅降水量随海拔会发生变化,降水变化速率也会发生变化,1961-2016 年间乌鲁木齐河流域降水速率随海拔升高表现为下降—上升—下降—上升,并在 5-8 月达到峰值^[42]。乌鲁木齐河流域降水量特征不仅表现为明显的垂直变化,在年代季上也有显著的变化。乌鲁木齐河上游降水量自 20 世纪 60-80 年代呈下降的趋势,此后降水呈现为明显的增加趋势,特别是进入 21 世纪以来增长十分迅速^[43]。乌鲁木齐河上游降水量的变化还体现在对径流量的影响上。北疆地区中小型河流降水与径流关系在气候变暖湿的背景下存在着差异,20 世纪 80-90 年代乌鲁木齐河的多年平均降水量明显高于 50-70 年代,受降水影响径流量明显增加^[44]。韩添丁等^[45]也证实 20 世纪 50 年代至 80 年代初期,乌鲁木齐河源区降水量呈下降趋势,并指出其转折期为 80 年代中后期,特别是 1985 年以来河源区降水量的明显增多,受降水量增加的影响,多年冻土融水径流为主的空冰斗径流自 20 世纪 80 年代中期以来也呈现明显增大趋势。此外,相关的水文模型也有在乌鲁木齐河流域运用,如穆艾塔尔·赛地等^[46]利用 HEC-HMS 水文模型对乌鲁木齐河流域进行了模拟,利用 1958-2009 年的 13 场混合型雨量数据进行模拟,并预测了 2015-2020 年的径流量变化,除 2015 年和 2018 年外,其它年份平均径流量都高于多年平均径流量。赵杰等^[47]利用 SWAT 水文模型结合 Sufi-2 算

法模拟了乌鲁木齐河上游地区的水文状况,指出河岸调蓄的基流 α 因子、土壤饱和导水率、地下水的延迟、气温降水垂直变率以及相关融雪参数对径流的模拟比较敏感。SWAT水文模型在乌鲁木齐河流域的应用还证明气候变化对径流的影响强度大于土地利用变化的影响强度,土地利用变化引起年均径流量减少 $0.04\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,而气候变化引起年均径流量减少 1.37 m^3 [48]。乌鲁木齐河源地区由于海拔高,气候条件恶劣,气象和水文站点较少,构建合适的水文模型有利于合理地探讨水资源的时空分布状况,为流域的经济社会建设和生态发展提供参考。

2.2 降水量模型与预测

降水量在山区的分布呈现一定的时空特征。因此,在研究降水模型与预测时,需要结合这一特征。但由于山区的降水监测点数量少,观测频率低,降水数据匮乏,导致其研究受到限制。因此,需要根据现有的观测数据,进行插值和拓展进而满足水资源的研究。对降水数据的拓展,主要从两方面进行,一方面是从空间尺度上,另一方面是从时间尺度上。关于降水插值在空间上的研究,何红艳等[49]认为不可能建立一个适用于流域全过程的空间插值模型,并归纳了三种主要的降水空间插值方法。尤淑撑等[50]提出的人工神经网络技术可较好的描述机理过程不明确的问题,之后该方法被应用于降水[51-52],这给乌鲁木齐河流域山区降水研究提供了借鉴。关于降水插值在时间上的研究,主要体现在短时间尺度和长时间尺度上,但需要大量降水方面的数据,才能使得插值精度较高。而高斯函数参量化法,可以较好的解决山区降水时空插值问题[53]。降水预测方法则主要有对数马尔科夫模型、多元统计、频谱分析和蒙特卡洛模型等。

3 出山口研究

在乌鲁木齐河流域水文水资源研究中,出山口作为一个临界点。一方面出山口以上山区对气候变化的敏感程度明显高于山前平原,这有利于天山气候变化趋势的研究;另一方面出山口以上径流是乌鲁木齐河流域水资源的主要产流区,气候变化对上游水资源的影响,可以在出山口气象水文站显现,这对中下游地区水资源管理具有指导作用。

3.1 径流对气候变化的响应

径流变化是气候变化的直接证据之一。在气候变化背景下径流的变化机理是研究其对气候变化的响应核心。王宗太[33]认为流域径流是由融雪径流、降水径流和地下水径流的组合,而地下水径流绝对量变化不大,其主要是受冰川融水、积雪融水和降水的影响,换言之,径流主要受气温和降水的影响。焦克勤等[54]通过对1号冰川径流的分析,也指出1996年以来乌鲁木齐上游地区的冰川物质损失对径流的作用与气温的升高响应明显。同时,Liu等[55]利用ARMA模型研究发现乌鲁木齐河上游径流量在1959-2006年的任何给定时段都与气温和降水密切相关,并且受气候变化影响,径流每十年大约增加了 $1\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$;在月径流量、月均气温、月降水量之间的关系上,基于小波分析得知气温与乌鲁木齐河径流存在负相关,而降水量指标均与径流保持正相关[56]。根据现有的气象水文数据,进行径流变化的机制研究,从而在假设的气候趋势情景下,可预测径流的变化。蓝永超等[57]根据山区径流与气温、降水的非线性关系建立了响应模型,并分析得知径流对降水变化的反馈比气温更为明显,此后,他还建立了乌鲁木齐河山区径流对气候变化的响应模型,发现近四十年来,乌鲁木齐河径流由于受气温升高和降水量增加的影响总体都呈波动上升[58]。而张捷斌[59]则认为乌鲁木齐河流域径流变化过程是随机过程,并通过时间序列分析来预测径流对气候变化的响应。Liu等[60]不仅通过乌鲁木齐河上游径流极值的变化分析,预测在全球气候变化的大背景下,2058年前后乌鲁木齐河上游在枯水期可能出现断流现象。

3.2 洪灾、致灾因子和措施

受气候变化影响,乌鲁木齐河流域上游产流区发生了明显的变化,洪水事件的发生使中下游地区遭到一定的威胁,甚至遭受到了一定的损失,但对于西北干旱地区在一定程度上补给地区水资源。掌握洪水发生的特征和内在规律,是一个地区做好防灾措施及合理管理水资源的基础。乌鲁木齐河流域洪水灾害的类型主要为:(1)冰雪消融型洪水;(2)暴雨型洪水;(3)冰雪消融与暴雨混合型洪水[61]。近49年乌鲁木齐河洪水变化趋势与新疆其它各河流洪水发生时间一致,且从1993年开始乌鲁木齐河处于大洪水多发期。特别是在1996年7月17-20日,乌鲁木齐河还发生洪量50年一遇的洪灾[62]。乌鲁木齐河出山口洪水灾害的频发是南北气温升高,高山区冰雪融化加速和夏季山区降水量增多的反馈。针对乌鲁木齐河流域频发的洪水灾害,关于临界致灾雨量、极端气候的研究取得了相当的进展。基于HBV水文模型分析的乌鲁木齐河流域的二级和三级预警致灾临界雨量分别是 40.6 mm 和 25.9 mm [63]。受气候变暖影响,乌鲁木齐河流域最大洪峰流量明显增大,年际间变化剧烈,洪水年更频繁[64]。通过造成乌鲁木齐流域洪水的天气形势和降雨量以及河流洪水的成因和类型分析,未来乌鲁木齐河流域要加强防洪加提设施建设,充分利用洪水资源[59]。

4 其他方面研究

同位素在研究水循环上得到了广泛的应用,它可以直接反映环境的变化,同时,也可追踪水的形成和转换过程。乌鲁木齐河上游的同位素研究取得了丰硕的成果。乌鲁木齐河流域氧同位素与温度存在极好的相关性,且越往越往冰川区氧同位素越能反映温度的变化^[65]。稳定氧同位素具有温度效应,而且还有高度效应^[66]。此外,稳定氧同位素具有季节效应,可以利用同位素追踪了水汽来源^[67]。同位素在区分河流补给来源中也得到应用,Sun等^[68]利用乌鲁木齐河降水量、河水和地下水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 同位素分析了河流的补给来源,得知春季乌鲁木齐河的地下水对径流的补给贡献为72.7%,远大于融雪水。我国西北地区的树轮气候相关研究较多,树轮不仅具有较长的时间序列,而且是研究古气候的重要手段。乌鲁木齐河流域山区的上树线树轮宽度主要受气温的限制,下树线树轮宽度主要受降水状况的限制^[69],树轮宽度还在一定程度记录着区域长时间的降水^[70]和径流^[71]的变化。树轮的研究广泛地用于乌鲁木齐河源降水的重建和分析,突变年份分析、年际干湿期划分等^[72]。

5 结语

天山乌鲁木齐河源1号冰川经过近70年的监测和研究,在相关单位和几代科学家的努力工作下取得了很多引人瞩目的研究成果。新疆地区20世纪80年代中后期出现的暖湿气候深刻影响着河源地区的冰川物质平衡。冰川物质负平衡持续增加、多年冻土活动层增厚以及融雪径流增加都证实了全球气候变暖对乌鲁木齐河源地区的冰冻圈影响十分突出。而乌鲁木齐河流域高山区的冰川、积雪和冻土监测研究取得的重大进展不仅是全球气候变化的响应器,同时极大地推动了天山地区水文水资源的深入研究。国外在气候变化对内陆河流水资源(尤其是冰川消融)影响的研究也较为丰富,但更多的还是关注南极洲冰川变化及冰川消融对海平上升的影响。乌鲁木齐河流域山区的径流研究,主要集中在降水分析及其对径流的影响。在暖湿气候的影响下,气温对乌鲁木齐河流域高山区冰冻圈的影响突出,而降水对山区的径流的影响同样不可忽视,20世纪90年代以来,乌鲁木齐河降水量的增加导致了山区径流量的增加。乌鲁木齐河流域的降水量模拟和预测也取得了一定进展,但相对于实测降水量的研究,乌鲁木齐河流域对降水模拟和预测的研究还较少。近年来,气候的暖湿变化导致乌鲁木齐河流域径流量增加,洪水灾害发生频率增高。但是,新疆地区经济发展水平相对较低,环境承载力较弱,对流域洪水灾害的研究及相关预报预警机制亟待加强。同位素分析技术和树轮研究的兴起和发展,为乌鲁木齐河上游水资源的空间迁移、转化和时间序列的重建提供了有效的技术手段。

天山乌鲁木齐河流域上游地区的水资源是中下游地区经济可持续发展和生态环境建设持续进行的有力保障。但是,任何影响水资源的因素都应进行长期的观测和研究。用多学科交叉思维和相似原理,对水资源进行广泛而深层次的研究,才能更好的进行水资源相关问题的理论研究和实际应用。

参考文献(References):

- [1] Xia Jun, Liu Chunzhen, Ren Guoyu. Opportunity and challenge of the climate change impact on the water resource of China[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(1): 1-12. [夏军, 刘春臻, 任国玉. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(1): 1-12.]
- [2] Chen Yaning, Li Zhi, Fan Yuting, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1295-1304. [陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. *地理学报*, 2014, 69(9): 1295-1304.]
- [3] Yang Daqing, Zhang Yinsheng, Zhang Zhizhong. A study on the snow density in the head area of Urumqi River basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1992, 47(3): 260-266. [杨大庆, 张寅生, 张志忠. 乌鲁木齐河源雪密度观测研究[J]. *地理学报*, 1992, 47(3): 260-266.]
- [4] Yang Daqing, Shi Yafeng, Kang Ersi, et al. Results of solid precipitation measurement intercomparison in the alpine area of Urumqi River basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1990, 35(22): 1734-1736. [杨大庆, 施雅风, 康尔泗, 等. 天山乌鲁木齐河源高山区固态降水对比测量的主要结果[J]. *科学通报*, 1990, 35(22): 1734-1736.]
- [5] Yang Daqing, Liu Chaohai, Wang Chunzu, et al. Studies of measurement and calculation methods of accumulation on Glacier No.1[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1992, 14(1): 1-10. [杨大庆, 刘潮海, 王纯足, 等. 冰川积累量测量和计算方法研究[J]. *冰川冻土*, 1992, 14(1): 1-10.]
- [6] Yang Zhenjiang, Hu Minggao, Liu Xinren, et al. The characteristics of water balance and runoff in permafrost in high mountain[J]. *Science in China: Series D*, 1996, 26(6): 567-573. [杨针娘, 胡鸣高, 刘新仁, 等. 高山冻土区水量平衡及地表径流特征[J]. *中国科学: D辑*, 1996, 26(6): 567-573.]
- [7] Kang Ersi. A parameterized energy balance model of glacier melting on the Tianshan Mountains[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1994, 49(5): 467-476. [康尔泗. 天山冰川消融参数化能量平衡模型[J]. *地理学报*, 1994, 49(5): 467-476.]
- [8] Liu Zhu, Li Zhongqin. Factors affecting the variation of glacier surface runoff-coefficient: a case study of Urumqi No.1 Glacier[J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(1): 103-112. [刘铸, 李忠勤. 近期冰川表面径流系数变化的影响因素: 以天山乌鲁木齐河源1号冰川为例[J]. *地球科学进展*, 2016, 31(1): 103-112.]
- [9] Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji, et al. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 219-226. [施雅风, 沈永平, 胡汝骥, 等. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 219-226.]

- [10] Chen Yaning, Xu Changchun, Yang Yuhui, et al. Hydrology and water resources variation and its responses to regional climate change in Xinjiang[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 11(64): 1331-1341. [陈亚宁, 徐长春, 杨余辉, 等. 新疆水文水资源变化及对区域气候变化的响应[J]. *地理学报*, 2009, 11(64): 1331-1341.]
- [11] Yang Xinyuan, Han Tianding. The variation trends of temperature and precipitation and their influence on glaciers in the headwaters of the Urumqi River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(2): 189-193. [杨新元, 韩添丁. 乌鲁木齐河源气温和降水的变化趋势及其对冰川影响[J]. *冰川冻土*, 1996, 18(2): 189-193.]
- [12] Shi Yafeng, Kang Ersi, Zhang Guowei, et al. Formation and estimation of mountain water resources in the Urumqi River basin[M]. Beijing: Science Press, 1992: 1-8. [施雅风, 康尔泗, 张国威, 等. 乌鲁木齐河山区水资源形成和估算[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 1-8.]
- [13] Wang Zongtai. Surface runoff variations since Little Ice Age in the Daxigou-Urumqi River[J]. *Advances in Water Science*, 1993, 4(4): 260-267. [王宗太. 乌鲁木齐河大西沟小冰期(盛)以来的径流变化[J]. *水科学进展*, 1993, 4(4): 260-267.]
- [14] Li Zhongqin, Han Tianding, Jing Zhefan, et al. A summary of 40-year observed variation facts of climate and Glacier No. 1 at headwater of Urumqi River, Tianshan[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(2): 117-123. [李忠勤, 韩添丁, 井哲帆, 等. 乌鲁木齐河源区气候变化和1号冰川40 a观测事实[J]. *冰川冻土*, 2003, 25(2): 117-123.]
- [15] Ju Yuanjiang, Wei Xia, Liu Gengnian. Statistics and analysis on the mass balance of Glacier No.1 at the head waters of the Urumqi River in the Tianshan Mountains[J]. *Arid Land Geography*, 2006, 29(1): 76-80. [鞠远江, 魏遐, 刘耕年. 天山乌一号冰川物质平衡特征的统计分析[J]. *干旱区地理*, 2006, 29(1): 76-80.]
- [16] Yao Hongbing, Li Zhongqin, Wang Puyu, et al. Analysis on the change of Glacier 1 in Urumqi River, Tianshan Mountains in recent 50 years[J]. *Arid Zone Research*, 2015(3): 442-447. [姚红兵, 李忠勤, 王璞玉, 等. 近50年天山乌鲁木齐河源1号冰川变化分析[J]. *干旱区研究*, 2015(3): 442-447.]
- [17] Kong Y, Pang Z. What is the primary factor controlling trend of Glacier No. 1 runoff in the Tianshan Mountains: temperature or precipitation change[J]. *Hydrology Research*, 2017, 48(1): 231-239.
- [18] Ye B, Yang D, Jiao K, et al. The Urumqi River source glacier No. 1, Tianshan, China: changes over the past 45 years [J/OL]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21) [2019-06-02]. <https://doi.org/10.1029/2005GL024178>.
- [19] Jiao Keqin, Wang Chunzu, Han Tianding. A strong negative mass balance recently appeared in the Glacier No.1 at the headwaters of the Urumqi River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(1): 62-64. [焦克勤, 王纯足, 韩添丁. 天山乌鲁木齐河源1号冰川新近出现大的物质负平衡[J]. *冰川冻土*, 2000, 22(1): 62-64.]
- [20] Wang Puyu, Li Zhongqin, Li Huilin. Ice volume changes and their characteristics for representative glacier against the background of climatic warming[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(7): 1189-1198. [王璞玉, 李忠勤, 李慧林. 气候变暖背景下典型冰川储量变化及其特征分析: 以天山乌鲁木齐河源1号冰川为例[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(7): 1189-1198.]
- [21] Deng H, Chen Y, Li Y. Glacier and snow variations and their impacts on regional water resources in mountains[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(1): 84-100.
- [22] Lü Jiaojiao, Lei Xiaoyun, Wei Bin, et al. Changes of snow area and its effects on runoff in Urumqi River basin[J]. *Hydrology*, 2016, 36(4): 26-30. [吕姣姣, 雷晓云, 魏宾, 等. 乌鲁木齐河流域积雪面积变化及其对径流的影响[J]. *水文*, 2016, 36(4): 26-30.]
- [23] Yang Zhenjiang. Glacier water resources in China[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1991: 72. [杨针娘. 中国冰川水资源[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991: 72.]
- [24] Zhang Qiang, Zhang Cunjie, Bai Huzhi, et al. New development of climate change in Northwest China and its impact on arid environment[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2010, 28(1): 1-7. [张强, 张存杰, 白虎志, 等. 西北地区气候变化新动态及对干旱环境的影响: 总体暖干化, 局部出现暖湿迹象[J]. *干旱气象*, 2010, 28(1): 1-7.]
- [25] Hu Liequn, Wu Pengfei, Liang Fengchao, et al. Analyzing the effect of snow cover in spring and winter and air temperature on frozen ground depth in Xinjiang[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(1): 48-54. [胡列群, 武鹏飞, 梁凤超, 等. 新疆冬春季积雪及温度对冻土深度的影响分析[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(1): 48-54.]
- [26] Zhang Shanqing, Pu Zongchao, Li Jinglin, et al. Response of the maximum depth of seasonal freezing to the cumulated negative temperature in Xinjiang[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(6): 1419-1427. [张山清, 普宗朝, 李景林, 等. 1961-2010年新疆季节性最大冻土深度对冬季负积温的响应[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(6): 1419-1427.]
- [27] Jiao Keqin, Jing Zhefan, Han Tianding, et al. Variation of the Glacier No. 1 at the headwaters of the Urumqi River in the Tian Shan Mountains during the past 42 years and its trend prediction[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(3): 253-260. [焦克勤, 井哲帆, 韩添丁, 等. 42 a来天山乌鲁木齐河源1号冰川变化及趋势预测[J]. *冰川冻土*, 2006, 26(3): 253-260.]
- [28] Zhang Y, Luo Y, Sun L. Quantifying future changes in glacier melt and river runoff in the headwaters of the Urumqi River, China[J/OL]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(9) [2019-04-18]. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5563-z>.
- [29] Ye Baisheng, Chen Kegong, Shi Yafeng. Responses of glacier and glacial runoff to climatic change: a model in simulating the Glacier No. 1 in headwaters of the Urumqi River[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1996, 17(1): 32-40. [叶佰生, 陈克恭, 施雅风. 冰川及其径流对气候变化响应过程的模拟模型: 以乌鲁木齐河源1号冰川为例[J]. *地理科学*, 1997, 17(1): 32-40.]
- [30] Kang Xingcheng. A preliminary analysis on the climatic changes in the drainage area of Urumqi River from tree ring[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1985, 7(2): 133-140. [康兴成. 天山乌鲁木齐河流域年轮气候的初步分析[J]. *冰川冻土*, 1985, 7(2): 133-140.]
- [31] Duan Keqin, Yao Tandong, Wang Ninglian, et al. Numerical simulation of Urumqi Glacier No. 1 in the eastern Tianshan, central Asia from 2005 to 2070[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(36): 3511-3515. [段克勤, 姚檀栋, 王宁练, 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川变化的数值模拟及其对气候变化的响应分析[J]. *科学通报*, 2012, 57(36): 3511-3515.]
- [32] Meng Yancong, Li Zhongqing, Xu Chunhai, et al. Glacier change of western China since the Little Ice Age: a case of the Urumqi River watershed[J]. *Arid Land Geography*, 2016(3): 486-494. [蒙彦聪, 李忠勤, 徐春海, 等. 中国西部冰川小冰期以来的变化: 以天山乌鲁木齐河流域为例[J]. *干旱区地理*, 2016(3): 486-494.]
- [33] Fu B H, Guo Q, Yan F, et al. Glacier retreat of the Tian Shan and its impact on the urban growth and environment evaluated from satellite remote sensing data[C]// The 3rd International Symposium on Earth Observation for Arid and Semi-Arid Environments, Dushanbe, Tajikistan, September 19-21, 2016.
- [34] Zhao Lin, Liu Guangyue, Jiao Keqin, et al. Variation of the permafrost in the headwaters of the Urumqi River in the Tianshan Mountains since 1991[J].

- Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(2): 223-230. [赵林, 刘广岳, 焦克勤, 等. 1991-2008年天山乌鲁木齐河源区多年冻土的变化[J]. 冰川冻土, 2010, 32(2): 223-230.]
- [35] Liu G, Zhao L, Li R, et al. Permafrost warming in the context of step-wise climate change in the Tien Shan Mountains, China[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2017, 28(1): 130-139.
- [36] Han Tianding, Gao Mingjie, Ye Baisheng, et al. Characteristic of runoff process of the glacier and permafrost in the headwaters of the Urumqi River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(3): 573-579. [韩添丁, 高明杰, 叶柏生, 等. 乌鲁木齐河源冰雪及多年冻土径流过程特征[J]. 冰川冻土, 2010, 32(3): 573-579.]
- [37] Huai Baojuan, Li Zhongqin, Sun Meiping, et al. Snowmelt runoff model applied in the headwaters region of Urumqi River[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(1): 41-48. [怀宝娟, 李忠勤, 孙美平, 等. SRM融雪径流模型在乌鲁木齐河源区的应用研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(1): 41-48.]
- [38] Muittal Sidi, Ding Jianli, Abear Salad, et al. Study on snowmelt runoff simulation in mountainous area of northern slope of Tianshan Mountains[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(3): 636-642. [穆艾塔尔·赛地, 丁建丽, 阿不都·沙拉木, 等. 天山北坡山区流域融雪径流模拟研究[J]. 干旱区研究, 2016, 33(3): 636-642.]
- [39] Wu Sufen, Liu Zhihui, Han Ping, et al. Impact of climate change on water resources of the Urumqi River basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(5): 703-706. [吴素芬, 刘志辉, 韩萍, 等. 气候变化对乌鲁木齐河流域水资源的影响[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 703-706.]
- [40] Han Tianding, Ding Yongjian, Ye Baisheng, et al. Precipitation variations on the southern and northern slopes of the Tianger Range in Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(6): 761-766. [韩添丁, 丁永建, 叶柏生, 等. 天山天格尔山南北坡降水特征研究[J]. 冰川冻土, 2004, 26(6): 761-766.]
- [41] Zhang Shanqing, Pu Zongchao. Analysis of spatial and temporal change of precipitation in Urumqi River basin based on DEM[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(3): 437-443. [张山清, 普宗朝. 基于DEM的乌鲁木齐河流域降水量时空变化分析[J]. 中国农业气象, 2011, 32(3): 437-443.]
- [42] Li Kaiming, Zhong Xiaofei, Jiang Ye, et al. Study on vertical gradient change of air temperature and precipitation in Urumqi River basin during 1961-2016[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(3): 607-615. [李开明, 钟晓菲, 姜烨, 等. 1961-2016年乌鲁木齐河流域气温和降水垂直梯度变化研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(3): 607-615.]
- [43] Li Ruixue, Zhang Mingjun, Jin Shuang, et al. Regional difference and catastrophe of climate change over Urumqi River basin[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(2): 243-250. [李瑞雪, 张明军, 金爽, 等. 乌鲁木齐河流域气候变化的区域差异特征及突变分析[J]. 干旱区地理, 2010, 33(2): 243-250.]
- [44] Gong Yuan, Yuan Yujiang, He Qing. Influence of climate warming and human activity on relationship between precipitation and runoff for middle-small river of northern Xinjiang[J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(5): 569-572. [龚原, 袁玉江, 何清. 气候变暖及人类活动对北疆中小河流降水-径流关系的影响[J]. 中国沙漠, 2003, 23(5): 569-572.]
- [45] Han Tianding, Ye Baisheng, Ding Yongjian, et al. Increasing runoff in the Urumqi River basin since 1980s[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(5): 655-659. [韩添丁, 叶柏生, 丁永建, 等. 乌鲁木齐河流域径流增加的事实分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(5): 655-659.]
- [46] Muittal Saidei, Abe Salad, Ding Jianli, et al. Application of HEC-HMS hydrological model in data scarcity mountainous watershed: taking Urumqi River basin as an example[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(6): 140-143. [穆艾塔尔·赛地, 阿不都·沙拉木, 丁建丽, 等. HEC-HMS水文模型在数据稀缺山区流域中的应用: 以乌鲁木齐河流域为例[J]. 水土保持通报, 2015, 35(6): 140-143.]
- [47] Zhao Jie, Xu Changchun, Gao Shentong, et al. Study on runoff simulation of Urumqi River basin based on SWAT model[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(4): 666-674. [赵杰, 徐长春, 高沈瞳, 等. 基于SWAT模型的乌鲁木齐河流域径流模拟[J]. 干旱区地理, 2015, 38(4): 666-674.]
- [48] Zubaida Muyibul, Shi Qingdong, Polat Muhtar, et al. Land use and climate change effects on runoff in the upper Urumqi River watershed: a SWAT model based analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(14): 5149-5157. [祖拜代·木依布拉, 师庆东, 普拉提提·莫合塔尔, 等. 基于SWAT模型的乌鲁木齐河上游土地利用和气候变化对径流的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(14): 5149-5157.]
- [49] He Hongyan, Guo Zhihua, Xiao Wenfa. Review on spatial interpolation techniques of rainfall[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(10): 1187-1191. [何红艳, 郭志华, 肖文发. 降水空间插值技术的研究进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24(10): 1187-1191.]
- [50] You Shucheng, Yan Tailai. A study on artificial neural network based surface interpolation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2000, 29(1): 30-34. [尤淑撑, 严泰来. 基于人工神经网络面插值的方法研究[J]. 测绘学报, 2000, 29(1): 30-34.]
- [51] Lin G F, Chen L H. A spatial interpolation method based on radial basis function networks incorporating a semivariogram model[J]. Journal of Hydrology, 2004, 288(3/4): 288-298.
- [52] Wong K W, Wong P M, Gedeon T D, et al. Rainfall prediction model using soft computing technique[J]. Soft Computing: A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications, 2003, 7(6): 434-438.
- [53] Zhang Xiaoyong, Liu Gengnian, Li Yonghua, et al. Gauss parameter method and its application in calculating the rainfall from the mountainous areas[J]. Geographical Research, 2008, 27(3): 598-602. [张小咏, 刘耕年, 李永化, 等. 高斯函数参量法及其在山区降水计算中的应用[J]. 地理研究, 2008, 27(3): 598-602.]
- [54] Jiao Keqin, Ye Baisheng, Han Tianding, et al. Response of run-off to climate change in the Glacier No.1 at the headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains during 1980-2006[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(3): 606-611. [焦克勤, 叶柏生, 韩添丁, 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川径流对气候变化的响应分析[J]. 冰川冻土, 2011, 33(3): 606-611.]
- [55] Liu Y, Wu J, Liu Y, et al. Analyzing effects of climate change on streamflow in a glacier mountain catchment using an ARMA model[J]. Quaternary International, 2015, 358: 137-145.
- [56] Liu Youcun, Liu Zhifang, Hao Yonghong, et al. Multi-time scale characteristics of the runoff in the upstream of Urumqi River, Tianshan Mountains, based cross-wavelet transformation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(6): 1564-1572. [刘友存, 刘志方, 郝永红, 等. 基于交叉小波的天山乌鲁木齐河出山径流多尺度特征研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(6): 1564-1572.]
- [57] Lan Yongchao, Shen Yongping, Zhong Yingjun, et al. Sensitivity of the mountain runoff of Urumqi River to the climate changes[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(11): 50-55. [蓝永超, 沈永平, 钟英君, 等. 乌鲁木齐河出山径流对气候变化的敏感性分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(11): 50-55.]
- [58] Lan Yongchao, Zhong Yingjun, Wu Sufen, et al. Sensitivity of mountain runoff of rivers originated from the south slope and the north slope of the Tianshan Mountain to climate change[J]. Mountain Research, 2009, 27(6): 712-718. [蓝永超, 钟英君, 吴素芬, 等. 天山南、北坡河流出山径流对气候变化的敏感性分析: 以开都河与乌鲁木齐河出山径流为例[J]. 山地学报, 2009, 27(6): 712-718.]

- [59] Zhang Jiebin. Application of time series analysis on the forecast of annual runoff of Urumqi River[J]. *Arid Land Geography*, 1988, 11(4): 45-52. [张捷斌. 时间序列分析在乌鲁木齐河年径流预测中的应用[J]. *干旱区地理*, 1988, 11(4): 45-52.]
- [60] Liu Youcun, Lu Miaojie, Huo Xueli, et al. A Bayesian analysis of Generalized Pareto Distribution of runoff minima[J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(3): 424-432.
- [61] Gong Jianxin, Wen Jun. Discuss on flood occurrence law of the middle river on the northern slope of Tianshan Mountains in Xinjiang[J]. *Groundwater*, 2012, 34(4): 113-116. [龚建新, 文军. 新疆天山北坡中段河流洪水规律探讨[J]. *地下水*, 2012, 34(4): 113-116.]
- [62] Gao Qin, Huo Li, Gong Jianxin. Trend analysis on flooding changes in Urumqi River[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2008, 2(2): 30-33. [高芹, 霍丽, 龚建新. 乌鲁木齐河洪水变化趋势分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2008, 2(2): 30-33.]
- [63] Chen Ying, Chen Pengxiang, Jiang Yuan'an, et al. Critical rainfall analysis of flood disaster in Urumqi River basin[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2017, 11(2): 8-13. [陈颖, 陈鹏翔, 江远安, 等. 乌鲁木齐河流域致灾洪水临界雨量分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2017, 11(2): 8-13.]
- [64] Mao Weiyi, Fan Jing, Shen Yongping, et al. Characteristics of extreme floods in Xinjiang region and Tianshan typical watershed in recent 50 years and their response to climate change[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(5): 1037-1046. [毛炜峰, 樊静, 沈永平, 等. 近 50 年来新疆区域与天山典型流域极端洪水变化特征及其对气候变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(5): 1037-1046.]
- [65] Yao Tandong, Sun Weizhen, Pu Jianchen, et al. Characteristics of stable isotope in precipitation in the inland area in the inland area: a case study of the $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and temperature in Urumqi River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(1): 15-22. [姚檀栋, 孙维贞, 蒲健辰, 等. 内陆河流域系统降水中的稳定同位素: 乌鲁木齐河流域降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度关系研究[J]. *冰川冻土*, 2000, 22(1): 15-22.]
- [66] Zhang Xinping, Yao Tandong, Tian Lide, et al. Stable oxygen isotope in water mediums in Urumqi River basin[J]. *Advances in Water Science*, 2003, 14(1): 50-56. [章新平, 姚檀栋, 田立德, 等. 乌鲁木齐河流域不同水体中的氧稳定同位素[J]. *水科学进展*, 2003, 14(1): 50-56.]
- [67] Feng Fang, Li Zhongqin, Jin Shuang, et al. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in precipitation and its water vapor sources in the upper Urumqi River basin, eastern Tianshan[J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(5): 634-641. [冯芳, 李忠勤, 金爽, 等. 天山乌鲁木齐河流域山区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 特征及水汽来源分析[J]. *水科学进展*, 2013, 24(5): 634-641.]
- [68] Sun C, Yang J, Chen Y, et al. Comparative study of streamflow components in two inland rivers in the Tianshan Mountains, Northwest China[J]/OL. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(9) [2019-04-18]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-016-5314-1>.
- [69] Yuan Qingxue, Ye Zhixiang, Wang Lili, et al. Characteristics of tree-ring width chronologies on Urumqi River mountainous basin and their responding to climate change[J]. *Arid Land Geography*, 2010, 33(3): 394-403. [袁晴雪, 叶志祥, 王丽丽, 等. 乌鲁木齐河山区树轮宽度年表特征及其对气候的响应[J]. *干旱区地理*, 2010, 33(3): 394-403.]
- [70] Gao Weidong, Yuan Yujiang, Zhang Rui, et al. The recent 338-year precipitation series reconstructed from tree-ring in northern slope of Tianshan Mountains[J]. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(6): 1535-1540. [高卫东, 袁玉江, 张瑞波, 等. 树木年轮记录的天山北坡中部过去 338 a 降水变化[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(6): 1535-1540.]
- [71] Bai Lei, Li Lanhai, Shi Chunxiang, et al. An overview of precipitation characteristics and its research progress in Tianshan Mountains area, China[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2017, 38(5): 38-48. [白磊, 李兰海, 师春香, 等. 中国天山山区降水特征及其研究进展[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(5): 38-48.]
- [72] Cui Yu, Yuan Yujiang, Jin Hailong, et al. Reconstruction and analysis of 467-year spring precipitation series in the Urumqi River head[J]. *Arid Land Geography*, 2007, 30(4): 496-500. [崔宇, 袁玉江, 金海龙, 等. 乌鲁木齐河源 467 年春季降水的重建与分析[J]. *干旱区地理*, 2007, 30(4): 496-500.]

Advances on water resources research in the upstream of Urumqi River since 1990

LIU Yan¹, LIU Youcun¹, JIAO Keqin², HAN Tianding², BIAN Xiaohui³, DING Qianqian³

(1.School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 2.Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3.School of Architectural and Surveying and Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: The Urumqi River in Tianshan Mountains is an inland river with typical precipitation, glaciers and groundwater replenishment in Northwest China. The research on its water resources is not only a hotspot in the study of water environment and water resources in the arid and cold regions of the northwest, but also important for the improvement of regional ecological environment and sustainable economic development. Therefore, the research content of hydrology and water resources in the Urumqi River basin is very extensive, and has achieved many high-level academic achievements. This paper from the interaction between climate change and cryosphere in high mountain areas; the interaction between precipitation changes and runoff in mountainous areas; the response of mountain runoff to climate change and the analysis of floods and hazards; the study of isotope, tree-ring climate and water environment in the basin. The four aspects summarize the related research. The conclusions are as

follows: (1) The temperature in the upper reaches of the Urumqi River tends to be warm and humid. The increase of temperature is largely affected by the large increase of winter temperature. The influence of temperature on the glacial snow in the high mountain area is greater than that of precipitation. The negative accumulated temperature in winter also accelerates the melting of the frozen soil in the basin. Changes in temperature and precipitation led to the acceleration of the glaciers in the upper reaches of Urumqi, the melting of snow, the rise of the snow line, and the thickening of the active layer of frozen soil. (2) The precipitation and precipitation change rate in the Urumqi River basin have obvious vertical characteristics, and the precipitation and precipitation variability in the middle and high mountain areas are large. The precipitation in mountainous areas also has interdecadal characteristics. Since the 1990s, the precipitation in mountainous areas has increased. The trend has also contributed to the increase in mountain runoff. (3) The increase of precipitation and glacial snowmelt greatly increased the runoff of the mountainous area of the Urumqi River basin, which increased the frequency of flood disasters in the mountainous area. (4) The application of isotope analysis is of great significance for exploring the mechanism of runoff formation and transformation. Tree-ring research provides a technical means for the reconstruction of the climate change sequence in the Urumqi River basin. In the future, the water resources carrying capacity, water cycle process and water pollution in the Urumqi River basin are important research contents for regional ecological environment construction and sustainable development.

Key words: glacier; hydrology and water resources; Urumqi River; Tianshan