

引用格式:王冠,王平,王田野,等. 1900年以来贝加尔湖水位变化及其原因分析[J]. 资源科学,2018,40(11):2177-2185. [Wang G, Wang P, Wang T Y, et al. The variation of Lake Baikal water level and causal analysis since 1900[J]. *Resources Science*, 2018, 40(11):2177-2185.] DOI :10.18402/resci.2018.11.04

1900年以来贝加尔湖水位变化及其原因分析

王冠^{1,2},王平¹,王田野^{1,2},李泽红^{2,3},于静洁^{1,2},刘昌明¹,Bolgov M.V.^{4,5}

(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. 中国科学院地理科学与资源研究所资源利用与环境修复重点实验室,北京 100101;

4. 俄罗斯科学院水问题研究所,莫斯科 119333;

5. 罗蒙诺索夫莫斯科国立大学陆地水文系,莫斯科 119991)

摘要:水位变化作为湖泊水文过程和水量平衡的动态反映,是湖泊生态环境的重要影响因素。全球最大的淡水湖——贝加尔湖,在自然变化与人为活动的双重影响下,过去100多年水位表现出较大的年内、年际和多年变化。贝加尔湖水位变化与入湖径流量变化密切相关,与贝加尔湖最大支流色楞格河的径流量变化较为一致。气候变暖带来的气温上升和降水减少使得入湖径流量减少,贝加尔湖水位下降。人类活动对贝加尔湖水位变化影响表现在两个方面:一方面,全球变暖条件下耕地面积扩张和灌溉用水增加导致贝加尔湖流域用水增加,使得入湖径流量减少,贝加尔湖水位下降;另一方面,1958年伊尔库茨克水电站投入运营之后,贝加尔湖水位变化受到了安加拉河水位顶托的影响。在下游水电站人为调控影响下,贝加尔湖年平均水位升高,年内水位波动幅度增加,年最低和最高水位出现日期推迟。地处全球气候与环境变化敏感区的贝加尔湖,其水位变化对湖泊及周边生态环境影响显著。因此,探究在全球变化背景下贝加尔湖的水位变化及影响因素对保护当地生态环境具有重要意义。

关键词:贝加尔湖;水位;气候变化;伊尔库茨克水电站

DOI :10.18402/resci.2018.11.04

1 引言

随着“一带一路”倡议提出和中蒙俄经济走廊建设的加快推进,东北亚地区人口、资源、环境、经济的协调发展成为了重要议题,其中水资源问题不可忽视。湖泊是地球上重要的淡水资源库,作为世界上最大的淡水湖,中蒙俄经济走廊沿线的贝加尔湖蓄水量约23.6万亿 m^3 ,占世界淡水总量的22%,是人类珍贵的淡水资源宝库。

近年来,全球气候变暖与人类活动的共同作用导致了湖泊面积萎缩、水位下降、污染严重、水体富营养化加剧、生态系统功能退化等一系列湖泊问

题^[1,2]。但对于不同区域与类型的湖泊而言,其水位变化过程不同,影响因素也存在差异。比如,青藏高原不同湖泊在气候变暖背景下呈现出不同的年际变化特征,部分湖泊水位呈上升趋势,而同期部分湖泊水位呈下降趋势^[3]。中国最大的咸水湖青海湖近几十年来水位急剧下降,气候变化是造成湖泊水位下降的主要原因,人类活动对湖泊水位下降的影响很小^[4]。在西北干旱区,新疆博斯腾湖水位持续上升,其水位变化与最大支流开都河的径流量增加直接相关^[5]。中国南方湿润区鄱阳湖的水位变化主要受到自身流域入湖水量和长江水位顶托的双

收稿日期:2018-04-27 修订日期:2018-10-09

基金项目:国家科技基础资源调查专项子课题(2017FY101302, 2017FY101301);中国科学院战略性先导科技专项子课题(No. XDA2003020101);中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2017-4)。

作者简介:王冠,女,河南新乡人,博士生,主要从事生态水文研究。E-mail: wangg.16b@igsnrr.ac.cn

通讯作者:王平, E-mail: wangping@igsnrr.ac.cn

重影响^[6]。

贝加尔湖水位在近百年也发生了较大的变化。俄罗斯及其他国际学者对贝加尔湖水位变化及其影响因素的研究主要集中在两个方面:一是气候变化如何通过改变流域的径流过程影响贝加尔湖水位波动;二是贝加尔湖下游安加拉河上伊尔库茨克水电站的修建如何影响贝加尔湖水位的变化。已有研究表明,贝加尔湖水位变化与气温和降水具有显著的相关性^[7,8],其水位变化几乎直接取决于其最大支流色楞格河的人湖水量^[9]。另有研究^[10]发现,色楞格河流域在过去的100年间气温上升与降水减少,直接导致了这一地区的地表径流量的减少,并进一步导致贝加尔湖水位的降低。另一方面,人类活动的影响加剧了贝加尔湖水位的动态过程。人口增长、土地利用变化、农业灌溉需求增加等一系列人类活动带来的用水增加,加剧了气候变暖背景下地表径流量的减少,被认为是导致贝加尔湖水位下降的重要原因^[11-13]。与此同时,在贝加尔湖下游的安加拉河上修建伊尔库茨克水电站之后,受安加拉河水位顶托的影响,贝加尔湖湖面水位得到抬升^[14],水位变化幅度加剧^[15]。

本文在前人的研究基础上,通过梳理文献资料,对影响贝加尔湖水位变化的自然与人为因素进行归纳,为这一地区的水资源利用与生态系统保护提供参考。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

贝加尔湖流域(46°28'E-56°42'E, 96°52'N-113°

50'N)地处欧亚大陆中部,流域面积55.7万 km²,是蒙古和俄罗斯的跨境流域(图1)。该地区属大陆性气候,气温日较差、年较差大,大部分地区年平均气温都在0℃以下,冬季寒冷漫长^[16]。降水量少,时空分布不均,年降水量的一半以上发生在夏季(6-8月)。

贝加尔湖位于俄罗斯布里亚特共和国和伊尔库茨克州境内,为东北-西南走向,呈月牙形,南北长636km,东西向平均宽度48km,水域面积3.15万 km²,平均湖深730m,中部最深达1620m^[17],是世界上蓄水量最大、深度最深的淡水湖。贝加尔湖生物多样性丰富,被联合国教科文组织列为世界自然与文化双遗产^[18]。

共有336条大小河流汇入贝加尔湖,其中色楞格河是贝加尔湖最大的支流。此外,上安加拉河和巴尔古津河也是贝加尔湖的重要支流。色楞格河是一条跨境河流,流域面积44.7万 km²,占贝加尔湖流域面积的80%,其中2/3位于蒙古领土,年均径流量约880m³/s^[19,20],占贝加尔湖总入湖径流量的一半以上(50%~60%)。降水是色楞格河径流的主要来源,融雪和地下水对径流补给的贡献较小^[21]。流域北部多年冻土覆盖,冻土是夏季土壤水分的重要来源^[22]。上安加拉河流域面积2.06万 km²,年均径流量约267m³/s,融雪是径流补给的主要来源。巴尔古津河流域面积1.98万 km²,年均径流量约124m³/s,其径流补给的主要来源为降水^[22]。色楞格河、上安加拉河和巴尔古津河三条支流汇入湖泊的水量占总入湖径流量的2/3。安加拉河是从贝加尔湖流出的唯一一条河流,在中西伯利亚高原的南部汇入叶

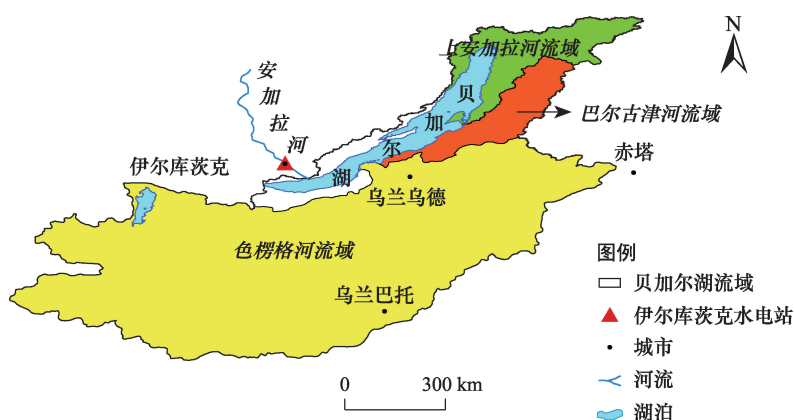


图1 贝加尔湖流域范围示意

Figure 1 Geographical location of Lake Baikal Basin

2018年11月

尼塞河并最终流入北冰洋。从贝加尔湖流出的径流量约为 $1851\text{m}^3/\text{s}$ 。

伊尔库茨克水电站大坝修建在贝加尔湖下游的伊尔库茨克市附近,位于叶尼塞河支流安加拉河上,距离安加拉河源头约65km处。伊尔库茨克水电站的水库面积 3.3km^2 ,有效库容464亿 m^3 ,为多年调节水库。水电站装机容量66万kW,年平均发电量41亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。该工程于1950年动工,1956年第一台机组投入运行,1958年8台机组全部投入运行^[23],具有发电、供水、灌溉等综合经济效益。贝加尔湖作为安加拉河的发源地,同时又是安加拉河上游的天然大水库。伊尔库茨克水电站建成蓄水后,将贝加尔湖用作水库进行年径流调节,并在一定程度上实现水位多年调节。

2.2 数据来源

本文选用的贝加尔湖水位、入湖径流量及其主要支流的径流数据来源于俄罗斯学者近年来公开发表的论文,其中贝加尔湖水位年内和年际变化数据分别参考文献[14, 15],贝加尔湖入湖径流量及主要支流径流量变化主要参考文献[22, 24]。1900—2015年降水与气温数据来自东安格利亚大学(the University of East Anglia)气候研究中心(Climatic Research Unit)生产的 $0.5^\circ\times 0.5^\circ$ 度CRU网格资料(<http://www.cru.uea.ac.uk>)。

3 贝加尔湖水位变化过程

3.1 年内变化

贝加尔湖水位为典型的单峰分布,具有明显的高、低水位变化。受气候影响,呈现出较为明显的季节性和周期性变化,夏秋季湖水位高,冬春季湖水位低,变化周期为1年^[25](图2)。每年自1月开

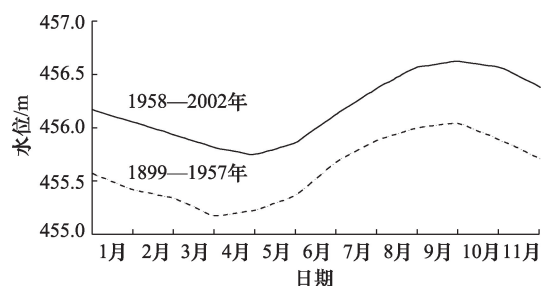


图2 伊尔库茨克水电站修建(1958年)前后
贝加尔湖水位年内变化

Figure 2 The water level of Lake Baikal changes during the year

注:图中数据参考文献[14]。

始,水位呈明显下降趋势,4—5月达到最低值,平均水位约为455.5m。自5月开始,随着气温回暖,贝加尔湖水位随着降水量和入湖径流量的增加而缓慢上升,至9—10月达到最高值,平均水位约为456.4m。此后,水位开始呈迅速下降趋势^[26]。1900—2015年,贝加尔湖水位多年平均变幅为0.93 m。贝加尔湖的最低水位和最高水位出现时间在伊尔库茨克水电站修建前后表现出明显的差异。如图2所示,伊尔库茨克水电站修建后,贝加尔湖的最低水位和最高水位的出现时间均有推迟。

3.2 年际变化

1900—2015年,贝加尔湖多年平均水位为456.01 m。从贝加尔湖年均水位变化曲线来看(图3),自1900年以来,湖泊水位呈高水期与低水期相互交替的波动变化,具有多年的周期循环:即大体经历了1900—1928年、1929—1957年、1958—1981年、1982年至今4个高低水位循环变化周期。

在1900—1928年这一周期内,贝加尔湖水位较低,近百年来最低水位454.92m(1900年和1904年)就出现在这一时期,同时,其水位年际变化较为平稳;1929—1957年间的水位年际变化也相对平稳,但水位平均高于前一周期。

在第三个周期(1958—1981年),受伊尔库茨克水电站影响,贝加尔湖水位变化非常剧烈。1958—1975年期间,贝加尔湖水位较高。1976—1982年间,贝加尔湖水位急剧下降,伊尔库茨克水电站水位1982年也相应下降到455.27 m PS(太平洋高程系统),低于设计最低水位(死水位)。

1982年至今,贝加尔湖水位年际变化较为平稳,且水位一直保持在较高水平。在1983—1995年

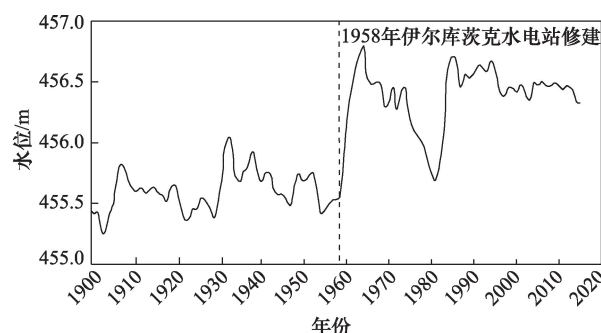


图3 1900—2015年贝加尔湖水位变化

Figure 3 The water level of Lake Baikal has changed from 1900 to 2015

注:图中数据参考文献[15]。

的13年高水位期间,贝加尔湖水位高于正常水位10次。1988年出现近百年最高水位(457.42m);1996—2015年处于贝加尔湖流域干旱期^[13],年平均水位迅速下降。在这一时期内存在相邻的两个极端干旱年(2014年和2015年),贝加尔湖水位出现明显低值^[15]。水位降低的主要原因是夏秋季降水减少,流入贝加尔湖的水量较往年大幅下降。自20世纪末开始,贝加尔湖干旱期已经持续了20年,而且很可能持续下去^[19]。值得注意的是,2001年俄罗斯出台第234号法令,将湖泊的最高和最低水位限制在456~457 m PS的1m范围内,通过人工调节实现干旱期水位仍保持平稳变化。但这一法令所规定的贝加尔湖的临界水位,尤其是它的最低水位线没有严格的科学依据,其合理性值得讨论^[15, 16, 27]。

4 贝加尔湖水位变化原因

4.1 入湖径流量变化

贝加尔湖水位年际及年内变化均与入湖径流量变化密切相关:由于降雨与融雪所引起的河流年内径流特征的变化,入湖径流量年内呈现明显的不对称性,使贝加尔湖水位呈现季节性和周期性变化;同时,全球气候变化影响了位于干旱气候区的贝加尔湖地区的降水和蒸发,从而影响入湖径流量^[9],使贝加尔湖水位出现显著的年际变化(图4)。

20世纪70年代初期以来,北半球的全球变暖一直在加剧,影响着径流特征的变化。贝加尔湖地区气候变暖的程度更为剧烈,这一地区的气温上升速率是地球平均水平的两倍,使得这一地区水文特征的变化尤为明显^[28, 29]。1959—2010年,贝加尔湖入湖径流量每年平均减少 $3\text{m}^3/\text{s}$ ^[7]。在气候变暖初期(1976—1981年)出现连续的少雨期,流域大部分地区的径流出现异常减少,入湖径流量非常低,相应地这一时期贝加尔湖水位显著下降;80年代中期至90年代中期,径流量有所回升,这一时期内贝加尔湖水位处于较高水位;90年代中期以后,受到中纬度东亚季风辐合区环流普遍衰减的影响,夏季降水减少^[21]。近20年表现出明显的、100多年以来持续时间最长的低流量时期,伴随90年代以后贝加尔湖入湖径流量降低,入湖径流量的波动周期消失^[15],相应地这一时期贝加尔湖水位一直维持在较低水平。

由于色楞格河对贝加尔湖补给贡献最大,其径

流量的变化趋势与贝加尔湖入湖径流量变化情况基本相似。近20年来色楞格河径流量一直低于长期平均水平,1990s中期以来色楞格河径流量的明显减少是贝加尔湖入湖径流量减少的主要原因^[22]。研究显示,自20世纪30年代至今,贝加尔湖主要支流色楞格河径流量以每年 $2.8\text{m}^3/\text{s}$ 的速率减少,上安加拉河径流量以每年 $0.6\text{m}^3/\text{s}$ 的速率增加,巴尔古津河径流量相对稳定,变化速率仅为每年 $-0.03\text{m}^3/\text{s}$ ^[22]。上安加拉河年径流量的增加部分补偿了色楞格河流入贝加尔湖的径流减少,但其增加量比色楞格河年径流量的减少量要低的多,因此这一时期内入湖径流量整体减少。此外,色楞格河和上安加拉河径流变化的一致性自气候变暖之后消失^[7](图4)。

气候变暖将对融雪-径流过程产生重要影响,融雪水是上安加拉河径流补给的主要来源,该流域大部分地区气温和降水量增加(图5,见2182页),导致融雪径流增多,可能是上安加拉河径流增加的主要原因。降雨是色楞格河和巴尔古津河径流补给的主要来源,在这两个流域内,近30年降水呈下降趋势。值得注意的是,在1978—1982年间,降水量剧烈减少,径流量长期减少(仅有正常值的20%),同时气温超过平均值,导致水体的蒸发量增加,特别是从贝加尔湖表面蒸发增加^[14]。因此,降水不足和蒸发增加减少了流入贝加尔湖的入湖径流量,其水位异常下降至明显的低值。2013—2015年间,上安加拉河和巴尔古津河(巴尔古津河自2011年至今一直呈下降趋势)的径流量均大幅减少,并且在2015年,色楞格河和巴尔古津河均出现了近年来的最低径流。其结果导致贝加尔湖的入流量非常低,使贝加尔湖水位低于设计最低水位。

湖泊水位变化是多方面因素共同作用的结果,全球气候变化对降水、蒸发^[12, 30, 31]和冻土^[18, 31]造成影响,这些自然因素的变化直接影响水文过程,是引起湖泊水位变化的主要原因,在大尺度上决定了湖泊水位的变化趋势。同时,贝加尔湖流域水文变化与人类活动密切相关,人类活动不但对湖泊水位变化造成直接影响,更对自然要素变化有放大作用^[33],全球变暖和人口增长条件下农业用地的增加带来的土地利用变化^[11, 34]和农业扩张和灌溉需求增加带

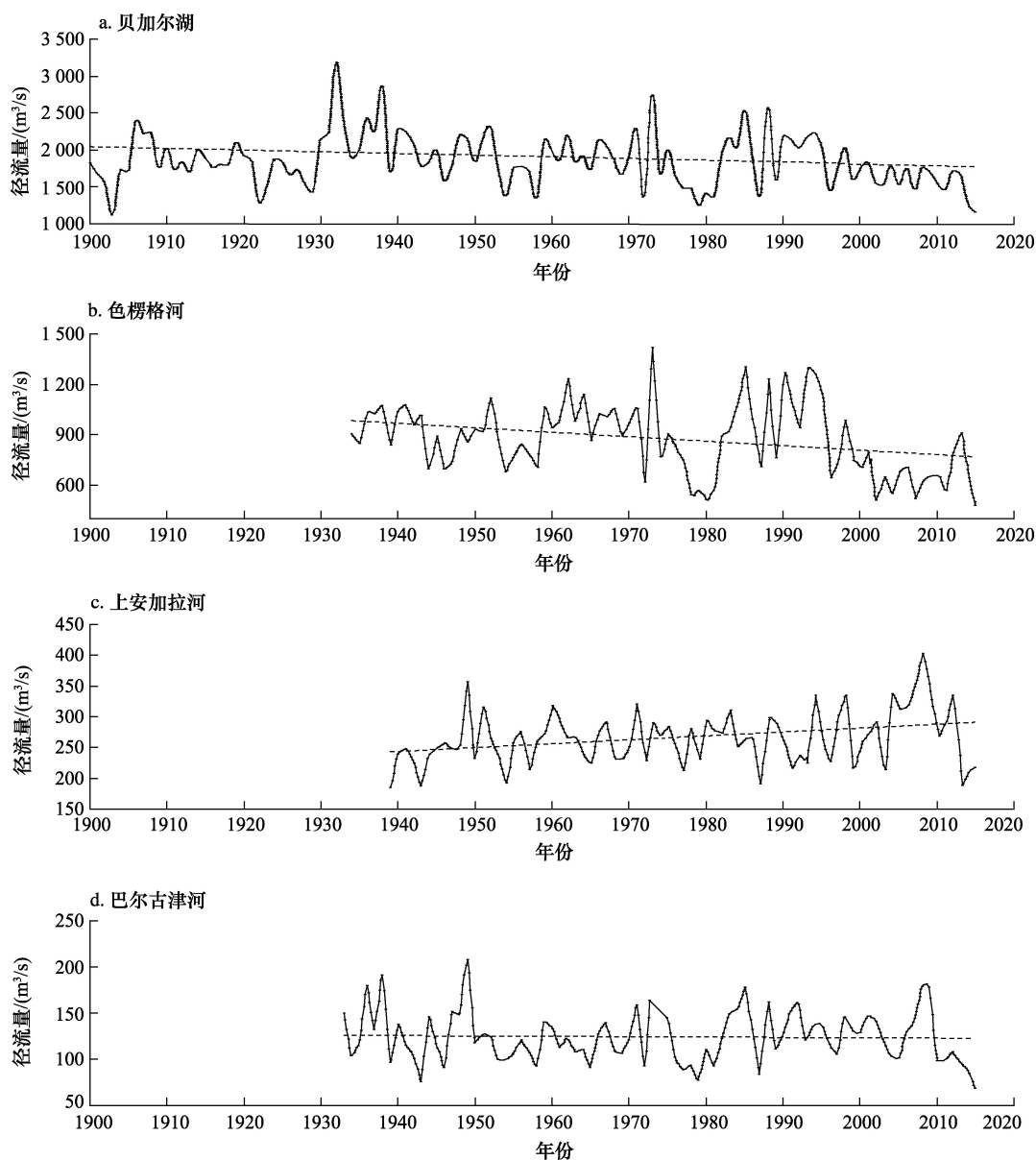


图4 1900—2015年贝加尔湖入湖径流量及主要支流径流量变化

Figure 4 The total streamflow of Lake Baikal and runoff of its main tributaries from 1900 to 2015

注:图中数据参考文献[22, 24]。

来的用水增加^[13]都是导致贝加尔湖水位下降的重要原因。20世纪下半叶以来,在降水量基本稳定的情况下,由于景观退化和农林业管理不合理,色楞格河径流减少的趋势仍在增加^[35]。与此同时,蒙古人口增加了三倍多,城市人口从35%增长到68.5%,为满足社会经济目标的灌溉和供水增多,地表水资源的利用大大增加^[36, 37]。

4.2 伊尔库茨克水电站建设的影响

贝加尔湖水位可以分为两个时期:1957年以前

(自然径流时期)和1958年以后。1958年伊尔库茨克水电站建成之后,贝加尔湖从自然湖泊变为年及多年调节水库。

贝加尔湖水位年内变化在伊尔库茨克水电站蓄水运行之后,季节性水位变化与水电站建设前的年内变化较为一致;但水量调节增加了水位波动的范围,水库蓄水前年水位波动为84 cm,蓄水后年水位波动上升至94 cm^[38],水位年内变化更大;年平均水位、最高水位、最低水位分布由正偏态变为负偏

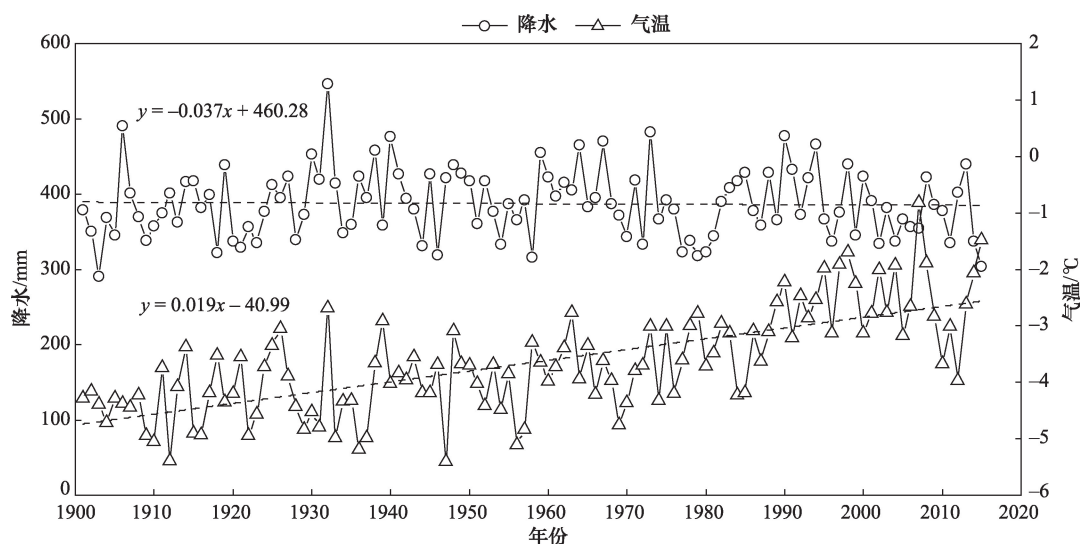


图5 1900—2015年贝加尔湖流域气温及降水变化

Figure 5 The variation of temperature and precipitation in the Lake Baikal Basin from 1900 to 2015

态^[15];并推迟了最低和最高水位的出现时间。湖泊最低水位出现的日期取决于3月下旬的实际水位和4月的入湖径流量,最低水位平均出现的日期自然条件下为4月19日,水库运行后为4月28日,平均推后9天。最高水位的出现日期主要取决于5—9月的入湖径流量,自然条件下最高水位出现的平均日期为9月17日,水库运行条件下为9月25日,平均推后8天^[39]。

由于安加拉河径流的顶托作用,蓄水后贝加尔湖水位上涨,如今贝加尔湖水位比蓄水前水位平均高0.80m^[15]。半个多世纪以来,贝加尔湖生态适应湖泊水位较高。1901—1958年间贝加尔湖的均衡水位标志线为454.55m,1997—2014年间贝加尔湖的均衡水位标志线为456.21m^[24]。自伊尔库茨克水电站建成以来,观测数据从开始径流调节以来表现出多个水位变化周期^[27],这些周期的发生频率平均为20至30年^[14]。在1974—1981年的缺水期内,伊尔库茨克水电站的流量仍超过贝加尔湖的入流量,这种不均衡的调节以及水电站蓄水放水时间的操作偏差更加剧了贝加尔湖水位的下降,使湖泊长期调节能力极为严重的下降。到1981和1982年,湖水位已经降到死水位以下(455.54 m)。此外,水电站建成后贝加尔湖作为多年调节水库,其水位的自相关系数从0.61增加到0.83^[14]。

5 结语

在过去一百多年间,贝加尔湖水位表现出较显著的年内、年际和多年变化。受季风气候及融雪径流变异性等因素影响,贝加尔湖水位年内呈现出较为明显的季节性和周期性变化,多年平均水位变幅0.93m,具体表现为夏秋季湖水水位高,冬春季湖水水位低,年最低水位一般出现在4—5月,平均水位约为455.5m,年最高水位一般出现在9—10月,平均水位约为456.4m。同时,受大陆性气候影响,贝加尔湖水位年际变化较为剧烈,1900—2015年间,最低水位为454.92m(1900年和1904年),最高水位为457.42m(1988年)。高水期与低水期相交替,形成了多年的周期循环。

贝加尔湖水位变化是自然因素和人类活动交互作用的结果。在全球气候变暖的背景下,贝加尔湖流域整体上呈现出气温升高,降水减少的趋势。受气候变化与人类活动(如土地利用变化、农业用水量增加)的影响,作为贝加尔湖流域最大支流的色楞格河河川径流量不断减少,导致流入贝加尔湖的总入湖径流量减少,并引起贝加尔湖水位下降。

伊尔库茨克水电站建成后,贝加尔湖从自然湖泊变为年及多年调节水库,水电站调蓄控制贝加尔湖湖水下泄,影响了贝加尔湖水位变化。蓄水后受安加拉河顶托作用,贝加尔湖水位上涨,在入湖径

2018年11月

流量持续减少的情况下,年平均水位仍比蓄水前高0.80m;年内水位波动的幅度84 cm增加至94 cm;年平均水位、最高水位、最低水位分布由正偏态变为负偏态;年最低和最高水位出现日期推迟约8~9天。

贝加尔湖水资源丰富,是西伯利亚地区重要的战略与经济资源,但其开发利用程度较低,通过虚拟水贸易或跨流域调水等方式合理开发水资源对当前的中蒙俄经济走廊建设具有重要的战略意义。然而,在全球变化背景下,地处半干旱区的贝加尔湖流域,其生态环境脆弱,对水资源依赖性强。特别是作为世界自然与文化双遗产的贝加尔湖,其生态环境对水位变化十分敏感。因此,探究全球变化背景下的贝加尔湖水位变化、合理利用贝加尔湖水资源,是当前所面临的具有全局性、基础性问题,具有重要的现实意义。

致谢:感谢中国科学院地理科学与资源研究所杜朝阳博士、张一驰博士在本文修改与完善过程中所提出的宝贵意见与建议。

参考文献(References):

- [1] 郑佳佳. 基于多源卫星数据的中亚地区湖泊水量变化监测研究[D]. 南京: 南京大学, 2017. [Zheng J J. Monitoring and Analysis of Lake Water Storage Changes in Central Asia Using Multi-mission Satellite Data[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.]
- [2] 柯长青. 湖泊遥感研究进展[J]. 海洋湖沼通报, 2004, (4): 81–86. [Ke C Q. A review of monitoring lake environment change by means of remote sensing[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2004, (4): 81–86.]
- [3] 张鑫, 吴艳红, 张鑫. 1972–2012年青藏高原中南部内陆湖泊的水位变化[J]. 地理学报, 2014, 69(7): 993–1001. [Zhang X, Wu Y H, Zhang X. Water level variation of inland lakes on the south-central Tibetan Plateau in 1972–2012[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(7): 993–1001.]
- [4] Li X Y, Xu H Y, Sun Y L, *et al.* Lake-level change and water balance analysis at Lake Qinghai, West China during recent decades [J]. *Water Resources Management*, 2007, 21(9): 1505–1516.
- [5] 王润, Giese Ernst, 高前兆. 近期博斯腾湖水位变化及其原因分析[J]. 冰川冻土, 2003, 25(1): 60–64. [Wang R, Giese E, Gao Q Z. The recent change of water level in the Bosten Lake and analysis of its causes[J]. *Sensing Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(1): 60–64.]
- [6] 王鹏, 赖格英, 黄小兰. 鄱阳湖水利枢纽工程对湖泊水位变化影响的模拟[J]. 湖泊科学, 2014, 26(1): 29–36. [Wang P, Lai G Y, Huang X L. Simulation of the impact of Lake Poyang Project on the dynamic of lake water level[J]. *Journal of Lake Science*, 2014, 26(1): 29–36]
- [7] Синюкович В Н, Сизова Л Н, Шимараев М Н, *et al.* Особенности современных изменений притока воды в озеро Байкал[J]. *География И Природные Ресурсы*, 2013, 4: 57–63.
- [8] Urabe A, Tateishi M, Inouchi Y, *et al.* Lake-level changes during the past 100, 000 years at Lake Baikal, southern Siberia[J]. *Quaternary Research*, 2004, 62(2): 214–222.
- [9] Dabaeva D B, Tsydypov B Z, Ayurzhanayev A A, *et al.* Peculiarities of Lake Baikal water level regime[J]. *Iop Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, 48(1): 1–10.
- [10] Malsy M, Flörke M, Borchardt D. What drives the water quality changes in the Selenga Basin: climate change or socio-economic development?[J]. *Regional Environmental Change*, 2017, (7): 1977–1981.
- [11] Minderlein S, Menzel L. Evapotranspiration and energy balance dynamics of a semi-arid mountainous steppe and shrubland site in Northern Mongolia[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 73(2): 1–17.
- [12] Karthe D, Malsy M, Kopp B J, *et al.* Assessing water availability and drivers in the context of an integrated water resources management (IWRM): a case study from the Kharaa river basin, Mongolia [J]. *Open-File Report*, 2013, 34(1–2): 5–26.
- [13] Priess J A, Schweitzer C, Wimmer F, *et al.* The consequences of land-use change and water demands in Central Mongolia[J]. *Land Use Policy*, 2011, 28(1): 4–10.
- [14] Выручалкина Т Ю. Байкал и Ангара до и после создания водохранилищ[J]. *Водные Ресурсы*, 2004, 31(5): 526–532.
- [15] Болгов М В, Бубер А J, Коробкина Е А, *et al.* Озеро байкал: Экстремальные уровни как редкое гидрологическое событие [J]. *Водные Ресурсы*, 2017, 44(3): 392–406.
- [16] Асламов И А, Козлов В В, Кириллин Г Б, *et al.* исследование теплового потока и структуры подледного слоя воды на границе со льдом в южном Байкале[J]. *Водные Ресурсы*, 2017, 44(3): 296–310.
- [17] Овчинникова Т Э, Бочаров О Б. Численное моделирование водообменных процессов в озере Байкал[J]. *Водные ресурсы*, 2017, 44(3): 322–331.
- [18] Törnqvist R, Jarsjö J, Pietroni J, *et al.* Evolution of the hydro-climate system in the Lake Baikal basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519(11): 1953–1962.
- [19] Морейдо В М, Калугин А С. Оценка возможных изменений водного режима реки Селенги в ххi в. На основе модели формирования стока[J]. *Водные Ресурсы*, 2017, 44(3): 275–

- 284.
- [20] Добровольский С. Г. Межгодовые и многолетние изменения речного стока в водосборном бассейне Байкала[J]. *Водные Ресурсы*, 2017, 44(3): 231–242.
- [21] Бережных Т. В., Марченко О. Ю., Абасов Н. В., *et al.* Изменение летней циркуляции атмосферы над Восточной Азией и формирование длительных маловодных периодов в бассейне реки Селенги[J]. *География И Природные Ресурсы*, 2012, 3: 61–68.
- [22] Синюкович В. Н., Чернышов М. С. О трансформации расчетных характеристик годового и максимального стока главных притоков оз. Байкал[J]. *Водные Ресурсы*, 2017, 44(3): 256–263.
- [23] 孔庆东, 谢春瑰. 俄罗斯东西伯利亚电力系统简介[J]. 华北电力技术, 1999, (7): 29–33. [Kong Q D, Xie C G. Brief introduction on East Siberia electric power system of Russia[J]. *North China Electric Power*, 1999, (7): 29–33.]
- [24] Фролов А. В., Выручалкина Т. Ю. Динамико-стохастическое моделирование многолетних колебаний уровня озера Байкал и стока реки Ангары[J]. *Водные Ресурсы*, 2017, 44(3): 264–274.
- [25] 李静, 岳建平, 梁子亮. Jason-2 卫星波形重定技术在研究贝加尔湖水位中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(2): 163–166. [Li J, Yue J P, Liang Z L. Application of Jason-2 waveform retracking method to investigation of water level of Lake Baikal[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2015, 43(2): 163–166.]
- [26] 杨小东, 施颢, 甄宗坤. 利用卫星测高监测贝加尔湖湖面高变化[J]. 现代测绘, 2014, 37(2): 62–64. [Yang X D, Shi H, Zhen Z K. Monitoring of water level variations of lake Baikal by altimetry[J]. *Modern Surveying and Mapping*, 2014, 37(2): 62–64.]
- [27] Бычков И. В., Никитин В. М. Регулирование уровня озера Байкал: Проблемы и возможные решения[J]. *География И Природные Ресурсы*, 2015, 36(3): 5–16.
- [28] Латышева И. В., Синюкович В. Н., Чумакова Е. В. Современные особенности гидрометеорологического режима южного побережья оз. Байкал[J]. *Изв. Иркут Ун-Та (Науки О Земле)*, 2009, 2(2): 117–133.
- [29] Шимараев М. Н., Куимова Л. Н., Синюкович В. Н., *et al.* О проявлении на Байкале глобальных изменений климата в XX столетии[J]. *Докл. РАН*, 2002, 383(3): 397–400.
- [30] Hampton S E, Izmet'Eva L R, Moore M V, *et al.* Sixty years of environmental change in the world's largest freshwater lake—Lake Baikal, Siberia[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(8): 1947–1958.
- [31] Magnuson J J, Robertson D M, Benson B J, *et al.* Historical trends in lake and river ice cover in the Northern Hemisphere[J]. *Science*, 2000, 289(5485): 1743–1746.
- [32] Moore M V, Hampton S E, Izmet'Eva L R, *et al.* Climate change and the world's "Sacred Sea"—Lake Baikal, Siberia[J]. *Bioscience*, 2009, 59(5): 405–417.
- [33] 董磊华, 熊立华, 于坤霞, 等. 气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 278–285. [Dong L H, Xiong L H, Yu K X, *et al.* Research advances in effects of climate change and human activities on hydrology[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(2): 278–285.]
- [34] Karthe D, Heldt S, Houdret A, *et al.* IWRM in a country under rapid transition: lessons learnt from the Kharaa River Basin, Mongolia [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(2): 681–695.
- [35] Сутырина Е. Н., Реакция Стока Р. Селенги на изменение интенсивности осадков и состояния водосборного бассейна [J]. *Изв. Иркут Ун-Та (Науки О Земле)*, 2015, 13: 120–130.
- [36] Karthe D, Chalov S, Moreido V, *et al.* Assessment of runoff, water and sediment quality in the Selenga River basin aided by a web-based geoservice[J]. *Water Resources*, 2017, 44(3): 399–416.
- [37] Batsukh N, Dorjsuren D, Batsaikan G. The Water Resources, Use and Conservation in Mongolia[R]. Ulaanbaatar: First National Report, 2008.
- [38] Атутов А. А., Пронин Н. М., Тулохонов А. К., *et al.* Гидроэнергетика И Состояние Экосистемы Озера Байкал [М]. Новосибирск: Издательство СО РАН, 1999.
- [39] Абасов Н. В., Болгов М. В., Никитин В. М., *et al.* О регулировании уроненного режима озера Байкал[J]. *Водные ресурсы*, 2017, 44(3): 407–416.

The variation of Lake Baikal water level and causal analysis since 1900

WANG Guan^{1,2}, WANG Ping¹, WANG Tianye^{1,2}, LI Zehong^{2,3}, YU Jingjie^{1,2},
LIU Changming¹, Bolgov M. V.^{4,5}

(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. Key Laboratory for Resource Use and Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

4. Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow 119333, Russia;

5. Department of Land Hydrology, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow 119911, Russia)

Abstract: Water level change is an important factor that influences the lake's environment, which is considered to be a dynamic reflection of its hydrological processes and water balance. Over the past 100 years, the water level in the Lake Baikal, the largest freshwater lake in the world, has exhibited a large annual, inter-annual, and multi-year variations under the dual stress of natural changes and human activities. The water level change of the Lake Baikal is highly associated with runoff variation into the lake, which is consistent with the runoff variation of the Selenga River, the largest tributary of the Lake Baikal. The increasing temperature and decreasing precipitation caused by climate warming reduced the inflow to the Lake Baikal, causing the decline in the lake's water level. The influence of human activities on the changes of water level in the Lake Baikal is manifested in two aspects. First, agricultural expansion under the global warming and associated increasing water consumption by irrigation has led to an increasing water consumption, reducing the surface water flow into the lake and declining the water level of the Lake Baikal. Second, water level change is affected by jacking of the Angara River after operating the Irkutsk Hydroelectric Power Station. Under the human control of the downstream hydropower station, the water level distribution asymmetry increases annually, the amplitude of water level fluctuation increases seasonally, and the date of annual minimum and the highest water level is delayed. The level change of the Lake Baikal, which is located in the sensitive region of global climate and environmental change, has a significant impact on the ecological environment of the lake and its surrounding area. Therefore, the research on the water level change in the Lake Baikal and its influencing factors has an important significance for protecting the local environment in the context of global change.

Key words: Lake Baikal; water level; climate change; Irkutsk Hydroelectric Power Station