

危润初,钟雅婕,欧阳琦,等. 非洲乍得湖流域水资源危机演变及溯因研究进展. 吉林大学学报(地球科学版),2026,56(4): 1348-1361. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240043.

Wei Runchu, Zhong Yajie, Ouyang Qi, et al. Research Process on Evolution and Causes of Water Resources Crisis in Lake Chad Basin in Africa. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2026, 56(4): 1348-1361. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240043.

非洲乍得湖流域水资源危机演变及溯因研究进展

危润初^{1,2,3}, 钟雅婕^{1,2,3}, 欧阳琦^{1,2,3}, 盛 丰^{1,2,3}, 陈 宏^{1,2,3}, 杜成额⁴

1. 长沙理工大学水利与海洋工程学院, 长沙 410004
2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 长沙 410004
3. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 长沙 410004
4. 湖南省国土空间调查监测所, 长沙 410129

摘要:乍得湖流域是非洲水资源矛盾最为突出的地区之一,水资源危机严重制约了经济发展与社会稳定,也影响了流域国家间的关系。本文从乍得湖萎缩、河流径流量减少、湿地退化、地下水和水冲突等方面开展文献检索与整理,全面总结乍得湖流域水危机演变过程,系统归纳该流域水危机成因。通过文献分析得出了以下结论:1)乍得湖水资源危机在自然层面主要表现为自20世纪60年代以来湖面持续萎缩、各河流径流量大幅度下降、湿地退化、多区域地下水资源枯竭;在社会层面表现为水争端与水冲突频发、经济社会发展条件恶化及恐怖组织快速蔓延。2)20世纪60—80年代的大干旱是乍得湖流域河流径流量锐减和湖泊萎缩的重要原因,同时也推动了区域内水利工程的建设热潮。以大坝工程为主体的水利工程群不仅减少了河流径流量,而且改变了河流径流的季节分配,加剧了湿地退化,减少了沿岸地区的地下水补给量,进一步加剧了水资源危机。3)人口快速增长导致水资源需求激增,进一步加剧了乍得湖流域的供需矛盾;而统一、有效的流域协同合作机制的缺失,则制约了水资源管理水平的提升,限制了各国应对危机的能力。综上,乍得湖流域水危机仍是国际社会广泛关注的热点问题,开展多视角、系统性研究将是其综合治理的重要方向。

关键词:乍得湖流域;乍得湖萎缩;地下水位下降;水冲突;水资源管理

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240043

中图分类号:TV21

文献标志码:A

Research Process on Evolution and Causes of Water Resources Crisis in Lake Chad Basin in Africa

Wei Runchu^{1,2,3}, Zhong Yajie^{1,2,3}, Ouyang Qi^{1,2,3}, Sheng Feng^{1,2,3}, Chen Hong^{1,2,3}, Du Cheng'e⁴

收稿日期:2024-08-04

作者简介:危润初(1984—),男,副教授,博士,主要从事地下水文演化、非洲水资源等方面的研究,E-mail: weirunchu@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41602264);湖南省自然科学基金项目(2020JJ5572);湖南省水利科技项目(XSKJ2023059-01);湖南省自然科学基金青年项目(2023JJ40021);湖南省教育厅优秀青年基金项目(21B0314)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41602264), the Natural Science Foundation of Hunan Province (2020JJ5572), the Water Conservancy Technology Project of Hunan Province (XSKJ2023059-01), the Youth Program of Natural Science Foundation of Hunan Province (2023JJ40021) and the Excellent Youth Project of Education Department of Hunan Province (21B0314)

1. School of Hydraulic and Ocean Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China
2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410004, China
3. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410004, China
4. Land Space Survey of Monitoring Institute of Hunan Province, Changsha 410129, China

Abstract: The Lake Chad basin is one of the regions in Africa with the most prominent water conflicts, and the water crisis has seriously constrained economic development and social stability, and also affected the relations among countries in the basin. This paper carries out literature search and collation from the shrinkage of Lake Chad, the reduction of river runoff, the shrinkage of wetlands, groundwater and water conflicts, etc., comprehensively summarizes the evolution of the water crisis in the Lake Chad basin, and systematically summarizes the causes of the water crisis in the basin. The following conclusions are drawn from the literature analysis: 1) The water crisis in Lake Chad is mainly manifested at the natural level by the drastic shrinkage of the surface of Lake Chad since the 1960s, the drastic decline of the runoff of rivers, the degradation of wetlands, the depletion of groundwater resources in many regions, the frequent occurrence of water disputes and conflicts, the deterioration of the conditions for economic and social development, and the rapid spread of the accompanying terrorist organizations. 2) The multi-decadal drought from the 1960s to the 1980s was a major cause of the shrinkage of river runoff and lakes in the Lake Chad basin, and at the same time prompted a surge in the construction of water conservation projects in the region. The cluster of water conservancy projects, mainly dam projects, not only reduced the river runoff volume, but also changed the seasonal distribution of river runoff, aggravated the degradation of wetlands, and reduced the amount of groundwater recharge in the coastal areas, thus further exacerbating the water resources crisis. 3) The rapid increase in water demand brought about by rapid population growth has further intensified the contradiction between supply and demand of water resources in the Lake Chad basin, while the lack of a unified and effective mechanism for coordinated cooperation in the basin has impeded the improvement of the level of water resources management in the basin, thus limiting the improvement of the overall capacity of the countries in the basin to cope with the water crisis. In conclusion, the water crisis in the Lake Chad basin is still a hot issue in the international community. Analyzing and solving the problem from multiple perspectives will be an important direction for the development of the water crisis in the Lake Chad basin.

Key words: Lake Chad basin; Lake Chad shrinkage; declining groundwater levels; water conflict; water resource management

0 引言

乍得湖位于非洲大陆中部的尼日尔、尼日利亚、乍得和喀麦隆等四国交界处,是非洲第四大湖泊,也是全球著名的内流型淡水湖泊之一^[1]。历史上乍得湖流域是非洲传统商贸走廊的重要节点,区内经济繁荣,人口密集。但是,受气候变化和人类活动的双重影响,乍得湖流域面临入湖水量减少,河流径流量下降、湖泊萎缩、地下水位快速下降等严重问题,同时又叠加了人口快速增长、水资源开发与管理水平低下等问题,流域内水资源情势异常严峻。近 20 年

来,水资源短缺严重破坏了流域内正常的经济社会发展环境,各类冲突、失业和贫困等问题频发,流域水资源危机正在进一步转变为生态危机和社会危机。

作为全球主要的贫困与恐怖活动热点地区之一,乍得湖流域的水资源危机演变过程具有显著代表性,受到全球学者的持续关注^[2-5],但总体仍缺乏对乍得湖流域水资源危机全面、系统性的总结。非洲历来是我国对外投资的重点区域,但长期以来,由于对当地水资源状况的认知不足,很多投资项目遭受了严重损失。因此,开展非洲水资源情势研究,对

强化我国海外投资安全保障、推进“一带一路”倡议的实施具有重要意义。本文在广泛查阅国内外有关乍得湖流域水资源危机文献的基础上,从湖泊萎缩、径流量减少、湿地退化、地下水枯竭和水资源冲突等方面,系统归纳了乍得湖流域水资源危机演变过程与成因,以期国内学界、企业界深入理解非洲水问题,制定应对策略提供参考。

1 研究区概况

乍得湖流域范围分布在 5°N — 25°N 和 5°E — 25°E 间(图 1),地跨乍得、尼日尔、中非、尼日利亚等 8 个国家,是世界上最大的内陆和跨界流域之一,地理流域面积达 239.7万 km^2 ,占非洲陆地面积的 8% ^[6]。其中,乍得和尼日尔在流域内的面积占比最高,但流域 75% 的径流来自中非和喀麦隆^[7]。乍得湖常规流域最初由《拉米堡公约》规定,主要覆盖喀麦隆、乍得、尼日尔和尼日利亚等国家的部分领土^[6],面积约 42.75万 km^2 ;后来扩大至尼日利亚北部、乍得南部和中非北部的其他区域,总面积增加至 96.70万 km^2 ^[8]。

乍得湖流域的集水子流域主要为 2 个主要子流域和 3 个次要子流域。2 个主要子流域分别为 Chari-Logone 河流域和 Komadugu-Yobe 河流域,3 个次要流域分别为 Yedseram 河流域、Ngadda 河流域和 El Beid 河流域(图 1)。其中:Chari-Logone 河由 Chari 河和 Logone 河两条主要水文网络汇集而成,流域面积约为 65.00万 km^2 ^[9],对乍得湖补水贡献率达 90% (1960—2013 年平均流量 $27.14\text{ km}^3/\text{a}$);Komadugu-Yobe 河是尼日利亚和尼日尔之间长约 160 km 的界河,也是唯一注入北乍得湖的常年性河流,流域面积约为 14.80万 km^2 ^[9],为乍得湖提供了 $2\%\sim 5\%$ 的水量(1961—2013 年平均流量为 $0.56\text{ km}^3/\text{a}$)^[10];Yedseram 河、Ngadda 河和 El Beid 河从乍得湖西南部注入,对乍得湖来水的贡献率为 $1\%\sim 2\%$ ^[6]。

乍得湖流域气候上跨热带草原气候与热带沙漠气候,根据不同降水量水平可划分为 4 个降雨带,由北往南依次为撒哈拉带(年降水量 $<100\text{ mm}$)、萨赫勒—撒哈拉带(年降水量 $100\sim 400\text{ mm}$)、萨赫勒—苏丹带(年降水量 $400\sim 600\text{ mm}$)和苏丹—几内亚带(年降水量 $600\sim 1\,500\text{ mm}$)^[6]。

乍得湖盆地是白垩纪时期产生的巨型构造盆地,沉积层最大厚度可达 7 km ,自下而上依次为白垩系、渐新统、上新统和第四系^[11-12]。各地层均具

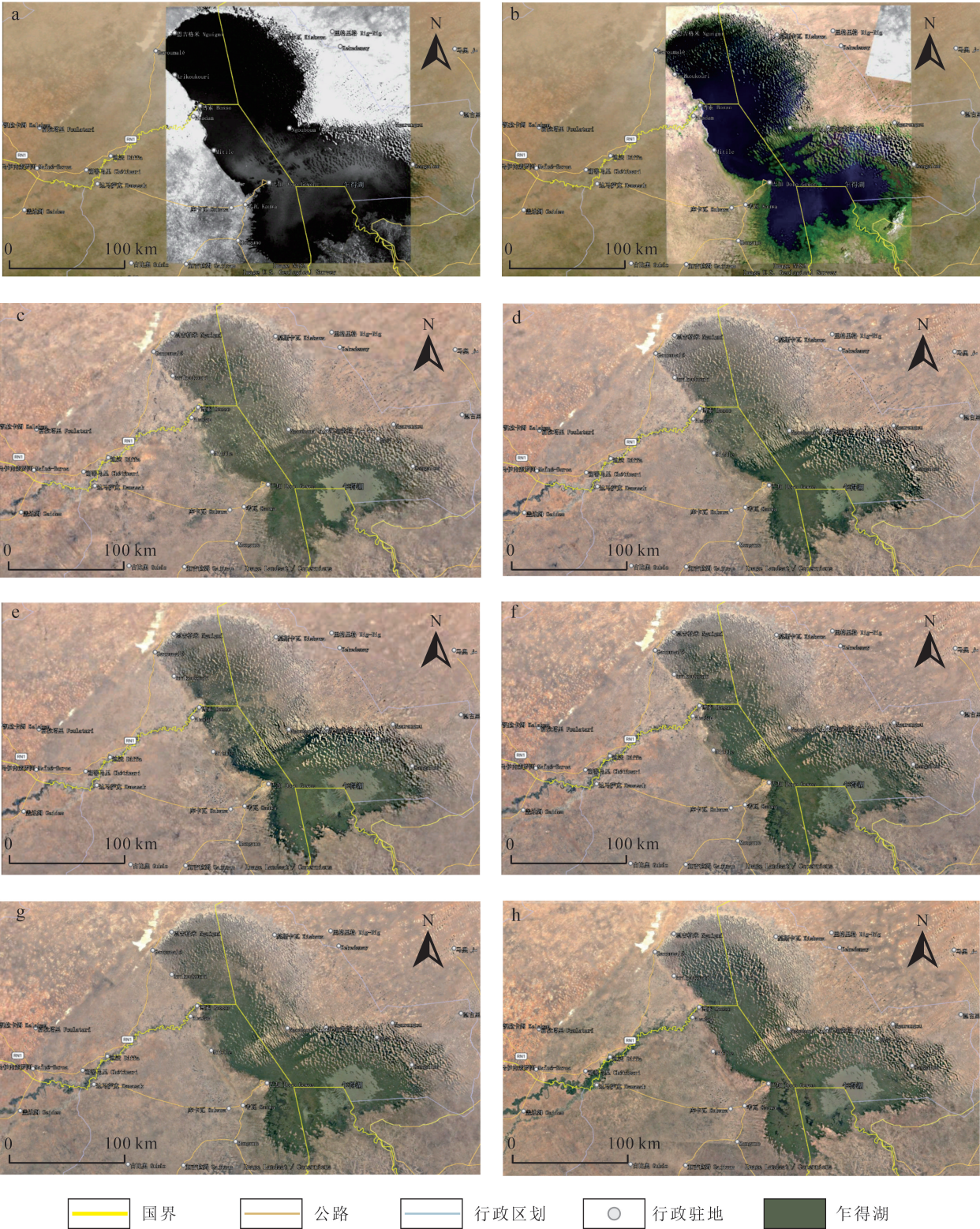
一定的赋水能力,受广泛延展的地层控制,形成面积广阔的跨界含水层^[11]。第四系含水层主要由冲洪积中砂和湖积细砂层组成,厚度为 $0\sim 190\text{ m}$,被称为乍得地层上部含水层^[13],是喀麦隆、乍得和尼日尔的重要供水水源。上新统上部为厚约 300 m 的绿色黏土弱透水层,上新统下部由细砂、粗砂沉积组成,称为乍得组中部含水层,埋深为 $250\sim 300\text{ m}$ ^[13-15]。因乍得盆地渐新世沉积未受海侵影响,均为大陆沉积,故该套地层又被称为乍得地层下部含水层^[12-13]。

2 乍得湖流域水资源危机演变研究进展

2.1 乍得湖萎缩

乍得湖为非洲第四大湖泊,是当地居民生活及生产重要淡水来源。在 20 世纪 60 年代,乍得湖的开放水域面积位居世界第六,湖面面积达 $25\,000\text{ km}^2$;自 20 世纪 70 年代起,乍得湖急剧萎缩;至 20 世纪 80 年代中期,湖面面积仅剩 300 km^2 ,萎缩近 90% (图 2)^[16-18];1987 年湖面面积仅余 $1\,495\text{ km}^2$,仅南乍得湖有水,北部湖区完全干涸,至 2000 年湖面小幅扩张^[19];相关遥感数据显示,2000、2003、2015 年乍得湖的水域面积分别为 $1\,576$ 、 $1\,326$ 、 $1\,003\text{ km}^2$,整体仍呈缩小趋势^[20]。乍得湖快速萎缩受到了国际众多学者的关注,Tilho^[21]将乍得湖萎缩过程分为三个阶段,即大型乍得湖阶段、中型乍得湖阶段和小型乍得湖阶段。2012 年法国发展研究机构(IRD)增加了第四个阶段,即干旱乍得湖阶段^[6]。

目前,乍得湖分为三个区域:南部湖区的开放水域、湖区东北边缘沙洲组成的群岛,以及北部湖区不规则的淹没区域。其中南部开放水域与北部水域被中部的天然拦截坝区隔^[6]。Gao 等^[16]认为,若没有天然拦截坝的阻隔,南乍得湖的水流入北乍得湖,会减少蒸发量和对地下水的补给量,湖域面积会有一定程度的扩大^[16]。近年来的研究表明,乍得湖水域已进入新的稳定阶段。Pham-Duc 等^[22]利用 MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer)影像,发现乍得湖在 20 世纪 90 年代起已经停止萎缩,近 20 年湖面范围基本稳定,南乍得湖湖面面积有所增加,北乍得湖略有减少,主要受蒸散发控制。Zhu 等^[23]利用 GRLM(global reservoir and lake monitor)、Hydroweb、RLH(river lake hydrology)和 DAHITI(database for hydrological time series of inland waters)4 种卫星数据研究发现,乍得湖自 20 世纪 90 年代以来已停



a. 1963 年 12 月; b. 1972 年 12 月; c. 1984 年 12 月; d. 1987 年 12 月; e. 1992 年 12 月; f. 2003 年 12 月; g. 2012 年 12 月; h. 2020 年 12 月。

图 2 乍得湖水面面积的时空变化

Fig.2 Spatial and temporal changes in Lake Chad surface area

明,自20世纪60年代以来,乍得湖流域河流径流量变化幅度较大,总体上呈前期快速下降、后期略有上升的特点。

Chari-Logone河及其支流Chari河径流量下降趋势较为显著。自20世纪50年代起,Chari河径流量呈快速下降趋势,之后河流径流量趋于稳定并有小幅度上升,但年际波动仍较大^[11]。Mahamat等^[28]综合分析了Chari-Logone河流域1960—2015年期间水文气象数据,发现流量变化幅度大,总体呈下降趋势。Mahmood等^[17]利用调和回归模型预测了Chari河流域2016—2035年水资源变化情况,结果表明在未来20年内,高分辨率模式所显示的低流量、高流量和年径流量均将减少。Zhu等^[23]利用Mann-Kendall法对Chari-Logone河流域1950—2013年流量序列进行检验,径流曲线总体呈下降趋势,径流量减少了24.52 km³。

Komadugu-Yobe河为季节性河流,年均流量为150~700 m³/s^[6]。目前,关于Komadugu-Yobe河干流径流变化的研究相对有限,多数研究聚焦于其支流Hadejia河流域。Odunuga等^[29]对Hadejia-Jama'are河流域的流量进行分析发现,1979—1989年的年平均流量较1964—1973年低552 m³/s,且平均洪峰流量亦低于前期水平。

乍得湖是乍得湖流域的终端湖,主要水源来自Chari-Logone河和Komadugu-Yobe河^[29-30]。乍得湖流域径流量的减少在一定程度上对乍得湖产生了影响。1973—1985年干旱期,Chari河径流量减少了40%,Komadugu-Yobe河径流量减少了60%,其他河流减少了83%;同时期,乍得湖急剧萎缩^[31]。1990—2012年,乍得湖入湖流量略有恢复,但仍处于小型乍得湖阶段^[18, 22, 32]。

2.3 地下水资源枯竭

地下水是人类生活生产的重要水源,占全球总取水量的1/3^[33]。乍得湖流域最主要含水层包括第四系含水层、下上新统含水层和大陆终端含水层,其中下上新统和大陆终端含水层为自流含水层。地下水是乍得湖流域生产、生活的最重要水源,对流域内经济社会发展具有关键支撑作用^[6]。

受特殊热带草原气候及湖积地层条件限制,乍得湖盆地地下水补给条件较为有限。Neukum等^[34]选取乍得湖流域内6个地点,对2003—2016年的平均地下水补给量进行评估,结果表明地下水年补给量在6~93 mm之间变化。Vassolo等^[13]通

过水化学与同位素方法对乍得湖流域地下水补给过程进行评估,并估算了地下水的年龄,指出Kanem地区为分散补给,且该地区降水量低,补给量有限。乍得湖流域的Salamat湿地和Chari-Baguirmi地区主要补给方式为降雨入渗的分散补给与湿地集中补给。Tewolde等^[35]据氯化物质量守恒法估算,Salamat湿地地区年地下水分散补给量为3~19 mm,集中补给量为111 mm,而Bahr el Ghazal河及乍得湖北部地下水补给量不足1 mm。Hadejia河流域地下水依赖于降雨、Hadejia河及洪泛湿地的补给,地表水补给占主导地位。危润初等^[36]采用氯离子平衡法探究了尼日利亚北部乍得湖盆地典型区域的降雨入渗补给问题,结果表明降雨入渗平均补给量为10.1 mm/a,年平均降雨入渗系数为0.015。上游水利工程建设显著减小了雨季洪水流量,洪泛湿地范围快速萎缩,这在很大程度上降低了地下水的补给量。Ikusemoran^[37]利用遥感方法监测了Hadejia-Nguru湿地的面积变化情况,1972年为3 191.2 km²,1986年减少到2 257.8 km²,2005年进一步缩减至1 781.9 km²。Goes^[38]利用水量估算法计算出Hadejia和Nguru之间洪泛湿地附近的地下水补给量为132 mm,较以往显著下降。

自20世纪60年代初以来,乍得湖流域地下水位持续下降。用水量增加导致地下水超采,乍得盆地尼日利亚段各含水层钻孔的静态水位均呈下降趋势。根据1960—2010年的监测数据,1970—2000年,尼日利亚乍得组上、中、下含水层平均静水位每10年分别下降13.3、11.1、67.61 m^[39],单井平均涌水量也从1960年的12.8 L/s减少至2010年的1.4 L/s^[40]。Hadejia河及洪泛平原的地下水位下降始于20世纪70年代,地下水储量减少了约5×10¹² m³,目前该区域地下水位仍持续下降^[9, 36, 41]。Thompson等对Hadejia-Nguru湿地进行了建模^[42],结果表明1964—1971年地下水储量为9×10⁹~10×10⁹ m³,1972—1975年期间降至7×10⁹~8×10⁹ m³,1986年后进一步降至5×10⁹ m³,地下水储量下降了近50%。在乍得湖东南部的Chari-Baguirmi洼地,Adamu等^[43]基于地下水位监测数据同样发现,自20世纪60年代以来,该区域地下水位持续下降,平均降幅约为0.06 m/a,其中靠近乍得湖的Massakory地区(1995—2011年均减幅为0.11 m/a)和洼地中心的Albadie地区(1995—2011年均减幅为0.46 m/a)水位下降幅度最大,且

1995 年后下降速度加快^[43-45]。地下水位的大幅下降已导致该区域多地出现更新世下部含水层干涸^[46]。

2.4 水争端与冲突加剧

全球气候变化导致乍得湖流域水资源形势持续恶化,沿岸国家难以应对由此引发的社会效应,国家间围绕河流主权的军事对抗频频发生,水资源冲突不断,暴力恐怖组织也随之滋生。

20 世纪 80—90 年代,引水工程建设引发了水资源分配问题。尼日利亚和尼日尔在引水工程建设和 Komadugu-Yobe 水资源量分配等方面发生冲突^[46-47]。1992 年,两国因尼日利亚卡诺州的 Tiga 和 Challawa 大坝取水问题再次发生冲突^[47]。与此同时,乍得湖水域萎缩也加剧了周边国家的领土与资源矛盾。因气候干旱和上游对径流进行截流,乍得湖持续萎缩,湖岸线大幅后退^[48]。1959—1994 年间,尼日利亚民众随后退的湖水迁徙到喀麦隆境内^[49]。至 20 世纪 90 年代中期,湖区已形成 30 多个由尼日利亚移民建立的村庄,尼日利亚政府将其视为主权领土,纳入 Borno 州进行管理并提供基本服务^[50]。这导致喀麦隆和尼日利亚的紧张关系升级,1993 年两国爆发小规模军事冲突,造成多人伤亡^[49, 51]。

乍得湖流域急剧恶化的水资源情势严重破坏了区域经济社会发展条件,周边地区民生困苦异常,为恐怖组织的滋生提供了土壤,其中最具代表性的是西非地区的恐怖组织“博科圣地”(Boko Haram)。自成立起至 2020 年,该组织在乍得湖周边国家共制造恐怖活动 2 642 起,造成 1 862 人死亡^[52]。自 2009 年以来,乍得湖地区冲突事件增长速度加快,且呈明显外溢趋势。在水资源危机大背景下,冲突、贫困和失业的问题频发,地方政府治理能力不足,大量青年人感到被边缘化与绝望,继而加入“博科圣地”等恐怖组织^[1]。

在学术研究方面,Griffin^[52]用顺序混合方法研究了乍得湖流域环境变化与冲突的关系,结果表明气候变化、水资源匮乏与冲突加剧存在相关性,且冲突数量与范围仍在持续扩大。Piesse^[53]指出,乍得湖萎缩、水安全问题及粮食安全问题共同助长了恐怖组织在区域的影响力。Galli 等^[54]基于农业水文模型研究水资源的可用性,认为水资源并非暴力冲突的直接原因,但水资源的复杂性存在于多个时空尺度。Treszkai^[55]则从乍得湖水资源冲突视角阐明了水资源与安全之间的相关性,指出在气候变化和

水资源短缺背景下,如果缺乏国际合作将引发更多争端与冲突。

萎缩的乍得湖和日益严重的水资源危机,以及由此而带来的普遍贫困与持续的恐怖活动威胁,是未来乍得湖流域实现社会稳定和经济繁荣必须解决的重大课题。

3 乍得湖流域水资源危机溯因研究进展

乍得湖流域水资源危机的演变受多因素共同影响,包括气候变化导致的降水量减少、水利工程引发的河流径流量下降,以及人口增长带来的水资源需求增加和水资源管理效率低下等。

3.1 气候变化

全球气温上升带来的气候变化对世界的影响是多维度且复杂的,不仅作用于自然生态系统,也波及社会经济层面,例如海平面上升、冰川融化、干旱及洪涝灾害等^[55-57]。非洲是受气候变化影响最为严重的地区之一。联合国政府间气候变化委员会在第 6 次全球气候变化评估报告^[58]中指出,2011—2020 年全球地表温度较 1850—1900 年平均上升了 1.1 °C,同期非洲地区上升了 0.5 °C。James 等^[59]的全球气候模型模拟结果表明,非洲降水变化将随全球气温的升高而发生变化,但其响应程度具有明显的区域差异性。

Mahmood 等^[10]利用趋势分析法研究了乍得湖流域主要子流域水文气候变化情况,结果显示,1951—2015 年间,乍得湖所有流域平均气温均呈显著上升趋势,上升幅度一般在 0.4~2.2 °C 间,平均约上升 1.4 °C,与此同时,降水量则呈明显的下降趋势。流域内多个气象站数据均表明,自 20 世纪 60 年代起,乍得湖流域年降水量呈大幅下降趋势,80 年代中期降水量降至最低值,降幅达 20%~30%^[60]。在 20 世纪 60—80 年代萨赫勒干早期,Logone 河流域降水量显著下降;直至 20 世纪 90 年代,降水量才有所增加^[27]。Nicholson^[61]把 Logone 河流域的降水变化归结于赤道辐合带的季节性南北移动,其强度和位置强烈影响该地区的降水过程。自 20 世纪 70 年代起,Komadugu-Yobe 流域的年降水量也呈下降趋势,但受大西洋暖流影响,赤道辐合带向北移动,部分地区降水量已有所恢复^[26, 62]。Adeyeri 等^[62]对 Komadugu-Yobe 河流域 1979—2015 年间降水的时空趋势及均匀性进行分析,结果表明流域内年降水量与雨季降水量均呈下降趋势,

而旱季降水量呈上升趋势。

降水情势的变化直接引发了乍得湖流域地表与地下水资源情势的变化。Zhu 等^[25]采用 Budyko 分析估算了气候变化对 Chair-Logone 河流域径流的影响,结果表明气候变化导致年径流量减少约 4.2 km³,Chari 河流域年降水量下降 10%,径流量减少 30%。Mahamat 等^[28]对 Chari-Logone 河流域过去 60 年的水文气候数据进行分析后指出,气候变化是该流域径流量减少的主要原因。Murumkar 等^[63]在分析 Logone 河流域降水量和径流量关系时发现,1954—1995 年降水量与径流量均呈显著下降趋势,1995—2013 年降水量缓慢恢复,且降水量的小幅波动会引起流量的显著变化。Boronina 等^[64]通过模拟研究指出,自 20 世纪 60 年代以来,乍得湖流域第四系含水层地下水储量减少了 3.1×10¹⁰ m³,其主要原因是年降水量减少,而非地下水开采。

总体而言,20 世纪 60 年代以后,乍得湖流域降水量呈快速下降趋势,至 80 年代降至最低值;90 年代以后降水量虽有所恢复,但仍处于较低水平。20

世纪 60—80 年代的干旱不仅直接导致河流径流量减少,还催生了流域内水利工程建设的热潮。受此双重影响,乍得湖流域主要河流径流量大幅度下降,乍得湖随之进入快速萎缩期。

3.2 水利工程

自 20 世纪 60 年代起,乍得湖流域内降水量快速下降,传统雨养农业难以维系。在此背景下,流域内各区域掀起了一轮水利工程建设的热潮。近 30 年来,众多学者就水利工程对乍得湖流域水文情势及乍得湖萎缩的影响开展了大量研究,取得很多有意义的成果。

乍得湖流域的大坝主要分布在 Komadugu-Yobe 流域(图 3),其中以 Tiga 大坝^[65-67]和 Challawa 大坝^[68-70]规模最大;此外,在 Chari-Logone 河流域大坝较少,最主要的为 Maga 大坝,但该坝对流域径流情势影响显著^[71]。在乍得湖近湖区域,尼日利亚政府还建设了规模较大的南乍得湖灌溉工程(SCIP)、Baga 圩田工程、Kano 河灌溉工程(KPIP)及 Hadejia 河谷灌溉工程(HVP)^[72]。

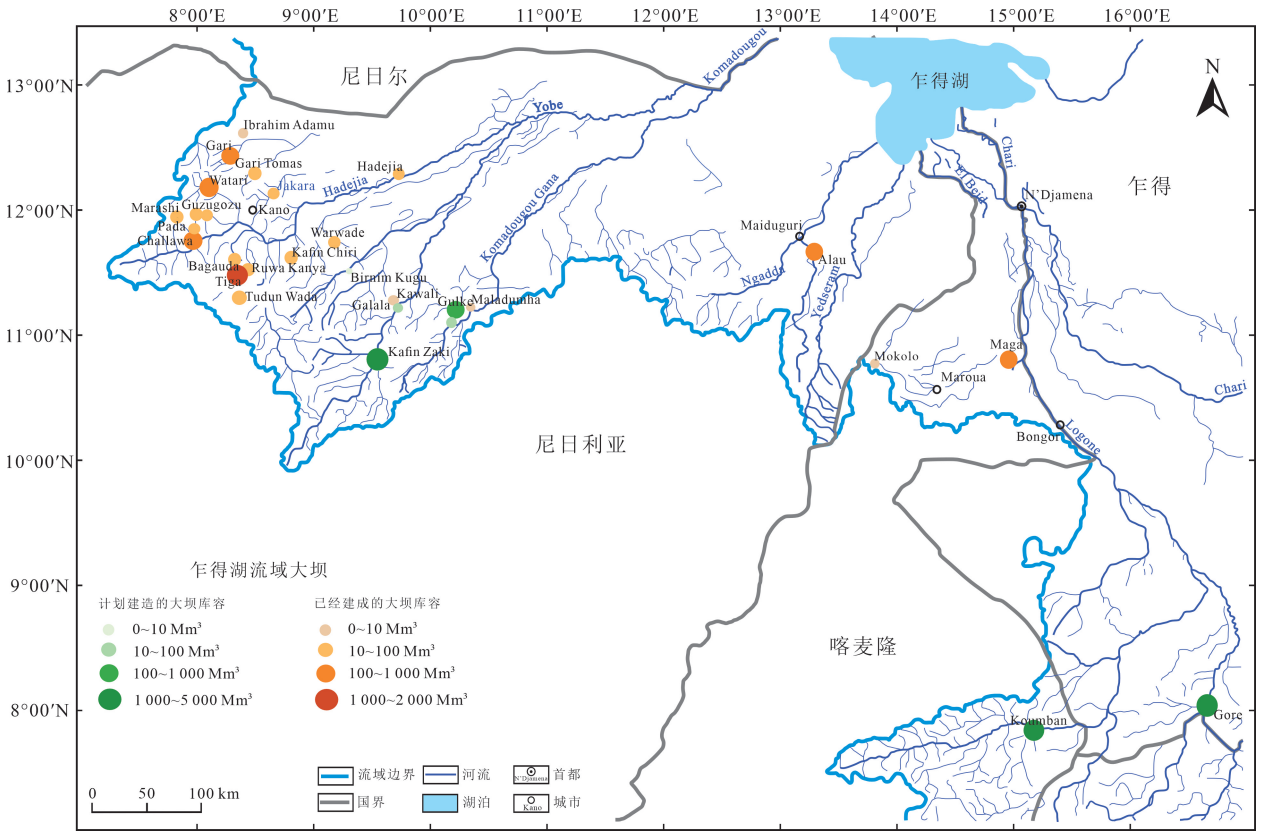


图 3 乍得湖流域大坝分布图^[6]

Fig.3 Distribution map of dams in Lake Chad basin^[6]

大规模水利工程改变了各河流的自然水文过程,降低了河道汛期流量和入湖总流量。Zhu 等^[25]利用回归分析估算了乍得湖流域人类活动引起的径流变化,结果表明在年平均尺度上人类活动造成的水损失为 16.76 km^3 ,占总水损失的 86%。Chari-Logone 河流域流量的变异性 and 降雨的变异性之间关系密切,但并非线性关系,径流减小幅度更大^[27]。Okonkwo 等^[73]通过趋势和相关性分析得出,自 20 世纪 90 年代初以来乍得湖流域的降水量虽有所恢复,但湖水位仍在下降,表明人类活动对乍得湖流域径流情势的影响仍在持续。Adeyeri 等^[26]基于 Komadugu-Yobe 河流域 1971—2013 年的降雨及流量数据,分析了降水量变化及人类活动对径流的影响,结果表明二者对径流量减少的影响各占 50%。Coe 等^[74]利用 IBIS(integrated biosphere simulator)模型及水文方法探究人类活动及气候变化对乍得湖流域的影响,模拟结果表明,气候变化仍控制着水量的年际变化,但灌溉用水是导致乍得湖水位及面积急剧下降的主要原因。Gao 等^[16]利用水文模型估算,1997—2006 年年均灌溉引水量约为 13 km^3 ,并推测在没有灌溉的情况下,分裂的乍得湖将在 1999 年合为一体。然而,受持续存在的灌溉引水等因素影响,这一推测中的合并情景并未实际发生。近 20 年来,乍得湖流域降水量已恢复至 20 世纪 60 年代中期水平,但是湖面面积并未随之恢复,湖区依然保持着南北两个池盆相互分隔的空间格局。这说明,灌溉工程阻碍了乍得湖南湖北湖合体的进程。

20 世纪 90 年代以来,乍得湖流域降水量虽略有恢复,但仍未达到 50 年代初期的水平,湖水面积及地下水位均未见明显回升。这表明,气候变化与人类活动的共同作用驱动了乍得湖流域水资源危机的演变;尽管降水量有所恢复,但人类活动影响的持续强化,导致乍得湖流域的水资源情势仍继续恶化。

3.3 人口增长

乍得湖流域所在区域是世界上人口增长速度最快的地区之一,相关国家人口增长率均位居世界前列,其中尼日利亚为 3.2%,喀麦隆为 2.8%,尼日尔为 4.0%,中非为 3.0%^[75-78]。2012 年,乍得湖流域的总人口初步统计约为 4 500 万,2015 年增至 5 100 万,预计到 2030 年,人口将达 8 000 万^[79],其中居住在湖边 300 km 半径范围内的人口将从 2012 年的 1 300 万增至 2050 年的至少 3 500 万^[6]。快速增长的人口势必给流域内水资源供给带来持续压力。

Okonkwo 等^[80]的人为动力学分析表明,人口剧增将使乍得湖流域各国的供水服务系统承受重大压力,部分地区甚至会因不堪重负而崩溃。Olowoyeye 等^[81]也指出,人口的快速增长给乍得湖流域带来了巨大的用水压力,这是乍得湖地区水资源供给能力下降的主要原因。

3.4 流域水管理

乍得湖流域日益严峻的水资源供需矛盾对高效的流域水资源管理提出了迫切需求。然而,该流域跨界河流众多,水资源管理水平受到跨流域合作推进、水资源分配制度和社会发展水平等多方面因素的制约^[82]。同时,受各国中央政府权力不足、管理制度不完善、责任界定不清及协调机制不健全等问题的影响,乍得湖流域水资源管理水平始终长期处于较低水平^[3]。

尽管早在 1964 年,乍得湖流域相关国家为协调各国水资源管理政策、共同推进乍得湖流域治理,共同签署了《拉米堡公约》,并据此成立了乍得湖流域委员会,并在《拉米堡公约》《湿地公约》(《拉姆萨尔公约》)《乍得湖水宪章》等多个条约框架下开展国际合作,但由于缺乏独立健全的管理制度,国际责任界定不明确,流域水资源管理的实际成效不明显。各国往往优先考虑自身利益,邻国间在灌溉工程及大坝建设方面很少开展协商^[83-85]。Asah^[3]认为,乍得湖流域委员会是一个无效机构,突出表现在流域内过度的水资源利用及沿岸国家之间缺乏有效合作。Abu 等^[86]指出,乍得湖流域委员会实施了一些计划,但大多数未能实现,主要原因在于乍得湖委员会成员政治意愿缺乏、暴力事件频发、资金不足、组织结构不完善及文化与语言差异等。Mbaigoto 等^[87]通过访谈发现,乍得湖流域委员会及其利益相关者缺乏协调力,导致相关水资源管理政策和法规体系薄弱。McAnally-Trejo^[82]指出,流域国家虽在一定程度上参与了治理,但缺乏明确的政治或治理权,加之贪污腐败现象存在,导致监管失效,流域治理效果不佳,严重削弱了流域治理的能力。Okpara 等^[88]指出,流域委员会在干预水资源问题上仍处于独立商议模式,很少结合地方实际评估成果调整和完善配套行动方案。

过快的人口增长给乍得湖流域水资源系统带来了持续压力,而科学、统一、有效的流域水资源管理体系的缺失,使得乍得湖流域管理长期处于无序、混乱的状态。如何协调人口增长与水资源供给之间的

矛盾,在各国间建立起统一、有效的流域协同合作机制,是解决乍得湖流域水资源危机首先要突破的重要难题。

4 结论与展望

4.1 结论

作为世界上水资源危机最为严峻的区域之一,乍得湖流域一直是水文与水资源学研究关注的焦点。综合已有在乍得湖水危机演变过程、影响因素等领域积累的研究成果,归纳得到以下基本结论。

1)乍得湖水资源危机在自然层面主要表现为自20世纪60年代以来乍得湖湖面大幅度萎缩、各河流径流量显著下降、湿地退化及多区域地下水资源枯竭;在社会层面则表现为水资源短缺引发的国家之间水争端与水冲突频发、经济社会发展条件恶化,以及恐怖组织活动在区域内的快速蔓延。

2)20世纪60—80年代的大干旱是乍得湖流域河流径流量和湖泊萎缩的重要原因,同时也推动了区域内水利工程建设的热潮。以大坝工程为主体的水利工程群不仅减少了河流径流量,也改变了河流径流的季节分配,加剧了湿地退化,减少了对沿岸地区的地下水补给,从而进一步加剧了水资源危机。

3)人口快速增长带来的水资源需求激增,进一步激化了乍得湖流域的水资源供需矛盾;而统一、有效的流域协同合作机制的缺失,制约了流域水资源管理水平的提升,也限制了流域内各国应对水资源危机的整体能力的提升。

4.2 展望

尽管众多学者已针对乍得湖水危机问题从不同角度开展了大量深入而富有成效的研究,但在气候变化、人类社会等多重影响持续深化的背景下,乍得湖水危机演变仍将是学者持续关注的焦点,主要表现在以下方面。

1)多因素耦合作用机制下的乍得湖流域水资源危机演变机制研究有待进一步深化。气候变化、水利工程建设、人口增加、水资源管理等多因素对乍得湖流域的影响是一个复杂的耦合过程,致使乍得湖水危机演变呈非线性特征;近20年来乍得湖水域面积呈现的恢复趋势正是非线性的具体表现。如何在准确预测气候变化趋势的前提下,定量评估不同因素对乍得湖水危机演变的影响及其交互耦合机制,是未来解决乍得湖水危机的重要课题。

2)流域水循环特征及多因子驱动下的水系统演

变规律需进一步研究。乍得湖平原地表水与地下水交互模式复杂多样,气候变化与地表水文情势的变化对该交互过程产生了深刻影响;然而已有研究对此问题的研究深度有限,制约了对乍得湖水危机的全面认识。因此,深入系统揭示各区域“三水”转化规律及其多因素影响下的水系统演变规律,是未来乍得湖流域水危机研究的重要方向之一。

3)气候变化与用水需求快速增长的双重压力下,流域内国家间的稳定合作机制及水资源管理制度亟需深化研究。乍得湖流域既是全球对气候变化最为敏感的地区之一,又是国家间水权争议最为突出的区域。未来需充分考虑流域内各国国情,创造性地探索国家间的合作机制,逐步制定跨国家的水资源管理制度,切实寻找一条利益共享与人水和谐的流域水资源开发利用路径,这是未来乍得湖流域水危机治理的关键所在。

参考文献(References):

- [1] Riebe K, Dressel A. The Impact on Food Security of a Shrinking Lake Chad [J]. *Journal of Arid Environments*, 2021, 189: 104486.
- [2] Magrin G. Crisis and Development: The Lake Chad Region and Boko Haram[M]. Paris: French Agency for Development, 2018.
- [3] Asah S T. Transboundary Hydro-Politics and Climate Change Rhetoric: An Emerging Hydro-Security Complex in the Lake Chad Basin [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2015, 2(1): 37 - 45.
- [4] 马栋山,王圣瑞,李贵宝.非洲水资源危机与乍得湖水问题[J]. *世界环境*, 2015(2): 42 - 44.
Ma Dongshan, Wang Shengrui, Li Guibao. Africa Water Resources Crisis and Lake Chad's Problem[J]. *World Environment*, 2015(2): 42 - 44.
- [5] 袁宣民.乍得湖的环境、安全及其脆弱性[J]. *世界科学*, 2016(7): 21 - 23.
Yuan Xuanmin. The Environment, Security, and Vulnerability of Lake Chad[J]. *World Science*, 2016(7): 21 - 23.
- [6] Kombe M D, Kostoingue B, Hamit A. Report on the State of the Lake Chad Basin Ecosystem[R]. Bonn: Lake Chad Basin Commission, 2016: 1 - 233.
- [7] Galeazzi G, Medinilla A, Marclint T, et al. Understanding the Lake Chad Basin Commission (LCBC): Water and Security at Inter-Regional Cross-

- Roads [R]. Brussels: European Centre for Development Policy Management, 2017: 1–24.
- [8] Bdiya H H, Bloxom M. Transboundary Diagnostic Analysis of the Lake Chad Basin[R]. N’Djamena: Lake Chad Basin Commission, 2006.
- [9] Fortnam M, Oguntola J. Lake Chad Basin, GIWA Regional Assessment 43[R]. Kalmar: United Nations Environment Programme, 2004.
- [10] Mahmood R, Jia S. Assessment of Hydro-Climatic Trends and Causes of Dramatically Declining Stream Flow to Lake Chad, Africa, Using a Hydrological Approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 675: 122–140.
- [11] Lemoalle J, Magrin G. Development of Lake Chad Current Situation and Possible Outcomes [M]. Marseille: IRD Editions, 2014.
- [12] 何中波, 冀华丽, 胡宝群. 准噶尔盆地北部晚白垩世至新近纪沉积介质环境演化特征及其对铀成矿的制约[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2024, 54(3): 800–810.
- He Zhongbo, Ji Huali, Hu Baoqun, et al. Environmental Evolution Characteristics of Sedimentary Media from Late Cretaceous to Neogene in the Northern Junggar Basin and Its Constraints on Uranium Mineralization [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2024, 54(3): 800–810.
- [13] Vassolo S, Gröschke M, Koeniger P, et al. Groundwater Recharge Processes in the Lake Chad Basin Based on Isotopic and Chemical Data [J]. *Hydrogeology Journal*, 2024, 32: 149–165.
- [14] Ngatcha B, Mudry J, Leduc C. Water Resources Management in the Lake Chad Basin: Diagnosis and Action Plan [C]//Applied Groundwater Studies in Africa. Boca Raton: CRC Press, 2008: 75–94.
- [15] Mahamat Nour A, Huneau F, Mahamat Ali A, et al. Shallow Quaternary Groundwater in the Lake Chad Basin Is Resilient to Climate Change but Requires Sustainable Management Strategy: Results of Isotopic Investigation [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 851: 158152.
- [16] Gao H, Bohn T J, Podest E, et al. On the Causes of the Shrinking of Lake Chad [J]. *Environmental Research Letters*, 2011, 6(3): 034021.
- [17] Mahmood R, Jia S, Mahmood T, et al. Predicted and Projected Water Resources Changes in the Chari Catchment, the Lake Chad Basin, Africa[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2020, 21(1): 73–91.
- [18] Leblanc M, Lemoalle J, Bader J C, et al. Thermal Remote Sensing of Water Under Flooded Vegetation: New Observations of Inundation Patterns for the “Small” Lake Chad[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 404(1/2): 87–98.
- [19] Mahamat A A A, Al-Hurban A, Saied N. Change Detection of Lake Chad Water Surface Area Using Remote Sensing and Satellite Imagery[J]. *Journal of Geographic Information System*, 2021, 13(5): 561–577.
- [20] Ndehedehe C E, Agutu N O, Okwuashi O, et al. Spatio-Temporal Variability of Droughts and Terrestrial Water Storage over Lake Chad Basin Using Independent Component Analysis[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 540: 106–128.
- [21] Tilho J. Changes and Possible Disappearance in Chad [J]. *Geographic Yearbook*, 1928, 207: 238–260.
- [22] Pham-Duc B, Sylvestre F, Papa F, et al. The Lake Chad Hydrology Under Current Climate Change[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 1–10.
- [23] Zhu W, Yan J, Jia S. Monitoring Recent Fluctuations of the Southern Pool of Lake Chad Using Multiple Remote Sensing Data: Implications for Water Balance Analysis[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(10): 1032.
- [24] Li H, Luo Z, Xu Y, et al. A Remote Sensing-Based Area Dataset for Approximately 40 Years That Reveals the Hydrological Asynchrony of Lake Chad Based on Google Earth Engine [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 126934.
- [25] Zhu W, Jia S, Lall U, et al. Relative Contribution of Climate Variability and Human Activities on the Water Loss of the Chari/Logone River Discharge into Lake Chad: A Conceptual and Statistical Approach [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 569: 519–531.
- [26] Adeyeri O E, Laux P, Lawin A E, et al. Assessing the Impact of Human Activities and Rainfall Variability on the River Discharge of Komadugu-Yobe Basin, Lake Chad Area [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(6): 143.
- [27] Nkiaka E, Nawaz N R, Lovett J C. Analysis of Rainfall Variability in the Logone Catchment, Lake Chad Basin[J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(9): 3553–3564.
- [28] Mahamat Nour A, Vallet-Coulomb C, Gonçalves J, et al. Rainfall-Discharge Relationship and Water Balance over the Past 60 Years Within the Chari-

- Logone Sub-Basins, Lake Chad Basin[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2021, 35: 1–17.
- [29] Odunuga S, Okeke I, Omojola A, et al. Hydro-Climatic Variability of the Hadejia-Jama'are River Systems in North-Central Nigeria[C]//IAHS–AISH Publication. Wallingford: IAHS Press, 2011: 163–168.
- [30] Mahamat Nour A, Vallet-Coulomb C, Bouchez C, et al. Geochemistry of the Lake Chad Tributaries Under Strongly Varying Hydro-Climatic Conditions [J]. *Aquatic Geochemistry*, 2020, 26(1): 3–29.
- [31] Gana B A, Harir A I, Bogoro A G, et al. Stream Ordering as a Tool for Effective River Basin Development: Examples from Komadugu-Yobe River Basin, Nigeria[J]. *Journal of Resources Development and Management*, 2018, 44: 67–78.
- [32] Lemoalle J, Bader J C, Leblanc M, et al. Recent Changes in Lake Chad: Observations, Simulations and Management Options (1973–2011)[J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 80/81: 247–254.
- [33] Famiglietti J S. The Global Groundwater Crisis[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(11): 945–948.
- [34] Neukum C, Morales-Santos A, Ronelngar M, et al. Modelling Groundwater Recharge, Actual Evaporation, and Transpiration in Semi-Arid Sites of the Lake Chad Basin: The Role of Soil and Vegetation in Groundwater Recharge[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2023, 27(19): 3601–3619.
- [35] Tewolde D O, Koeniger P, Beyer M, et al. Soil Water Balance in the Lake Chad Basin Using Stable Water Isotopes and Chloride of Soil Profiles [J]. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2019, 55(5): 459–477.
- [36] 危润初, 姜颖迪, 李铭远, 等. 乍得湖盆地典型区域降雨入渗补给地下水试验[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(2): 495–504.
- Wei Runchu, Jiang Yingdi, Li Mingyuan, et al. Rainfed Recharge Experiment in Typical Plain Area of Chad Lake Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(2): 495–504.
- [37] Ikusemoran M. Remotely Sensed Data and Geographic Information System Techniques for Monitoring the Shrinking Hadejia-Nguru Wetlands [J]. *Lagos Journal of Geo-Information Sciences*, 2011, 1(1): 73–86.
- [38] Goes B J M. Estimate of Shallow Groundwater Recharge in the Hadejia-Nguru Wetlands, Semi-Arid Northeastern Nigeria [J]. *Hydrogeology Journal*, 1999, 7(3): 294–304.
- [39] Yusuf A K. Groundwater Resource Management Strategy in the Nigerian Sector of the Chad Basin[J]. *Journal of Natural Sciences Research*, 2015, 5(14): 56–63.
- [40] Yusuf A K, Goni I B, Hassan M. The Declining Middle Zone Aquifer of the Southwestern Chad Basin in the Last Millenium[J]. *Journal of Applied Geology and Geophysics*, 2014, 2(2): 67–75.
- [41] Tukur A, Nabegu A, Abba Umar D, et al. Groundwater Condition and Management in Kano Region, Northwestern Nigeria[J]. *Hydrology*, 2018, 5(16): 1–21.
- [42] Tanko A I, Momale S B. Kano: Environment, Society and Development [M]. London: Adonis & Abbey Publishers Ltd, 2014.
- [43] Adamu S, Sadiq H M, Kodomi M G, et al. Groundwater Depletion in the Upper Aquifer of the Chad Formation, Chad Basin, North-Eastern Nigeria [J]. *Nigerian Journal of Technology*, 2020, 39(2): 621–631.
- [44] Daira D, Vassolo S. Effects of Climate Change on the Groundwater Resource in the Lake Chad Basin[R]. Ohrid: Lake Chad Basin Commission, 2012: 1–6.
- [45] Abdoulaye A C, Emvoutou H, Abderamane H, et al. Stable Isotopes for Groundwater Assessment of the Quaternary Aquifer of the Western Part of Chad: A Case Study of Bahr El Gazel, Hadjer Lamis, Kanem and Lac Regions [J]. *American Journal of Water Resources*, 2021, 9(2): 49–62.
- [46] Schneider J L. Water Balance in Three Points of the Water Table Aquifer of Chad[J]. *Pangea*, 2002, 37/38: 45–52.
- [47] Okpara U T, Stringer L C, Dougill A J, et al. Conflicts About Water in Lake Chad: Are Environmental, Vulnerability and Security Issues Linked? [J]. *Progress in Development Studies*, 2015, 15(4): 308–325.
- [48] Odada E, Oyebande L, Oguntola J. Experiences and Lessons Learned: Brief for Lake Chad [R]. Shiga: International Lake Environment Committee Foundation (ILEC), 2003: 1–30.
- [49] Hall E L. Conflict for Resources: Water in the Lake Chad Basin [D]. Fort Belvoir: Defense Technical Information Center, 2009.
- [50] Niasse M. Climate-Induced Water Conflict Risks in

- West Africa: Recognizing and Coping with Increasing Climate Impacts on Shared Watercourses[R]. Dakar: IUCN-West Africa Regional Office (IUCN-BRAO), 2005: 21–23.
- [51] Waddington C. Water Security-Related Conflict in West Africa [R]. Pretoria: Consultancy Africa Intelligence (Pty) Ltd, 2014: 56–59.
- [52] Griffin T E. Lake Chad Changing Hydrography, Violent Extremism, and Climate-Conflict Intersection [J]. Expeditions with MCUP, 2020, 1: 1–30.
- [53] Piesse M. Boko Haram: Exacerbating and Benefiting from Food and Water Insecurity in the Lake Chad Basin [R]. Perth: Future Directions International, 2017: 1–8.
- [54] Galli N, Dell' Angelo J, Epifani I, et al. Socio-Hydrological Features of Armed Conflicts in the Lake Chad Basin[J]. Nature Sustainability, 2022, 5(10): 843–852.
- [55] Treszkai A. Water Conflicts: Case Study: Lake Chad Conflict[J]. Strategic Impact, 2018, 68/69: 54–62.
- [56] 张群智, 黄小平. 气候变化对水文水资源影响的研究进展[J]. 环境与发展, 2019, 31(4): 220–221. Zhang Qunzhi, Huang Xiaoping. Research Progress on the Impact of Climate Change on Hydrology and Water Resources[J]. Environment and Development, 2019, 31(4): 220–221.
- [57] 王兆, 孟先强, 李陈志. 末次冰盛期以来的东北地区湖泊记录: 气候变迁、生态演变与人类活动印迹[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2026, 56(1): 266–284. Wang Yao, Meng Xianqiang, Li Chenzhi, et al. Lake Records in Northeast China Since Last Glacial Maximum: Climate Change, Ecological Evolution, and Human Activities[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2026, 56(1): 266–284.
- [58] Calvin K, Dasgupta D, Krinner G, et al. Climate Change 2023: Synthesis Report [R]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023.
- [59] James R, Washington R. Changes in African Temperature and Precipitation Associated with Degrees of Global Warming [J]. Climatic Change, 2013, 117(4): 859–872.
- [60] Niel H, Leduc C, Dieulin C. Spatial and Temporal Variability of Annual Rainfall in the Lake Chad Basin During the 20th Century[J]. Hydrological Sciences Journal, 2005, 50(2): 223–243.
- [61] Nicholson S E. The West African Sahel: A Review of Recent Studies on the Rainfall Regime and Its Interannual Variability[J]. ISRN Meteorology, 2013, 2013: 1–32.
- [62] Adeyeri O E, Lamptey B L, Lawin A E, et al. Spatio-Temporal Precipitation Trend and Homogeneity Analysis in Komadugu-Yobe Basin, Lake Chad Region [J]. Journal of Climatology & Weather Forecasting, 2017, 5(3): 1–12.
- [63] Murumkar A, Durand M, Fernández A, et al. Trends and Spatial Patterns of 20th Century Temperature, Rainfall and PET in the Semi-Arid Logone River Basin, Sub-Saharan Africa[J]. Journal of Arid Environments, 2020, 178: 104168.
- [64] Boronina A, Favreau G, Coudrain A, et al. Data Scarcity in the Large Semiarid Lake Chad Basin: Incorporating Environmental Tracers as a Priori Information for Groundwater Modelling [C]// Fifth International Conference on Calibration and Reliability in Groundwater Modelling: From Uncertainty to Decision Making: Pre-published Proceedings, The Hague. Wallingford: International Association of Hydrological Sciences, 2005: 3–6.
- [65] Mohammed A, Muhammad M M, Adeogun B K, et al. Application of the WEAP Model for Future Water Allocation from Tiga Dam [J]. Nigerian Journal of Engineering, 2020, 27(2): 45–54.
- [66] Blench R. The History and Future of Water Management of the Lake Chad Basin in Nigeria [C]// Jungraithmayr H, Barreteau D, Seibert U, et al. Man and Water in the Lake Chad Basin. Paris: ORSTOM, 1997: 143–166.
- [67] Thomas D H L, Adams W M. Adapting to Dams: Agrarian Change Downstream of the Tiga Dam, Northern Nigeria [J]. World Development, 1999, 27(6): 919–935.
- [68] Ahmad I M, Yola I D, Suleiman N. Mortality and Exploitation Rates of Challawa Gorge Dam Fishes, Kano State, Nigeria [J]. Journal of Fisheries & Livestock Production, 2018, 6(1): 1–10.
- [69] Malami D, Zakaria Z, Mohammed M, et al. Comparison of Levels of Some Metals in the Water and Sediment from Challawa Gorge Dam, Kano, Nigeria [J]. Bayero Journal of Pure and Applied Sciences, 2014, 7(1): 80–84.
- [70] Delclaux F, Seignobe C, Liénou G, et al. Water and People in the Yaere Floodplain (North Cameroon) [M]// Floodplains: Physical Geography, Ecology and

- Societal Interactions. Hauppauge, NY: Nova Science Publisher's, 2011: 1-36.
- [71] 刘甜甜, 刘荣高, 葛全胜. 基于多源遥感数据的非洲乍得湖水面变化监测[J]. 地理科学进展, 2013, 32(6): 906-912.
- Liu Tiantian, Liu Ronggao, Ge Quansheng. Remote Sensing Analysis on Lake Area Variation of Lake Chad[J]. Progress in Geography, 2013, 32(6): 906-912.
- [72] Barbier E B. Upstream Dams and Downstream Water Allocation: The Case of the Hadejia-Jama' are Floodplain, Northern Nigeria[J]. Water Resources Research, 2003, 39(11): 1-9.
- [73] Okonkwo C, Demoz B, Gebremariam S. Characteristics of Lake Chad Level Variability and Links to ENSO, Precipitation, and River Discharge[J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014: 1-13.
- [74] Coe M T, Foley J A. Human and Natural Impacts on the Water Resources of the Lake Chad Basin[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D4): 3349-3356.
- [75] Federal Ministry of Environment. 2050 Long-Term Vision for Nigeria (LTV - 2050) [R]. Abuja: Department of Climate Change, 2021: 1-37.
- [76] Defo C, Mishra A K, Yerima B P K, et al. Current Conditions of Groundwater Resources Development and Related Problems in the Republic of Cameroon, West Africa[J]. European Water, 2016, 54: 43-68.
- [77] Bronkhorst B V. Climate Risk Profile: Central Africa Republic[R]. Washington: The World Bank Group, 2021: 1-29.
- [78] Christoph G, Haider J. Climate Risk Profile: Niger [R]. Bonn: Federal Ministry for Economic Cooperation and Development, 2021: 1-12.
- [79] Haller T, Fokou G, Mbeyale G, et al. How Fit Turns into Misfit and Back: Institutional Transformations of Pastoral Commons in African Floodplains[J]. Ecology and Society, 2013, 18(1): 34.
- [80] Okonkwo C, Demoz B. Identifying Anthropogenic "Hotspots" and Management of Water Resources in Lake Chad Basin Using GIS[J]. Journal of Natural Resources Policy Research, 2014, 6(2/3): 135-149.
- [81] Olowoyeye O S, Kanwar R S. Water and Food Sustainability in the Riparian Countries of Lake Chad in Africa[J]. Sustainability, 2023, 15(13): 10009.
- [82] McAnally-Trejo E. A Manuscript for Addressing Climate Fragility Risks in Transboundary Water Projects: Operationalizing Risk in the Lake Chad Basin and Beyond[D]. Flagstaff: Northern Arizona University, 2020.
- [83] Ruppel O C, Funtteh M B. Climate Change, Human Security and the Humanitarian Crisis in the Lake Chad Basin Region: Selected Legal and Developmental Aspects with a Special Focus on Water Governance[C]// Kameri-Mbote P, Paterson A, Ruppel O C, et al. Law | Environment | Africa. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft, 2019: 105-136.
- [84] 马梓文, 张明祥. 从《湿地公约》第12次缔约方大会看国际湿地保护与管理的发展趋势[J]. 湿地科学, 2015, 13(5): 523-527.
- Ma Ziwen, Zhang Mingxiang. Prospective on Development Trends of International Wetland Conservation and Management from the 12th Meeting of the Conference of the Parties of the Convention on Wetlands[J]. Wetland Science, 2015, 13(5): 523-527.
- [85] Yogo E D K. The Lake Chad Basin Water Charter: Strengths and Weaknesses[C]// Kameri-Mbote P, Paterson A, Ruppel O C, et al. Law | Environment | Africa. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft, 2019: 105-136.
- [86] Abu S W, Ahmed A O. Cooperation Between the Countries Around Lake Chad Basin: An Assessment [J]. Asian Social Science, 2021, 17(12): 1-11.
- [87] Mbaigoto N, Alsharif K, Landry S. An Assessment of the Degree of the Implementation of the Integrated Water Resources Management Principles in the Lake Chad Basin: The Case of the Republic of Chad[J]. Sustainable Water Resources Management, 2023, 9(4): 118.
- [88] Okpara U T, Stringer L C, Dougill A J. Integrating Climate Adaptation, Water Governance and Conflict Management Policies in Lake Riparian Zones: Insights from African Drylands[J]. Environmental Science & Policy, 2018, 79: 36-44.