

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.08.014

叶琰, 翁薛柔, 马黎华, 等. 基于 ITA 的三峡库区地温时空演变格局 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(8): 151-164.

基于 ITA 的三峡库区地温时空演变格局

叶琰¹, 翁薛柔^{1,2}, 马黎华^{1,3}, 叶勇¹, 龙训建¹1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400715; 2. 中山大学 地理科学与规划学院, 广州 510006;
3. 长江经济带农业绿色发展研究中心, 重庆 400715

摘要: 自 2003 年三峡工程蓄水以来, 库区地表水陆面积占比发生变化, 水热条件需适应新的空间格局. 为探讨三峡工程建设前后库区范围地表温度的时空演变特征, 以三峡库区 1981—2014 年 21 个气象站的日地表温度为研究数据, 利用创新趋势分析(Innovative Trend Analysis, ITA)方法的微趋势识别优势, 探讨研究区内地表温度在不同尺度的时空格局特征. 结果表明: ① 三峡库区平均、最高和最低地表温度在研究时段内均呈增加趋势, 区域内温差分布特征为西北高、东南低; ② 以 2003 年为蓄水分界时期, 对比前后地表温度变化特征, 显示蓄水前平均地表温度多呈增加趋势, 而蓄水后增加速度放缓, 距离三峡大坝最近的区域 E 放缓程度最为明显, 蓄水后平均、最高和最低地表温度分别增加了 0.52, 0.94, 0.71 °C, 其中分区 D 增加幅度最大, 平均地表温度增加 4.68%, 最高地表温度增加 9.35%; ③ 在年内的水位变动期, 4—5 月和 9—10 月的日平均地表温度较蓄水前增加了 0.42 °C 和 0.50 °C, 但统计参数表明, 研究区在三峡水库蓄水前后, 两个时段内的平均地表温度表现出不同的变化趋势. 研究结果可为改善三峡库区生态建设、土地利用规划、环境保护等提供理论参考.

关键词: 地表温度; 三峡水库; 创新趋势分析法 ITA; 时空演变

中图分类号: P423.7

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2023)08-0151-14

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Spatial and Temporal Evolution Pattern of Ground Temperature in Three Gorges Reservoir Area Based on ITA

YE Yan¹, WENG Xuerou^{1,2}, MA Lihua^{1,3},
YE Yong¹, LONG Xunjian¹

1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China;

3. Interdisciplinary Research Center for Agriculture Green Development in Yangtze River Basin, Chongqing 400715, China

Abstract: Since the impoundment of the Three Gorges Project in 2003, the proportion of surface water and land area in the reservoir area has changed. The hydrothermal environment of the Three Gorges Reservoir area needs to adapt to the new spatial pattern. In order to explore the spatiotemporal evolution characteristics of the surface temperature in the reservoir area before and after the construction of the Three Gorges

收稿日期: 2022-09-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(42107347); 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJZD-K202100201).

作者简介: 叶琰, 博士, 副教授, 主要从事流域水资源规划与管理、水生态修复与保护研究.

project, the paper takes the daily surface temperature of 21 meteorological stations in the Three Gorges Reservoir area from 1981 to 2014 as the basic data, and uses the innovative trend analysis (ITA) method with the advantage of micro trend identification to explore the spatiotemporal pattern of the surface temperature in the research area at different scales. The results show that: ① The average, maximum and minimum surface temperatures in the Three Gorges Reservoir area all showed an increasing trend in the study period. The spatial distribution characteristics of the difference between the maximum and minimum surface temperatures in the region were high in the northwest and low in the southeast. ② Taking 2003 as the time dividing point, the variation characteristics of surface temperature in the Three Gorges Reservoir area before and after impoundment are compared. The average surface temperature tended to increase before impoundment, but the increase speed slowed down after impoundment. The area E closest to the Three Gorges Dam had the most obvious slow down. After impounding, the average, maximum and minimum surface temperatures increased by 0.52, 0.94, 0.71 °C, respectively. Among them, area D increased the most, the average surface temperature increased by 4.68%, and the maximum surface temperature increased by 9.35%. ③ During the water level fluctuation period, the daily average surface temperature in the two periods of April-May and September-October increased by 0.42 °C and 0.50 °C, respectively, compared with that before water storage. However, the statistical parameters show that the average surface temperature in the study area showed different trends before and after the reservoir impoundment. The results of this study can provide theoretical reference for improving the ecological construction, land use planning and environmental protection in the Three Gorges Reservoir area.

Key words: surface temperature; Three Gorges Reservoir; innovation trend analysis (ITA); temporal and spatial evolution

地表温度是反映全球和区域热环境的重要环境监测指标之一,是影响地表能量和水分平衡的重要参数^[1-2]. 政府间气候变化专门委员会第六次评估报告指出,从 1880 年到 2012 年,全球平均地表温度提高了 0.92 °C (0.68~1.17 °C)^[3],已对全球和区域尺度的地表温度产生了重大影响,如产生城市热岛^[4]、局部温度异常灾害^[5-6]等.

三峡工程作为目前世界上最大的水利水电工程,范围涉及鄂西和渝东北的 26 个区县,整体区域山水交错,气候复杂. 在全球气候变化背景下,三峡库区形成后,区域水面扩张,山体相对高度降低,山体与地势低洼地区的热力作用也随之发生改变,三峡库区局地气候效应明显^[7]. 大量学者基于统计分析、数值模拟等数学方法,对三峡工程建成后的区域气候效应开展相关研究,均表明三峡工程对库区局部气温^[8-10]、降水^[7, 11]及径流^[12-13]等气象要素产生了一定影响. 尽管多数研究普遍认为三峡水库建成后对库区夏季具有弱降温效应,对冬季有增温效应^[8, 10, 14],但关于库区内地表温度局域变化特征的研究相对较少.

长序列地表温度的相关研究中, Mann-Kendall 趋势检验法^[15]、线性趋势法^[16]是较为常用的检验气候突变的方法,但它们对微趋势的识别具有一定的局限性. Şen^[17]在 2012 年提出的创新趋势分析 (Innovative Trend Analysis, ITA) 方法,则在微趋势识别方面具有特别优势. 它通过数据图形化的方式,可识别长时间序列数据的突变微趋势特征^[18-19]. 基于此,对变化微敏的地表温度而言,ITA 方法有利于更好地解析区域热环境变化特征. 鉴于此,本研究基于三峡库区及周边共计 82 个国家基本气象站点 1981—2014 年逐日平均、最高、最低地表温度数据,利用 ITA 方法对三峡库区地表温度的时空演变规律进行分析研究,探讨水库蓄水前后地表温度的变化情况以及水库调度对月平均地表温度的影响,以期解析区域热环境动态变化规律,为促进区域绿色发展、实现三峡库区环境保护提供科学支撑.

1 数据与方法

1.1 研究区分区

1.1.1 研究时段划分

三峡库区位于长江上游,地理位置为 105°50′—111°40′E, 28°31′—31°44′N,回水范围涉及 26 个区县,其

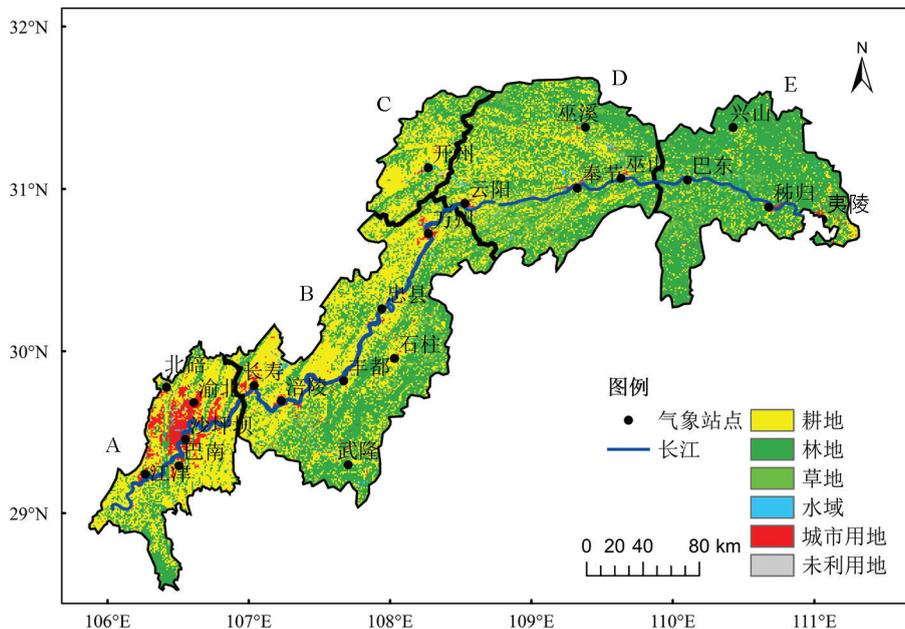
中 22 个为重庆市管辖, 4 个由湖北省管辖, 总面积约 5.8 万 km²。三峡库区位于亚热带北缘, 属中亚热带湿润季风气候区, 区域内温暖湿润, 年均气温为 17~19 °C, 年降水量为 1 000~1 200 mm, 水热条件良好。

三峡工程从开工建设到正常蓄水运行前, 蓄水阶段经历了 3 个重要时间节点: 围堰蓄水(2003 年), 水库蓄水至 135 m 水位; 初期蓄水(2006 年), 水库蓄水至 156 m 水位; 试验蓄水(2008 年), 水库进入试验蓄水期, 2010 年 10 月首次达到正常蓄水位 175 m。三峡水库蓄水及调度运行水面在 145~175 m 之间变化, 2003 年可视为蓄水关键节点, 据此将研究时段划分为两个部分, 即 1981—2002 年为水库蓄水前, 2003—2014 年为水库蓄水后。

根据三峡水库的调度规则, 水库正常蓄水后, 在每年的汛末关闸蓄水至正常蓄水位 175 m, 发挥兴利作用; 在枯水期末逐渐释放并腾出库容, 汛期开始时水位降至 145 m 汛限水位, 发挥汛期防洪功能, 以最大限度地发挥防洪、发电、通航、水资源利用等方面的综合效益。从时间节点角度, 三峡水库水位通常在每年 4 月开始消落, 5 月逐渐下降到 145 m 的三峡水库汛限水位。7—9 月是洪水期, 9 月底左右开始蓄水, 10 月逐渐蓄至 175 m 的正常蓄水位。因此, 自 2003 年蓄水后, 将每年的 4—5 月视为预泄期, 9—10 月视为蓄水期。

1.1.2 研究子单元划分

由于三峡库区全域内自然环境、人为活动聚集度和影响范围存在差异, 为了探讨三峡库区范围内区域地表温度随大坝距离的空间变化特征, 本研究以社会经济、环境特征相似为基本原则, 参考国家环境保护总局《三峡水库及其上游水污染防治规划(2001—2010 年)》^[20]和翟羽佳等^[21]的研究成果, 结合三峡库区汇入的重要支流节点位置, 将空间位置临近且相互关联的一定范围水域和陆域划为同一子单元, 按照三峡库区库尾到坝前的顺序, 共计 5 个子单元, 依次编号为 A, B, C, D, E。其中, A 区距离三峡大坝最远, 包括重庆的中心城区渝中区、大渡口区、江北区、沙坪坝区、九龙坡区、南岸区、北碚区、渝北区、巴南区, 以及江津区; B 区由三峡库区腹部的长寿、涪陵、武隆、丰都、石柱、忠县和万州 7 个行政区组成; C 区仅涉及开州区; D 区由重庆市东北部的云阳、巫溪、巫山和奉节 4 个县组成; E 区则由距离三峡大坝最近, 库水面变化最剧烈的湖北省西部的兴山、巴东、秭归和夷陵 4 个行政区组成。研究区地理位置及分区情况如图 1 所示。



审图号: GS(2019)3333 号。

图 1 三峡库区分区情况及气象站点位置

1.2 数据来源

根据国家基本气象台站分布情况, 三峡库区范围内有 21 个基本气象站点, 分别位于重庆市江津区、巴南区、沙坪坝区、渝北区、北碚区、长寿区、涪陵区、武隆区、丰都县、石柱县、忠县、万州区、云阳县、开州区、奉节县、巫溪县、巫山县和湖北省巴东县、秭归县、兴山县、夷陵区。为满足空间插值需要, 同时收

集了三峡库区周边 61 个基本气象站点的数据. 本研究使用的各基本气象站点 1981—2014 年的逐日平均、最高、最低地表温度数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>).

1.3 分析方法

1.3.1 ITA 方法

ITA 方法^[17]的基本分析计算不需要基于任何假设, 就可轻松获取长时间序列数据低、中、高等不同等级数据的微趋势, 在水文气象、环境变量的趋势分析研究中已有应用^[22-23]. 基本计算方法与步骤如下:

1) 将收集的地表温度时间序列数据 a_1, a_2, \dots, a_n 分为两组长度相等的子序列: $\{b_{1, n/2}\} = \{a_1, a_2, \dots, a_{n/2}\}$ 和 $\{b_{2, n/2}\} = \{a_{n/2+1}, a_{n/2+2}, \dots, a_n\}$.

2) 对两组子序列各自按升序排序以便后续作图, 记为:

$$\{s_1\} = \{\min(b_{1, n/2}), \dots, b_i, \dots, \max(b_{1, n/2})\} (1 < i < n/2) \quad (1)$$

$$\{s_2\} = \{\min(b_{2, n/2}), \dots, b_j, \dots, \max(b_{2, n/2})\} (1 < j < n/2) \quad (2)$$

3) 在直角坐标系内以 $\{s_1\}$ 为横坐标, 以 $\{s_2\}$ 为纵坐标绘制散点图, 并将各点与 45° 无趋势直线(1:1 直线)进行比较. 如果散点分布在 45° 线上方(下方), 则认为此时间序列呈单调增加(减少)趋势; 若散点恰好位于 45° 线上, 则认为此序列不存在变化趋势. 若存在变化趋势, 则由下式计算时间序列的趋势斜率 b :

$$b = \frac{2(\bar{y}_2 - \bar{y}_1)}{n} \quad (3)$$

式中: \bar{y}_1 和 \bar{y}_2 分别为 $\{s_1\}, \{s_2\}$ 两组子序列的算术平均值; n 为数据长度.

4) 计算 b 的标准偏差 σ_b :

$$\sigma_b = \frac{2\sqrt{2}}{n\sqrt{n}}\sigma\sqrt{1-\rho_{y_1y_2}^-} \quad (4)$$

式中: $\rho_{y_1y_2}^-$ 为 $\{s_1\}$ 和 $\{s_2\}$ 之间的相关系数; σ 为原始序列的标准差.

5) b 服从均值为 0, 方差为 σ_b 的正态分布, 如果在 α 置信水平内, 标准正态分布的置信限为 b_{cri} , 则 b 的置信限 $CL_{(1-\alpha)}$ 为:

$$CL_{(1-\alpha)} = 0 \pm b_{cri}\sigma_b \quad (5)$$

如果 b 落于置信区间之外, 就认为 ITA 检测出来的趋势具有显著性.

1.3.2 克里金空间插值法

克里金空间插值法是空间统计分析中较为常用的方法之一, 是在半变异函数理论分析的基础上建立, 并对有限区域内的区域变化取值进行无偏最优有效估计的一种插值方法^[24]. 本研究以三峡库区范围内和周边站点数据为基础, 用 ArcGIS 空间分析工具中的 Kriging 插值工具生成研究区地温空间分布图.

2 结果分析

2.1 三峡库区地表温度年际变化

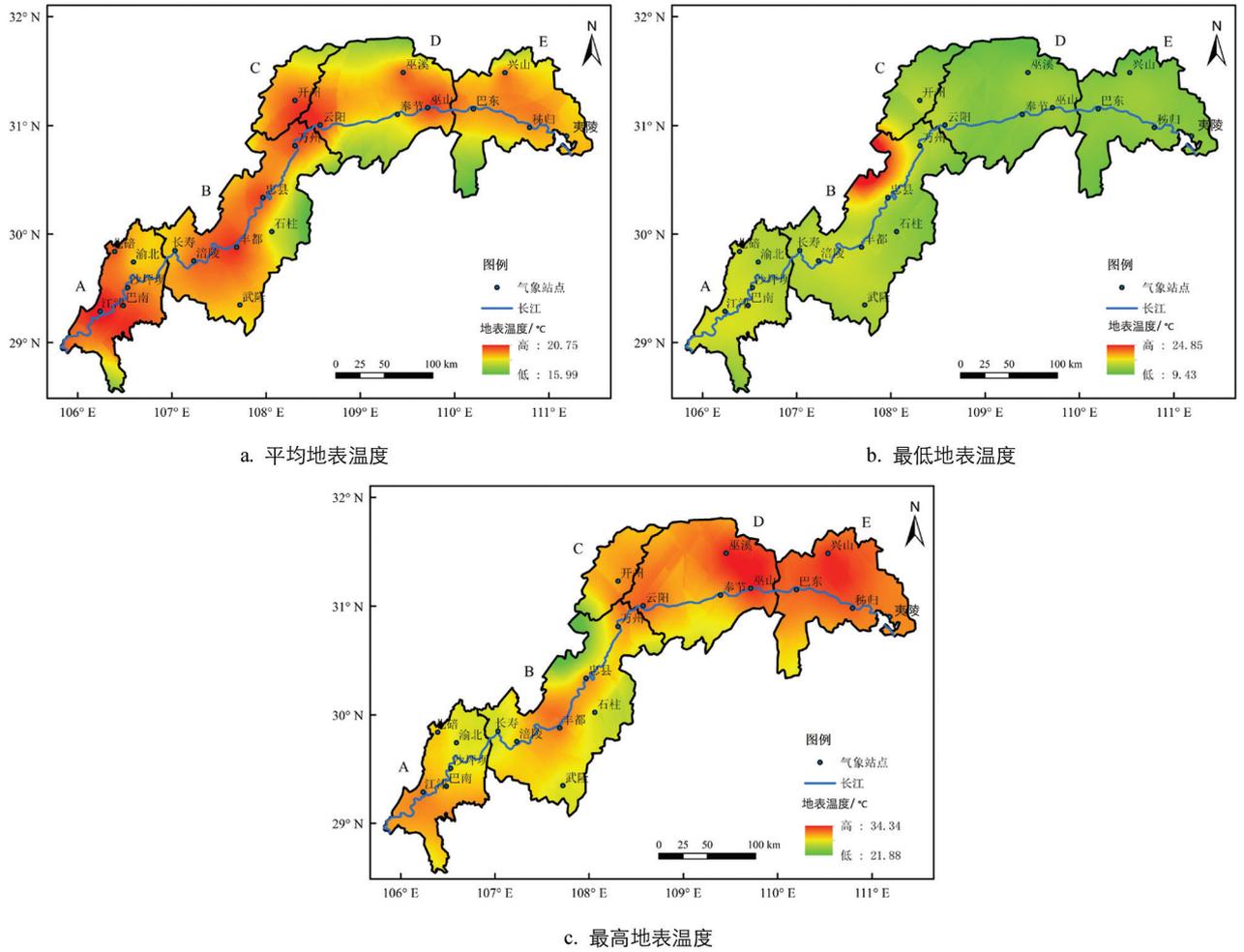
2.1.1 多年平均值空间特征

基于三峡库区范围内和库区周边国家基本气象站 1981—2014 年的逐日平均、最低和最高地表温度数据, 采用克里金空间插值法生成各分析时段内的多年平均温度空间分布图(图 2). 由图 2a 可知, 三峡库区多年日平均地表温度范围为 $15.99 \sim 20.75^\circ\text{C}$, 高值区主要发生在子单元分区 A 和分区 C, 低值区则位于大坝附近的子单元分区 E. 而多年平均每日最低(图 2b)和最高地表温度(图 2c)则介于 $9.43 \sim 24.85^\circ\text{C}$ 和 $21.88 \sim 34.34^\circ\text{C}$. 整体上, 三峡库区地表温度温差表现出西北高、东南低的空间分布特征.

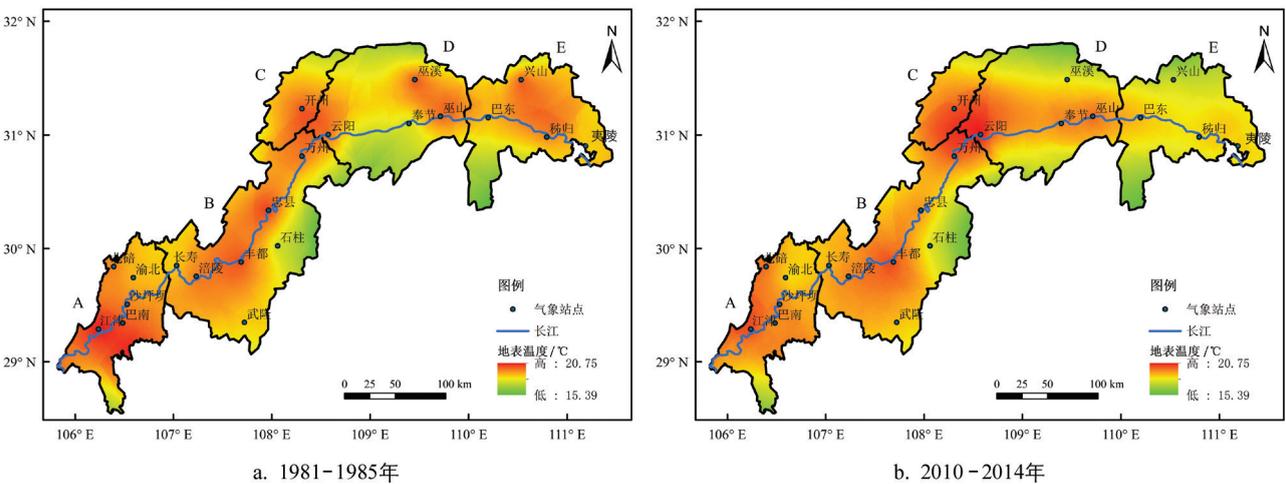
2.1.2 典型年平均地表温度空间特征

已有研究资料充分表明, 近年来全球地温处于持续升温状态, 但表现出空间异质性. 为对比分析研究区内的地温空间分布特征, 绘制得到 1981—1985 年和 2010—2014 年三峡库区 5 年滑动平均地表温度的空间分布图(图 3). 由图 3a 可知, 三峡库区成库前的 1981—1985 年平均地表温度低值区主要位于分区 B, C, D, 高值区则出现在分区 E 和分区 A; 三峡库区全面蓄水后的 2010—2014 年(图 3b), 地表平均温度整体略

升高, 地表温度高值中心转移到开州, 低值区增加了分区 E.



审图号: GS(2019)3333 号.
图 2 1981—2014 年三峡库区多年平均温度空间分布图



审图号: GS(2019)3333 号.
图 3 典型年三峡库区平均地表温度空间分布

2.1.3 整体变化趋势

统计分析三峡库区逐日平均、最高和最低地表温度在 1981—2014 年的年际变化特征, 结果如表 1 所

示. 整体上, 三峡库区多年日平均地表温度为 19.69 °C, 总体呈中间高、两端低的空间分布特征; 分区 C 多年平均地表温度最高, 达 20.21 °C, 分区 E 最低, 为 19.37 °C, 两者多年平均温差 0.84 °C. 最高、最低地表温度的多年平均值分别为 31.41 °C 和 13.87 °C, 在区域分布上, 表现出明显的地域特征, 如距离大坝越近, 最高和最低地表温度之间相差越大, 分区 A 的多年平均最高温度是多年平均最低温度的 2.06 倍, 但分区 E 则达到 2.62 倍. 各分区 1981—2014 年平均地表温度的标准差为 0.55~0.74, 分区 D 的年际差异最大, 分区 C, E 较小. 最高地表温度的年际差异最为明显, 其标准差约为最低地表温度的两倍. 三峡库区各分区平均、最高、最低地表温度的离差系数相似, 约为 0.03.

表 1 三峡库区多年日平均、最高和最低地表温度及其变化趋势

°C

参数	地表温度	分区 A	分区 B	分区 C	分区 D	分区 E	三峡库区
多年平均值	平均	19.90	19.57	20.21	19.82	19.37	19.69
	最高	30.45	30.25	31.40	33.12	32.95	31.41
	最低	14.80	14.24	14.35	13.21	12.59	13.87
标准差	平均	0.56	0.59	0.55	0.74	0.55	0.57
	最高	1.18	1.27	1.30	1.35	1.28	1.17
	最低	0.41	0.45	0.49	0.67	0.37	0.45
Cv 值	平均	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03
	最高	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	最低	0.03	0.03	0.03	0.05	0.03	0.03

对三峡库区 5 个分区的 1981—2014 年平均地表温度应用 ITA 进行微趋势分析, 结果如图 4 所示. 各分区的散点均位于 1:1 直线上方, 说明三峡库区平均、最高和最低地表温度在 1981—2014 年均呈明显的增加趋势. 按照其趋势结果规律, 即散点距离 1:1 直线越远, 变化幅度(斜率)越大, 反之则越小, 可知, 分区 D 的平均地表温度增加幅度最大, 分区 B 次之, 而分区 E 最小.

2.2 三峡水库蓄水前后库区地表温度变化

2.2.1 地表温度空间变化整体特征

以 2003 年三峡库区开始蓄水为时间分界点, 绘制 1981—2002 年蓄水前、2003—2014 年蓄水后库区日平均地表温度的空间分布图, 如图 5 所示. 就平均地表温度而言, 三峡水库蓄水后, 库区平均地表温度整体较蓄水前增加了约 0.5 °C, 与全球气候变暖的升温情况较为一致. 然而, 巫溪、渝北、兴山的平均地表温度在蓄水后显著降低, 分别减少了 1.00, 0.34, 0.37 °C. 最高地表温度的空间变化中, 蓄水后除原有的高值区以外, 奉节、云阳和丰都成为新的地表温度高值中心, 这与区域依托三峡库区建设, 水路交通质量显著改善, 建设配套陆域交通设施, 引领当地城市快速扩展, 区域土地利用类型发生变化, 城市迅速扩张, 形成区域性城市热岛有关.

2.2.2 地表温度空间变化局部特征

计算 2003 年前后研究区内平均地表温度的变化率, 生成空间分布图, 如图 6 所示. 三峡库区平均、最高、最低地表温度蓄水前后变化百分比分别为 2.64%, 3.02%, 5.24%. 整体上, 库区中部, 即分区 D 所在的云阳、巫溪、奉节、巫山平均地表温度变化幅度最大, 较蓄水前增加幅度约为 4.68%; 而库区前后两端变化幅度较小, 增加幅度不足 2.00%. 各分区最高地表温度增加的百分比为 3.55%~9.35%, 分区 D 最大, 分区 E 最小. 而分区 B 的最低地表温度变化幅度最大, 为 4.38%, 分区 E 最小, 为 1.49%.

2.2.3 变化趋势

计算各分区蓄水前后的平均、最高、最低地表温度的年平均值, 并进行趋势检验, 结果如表 2 所示. 蓄水前, 三峡库区整体平均、最高、最低地表温度分别为 19.51, 31.08, 13.62 °C; 蓄水后三峡库区的整体平均、最高、最低地表温度分别为 20.02, 32.02, 14.33 °C, 与蓄水前相比, 分别增加 0.51, 0.94, 0.71 °C, 增

加幅度为 2.64%, 3.02%, 5.24%。从各分区的统计结果看, 蓄水前后最高和最低地表温度的变化程度从库尾到库首依次增加。应用 ITA 对变化趋势进行检验, 结果表明, 蓄水前, 三峡库区各分区平均、最高地表温度均呈显著增加趋势, 最低地表温度以下降为主; 蓄水后, 库区平均地表温度多呈下降趋势, 最高地表温度的增加幅度较蓄水前有所减缓, 最低地表温度依然呈下降趋势。

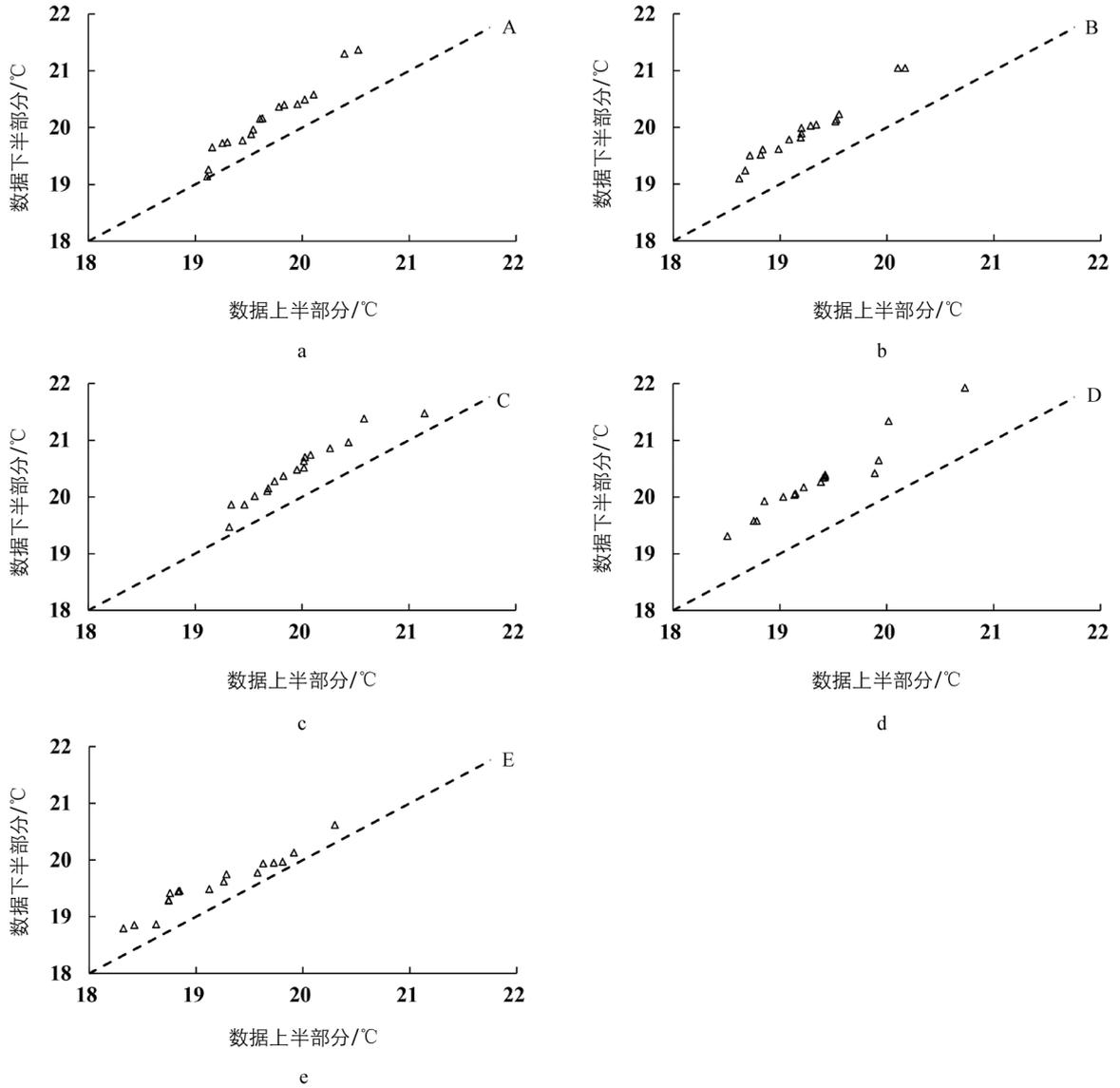


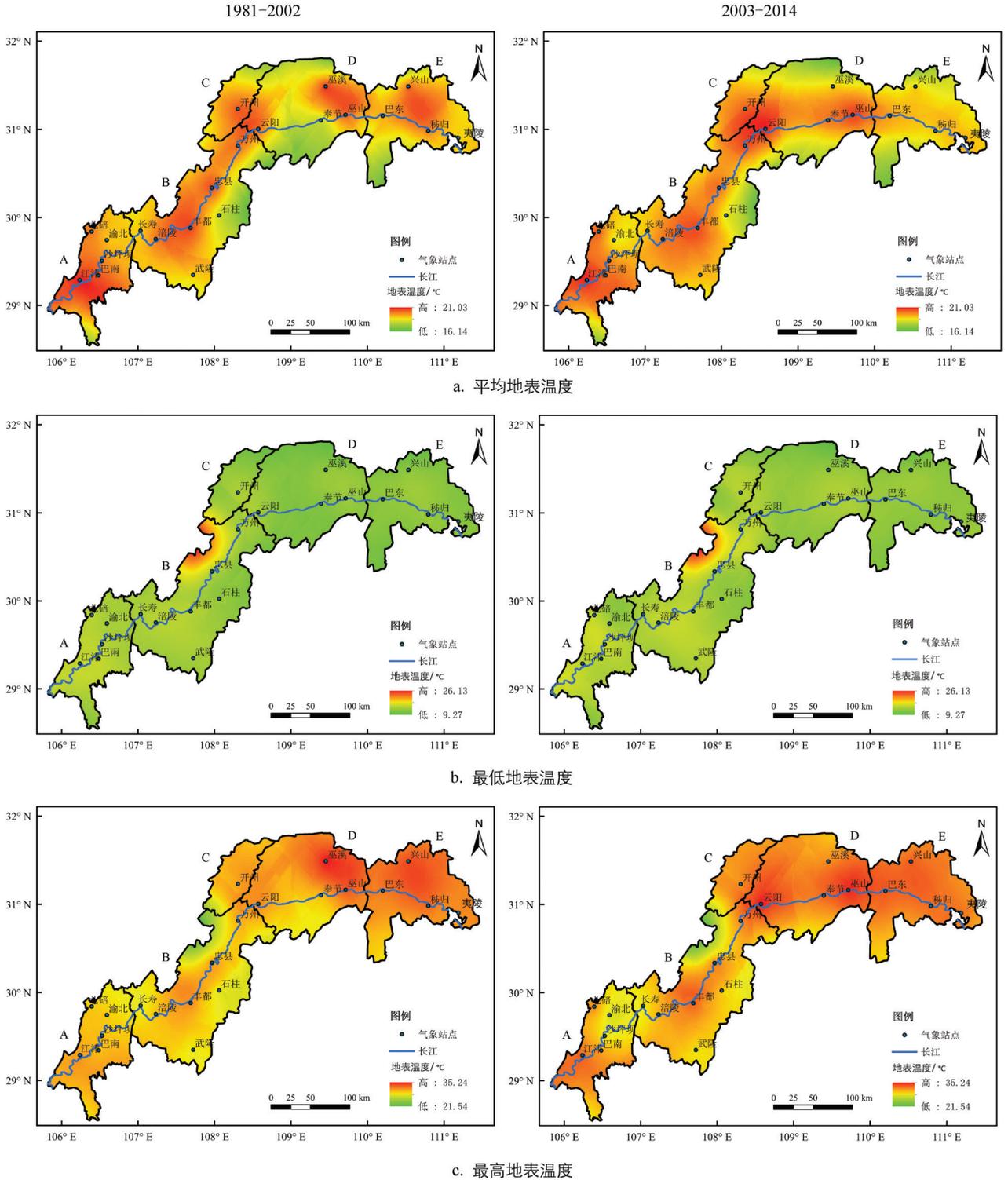
图 4 三峡库区各分区多年日平均地表温度 ITA 趋势检验结果

表 2 三峡水库蓄水前后地表温度年平均值及变化趋势

°C

时间段	地表温度	分区 A	分区 B	分区 C	分区 D	分区 E	三峡库区
蓄水前 1981—2002 年	平均	19.78 ^{↑*}	19.36 ^{↑*}	20.07 ^{↑*}	19.50 ^{↑*}	19.30 ^{↑*}	19.51 ^{↑*}
	最高	30.24 ^{↑*}	29.79 ^{↑*}	31.1 ^{↑*}	32.69 ^{↑*}	32.78 ^{↑*}	31.08 ^{↑*}
	最低	14.62 [↓]	13.98 ^{↑*}	14.09 ^{↓*}	12.79 ^{↓*}	12.43 [↓]	13.62 [↓]
蓄水后 2003—2014 年	平均	20.13 ^{↓**}	19.97 [↓]	20.45 [↑]	20.41 ^{↓*}	19.49 ^{↓*}	20.02 [↓]
	最高	30.83 [↑]	31.1 ^{↑**}	31.94 ^{↑*}	33.9 [↑]	33.27 ^{↓*}	32.02 [↑]
	最低	15.15 ^{↓*}	14.7 ^{↓***}	14.82 ^{↓**}	13.98 [↓]	12.88 ^{↓*}	14.33 ^{↓*}

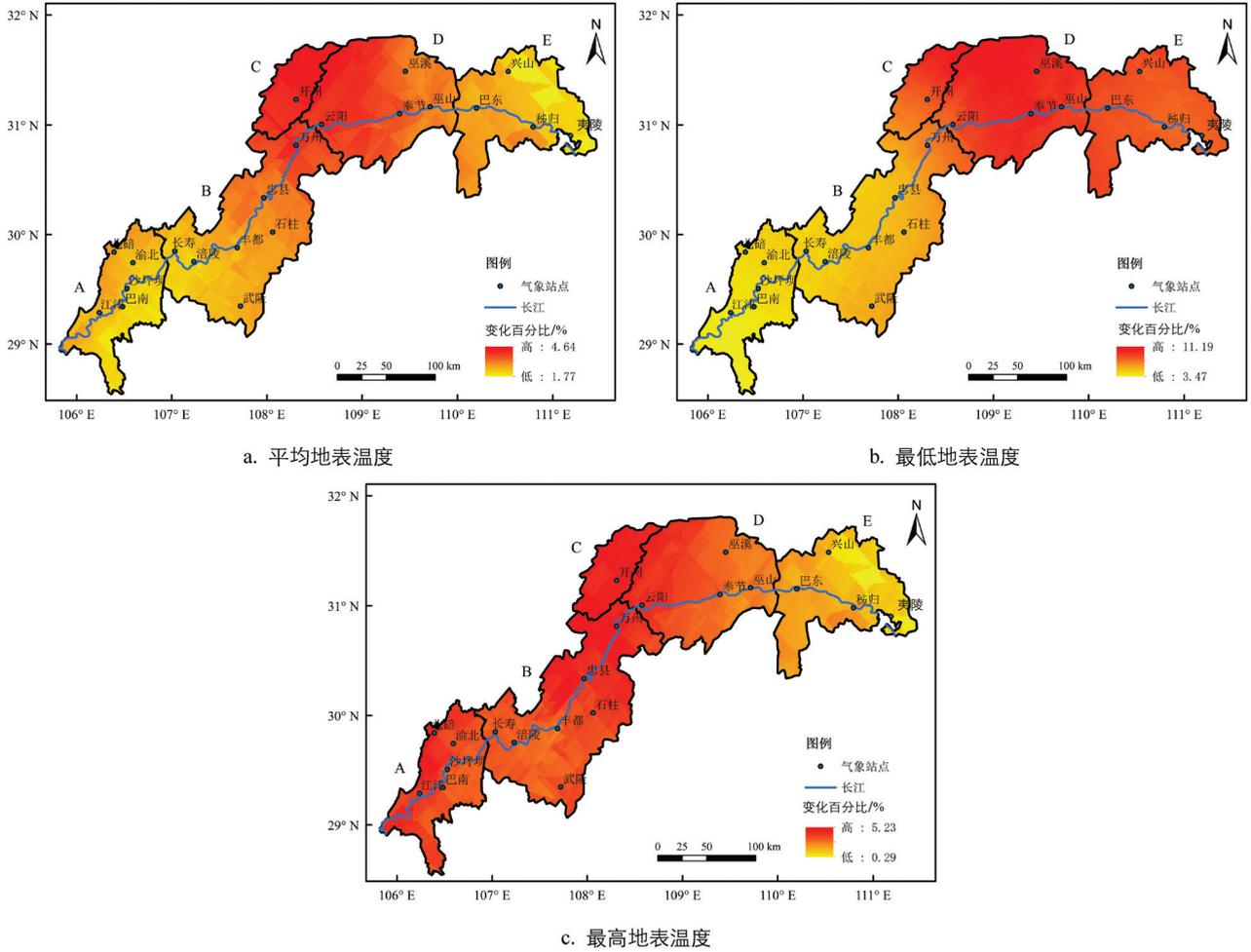
注: * 1%置信水平, ** 5%置信水平, *** 10%置信水平, ↑表示时段内的变化趋势为增加, ↓表示减少。



审图号: GS(2019)3333 号.

图 5 三峡水库蓄水前后库区平均地表温度空间分布图

三峡水库蓄水前后库区平均地表温度变化的 ITA 结果如图 7 所示. 三峡水库蓄水前, 散点多位于 1 : 1 直线上方, 而蓄水后的点大部分位于 1 : 1 直线下方, 这表明三峡水库蓄水前后的库区平均地表温度变化趋势相反, 蓄水前各分区均呈增加趋势, 蓄水后除分区 C 有不明显的增加趋势外, 其余分区均呈下降趋势. 其中分区 E 蓄水前后的散点分布差异最为明显, 分区 E 蓄水前的点在较小值处靠近 1 : 1 直线, 较大值处位于 1 : 1 直线上方且距 1 : 1 直线较远, 蓄水后的点均位于 1 : 1 直线下方, 有明显的下降趋势.



审图号: GS(2019)3333 号.

图 6 三峡水库蓄水前后库区平均地表温度、最低地表温度、最高地表温度变化百分比

2.3 年内水位变动期地表温度变化

蓄水前后三峡库区平均地表温度在水位变动期(4—5 月和 9—10 月)的变化情况如表 3 所示. 三峡水库蓄水前, 4—5 月的日平均温度为 22.00 °C, 各分区中分区 C 地表温度最高, 为 22.62 °C, 分区 B 最低, 为 21.48 °C; 9—10 月的日平均地表温度为 22.80 °C, 但分区 C 最高, 达 23.41 °C, 分区 A 最低, 为 22.62 °C. 三峡水库蓄水后, 各分区在 4—5 月和 9—10 月的日平均地表温度较蓄水前都有所增加, 4—5 月均值增加了 0.42 °C, 9—10 月则增加了 0.50 °C.

年内水位变动时间段的日平均地表温度的年际差异并不一致. 其中, 4—5 月, 蓄水前的年际差异相对较小, 蓄水后年际差异略有增加, 各分区蓄水前后 Cv 值介于 0.04~0.06; 9—10 月, 蓄水前后的年际差异不大, 各分区蓄水前后 Cv 值介于 0.03~0.05.

图 8 为三峡库区各分区在水位变动期(4—5 月和 9—10 月)的 ITA 趋势检验结果. 在 4—5 月的水位降低、水面减小时段, 坝前(分区 E)和库尾区域(分区 A)在三峡水库蓄水前对应时期的平均地温多位于 1:1 直线上或近上方, 呈增加趋势; 而库区中部(分区 C, D)在时段内呈减小趋势. 同时期, 水库蓄水后三峡库区地表温度则表现为下降趋势, 图上散点与 1:1 直线距离明显比水库蓄水前的点对应距离远, 由此表明, 三峡水库蓄水后, 库区范围内对应的平均地表温度整体下降趋势明显. 在 9—10 月对应的水位上升、水面增加阶段, 除分区 C 未表现出显著的差异变化趋势外, 其余各分区地表温度在蓄水前后的变化趋势均相反, 水库蓄水前各分区地表温度均表现出增加趋势, 在蓄水后则呈减小趋势.

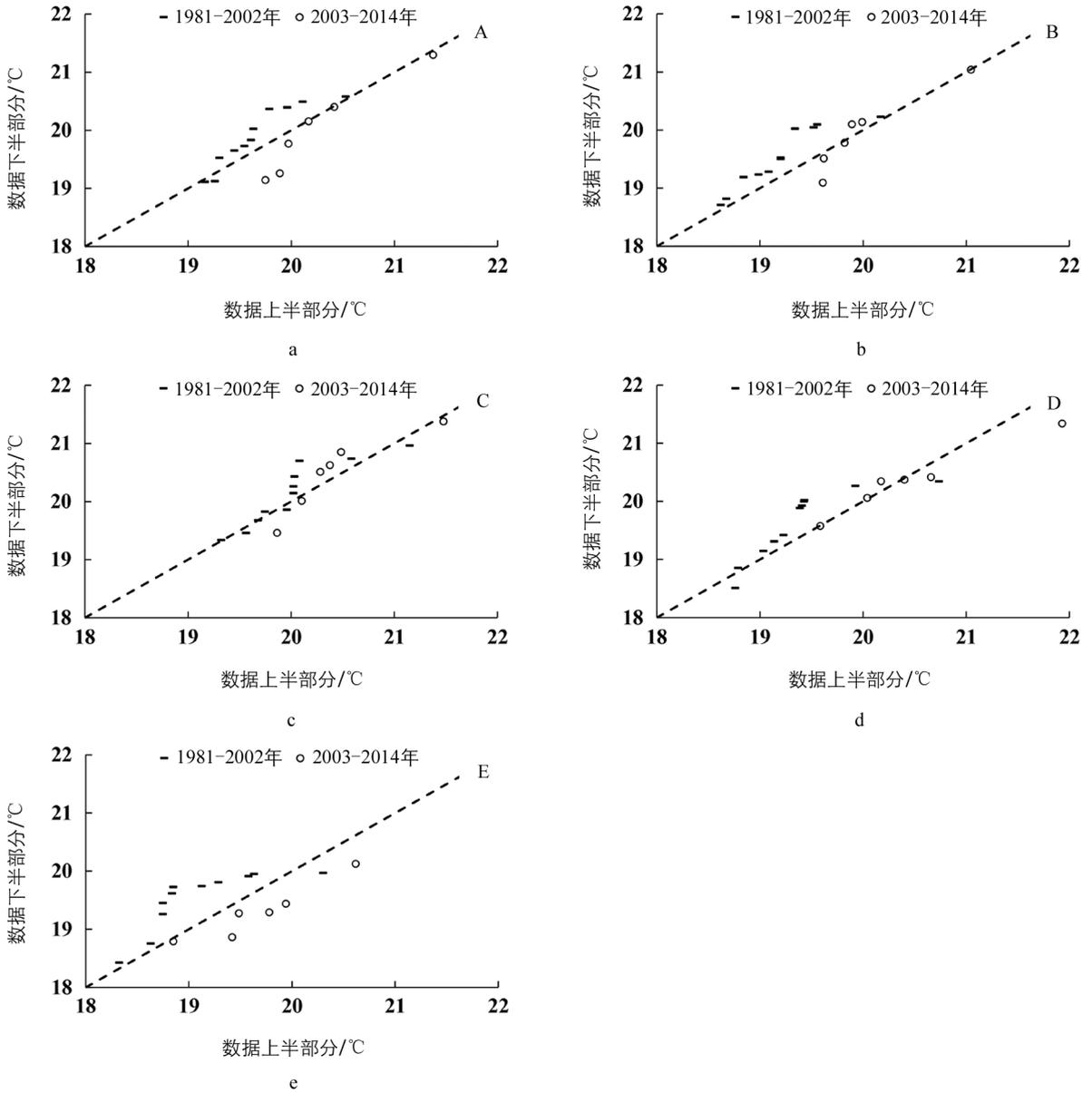


图 7 三峡水库蓄水前后各分区平均地表温度的 ITA 结果

表 3 蓄水前后 4—5 月和 9—10 月各分区平均地表温度变化情况

水位变动期	分区	平均值/°C		标准差		C_v 值	
		蓄水前	蓄水后	蓄水前	蓄水后	蓄水前	蓄水后
4—5 月	A	22.22	22.50	1.13	0.99	0.05	0.04
	B	21.48	21.98	0.98	0.99	0.05	0.05
	C	22.62	23.03	1.10	1.20	0.05	0.05
	D	22.27	22.83	1.11	1.29	0.05	0.06
	E	22.21	22.54	1.03	1.29	0.05	0.06
	库区	22.00	22.42	0.96	1.07	0.04	0.05
9—10 月	A	22.62	23.10	1.03	1.14	0.05	0.05
	B	22.66	23.29	0.86	0.92	0.04	0.04
	C	23.41	23.77	0.90	1.10	0.04	0.05
	D	22.90	23.76	1.11	0.88	0.05	0.04
	E	23.00	22.96	0.99	0.72	0.04	0.03
	库区	22.80	23.30	0.91	0.87	0.04	0.04

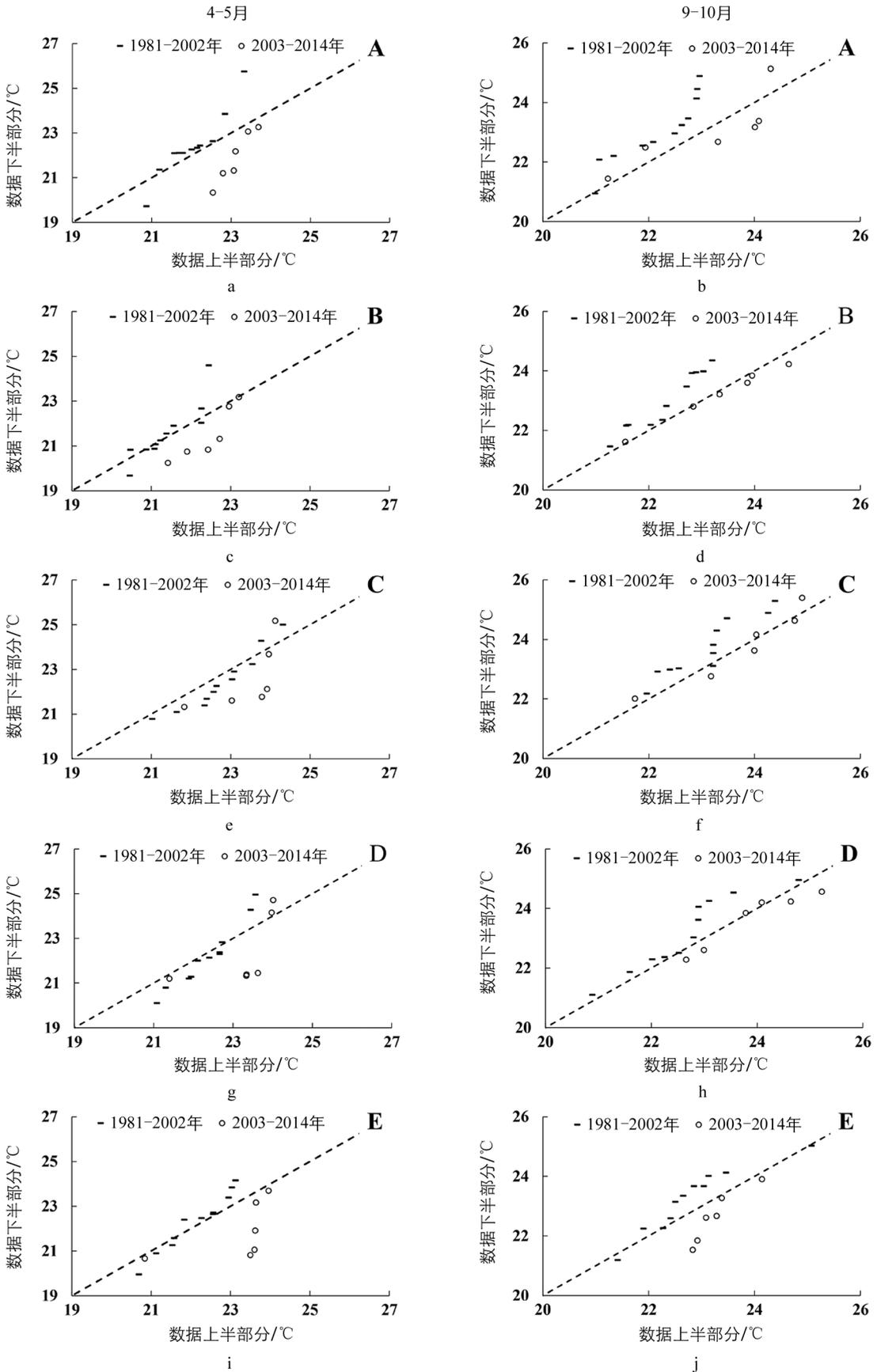


图 8 三峡水库运行前后 4-5 月和 9-10 月各分区平均地表温度变化的 ITA 结果

3 讨论

3.1 库区地温空间变化

三峡库区各分区多年平均地表温度从大到小依次为: C,A,D,B,E. 这与冯茹等^[25]利用三峡库区(重庆段)2003—2009年 MODIS 数据分析得到的库区地表温度呈西南高、东北低的碎带状分布特征大体一致. 整体上, 三峡库区地表温度的地域分布特征也符合温度随纬度升高而逐渐降低的基本规律. 1981—2014年库区平均、最高和最低地表温度均表现出增加趋势, 平均地表温度的变化幅度从大到小依次为: D,B,A,C,E, 与王圆圆等^[26]基于 Mann-Kendall 得出的三峡库区气温变化趋势相似.

三峡库区尾部, 即分区 A 为快速城市化的重庆市中心城区, 周边高山地形相对较远, 在人类活动影响下, 该范围内高度城市化产生的热岛效应更加明显, 也导致分区 A 的平均地表温度整体较高. 分区 D 北靠大巴山, 南抵七曜山, 形成两山夹河谷的“V”形地貌, 近山区以经济林和森林为主, 河谷地带聚集城镇, 因而形成南北山区地表温度走低, 城镇区域地表温度走高的空间分布特征. 尽管分区 E 的多年平均地表温度未出现高值聚集区(图 2), 但图 5 的空间分布结果表明, 三峡库区蓄水后, 多年平均地表温度表现出降低的趋势, 这与该区域水域面积增加, 局域水汽小循环调节有关, 但多年平均最高温度的高值区在该区域变化不明显.

事实上, 在全球气候变暖的大背景下, 气候统计研究表明, 中国近 50 年地表温度显著增加趋势为 $0.29\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ^[27]. 从 1981 年到 2014 年, 三峡水库库区的地表温度整体也呈上升特征, 但 Miller 等^[28]针对三峡水位提升对区域气候变化敏感性的研究表明, 三峡水库蓄水后对局域空间温度变化有一定的调节作用. 各分区蓄水前后平均、最高、最低地表温度的空间变化对比情况也印证了 Miller 等^[28]的结论, 即距大坝越近的区域, 三峡水库蓄水后水面增加越多, 对局域降温效果越明显, 故分区 E 的平均、最高、最低地表温度的增加幅度最小^[11]. 此外, 地表温度与植被覆盖度呈负相关^[8, 29], 自三峡工程建设以来, 三峡库区内持续大力推行退耕还林和天然林保护工程, 实现绿水青山, 高覆盖率的植被有降低地表温度或缓和地表温度变化程度的作用.

3.2 水库运行对地表温度的影响

相对于大尺度的气候变化, 局地气候的重塑和演变受到自然条件演变和人类活动痕迹所形成的特殊下垫面的共同影响^[30]. 随着三峡工程的稳定运行, 库区水位在短时期内抬高, 在库首区域的库岸交界地带, 下垫面发生了明显的变化, 对库区周边一定范围内的气候可能产生了一定影响^[8], 尤其是对近地层或水面的气候影响最为明显.

尽管 1981—2014 年三峡库区地表温度整体呈明显增加趋势, 但三峡水库蓄水运行后, 库区地表温度变化趋势有所下降, 这说明尽管全球气候变暖整体趋势明显, 但三峡工程成库后形成的 $1\ 084\text{ km}^2$ 水域面积在一定程度上减缓了库区地表温度持续上升的速率, 与 Miller 等^[28]得出的蓄水后库区气温有微弱下降趋势的结果一致. 图 7 的蓄水前后的 ITA 检验结果表明, 水库蓄水前后库区地表温度变化趋势或变化幅度有一定差异, 尤其是距离三峡大坝最近的分区 E 差异明显. 这主要是由于三峡工程建成后, 距离三峡大坝最近的分区 E 的水域面积增加值较其他区域更大, 在水面调节的影响下, 分区 E 地表温度增温趋势减缓; 而海拔较高的分区 B 和分区 D 的地表温度在蓄水后增加趋势显著, 这可能是因为在影响地表温度变化的因素中, 其他因素引起的增温作用大于水域发挥的减速调节作用^[31].

三峡工程蓄水运行后, 不仅在年尺度上对库区地表温度有一定影响, 其年内的水库调度规则也对月平均地表温度产生影响. 库区水域面积的短历时变化使得预泄期 4—5 月和蓄水期 9—10 月表现出不同的变化特征, 大部分区域地表温度由蓄水前的增加趋势演变为蓄水后的减少趋势. 比较蓄水期和预泄期在 2003—2014 年的点距 1:1 直线的远近可以发现, 预泄期的点与 1:1 直线的距离较蓄水期更远, 预泄期的下降幅度更加明显. 这表明水库放水时对地表温度的影响大于蓄水时的影响. 三峡库区蓄水期地表温度在 2003—2014 年的下降幅度从大到小依次为: E,D,B,A,C, 水库从 9 月开始蓄水应对之后的枯水期, 水位不断抬升, 对 5 个分区中距离大坝最近的分区 E 影响最大, 故分区 E 地表温度在 9—10 月下降幅度最为明显.

4 结论

基于三峡库区 21 个国家基本气象站点 1981—2014 年的地表温度数据, 本研究利用 ITA 创新趋势分析法和克里金空间插值法, 对三峡水库蓄水前后以及运行后不同阶段的地表温度空间变化格局进行探讨, 得出以下结论:

1) 三峡库区多年日平均地表温度为 $19.69\text{ }^{\circ}\text{C}$, 表现出空间异质性, 多年平均地表温度最高值分布在分区 C, 达 $20.21\text{ }^{\circ}\text{C}$, 较分区 E 高 $0.84\text{ }^{\circ}\text{C}$. 距离大坝越近, 最高和最低地表温度的多年平均值之间的差值越大. 各分区最高地表温度的年际差异均明显大于平均、最低地表温度. 同时, ITA 方法的趋势检验结果表明, 三峡库区平均、最高和最低地表温度在研究时段内均呈显著增加趋势.

2) 三峡库区在 1981—2002 年蓄水前多年日平均、最高、最低地表温度分别为 $19.51, 31.08, 13.62\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而在 2003—2014 年蓄水后分别增加了 $0.52, 0.94, 0.71\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其中分区 D 增加幅度最大, 库区前后两端较小. 三峡库区在蓄水前, 日平均地表温度呈明显的增加趋势, 但蓄水后 2003—2014 年间增加趋势有所减缓, 这一变化在距大坝最近的分区 E 表现最为明显.

3) 三峡水库蓄水后各分区在蓄水期和预泄期的日平均地表温度较蓄水前的 4—5 月和 9—10 月分别增加了 $0.42, 0.50\text{ }^{\circ}\text{C}$. 受水库调度影响, 蓄水后蓄水期(9—10 月)和预泄期(4—5 月)库区地表温度的变化趋势存在明显差异, 蓄水期较预泄期受水库运行的影响程度更为明显, 而分区 E 较其他区域受影响程度更为明显.

由于三峡库区生态环境系统是一个自然—社会—经济的复合系统, 区域内地表温度的变化受到多种因素的共同影响. 本研究仅对三峡库区 1981—2014 年的地表温度进行了初步分析, 基于本次研究结果, 下一阶段可尝试结合遥感影像开展更为全面的库区地表温度变化特征及发展趋势研究.

参考文献:

- [1] PENG J, MA J, LIU Q Y, et al. Spatial-Temporal Change of Land Surface Temperature across 285 Cities in China: An Urban-Rural Contrast Perspective [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 487-497.
- [2] 张计深, 陈笑蝶, 彭守璋. 2001—2100 年中国温度变化趋势及时空差异研究 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(12): 112-124.
- [3] IPCC Working Group I. *Climate Change 2021: Physical Science Basis* [M]. Cambridge: University Press, 2021.
- [4] REN T, ZHOU W Q, WANG J. Beyond Intensity of Urban Heat Island Effect: A Continental Scale Analysis on Land Surface Temperature in Major Chinese Cities [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 791: 148334.
- [5] KARNIELI A, AGAM N, PINKER R T, et al. Use of NDVI and Land Surface Temperature for Drought Assessment: Merits and Limitations [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(3): 618-633.
- [6] XU X J, ZHOU G M, DU H Q, et al. Combined MODIS Land Surface Temperature and Greenness Data for Modeling Vegetation Phenology, Physiology, and Gross Primary Production in Terrestrial Ecosystems [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 726: 137948.
- [7] ZOU X K, CHEN X Y, ZENG H L, et al. State of the Climate over the Three Gorges Region of the Yangtze River in 2018 [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2020, 13(1): 48-54.
- [8] SONG Z, LIANG S L, FENG L, et al. Temperature Changes in Three Gorges Reservoir Area and Linkage with Three Gorges Project [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(9): 4866-4879.
- [9] YU S H, SHENG L, ZHAN L K, et al. Analysis of Temperature Variation Characteristics in the Three Gorges Reservoir Area after Impoundment of the Three Gorges Dam [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(5): 384-389.
- [10] TAO Y W, WANG Y K, RHOADS B, et al. Quantifying the Impacts of the Three Gorges Reservoir on Water Temperature in the Middle Reach of the Yangtze River [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 582: 124476.
- [11] WU J, GAO X J, GIORGI F, et al. Climate Effects of the Three Gorges Reservoir as Simulated by a High Resolution Double Nested Regional Climate Model [J]. *Quaternary International*, 2012, 282: 27-36.
- [12] GAO Y, CHEN L, ZHANG W, et al. Spatiotemporal Variations in Characteristic Discharge in the Yangtze River Down-

- stream of the Three Gorges Dam [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 785: 147343.
- [13] QIN P C, XU H M, LIU M, et al. Climate Change Impacts on Three Gorges Reservoir Impoundment and Hydropower Generation [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 580: 123922.
- [14] YAO Y, RUAN L, LI H, et al. Changes of Meteorological Parameters and Lightning Current during Water Impounded in Three Gorges Area [J]. *Atmospheric Research*, 2013, 134: 150-160.
- [15] 王佳琳, 潘志华, 韩国琳, 等. 1961—2010 年中国 0 cm 地温变化特征及其与气温变化的关系 [J]. *资源科学*, 2016, 38(9): 1733-1741.
- [16] 周刊社, 罗骜翮, 杜军, 等. 西藏高原地温对气温变化的响应 [J]. *中国农业气象*, 2015, 36(2): 129-138.
- [17] ŞEN Z. Innovative Trend Analysis Methodology [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012, 17(9): 1042-1046.
- [18] KISI O, AY M. Comparison of Mann-Kendall and Innovative Trend Method for Water Quality Parameters of the Kizilirmak River, Turkey [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 513: 362-375.
- [19] DABANLIÍ, ŞEN Z, YELEĞEN M Ö, et al. Trend Assessment by the Innovative-Şen Method [J]. *Water Resources Management*, 2016, 30(14): 5193-5203.
- [20] 国家环境保护总局. 三峡库区及其上游水污染防治规划(2001-2010) [EB/OL]. [2022-08-20]. https://wenku.com/d/68a6385e2bad889b163e1efc844b6402?src=ob_zz_juhe360wenku.
- [21] 翟羽佳, 王丽婧, 郑丙辉, 等. 基于系统仿真模拟的三峡库区生态承载力分区动态评价 [J]. *环境科学研究*, 2015, 28(4): 559-567.
- [22] ZHOU Y L, GUO S L, CHANG F J. Explore an Evolutionary Recurrent ANFIS for Modelling Multi-Step-Ahead Flood Forecasts [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 570: 343-355.
- [23] 邹磊, 夏军, 张印, 等. 海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析 [J]. *水资源保护*, 2021, 37(1): 53-60.
- [24] DUBRULE O. Cross Validation of Kriging in a Unique Neighborhood [J]. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 1983, 15(6): 687-699.
- [25] 冯茹, 孟翔飞, 魏虹, 等. 基于 MODIS 的三峡库区(重庆段)地表温度格局 [J]. *生态学杂志*, 2013, 32(9): 2398-2406.
- [26] 王圆圆, 李贵才, 郭徽, 等. 1979—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.
- [27] 乔丽, 吴林荣, 张高健. 中国近 50 a 地表温度时空变化特征分析 [J]. *水土保持通报*, 2015, 35(5): 323-326.
- [28] MILLER N L, JIN J M, TSANG C F. Local Climate Sensitivity of the Three Gorges Dam [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(16): 16704.
- [29] NSE O U, OKOLIE C J, NSE V O. Dynamics of Land Cover, Land Surface Temperature and NDVI in Uyo City, Nigeria [J]. *Scientific African*, 2020, 10: 00599.
- [30] ZHANG Q F, LOU Z P. The Environmental Changes and Mitigation Actions in the Three Gorges Reservoir Region, China [J]. *Environmental Science and Policy*, 2011, 14(8): 1132-1138.
- [31] BARTLETT M G, CHAPMAN D S, HARRIS R N. A Decade of Ground-Air Temperature Tracking at Emigrant Pass Observatory, Utah [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(15): 3722-3731.