

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2021.0007

于静洁, 阮宏威, 史尚渝, 等. 乌兹别克斯坦水资源变化及其对供给压力的影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(2): 75-82. YU J J, RUAN H W, SHI S Y, et al. Changes in Uzbekistan's water resources and its impact on supply pressure[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(2): 75-82. (in Chinese)

乌兹别克斯坦水资源变化及其对供给压力的影响

于静洁^{1,2}, 阮宏威^{1,2}, 史尚渝^{1,2}, 王平¹, KHIKMATOV Fazliddin³,
KULMATOV Rashid³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 乌兹别克斯坦国立大学, 塔什干 700174 乌兹别克斯坦)

摘要: 梳理文献资料, 结合农业、遥感和气象水文产品数据, 分析乌兹别克斯坦水资源变化及水资源供给压力。分析表明: 自 1980 年以来, 乌兹别克斯坦年平均取水量由 59 亿 m³ 增至 102 亿 m³, 灌溉农业消耗了 90% 以上的水资源; 尽管 1992 年以来耕地面积总体呈下降态势(200 km²/a), 且高耗水作物种植比重下降(-3.24%), 但受气候变暖的影响(0.31 °C/(10 a)), 单位面积作物需水量持续增加(3.27 mm/a), 导致总的需水量仍呈增加态势(2.75 亿 m³/a); 与此同时, 上游来水量减少以及上游国家用水的增加, 将进一步加剧区域水资源短缺及供给压力。为应对水资源问题, 乌兹别克斯坦需加强水管理, 改进灌溉技术, 提高用水效率, 同时, 需寻求完善跨境河流水资源分配与管理的途径。该研究有助于增进对乌兹别克斯坦水资源问题的认识, 并为应对该问题提供科学依据, 以及为“一带一路”合作发展提供支撑。

关键词: 气候变化; 人类活动; 水资源; 乌兹别克斯坦; 跨境河流; 中亚

中图分类号: TV 213 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



地处中亚内陆区的乌兹别克斯坦水资源匮乏, 是世界上水问题最严重的国家之一^[1]。据联合国 2019 年水资源评估报告, 当前全球平均水压力(Water Stress)为 11%, 而乌兹别克斯坦的水压力超过 75%^[2]。

乌兹别克斯坦戈壁与荒漠约占国土面积的 80%。其位于中亚两大内陆河流的中下游(阿姆河、锡尔河), 水资源受控于上游来水, 同时其用水也会影响阿姆河及锡尔河尾间——咸海的生态环境。自 1960 起, 苏联在中亚地区大兴水利、发展农业, 包括在乌兹别克斯坦大面积种植棉花, 大片荒地开垦为农田, 农业生产对水资源的消耗剧增。1991 年苏联解体, 中亚地区原有的水资源配置格局被打破, 中亚 5 国水资源协同优化利用难度加

大; 加之乌兹别克斯坦境内不合理的水资源利用和较为粗放型的水资源管理模式导致该国的水问题日益突出^[3,4]。

针对中亚地区水问题, 许多学者从水资源可持续利用^[5]、农业灌溉^[6]、地缘政治^[7]和国家政策^[8]等各个角度进行了分析, 并提出了应对措施及建议。但已有研究侧重于气候变化和人类活动影响下的中亚跨境河流水资源问题整体性研究, 而对于国别尺度的气候、农业和水资源关系研究较为缺乏。

本文梳理相关研究文献, 结合乌兹别克斯坦的遥感水文、气象和农业数据等, 分析气候变化与人类活动影响下该国的水资源变化及压力问题, 并提出相应对策, 以期为该地区实现水资源合理开发利用提供科学依据和决策参考。

收稿日期: 2020-07-23 修回日期: 2020-10-20 网络出版时间: 2020-10-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20201027.1842.002.html>

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项资助(XDA20040302)

作者简介: 于静洁(1964—), 女, 吉林四平人, 研究员, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: yujj@igsnr.ac.cn

通信作者: 王平(1979—), 男, 安徽肥西人, 副研究员, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: wangping@igsnr.ac.cn

1 研究方法

1.1 研究区概况

乌兹别克斯坦地处亚欧大陆干旱及半干旱区,经纬度位置为 $56^{\circ}00' \sim 73^{\circ}13' E$ 和 $37^{\circ}18' \sim 45^{\circ}57' N$,国土面积 44.74 万 km^2 :东接帕米尔高原和天山山脉,地貌类型主要为山地丘陵;西至咸海,地貌类型主要为平原。乌兹别克斯坦深居内陆,远离海洋,受太平洋暖流、印度洋暖流及北冰洋寒流的影响均很小^[9],且青藏高原热力抬升引发的高原环流进一步影响了中亚地区水汽运移,加剧了乌兹别克斯坦的干旱^[10]。乌兹别克斯坦降水时空分布不均匀,山区降水高达 1000 mm,平原区仅 80 mm。锡尔河和阿姆河总径流量达到 116 km^3 ,是乌兹别克斯坦主要地表水资源,其约占流域水资源的 52% 。独特的气候和水文条件使得乌兹别克斯坦灌溉农业发达,供水基础设施包括了 180 km的运河管道网络、超过 800 个泵站和 55 座总容量 198 亿 m^3 水库和 4100 口井,农业用水量约占乌兹别克斯坦总水资源利用量的 90% ^[11]。 45.3% 的农业用地用于粮食(小麦 39.5%)生产,其次是棉花(36.2%)、饲料作物(8.6%)和蔬菜(4.7%)。

1.2 数据来源

乌兹别克斯坦地形的划分参考李炳元等^[12]的研究,并结合研究需求及乌兹别克斯坦实际情况,将高程低于 1000 m且地形起伏度低于 30 m的地区划分为平原,其余为山地丘陵。乌兹别克斯坦的高程资料使用了美国国家航天航空局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发布的SRTM(shuttle radar topographic mission)数据,空间分辨率为 90 m(<http://srtm.csi.cgiar.org/>)。

气象及水文要素分析使用全球陆地数据同化系统(Global Land Data Assimilation System, GLDAS)中Noah模式下V2.0月值数据集,时间序列为 $1948-2010$ 年,空间分辨率为 0.25° (<https://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas/>)。GLDAS是由NASA发布的基于遥感及地面观测数据,使用了陆面模型及数据同化技术,被广泛用于水资源评价、陆面水储量变化等研究^[13-15]。水资源数据来源于乌兹别克斯坦农业部(www.agro.uz)和中亚水资源信息网(www.cawater-info.net)。

耕地面积来源于欧洲空间局气候变化项目(ESA CCI)全球土地覆盖产品,时间序列为 $1992-2015$ 年,时空分辨率分别为年尺度和 300 m(<https://www.>

esa-landcover.cci.org),该产品包含了AVHRR($1992-1999$ 年)、SPOT-VGT($2000-2013$ 年)和PROBA-V($2014-2015$ 年)遥感数据。CCI土地覆盖描述了与IPCC土地分类相匹配的土地覆盖变化特征,共包含 22 种土地覆盖类型,本文重点分析耕地的动态变化过程。

本文使用最小二乘法计算的线性趋势率表征不同要素的变化速率,并采用双边 t 检验进行显著性检测,显著性标准为 $p < 0.05$ 。

2 乌兹别克斯坦水资源变化及原因

2.1 水资源主要来源及变化

乌兹别克斯坦当地降水稀少,年可更新的水资源总量为 560 亿 m^3 ,其中 82% 源自阿姆河和锡尔河^[16]。这两条河流分别发源于天山和帕米尔高原,受冰川融水和降水补给,补给比重分别为 25% 和 15% 。阿姆河多年平均径流量为 792.80 亿 m^3/a ,锡尔河为 372.03 亿 m^3/a ,两条河总径流量为 1164.83 亿 m^3/a 。乌兹别克斯坦位于两河的中下游,阿姆河 80% 的径流产自塔吉克斯坦,锡尔河 75% 的径流产自吉尔吉斯斯坦,这两条河流在乌兹别克斯坦的产流仅为 6% 和 11% ^[17]。自 1989 年以来,阿姆河水资源总量下降明显,平均每年减少 8.18 亿 m^3 ;相较而言,锡尔河水资源总量变化不明显(图1)。气候变化对两大河流的水资源影响将直接影响乌兹别克斯坦可用水资源量。

2.2 气候变化对水资源的影响

降水与气温是影响水资源形成最为重要的气候因子^[18]。分析(图2)显示, $1948-2010$ 年,乌兹别克斯坦境内平原区和山地丘陵区多年平均气温分别为 11 和 10 $^{\circ}C$,多年平均降水分别为 135 和 362 mm。研究时段内气温、降水均呈现增加态势。研究时段内,乌兹别克斯坦境内气温均呈显著升高,平均变化趋势率为 0.31 $^{\circ}C/(10 a)$ (图2),高于同期全球升温速率 0.09 $^{\circ}C/(10 a)$ ^[19],其中在阿姆河下游及咸海周边,温度升高速率接近 0.40 $^{\circ}C/(10 a)$ 。降水量变化整体上呈微弱增加趋势,但存在区域差异。降水的平均趋势率为 0.76 mm/($10 a$),降水量呈增加趋势的面积为乌兹别克斯坦全境面积的 66.36% ,主要集中在乌兹别克斯坦的西部,其中咸海周边降水量呈显著增加,变化趋势接近 4 mm/($10 a$)。降水量呈减少趋势的面积为 33.54% ,主要分布在东部地区,包括塔什干和费尔干纳谷地(图2(b))。

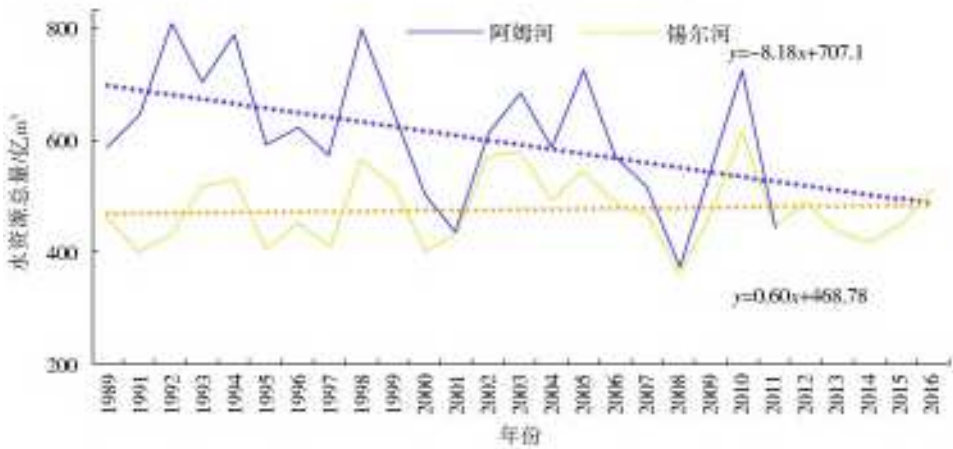


图1 阿姆河和锡尔河流域不同水文年(10月至次年9月)水资源总量变化

Fig. 1 Water resources contents of Amu Darya and Syr Darya in different hydrological years (October to September next year)

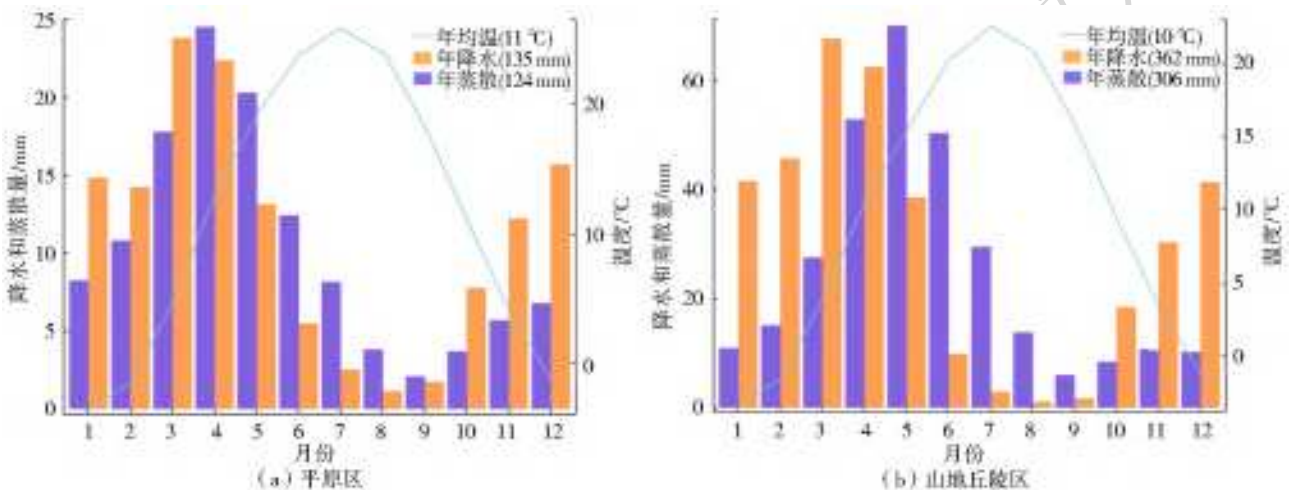


图2 乌兹别克斯坦多年平均月气温、降水量及蒸散量(1948—2010年)

Fig. 2 Monthly temperature, precipitation, and evapotranspiration in Uzbekistan from 1948 to 2010

在降水 and 气温上升的同时,乌兹别克斯坦实际蒸散量也随之升高。研究时段内,乌兹别克斯坦蒸散量的变化速率为 $0.83 \text{ mm}/(10 \text{ a})$,空间分布特征与降水相同。境内产水量较少,但研究时段内当地地表及地下径流量(当地产水量)除东部少数地区均呈微弱增加外,变化速率均为 $0.04 \text{ mm}/(10 \text{ a})$ 。可见气候变化加剧了乌兹别克斯坦的水循环速率,导致 1948—2010 年的降水、蒸散量及本地产流量呈增加趋势。

气候变化虽然使乌兹别克斯坦自产水资源略有增加,但是该国自产水资源所占可利用水资源的份额很少,水资源主要来自入境的阿姆河和锡尔河。而阿姆河、锡尔河的水源区天山地区及帕米尔高原的冰川正加速消融。研究表明,1963—2000 年,塔吉克斯坦境内天山山脉的冰川减少了 28% ^[20]。随着气温持续升高,预计到 2050 年,中亚地区的冰川将减少 $36\% \sim 45\%$ ^[21]。温度的升高会增加源区降水量,但是同时也会增强蒸散能力,两者共同作用致使区域上游来水量减少^[22]。预计到本世纪末,受气候变化影

响,阿姆河径流将减少 $10\% \sim 20\%$ ^[23-24]。因此,气候变化对乌兹别克斯坦可利用水资源整体是不利的。

2.3 人类活动对水资源的影响

人类活动一方面体现为人口增长、经济发展增加对水资源量的消耗,另一方面则体现为通过调整经济活动调控对水资源消耗的增长。

20 世纪中期至今,乌兹别克斯坦经历了人口的迅速增长。乌兹别克斯坦 1950 年的人口为 626 万人,而 2019 年增至 3298 万人,增加了近 4 倍。人口的急剧增长致使对水资源的需求迅速增加^[25]。在人口扩张和农业粗放化管理的背景下,乌兹别克斯坦取水量呈明显增加的趋势(图 3)。1980—2000 年平均取水量仅 59 亿 m^3 ,2001—2004 年年均取水量激增至 140 亿 m^3 ,2005—2007 年年均取水量达到 176 亿 m^3 ,之后受水资源限制,2008—2012 年年均取水量下降至 102 亿 m^3 。未来乌兹别克斯坦经济发展和咸海生态环境保护的用水需求增加必将导致水资源供需矛盾进一步加剧。

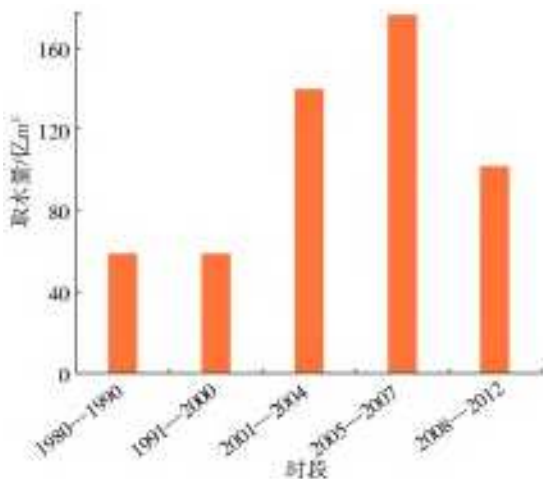


图 3 1980—2012 年乌兹别克斯坦年平均取水量
Fig. 3 Mean annual water withdrawals in Uzbekistan from 1980 to 2012

农业是乌兹别克斯坦最重要经济产业之一。乌兹别克斯坦的灌溉面积达 4.4 万 km², 灌溉用水量占总用水量 90%^[26], 减少耕地面积、调整高耗水作物种植比例是该国水资源调控的重要措施。1992 年乌兹别克斯坦耕地面积为 9.13 万 km², 至 1999 年达到最大值 9.15 万 km²; 1999—2001 年耕地面积下降明显, 2002 年后耕地面积持续下降, 至 2015 年耕地面积达到最低值 8.82 万 km² (图 4); 1992—2015 年, 乌兹别克斯坦多年平均耕地面积 9.0 万 km², 其中锡尔河流域 3.6 万 km², 阿姆河流域 5.4 万 km²。受水资源量的限制, 乌兹别克斯坦的耕地面积总体呈减少态势 (-0.02 万 km²/a), 研究时段内共减少了 0.31 万 km²。

乌兹别克斯坦农田种植的主要作物是棉花和小麦。有研究^[27]表明, 即使灌溉面积不扩张, 预估到 2050 年, 受气候变化影响, 灌溉用水也将增至 630 亿 m³。因此, 调整作物种植结构、减少高耗水作物种植比例

是该国一项重要的减少水资源消耗的措施。2000—2018 年, 棉花 (39.3%) 和小麦 (23.7%) 是乌兹别克斯坦主要作物类型, 种植面积之和超过耕地面积的 60%, 蔬菜和玉米分别占 10.7% 和 7.7%, 其他作物均不足 5%。图 5 反映了 2000—2018 年乌兹别克斯坦种植结构的动态变化, 研究时段内, 棉花和小麦的种植比例均呈下降趋势, 趋势率分别为 -0.17%/a 和 -0.19%/a。总体而言, 乌兹别克斯坦高耗水的棉花以及小麦种植比重下降, 种植结构在一定程度上得到了优化。但气候变化导致单位面积作物需水量呈持续增加趋势 (3.27 mm/a), 平均达到 682.2 mm。气候变化导致的单位面积作物需水量的增加, 不仅抵消了减少耕地面积和种植结构优化带来的水资源消耗量减少, 而且导致作物总需水量仍呈明显增加态势 (2.75 亿 m³/a), 在研究时段内, 年作物总需水量增加了 49.5 亿 m³ (图 6)。目前, 乌兹别克斯坦仍致力于减少耕地面积、优化种植结构, 以期降低单位面积农业水资源消耗量, 并减少作物总需水量。

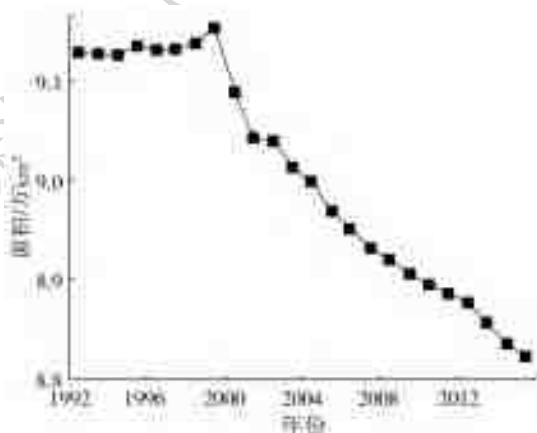


图 4 乌兹别克斯坦 1992—2015 年逐年耕地面积
Fig. 4 Cropland area from 1992 to 2015 in Uzbekistan

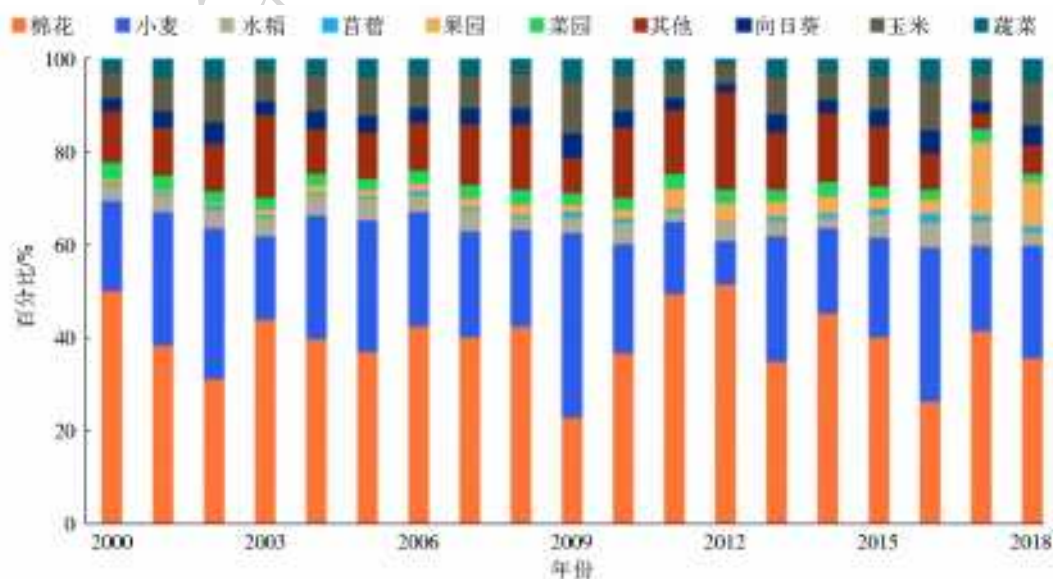


图 5 2000—2018 年乌兹别克斯坦作物种植结构
Fig. 5 Crop planting structure in Uzbekistan from 2000 to 2018

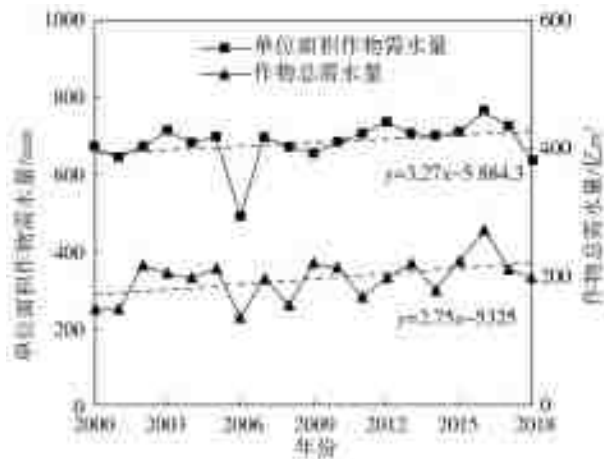


图6 2000—2018年乌兹别克斯坦单位面积作物需水量及总需水量

Fig. 6 Crop water requirement per unit area and total crop water requirement from 2000 to 2018 in Uzbekistan

3 乌兹别克斯坦水资源供给压力及解决前景

在气候变化和人类活动的共同作用下,乌兹别克斯坦的可利用水资源量日益减少,陆地水储量平均下降率为 $-0.51 \text{ mm}/(10 \text{ a})$ 。然而,需求量的不断增加致使水资源供需矛盾日益加剧。与此同时,农业水资源利用与管理水平相对较低及跨境河流的水权纠纷等,在一定程度上加剧了乌兹别克斯坦的水问题,为乌兹别克斯坦水资源利用增添了巨大压力。

乌兹别克斯坦农业灌溉设施不完善,灌溉方式主要为自流沟灌(63.9%),灌溉用水利用效率不足40%,水资源浪费严重^[3,28]。同时,沟灌导致田间地下水位升高,进而造成土壤盐渍化。在乌兹别克斯坦,约有50%的耕地存在土壤盐渍化问题,主要集中在阿姆河下游地区^[25,29]。在咸海及阿姆河下游地区,受盐碱化影响,土地生产力降低了约50%^[30],极大地影响了经济发展。水资源问题不仅限制了乌兹别克斯坦经济的发展,同时也对公众的健康造成了不利影响^[31]。直到2010年,乌兹别克斯坦仍有750万人无法获取清洁的饮用水^[32]。紧邻咸海的卡拉卡尔帕克斯坦共和国居民各种疾病的发病率显著高于其他地区^[25]。

跨境河流管理困难也是乌兹别克斯坦水问题的重要原因。乌兹别克斯坦的水资源依赖阿姆河和锡尔河,而这两条河流的水源地分别为吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦。在苏联时期,整个中亚地区实行集中管理和经济补偿模式,统一调配水资源,具体为:上游地区发展水利设施,以保障下游的用水;而下游则发展农业和工业,同时为上游提供能源。自1991年起,苏联解体,中亚5国独立,政治上的巨大变化

使得原有的水资源配置模式被打破,各国之间的水资源矛盾加深^[9]。位于河流上游的塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦水资源丰富,但是耕地较少且能源匮乏,因此为满足自身发展需求,大力开发水电,由此导致乌兹别克斯坦农业用水无法得到保障^[33]。

乌兹别克斯坦的水问题是由自然地理条件、气候变化及人类活动共同导致的,因此水问题的解决需要做到适应自然地理条件、积极应对气候变化、缓解人类活动对水资源的不利影响。

治理水问题的核心是加强水管理,许多学者^[3,26,28,34]对中亚及乌兹别克斯坦的水管理进行相应的研究,并提出了一系列改进的措施及方法。乌兹别克斯坦农业耗水量大,水资源利用效率低,因此治理水问题首先需要控制农业耗水量,采用先进管理技术提高水资源利用效率。有学者在原有的沟灌基础上进行改进,提出了双边沟灌(double sides furrows)^[35]、长短沟灌(short and long furrows)^[36]和交替沟灌(alternative furrows)^[29]等措施。但是在乌兹别克斯坦干旱的气候环境下,地面灌溉由于渗漏和蒸发量大,因此水资源利用效率依旧较低,而发展滴灌技术替代原有的地面灌溉才能真正实现水资源利用效率的提升^[37]。相比地面灌溉,滴灌可以节省35%的水资源并提高21%的产量^[38]。同时,需要调整种植模式,改变单一的以棉花等高耗水作物为主的种植业经济结构^[35]。

在发展经济的同时,乌兹别克斯坦还须保障咸海的生态用水。生态环境对区域水资源具有一定的调节能力,生态系统退化会导致原有的生态系统功能丧失,引发湿地萎缩、植被退化、土地荒漠化、沙尘暴及盐尘暴等,进一步恶化乌兹别克斯坦的水问题^[39]。各国之间的水资源分布及消耗不均衡是中亚地区水问题的重要原因^[40]。因此,乌兹别克斯坦水问题的解决还依赖于国际合作,主要包括与周边国家一同完善跨境河流的管理,并积极寻求国际组织的帮助。围绕跨界河流的管理,中亚地区曾签署过水资源调配协议,还成立了中亚水资源协调国际委员会和咸海拯救国际基金等组织^[1,34]。但是这些协议及组织对国家行为的约束力极其有限,未来需中亚各国之间对水资源使用及分配达成共识,加强中亚各国间的交流与合作,实现资源共享和双方共赢,共同努力以推动中亚水问题的解决^[41]。

4 结论

乌兹别克斯坦先天水资源不足,农业灌溉用水占乌兹别克斯坦水资源总量的90%以上。水资源

主要依赖阿姆河与锡尔河的径流补给,来水量受上游国家塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦用水的影响。受气候变化影响,可用水资源呈现下降态势。自 1989 年以来,两河水资源总量年均递减近 1%。然而,乌兹别克斯坦农业用水量却在增加。受区域增温的影响,乌兹别克斯坦农作物需水总量呈增加趋势,导致区域陆地水储量呈减少态势。因此,水资源短缺形势严峻、供给压力还将随经济发展不断加大。

乌兹别克斯坦尽管已经采取压缩耕地面积,调减高耗水作物种植比例,但自流沟灌的灌溉方式和相对粗放式管理,还没有做到水资源供用平衡。同时,已经出现的咸海萎缩、土壤盐渍化等环境问题,以及由此引发的危害公众健康问题,进一步加剧了区域水资源供给压力。为此,建议改进灌溉技术,提高农业用水效率,进行土壤盐渍化治理,并强化对咸海生态用水的保障。

乌兹别克斯坦的水资源所依赖的阿姆河和锡尔河均为跨境河流,前苏联的中亚 5 国水资源统一配置模式对乌兹别克斯坦水资源短缺构成重大影响,必须进一步加强与周边国家沟通与合作,寻求完善跨境河流水资源分配与管理的途径。

参考文献(References):

- [1] ABDULLAEV I, RAKHMATULLAEV S. Transformation of water management in Central Asia: from State centric, hydraulic mission to socio political control[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 73(2): 849-861. DOI: 10.1007/s12665-013-2879-9.
- [2] CONNOR R, UHLENBROOK S, KONCAGUL E. United Nations World Water Development Report 2019: Leaving no one behind[M]. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2019. DOI: 10.18356/0d8fe383-en.
- [3] MIRSHADIEV M, FLESKENS L, VAN D J, et al. Scoping of promising land management and water use practices in the dry areas of Uzbekistan[J]. *Agricultural Water Management*, 2018(207): 15-25. DOI: 10.1016/j.agwat.2018.05.015.
- [4] 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[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, (110): 8-98. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2013.08.002.
- [5] CAI X, MCKINNEY D C, ROSEGRANT M W. Sustainability analysis for irrigation water management in the Aral Sea region[J]. *Agricultural Systems*, 2003, 76(3): 1043-1066. DOI: 10.1016/S0308-521X(2)00028-8.
- [6] RAKHMATULLAEV S, HUNEAU F, CELLE JEAN-
TON H, et al. Water reservoirs, irrigation and sedimentation in Central Asia: a first cut assessment for Uzbekistan[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68(4): 985-998. DOI: 10.1007/s12665-012-1802-0.
- [7] ABDOLVAND B, MEZ L, WINTER K, et al. The dimension of water in Central Asia: security concerns and the long road of capacity building[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 73(2): 897-912. DOI: 10.1007/s12665-014-3579-9.
- [8] DJANBEKOV N, SOMMER R, DJANIBEKOV U. Evaluation of effects of cotton policy changes on land and water use in Uzbekistan: Application of a bio economic farm model at the level of a water users association[J]. *Agricultural Systems*, 2013(118): 1-13. DOI: 10.1016/j.agry.2013.02.004.
- [9] 邓铭江, 龙爱华, 章毅, 等. 中亚五国水资源及其开发利用评价[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(12): 1347-1356. (DENG M J, LONG A H, ZHANG Y, et al. Assessment of water resources development and utilization in the five Central Asia countries[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(12): 1347-1356. (in Chinese))
- [10] 吴国雄, 毛江玉, 段安民, 等. 青藏高原影响亚洲夏季气候研究的最新进展[J]. *气象学报*, 2004, 62(5): 528-540. (WU G X, MAO J Y, DUAN A M, et al. The latest progress in the study of the influence of Qinghai Tibet Plateau on Asian summer climate[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(5): 528-540. (in Chinese))
- [11] RASHID K. Problems of sustainable use and management of water and land resources in Uzbekistan[J]. *Journal of Water Resource and Protection*, 2014(6): 35-42. DOI: 10.4236/jwarp.2014.61006
- [12] 李炳元, 潘保田, 韩嘉福. 中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(4): 535-543. (LI B Y, PAN B T, HAN J F. Basic terrestrial geomorphological types in China and their circumscriptions[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(4): 535-543. (in Chinese))
- [13] RODELL M, HOUSER P R, JAMBOR U, et al. The global land data assimilation system[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85(3): 381-394. DOI: 10.1175/BAMS-85-3-381.
- [14] PROULX R A, KNUDSON M D, KIRILENKO A, et al. Significance of surface water in the terrestrial water budget: A case study in the Prairie Coteau using GRACE, GLDAS, Landsat, and groundwater well data[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(9): 5756-5764. DOI: 10.1002/wrcr.20455.
- [15] SYED T H, FAMILIETTI J S, RODELL M, et al. Analysis of terrestrial water storage changes from GRACE and GLDAS[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(2): 1-15. DOI: 10.1029/2006WR005779.
- [16] RAKHMATULLAEV S, MARACHE A, HUNEAU

- F, et al. Geostatistical approach for the assessment of the water reservoir capacity in arid regions: A case study of the Akdarya reservoir, Uzbekistan[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 63(3): 447-460. DOI: 10.1007/s12665-010-0711-3.
- [17] 李立凡, 陈佳骏. 中亚跨境水资源: 发展困境与治理挑战[J]. *国际政治研究*, 2018, 3: 89-108. (LI L F, CHEN J J. Cross-border water resources in Central Asia: Development dilemma and governance challenges[J]. *The Journal of International Studies*, 2018, 3: 89-108. (in Chinese))
- [18] 刘昌明, 刘小莽, 郑红星. 气候变化对水文水资源影响问题的探讨[J]. *科学对社会的影响*, 2008(2): 21-27. (LIU C M, LIU X M, ZHENG H X. Discussion on the impact of climate change on hydrology and water resources[J]. *Impact of Science on Society*, 2008(2): 21-27. (in Chinese))
- [19] Intergovernmental panel on climate change. *climate change 2013: The physical science basis* [M]. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2014. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.
- [20] NIEDERER P, BILENKO V, ERSHOVA N, et al. Tracing glacier wastage in the northern Tien Shan (Kyrgyzstan/Central Asia) over the last 40 years[J]. *Climatic Change*, 2007, 86(1-2): 227-234. DOI: 10.1007/s10584-007-9288-6.
- [21] HAGG W, HOELZLE M, WAGNER S, et al. Glacier and runoff changes in the Rukhk catchment, upper Amu Darya basin until 2050[J]. *Global and Planetary Change*, 2013(110): 62-73. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2013.05.005.
- [22] AGALTSEVA N A, BOLGOV M V, SPEKTORMAN T Y, et al. Estimating hydrological characteristics in the Amu Darya River basin under climate change conditions[J]. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2011, 36(10): 681-689. DOI: 10.3103/S1068373911100062.
- [23] AIZEN V B, AIZEN E M, KUZMICHENOK V A. Geoinformational simulation of possible changes in Central Asian water resources[J]. *Global & Planetary Change*, 2007, 56(3-4): 341-358. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2006.07.020.
- [24] WHITE C J, TANTON T W, RYCROFT W. The impact of climate change on the water resources of the Amu Darya basin in Central Asia[J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(15): 5267-5281. DOI: 10.1007/s11269-014-0716-x.
- [25] ALLEN, BARROS V, BROOME J, et al. *Climate Change 2014: Synthesis Report* [M]. IPCC Fifth Assessment Synthesis Report, 2014.
- [26] GULIYULDASHEVA U H, JAMES C. Current trends in water management in Central Asia[J]. *Peace and Conflict Review*, 2010, 5(1): 1-13.
- [27] SUTTON W, SRIVASTAVA J, LYNCH B, et al. Uzbekistan: Climate Change and Agriculture Country Note[M]. Washington, DC: World Bank Group, 2010.
- [28] BOBOJONOV I, BERG E, FRANZ VASDEKI J, et al. Income and irrigation water use efficiency under climate change: An application of spatial stochastic crop and water allocation model to western Uzbekistan[J]. *Climate Risk Management*, 2016(13): 19-30. DOI: 10.1016/j.crm.2016.05.004.
- [29] REDDY J M, JUMABOEY K, MATYAKUBOV B, et al. Evaluation of furrow irrigation practices in Fergana valley of Uzbekistan[J]. *Agricultural Water Management*, 2013(117): 133-144. DOI: 10.1016/j.agwat.2012.11.004.
- [30] ABDULKASIM OV H, ALIBEKOVA A, VAKHABOV A. Desertification problems in Central Asia and its regional strategic development[R]. Samarkand, Uzbekistan: NATO Advanced Research Workshop, 2003.
- [31] SEVERSKIY I V. Water related problems of Central Asia: Some results of the (GIWA) International Water Assessment Program[J]. *Ambio*, 2004, 33(1-2): 52-62. DOI: 10.1579/0044-7447-33.1.52.
- [32] BEKTURGANOV Z, TUSSUPOVA K, BERNDTSON R, et al. Water related health problems in Central Asia: A review[J]. *Water*, 2016, 8(6): 219-1-13. DOI: 10.3390/w8060219.
- [33] 杨胜天, 于心怡, 丁建丽, 等. 中亚地区水问题研究综述[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 79-93. (YANG S T, YU X Y, DING J L, et al. A review of water issues research in Central Asia[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 79-93. (in Chinese)) DOI: 10.11821/dlxh201701007.
- [34] 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[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 73(2): 487-499. DOI: 10.1007/s12665-014-3789-1.
- [35] BEKCHANOV M, LAMERS J P, MARTIUS C. Pros and cons of adopting water wise approaches in the lower reaches of the Amu Darya: a socio-economic view[J]. *Water*, 2010, 2(2): 200-216. DOI: 10.3390/w2020200.
- [36] KARIMOV A, MOLDEN D, KHAMZINA T, et al. A water accounting procedure to determine the water savings potential of the Fergana valley[J]. *Agricultural Water Management*, 2011(108): 61-72. DOI: 10.1016/j.agwat.2011.11.010.
- [37] IBRAGIMOV N, EVETT S, ESANBEKOV Y, et al. Water use efficiency of irrigated cotton in Uzbekistan under drip and furrow irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 90(1-2): 112-120. DOI: 10.1016/j.agwat.2007.01.016.
- [38] KAMILOV B, IBRAGIMOV N, ESANBEKOV Y, et al. Drip irrigated cotton: Irrigation scheduling study by use of soil moisture neutron probe[J]. *International Wa*

- ter and Irrigation, 2003(23): 38-41.
- [39] MICKLIN P. The past, present, and future Aral Sea [J]. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 2010, 15(3): 193-213. DOI: 10.1111/j.1440-1770.2010.00437.x.
- [40] 廖成梅. 中亚水资源问题难解之原因探析[J]. *新疆大学学报(哲学·人文社会科学版)*, 2011, 39(1): 102-105. (LIAO C M. Causes of water resources disputes in Central Asia countries[J]. *Journal of Xinjiang University (Philosophy, Humanities & Social Science)*, 2011, 39(1): 102-105. (in Chinese) DOI: 10.13568/j.cnki.issn1006-2820.2011.01.014
- [41] 张小瑜. 乌兹别克斯坦农业经济发展与水资源利用[J]. *边疆经济与文化*, 2012(9): 22-23. (ZHANG X Y. Agricultural economic development and water resource utilization in Uzbekistan[J]. *The Border Economy and Culture*, 2012(9): 22-23. (in Chinese)

Changes in Uzbekistan's water resources and its impact on supply pressure

YU Jingjie^{1,2}, RU AN Hongwei^{1,2}, SHI Shangyu^{1,2}, WANG Ping¹, KHIKMAT OV Fazliddin³, KULMATOV Rashid³

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. National University of Uzbekistan, Tashkent 700174, Uzbekistan)

Abstract: The change in water resources and the consequent water resources supply pressure in Uzbekistan is analyzed by literature reviewing, based on agricultural, remote sensing, and hydro-meteorological reanalysis data. The analysis shows that: since 1980, the average annual water withdrawals have increased from 5.9 billion m³ to 10.2 billion m³ in Uzbekistan and more than 90% of water resources are consumed for irrigation agriculture: despite declines in both areas of cropland (200 km²/a) and the proportion of high water consuming crops (-3.24%), the water demand per unit area is still increasing (3.27 mm/a) under the influence of a warming climate (0.31 °C/10 a), the overall water demand is still increasing (275 million m³/a); simultaneously, the decrease of upstream inflow and the further increase in water use in upstream countries will further aggravate the regional water shortage and supply pressure. To deal with the problem of water resources, Uzbekistan needs to strengthen water management, improve irrigation technology, and improve water use efficiency. Therefore, it is necessary to strengthen cooperation with neighboring countries and to seek ways to improve the allocation and management of water resources of transboundary rivers. The study will help to enhance understanding of the water resource problems in Uzbekistan and provide a scientific basis for addressing them, as well as support the development of cooperation in the "Belt and Road" region.

Key words: climate change; human activity; water resource; Uzbekistan; trans-boundary river; Central Asia

(上接第 49 页)

Assessment of sponge city scheme in a hillside area based on SWMM model

LI Huaimin¹, CHANG Xiaodong^{2,3}, XU Zongxue^{2,3}, WANG Jingjing^{2,3}

(1. Jinan Hydrology Bureau, Jinan 250014, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China)

Abstract: A hillside residential area in Jinan city is selected to study the main road of "road flood discharge" which is generalized as an irregular open channel, and the influence of sponge city reconstruction scheme on design rainfall hydrological process in different return periods based on the SWMM (storm water management model) model. The results show that: the SWMM model can be used to simulate the process of "flooding on road" in the hillside area, and the rainfall runoff process can be effectively controlled by the selected modification scheme (low impact development and drainage system reconstruction); for different return periods (1 year, 3 years, and 5 years) within 5 years, the reduction rates of total runoff and peak flood discharge from Out 01 and Out 02 are over 20% and 10%, respectively, the peak water level reduction rate at Out 01 is greater than 15%, which significantly reduces the impact of the "road flood" disaster in the study area. This study can provide a theoretical basis and significant reference for the simulation of "flooding on road" and the construction and management of sponge cities in the hillside area.

Key words: SWMM; hillside area; sponge city; flooding on road; flood control