

doi: 10.6046/zrzyg.2020404

引用格式: 赖佩玉, 黄静, 韩旭军, 等. 基于 GEE 的三峡蓄水对重庆地表水和植被影响研究[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(4): 227-234. (Lai P Y, Huang J, Han X J, et al. An analysis of impacts from water impoundment in Three Gorges Dam Project on surface water in Chongqing area base on Google Earth Engine[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(4): 227-234.)

基于 GEE 的三峡蓄水对重庆地表水和植被影响研究

赖佩玉, 黄静, 韩旭军, 马明国

(西南大学地理科学学院, 重庆金佛山喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 重庆 400715)

摘要: 研究三峡工程对周边生态环境的影响对维护生态安全具有重要意义。目前, 相关研究已经揭示了三峡大坝的建设与蓄水在气象、植被、土地利用以及灾害发生等方面的影响, 而地表水作为地球水资源的重要组成部分, 受三峡工程的影响程度还不清楚, 尤其是在长江上游。本研究利用多源数据在 GEE (Google Earth Engine) 平台上分析了重庆地区 1990—2019 年间常年地表水、植被以及气象要素在三峡蓄水前期 (1990—2002 年)、中期 (2003—2012 年) 和后期 (2013—2019 年) 3 个阶段的时空变化情况。结果表明: ①地表水和植被在 1990—2019 年都表现出增长的趋势, 且其不同的增长模式都表现出对三峡蓄水明显的响应, 而温度和降雨表现出持续的波动, 对蓄水过程无明显响应; ②常年地表水面积在蓄水过程中以 $18.32 \text{ km}^2/\text{a}$ 的速度增加, 而在蓄水前后变化不大, 新增的常年地表水主要分布在长江及其支流沿岸, 且集中在长江重庆段的中部, 少数的地表水面积增加出现在湖泊和水库, 如长寿湖在蓄水期间增加了超过其面积 20% 的水域; ③归一化植被指数在 3 个阶段表现为台阶式增长 (共增长 18.55%), 这一变化为地表水资源增加和生态修复工程的共同作用。本研究表明三峡蓄水对重庆地区水资源的时空动态有着较为显著的影响, 同时发现了水利工程改变地表覆盖及水资源分布的有效证据, 这为重庆地区乃至整个长江流域的水资源管理提供了科学依据。

关键词: 三峡蓄水; 常年地表水; Google Earth Engine; 长时间序列数据; 多源数据

中图分类号: TP 79; X 87 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2021)04-0227-08

0 引言

三峡工程是目前世界上最大的水利枢纽工程, 具有强大的防洪、发电和航运效益。三峡库区地处四川盆地与长江中下游平原的结合部, 属于气候敏感区和生态系统过渡区, 而其气候环境直接受三峡蓄水的影响。此外, 三峡水库于 2003 年首次蓄水, 至 2012 年工程竣工验收启动, 期间蓄水也直接影响着整个长江流域的水循环过程^[1]。因此, 研究三峡蓄水对周边气候和生态系统的影响对维护生态安全具有重要意义。

自动工以来, 三峡大坝带来的气候影响就备受学者关注。相当一部分学者分析了库区近几十年以来气象因子的时空变化特征以确定三峡建设和蓄水的影响。例如, 陈鲜艳等^[2]分析了库区气象站的气温, 发现三峡蓄水对库区冬季产生增温效应, 夏季有弱降温效应, 但总体以增温为主; 王圆圆等^[3]研究发现三峡库区年平均气温在 1997 年后明显上升,

但在 2003 年库区蓄水后无明显变化趋势。有关该地区降雨的研究还发现, 蓄水对整个库区的年降水量无明显影响^[4-5], 但库区连年阴雨频次有微弱的减少趋势^[6]。另一部分研究关注蓄水对库区生态环境带来的影响, 其中对植被的影响是研究热点, 相关研究发现自 21 世纪以来, 库区植被的绿色度和覆盖度都呈现增加的趋势^[7-9]; 蓄水过程中库区的蒸散发呈现增加趋势^[1]; 冬小麦的气候生产潜力增大^[10]等。对植被所受影响原因的探索发现, 大坝的修建、库区水位的上升以及剧烈的人为活动都有一定作用。同时, 也有相当一部分研究关注三峡土地利用的变化及其带来的影响。目前较为一致的观点认为, 在大坝建设时期 (2002 年以前), 库区土地覆盖以农田为主, 且有一定扩张趋势, 而在三峡蓄水阶段 (2003—2012 年), 建设用地和草地的比例大幅增加, 农田面积比例降低^[11-14]。此外, 三峡蓄水带来的灾害风险也在多个研究中被提及, 如李强等^[15]分析了 1980—2007 年三峡库区的洪涝特征, 发现年均

收稿日期: 2020-12-16; 修订日期: 2021-05-24

基金项目: 重庆市研究生科研创新项目“重庆市地表水变化及其在干旱中的应用研究” (编号: CYS20107) 资助。

第一作者: 赖佩玉 (1996-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境遥感。Email: peiyul@email.swu.edu.cn。

通信作者: 韩旭军 (1980-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为数据同化。Email: hanxujun@swu.edu.cn。

洪涝强度呈减弱趋势,但区域性洪涝较为频繁,以及三峡库区土壤侵蚀状况呈降低趋势^[16]等。从研究区范围来看,多数研究以三峡库区为研究区,而关注长江上下游的研究较少,这其中部分研究关注蓄水过程对长江中下游径流以及湖泊水量的影响,如三峡蓄水减少了洞庭湖上游 20.45% 的来水量,且枯水期提前^[17-18];蓄水同样使得汉江平原地下水位下降约 0.35 m 等^[19]。

三峡建设和蓄水影响着周边地区的生态水文,对生态系统的影响已经在气象、植被、土地利用以及灾害等多个方面被评估。而地表水作为地球水资源的重要组成部分,受三峡工程的影响程度还不清楚,也少有研究关注地表水在长江上游的变化。此外,上述研究常受限于长时间历史数据的获取,未能完全比较蓄水前后的动态变化。因此,本研究利用多源数据对比分析了 1990—2019 年蓄水前(1990—2002 年)、中(2003—2012 年)、后(2013—2019 年)3 个阶段地表水的变化情况,以明确三峡蓄水给重庆地区地表水带来的影响,为该地区乃至整个长江流域水资源管理提供科学依据。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

本研究以重庆市作为研究区,其地表覆盖情况如图 1 所示。重庆市位于四川盆地与长江中下游平原的过渡地带,地跨 E105°11′~110°11′,N28°10′~32°13′,为亚热带季风性湿润气候,年均降水量为 1 119.86 mm,年均气温为 17.02 ℃。

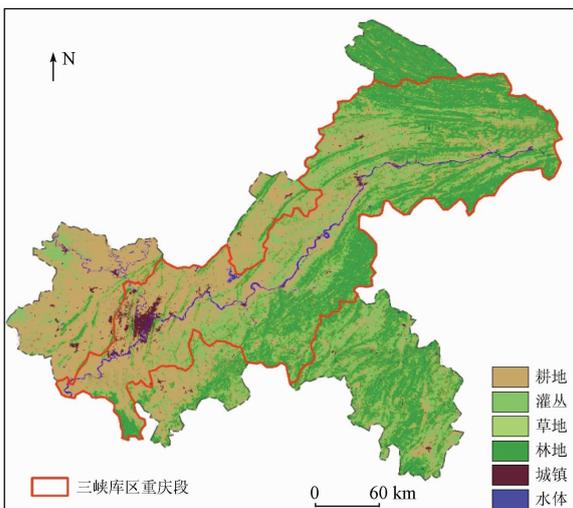


图 1 重庆地表覆盖(2015 年欧洲航天局 CCI 土地覆盖数据)及三峡库区位置示意图

Fig. 1 Land cover of Chongqing in 2015 (data from ESA CCI) and the location of Three Gorges Reservoir in Chongqing

1.2 数据源

本研究使用了包括遥感、气象站点观测以及模型模拟在内的多源数据,分析了三峡蓄水前中后 3 个时段内地表水、植被以及气象要素的变化情况,使用到的主要数据集如表 1 所示。其中,地表水和植被的数据处理及分析在地理云平台 GEE (Google Earth Engine) 上完成。GEE 是由 Google 提供的对大量全球尺度地球科学资料(尤其是卫星数据)进行在线分析的平台^[14],其高度集成的数据集和强大的计算能力为本研究提供了支撑。所有数据在时间尺度上统一到年。需要说明的是,高分辨率全球地表水时间序列数据集将水体分为季节性地表水和常年地表水,其定义取决于观测时段内地表水出现的频率,1 a 内所有观测时相均为水体的像是常年地表水,而有时为水体,有时无水的是季节性地表水。例如,一个湖泊在某一年中因为干旱而面积缩小,则湖面收缩后仍为水体的部分才是常年地表水。

表 1 本研究用到的数据集及其属性

Tab. 1 Summary of data used in this study and their attributes

要素	数据来源	空间分辨率	时间分辨率	数据发布者
常年地表水	高分辨率全球地表水时间序列数据集 V2 ^[20]	30 m	1 a	欧盟联合研究中心
归一化植被指数	先进型高分辨率辐射计 (AVHRR) NDVI 数据集 ^[21]	0.05°	1 d	NASA 戈达德太空飞行中心和马里兰大学
降雨	中国地面气候资料日值数据集 V3 ^[22]	12 个气象站	1 d	国家气象信息中心
气温	中国地面气候资料日值数据集 V3	12 个气象站	1 d	国家气象信息中心

2 研究方法

Mann - Kendall 检验方法是一种基于非参数秩的时间序列趋势估计方法^[23-24],是有效的时间序列变化检测工具。其原理及计算方法如下:首先,在时间序列为随机的假设下,定义统计量,即

$$UF_K = \frac{[S_K - E(S_K)]}{\sqrt{\text{Var}(S_K)}} \quad (K=1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

式中: $UF_1 = 0$; $E(S_K)$ 和 $\text{Var}(S_K)$ 分别为 S_K 的均值和方差,且 x_1, x_2, \dots, x_n 互相独立时,它们具有相同连续分布。可以由下式推算出,即

$$E(S_K) = \frac{n(n+1)}{n} \quad (2 \leq K \leq n), \quad (2)$$

$$Var(S_K) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (2 \leq K \leq n) \quad (3)$$

UF_k 为标准正态分布,它是按时间序列 X 的顺序 (x_1, x_2, \dots, x_n) 计算出的统计量序列,给定显著性水平 α ,查正态分布表,若 $UF_i > U_\alpha$,则表明序列存在明显的趋势变化。

再按时间序列 X 的逆序 $(x_n, x_{n-1}, \dots, x_1)$ 重复上述过程,并且令 $UB_K = UF_K (K = n, n-1, \dots, 1)$, $UB_1 = 0$ 。

一般情况取显著性水平 $\alpha = 0.05$,则临界值 $U_{0.05} = \pm 1.96$ 。将 UF_k 和 UB_k 这 2 个统计量序列曲线和 ± 1.96 这 2 条直线绘在一张图上。若 UF_k 和 UB_k 的值大于 0,则表明序列呈上升趋势,小于 0 则表明呈下降趋势。当它们超过临界直线时,表明上升或下降趋势显著,超过临界线的范围确定为出现突变的时间区域。如果 UF_k 和 UB_k 这 2 条曲线出现交叉,交点对应的时刻便是突变开始的时间。

3 结果与分析

3.1 三峡蓄水前后地表水动态变化

基于地表水数据集,本研究统计了 1990—2019 年近 30 a 来重庆市常年地表水的面积(permanent surface water area, PWA),其变化情况如图 2 所示。

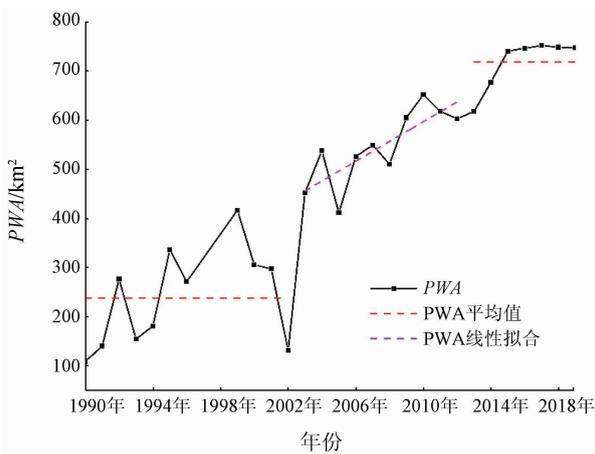


图 2 重庆市 1990—2019 年 PWA 时间序列
Fig. 2 Time series of PWA in Chongqing between 1990 and 2019

PWA 在该地区出现波动增加的趋势,其最大值为 2017 年的 752.22 km^2 ,最小值出为 1990 年的 109.04 km^2 ,平均值为 468.65 km^2 。从蓄水的分段过程来看,蓄水前(1990—2002 年) PWA 的年际波动较大,但增长趋势不明显,该阶段 PWA 平均值为 238.36 km^2 ; 三峡蓄水过程中(2003—2012 年),

PWA 呈现波动上升的趋势,大约以 $18.32 \text{ km}^2/\text{a}$ 的速度增加。而 2012 年以后,PWA 先表现为一个剧烈的增加,之后基本上保持在 750 km^2 这一较高水平。PWA 在该地区的变化主要表现为蓄水期间的大幅增加、蓄水前的较大波动和蓄水后的较小波动,这突出了三峡蓄水对重庆市地表水的影响。对 PWA 在该地区的时间序列做 Mann - Kendall 突变检验的结果如图 3 所示,可以看到,多数年份的 UF 和 UB 值都大于 0,表明 PWA 呈现上升趋势。1990—2002 年 UF 值一直在临界值上限波动,自 2003 年开始,超过上限临界值,表明 PWA 增加的趋势在 0.05 条件下显著。而 UF 和 UB 的交点出现在 2007—2008 年之间,这表明 PWA 增加的趋势于 2007 年发生了转折,出现了突变。

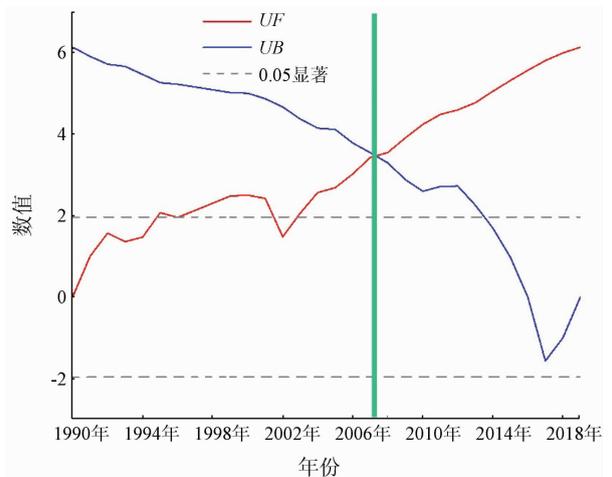


图 3 1990—2019 年 PWA 的 Mann - Kendall 检验结果
Fig. 3 Mann - Kendall test of PWA between 1990 and 2019

PWA 自 2003 年开始具有显著增加的趋势,其在 2003 年增加了 321.06 km^2 ,这一剧烈增加表现出了重庆地区地表水对三峡蓄水的响应,之后,随着蓄水高度的增加,PWA 波动上升。2007 年的突变也与蓄水状态有关,三峡大坝自 2003 年蓄水至 135 m 之后于 2006 年 9 月长江水位提高到 156 m,水位的提高可能导致了 2007 年的突变,这一滞后是因为常年地表水的观测是以年为尺度的。PWA 在 2003 年的显著增加、2007 年的突变以及蓄水过程中的增加趋势均说明了其动态变化深受三峡蓄水的影响。而 PWA 在 2002 年的下跌与地表水状态之间的转化有关,本研究使用到的地表水数据集将地表水分为季节性地表水和常年地表水,PWA 在 2002 年下跌的同时观测到季节性地表水面积(seasonal surface water area, SWA)在该地区的增加,而总的地表水面积在 2002 年呈现轻微的上升,并无明显波动(图 4),所以 PWA 在 2002 年的下跌是由于常年地表水向季节性地表水的转化。

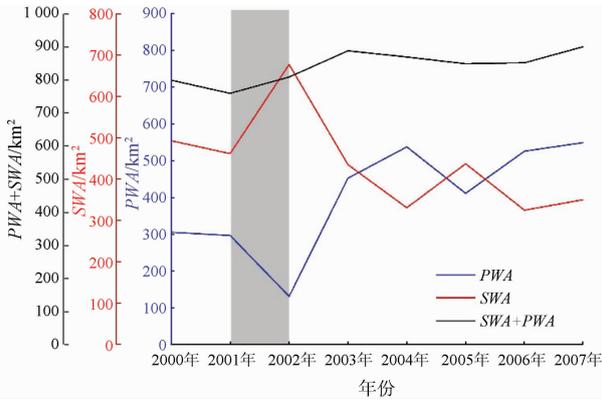


图4 2002年重庆市地表水状态转换情况
Fig. 4 Changes and transition of surface water in Chongqing in 2002

为明确新增常年地表水的空间分布,本研究进行了三峡蓄水前后2个年份(2002年和2013年)的PWA空间变化检测,结果如图5所示。

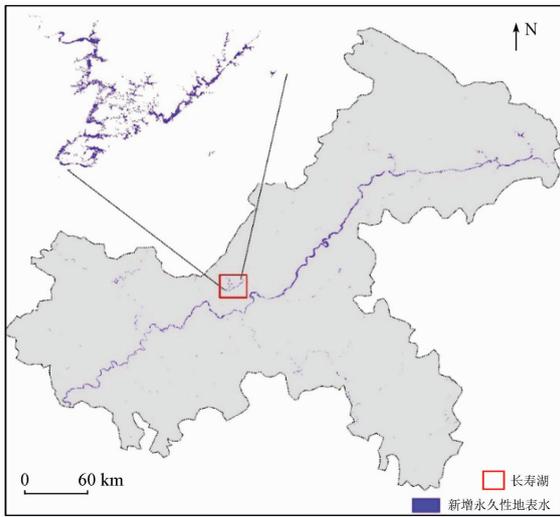


图5 重庆市2002—2013年新增常年地表水的空间分布
Fig. 5 New permanent surface water from 2002 to 2013 in Chongqing

从图5中可以看到,从2002—2013年,重庆市新增的常年地表水主要分布在河流沿岸,且以长江为主,小部分分布在其支流沿岸,也有部分水库有着较大面积的地表水增加,如位于长寿的狮子滩水库。狮子滩水电站建成于1957年,是我国第一个五年计划第一批水电站中最大的工程建设项目,以此形成的水面于1992年开发为旅游景区长寿湖,成为西南最大的人工湖。该湖泊在2002—2013年间增加了13.32 km²,占其总面积的20.3%。此外,值得注意的是,长江沿岸的常年地表水增加在其中段较为密集,而两边相对稀疏。河流以及湖泊在2002—2013年期间面积的增加反映了重庆市地表水对三峡蓄水的强烈响应。这也从另一方面见证了人类活动,尤其是水利工程对地表水总量和分布的巨大影响。

3.2 蓄水前后植被的动态变化

归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)已被证明对植被生长状态的监测极为有效^[25]。研究区内平均NDVI值在1990—2019年呈现波动上升的趋势(图6),其平均NDVI值为0.379,最大值出现在2018年的0.409,最小值为0.345,出现在1992年。NDVI值自1990—2019年共增长了18.55%。虽然NDVI和PWA的趋势在研究时段内类似,都对3个阶段有不同响应,但在3个阶段内的响应模式不同。在蓄水之前,重庆地区的NDVI值呈现波动上升的趋势,主要的波动出现在1992年和2000年左右的低谷。NDVI值在2002—2003年大幅度增加,在2003—2012年这一蓄水阶段基本保持在0.385左右。2013年蓄水恒定后,NDVI值也有一个较大幅度的抬升,之后的第三阶段保持在0.405左右的较高水平。总体来说,NDVI值呈现出3个平台期,在蓄水前有轻微的上升趋势,而在后2个阶段趋于稳定。

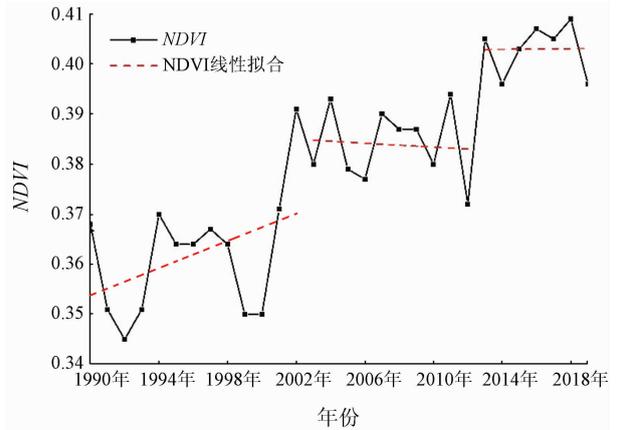


图6 重庆市1990—2019年NDVI时间序列
Fig. 6 Time series of NDVI in Chongqing between 1990 and 2019

空间上,NDVI值在1990—2019年的分布如图7所示,研究区西北部和东南部主要呈现NDVI值增加的趋势,其中在西北部增势最为明显,部分地区的增幅超过0.1。而研究区东北部和中部主要呈现NDVI值减少趋势,最大减少幅度达到0.08。已有研究表明该地区植被生长状态的改善受益于重庆地区实施的退耕还林还草工程^[26],该工程在重庆地区分为3个阶段执行,第一阶段开始于2000年,结束于2014年,第三阶段开始于2014年,第二阶段在这2阶段中交叉进行。这3个阶段的实施使得NDVI值在2000—2002年和2013—2014年呈现较大幅度的增加。在工程初期,低幼林生长较快,对NDVI贡献明显,随着林分的成熟,NDVI值趋于稳定^[27]。此外,针对该地区植被状态的改善,本研究还探索了

其与 PWA 之间的关系。结果表明,PWA 与 NDVI 在 1990—2019 年期间呈较高的相关性(图 8),其相关系数 $R = 0.93$ 。这表明 NDVI 的这种平台式变化可能受蓄水初期 PWA 增加带来的植被可利用水分增加影响,这促进了植被的生长,随着水分增长,其对植被生长的影响达到饱和,进而呈现平台期。

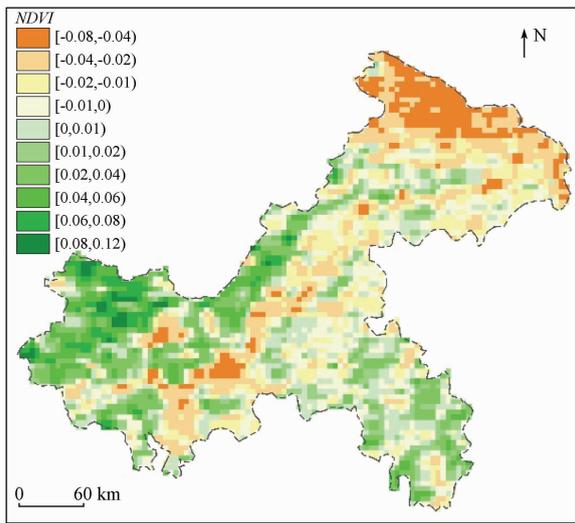


图 7 重庆市 1999—2019 年 NDVI 空间变化分布
Fig. 7 Spatial distribution of NDVI changes in Chongqing from 1999 to 2019

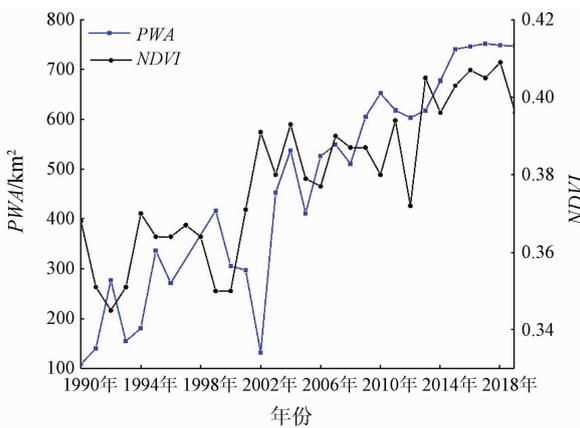


图 8 重庆市 NDVI 与 PWA 的相关关系
Fig. 8 Correlation between NDVI and PWA in Chongqing

3.3 蓄水前后气温和降雨动态变化

重庆市的气温在 1990—2019 年呈现较大幅度波动(图 9)。其平均气温为 $17.02\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大值为 2004 年的 $18.00\text{ }^{\circ}\text{C}$,最小值为 2017 年的 $15.89\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。气温的变化并没有体现大坝蓄水的影响,这可能是因为蓄水对周边环境气候调节是有限的,一般来说这个范围在大坝周围 20 km 左右^[5]。降雨同样呈现剧烈波动(图 10),其平均值为 1119.86 mm ,最大值为 2004 年的 1479.55 mm ,最小值为 2012 年的 864.28 mm 。降雨的变化同样没有反映三峡蓄水的

影响。总的来说,气象因子在该地区的变化都呈现较大幅度波动,而对蓄水过程并无明显响应,这与已有研究结论一致^[3-5]。

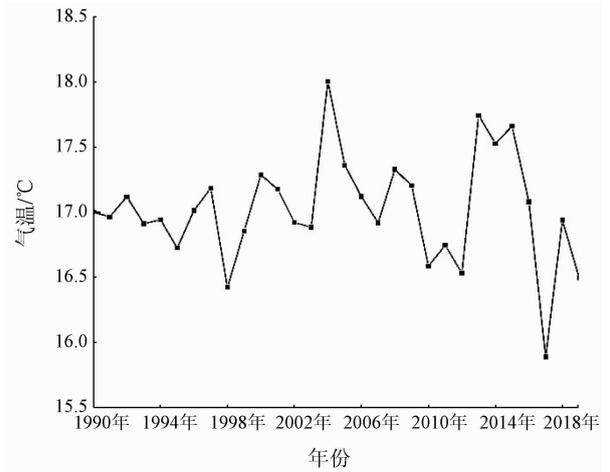


图 9 重庆市 1990—2019 气温时间序列
Fig. 9 Time series of air temperature in Chongqing between 1990 to 2019

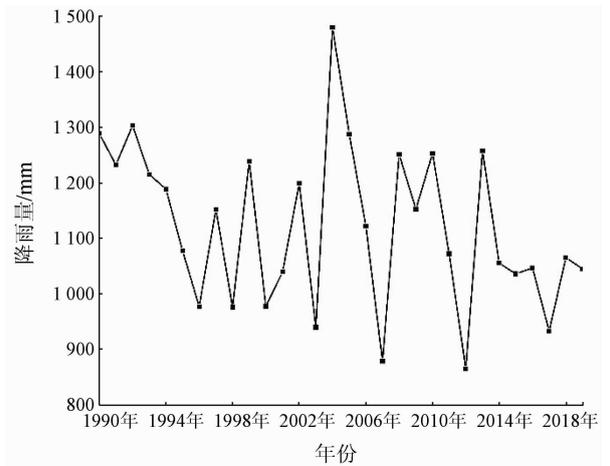


图 10 重庆市 1990—2019 年降雨量时间序列
Fig. 10 Time series of precipitation in Chongqing between 1990 and 2019

总之,重庆市地表水及其相关变量在三峡蓄水前中后 3 个阶段中表现出不同的动态变化,其中地表水和植被都表现出 3 个阶段性的响应。PWA 在蓄水期间的增加以及蓄水前后的相对稳定说明了三峡蓄水对重庆市地表水资源的增加有一定贡献。NDVI 的变化受 PWA 增加和该地区退耕还林还草等生态工程的共同影响,表现为蓄水前的小幅度增加以及蓄水中后期的台阶式增加。而气温和降雨都在该地区表现出持续的波动,没有对三峡蓄水过程产生明显响应。

4 结论

本研究利用长时间序列的多源数据,分析了重

庆市地表水、植被及相关气象变量在三峡蓄水前(1990—2002年)、中(2003—2012年)后(2013—2019年)3个阶段的变化。结果表明:

1) 地表水、植被以及气象要素在 1990—2019 年都表现出增长的趋势,但其增长模式不同。常年地表水和植被都在蓄水过程中表现出和蓄水前后不同的变化模式,体现了三峡蓄水带来的影响,而温度和降雨对蓄水过程无明显响应,表现出持续的波动。

2) 常年地表水面积在蓄水过程中以 18.32 km²/a 的速度增加,而在蓄水前后无明显趋势,新增的常年地表水主要分布在长江及其支流沿岸,且集中在长江重庆段的中部,少数的地表水面积增加出现在湖泊和水库等水域,如长寿湖在蓄水期间增加了超过其面积的 20.3%。

3) NDVI 在 3 个阶段表现为台阶式增长(共增长 18.55%),这一变化为地表水资源增加和生态修复工程的共同作用。

参考文献(References):

[1] 何军,张伟,李家明,等.三峡工程建成蓄水对库区参考作物蒸发蒸腾量的影响研究[J].中国农村水利水电,2020(8):122-125.
He J,Zhang W,Li J M,et al. Research on the influence of Three Gorges Project construction on reference crop evapotranspiration ET₀ in reservoir areas[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(8):122-125.

[2] 陈鲜艳,张强,叶殿秀,等.三峡库区局地气候变化[J].长江流域资源与环境,2009,18(1):47-51.
Chen X Y,Zhang Q,Ye D X,et al. Regional climate change over Three Gorges Reservoir area[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2009,18(1):47-51.

[3] 王圆圆,李贵才,郭微,等.1979年—2014年三峡库区月平均气温的时空变化分析[J].遥感学报,2018,22(3):487-496.
Wang Y Y,Li G C,Guo H,et al. Spatial-temporal analysis of monthly air temperature changes from 1979—2014 in the Three Gorges Dam region[J]. Journal of Remote Sensing,2018,22(3):487-496.

[4] 李博,唐世浩.基于TRMM卫星资料分析三峡蓄水前后的局地降水变化[J].长江流域资源与环境,2014,23(5):617-625.
Li B,Tang S H. Local precipitation changes induced by the Three Gorges Reservoir based on TRMM observations[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2014,23(5):617-625.

[5] 陈鲜艳,宋连春,郭占峰,等.长江三峡库区和上游气候变化特点及其影响[J].长江流域资源与环境,2013,22(11):1466-1471.
Chen X Y,Song L C,Guo Z F,et al. Climate change over the Three Gorge Reservoir and upper Yangtze with its possible effect[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2013,22(11):1466-1471.

[6] 邹旭恺,张强,叶殿秀.长江三峡库区连阴雨的气候特征分析

[J].灾害学,2005,20(1):84-89.
Zou X K,Zhang Q,Ye D X. An analysis on the climatic characteristics of consecutive rainfall in the Three Gorges area[J]. Journal of Catastrophology,2005,20(1):84-89.

[7] 李建国,濮杰杰,刘金萍,等.2001年至2010年三峡库区重庆段植被活动时空特征及其影响因素[J].资源科学,2012,34(8):1500-1507.
Li J G,Pu L J,Liu J P,et al. The temporal and spatial characteristics of vegetation activity in Three Gorges Reservoir area (Chongqing) from 2001 to 2010 and its influencing factors[J]. Resources Science,2012,34(8):1500-1507.

[8] 马骏,马朋,李昌晓,等.2000—2011年三峡库区重庆段植被覆盖景观格局变化[J].西南大学学报(自然科学版),2014,36(12):141-147.
Ma J,Ma P,Li C X,et al. Changes in landscape patterns of vegetation coverage in chongqing section of the Three Gorges Reservoir region from 2000 to 2011[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition),2014,36(12):141-147.

[9] 张兰,沈敬伟,刘晓璐,等.2001—2016年三峡库区植被变化及其气候驱动因子分析[J].地理与地理信息科学,2019,35(2):38-46.
Zhang L,Shen J W,Liu X L,et al. Vegetation changes in the Three Gorges Reservoir area from 2001 to 2016 and the analysis of its climate driving factors[J]. Geography and Geo-Information Science,2019,35(2):38-46.

[10] 钟海玲,高荣,杨霞.三峡库区蓄水后气候特征及其对生产潜力的影响[J].安徽农业科学,2010,38(12):6353-6355.
Zhong H L,Gao R,Yang X. Climate characteristics in Three Gorges Reservoir area after water storage and its impact on the production potential[J]. Meteorological and Environmental Research, 2010,38(12):6353-6355.

[11] 曹银贵,王静,刘正军,等.三峡库区近30年土地利用时空变化特征分析[J].测绘科学,2007,32(6):167-170.
Cao Y G,Wang J,Liu Z J,et al. Analyses on temporal-spatial traits of land use in three gorges during 30 years[J]. Science of Surveying and Mapping,2007,32(6):167-170.

[12] 滕明君,曾立雄,肖文发,等.长江三峡库区生态环境变化遥感研究进展[J].应用生态学报,2014,25(12):3683-3693.
Teng M J,Zeng L X,Xiao W F,et al. Research progress on remote sensing of ecological and environmental changes in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014,25(12):3683-3693.

[13] 张磊,董立新,吴炳方,等.三峡水库建设前后库区10年土地覆盖变化[J].长江流域资源与环境,2007,16(1):107-112.
Zhang L,Dong L X,Wu B F,et al. Land cover change before and after the construction of three gorges reservoir within 10 years[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2007,16(1):107-112.

[14] 郝斌飞,杨洪,马明国,等.基于Google Earth Engine的三峡库区土地利用与陆表参数变化研究[J].长江流域资源与环境,2020,29(6):1343-1355.
Hao B F,Yang H,Ma M G,et al. Variation in land use and land surface parameters in the Three Gorges Reservoir catchment based on Google Earth Engine[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2020,29(6):1343-1355.

- [15] 李强,李永华,王中,等. 近30年三峡库区洪涝特征及建库前后致涝气候因子的差异[J]. 热带气象学报,2010,26(6): 750-758.
Li Q, Li Y H, Wang Z, et al. The flood features of the three gorges reservoir region for the past 30 years and the difference of flood-causing climatic factors before and after the construction of the reservoir[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2010, 26(6): 750-758.
- [16] 范建容,刘飞,郭芬芬,等. 基于遥感技术的三峡库区土壤侵蚀量评估及影响因子分析[J]. 山地学报,2011,29(3):306-311.
Fan J R, Liu F, Guo F F, et al. Soil erosion assessment and cause analysis in Three Gorges Reservoir area based on remote sensing[J]. Mountain Research, 2011, 29(3): 306-311.
- [17] 贺秋华,余德清,余姝辰,等. 三峡水库运行前后洞庭湖水资源量变化[J]. 地球科学,2021,46(1):293-307.
He Q H, Yu D Q, Yu S C, et al. Changes of water resources amount in Dongting Lake before and after the operation of the Three Gorges Reservoir[J]. Earth Science, 2021, 46(1): 293-307.
- [18] 黄维,王为东. 三峡工程运行后对洞庭湖湿地的影响[J]. 生态学报,2016,36(20):6345-6352.
Huang W, Wang W D. Effects of Three Gorges Dam Project on Dongting Lake wetlands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(20): 6345-6352.
- [19] 黄浩,黄雷,鲁朝林. 三峡工程对下游地下水动态的影响[J]. 科学技术创新,2020(8):143-145.
Huang H, Huang L, Lu C L. The influence of the Three Gorges Dam Project on the groundwater dynamics in downstream area[J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(8): 143-145.
- [20] Pekel J-F, Cottam A, Gorelick N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes[J]. Nature, 2016, 540(7633): 418-422.
- [21] Vermote C, Csiszar I, Eidenshink J, et al. NOAA climate data record (CDR) of normalized difference vegetation index (NDVI), Version 4[DB]. 2014.
- [22] 中国气象局气象数据中心. 中国地面气候资料日值数据集[DB]. http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0.html.
Meteorological Data Center of China Meteorological Administration. Dataset of daily surface climatological data in China[DB]. http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0.html.
- [23] Douglas E M, Vogel R M, Kroll C N. Trends in floods and low flows in the United States: Impact of spatial correlation[J]. Journal of Hydrology, 2000, 240(1-2): 90-105.
- [24] Guo M, Li J, He H, et al. Detecting global vegetation changes using Mann-Kendall (MK) trend test for 1982-2015 time period[J]. Chinese Geographical Science, 2018, 28(6): 907-919.
- [25] Aghakouchak A, Farahmand A, Melton F S, et al. Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities[J]. Reviews of Geophysics, 2015, 53(2): 452-480.
- [26] 王翔. “退”出一片绿水青山——写在重庆实施退耕还林20周年之际[EB/OL]. 重庆日报, (2019-08-21)[2021-04-26]. <https://epaper.cqrb.cn/html/cqrb/2020-01/22/001/node.htm>.
Wang X. “Retreat” out of the green mountains; Written on the 20th anniversary of Chongqing’s conversion of farmland to forests[EB/OL]. Journal of Chongqing, (2019-08-21)[2021-04-26]. <https://epaper.cqrb.cn/html/cqrb/2020-01/22/001/node.htm>.
- [27] 吴昌广. 气候变化背景下三峡库区植被覆盖动态及其土壤侵蚀风险研究[D]. 武汉:华中农业大学,2011.
Wu C G. Assessment of vegetation cover dynamic and soil erosion risk in Three Gorges Reservoir area under the background of climate change[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011.

An analysis of impacts from water impoundment in Three Gorges Dam Project on surface water in Chongqing area base on Google Earth Engine

LAI Peiyu, HUANG Jing, HAN Xujun, MA Mingguo

(Chongqing Jinpo Mountain Karst Ecosystem National Observation and Research Station, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: It is significant for maintaining ecological security to study the impacts of the Three Gorges Dam Project on the surrounding ecological environment. At present, massive studies have revealed the impacts from the construction and water impoundment of the Three Gorges Dam on meteorology, vegetation, land use, and the occurrence of disasters. However, the impacts of the project on surface water – an important part of the Earth’s water resources – are still unclear, especially in the upper reaches of the Yangtze River. Based on multi-source data and the Google Earth Engine platform, this study analyzes the changes in permanent surface water, vegetation, and meteorological factors in the Chongqing area before (1990–2002), during (2003–2012) and after (2013–2019) the water impoundment of Three Gorges Dam Project. The results show: ① Both surface water and vegetation in the study area showed an increasing trend during 1990–2019 with different growth patterns and notably response to the water impoundment. In contrast, the temperature and precipitation continuously fluctuated

but did not significantly respond to the water impoundment process during that period. ② The area of the permanent surface water in the study area increased at an annual rate of 18.32 km^2 during the water impoundment but did not greatly change before and after the water impoundment. The newly added permanent surface water was mainly distributed along the Yangtze River and its tributaries, especially in the middle part of the Chongqing section of the Yangtze River. Besides, a minority of it was distributed in some lakes and reservoirs. For example, the area of the Changshou lake increased by more than 20% during the water impoundment. ③ The normalized difference vegetation index (NDVI) increased by 18.55% in a stepwise way before, during, and after the water impoundment, which is attributable to joint effects of the increase in surface water and the restoration projects of degraded ecosystem. This study indicates that the water impoundment of the Three Gorges Dam Project has notable impacts on the spatial – temporal dynamics of the water resources in the Chongqing area. Meanwhile, it reveals effective evidence that the water conservancy projects can change the coverage and water resource distribution on the ground surface. All these will provide scientific basis for water resource management in the Chongqing area and even the whole Yangtze River Basin.

Keywords: water impoundment of Three Gorges Dam Project; permanent surface water; Google Earth Engine; Long time series data; multi – source data

(责任编辑: 陈 理)