

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20201222

# 中亚干旱区陆地水资源对气候变化的响应

周启鸣<sup>1</sup>, 李剑锋<sup>1</sup>, 崔爱红<sup>1,2</sup>, 刘会增<sup>1,2</sup>

(1.香港浸会大学 地理系, 香港 999077; 2.深圳大学 自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室, 广东 深圳 518060)

**摘要:**气候变化对中亚干旱区高山融雪、蒸散发以及径流等水循环过程产生影响,从而引起区域水资源在空间和时间上的重新分配。在归纳总结降水、土壤水、地表水、陆地水储量等不同水体类型在气候变化下改变情况的基础上,综述了中亚干旱区陆地水资源变化对气候变化响应的现状及进展。由于使用的数据和评估方法不同,水资源变化研究结果具有一致性及不确定性。基于上述总结,对中亚干旱区水资源对气候变化响应方面的展望及挑战进行了讨论。

**关键词:**中亚干旱区;水资源;不同水体类型;气候变化

**中图分类号:**TV11 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0852(2021)02-0008-06

## 1 引言

水资源是人类赖以生存的自然资源,在缺水的干旱地区显得尤其珍贵<sup>[1]</sup>。2019年联合国世界水发展报告指出水资源短缺是威胁人类生活和挑战世界可持续发展的关键问题之一,特别是水资源已十分缺乏的干旱地区<sup>[2]</sup>。历史观测及未来气候预测显示,干旱地区水循环更易受气候变化影响且敏感度极高,因此气候变化下干旱区水资源短缺问题可能更加显著<sup>[3-5]</sup>。同时,干旱地区不断增长的人口和经济发展带来与日俱增的用水需求,而水污染以及含水层枯竭进一步加剧了水资源的供需矛盾,使得干旱区社会经济和自然环境面临巨大的水资源短缺挑战。

气候变化是21世纪最主要和最复杂的挑战之一,其引起的蒸散发增加和降水规律变化对区域和全球水循环和水资源产生深远影响<sup>[6-10]</sup>。由于水资源对人类社会和自然环境的重要性,水循环和水资源对气候变化的响应已经引起了科学界和社会公众的广泛关注。人们普遍认识到,气候变化加剧了水循环,增加了极端天气和极端水文事件(如洪涝和干旱)的频率和强度。气候变化下,干旱区由于蒸散发增加和土壤水分减少而遭受的植

被、农作物损失比其它区域大<sup>[11]</sup>,同时受更频繁和极端的干旱等灾害影响,可能导致更加严峻的水资源短缺问题,给干旱区供水、农业、畜牧业等带来更大威胁<sup>[12]</sup>。

同时,水库建造、耕地面积变化、取水和消耗等人类活动在近几十年对陆地水资源影响较大,相关研究指出当前人为干预对于干旱地区的年均径流的影响已超过全球变暖<sup>[13-14]</sup>。近年来,气候变暖以及高强度的人类活动,如不合理的农田扩张<sup>[15-18]</sup>、农田弃置或管理不善和地下水开采,改变了干旱地区冰川、融雪、径流等地表水资源的分布及变化规律<sup>[19-20]</sup>。随着人口增长和经济发展,干旱区面临的水资源问题进一步恶化,其影响进一步加深,这将对生态系统和社会经济的可持续性以及区域稳定构成威胁。

中亚干旱区地处亚洲腹地,范围包括中亚五国和中国新疆地区(见图1)<sup>[21]</sup>,常年干旱少雨,是典型的温带大陆性气候。人为因素如过度抽取灌溉是引发中亚干旱区的水资源问题的原因之一<sup>[22]</sup>,此外,气候变化也造成过去几十年中中亚水资源匮乏,气候变化会导致水资源在时间和空间分布上的不均衡分配,从而造成极端水文事件的频繁发生<sup>[23-24]</sup>。这些气象和水文变化共同作用于中亚水资源变化。所以研究不同水体类

收稿日期:2020-04-18

基金项目:国家自然科学基金项目“干旱区陆地水资源评估及其对气候变化的响应”(41971386)

作者简介:周启鸣(1956-),男,北京人,博士,教授,主要研究方向为地理信息系统和遥感科学与技术及其应用方法。E-mail: qiming@hkbu.edu.hk

通讯作者:崔爱红(1989-),女,山东聊城人,博士研究生,主要研究方向为基于GRACE重力卫星的水文干旱监测。E-mail: 17482402@life.hkbu.edu.hk

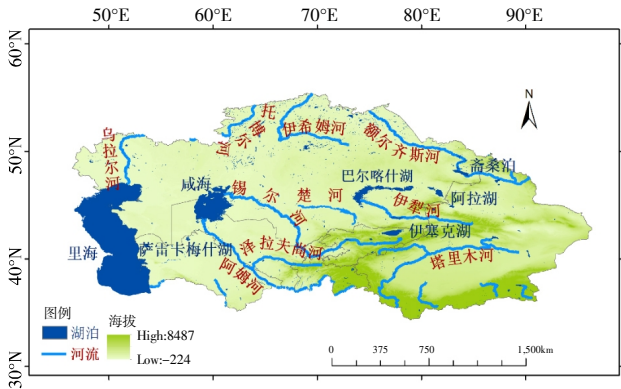


图 1 中亚地区范围及水资源分布

Fig.1 Geographical boundary and water resources distribution of Central Asia

型对气候变化响应是实现水资源合理分配和利用的重要基础。近年来多源数据和多种数值模拟手段被应用于中亚不同水资源对气候变化的响应关系研究,例如利用遥感、重分析数据分析气候变化对水体面积、水位及陆地水储量的影响等。虽然目前针对中亚地区水资源对气候变化的响应多有研究,但仍缺乏对中亚干旱区不同水体类型变化对气候响应方面的系统归纳。本文阐述并总结中亚干旱区对气候变化响应的研究现状与进展,从而为中亚干旱区的水资源合理利用提供参考与借鉴。

## 2 气候变化下中亚降水规律改变

中亚干旱区由于地处内陆,对气候变化响应十分敏感,近十几年来中亚地区已成为研究全球气候变化与水资源响应的热点区域。目前研究采用不同评估手段对中亚陆地水储量、土壤水、冰川消融和径流等水体的变化进行了评估,并探究中亚水体对其影响因素如气候变化的响应规律。总体来说,相关研究从基于站点观测数据为主发展到以基于遥感监测、再分析等多数据源及水文模型模拟为主。采用不同评估手段的研究结果具有一致性也有差异性,体现了中亚地区水资源变化评价的不确定性。气候变化对水资源的影响由于水体海拔高度、地理位置、水体类型、季节等因素的不同而不同,相关研究也会受到所选择数据、模型等不确定性的影响。

降水是中亚陆地水资源的重要来源之一<sup>[25]</sup>,气候变化下降水规律的改变对陆地水资源有重要影响。上述介绍的不同评估手段被用于评价中亚降水规律变化,而基于不同手段评价的降水变化具有一致性及一定程度的差异性。Chen 等利用基于站点数据重采样的 CRU 再分析数据研究了 1930~2009 年中亚降水与全

球变暖现象的关系<sup>[26]</sup>。结果表明,在过去的 80a 中,以西风循环为主的中亚干旱地区的年降水量总体上有所增加,而冬季则有明显的增加趋势。受中纬度西风环流、西伯利亚高压、北极涛动、西风急流北移和副热带高压等多重作用的影响,中亚地区的降水变化存在不均衡现象。Zhang 等根据 1957~2005 年间中亚地区的 55 个气象站实测的每日气候观测资料计算 17 个极端气候指数并追踪中亚的极端气候变化趋势<sup>[27]</sup>,极端降水表现出时空变异性,年总降水量及极端降水增加,但年度最大连续干旱天数显著下降。天山、哈萨克丘陵、克孜勒库姆沙漠和新疆大部分地区的极端干旱都经历了轻微的湿润趋势。所有降水指数在 1986 年变化异常。西伯利亚高压指数和青藏高原指数可能是影响气候的最重要的大气环流因子。Mannig 等研究发现,区域气候模型 REMO 可以较好地模拟中亚平均温度和降水的空间分布<sup>[28]</sup>。相对再分析数据集 ERA-40 和 NCEP/NCAR,REMO 模拟通常更接近观测数据,并且显示出更高的空间细节。在 IPCC AIB 情景下,使用全球气候模式 ECHAM 驱动 REMO 进行未来气候分析发现,到 21 世纪末,中亚北部和山区的冬季温度气候变化最大,夏季中亚南部的变暖最强烈,而降水变化在空间上更加不均一。同时,由于不同气候情景、气候模式及空间分辨率处理方法等因素,相关降水未来变化预估具有一定不确定性<sup>[29]</sup>。2002 年,施雅风等根据在中国西北的观测站降水增加的纪录,提出中国西北由暖干到暖湿的假说<sup>[30]</sup>,这一假设在随后几年中被多项研究证实<sup>[31-32]</sup>。刘亚敏等利用统计资料具体分析了新疆水资源对气候变化的响应<sup>[32]</sup>:1961~2006 年,新疆年平均气温逐渐上升,且在 1995 年后呈显著上升趋势;年均降水在总体上有所增加且各地区分布不均,降水增加速度有明显加快。

总的来说,在过去几十年中,中亚地区气温整体呈上升趋势,且上升速率显著增加,远高于全球及北半球的平均增长率,极端温度在空间分布上也呈上升趋势。除伊朗高原地区降水减少外,大部分区域降水呈增加趋势,极端降水呈上升趋势但连续干旱时间变短。在未来 100 年里,中亚北部、南部和山区温度可能会明显升高,降水也呈现更加显著的空间差异性。

## 3 土壤水和地表水对气候变化的响应

土壤水对气候变化较敏感,研究土壤水的空间时间变化特征有助于更好地分析地表水文水文过程。王

景凯等用 AMSR-E 地表土壤水遥感数据对中亚五国 2003~2010 年的植被生长季节的土壤含水量进行分析,并结合 CRU 再分析数据分析了土壤水变化与气温和降水之间的关系<sup>[33]</sup>。研究表明,中亚五国的土壤含水量变化率主要由西南地区向北、东方向逐渐降低。4~10 月份的土壤水含量和降水的空间变化相似,与气温的变化相反。土壤水除秋季变湿外,其他季节均有变干趋势。基于 ECV-SM 微波土壤遥感数据和 CRU TS 再分析降水及温度数据,Li 等详细探讨了中亚五国和新疆的土壤水变化动态及其对气候变化的响应<sup>[34]</sup>。1978~2010 年,中亚土壤水量呈下降趋势,中亚五国的土壤干燥趋势比新疆更为严重,而新疆自 2004 年以来土壤水量则逐渐增加,中亚的土壤干旱化趋势对显著变暖趋势均表现出负响应。根据全球气候模式预估,未来土壤水可能进一步变干<sup>[35]</sup>。气温的显著升高主导了除吉尔吉斯斯坦以外的其他四个国家的土壤干化,而降水对中亚国家的土壤水分没有显著影响。干燥变暖和变冷的地区(占总面积的 89%左右)主要分布在主要农业地区,该趋势不利于农业的可持续发展。然而,就中亚地区整体而言,若将湿度、风速、温度等参数考虑在内,用 Penman-Monteith 公式计算的常用于土壤水干旱评估的 PDSI 指数显示该地区在过去 60a 无明显干湿变化<sup>[36]</sup>。基于简单的统计方法,中亚大部分地区土壤水量减少,并且与气温呈负相关,与降水关系不明确。但考虑多个气候变化因素的 PDSI 干旱指数显示中亚土壤无明显干湿变化。然而采用遥感、气候模式模型、水文模型等不同技术手段评估的土壤水变化趋势在局部具有一定的不一致性<sup>[37]</sup>。

湖泊作为地表水储量的重要组成部分,可以较直观地反映地表水资源变化以及气候变化与人类活动对陆面生态系统的影响。基于 Landsat MSS/TM/ETM+遥感数据和 GIS 技术,白洁等发现 1975~2007 年中亚湖泊面积普遍出现缩小,湖泊缩小面积与降水变化一致,都由西向东减少<sup>[38]</sup>。李靖等利用多时相、空间分辨率为 500 米的 MODIS 遥感反射率产品,分析了 2001~2016 年中亚五国 9 个典型湖泊的水量变化及主导因素<sup>[39]</sup>。结果表明,人类作用和气候变化共同作用于湖泊水面面积变化,且整体面积呈衰减趋势,其中海拔较低的平原尾间湖及水库由于受人类影响较大,变化较为显著,如威海南北湖、萨雷卡梅什湖、斋桑泊等。相对而言,海拔较高的高山封闭湖年内及年际变化较平缓,且大部分湖泊面积呈增加趋势,主要原因是气候变暖使流入

阿拉湖、萨瑟克湖、赛里木湖等湖泊的冰川融水增加。Liu 等基于 MODIS 遥感反射率数据提取了水体面积,并结合 GPCP 气象数据以及 GHCN CAMS 地表温度再分析数据对 2001~2016 年春夏秋季中亚干旱区 14 个湖泊的面积变化进行了分析<sup>[40]</sup>,研究结果表明:湖泊总体面积呈下降趋势,其中平原湖泊面积与总面积变化规律一致,而气候暖干向暖湿变化引起的降水增加使得高寒地区的湖泊面积扩大。多项研究表明:中亚平原湖泊面积呈下降趋势,主要是由于气候变化和人类灌溉活动造成的。高山湖泊呈扩大趋势,可能是由于气候变暖引起的冰川融化或者气候变湿润引起的降水增加所致。

气候变化也会对地表径流、冰川等产生影响。Siegfried 等基于 ASTER 传感器的 GLIMS 冰川数据、TRMM 多卫星降水数据等数据集,结合航天飞机雷达地形任务的数字高程模型构建了针对锡尔河的气候—陆冰—降雨—径流耦合模型,以量化气候与不同水文因素之间的关系<sup>[41]</sup>。实验结果表明,由于融雪较早,气候变化可能会对径流季节性产生重大影响,并且将严重影响夏季灌溉水量。气温升高和人口增长的共同作用会导致冰川湖溃堤等后果而引起下游洪水泛滥。风险最高的地区是人口稠密、农业生产和政治不稳定的费尔干纳河谷,该地区需要通过改善水管理和基础设施以解决国际水和能源分配冲突。多项研究表明,1980 年代后中国西北地区从暖干气候过渡到暖湿气候。这种转变的特征是温度和降水增加,河流径流量增加,湖泊水面高度和面积增加以及地下水位升高。特别是在塔里木河流域,降水增加和融冰加速都增加了河流流量,缓解了当地的水资源短缺<sup>[42]</sup>。然而,有研究揭示,作为塔里木河源头之一的和田河却呈现出相反的情况,即径流量持续减少而气温和降水却在增加。为此,Xu 等基于气象站和水文站观测数据,利用小波分析和回归分析相结合的方法来研究和田河的径流非线性趋势<sup>[43]</sup>。结果表明,由于和田河的径流集中在夏季,主要来自昆仑山高地的冰川和融雪,因此和田地区地面气象站的数据不能真正反映出高山的气候变化,但来自大气探测气象台站的数据可做出合理解释。White 等利用 CRU 年平均地面气温和降水数据及从 CMIP3 的高排放 A2 情景下获取的多模式平均地表气温和降水异常数据,结合 Rycroft 2010 年构建的阿姆河流域水文模型对阿姆河进行了预测<sup>[44]</sup>。该研究表明,到 2070~2099 年,夏季气温升高与降水

季节变化将导致农作物耗水需求与 1961~1990 年相比增加 10.6%~16%。到本世纪末径流预计也将在目前水平上下降 10%~20%,冰川退缩和融雪对河流流量的贡献可能仍然很小。由于天山山区气象站点数据稀缺,Chen 等使用来自 CRU TS 数据集检测降水温度变化,并结合 MODIS 积雪覆盖遥感数据以及 GRACE 卫星数据等,发现在全球变暖下,有中亚水塔之称的天山冰川消融加剧<sup>[45]</sup>,并且随着未来几十年温度的升高,冰川收缩可能会持续下去。但由于许多补偿性因素,例如降水和蒸发的变化以及人为的影响,年度径流尚未发生重大变化。到 21 世纪末,由于冰川枯竭和水消耗量增加,径流有可能减少<sup>[46]</sup>。气候变化导致冰川收缩、积雪融化,使得径流量季节性增加,有可能会引起洪水泛滥,有助于缓解当地用水紧张。从长远看,虽然温度升高会导致冰川消融或枯竭,但气候变化对地表径流的影响并不明确。

#### 4 陆地水储量对气候变化的响应

陆地储水包括地下水、土壤水分、地表水体(湖泊、河流和水库)、冰川、雪水当量和植被冠层储水等。陆地储水变化是气候变化的一个指标,了解气候变化对陆地水储量的影响对水资源管理及可持续发展十分重要。Deng 等使用 GRACE 和 CRU TS 气象数据,结合 GLDAS Noah 陆面过程模型分析了过去十年中气候变化对中亚陆地水储量的影响<sup>[20]</sup>。结果表明,2003~2013 年,陆地水储量在中亚呈下降趋势。蒸散量的增加使得土壤水存储减少,是中亚北部陆地水储量下降的主要成因。在山区,气候变化通过影响冰川和积雪变化而对陆地水储量产生影响,陆地水储量呈下降趋势。而人类活动是导致咸海地区和塔里木河盆地北部陆地水储量下降的主要因素。基于多数据源同化的 GPCP 数据集、GLDAS 水文模型、GRACE 数据以及气象站实测数据,Tangdamrongsub 等研究了中亚和南亚地区的储水量变化<sup>[47]</sup>。2002 年以后中亚地区明显变暖,由于温度升高,雪水当量和等效水高都显示出下降的趋势,这导致该地区的地表水储量持续下降。在年度和年际时间尺度上,等效水高的变化与温度以及降水和雪当量高度的变化之间存在显着的相关性,特别是在 Markansu 高海拔站,这表明气候变化是造成中亚水资源枯竭的驱动因素。多数据源结合评估水量变化可以提高水资源评估的准确性,从而有助于评价其与气候变化的关系。Singh 等利用 GRACE 数据估测咸海湖泊及其周围地

区的陆地储水量的时间变化,结合 JASON-1/2、IceSAT 等雷达和激光卫星测高仪数据对 2002 至 2011 年水位变化进行计算,并使用 Landsat 影像对估计的水位进行比较<sup>[48]</sup>。就其时间演变而言,GRACE 结果与由测高仪和 Landsat 确定的几何变化非常吻合。经比较可以得出,直到 2009 年初,干旱不断加剧,对咸海几何形状的影响较为严重。由于 Dike Kokaral 大坝的建设使得北部湖泊水位稳定,南部湖泊由于锡尔河流入减少干旱越来越严重。2009~2010 年,阿姆河流域洪水导致咸海湖泊水位和面积以及水量的增加,该结果与 Klein 等的研究结果一致<sup>[49]</sup>。温度升高蒸散发增加,使得中亚水储量而呈现减少趋势,人类活动和自然灾害如干旱洪水等加剧水储量变化。

#### 5 水资源对气候变化响应研究挑战

中亚干旱区地处欧亚大陆中心,其水资源受气候变化影响较大:气温升高,冰川过早融化,使得植被灌溉期缺水;而气温升高也会引起蒸散发增加,使得平原湖泊面积缩减、径流减少。同时,人类活动的加剧使得中亚水资源供需矛盾更加突出,已成为社会经济可持续发展的重要挑战。因此,对中亚干旱区总体的水资源评估和研究显得越发重要,从而更有效地指导和规划中亚地区的水资源利用和管理。

由于选择的数据源和计算方法不同,水资源对气候变化响应的结果可能在某些区域存在相当大的差异甚至出现矛盾的结果。对于数据源的选择,有必要对数据源进行不确定性的评估,并选择与水文气象站点的实测数据拟合效果较好的数据,对于无实测数据的区域,多数据源结合的方法可以提高气候变化对水资源影响评估的可靠性;在计算方法方面,可以选择考虑多个不同的计算公式和理论模型进行研究。

气候变化对中亚地区陆地水资源的影响是目前中亚地区重点研究方向之一。相关研究已取得一定成果,但仍然面对一定挑战。除了气候变化,中亚水资源同时受多个要素(例如人类活动)的耦合影响,目前中亚气候变化耦合关系如何影响水资源还少有研究。对于中亚而言,关于气候变化如何影响湖泊水位及水储量变化的研究较少,是函待研究的空白点。将物理基础水文模型与大量现场和卫星数据结合使用,有可能对中亚干旱的变化及其与气候变化的关系做出更好的估计。但由于实测站点密度较低,特别在高山水源头地区和南部干旱区域,模型验证仍面临挑战<sup>[50]</sup>,随着

站点数据的不断建设,实测数据有助于提高模型精度,从而提高水资源以及气候变化评估的准确性。而且未来在丰富的数据支持下,可以深入分析气候变化、人类活动对水资源影响的过程机理,建立有效的用水机制,有助于解决中亚日趋严重的水资源短缺问题。

#### 参考文献:

- [1] Gaur M K, Squires V R. Geographic Extent and Characteristics of the World's Arid Zones and Their Peoples. In: *Climate Variability Impacts on Land Use and Livelihoods in Drylands* [M]. Switzerland: Springer, Cham, 2018.
- [2] WWAP (UNESCO World Water Assessment Programme). The united nations world water development report 2019: Leaving no one behind [R]. Paris: UNESCO, 2019.
- [3] Immerzeel W W, Van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the asian water towers [J]. *Science*, 2010.
- [4] Chen Y, Li W, Shen Y. *Water Resources Research in Northwest China* [M]. Switzerland: Springer, 2014.
- [5] Hu Z, Zhou Q, Huang J. Climate change in the last century and its impact on water cycle in central Asian aridzone [J]. *Proceedings of the International conference "InterCarto/InterGIS"*, 2017,1 (23): 184–191.
- [6] Huntington T G. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis [J]. *Journal of Hydrology*, 2006.
- [7] IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [R]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.
- [8] Bishop M P, Bush A B G, Furfaro R, et al. Theoretical foundations of remote sensing for glacier assessment and mapping. In: *Global land ice measurements from space* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014.
- [9] Xi C, Qiming Z. *Ecological and environmental remote sensing in arid zones—a case study of Central Asia* [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [10] Milly P C D, Dunne K A, Vecchia A V. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate [J]. *Nature*, 2005,438(7066):347–350.
- [11] Norzagaray Campos M, Patricia Muñoz–Sevilla N, Le Bail M. Hydrological stress and climate change impact in arid regions with agricultural valleys in Northern Mexico. In: *Advances in Environmental Monitoring and Assessment* [M]. London: IntechOpen, 2019.
- [12] UNESCO. *Managing water resources in arid and semi arid regions of Latin America and Caribbean (MWAR–LAC): accomplishment report* [R]. 2019.
- [13] Haddeland I, Heinke J, Biemans H, et al. Global water resources affected by human interventions and climate change [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014,111 (9): 3251–3256.
- [14] Dong W, Cui B, Liu Z, et al. Relative effects of human activities and climate change on the river runoff in an arid basin in northwest China [J]. *Hydrological Processes*, 2014,28 (18):4854–4864.
- [15] Zhou Q, Li B, Kurban A. Trajectory analysis of land cover change in arid environment of China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008,29(4):1093–1107.
- [16] Zhou Q, Li B, Kurban A. Spatial pattern analysis of land cover change trajectories in Tarim Basin, northwest China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008,29(19):5495–5509.
- [17] Zhou Q, Li B, Chen Y. Remote sensing change detection and process analysis of long–term land use change and human impacts [J]. *Ambio*, 2011,40(7):807–818.
- [18] Li B, Zhou Q. Spatial pattern of land cover change in China's semiarid environment [J]. *Journal of Arid Land*, 2009,1(1):16–25.
- [19] Wang Y J, Qin D H. Influence of climate change and human activity on water resources in arid region of Northwest China: An overview [J]. *Advances in Climate Change Research, National Climate Center*, 2017,8(4):268–278.
- [20] Deng H, Chen Y. Influences of recent climate change and human activities on water storage variations in Central Asia [J]. *Journal of Hydrology*, 2017,544:46–57.
- [21] 陈曦, 姜逢清, 王亚俊, 等. 亚洲中部干旱区生态地理格局研究[J]. 干旱区研究, 2013,30(3):385–390. (CHEN Xi, JIANG Fengqing, WANG Yajun, et al. Characteristics of the eco–geographical pattern in arid land of central Asia [J]. *Arid Zone Research*, 2013,30(3):385–390. (in Chinese))
- [22] 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*, 2015,73(2):487–499.
- [23] Jung M, Reichstein M, Ciais P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply [J]. *Nature*, 2010,467(7318):951–954.
- [24] Famiglietti J S, Rodell M. Water in the Balance [J]. *Science*, 2013,340(June):1300–1302.
- [25] 陈发虎, 黄伟, 靳立亚, 等. 全球变暖背景下中亚干旱区降水变化特征及其空间差异[J]. 中国科学: 地球科学, 2011,41(11):1647–1657. (CHEN Fahu, HUANG Wei, JIN Liya, et al. Spatiotemporal precipitation variations in the arid Central Asia in the context of global warming [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2011,41(11):1647–1657. (in Chinese))
- [26] Chen F H, Huang W, Jin L Y, et al. Spatiotemporal precipitation variations in the arid Central Asia in the context of global warming [J]. *Science China Earth Sciences*, 2011,54(12):1812–1821.
- [27] Zhang M, Chen Y, Shen Y, et al. Tracking climate change in Central Asia through temperature and precipitation extremes [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019,29(1):3–28.
- [28] Mannig B, Müller M, Starke E, et al. Dynamical downscaling of

- climate change in Central Asia [J]. *Global and Planetary Change*, 2013,110:26–39.
- [29] Li J, Gan T Y, Chen Y D, et al. Tackling resolution mismatch of precipitation extremes from gridded GCMs and site-scale observations: Implication to assessment and future projection [J]. *Atmospheric Research*, 2020,239.
- [30] 施雅风, 沈永平. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初探[J]. *资源环境*, 2003,2:54–57. (SHI Yafeng, SHEN Yongping. Signal, impact and outlook of climatic shift from warm – dry to warm – humid in Northwest China [J]. *Science and Technology Review*, 2003,2:54–57. (in Chinese))
- [31] 姜大膀, 苏明峰, 魏荣庆, 等. 新疆气候的干湿变化及其趋势预估[J]. *大气科学*, 2009,33(1):90–98. (JIANG Dabang, SU Mingfeng, WEI Rongqing, et al. Variation and projection of drought and wet conditions in Xinjiang [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2009,33(1):90–98. (in Chinese))
- [32] 刘亚敏, 张生, 刘亚峰. 新疆气候变化对水资源影响分析研究[J]. *河北工程大学学报(社会科学版)*, 2011,28(1):29–32. (LIU Yamin, ZHANG Sheng, LIU Yafeng. Analysis about climate change effects on water resource in Xinjiang [J]. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 2011,28(1):29–32. (in Chinese))
- [33] 王景凯, 李新武, 郭华东. 2003—2010年中亚地表土壤水对气候变化的响应[J]. *干旱区研究*, 2015,32(1):40–47. (WANG Jingkai, GUO Huadong, LI Xinwu. Responses of Surface soil moisture in central Asia to climate change during 2003–2010 [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015,32:40–47. (in Chinese))
- [34] Li X, Gao X, Wang J, et al. Microwave soil moisture dynamics and response to climate change in Central Asia and Xinjiang Province, China, over the last 30 years [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2015,9(1).
- [35] Gu X, Zhang Q, Li J, et al. Intensification and expansion of soil moisture drying in warm season over Eurasia under global warming [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019,124(7):3765–3782.
- [36] Sheffield J, Wood E F, Roderick M L. Little change in global drought over the past 60 years [J]. *Nature*, Nature Publishing Group, 2012,491(7424):435–438.
- [37] Gu X, Li J, Chen Y D, et al. Consistency and discrepancy of global surface soil moisture changes from multiple model-based data sets against satellite observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019,124(3):1474–1495.
- [38] 白洁, 陈曦, 李均力, 等. 1975–2007年中亚干旱区内陆湖泊面积变化遥感分析[J]. *湖泊科学*, 2011,23(1):80–88. (BAI Jie, CHEN Xi, LI Junli, et al. Changes of inland lake area in arid Central Asia during 1975–2007: A remote-sensing analysis [J]. *Journal of Lake Science*, 2011,23(1):80–88. (in Chinese))
- [39] 李靖, 李浩, 王树东, 等. 中亚五国主要湖泊水面变化特征及关键影响因素分析[J]. *遥感技术与应用*, 2019,34(3):639–646. (LI Jing, LI Hao, WANG Shudong, et al. Changes of major lakes in central Asia and analysis of key influencing factors [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019,34(3):639–646. (in Chinese))
- [40] Liu H, Chen Y, Ye Z, et al. Recent lake area changes in central Asia [J]. *Scientific Reports*, 2019,9(1):1–11.
- [41] Siegfried T, Bernauer T, Guinnet R, et al. Will climate change exacerbate water stress in Central Asia [J]. *Climatic Change*, 2012,112(3–4):881–899.
- [42] Zhang Q, Xu C Y, Tao H, et al. Climate changes and their impacts on water resources in the arid regions: A case study of the Tarim River basin, China [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2010,24(3):349–358.
- [43] Xu J, Chen Y, Li W, et al. An integrated statistical approach to identify the nonlinear trend of runoff in the Hotan River and its relation with climatic factors [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2011,25(2):223–233.
- [44] 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 [J]. *Water Resources Management*, Kluwer Academic Publishers, 2014,28(15):5267–5281.
- [45] Chen Y, Li W, Deng H, et al. Changes in Central Asia's water tower: Past, present and future [J]. *Scientific Reports*, Nature Publishing Group, 2016,6(1):1–12.
- [46] Sorg A, Bolch T, Stoffel M, et al. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia) [J]. *Nature Climate Change*, 2012,2(10):725–731.
- [47] Tangdamrongsub N, Hwang C, Kao Y C. Water storage loss in central and South Asia from GRACE satellite gravity: Correlations with climate data [J]. *Natural Hazards*, 2011,59(2):749–769.
- [48] Singh A, Seitz F, Schwatke C. Inter-annual water storage changes in the Aral Sea from multi-mission satellite altimetry, optical remote sensing, and GRACE satellite gravimetry [J]. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier Inc., 2012,123:187–195.
- [49] 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 [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014,26(1):335–349.
- [50] Malsy M, Aus Der Beek T, Flörke M. Evaluation of large-scale precipitation data sets for water resources modelling in Central Asia [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015,73(2):787–799.

(下转第 74 页)