

中亚地区水问题研究综述

杨胜天^{1,3}, 于心怡², 丁建丽³, 张 飞³, 王 飞³, 马利刚³

(1. 北京师范大学水科学研究院 环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 3. 新疆大学资源与环境科学学院
绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 中亚地区地处内陆干旱区, 水资源匮乏, 是国际上水问题十分严重的地区。本文收集了自2000年以来近15年的相关文献, 从文献数量、研究机构、研究方法和主要水问题等方面, 综述国内外中亚地区水问题研究成果。通过对文献分析得出以下认识: ① 中亚地区水问题是地理学研究热点之一, 中国、德国和美国等国家的研究机构开展了大量研究工作, 主要集中在水循环过程对气候变化的响应和流域水环境两个方面, 中国在跨界河流管理方面的研究成果相对丰富; ② 气温升高与降水增加是中亚地区气候变化的基本特征, 受气温升高影响, 陆地水储量与河川径流减小趋势明显, 水资源日趋短缺; ③ 不合理的水资源利用方式, 加剧了土壤盐渍化和土地退化, 加重了水环境污染, 加大了流域水环境的压力; ④ 复杂的地缘政治使中亚地区跨界河流管理成为当前国际社会面临的重大难题。从已经获得的成果还可以看出, 基础数据获取方法、人口—资源—环境相互关系分析、气候—水文—社会—政治相互作用机制等将是未来中亚地区水问题研究发展的重要方向。

关键词: 中亚地区; 水循环过程; 水资源状况; 流域水环境; 跨界河流

DOI: 10.11821/dlxb201701007

1 引言

中亚地区位于亚洲中部, 目前中亚地区范围并没有十分准确的界定。在俄语中, 前苏联将中亚地区表述为“Middle Asia”, 包括哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦、吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦五国; 而在英语中, 中亚地区使用的名词是“Central Asia”, 包括范围更广, 有蒙古、中国西部、俄罗斯西伯利亚、伊朗北部、阿富汗、巴基斯坦和印度等国家和地区。在中国一般将伊朗北部、阿富汗、巴基斯坦和印度等国家和地区划为西亚。为了更好地开展相关文献收集和分析, 本文按中国分类, 中亚地区主要指中亚五国(哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦)和中国新疆维吾尔自治区(图1)。

中亚地区位于东、西、南三方地理交汇点, 是联接它们社会、经济和文化交流的节点, 历史上商贸聚集, 是古丝绸之路的重要地段; 第二次世界大战结束后, 中亚地区进

收稿日期: 2016-07-15; 修订日期: 2016-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1603241, U1303381, 41261090); 国家重点研发计划(2016YFC0402403, 2016YFC0402409) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.U1603241, No.U1303381, No.41261090; National Key Research and Development Program of China, No.2016YFC0402403, No.2016YFC0402409]

作者简介: 杨胜天(1965-), 男, 教授, 博导, 主要从事水资源与水环境遥感研究。E-mail: yangshengtian@bnu.edu.cn

通讯作者: 丁建丽(1974-), 男, 教授, 博导, 中国地理学会会员(S110010255M), 主要从事干旱区资源遥感研究。

Email: watarid@xju.edu.cn

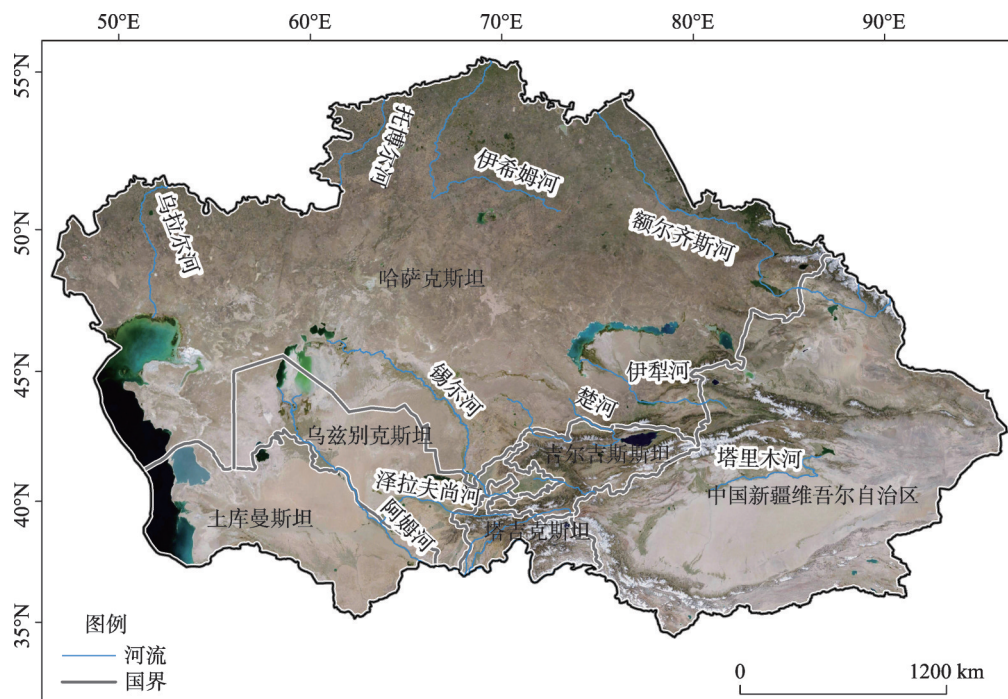


图1 中亚地区范围及主要河流

Fig. 1 Geographical boundary and major rivers of Central Asia

一步发展成为重要的能源产地。1991年前苏联解体后,各加盟共和国相继独立,政治制度和管理体制发生巨变,加剧了这一地区地缘政治的复杂程度,中亚地区成为全球各种政治力量角逐的敏感地区,是国际社会中最不稳定的地区之一^[1]。

中亚地域广阔,河流众多,主要河流有阿姆河、锡尔河、楚河、塔拉斯河、额尔齐斯河、伊犁河、伊希姆河、托博尔河、塔里木河、乌拉尔河、喷赤河、瓦赫什河、泽拉夫尚河、费尔尼干河和卡拉河等15条,且多为国际河流。但是,由于中亚地区地处欧亚大陆腹地,降水稀少,蒸发量大,导致水资源十分匮乏。近60年来,中亚各国水资源利用经历了从合作到对立的过程:前苏联时期,中亚地区在20世纪60年代开始大规模兴建水利工程;20世纪70-80年代达到高峰,大量的大坝、灌区建设完成,有较为完整的水资源利用总体规划与布局,也有较好的统一管理;但1991年后,随着前苏联解体,以公有制为主体的计划经济转向以私有制为主体的市场经济,社会格局巨变,完全摧毁了原有水资源管理体系。同时由于近年来气候变化,各国之间用水问题日益恶化,中亚地区面临着上游国产水与下游国用水、水资源总量减少与水资源用量增加、工业发电与农业灌溉、能源价格与水资源价格,以及水污染与水环境保护等诸多矛盾,引发了一系列水资源与水环境问题,甚至危及到社会稳定与经济发展。中亚被列为世界上七大水资源争端高发区之一,是国际上水问题十分严重的地区。

当前,国内外十分关注中亚地区水问题研究,Unger-Shayesteh等^[2]总结了气候变化对中亚高山地区水循环影响的研究成果;Abdolvand等^[3]从地缘政治角度综述了中亚地区水资源利用的合作与发展;Abdullaev等^[4]阐述了中亚地区水资源利用的变化历程;Karthé等^[1]分析了未来中亚地区水资源利用面临的挑战。这些综述性文章从不同侧面总结了中亚地区水问题研究成果,但仍缺乏从发展历程、研究方法和研究内容等方面的综合分析。

为此, 本文查阅了2000年以来近15年的中英文文献, 从文献数量变化、研究机构、研究方法, 以及主要水问题研究等方面, 归纳国内外有关中亚地区水问题的主要研究成果, 阐述中亚地区水问题研究热点、研究理论与方法, 揭示研究发展的趋势。

2 文献统计分析

文献检索时间范围为2000年1月-2016年5月。英文文献主要从 Academic Search Premier (ASP)、ScienceDirect (Elsevier) 和 SpringerLink (Kluwer Online) 等数据库中查询, 文献检索方式以标题或关键词“Central Asia+water”、“Central Asia+river”或“Central Asia+basin”查询; 中文文献主要从万方数据库查询, 文献检索方式以标题或关键词“中亚+水”、“中亚+河”或“中亚+流域”查询。共计检索英文文献近160篇, 中文文献60余篇, 对其中与中亚地区水问题密切相关的105篇英文文献和51篇中文文献进行统计分析, 再选择60余篇重点文献进行综述。

按照中亚地区水问题的特点, 参考国内外水文水资源研究的主要内容, 针对每篇文献的研究对象, 按水循环过程、水资源状况、流域水环境和跨界河流管理4个研究领域进行分类统计, 每个领域涉及中亚地区水问题的不同内容(表1); 同时按照英文文献和中文文献数量、研究方法、研究机构所在国家等对文献分别统计(图2, 图3, 图4)。

中亚地区水问题一直受到相关国家的密切关注, 特别是2007年后发表的英文文献数

表1 近15年中亚地区水问题文献研究内容统计
Tab. 1 Classification of research subjects of literatures on water issues in Central Asia during the last 15 years

研究分类	研究内容
水循环过程	水循环要素、水循环过程、冰雪覆盖、湖泊变迁、气候因子
水资源状况	水资源要素、河流水过程、水资源量、水生态、水污染
流域水环境	水文地理要素、流域社会经济因子、土地覆被与土地利用
跨界河流管理	地缘政治、国际关系、水资源战略、水资源管理

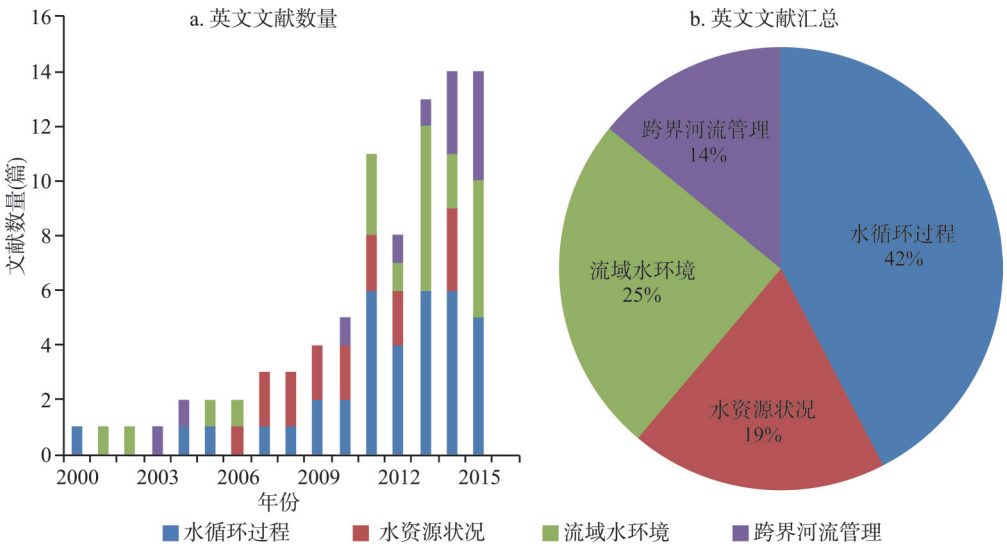


图2 近15年中亚水问题英文文献统计结果
Fig. 2 Statistics of English literatures on water issues in Central Asia during the last 15 years

量急剧增加 (图 2a), 说明在 2007 年左右中亚水问题研究取得显著进展。在这些研究成果中, 中亚地区水循环过程一直是重要的研究内容, 2007 年以后流域水环境受到国际上的广泛关注, 自 2010 年起中亚地区跨界河流管理研究才有较大增长。从英文文献汇总统计结果可以看出 (图 2b), 中亚地区水问题中水循环过程、水资源状况、流域水环境和跨界河流管理 4 个领域均有一定成果积累, 但相对来看有关水循环过程的研究成果最多, 占全部英文文献的 42%; 其次为流域水环境研究, 占全部英文文献的 25%, 水资源状况与跨界河流管理研究相对较少, 分别占全部英文文献的 19% 和 14%。

从 2000 年以来中国、德国和美国等 12 个国家的学者在国际期刊上发表的中亚地区水问题研究成果可以看出 (图 3a), 中、德两国发表的成果最多, 分别占英文文献数量的 25% 和 24%, 两国研究成果合计占文献总数的一半; 而中亚五国和俄罗斯等中亚地区国家的学者发表的英文成果相对较少, 合计为 20% 左右。在水问题的研究方法中, 主要是利用

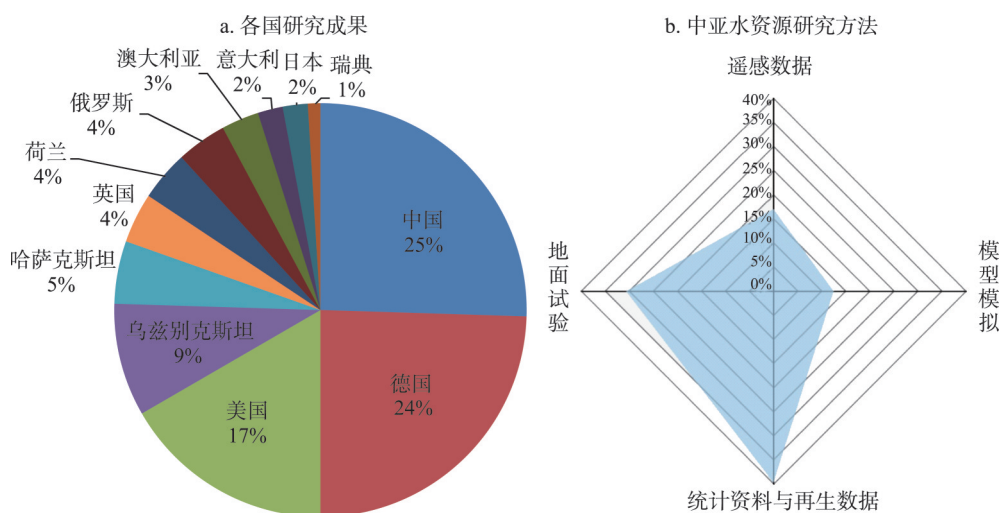


图 3 近 15 年中亚水问题各国研究成果及研究方法

Fig. 3 Research achievements in some countries and methodologies of water issues in Central Asia during the last 15 years

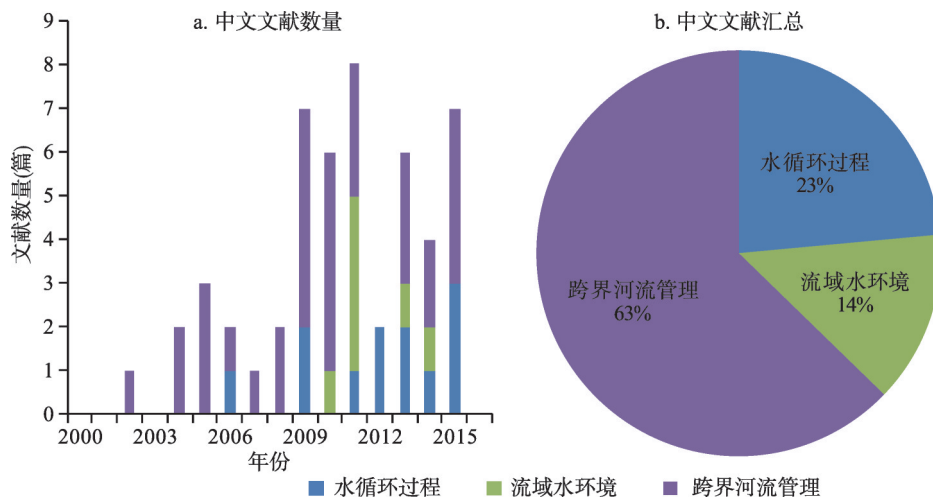


图 4 近 15 年中亚水问题中文文献统计结果

Fig. 4 Statistics of Chinese literatures on water issues in Central Asia during the last 15 years

统计资料与再生数据进行分析, 占英文文献的40%, 资料统计主要来源于政府各类统计报表和文献总结, 再生数据主要来源于国际上公开的遥感同化数据; 应用地面观测和地面实验数据开展研究占英文文献的30%; 遥感数据的使用在中亚地区水问题研究中比较普遍, 占英文文献的18%; 应用水循环模型、流域水文模型开展的研究工作最少, 仅占12% (图3b)。

与英文文献成果不同的是, 国内有关中亚地区水问题研究成果增加的时间节点为2009年 (图4a), 反映出国内对于中亚地区水问题研究起步较晚。但是中文文献中有关跨界河流管理的研究成果较多, 自2000年以来, 该部分研究成果数量占中文文献的63% (图4b), 其次为水循环过程和流域水环境的研究成果, 几乎没有关于水资源状况的研究成果。研究方法以资料统计分析为主。

3 水循环过程

气候变化对水循环过程的影响一直是国际研究热点, 气候变化会直接影响蒸散发、径流等水循环过程, 从而引起区域水资源在空间和时间上总量和分布模式发生变化。中亚地区地处内陆干旱区, 对气候变化响应十分敏感, 近15年来中亚地区成为揭示全球气候变化对水循环影响的重要区域之一。有关水循环过程的研究主要集中在气温与降水指标变化特征分析, 气温变化对高山冰川消退作用, 以及水循环过程变化对河川径流和湖泊变化影响等方面。

3.1 气温与降水变化

气温与降水是气候变化的标志性指标, 二者对水循环过程有非线性的叠加作用, 研究二者变化趋势有助于分析气候变化对水循环过程的影响。

Chen等^[5]利用美国气候中心降水空间数据分析了1930-2009年中亚地区降水变化趋势, 结果表明在西风环流控制下, 中亚地区降水持续增加, 增加速率在1970年后显著上升; 龙爱华等^[6]通过咸海流域和中国新疆地区大量气候—水—生态统计资料, 分析了近80年来中亚地区气候变化态势, 认为中亚气候将由“暖干”向“暖湿”方向发展; Manning等^[7]利用高分辨率区域气候模式REMO分析了中亚地区气候变化, 预测了至21世纪末中亚地区气候变化趋势, 其结果表明中亚地区气温在未来100年中将上升7℃。

总体来看, 中亚地区近60年来气候变化趋势为气温升高、降水增加, 与全球气候变化同步。但同时中亚地区具有其特殊性, IPCC第五次评估报告指出, 到21世纪末在RCP 8.5情况下全球地表温度将上升2.6~4.8℃^[8], 根据Manning等^[7]的计算结果, 中亚地区气温上升幅度明显高于全球平均水平, 气候变化对水循环过程的影响在中亚地区可能放大, 因此研究中亚地区水文循环对气候变化的响应具有重要意义。

3.2 冰川消退

冰川是中亚地区重要的地表径流来源, 冰川变化对中亚区域水循环影响巨大。气候变化导致冰川融化速度加快, 退缩现象十分明显。

Niederer等^[9]的研究结果表明, 在1963-2000年期间塔吉克斯坦境内天山山脉地区冰川减少了近28%, 且退缩速度在20世纪80年代后明显加快; Li等^[10]分析了近50年来中国乌鲁木齐一号冰川观测资料, 发现1985年和1996年两年冰川退缩显著, 且1996年冰川退缩幅度明显大于1985年; Krigel等^[11]利用1970s、1990s后期、2000s中期MSS、TM和ETM+遥感数据以及2007年SPOT遥感影像, 分析了天山地区冰川退缩状况, 结果显示不到40年的时间内冰川减少了23%; Hagg等^[12]应用WGI (World Glacier Inventory) 和

GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space) 模型估算中亚地区冰川退缩情况, 结果表明到 2050 年, 气温将上升 2.2~3.1 °C, 冰川将减少 36%~45%。

上述研究表明, 半个世纪以来中亚地区冰川持续减少, 已有五分之一的冰川消失, 且随着工业化进程加快冰川退缩呈加速态势, 对于中亚地区水循环可持续发展极为不利。同时冰川作为中亚地区地表径流的主要来源, 其退缩将导致该地区地表径流减少, 从而影响社会和经济发展的水资源保障。

3.3 河流湖泊变化

受气候变化与冰川消融影响, 水循环过程变化势必引起区域内河流湖泊的相应改变。河流湖泊是水循环的参与者, 河川径流、湖泊水量受到水循环过程影响, 同时河川径流、湖泊水量也会对水循环过程产生影响

Deng 等^[13]应用长时间序列气候和水文观测资料分析了水循环过程对气候变化的响应, 结果表明尽管在过去 50 年中降水增加, 但冬季气温升高对水循环过程的影响更明显, 冰雪覆盖退缩对径流减少的作用更显著; Aizen 等^[14]应用水循环模型分析了气候变化对天山地区水循环过程的影响, 结果表明气温升高导致蒸散发增加, 到 2100 年时蒸散发将增加 83%~87%; 气候变化对径流呈非线性影响, 径流因此减少 17%~13%; White 等^[15]应用水量平衡模型分析了气候变化条件下里海流域的河流水文变化, 结果表明到 2070-2099 年虽然降水相对增加, 但由于气温将升高 5 °C, 径流将因此减少 10%~20%; Morris 等^[16]在吉尔吉斯斯坦地下水滞留的研究中也发现降水对地下水水量补给几乎没有作用。

河川径流的减少在一定程度上加剧了湖泊萎缩。程彦培等^[17]利用 3 个时相 MODIS 数据, 采用监督分类和人工解译方法获取中亚地区水体变化信息, 结果表明咸水湖泊、淡水湖泊以及含水沟渠明显减少; Bai 等^[18]应用 1975 年、1990 年、1999 年多期遥感数据进行分析, 结果表明 1975-2007 年湖泊面积减少了 49.62%; 李均力等^[19]分析了 2003-2009 年间中亚地区 24 个典型湖泊的水位变化, 认为冰川融水对高山封闭湖泊的减少有重要作用; Klein 等^[20]利用 AVHRR 和 MODIS 遥感数据分析了 1986-2012 年中亚地区内陆水体范围, 也发现了湖泊萎缩的趋势。

气温和降水对水循环过程有叠加作用, 而且呈非线性关系。尽管降水有所增加, 但对水循环的贡献有限, 难以弥补径流量的缺口。气温升高使蒸散发增加, 导致河川径流减少, 进而促使进入湖泊的水量减少, 湖泊水面减小。

2012 年“中亚生态系统和水文系统对气候变化和土地利用/覆被变化的响应”国际会议上, 各国科学家第一次对中亚生态环境变化和人类适应问题进行了研讨, 说明中亚地区气候变化对水循环过程的影响尚处于探索阶段, 需进一步研究揭示水循环过程的变化趋势。同时, 由于中亚地区下垫面因子空间异质性大, 水循环时空变化非常复杂, 高山冰雪带可靠观测数据匮乏, 以及研究方法缺乏等因素, 中亚地区水循环过程的深入研究也受到一定程度制约。

4 水资源状况

中亚地区地形地貌变化大, 水资源时空分布不均, 受气候变化与人类活动的影响, 水资源供需矛盾不断加剧, 中亚地区的淡水总量约 $1.09 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 以上, 但真正可利用的水资源约为 $2.66 \times 10^{11} \text{ m}^3$, 其中地表水约为 $2.38 \times 10^{11} \text{ m}^3$, 不重复的地下水约为 $2.80 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ^[21-22]。近 15 年来对中亚地区水资源状况的研究主要集中在陆地水储量、河川径流量和农业灌溉量等变化分析方面。

4.1 陆地水储量

陆地水储量是一个地区地表水与地下水总的水储量, 可用重力卫星数据 (Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE) 和全球陆面数据同化系统 (Global Land Data Assimilation System, GLDAS) 反演计算。目前大多数学者应用 GRACE 重力卫星数据进行区域水储量计算, 揭示陆地储水量变化, 评价地区水资源状况。

Yang 等^[23]利用 GRACE 计算中亚地区 2003 年 1 月-2013 年 3 月月尺度陆地等效水高, 结果表明陆地水储量有明显年际和季节性波动, 总体呈下降趋势, 年均减少量为 0.42 ± 0.12 cm; 孙倩等^[24]利用 2003 年 1 月至 2013 年 1 月 GRACE 数据, 辅以 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) /CMAP (Climate Prediction Center's Merged Analysis of Precipitation) 降水数据、NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 植被指数和 DEM (Digital Elevation Model) 等多种数据, 分析了中亚地区陆地水储量动态变化, 结果表明中亚地区自东向西陆地水储量变化程度呈逐渐增加的趋势, 陆地水储量总体呈下降趋势, 但哈萨克斯坦东南部的巴尔喀什湖地区呈持续增长趋势。

中亚地区处于干旱内陆区, 虽然该地区水资源总量并不少, 但真正可用的水资源量仅为水资源总量的 24.4%, 且应用 GRACE 卫星数据的研究成果表明该地区陆地水储量呈不断减少趋势, 水资源短缺状况日益严峻。

4.2 径流量变化

中亚地区很多河流缺少水文站观测, 应用水文模型计算河川径流是分析径流量变化的重要途径, 因此中亚地区也是国际上开展缺少资料区水文模拟实验的重要区域。

Cai 等^[25]以 DTVGM 模型为基础, 结合多源空间数据 (MS-spatial data), 构建了基于多源空间数据的 DTVGM 模型 (MSDTVGM), 用于伊犁河流域径流计算与变化分析, 减少了对常规观测的依赖; Radchenko 等^[26]应用了 gap filling、MODAWEC (Monthly to Daily Weather Converter) 方法解决了资料缺少的难题, 并评价了这些方法对 HBV-light 模型计算精度的影响; Wang 等^[27]利用改进的 SWAT 模型模拟了 1961-2007 年天山地区冰川面积比率与径流的关系, 量化了冰川退化在水文过程的作用; Siegfried 等^[28]通过气候变化、冰雪覆盖和降水径流耦合模型揭示了由气候变化导致的冰雪融化对径流季节性变化的直接影响; Ma 等^[29]在 1961-1985 年水文资料的基础上率定了 SWAT 模型, 将 GCMs (Global Circulation Models) 数据进行降尺度, 计算表明未来气候条件下楚河径流量将减少 1.0%~26.6%。

地表径流是最易获取和利用的水资源之一, 对地表径流的研究一直是水资源研究中的重点。中亚地区属于缺少水文资料地区, 应用多源数据支持的流域水文模型来模拟分析径流变化是掌握该地区水资源状况的重要途径, 可为该地区水资源管理提供可靠的数据来源。世界范围内水文模型众多, 但被应用到中亚地区的相对较少, 也反映出对该地区地表径流的研究尚在发展阶段。

4.3 灌溉用水

灌溉是中亚地区农业活动的重要手段。该地区约 8.0×10^6 hm² 的耕地面积依赖于地表水灌溉, 中亚两大河流阿姆河和锡尔河灌溉用水量占总取水量的 90%^[21, 30], 灌溉用水是中亚地区最主要的水资源利用方式。然而由于供水渠道蒸发量大和水利设施运行低效, 水资源损耗巨大, 如何提高农业灌溉用水效率是当前亟待解决的问题。

Kitamura^[31]分析了中亚地区水资源管理中面临的问题, 发现用水协会 (WUAs) 在管理灌溉与维护供排水设施, 提高农业用水效率方面发挥着重要作用; Iskandar 等^[32]分析了

自上而下的集体农场式集中灌溉管理的局限性,认为新兴用水户小组(WUGs)是一种有效的管理措施,能够有效支撑WUAs的实施。

在WUAs农业灌溉用水管理基础上,建立可靠的农业用水效率评价方法十分重要。Awan等^[33]利用相对蒸散发量(RET)、传输性能比(DPR)、径流系数(DR)、总消耗比(OCR)、田间利用比(FAR)和传送率(CR)作为指标,评价了WUAs灌溉管理的效益;Karimov等^[34]应用经济核算方法分析农业节水潜力,通过上游冬季盈余水量在夏季重新分配供给下游,提高了灌溉效益;Platonov等^[35]利用Landsat ETM+长时间序列数据生成灌溉作物的水分生产力图WPMs,并应用到灌溉管理中;Pereira等^[36]应用ISAREG灌溉模型模拟改进后的灌溉制度,监测灌溉制度下作物根系区的渗流,提高灌溉效率20%;Conrad等^[37]将基于对象的遥感分类数据与联合国粮食农业组织(FAO)提出的CropWat模型耦合,获取了棉花和冬小麦灌溉的作物分布和用水数据。

中亚地区农业种植以棉花、水稻等高耗水作物为主,两千年来农业灌溉一直是中亚地区水资源利用的主要方式^[38]。提高灌溉水利用效率,改善灌溉技术和灌溉设施,减少蒸发等非生产性消耗水,建立农业灌溉的联合管理机制,加强水资源利用效益评价,对区域水资源可持续管理至关重要。在气象、水文、土地利用和水资源等丰富数据支持下,分析气候和水文系统的变化,以及它们与社会经济的相互作用和反馈机制,是未来中亚地区水资源利用研究的发展方向^[2]。

5 流域水环境

气候变化和不合理的人类活动导致河川径流减少、河流水质恶化,环境退化严重影响河流生态系统服务功能,危害流域水环境。近15年来,对于中亚地区流域水环境的研究主要集中在植被动态变化对气候变化的响应机制、流域环境要素、土壤盐渍化与土地退化、人口—资源—环境关系分析等4个方面。

5.1 植被—气候响应机制

植被生长容易受到气候变化的影响,特别是中亚地区位于内陆干旱区,植被相对较少,对气候变化更加敏感。研究植被动态变化对气候变化的响应机制对揭示中亚环境的演变过程、预测环境发展趋势、维护流域水环境具有重要意义,因此植被变化常作为流域水环境的标志。

索玉霞等^[39]利用1982-2002年NDVI数据和气候研究组(CRU)降水与气温数据分析NDVI年际、季节变化特征与气候因子的相关关系,结果表明49%的地区年均NDVI与年降水量呈正相关,52%的地区NDVI与春季降水量正相关,34%的地区NDVI与夏季降水量正相关;Gessner等^[40]利用1982-2006年的NDVI和网格化降水数据(GPCC Full Data Reanalysis)分析了植被生长对降水变化的敏感性,发现降水异常对中亚地区植被状况影响程度接近80%;张琪等^[41]对中亚地区1982-2012年植被变化对气候变化的响应研究表明,NDVI的空间变化特征与降水的空间变化特征较为一致;Kariyeva等^[42]应用1981-2008年遥感植被绿度数据分析了中亚地区植被物候与气候动态的关系,结果表明大多数物候响应变量与降水呈正相关,且气温升高使植被生长季提前,生长期延长。

气候变化对植被的影响具有复杂机制,降水与气温作为最直接的气候变化因子对植被动态作用十分明显。从目前研究结果可以看出降水增加有利于空间上植被覆盖度的提高,气温升高延长了年内植被覆盖时长,但对于更深层次植被—气候响应机制的研究仍然缺乏。

5.2 环境要素

环境要素是区域环境演变发展的基质, 人类活动的过程中不可避免对环境要素进行改造、破坏, 对环境要素的研究是了解水环境现状、预测水环境发展的基石。

景观格局影响着流域内能量平衡和物质循环过程, 植被根系吸水反映流域内植被生长状况, 土壤水供给植被生长, 是农业活动的必要条件。Luo 等^[43-44]应用 Cellular Automata (CA) -Markov 模型分析了哈萨克斯坦伊犁河三角洲景观格局时空动态, 结果表明湖泊沼泽等水利景观受干扰明显, 水利工程对三角洲景观结构变化作用最为深远; Li 等^[45]利用通用陆面模型 CLM 分析植被根系吸水过程, 模拟植被对干旱环境的响应, 获取了中亚荒漠生态系统的水汽通量数据; Devkota 等^[46]根据乌兹别克斯坦 2008-2010 年水稻和小麦生长季的实验数据, 利用 CSM-CERES-Wheat 模型计算作物生长发育过程中土壤体积含水量变化; 王景凯等^[47]对 2003-2010 年中亚地表土壤水的研究结果表明, 中亚地区植物生长季及春、夏季地表土壤水均以变干为主。

植被动态变化使流域景观格局、根系吸水、土壤水等环境要素随之变化, 在一定程度上增加了水分的消耗。虽然有学者已经对中亚地区流域环境要素展开研究, 但目前对于该区域环境要素的研究仍显薄弱, 尚不能为流域水环境管理提供充分的理论指导。

5.3 土壤盐渍化

农业是中亚五国的传统主导产业, 这一特征一方面受地理环境、自然资源影响, 另一方面中亚地区农业是前苏联时期社会主义计划经济的一个重要组成部分^[48]。农业活动中大量施用农药化肥以及不合理的灌溉方式容易造成土壤盐渍化, 严重威胁中亚地区的流域水环境。

Devkota 等^[46]以水稻—小麦农业灌溉实验为基础, 采用利润总额 (GMs) 估算和收益/成本率 (BCR) 评价农业灌溉与土壤盐渍化的收益与损害比例; Karimov 等^[49]用 HYDRUS-1D 模型研究浅层地下水位的影响, 模拟结果表明由于水位上升和灌溉减少, 地下水对蒸散做贡献增加, 作物根系区盐分累积加剧; Chen 等^[50]从孔雀河采集了 14 个地表水和 9 个表层沉积物样品, 检测结果表明含有绝大多数的有机氯农药; Crosa 等^[51]对阿姆河流域水质进行采样分析发现农业活动驱动和增加了次生盐渍化过程, 导致阿姆河流域下游用水受到影响。

由于社会经济发展的需求, 不合理的农业灌溉没有受到限制, 加剧了土壤盐渍化程度, 土地退化面积不断扩大, 农作物产量减少, 加重粮食危机; 农药化肥施用危害到了水环境; 劳动力、水资源和能源短缺提高了生产成本, 对传统生产、生活方式提出了新的挑战。大范围的土壤盐渍化会对人类生存产生极大威胁, 因此, 合理利用土地、加强盐渍化土壤管理、改善水质的工作刻不容缓, 对中亚地区土壤盐渍化形成的深层原因应受到重视。

5.4 人口—资源—环境关系分析

维持一个地区的可持续发展需要综合协调好人口—资源—环境之间的关系。人口数量增多会加大当地资源和环境的压力, 厘清人口与资源、环境的关系有助于经济社会稳定发展。

Schlüter 等^[52]分析了咸海萎缩与抽水灌溉的情况, 认为应将环境流量纳入流域管理体系中, 以提高湿地生态系统服务的供给能力, 改善社会—生态系统的恢复力; Cretaux 等^[53]从千年尺度上分析咸海水位变化幅度和原因, 提出了在人口不断增长的情况下咸海生态需水量和供水方案; Djanibekov 等^[54]以乌兹别克斯坦为例, 研究了中亚地区人口饮食中水足迹变化, 定量评价至 2034 年时食品消费国家的水足迹; Bekchanov 等^[55]利用均衡理

论模型评价乌兹别克斯坦供水减少对整体经济的影响,结果表明当供水减少10%~20%,将减少灌溉24.1~37.4万 hm^2 的土地,导致71.2~86.8万人口失业,国民收入损失3.6%~4.3%。

在人类文明伊始,绿洲农业就是建立在合理利用水资源的基础上,是一种自觉维护流域水环境的有效形式。中亚地区考古发掘的成果表明,自全新纪以来天山山麓地区人类就在不断改变生产生活方式,自觉维护流域生态环境可持续发展^[56]。近年来由于气候变化,水循环过程和水资源分配发生变动,日益加剧的人类活动对水环境也造成深刻影响。处理好人口—资源—环境的和谐关系,构建有效水资源利用方式是维持中亚地区水环境的根本途径。

6 跨界河流管理

中亚地区跨界河流众多,水资源空间分布不均,供需矛盾十分突出。对有限资源的争夺导致跨界河流管理混乱,跨境水资源的合理分配利用、协调管理和可再生性维持,与复杂的地缘政治、区域经济等问题相互影响,越来越受到关注^[57]。因此需要从自然资源、社会文化及地缘政治等多个维度来确立管理方法。多维度的跨界河流管理十分复杂,Stucki等^[58]形象地将中亚水资源问题比喻成魔方,不仅中亚国家,美国、中国、欧盟等也参与其中,还有不同利益集团等使中亚地区跨界河流管理更加复杂。

在水资源自然分布状况方面,位于上游的吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦两国拥有中亚地区90%的水资源,而位于下游的乌兹别克斯坦、哈萨克斯坦和土库曼斯坦三国境内水资源径流补给较少,尤其是乌兹别克斯坦和土库曼斯坦几乎90%的水资源来自跨界河流^[59]。然而由于国力悬殊导致中亚地区水资源供需矛盾突出,上游两国水资源利用量仅占11.4%,而下游乌兹别克斯坦、哈萨克斯坦和土库曼斯坦3个国家水资源使用量分别占52%、20%和10%^[60-61]。水资源分布与利用的不均衡是该地区矛盾争端的重要原因,增加了引发国际冲突的可能性,为此中亚五国也努力寻找解决问题的出路。

随着苏联解体,中亚五国各自寻求经济发展,水资源利用的矛盾被不断激化,围绕跨界河流开发的争论愈演愈烈。为确保中亚地区水资源的使用与保护,改善咸海的生态环境,中亚五国分别于1992年和1993年成立了“水资源跨国协调委员会”和“拯救咸海国际基金会”,但由于这两个国际组织并不具有法律约束力,无法在法律层面上制约中亚各国的水资源分配与利用政策,因此对于中亚地区水资源管理作用有限。此外由于各方缺乏信任,上游国家与下游国家签订的一系列水资源区域性协定基本没有约束力,水资源滥用现象十分普遍^[1]。

中亚地区混乱的跨境水资源管理引起了国际专家学者的广泛关注,围绕该问题展开了一系列讨论。Abdullaev等^[4]对比了乌兹别克斯坦水资源管理的历史与现状,结果表明传统的中央控制水资源管理方式正逐渐丧失;Abbink等^[62]利用博弈论分析了中亚地区跨界河流管理中的合作与信任,结果表明中亚地区需要流域尺度的区域合作,但合作难以实现;廖成梅^[59]关于中亚各国新建水电站建设的研究成果表明,各国在新建水电站问题上的不同立场,形成了对立的两派:上游国家追求能源独立,下游国家追求灌溉水利独立。各方缺乏解决问题的诚意,只从自己的立场考虑问题,并且限制流域内其他国家的利益,民族利己主义严重,水资源在中亚地区沦为政治工具和谈判筹码。

水资源是国家自然资源的组成部分,构建气候—水文—社会—政治相互协调的管理机制是确保跨界河流水安全的重要前提。Seidakhmetov等^[63]认为水资源不仅是环境的组

成部分,而且是调度机制的重要组成部分,应确保它们的法律基础、立法依据和技术支持;Sorg等^[64]分析了气候—水文—社会—政治发展对锡尔河水量分配的影响,提出了应对水资源变化的适宜措施;Abdolvand等^[3]认为中亚跨界河流管理与能源、政治紧密关联,该地区水量和能源储量丰富,但这些资源如何分配一直是各国争执的原因,导致了紧张的国际关系;Abdullaev等^[65]研究成果表明中亚国家经济政策关注的依旧是提高资源开采而不是提高利用效率,工程水资源管理仍然在这些国家水资源部门占主导地位,现有制度难以从水—能源—农业—气候变化系统实现互利共赢。

自2000年以来,有关中亚地区水问题的国际会议频频召开,仅2009-2016年举行的国际会议就多达十余次。加强互利合作,有效保护和利用地区水资源是近15年来中亚水问题一成不变的议题。Karaye在2010年“生命之水”国际会议上指出,中亚地区存在的最大问题不是缺水,而是各方无法协商并达成共识。中亚五国由于产水与用水空间分布差异巨大,导致用水关系复杂,各国国家利益不同,过多强调他国对本国造成的损失,加大了水资源管理难度^[57],混乱的管理导致水资源利用十分粗放,效率低下^[66]。每一个国家都试图通过保障本国资源与能源的独立性,从而巩固其地缘政治地位。因此,中亚地区跨界河流管理超越了中亚地区边界,成为国际性问题,只有从全球地缘政治利益角度出发,才能全面有效地解决好该地区跨界河流管理问题。

7 结论

通过以上对文献的分析可以得出以下结论:

(1) 中亚地区水问题研究是地理学的研究热点之一。2007年以来中亚地区水问题受到国内外广泛关注,中国、德国和美国等国家的研究学者开展了大量研究工作,取得一系列成果,研究工作主要集中在水循环过程对气候变化的响应和流域水环境两方面,中国在跨界河流管理的研究成果相对丰富;研究方法主要是利用统计资料与再生数据进行分析,遥感数据也有较为广泛的应用。

(2) 中亚地区水循环过程深受气候变化影响,陆地水储量与河川径流减小趋势明显。中亚地区属于干旱气候区,地处欧亚大陆内陆中心,气候变化对水循环过程的影响十分显著,气温升高与降水增加是气候变化的基本特征,但气温升高的效应更大,导致冰川退缩,蒸散发增加,从而引起河川径流减少与湖泊萎缩,水资源状况将进一步恶化。

(3) 气候变化与人类活动威胁着中亚地区流域水环境。气温上升延长了植被生长季,改变了植被景观格局,在一定程度上增加了水分的消耗;不合理的农业灌溉,加剧了土壤盐渍化,土地退化面积不断扩大;农药化肥施用加重了水环境污染;劳动力、水资源和能源短缺提高了生产成本,加大了流域水环境的压力。

(4) 中亚地区跨界河流管理是当前国际社会面临的重大挑战。前苏联的解体,完全摧毁了原有水资源管理体系,加之近年来气候变化,各国之间用水问题日益恶化,引发了一系列生态问题,甚至危及到社会稳定与经济发展,中亚国家、美国、中国、欧盟等以及不同利益集团加入使中亚地区跨界河流管理成为复杂的地缘政治问题。

对近15年的研究成果分析表明,加强数据获取,增加地面观测,特别是高山冰雪带监测有助于深入分析中亚地区水循环过程机理;在丰富数据支持下,分析气候和水文系统变化,以及它们与社会经济的相互反馈机制,是未来中亚地区水问题研究的发展方向;协调好人口—资源—环境相互关系,构建高效水资源利用方式是维护中亚地区流域

水环境的根本途径;从全球地缘政治角度,在气候—水文—社会—政治框架基础上开展研究才能全面解决好该地区跨界河流管理问题。

参考文献(References)

- [1] Karthe D, Chalov S, Borchardt D. Water resources and their management in central Asia in the early twenty first century: Status, challenges and future prospects. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(2): 487-499.
- [2] Unger-Shayesteh K, Vorogushyn S, Merz B, et al. Introduction to "Water in Central Asia: Perspectives under Global Change". *Global and Planetary Change*, 2013(110): 1-3.
- [3] Abdolvand B, Mez L, Winter K, et al. The dimension of water in Central Asia: Security concerns and the long road of capacity building. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(2): 897-912.
- [4] Abdullaev I, Rakhmatullaev S. Transformation of water management in Central Asia: From state-centric, hydraulic mission to socio-political control. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(2): 849-861.
- [5] Chen F, Huang W, Jin L, et al. Spatiotemporal precipitation variations in the arid Central Asia in the context of global warming. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(12): 1812-1821.
- [6] Long Aihua, Deng Mingjiang, Xie Lei, et al. Exploring analysis on the adaptive countermeasures to water resources evolvement under the climate change in Xinjiang and Aral Sea Basin. *Arid Land Geography*, 2012, 35(3): 377-387. [龙爱华, 邓铭江, 谢蕾, 等. 气候变化下新疆及咸海流域河川径流演变及适应性对策分析. *干旱区地理*, 2012, 35(3): 377-387.]
- [7] Mannig B, Müller M, Starke E, et al. Dynamical downscaling of climate change in Central Asia. *Global and planetary change*, 2013, 110: 26-39.
- [8] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2014--Impacts, Adaptation and Vulnerability: Regional Aspects*. Cambridge University Press, 2014.
- [9] Niederer P, Bilenko V, Ershova N, et al. Tracing glacier wastage in the Northern Tien Shan (Kyrgyzstan/Central Asia) over the last 40 years. *Climatic Change*, 2008, 86(1-2): 227-234.
- [10] Li Z, Li H, Chen Y. Mechanisms and simulation of accelerated shrinkage of continental glaciers: A case study of Urumqi Glacier No. 1 in eastern Tianshan, Central Asia. *Journal of Earth Science*, 2011, 22: 423-430.
- [11] Kriegel D, Mayer C, Hagg W, et al. Changes in glacierisation, climate and runoff in the second half of the 20th century in the Naryn basin, Central Asia. *Global and Planetary Change*, 2013, 110: 51-61.
- [12] Hagg W, Hoelzle M, Wagner S, et al. Glacier and runoff changes in the Rukhik catchment, upper Amu-Darya basin until 2050. *Global and Planetary Change*, 2013, 110: 62-73.
- [13] Deng H, Chen Y, Wang H, et al. Climate change with elevation and its potential impact on water resources in the Tianshan Mountains, Central Asia. *Global and Planetary Change*, 2015, 135: 28-37.
- [14] Aizen V B, Aizen E M, Kuzmichenok V A. Geo-informational simulation of possible changes in Central Asian water resources. *Global and Planetary Change*, 2007, 56(3): 341-358.
- [15] White C J, Tanton T W, Rycroft D W. The impact of climate change on the water resources of the Amu Darya basin in Central Asia. *Water Resources Management*, 2014, 28(15): 5267-5281.
- [16] Morris B L, Darling W G, Gooddy D C, et al. Assessing the extent of induced leakage to an urban aquifer using environmental tracers: An example from Bishkek, capital of Kyrgyzstan, Central Asia. *Hydrogeology Journal*, 2006, 14 (1-2): 225-243.
- [17] Cheng Yanpei, Zhang Fawang, Dong Hua, et al. Wetland dynamic monitoring in central Asia based on MODIS image. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, 37(5):33-37. [程彦培, 张发旺, 董华, 等. 基于MODIS卫星数据的中亚地区水体动态监测研究. *水文地质工程地质*, 2010, 37(5): 33-37.]
- [18] Bai J, Chen X, Li J, et al. Changes in the area of inland lakes in arid regions of Central Asia during the past 30 years. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 178(1-4): 247-256.
- [19] Li Junli, Chen Xi, Bao Anming. Spatial-temporal characteristics of lake level changes in Central Asia during 2003-2009. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9): 1219-1229. [李均力, 陈曦, 包安明. 2003-2009年中亚地区湖泊水位变化的时空特征. *地理学报*, 2011, 66(9): 1219-1229.]
- [20] Klein I, Dietz A J, Gessner U, et al. Evaluation of seasonal water body extents in Central Asia over the past 27 years derived from medium-resolution remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 26: 335-349.

- [21] Deng Mingjiang, Long Aihua, Zhang Yi, et al. Assessment of water resources development and utilization in the five Central Asia countries. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(12): 1347-1356. [邓铭江, 龙爱华, 章毅, 等. 中亚五国水资源及其开发利用评价. *地球科学进展*, 2010, 25(12): 1347-1356.]
- [22] Zhou Hongfei, Zhang Jiebin. Analysis on the volume of available water resources and its carrying capacity in Xinjiang, China. *Arid Land Geography*, 2005, 28(8): 756-763. [周宏飞, 张捷斌. 新疆的水资源可利用量及其承载能力分析. *干旱区地理*, 2005, 28(8): 756-763.]
- [23] Yang P, Chen Y. An analysis of terrestrial water storage variations from GRACE and GLDAS: The Tianshan Mountains and its adjacent areas, central Asia. *Quaternary International*, 2015, 358: 106-112.
- [24] Sun Qian, Tashpolat T, Ding Jianli, et al. GRACE data-based estimation of spatial variations in water storage over the Central Asia during 2003-2013. *Acta Astronomica Sinica*, 2014, 55(6): 498-511. [孙倩, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 利用 GRACE 数据监测中亚地区陆地水储量动态变化的研究. *天文学报*, 2014, 55(6): 498-511.]
- [25] Cai M, Yang S, Zeng H, et al. A distributed hydrological model driven by multi-source spatial data and its application in the Ili River Basin of Central Asia. *Water resources management*, 2014, 28(10): 2851-2866.
- [26] Radchenko I, Breuer L, Forkutsa I, et al. Simulating water resource availability under data scarcity: A case study for the Fergana Valley (Central Asia). *Water*, 2014, 6(11): 3270-3299.
- [27] Wang X, Luo Y, Sun L, et al. Attribution of Runoff Decline in the Amu Darya River in Central Asia during 1951-2007. *Journal of Hydrometeorology*, 2016, 17(5): 1543-1560.
- [28] Siegfried T, Bernauer T, Guennet R, et al. Will climate change exacerbate water stress in Central Asia?. *Climatic Change*, 2012, 112(3/4): 881-899.
- [29] Ma C, Sun L, Liu S, et al. Impact of climate change on the streamflow in the glacierized Chu River Basin, Central Asia. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(4): 501-513.
- [30] Yuldasheva G, Hashimova U, Callahan J. Current trends in water management in Central Asia. *Peace and Conflict Review*, 2010, 5(1): 1-11.
- [31] Kitamura K. Issues of Water Users' Associations for sustainable irrigation and drainage in Central Asia. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, 2008, 42(3): 203-210.
- [32] Abdullaev I, Kazbekov J, Manthritlake H, et al. Water user groups in Central Asia: emerging form of collective action in irrigation water management. *Water Resources Management*, 2010, 24(5): 1029-1043.
- [33] Awan U K, Tischbein B, Conrad C, et al. Remote sensing and hydrological measurements for irrigation performance assessments in a water user association in the lower Amu Darya River Basin. *Water Resources Management*, 2011, 25(10): 2467-2485.
- [34] Karimov A, Molden D, Khamzina T, et al. A water accounting procedure to determine the water savings potential of the Fergana Valley. *Agricultural Water Management*, 2012, 108: 61-72.
- [35] Platonov A, Thenkabail P S, Biradar C M, et al. Water productivity mapping (WPM) using Landsat ETM+ data for the irrigated croplands of the Syrdarya River basin in Central Asia. *Sensors*, 2008, 8(12): 8156-8180.
- [36] Pereira L S, Paredes P, Cholpankulov E D, et al. Irrigation scheduling strategies for cotton to cope with water scarcity in the Fergana Valley, Central Asia. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(5): 723-735.
- [37] Conrad C, Rahmann M, Machwitz M, et al. Satellite based calculation of spatially distributed crop water requirements for cotton and wheat cultivation in Fergana Valley, Uzbekistan. *Global and Planetary Change*, 2013, 110: 88-98.
- [38] Zhang Q, Xu H, Li Y, et al. Oasis evolution and water resource utilization of a typical area in the inland river basin of an arid area: A case study of the Manas River valley. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66(2): 683-692.
- [39] Suo Yuxia, Wang Zhengxing, Liu Chuang, et al. Relationship between NDVI and precipitation and temperature in Middle Asia during 1982-2002. *Resources Science*, 2009, 31(8): 1422-1429. [索玉霞, 王正兴, 刘闯, 等. 中亚地区 1982 年至 2002 年植被指数与气温和降水的相关性分析. *资源科学*, 2009, 31(8): 1422-1429.]
- [40] Gessner U, Naeimi V, Klein I, et al. The relationship between precipitation anomalies and satellite-derived vegetation activity in Central Asia. *Global and Planetary Change*, 2013, 110: 74-87.
- [41] Zhang Qi, Yuan Xiuliang, Chen Xi, et al. Vegetation change and its response to climate change in Central Asia from 1982 to 2012. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(1): 13-23. [张琪, 袁秀亮, 陈曦, 等. 1982-2012 年中亚植被变化及其对气候变化的响应. *植物生态学报*, 2016, 40(1): 13-23.]
- [42] Kariyeva J, van LEEUWEN W J D, Woodhouse C A. Impacts of climate gradients on the vegetation phenology of major land use types in Central Asia (1981-2008). *Frontiers of Earth Science*, 2012, 6(2): 206-225.
- [43] Luo G, Amuti T, Zhu L, et al. Dynamics of landscape patterns in an inland river delta of Central Asia based on a cellular

- automata-Markov model. *Regional Environmental Change*, 2015, 15(2): 277-289.
- [44] Luo Geping, Wang Yuangang, Zhu Lei, et al. Influence mechanism of landscape structure in River Ili delta. *Arid Land Geography*, 2012, 35(6): 897-908. [罗格平, 王渊刚, 朱磊, 等. 伊犁河三角洲景观结构的影响机制研究. *干旱区地理*, 2012, 35(6): 897-908.]
- [45] Li L, Van der Tol C, Chen X, et al. Representing the root water uptake process in the Common Land Model for better simulating the energy and water vapour fluxes in a Central Asian desert ecosystem. *Journal of Hydrology*, 2013, 502: 145-155.
- [46] Devkota K P, Hoogenboom G, Boote K J, et al. Simulating the impact of water saving irrigation and conservation agriculture practices for rice-wheat systems in the irrigated semi-arid drylands of Central Asia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 214: 266-280.
- [47] Wang Jingkai, Guo Hhuadong, Li Xinwu. Responses of surface soil moisture in Central Asia to climate change during 2003- 2010. *Arid Zone Research*, 2015, 32(1): 40-47. [王景凯, 郭华东, 李新武. 2003-2010年中亚地表土壤水对气候变化的响应. *干旱区研究*, 2015, 32(1): 40-47.]
- [48] Buwujia Abula. Analysis on complementarity between agricultures in five Central Asian countries and agricultures in China. *Issues in Agricultural Economy*, 2008, 29(3): 104-109. [布娟鹑·阿布拉. 中亚五国农业及与中国农业的互补性分析. *农业经济问题*, 2008, 29(3): 104-109.]
- [49] Karimov A K, Šimůnek J, Hanjra M A, et al. Effects of the shallow water table on water use of winter wheat and ecosystem health: Implications for unlocking the potential of groundwater in the Fergana Valley (Central Asia). *Agricultural Water Management*, 2014, 131: 57-69.
- [50] Chen W, Jing M, Bu J, et al. Organochlorine pesticides in the surface water and sediments from the Peacock River Drainage Basin in Xinjiang, China: A study of an arid zone in Central Asia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 177(1-4): 1-21.
- [51] Crosa G, Froebrich J, Nikolayenko V, et al. Spatial and seasonal variations in the water quality of the Amu Darya River (Central Asia). *Water Research*, 2006, 40(11): 2237-2245.
- [52] Schlüter M, Khasankhanova G, Talskikh V, et al. Enhancing resilience to water flow uncertainty by integrating environmental flows into water management in the Amudarya River, Central Asia. *Global and Planetary Change*, 2013, 110: 114-129.
- [53] Cretaux J F, Letolle R, Bergé-Nguyen M. History of Aral Sea level variability and current scientific debates. *Global and Planetary Change*, 2013, 110: 99-113.
- [54] Djanibekov N, Froberg K, Djanibekov U. Income-based projections of water footprint of food consumption in Uzbekistan. *Global and Planetary Change*, 2013, 110: 130-142.
- [55] Bekchanov M, Lamers J P A. Economic costs of reduced irrigation water availability in Uzbekistan (Central Asia). *Regional Environmental Change*, 2016: 1-19.
- [56] Macklin M, Panyushkina I, Toonen W, et al. The influence of Late Pleistocene geomorphological inheritance and Holocene hydromorphic regimes on floodwater farming in the Talgar catchment, southeast Kazakhstan, Central Asia. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 129: 85-95.
- [57] He Daming, Feng Yan. *Rational Utilization and Coordination Management of Transboundary River Water Resources*. Beijing: Science Press, 2006. [何大明, 冯彦. *国际河流跨境水资源合理利用与协调管理*. 北京: 科学出版社, 2006.]
- [58] Stucki V, Wegerich K, Rahaman M, et al. Introduction: Water and security in Central Asia: Solving a Rubik's Cube. *International Journal of Water Resources Development*, 2012, 28(3): 395-397.
- [59] Liao Chengmei. Causes of water resources disputes in Central Asian countries. *Journal of Xinjiang University (Philosophy, Humanities & Social Sciences)*, 2011, 39(1): 102-105. [廖成梅. 中亚水资源问题难解之原因探析. *新疆大学学报: 哲学. 人文社会科学版*, 2011, 39(1): 102-105.]
- [60] Allison R, Jonson L, Institution B. *Central Asian security : the new international context*. Royal Institute of International Affairs, Brookings Institution Press, 2001.
- [61] Islam Sulayman, Muming Tailaiti. Water resources conflicts and present cooperation status in Central Asia. *Russian, Central Asian and East European Market*, 2014(3): 81-90. [苏来曼·斯拉木, 泰来提·木明. 中亚水资源冲突与合作现状. *俄罗斯中亚东欧市场*, 2014(3): 81-90.]
- [62] Abbink K, Moller L C, O'Hara S. Sources of mistrust: An experimental case study of a Central Asian water conflict. *Environmental and Resource Economics*, 2010, 45(2): 283-318.
- [63] Seidakhmetov M, Alzhanova A, Baineeva P, et al. Mechanism of trans boundary water resources management for

- Central Asia countries. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2014, 143: 604-609.
- [64] Sorg A, Mosello B, Shalpykova G, et al. Coping with changing water resources: The case of the Syr Darya river basin in Central Asia. *Environmental Science & Policy*, 2014, 43: 68-77.
- [65] Abdullaev I, Rakhmatullaev S. Setting up the agenda for water reforms in Central Asia: Does the nexus approach help?. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(10): 1-10.
- [66] Deng Mingjiang, Long Aihua, Li Xiangquan, et al. An analysis of the exploitation, cooperation and problems of trans-boundary water resources in the five Central Asian countries. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(12): 1337-1346. [邓铭江, 龙爱华, 李湘权, 等. 中亚五国跨界水资源开发利用与合作及其问题分析. *地球科学进展*, 2010, 25(12): 1337-1346.]

A review of water issues research in Central Asia

YANG Shengtian^{1,3}, YU Xinyi², DING Jianli³, ZHANG Fei³, WANG Fei³, MA Yugang³

(1. College of Water Sciences, Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Key Laboratory of Oasis Ecology, College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: Central Asia, which is an arid inland area, has the most severe water-resource problems in the world. This paper reviews the literature on water issues in Central Asia published in the last 15 years (i.e., since 2000), covering the quantity of literature, the research institutes involved, the research approaches, and the major issues in the subject. The following conclusions can be reached based on the literature: (1) Water issues in Central Asia are an important area of geographical research. Many studies from China, Germany, the USA, and other countries have focused on the responses of water cycling processes to climate change, and on the hydrological environment of the catchment. In addition, Chinese researchers have tended to focus their studies on trans-boundary river management. (2) Temperature rise and precipitation increase are the fundamental features of climate change in Central Asia. Terrestrial water storage and river runoff have an obvious decrease as a result of temperature rise. (3) Soil salinization, land degradation and water pollution have been worsened by irrational utilization of water resources, and all of these have increased the pressures on the environment of the catchment. (4) Complicated geopolitics makes it difficult for the international community to manage the trans-boundary rivers in Central Asia. The water utilization situation in Central Asian countries is getting worse, which causes a series of ecological problems and even endangers the stability of social and economic development. Important future directions for studies on water issues in Central Asia include the relationships between population, resources and environment; the interaction mechanism of hydrology, methodological, social and political aspects; as well as the collection of basic hydrological data.

Keywords: Central Asia; hydrological cycle; water resources; catchment environment; trans-boundary river