

# 小浪底水利枢纽对周边局地气候的影响分析

尚文绣, 许明一, 严登明

(黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

**摘要:** 为了科学量化水库对周边局地气候的影响,提出了一种水库影响定量分析方法。以小浪底水利枢纽为例,基于建库前实测数据建立水库周边站点与参照站点气候指标的相关关系,预测评价时段无水库情景下的模拟气候指标,与评价时段实测气候指标进行对比,量化水库对周边局地气候的影响。结果显示:2000-2019年,小浪底水利枢纽在年际和年内均发挥了降低气温、增加相对湿度的作用,使水库周边年均气温降低 $0.46\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、年均相对湿度增加 $3.78\%$ ;小浪底水利枢纽的气候调节作用减弱了区域干旱化的趋势,与1980-1999年相比,2000-2019年水库周边站点的气温增幅比参照站点小 $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度降幅比参照站点小 $4.29\%$ 。提出的水库影响定量分析方法排除了区域气候变化对水库周边局地气候变化的影响,提高了分析结果的科学性与准确性。

**关键词:** 水库影响定量分析方法; 局地气候; 气温; 相对湿度; 小浪底水利枢纽

中图分类号:TV61

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2022)03-0027-06

## Impact of the Xiaolangdi Water Conservancy Complex on local climate in surrounding area

SHANG Wenxiu, XU Mingyi, YAN Dengming

(Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** In order to accurately quantify the impact of the reservoir on the surrounding local climate, a quantitative analysis method of reservoir impact is proposed. Taking the Xiaolangdi Water Conservancy Complex as an example, based on the measured data before the construction of the reservoir, the correlation between climatic indicators of the surrounding stations and the reference stations was established to predict simulated climatic indicators under the scenario of no reservoir in the evaluation period, which were then compared with the measured climatic indicators to quantify the impact of the reservoir on the surrounding local climate. The results show that the Xiaolangdi Water Conservancy Complex played an important role in lowering temperature and increasing relative humidity annually and interannually during 2000-2019, which lowered the annual average temperature by  $0.46\text{ }^{\circ}\text{C}$  and increased the annual average relative humidity by  $3.78\%$ ; the climate regulation effect of the Xiaolangdi Water Conservancy Complex weakened the impact of regional aridity, compared with 1980-1999, the increase of temperature in surrounding meteorological stations was  $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}$  smaller than those in the reference stations and the decrease of relative humidity was  $4.29\%$  smaller during 2000-2019. The proposed quantitative analysis method of reservoir impact eliminates the impact of regional climate change on local climate change around the reservoir, and improves the accuracy of the analysis results.

**Key words:** quantitative analysis method of reservoir impact; local climate; temperature; relative humidity; the Xiaolangdi Water Conservancy Complex

收稿日期:2021-08-23; 修回日期:2022-01-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200203); 河南省重大科技专项项目(201300311400)

作者简介:尚文绣(1990-),女,山东曹县人,博士,高级工程师,主要研究方向为水文水资源。

通讯作者:严登明(1989-),男,安徽安庆人,博士,工程师,主要研究方向为水文水资源。

## 1 研究背景

水库的建设运行是河流开发的重要方式<sup>[1-2]</sup>,其提供了全球30%~40%的农业灌溉用水,并生产了近17%的电力<sup>[3-4]</sup>。在为人类带来巨大经济和社会利益的同时,水库工程导致生态要素重新分配,对河流和相关地区的生态环境产生了不同程度的影响<sup>[5-7]</sup>。水库蓄水后库区水位上升并形成大面积水体,改变了区域水文循环、物质传输、生物资源分布等<sup>[8-9]</sup>,导致水库周边成为受影响最显著的区域。

水库蓄水后可能导致周边10~20 km以内的气温、湿度、风速等气候要素发生变化<sup>[10-11]</sup>。当前,关于水库对局地气候影响的研究方式包括实测数据统计分析和数值模拟两种,前者主要用于运行多年的已建水库,后者可用于预测规划水库或已建水库扩容的气候影响<sup>[11-13]</sup>。采用实测气候数据时,相关研究一般通过对比水库蓄水前后局地气候的变化来反映水库发挥的作用<sup>[14-16]</sup>。受土地利用变化、人类活动等因素的影响,全球气候发生了剧烈变化<sup>[17-19]</sup>,近60年我国陆地表面气温上升率为 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ <sup>[20]</sup>,北方地区干旱趋势加剧<sup>[21-22]</sup>。因此水库蓄水并非是导致水库周边地区气候变化的唯一因素,例如,研究显示在三峡库区(重庆段)周边城镇化发展对气候的影响程度大于水库蓄水的影响<sup>[23]</sup>,然而仅对比水库蓄水前后局地气候的变化无法将水库发挥的作用从多因素复合作用中分离出来,如何量化水库单一要素对局地气候的影响是该领域研究的难点。

为了科学量化水库对周边局地气候的影响,本文提出了基于情景对比的水库影响定量分析方法,以小浪底水利枢纽为例,量化了小浪底水利枢纽建设运行对周边气温和相对湿度的影响。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 研究区域概况

以小浪底水利枢纽为例开展分析。小浪底水利枢纽临近黄河中游与下游的分界处,坝址以上流域面积为 $69.42 \times 10^4\text{ km}^2$ ,该工程于1999年底投入运行。枢纽正常蓄水位275 m相应库容为 $126.5 \times 10^8\text{ m}^3$ ,水面面积为 $279.6\text{ km}^2$ 。研究区域示意图见图1。

### 2.2 水库影响定量分析方法与数据来源

水库周边局地气候受到水库运行、下垫面变化、人类活动等多因素复合影响,本文提出基于情景对比的水库影响定量分析方法,将水库发挥的作用从多因素复合作用中分离出来。评价时段为小浪底水

利枢纽运行后的2000-2019年,情景1代表了有小浪底水利枢纽时该时段水库周边实测气候状态;情景2代表了如果没有小浪底水利枢纽,评价时段内水库周边气候的模拟状态,两种情景设置见表1。与情景1对比,情景2仅改变了小浪底水利枢纽这一个影响因素,其他自然与人类活动影响因素均与情景1保持一致。

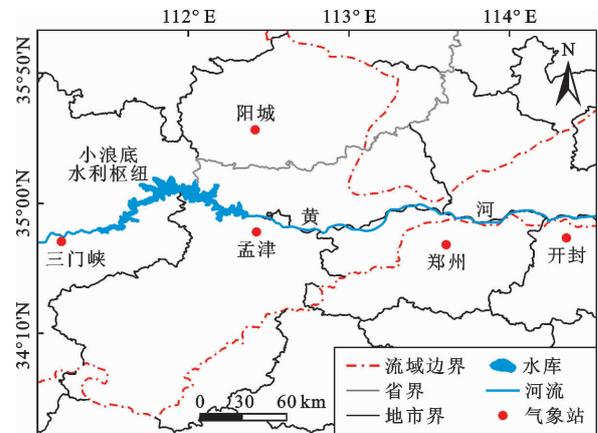


图1 研究区域示意图

表1 小浪底水库对周边气候状态影响研究的情景设置

情景分类	工程条件	评价时段	气候数据类型
情景1	有小浪底水利枢纽	2000-2019年	实测月、年数据
情景2	无小浪底水利枢纽	2000-2019年	模拟月、年数据

两种情景下的水库周边气候状态的表达式为:

$$F_A = \{f_{A,1}, f_{A,2}, \dots, f_{A,n}\} \quad (1)$$

$$F_S = \{f_{S,1}, f_{S,2}, \dots, f_{S,n}\} \quad (2)$$

式中: $F_A$ 和 $F_S$ 分别为情景1和情景2对应的小浪底水利枢纽下游的气候状态; $f_{A,i}$ 和 $f_{S,i}$ 分别为情景1和情景2第*i*个气候指标, $i = 1 \sim n$ 。

小浪底水利枢纽对水库周边气候状态的影响*E*表示为:

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\} \quad (3)$$

$$e_i = f_{A,i} - f_{S,i} \quad (4)$$

式中: $e_i$ 为小浪底水利枢纽对第*i*个气候指标的影响。

水库蓄水后形成大面积水面,对气温和空气湿度有较明显的影响。选取平均气温和平均相对湿度两个指标反映水库对局地气候的影响,在时间尺度上分为年尺度和月尺度,数据来源为国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>)。

### 2.3 无水库情景模拟方法

采用相关分析法模拟评价时段内如果没有修建小浪底水库情况下的水库周边气候状态,步骤为:

(1)选择小浪底水利枢纽气候影响范围内的周边站点和影响范围外的参照站点;(2)利用小浪底水利枢纽修建前(1960-1989年)的历史实测气候数据建立无水库情况下参照站点与周边站点各项气候指标的相关关系;(3)假设如果没有修建小浪底水利枢纽,则2000-2019年参照站点与周边站点各项气候指标之间仍保持1960-1989年的相关关系,即可通过2000-2019年参照站点实测气候指标和1960-1989年的相关关系得到情景2下周边站点的气候指标。

相关研究显示,大型水库对局地气候的影响范围可以达到近20 km<sup>[10]</sup>,因此选择距离库区20 km以内的孟津和三门峡2个气象站反映小浪底水利枢纽工程周边气候;选择距离库区50 km以外的阳城、郑州和开封3个气象站作为参照站点,反映水库所在区域的整体气候状态(表2)。所选参照站点均位于水库气候影响范围以外,且在小浪底水利枢纽修建前,参照站点的气温及相对湿度与周边站点具有一致的变化趋势。

表2 小浪底水库周边及参照气象站选择

分类	名称	纬度	经度	距离库区/km
周边站点	三门峡	34°48'N	111°12'E	14
	孟津	34°49'N	112°26'E	12
	阳城	35°29'N	112°24'E	55
参照站点	郑州	34°43'N	113°39'E	120
	开封	34°47'N	114°18'E	180

1960-1989年参照站点与周边站点各项气候指标的相关关系式为:

$$f_{s,i} = a_i f_{c,i} + b_i \quad (5)$$

式中: $f_{c,i}$ 为3个参照站点第*i*个气候指标的平均值; $a_i$ 为第*i*个气候指标的拟合公式的回归系数; $b_i$ 为第*i*个气候指标的拟合公式的截距。

采用*t*检验判断关系式(5)参照站点与周边站点各项气候指标之间是否存在显著线性关系。计算检验统计量*t*,给定显著性水平 $\alpha = 0.01$ ,如果 $t > t_{\alpha/2}(m-2)$ ,表明自变量和因变量之间存在显著的线性关系, $m$ 为样本数量。如果关系式(5)通过显著性检验,则说明该公式可以有效反映小浪底水利枢纽建设前参照站点和周边站点各项气候指标之间的相关关系,再将2000-2019年参照站点实测气候指标值代入关系式(5),即可得到情景2下周边站点气候指标值。

### 3 结果与分析

#### 3.1 参照站点与周边站点气候指标拟合效果

为了得到情景2的气候指标,首先需要建立小浪底水利枢纽修建前(1960-1989年)参照站点与周边站点各项气候指标的相关关系。1960-1989年水库周边站点气候指标与参照站点气候指标间的线性拟合结果如表3所示。由表3可见,全年及各月份尺度下拟合公式的相关系数均不小于0.90,且均通过了 $\alpha = 0.01$ 显著性检验,说明两者具有较好的相关关系,可用表3中的拟合公式计算情景2的气候指标。

表3 1960-1989年水库周边站点气候指标与参照站点气候指标线性拟合结果

时段	平均气温			平均相对湿度		
	$a_i$	$b_i/^\circ\text{C}$	相关系数	$a_i$	$b_i/\%$	相关系数
全年	1.05	-0.19	0.95	0.98	-1.65	0.95
1月	1.01	0.67	0.96	0.94	-1.55	0.97
2月	1.09	0.61	0.99	1.11	-10.14	0.98
3月	1.10	0.01	0.97	1.07	-6.79	0.97
4月	1.04	-0.20	0.98	0.97	0.64	0.95
5月	1.02	-0.11	0.98	0.96	0.36	0.98
6月	1.12	-2.43	0.96	1.09	-9.10	0.96
7月	1.12	-2.87	0.94	1.31	-27.21	0.90
8月	1.18	-4.10	0.93	1.29	-26.94	0.90
9月	1.12	-2.07	0.91	1.09	-9.25	0.92
10月	1.08	-0.64	0.96	1.14	-12.95	0.96
11月	1.05	0.10	0.98	1.02	-3.33	0.96
12月	0.95	0.56	0.96	0.92	0.04	0.97

#### 3.2 水库对周边年际气候变化的影响

2000-2019年两种情景下水库周边年均气温及年均相对湿度变化曲线如图2所示。由图2(a)可见,2000-2019年,情景1水库周边每年的平均气温均低于情景2,小浪底水利枢纽使水库周边气温每年降低0.09~0.92℃,每年平均降低0.46℃。近年来,小浪底水利枢纽在降低水库周边气温方面发挥的作用逐渐增强,2000-2009年小浪底水利枢纽使水库周边气温年均降低0.26℃,2010-2019年小浪底水利枢纽使水库周边气温年均降低0.63℃。由图2(b)可见,2000-2019年期间除2000年外,情景1水库周边每年的平均相对湿度均高于情景2,小浪底水利枢纽使水库周边相对湿度每年增

大0.80%~7.03%，每年平均增大3.78%。近年来小浪底水利枢纽在增大水库周边平均相对湿度方面发挥的作用逐渐增强。2000-2009年小浪底水利

枢纽使水库周边相对湿度年均增加2.88%，2010-2019年小浪底水利枢纽使水库周边相对湿度年均增加4.44%。

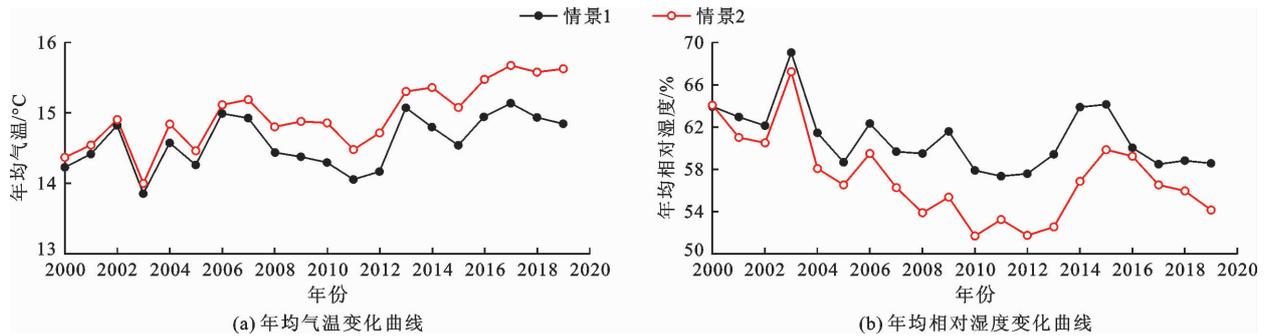


图2 2000-2019年两种情景下小浪底水库周边年际气候变化曲线

### 3.3 水库对周边年内气候变化的影响

2000-2019年两种情景下小浪底水库周边年内月均气候指标如表4所示。

表4 2000-2019年两种情景下小浪底水库周边月均气温和月均相对湿度变化

月份	月均气温/°C			月均相对湿度/%		
	情景1	情景2	差值	情景1	情景2	差值
1	0.20	0.47	-0.27	53.92	50.12	3.79
2	3.74	4.25	-0.51	55.58	51.31	4.26
3	10.05	10.62	-0.57	49.13	46.20	2.93
4	16.15	16.33	-0.18	53.12	52.63	0.49
5	21.36	21.76	-0.40	56.24	53.79	2.44
6	25.66	26.24	-0.57	58.39	54.15	4.23
7	26.78	27.16	-0.38	72.95	67.89	5.06
8	25.30	25.82	-0.53	74.59	68.71	5.87
9	20.56	21.09	-0.53	73.48	68.78	4.70
10	15.14	15.82	-0.68	67.48	60.43	7.06
11	8.07	8.43	-0.36	62.92	58.73	4.19
12	2.00	2.31	-0.31	54.09	49.94	4.15

由表4可以看出,2000-2019年情景1每月的平均气温均低于情景2,说明小浪底水利枢纽在年内始终发挥着降低水库周边气温的作用。与情景2相比,汛期(7-10月)情景1水库周边平均气温降低了0.53℃,非汛期(11-次年6月)平均气温降低了0.40℃。2000-2019年情景1每月的平均相对湿度均高于情景2,说明小浪底水利枢纽在年内始终发挥着增加水库周边相对湿度的作用。与情景2相比,情景1水库周边汛期平均相对湿度增大了5.67%,非汛期平均相对湿度增大了3.31%。虽然

汛期小浪底水库需进行防洪调度运行,库水位较低、水面面积较小,但汛期气温较高,水面蒸散发更加强烈,导致小浪底水利枢纽在汛期对周边气候的影响更大。

## 4 讨论

### 4.1 区域气候变化趋势及对水库周边气候的影响

小浪底水利枢纽周边气候的变化受到水库运行和更大空间尺度上的区域气候变化的共同影响。枢纽库区临近黄河中游和下游交界处,相关研究显示黄河中游和下游地区呈现出明显的增温趋势和较高的干旱化程度<sup>[24-25]</sup>。对比小浪底水利枢纽运行前、后两个时段(1980-1999年和2000-2019年)的参照站点和周边站点实测气候变化量,进一步分析在区域气候变化的背景下小浪底水利枢纽对周边气候的影响。

2000-2019年小浪底水利枢纽周边站点及参照站点的年内实测平均气候指标相对于1980-1999年的变化量如图3所示。

图3显示,区域气候表现出气温升高、相对湿度降低的变化趋势。与1980-1999年相比,2000-2019年参照站点全年平均气温升高了1.04℃、全年平均相对湿度降低了5.75%。参照站点各月的气温增幅均高于水库周边站点,汛期尤为显著,汛期参照站点气温增幅比水库周边站点平均高0.38℃,非汛期参照站点气温增幅比水库周边站点高0.28℃。与1980-1999年相比,2000-2019年参照站点各月的平均相对湿度均减小。汛期参照站点相对湿度减幅比水库周边站点高4.77%,非汛期参照站点相对湿度减幅比水库周边站点高4.00%。

从图3中周边站点实测气候数据来看,小浪底

水利枢纽周边气候也表现出气温升高、相对湿度降低的变化趋势,但变化幅度小于参照站点。与1980-1999年相比,2000-2019年水库周边站点年平均气温升高了 $0.71\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年内各月的平均气温升高了 $0.19\sim 2.56\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,汛期平均气温升高了 $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,非汛期平均气温升高了 $0.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;与1980-1999年相比,2000-2019年水库周边站点平均相对湿度减小了 $1.46\%$ ,9-次年2月的平均相对湿度增大了 $0.11\%\sim 3.30\%$ ,3-8月的平均相对湿度减小了 $0.60\%\sim 11.04\%$ ,汛期平均相对湿度减小了 $0.03\%$ ,非汛期平均相对湿度减小了 $1.98\%$ 。

综合考虑小浪底水利枢纽对局地气候的影响,以及1980-1999年和2000-2019年两个时段之间水库周边站点及参照站点的实测气候变化量,发现

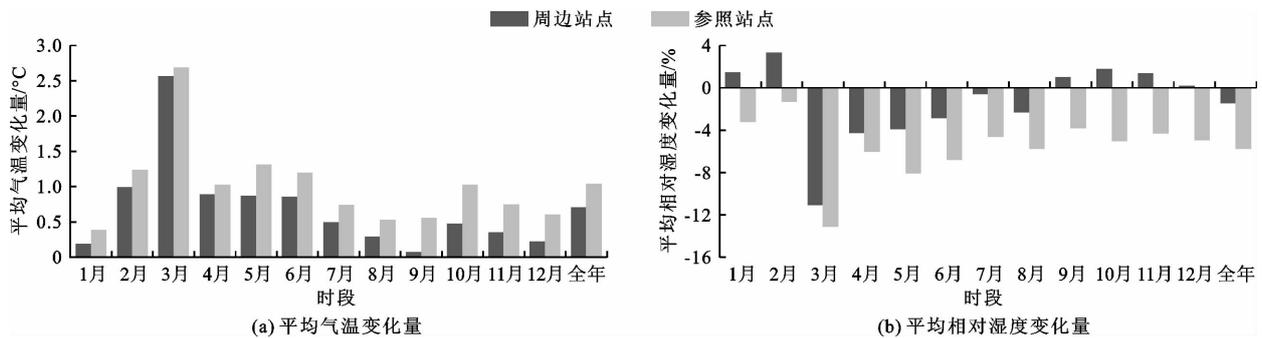


图3 2000-2019年小浪底水利枢纽周边及参照站点年内实测平均气候指标相对于1980-1999年的变化量

#### 4.2 小浪底水利枢纽对局地气候影响的可能范围

参照站点与周边站点的气候变化对比结果显示,小浪底水利枢纽对库区 $14\text{ km}$ 以内站点的气温和相对湿度具有显著影响。根据国家气象科学数据中心提供的气象站点,在距离小浪底库区 $14\sim 55\text{ km}$ 范围内没有站点分布,导致无法精确识别小浪底水利枢纽对局地气候的影响范围上限。国内对水库局地气候影响范围的研究主要围绕三峡水库展开,已有研究得出的结论为三峡水库对各类气候要素的影响范围一般在 $20\text{ km}$ 以内<sup>[10-11]</sup>。考虑到小浪底水利枢纽的水面面积小于三峡水库,因此推断小浪底水利枢纽对局地气候的影响范围不超过三峡水库,最大影响范围在距离库区 $14\sim 20\text{ km}$ 以内。

#### 4.3 气候调节对水库周边生态服务的影响

小浪底水利枢纽建成运行后发挥了降低气温、增加相对湿度的气候调节作用,为动植物提供了相对较好的气候条件,加上地下水水位上升、大面积水面形成、管理机构植树造林等因素的共同作用,水库周边的生态环境得到了显著改善。小浪底水利枢纽库区与枢纽管理区林草覆盖率达到 $47\%$ ,小浪底国

家水利风景区内共有鸟类 $155$ 种,数量最多时有 $5$ 万多只,是河南省能记录到的水禽种类最多的区域。适宜的气候条件、丰富的动植物资源和水利景观吸引了大量游客,提供了娱乐审美等生态服务。2019年小浪底国家水利风景区接待游客约 $70$ 万人次,产生了显著的经济价值。

家水利风景区内共有鸟类 $155$ 种,数量最多时有 $5$ 万多只,是河南省能记录到的水禽种类最多的区域。适宜的气候条件、丰富的动植物资源和水利景观吸引了大量游客,提供了娱乐审美等生态服务。2019年小浪底国家水利风景区接待游客约 $70$ 万人次,产生了显著的经济价值。

在分析水库对局地气候的影响时,有必要排除更大空间尺度上气候变化的影响。例如,介玉娥等<sup>[26]</sup>2009年发表的研究成果分析了小浪底水利枢纽对局地气候的影响,通过对比建库前、后的气候数据,认为小浪底水利枢纽蓄水造成水库周边的济源、孟津、新安等气象站温度呈上升趋势。但本文研究结果显示,这种增温趋势是更大空间尺度上区域气候变化的体现,小浪底水利枢纽其实发挥了降低水库周边气温的作用,但水库降温效果小于区域升温效果,导致水库周边仍呈现增温趋势。

## 5 结论

(1)小浪底水利枢纽在水库周边发挥了降低气温、增加相对湿度的作用。2000-2019年,小浪底水利枢纽使水库周边年均气温降低了 $0.46\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、年均相对湿度增加了 $3.78\%$ ,在汛期发挥的气候调节作用强于非汛期;小浪底水利枢纽发挥的气候调节作用随时间呈增强趋势,与2000-2009年相比,2010-2019年小浪底水利枢纽在水库周边产生的年均气温降幅增大了 $0.37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、年均相对湿度增幅增大了 $1.56\%$ 。

(2)小浪底水利枢纽减弱了水库周边的干旱化趋势。小浪底水利枢纽所在区域呈现出干旱化趋势,与1980-1999年相比,2000-2019年参照站点

年均气温升高了 1.04℃、年均相对湿度降低了 5.75%；在小浪底水利枢纽作用下，水库周边年均气温升高了 0.71℃、年均相对湿度降低了 1.46%，变幅小于参照站点。

(3)在全球气候变化背景下，分析水库对局地气候的影响时需要排除更大空间尺度上的气候变化的影响。本文提出的水库影响定量分析方法能够将水库的影响从多因素复合影响中分离出来，更加准确地量化水库对局地气候的影响。本文采用相关分析的方法模拟评价时段无水库情景下的周边气候，未来需要进一步发展数值模拟手段，以提高模拟的精准性。

### 参考文献：

- [1] POFF N L, SCHMIDT J C. How dams can go with the flow [J]. *Science*, 2016, 353(6304): 1099 - 1100.
- [2] 王浩,王旭,雷晓辉,等. 梯级水库群联合调度关键技术发展历程与展望[J]. *水利学报*, 2019, 50(1): 25 - 37.
- [3] MAAVARA T, CHEN Qiuwen, MATER K V, et al. River dam impacts on biogeochemical cycling [J]. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2020, 1: 103 - 116.
- [4] GRILL G, LEHNER B, THIEME M. Mapping the world's free-flowing rivers [J]. *Nature*, 2019, 569(7755): 215 - 221.
- [5] 陈求稳,张建云,莫康乐,等. 水电工程水生态环境效应评价方法与调控措施[J]. *水科学进展*, 2020, 31(5): 793 - 809.
- [6] 孙志禹,陈永柏,李翀,等. 中国水库温室气体研究(2009 - 2019): 回顾与展望[J]. *水利学报*, 2020, 51(3): 253 - 267.
- [7] CHEN Qiuwen, SHI Wenqing, HUISMAN J, et al. Hydro-power reservoirs on the upper Mekong River modify nutrient bioavailability downstream [J]. *National Science Review*, 2020, 7(9): 41 - 49.
- [8] 翟婉盈,湛若云,卓海华,等. 三峡水库蓄水不同阶段总磷的变化特征[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(12): 5069 - 5078.
- [9] 黄新莹,姚鹏,宋国栋,等. 小浪底水库关键水体环境要素的时空变化特征及其影响因素[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(4): 111 - 120.
- [10] 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.
- [11] 刘红年,张宁,吴润,等. 水库对局地气候影响的数值模拟研究[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2010, 32(2): 171 - 176.
- [12] 李艳,张倩倩,陈鲜艳. 大渡河流域水电开发对区域气候的可能影响[J]. *大气科学学报*, 2017, 40(1): 90 - 99.
- [13] 封瑞雪,刘军旗,姚梦辉,等. 三峡水库蓄水前后重庆气候变化分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(4): 994 - 1002.
- [14] 郑祚芳,任国玉,王耀庭,等. 大型人工湖气候效应观测研究——以密云水库为例[J]. *地理科学*, 2017, 37(12): 1933 - 1941.
- [15] 路振刚,李龙波,王永峰,等. 丰满水库运行对局地气候的影响回顾[J]. *水利水电技术*, 2017, 48(4): 35 - 41.
- [16] 张静,刘增进,肖伟华,等. 三峡水库蓄水后库区气候要素变化趋势分析[J]. *人民长江*, 2019, 50(3): 113 - 116.
- [17] 孙颖,尹红,田沁花,等. 全球和中国区域近 50 年气候变化检测归因研究进展[J]. *气候变化研究进展*, 2013, 9(4): 235 - 245.
- [18] 丁一汇,王会军. 近百年中国气候变化科学问题的新认识[J]. *科学通报*, 2016, 61(10): 1029 - 1041.
- [19] 焦珂伟,高江波,吴绍洪,等. 植被活动对气候变化的响应过程研究进展[J]. *生态学*, 2018, 38(6): 2229 - 2238.
- [20] 张建云,向衍. 气候变化对水利工程安全影响分析[J]. *中国科学:技术科学*, 2018, 48(10): 1031 - 1039.
- [21] 顾磊,陈杰,尹家波,等. 气候变化下中国主要流域气象水文干旱潜在风险传播[J]. *水科学进展*, 2021, 32(3): 321 - 333.
- [22] 杨思遥,孟丹,李小娟,等. 华北地区 2001 - 2014 年植被变化对 SPEI 气象干旱指数多尺度的响应[J]. *生态学报*, 2018, 38(3): 1028 - 1039.
- [23] 汪洋,王力力,祁鹏卫,等. 近 30 a 三峡库区(重庆段)城镇化发展的气温响应图谱诊断[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(9): 1397 - 1405.
- [24] 黄建平,张国龙,于海鹏,等. 黄河流域近 40 年气候变化的时空特征[J]. *水利学报*, 2020, 51(9): 1048 - 1058.
- [25] 周帅,王义民,畅建霞,等. 黄河流域干旱时空演变的空间格局研究[J]. *水利学报*, 2019, 50(10): 1231 - 1241.
- [26] 介玉娥,胡玉梅,张姣姣,等. 小浪底水库蓄水后气候变化对生态、农业的影响[J]. *气象与环境科学*, 2009, 32(S1): 252 - 255.