

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2018.0048

程清平,王平,谭小爱. 1961-2013年贵州省地面温度时空变化特征[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 122-131. CHENG Q P, WANG P, TAN X A, et al. Temporal and spatial variation characteristics of surface temperature in Guizhou during 1961-2013[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 122-131. (in Chinese)

# 1961-2013年贵州省地面温度时空变化特征

程清平<sup>1,2</sup>, 王平<sup>1</sup>, 谭小爱<sup>1</sup>

(1. 云南师范大学 旅游与地理科学学院, 昆明 650092; 2. 福建师范大学 地理科学学院, 福州 350007)

**摘要:** 利用贵州省1961-2013年逐日0 cm地面温度观测资料, 采用ArcGIS空间分析、线性趋势分析、小波分析、Mann-Kendall非参数统计检验法等对贵州省地温的空间分布、变化趋势、突变特点、周期变化等进行研究。结果表明: 平均地温、平均最低地温年际、季节空间分布大致从黔西北向黔东南随经度增加、海拔和纬度的降低而逐渐升高; 平均最高地温年际与秋、冬季空间分布大致从黔东北向黔西南随着经度、纬度的降低和海拔的升高而逐渐升高。平均地温与平均最低地温年际、季节变化均呈增温趋势, 尤以平均最低地温年际、季节增温趋势最显著; 平均最高地温年际与春、夏、秋季均呈增温趋势, 冬季呈缓慢下降趋势。平均地温、平均最高地温、平均最低地温年际、季节突变集中于20世纪90年代以来; 且均以春、秋季突变十分显著。平均地温、平均最高地温、平均最低地温年际、季节周期变化主要以长周期为主周期。年平均地温、年平均最低地温与海拔呈显著的负相关, 与经度呈显著的正相关, 而年平均最高地温则与纬度呈显著的负相关。

**关键词:** 贵州省; 地面温度; 时空变化; 周期变化

**中图分类号:** S159 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)02-0122-10

## Temporal and spatial variation characteristics of surface temperature in Guizhou during 1961-2013

CHENG Qingping<sup>1,2</sup>, WANG Ping<sup>1</sup>, TAN Xiaoi<sup>1</sup>

(1. School of Tourism and Geographical Sciences, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;

2. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** Using the daily 0 cm soil surface temperature data of Guizhou during 1961 to 2013, adopting the methods of ArcGIS spatial analysis, linear trend, wavelet analysis, and Mann-Kendall nonparametric test, we analyzed the spatial distribution, change trend, mutation characteristics, and variation period of the surface temperature in Guizhou. The results showed that the annual and seasonal spatial distribution of average surface temperature and average minimum surface temperature was roughly increasing from northwestern Guizhou to southeastern Guizhou along with the increase of longitude and the decrease of altitude and latitude. The annual, autumn, and winter spatial distribution of average maximum surface temperature was roughly increasing from the northeast to the southwest of Guizhou along with the decrease of latitude and longitude and the increase of altitude. The annual and seasonal changes of average surface temperature and average minimum surface temperature all showed a warming trend, which was especially prominent for the annual and seasonal changes of average minimum surface temperature. The annual, spring, summer, and autumn changes of average maximum surface temperature all showed a warming trend, but the winter change showed a slight downward trend. The annual and seasonal mutations of average surface temperature, average maximum surface temperature, and average minimum surface temperature concentrated in the 1990s, and the mutations were very significant in spring and autumn. The annual and seasonal variation periods of average surface temperature, average maximum surface temperature, and average minimum surface temperature were primarily long periods. The annual average surface temperature and annual average minimum surface temperature were both negatively correlated with the altitude and positively correlated with the longitude, while the annual average maximum surface temperature was negatively correlated with latitude.

收稿日期: 2017-04-18 修回日期: 2017-11-09 网络出版时间: 2018-01-30  
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180130.0905.002.html>  
基金项目: 国家自然科学基金(41261007)

**Fund:** National Natural Science Foundation of China(41261007)

**作者简介:** 程清平(1987-), 男, 云南昭通人, 主要从事气候变化与灾害风险评估研究。E-mail: 446925163@qq.com

**通讯作者:** 王平(1965-), 男, 云南昭通人, 副教授, 主要从事区域自然地理和自然环境保护研究。E-mail: ynwangping@163.com

**Key words:** Guizhou; surface temperature; temporal and spatial variation; periodic variation

地温是表征地表自然生态环境的一个重要物理量,对地表向大气长波能量的辐射能力具有决定作用,也是气候系统变化的一个重要参数<sup>[1,2]</sup>。地温是指地表面和以下不同深度处土壤温度的统称,包括地面温度(0 cm)、浅层地温(距离地面5 cm、10 cm、15 cm、20 cm)和深层地温(距离地面40 cm、80 cm、160 cm、320 cm)<sup>[3]</sup>。土壤温度是重要的土壤物理性质,其变化特征直接影响着土壤生物的生长发育、繁殖和分布,与农业生产和生态环境紧密相关<sup>[4]</sup>。农业是对气候变化反应最敏感的领域之一,气候变化会影响农业生产的结构和布局,也会对农作物的生长发育等产生影响。在气候变暖背景下,近地面层气温和各层地温升温速率是否一致,关系到利用气温数据评估气候变化对农作物影响的适用性<sup>[5]</sup>。此外,各种地温数据对林、牧、工程设施等均具有实际作用<sup>[6]</sup>。因此,对于地温的研究是十分有价值和有意义的工作。近年来,有不少学者采用回归分析方法、M-K非参数检验方法和反距离权重插值等方法对地温的变化趋势、周期变化、空间分布等做了研究,发现大部分地区地温升高趋势和周期变化特点明显,且在季节和空间上存在区域差异<sup>[7-12]</sup>。

目前,对于地温的研究主要集中在时间变化趋势特点上,对于空间分布特点研究较少,对于贵州地温的研究仅有杨平等<sup>[7]</sup>对黔东南州0~20 cm浅层地温的周期变化和突变特点进行过分析,而对贵州全省0 cm地温时空变化特征的研究未见报道。此外,对于空间分析方法上采用反距离权重插值方法未能体现特殊地形、地势影响下地温的分布特点。本文利用贵州省33个国家基准/基本气象站0 cm地温观测资料,通过线性趋势分析、Mann-Kendall非参数检验、小波分析和ArcGIS地统计中的协同克里金插值等方法,分析贵州省地温时间变化趋势、突变特征、周期变化和空间分布特点;可为完善和全面认识贵州省气候变化特点,指导农业生产、护林防火、生态环境保护等提供有关科学依据。

## 1 研究区域概况

贵州省(103°40′-109°40′E, 24°37′-29°24′N)地处中国西南云贵高原东部,地势西高东低,地貌以高原、山地为主,平均海拔约1 100 m,国土面积176 167 km<sup>2</sup>,喀斯特地貌占全省总面积的73%<sup>[13]</sup>,

属亚热带湿润季风气候,年均气温15℃左右,年降水800~1 700 mm,光照适中,雨热同季,无霜期270 d左右<sup>[14]</sup>。地带性植被以常绿阔叶林为主,土壤以黄壤为主,次为石灰土等。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

逐日平均地温、平均最高地温、平均最低地温来源于中国气象局国家气象信息中心(<http://www.nmic.gov.cn/>),DEM高程数据为90 m分辨率的SRTM,来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),研究站点分布见图1。各站点数据均经过严格的质量控制,包括极值检验、时间一致性检验,最终选择数据完整的1961年1月1日-2014年2月28日逐日0 cm地温数据,利用泰森多边形方法获得贵州省地温平均值(其中,思南、习水平均最高地温、平均最低地温缺1961年,松桃平均最低地温缺1961-1963年,则该站该年不参与计算)。按春季(3月-5月)、夏季(6月-8月)、秋季(9月-11月)、冬季(12月-翌年2月)统计各季平均地温。

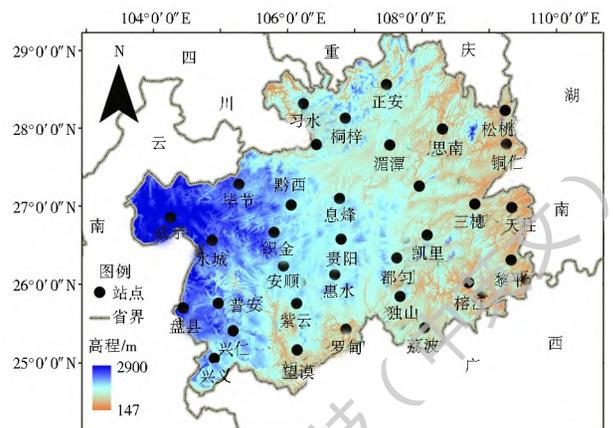


图1 贵州气象站点分布

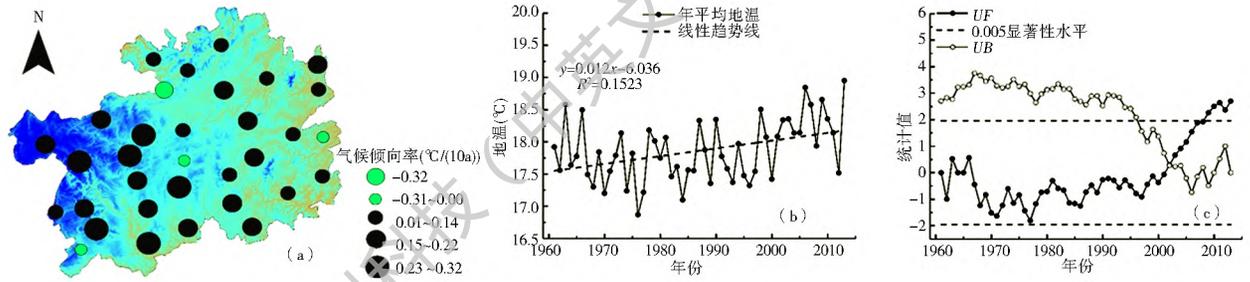
Fig. 1 Location of meteorological stations in Guizhou Province

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 地温倾向率

$x_i$ 表示样本量为 $n$ 的地温变量,用 $t_i$ 表示 $x_i$ 所对应的时间,建立 $x_i$ 和 $t_i$ 之间的一元线性回归方程: $x_i = a + bt_i, i = 1, 2, \dots, n$ 。式中: $a$ 为常数项(截距); $b$ 为地温变量的倾向率, $b > 0$ 表示直线递增, $b < 0$ 表示直线递减, $b \times 10$ 表示每10 a的变化率,单位为℃。





1961-2013年贵州年平均地温气候倾向率空间分布(a), 变化趋势(b)和突变图(c)

Fig. 3 The spatial distribution of climate tendency rate (a), change trend (b) and mutation test (c) for annual average surface temperature in Guizhou from 1961 to 2013

表1 1961-2013年贵州省地温突变点

Tab. 1 Surface temperature mutation points in Guizhou from 1961 to 2013

站点	平均地温	平均最高地温	平均最低地温
桐梓	1998 <sup>*</sup> / 0 / 1989 <sup>*</sup>	2005 / 0 / 1989	1997 <sup>**</sup> / 1994 <sup>***</sup> / 1993 <sup>***</sup>
罗甸	1999 <sup>*</sup> / 1999 <sup>*</sup> / 1997 <sup>**</sup>	2001 / 2001 <sup>*</sup> / 1997 <sup>*</sup>	1993 <sup>**</sup> / 1993 <sup>*</sup> / 1993 <sup>***</sup>
思南	2006 / 2002 <sup>*</sup> / 2002 <sup>*</sup>	1966 <sup>***</sup> / 2003 <sup>**</sup> / 1981 <sup>*</sup>	1993 <sup>**</sup> / 1997 <sup>***</sup> / 1993 <sup>***</sup>
安顺	1996 <sup>*</sup> / 1986 <sup>**</sup> / 1986 <sup>**</sup>	1998 <sup>*</sup> / 1986 <sup>**</sup> / 1986 <sup>**</sup>	1994 <sup>**</sup> / 1979 <sup>*</sup> / 1993 <sup>**</sup>
仁怀	1964 <sup>**</sup> / 1971 <sup>***</sup> / 1969 <sup>**</sup>	1966 <sup>**</sup> / 1971 <sup>***</sup> / 1969 <sup>**</sup>	1966 <sup>*</sup> / 1971 <sup>***</sup> / 1969 <sup>**</sup>
望谟	2000 <sup>**</sup> / 2000 <sup>***</sup> / 1997 <sup>**</sup>	2003 <sup>**</sup> / 2003 <sup>**</sup> / 1997 <sup>**</sup>	1998 <sup>***</sup> / 1998 <sup>**</sup> / 1997 <sup>**</sup>
松桃	1966 / 0 / 2004	1978 <sup>**</sup> / 1978 <sup>**</sup> / 1978 <sup>*</sup>	2001 <sup>**</sup> / 1998 <sup>*</sup> / 1997 <sup>*</sup>
盘县	1981 / 0 / 1989	2006 <sup>*</sup> / 1998 <sup>*</sup> / 1997 <sup>**</sup>	1974 / 1978 <sup>*</sup> / 1978
织金	1998 <sup>**</sup> / 1998 <sup>***</sup> / 1996 <sup>***</sup>	2006 <sup>**</sup> / 2001 <sup>**</sup> / 1997 <sup>*</sup>	1997 <sup>**</sup> / 1979 <sup>***</sup> / 1979 <sup>***</sup>
紫云	2001 <sup>**</sup> / 2001 <sup>***</sup> / 2000 <sup>**</sup>	1966 <sup>*</sup> / 2001 <sup>*</sup> / 2001 <sup>*</sup>	1987 <sup>**</sup> / 1979 <sup>***</sup> / 1987 <sup>**</sup>
湄潭	1997 <sup>**</sup> / 2001 <sup>**</sup> / 1997 <sup>**</sup>	2009 / 0 / 1997	1994 <sup>**</sup> / 1994 <sup>***</sup> / 1993 <sup>***</sup>
三穗	2002 <sup>*</sup> / 2002 <sup>*</sup> / 1997 <sup>*</sup>	2001 <sup>**</sup> / 2001 <sup>**</sup> / 1997 <sup>**</sup>	1979 / 1979 <sup>*</sup> / 1996
普安	2004 <sup>*</sup> / 2004 <sup>*</sup> / 2000 <sup>*</sup>	2001 <sup>*</sup> / 2000 <sup>*</sup> / 2000 <sup>*</sup>	2000 <sup>***</sup> / 2000 <sup>*</sup> / 2000 <sup>**</sup>
息烽	1989 <sup>*</sup> / 0 / 1985 <sup>**</sup>	2004 / 0 / 1964	1998 <sup>**</sup> / 2004 <sup>*</sup> / 1993 <sup>**</sup>
习水	2005 <sup>*</sup> / 2002 <sup>**</sup> / 1997 <sup>*</sup>	2005 / 0 / 2000	1998 <sup>***</sup> / 2003 <sup>*</sup> / 1978 <sup>**</sup>
惠水	1997 <sup>**</sup> / 1997 <sup>*</sup> / 1986 <sup>**</sup>	1997 <sup>**</sup> / 1997 <sup>**</sup> / 1992 <sup>**</sup>	1981 <sup>***</sup> / 1972 <sup>*</sup> / 1986 <sup>**</sup>
兴仁	2004 <sup>***</sup> / 2004 <sup>*</sup> / 1997 <sup>**</sup>	2005 <sup>*</sup> / 1997 <sup>*</sup> / 1997 <sup>**</sup>	2000 <sup>**</sup> / 1997 <sup>*</sup> / 1997 <sup>*</sup>
天柱	1964 <sup>*</sup> / 1988 <sup>*</sup> / 1988	1971 <sup>**</sup> / 1971 <sup>***</sup> / 1988 <sup>**</sup>	1991 <sup>**</sup> / 1997 <sup>***</sup> / 1996 <sup>**</sup>
威宁	2001 <sup>**</sup> / 0 / 1997 <sup>**</sup>	2001 <sup>***</sup> / 2001 <sup>*</sup> / 1997 <sup>***</sup>	2001 <sup>***</sup> / 2001 <sup>*</sup> / 1997 <sup>**</sup>
余庆	2001 <sup>**</sup> / 2001 <sup>***</sup> / 1997 <sup>**</sup>	2001 <sup>*</sup> / 2001 <sup>***</sup> / 1997 <sup>*</sup>	1997 <sup>**</sup> / 1997 <sup>*</sup> / 1993 <sup>***</sup>
黔西	2002 <sup>**</sup> / 2002 <sup>***</sup> / 1986 <sup>**</sup>	2006 <sup>**</sup> / 2001 <sup>**</sup> / 2001 <sup>**</sup>	1988 <sup>**</sup> / 1979 <sup>***</sup> / 1979 <sup>**</sup>
黎平	2002 <sup>*</sup> / 2002 <sup>*</sup> / 1997 <sup>*</sup>	2007 / 2002 <sup>**</sup> / 2004	1998 <sup>**</sup> / 1998 <sup>*</sup> / 1998 <sup>**</sup>
都匀	1970 <sup>*</sup> / 1978 <sup>*</sup> / 1977 <sup>*</sup>	1976 / 1978 <sup>*</sup> / 2004	1970 <sup>**</sup> / 1977 <sup>*</sup> / 1977 <sup>*</sup>
毕节	2002 <sup>*</sup> / 2002 <sup>*</sup> / 1997 <sup>**</sup>	2005 <sup>*</sup> / 2002 <sup>**</sup> / 2002 <sup>**</sup>	2000 <sup>**</sup> / 2000 <sup>*</sup> / 2000 <sup>*</sup>
贵阳	1972 <sup>*</sup> / 0 / 1983 <sup>*</sup>	1972 <sup>***</sup> / 1988 <sup>*</sup> / 1985 <sup>*</sup>	2005 / 0 / 2004
凯里	1998 <sup>***</sup> / 1998 <sup>*</sup> / 1997 <sup>*</sup>	2006 / 2002 <sup>*</sup> / 2001	1992 / 1998 <sup>**</sup> / 1996 <sup>***</sup>
铜仁	2006 / 2003 <sup>*</sup> / 2003 <sup>*</sup>	1966 <sup>***</sup> / 1988 <sup>*</sup> / 1988 <sup>*</sup>	1996 <sup>**</sup> / 1997 <sup>*</sup> / 1996 <sup>**</sup>
兴义	1964 <sup>*</sup> / 2001 <sup>*</sup> / 2001	1964 <sup>*</sup> / 2001 <sup>*</sup> / 2001 <sup>*</sup>	2007 / 2002 <sup>*</sup> / 2002 <sup>*</sup>
荔波	1998 <sup>**</sup> / 1998 <sup>***</sup> / 1997 <sup>**</sup>	1971 <sup>*</sup> / 1997 <sup>*</sup> / 1997	1998 <sup>**</sup> / 1998 <sup>*</sup> / 1998 <sup>**</sup>
独山	2001 <sup>**</sup> / 2001 <sup>**</sup> / 1997 <sup>*</sup>	1969 <sup>*</sup> / 1998 <sup>**</sup> / 1998	2002 <sup>**</sup> / 2002 <sup>*</sup> / 2001 <sup>***</sup>
正安	1998 / 0 / 1997	1967 <sup>*</sup> / 1991 <sup>*</sup> / 1971	1994 <sup>**</sup> / 1994 <sup>***</sup> / 1994 <sup>**</sup>
榕江	1977 <sup>**</sup> / 1977 <sup>*</sup> / 1977 <sup>**</sup>	2007 <sup>*</sup> / 2002 <sup>**</sup> / 2002 <sup>**</sup>	1983 <sup>**</sup> / 1989 <sup>***</sup> / 1989 <sup>**</sup>
水城	2001 <sup>**</sup> / 2001 <sup>***</sup> / 1997 <sup>**</sup>	2005 <sup>*</sup> / 2000 <sup>**</sup> / 2000 <sup>**</sup>	2002 <sup>**</sup> / 2002 <sup>*</sup> / 2002 <sup>**</sup>

注：“\*”通过0.05显著性检验，“\*\*”通过0.01显著性检验，“\*\*\*”通过0.001显著性检验，粗体为突变之后呈下降趋势的年份，0为没有检测到突变；表中依次为M-K/滑动t/pettit法检测突变年份。

从图 3(b) 可知, 贵州年平均地温呈显著的升温趋势, 其倾向率为  $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{a})$  ( $\alpha < 0.01$ )。四季平均地温变化趋势与年一致(图略), 均呈升温趋势, 其中秋季( $0.161\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{a})$ ,  $\alpha < 0.01$ ) 升温趋势显著, 而春( $0.112\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{a})$ ,  $\alpha > 0.05$ )、夏( $0.081\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{a})$ ,  $\alpha > 0.05$ )、冬季( $0.128\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{a})$ ,  $\alpha > 0.05$ ) 升温趋势不显著。各站点季节变化与年际一致, 升温与降温趋势均有所表现, 只是在区域上和显著性水平上表现不同。

年平均地温在顺序列  $UF$  和逆序列  $UB$  之间于 2002 年交于一点, 突变时间区域为 2009–2013 年, 结合滑动  $t$  和 pettitt 法检验突变点分别为 2002 年 ( $\alpha < 0.01$ ) 和 1997 年 ( $\alpha < 0.01$ ), 可见 2002 为年平均地温显著突变点(图 3(c))。春、夏、秋、冬季地温与年平均地温一致, 均呈突变升温(图略), M-K 法、滑动  $t$  法(未检测到显著突变点用 0 表示)、pettitt 法检测突变点分别为 2004 年 ( $\alpha > 0.05$ ) / 1997 年 ( $\alpha < 0.05$ ) / 1997 年 ( $\alpha < 0.05$ )、2009 年 ( $\alpha > 0.05$ ) / 2004 年 ( $\alpha < 0.05$ ) / 2004 年 ( $\alpha > 0.1$ )、1997 年 ( $\alpha < 0.05$ ) / 1997 年 ( $\alpha < 0.05$ ) / 1997 年 ( $\alpha < 0.01$ )、1990

年 ( $\alpha > 0.05$ ) / 0 / 1985 年 ( $\alpha > 0.1$ ); 可见, 秋季 1997 年突变最显著, 其次是春季 1997 年, 夏、冬季突变不显著。在 0.05 的显著性水平下各站点年际、季节突变特征与整个贵州一致, 主要集中突变于 20 世纪 90 年代以来(表 1); 3 种方法均以 M-K 法和 pettitt 法检测的突变年份较一致。

### 3.1.3 年际、季节平均地温周期分析

从图 4(a) 可知, 年平均地温存在 2~5 a 左右的周期变化, 且贯穿整个研究时段, 正负相位交替出现。6~9 a 左右的短周期变化主要发生在 1970–1980 年代; 而 20~30 a 左右的长周期变化, 主要发生在 1970 年代以来。从图 4(b) 可知, 年平均地温在 24 a 时间尺度上, 振荡最强, 振幅最大, 为年平均地温主周期; 此外, 还存在 4 a 和 8 a 的短周期变化。各站点年际变化主周期中盘县、习水、惠水、兴仁、威宁、兴义、正安站以短周期变化为主周期, 其余站点均以长周期变化为主周期(表 2)。从不同季节来看(图略), 春、冬季主要以 7 a 短周期变化为主周期; 同时, 还存在一致的 4 a 短周期变化。夏、秋季均以长周期变化为主周期, 分别为 27 a、23 a; 同时还存

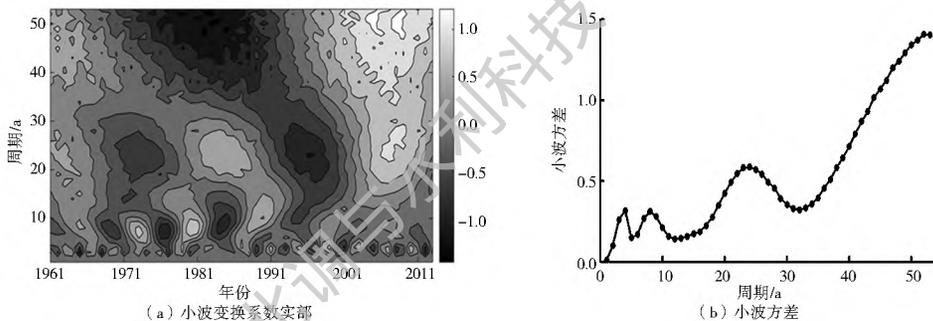


图 4 1961–2013 年贵州年平均地温小波变换系数实部(a) 和小波方差(b)

Fig. 4 The wavelet coefficients (a) contours and wavelet variance (b) of annual average surface temperature in Guizhou from 1961 to 2013

表 2 1961–2013 年贵州地温小波方差主周期

Tab. 2 The wavelet variance main period of surface temperature in Guizhou from 1961 to 2013

站点	平均地温	平均最高地温	平均最低地温	站点	平均地温	平均最高地温	平均最低地温
桐梓	13	14	15	天柱	22	12	28
罗甸	25	26	26	威宁	9	8	28
思南	24	24	26	余庆	22	26	27
安顺	21	20	8	黔西	25	26	26
仁怀	23	21	23	黎平	24	23	26
望谟	28	30	26	都匀	20	38	8
松桃	16	29	20	毕节	23	22	24
盘县	9	11	35	贵阳	20	21	24
织金	25	25	28	凯里	26	23	29
紫云	21	47	28	铜仁	25	25	28
湄潭	25	23	28	兴义	9	25	8
三穗	28	26	23	荔波	26	38	28
普安	31	38	28	独山	19	40	23
息烽	12	27	28	正安	8	25	28
习水	8	44	29	榕江	22	20	28
惠水	8	3	30	水城	24	24	8/32
兴仁	8	3	28				

在一致的 3 a 短周期变化。各站点季节变化主周期中春季有 10 个站点以长周期变化为主周期, 集中在 16~22 a 之间; 23 个站点以短周期变化为主周期, 集中在 2~7 a 之间。夏季有 19 个站点以长周期变化为主周期, 集中在 14~25 a 之间; 14 个站点以短周期变化为主周期, 集中在 2~3 a 之间。秋季有 5 个站点以长周期变化为主周期, 集中在 16~26 a 之间; 28 个站点以短周期变化为主周期, 集中在 3~8 a 之间。冬季有 25 个站点以长周期变化为主周期, 集中在 11~25 a 之间; 8 个站点以短周期变化为主周期, 集中在 3~4 a 之间。

### 3.2 年际、季节平均最高地温

#### 3.2.1 年际、季节平均最高地温空间分布

贵州年平均最高地温呈现出从黔东北向黔西南随着纬度和经度的降低和海拔的升高而逐渐升高的

趋势(图5),黔西南高于黔东北,黔西高于黔东,其值变化范围在26.9~37.5℃之间,1961-2013年贵州平均值为31.1℃;同时,也表现出明显的区域差异。年平均最高地温最大值出现在黔西南的望谟站(37.3℃),最小值为黔西北的习水站(26.9℃)。春、夏季最小值均出现在黔东南的独山站(春季为27.9℃,夏季为38.1℃),而不是纬度最北端的正安站(春季为30.3℃,夏季为45.2℃),春季最大值为黔西南的兴义站(39.3℃),夏季最大值为黔西南的罗甸站(46.7℃);秋、冬季最小值与年平均最高地温最小值一致均出现在黔西北的习水站(秋季为26.0℃,冬季为13.1℃),最大值也与年平均最高地温最大值一致为黔西南的望谟站(秋季为35.9℃,冬季为24.4℃)。

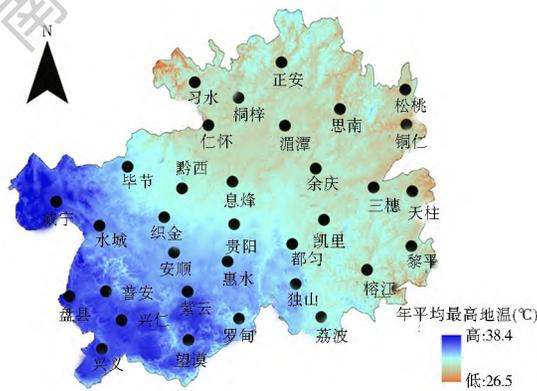


图5 1961-2013年贵州年平均最高地温空间分布  
Fig. 5 The spatial distribution of annual average maximum surface temperature in Guizhou from 1961 to 2013

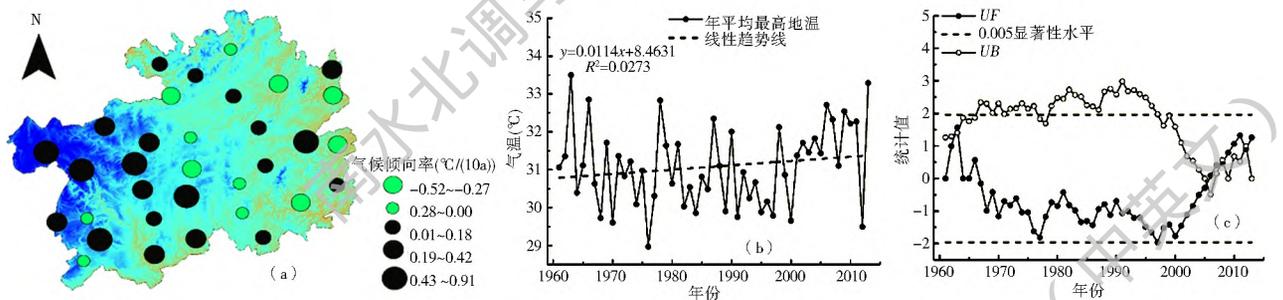


图6 1961-2013年贵州年平均最高地温气候倾向率空间分布(a),变化趋势(b)和突变图(c)

Fig. 6 The spatial distribution of climate tendency rate (a), change trend (b) and mutation test (c) for annual average maximum surface temperature in Guizhou from 1961 to 2013

pettitt法检验一致的突变点为2000年( $\alpha < 0.05$ ),可见,2000年为年平均最高地温突变点。春、夏、秋、冬季M-K法、滑动 $t$ 法、pettitt法检测突变点分别为2005年( $\alpha > 0.05$ )/2000年( $\alpha < 0.05$ )/2000年( $\alpha < 0.05$ )、2010年( $\alpha > 0.05$ )/2002年( $\alpha < 0.05$ )/2002年( $\alpha > 0.1$ )、1998年( $\alpha < 0.05$ )/1998年( $\alpha < 0.05$ )/1997年( $\alpha > 0.05$ )、1965年( $\alpha > 0.05$ )/0/1997年( $\alpha > 0.1$ );可见,春季突变于2000年、秋季突变于1998年较显著,夏、冬季不显著。在0.05的显著性水平下各站点年际、季节突变特征与整个贵

### 3.3.2 年际、季节平均最高地温变化趋势及突变特征

从图6(a)可知,年平均最高地温在黔中、东部降温与升温站点均有分布,以降温站点较升温站点多;而海拔较高的西部以增温趋势为主(图6(a))。同时也存在普安站( $-0.029$ ℃/(10a), $\alpha > 0.05$ )、兴义站( $-0.006$ ℃/(10a), $\alpha > 0.05$ )2个略微呈下降趋势的站点。33个站点中,有12个站点呈降温趋势,且主要位于贵州东部,但仅有天柱站( $-0.523$ ℃/(10a), $\alpha < 0.001$ )、榕江站( $-0.399$ ℃/(10a), $\alpha < 0.01$ )、贵阳站( $-0.370$ ℃/(10a), $\alpha < 0.01$ )、思南站( $-0.06$ ℃/(10a), $\alpha < 0.05$ )降温趋势显著;其余21个站点均呈升温趋势,其中有11个站点通过0.05及以上显著性检验,10个站点未通过显著性检验。1961-2013年贵州年平均最高地温呈升温趋势(图6(b)),其倾向率为0.114℃/(10a),未通过0.05的显著性检验。从季节变化来看,春季(0.164℃/(10a))、夏季(0.088℃/(10a))、秋季(0.219℃/(10a))与年平均最高地温一致呈升温趋势,而冬季( $-0.009$ ℃/(10a))呈略微的降温趋势,但四季均未通过显著性检验。各站点季节变化与年际变化表现特征较一致,升温与降温趋势并存,只是在区域上和显著性水平上有所差别。

年平均最高地温在正序列 $UF$ 和逆序列 $UB$ 之间于2008年交于一点,但未突破临界线,因此,M-K法未检测出显著突变点(图6(c));结合滑动 $t$ 和

州表现较一致,主要集中突变于1990年代以来(表1);3种方法均以M-K法和pettitt法检测的突变年份较一致。

### 3.2.3 年际、季节平均最高地温周期分析

从图7(a)年平均最高地温小波变换系数实部得知,年平均最高地温在2~5a左右处,正负相位交替变换且贯穿整个时段;6~9a左右的周期变化主要发生在1970-1980年代;此外,还存在20~30a左右贯穿整个时段的长周期变化。从图7(b)小波方差得知,年平均最高地温在23a年的长时间尺度

上峰值最大, 振幅最强为年平均最高地温主周期; 此外, 还存在 3 a、8 a 的短周期变化。各站点主周期中除惠水、兴仁、威宁站以短周期变化为主周期外, 其余站点均以长周期变化为主周期(表 2)。从四季来看, 春、夏季以长周期变化为主周期, 分别为 22 a 和 26 a; 同时, 春季还存在一致的 4 a 短周期变化, 夏季还存 3 a、5 a 的短周期变化。秋、冬季主要以短变化周期为主, 分别为 5 a 和 8 a, 此外, 冬季还存在 4 a 短周期变化。各站点季节变化主周期中春季有 18

个站点以长周期变化为主周期, 集中在 15~ 26 a 之间; 15 个站点以短周期变化为主周期, 集中在 2~ 7 a 之间。夏季有 29 个站点以长周期变化为主周期, 集中在 11~ 26 a 之间; 4 个站点以 3 a 短周期变化为主周期。秋季有 17 个站点以长周期变化为主周期, 集中在 11~ 27 a 之间; 16 个站点以短周期变化为主周期, 集中在 3~ 10 a 之间。冬季有 28 个站点以长周期变化为主周期, 集中在 11~ 27 a 之间; 5 个站点以短周期变化为主周期, 集中在 4~ 7 a 之间。

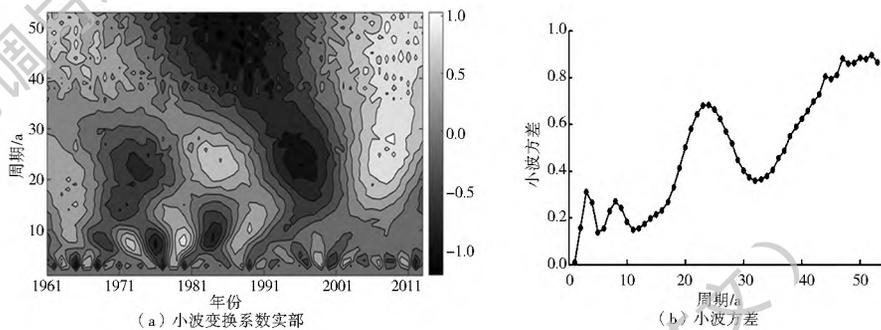


图 7 1961- 2013 年贵州年平均最高地温小波变换系数实部(a) 和小波方差(b)

Fig. 7 The wavelet coefficients (a) contours and wavelet variance (b) of annual average maximum surface temperature in Guizhou from 1961 to 2013

### 3.3 年平均最低地温

#### 3.3.1 年际、季节平均最低地温空间分布

从全省来看, 年平均最低地温大致从黔西北向黔东南随经度的增加、海拔和纬度的降低而逐渐升高(图 8), 与年平均地温分布较一致, 其值变化范围在 6.1~ 15.9 °C 间, 1961- 2013 年贵州平均值为 11.7 °C。年平均最低地温低值中心位于黔西的威宁站(6.1 °C), 高值中心位于黔西南的望谟站(15.5 °C)。四季平均最低地温空间分布与年平均最低地温空间分布一致, 其最小值均位于黔西的威宁站(春季 5.8 °C, 夏季 13.0 °C, 秋季为 7.2 °C, 冬季为 -1.6 °C); 最大值与年平均最低地温不同, 夏季最大值为榕江站(23.2 °C), 春、秋、冬季最大值均为罗甸站(春季 16.2 °C, 秋季 16.7 °C, 冬季 7.6 °C)。

#### 3.3.2 年际、季节平均最低地温变化趋势及突变特征

从年平均最低地温变化趋势空间分布(图 9(a)) 来看, 所研究站点中除仁怀(-0.172 °C/(10a),  $\alpha < 0.05$ ) 和盘县站(-0.004 °C/(10a),  $\alpha > 0.05$ ) 呈降温趋势和贵阳(0.052 °C/(10a))、三穗(0.06 °C/(10a)) 和兴义(0.027 °C/(10a)) 升温趋势不明显外。其余 28 个站点均通过 0.05 及以上显著性检验, 增温趋势十分显著。从年变化趋势来看, 贵州 1961- 2013 年年平均最低地温呈极其显著的增温趋势(图 9(b)), 其倾向率为 0.24 °C/(10a) ( $\alpha < 0.001$ ); 四季与年平均最低地温一致呈极其显著的增温趋势, 以冬季(0.302 °C/(10a),  $\alpha < 0.001$ ) 增温幅度最大, 其次是秋季(0.22 °C/(10a),  $\alpha < 0.001$ ) 和夏季(0.202 °C/(10a),  $\alpha < 0.001$ ), 春季(0.179 °C/(10a),  $\alpha < 0.001$ ) 增温幅度最小。各站点季节变化中除秋季均呈升温趋势外, 春季、夏季、冬季与年一致, 升温与降温趋势均有所表现, 只是在站点和显著性水平上有所差别。

从突变特点来看, 年平均最低地温在顺序列 *UF* 和逆序列 *UB* 之间于 1996 年和 1997 年交于一点(图 9(c)), 并于 2002- 2013 年突破 0.001 的临界线, 突变增温趋势极其显著; 结合滑动 *t* 和 petit 法检验突变点分别为 1997 年( $\alpha < 0.05$ ) 和 1993 年( $\alpha < 0.001$ ); 可见, 显著突变点为 1997 年。春、夏、秋、冬季平均最低地温与年一致, 呈突变升

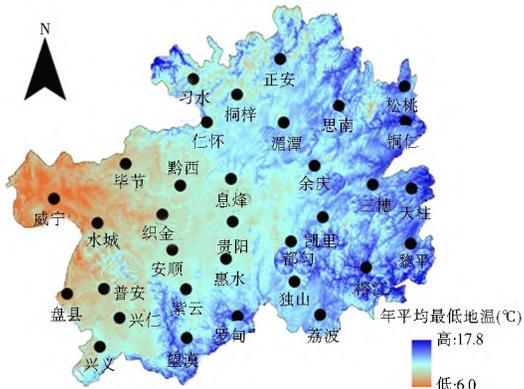


图 8 1961- 2013 年贵州年平均最低地温分布

Fig. 8 The spatial distribution of annual average minimum surface temperature in Guizhou from 1961 to 2013

温趋势, M-K法、滑动  $t$  法、pettitt 法检测突变点分别为 2003 年 ( $\alpha < 0.05$ ) / 2003 年 ( $\alpha < 0.05$ ) / 1996 年 ( $\alpha < 0.001$ )、1990 年 ( $\alpha < 0.01$ ) / 1977 年 ( $\alpha < 0.01$ ) / 1977 年 ( $\alpha < 0.001$ )、2002 年 ( $\alpha < 0.01$ ) / 2002 年 ( $\alpha < 0.05$ ) / 2002 年 ( $\alpha < 0.05$ )、1988 年 ( $\alpha < 0.01$ ) / 0 / 1975 年 ( $\alpha < 0.01$ ); 春季一致突变点为

2003 年, 夏季一致突变点为 1977 年, 秋季一致突变点为 2002 年, 冬季未有一致突变点。在 0.05 的显著性水平下, 各站点年际、季节突变点与整个贵州一致(表 1), 突变点主要集中在 20 世纪 90 年代以来, 3 种方法均以 M-K 法和 pettitt 法检测的突变年份较一致。

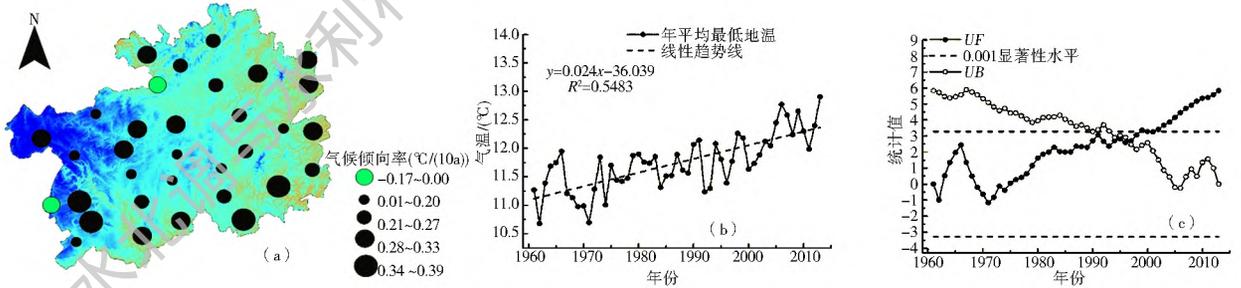


图 9 1961-2013 年贵州年平均最低地温气候倾向率空间分布(a), 变化趋势(b)和突变图(c)

Fig. 9 The spatial distribution of climate tendency rate (a), change trend (b) and mutation test (c) for annual average minimum surface temperature in Guizhou from 1961 to 2013

### 3.2.3 年际、季节平均最低地温周期分析

从图 10(a) 知, 年平均最低地温存在 5~10 a 左右的短周期变化, 正负相位交替出现, 且贯穿整个研究时段; 此外, 还存在 25~30 a 左右的长周期变化。从小波方差(图 10(b)) 知, 年平均最低地温在 26 a 的长时间尺度上振荡最强, 为年平均最低地温主周期, 同时还存在 8 a 短周期变化。各站点年际变化主周期中除安顺水、都匀、兴义站以短周期变化为主周期外, 其余站点均以长周期变化为主周期(表 2)。春、夏、秋、冬季周期变化与年一致, 均以长周期变化为主周期, 分别为 29 a、28 a、26 a、26 a; 此外, 春季还存在 4 a 短周期和 14 a 长周期变化, 夏季还存在

4 a、8 a 短周期和 16 a 长周期变化; 秋、冬季还存在一致的 8 a 短周期变化。各站点季节变化主周期中春季有 13 个站点以长周期变化为主周期, 集中在 15~26 a 之间; 20 个站点以短周期变化为主周期, 集中在 2~8 a 之间。夏季有 19 个站点以长周期变化为主周期, 集中在 15~27 a 之间; 14 个站点以短周期变化为主周期, 集中在 2~8 a 之间。秋季有 27 个站点以长周期变化为主周期, 集中在 14~26 a 之间; 6 个站点以短周期变化为主周期, 集中在 3~9 a 之间。冬季有 15 个站点以长周期变化为主周期, 集中在 11~25 a 之间; 18 个站点以短周期变化为主周期, 集中在 2~8 a 之间。

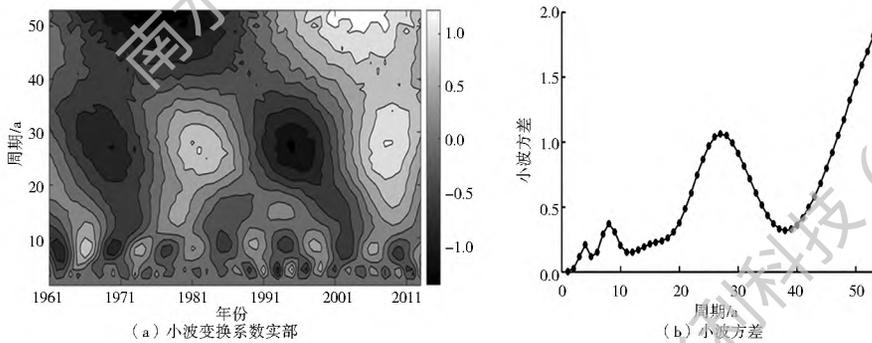


图 10 1961-2013 年贵州年平均最低地温小波变换系数实部(a)和小波方差(b)

Fig. 10 The wavelet coefficients (a) contours and wavelet variance (b) of annual average minimum surface temperature in Guizhou from 1961 to 2013

## 4 讨论

Shao 等<sup>[20]</sup>指出, 气温的变化与地形、海拔、经度、纬度有关, 影响程度从大小表现为海拔 > 纬度 > 地形 > 经度的形式。贵州年平均地温与经度、纬度、海拔相关系数分别为 0.424 ( $\alpha < 0.05$ )、-0.328

( $\alpha > 0.05$ )、-0.750 ( $\alpha < 0.01$ ), 影响大小表现为海拔 > 经度 > 纬度的特点; 年平均最高地温与经度、纬度、海拔的相关性系数分别为 -0.247 ( $\alpha > 0.05$ )、-0.601 ( $\alpha < 0.01$ )、-0.064 ( $\alpha > 0.05$ ), 影响大小表现为纬度 > 经度 > 海拔的特点; 年平均最低地温与经度、纬度、海拔的相关性系数分别为 0.602 ( $\alpha <$

0.01)、-0.184( $\alpha > 0.05$ )、-0.875( $\alpha < 0.01$ ),影响大小表现为海拔>经度>纬度的特点;可见经度和海拔对年平均地温和年平均最低地温有显著的影响。而年平均最高地温与纬度密切相关,与经度和海拔相关性不明显。此外,年平均地温、年平均最高地温、年平均最低地温的空间分布格局还与大气环流有密切的关系<sup>[21-22]</sup>,尤其是冬半年昆明准静止锋(滇黔准静止锋)止锋在东、西部控制时间的长短和影响强度的空间差异<sup>[23-24]</sup>。贵州年平均地温、年平均最高地温、年平均最低地温均以21世纪以来增温最为显著,与黔东南州地温的变化趋势一致<sup>[7]</sup>。土壤温度是重要的土壤物理性质,其变化特征直接影响着土壤生物的生长发育、繁殖和分布,与农业生产和生态环境紧密相关<sup>[4]</sup>,因此贵州地温呈显著增温这一变化趋势,可能会对农、林、牧和生态环境等造成不同影响,是十分有必要关注的问题。

## 5 结论

(1) 贵州年平均地温、年平均最低地温大致从黔西北向黔东南随着经度的增加、纬度和海拔的降低而逐渐升高,黔南高于黔北,黔东南高于黔西北,黔东高于黔西;年平均最高地温从黔东北向黔西南随着纬度和经度的减少和海拔的升高而逐渐升高。四季平均地温和平均最低地温空间分布与年际分布一致。秋、冬季平均最高地温与年平均最高地温一致,春、夏季有所不同。

(2) 贵州年平均地温、年平均最高地温、年平均最低地温整体均呈增温趋势。空间分布上表现为海拔较高的黔西地区年平均地温和年平均最低地温升温幅度大,同时也存在降温区域。海拔较低的黔中、东部地区年平均地温升温幅度小且存在降温区域;而年平均最低地温升温幅度大,同时也存在降温区域。年平均最高地温呈现海拔较高的黔西地区以升温为主,海拔较低的黔中、东部地区以降温为主。年平均地温、年平均最高地温、年平均最低地温四季变化趋势与年际变化趋势较一致,升温与降温趋势并存,只是在区域上有所不同。年平均地温与年平均最高地温均以秋季增温最为显著,年平均最低地温以冬季增温最为显著。各站点季节变化趋势中年平均地温和年平均最高地温均以秋季升温趋势较显著;年平均最低地温四季升温趋势均较显著。

(3) 贵州年平均地温、年平均最高地温、年平均最低地温均发生显著的突变增温,突变点分别为2002年、2000年、1997年;年平均地温、年平均最高地温、年平均最低地温均以春、秋季突变十分显著,

同时年平均最低地温夏季突变也十分显著。

(4) 贵州年平均地温、年平均最高地温、年平均最低地温及四季地温均以长周期变化为主周期,长周期变化集中在10~44a之间,短周期变化集中在2~10a之间。各站点年平均地温、年平均最高地温、年平均最低地温年际、季节变化主周期也主要以长周期变化为主,长周期主要集中在10~28a,短周期主要集中在2~9a。

## 参考文献(References):

- [1] 李崇银. 气候动力学引论[M]. 北京: 气象出版社, 1995: 290-296. (LI C Y. Introduction of Climatic Dynamics[M]. Beijing: Meteorological Press, 1995: 290-296. (in Chinese))
- [2] WANG M Y, LU D R. Diurnal and seasonal variation of clear sky land surface temperature of several representative land surface types in China retrieved by GMS-5[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2006, 20(4): 475-488.
- [3] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 85-89. (China Meteorological Administration. Ground meteorological observation standard[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003: 85-89. (in Chinese))
- [4] 周绍毅, 劳炜, 苏志, 等. 1961-2010年广西浅层地温变化特征[J]. 西南农业学报, 2012, 25(4): 1372-1375. (ZHOU S Y, LAO W, SU Z, et al. Variation features of fleet soil temperature in Guangxi from 1961 to 2010[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2012, 25(4): 1372-1375. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4829.2012.04.051.
- [5] 陈超, 周广胜. 1961-2010年阿拉善左旗气温和地温的变化特征分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(1), 91-102. (CHEN C, ZHOU G S. Characteristics of air temperature and ground temperature in Alxa Left Banner from 1961 to 2010[J]. Journal of natural resource, 2014, 29(1), 91-102. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.2014.01.009.
- [6] 戴加洗. 青藏高原气候[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 142-15. (DAI J X. The climate of Qinghai Tibet Plateau[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990: 142-15. (in Chinese))
- [7] 杨平, 陈少华, 顾欣. 近50年黔东南浅层地温时空变化特征分析[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2012, 37(11): 54-58. (YANG P, CHEN S H. On temporal and spatial characteristics of shallow geothermal in Southeast Guizhou in the past fifty years[J]. Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition), 2012, 37(11): 54-58. (in Chinese)). DOI: 10.3969/j.issn.1000-5471.2012.11.012.
- [8] 李帅, 王萍, 陈莉, 等. 黑龙江省春季浅层(0-20cm)地温变化特征及预测[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 55-62. (LI S, WANG P, CHEN L, et al. Variation features and prediction of the top soil(0-20cm) ground temperature of spring in Heilongjiang Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(1): 55-62. (in Chinese)) DOI: 10.7552/j.issn.1000-0240.2014.0007.

- [9] 杨晓玲, 丁文魁, 马中华, 等. 石羊河流域中下游浅层地温变化及其对气温变化的响应[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1401-1411. (YANG X L, DING W K, MA Z H, et al. Change in shallow soil temperature and its response to change in air temperature in middle and lower reaches of Shiyang River Basin [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(6): 1401-1411. (in Chinese)) DOI: 10.11766/trxb201410290547.
- [10] 陈超, 周广胜. 1961-2010年桂林气温和地温的变化特征[J]. 生态学报, 2013, 33(7): 2043-2053. (CHEN C, ZHOU G S. Analysis on variation characteristics of air temperature and ground temperature in Guilin from 1961 to 2010 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(7): 2043-2053. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201112312022.
- [11] 李岳坦, 李小雁, 崔步礼, 等. 青海湖流域及周边地区浅层地温对全球变化的响应[J]. 地球环境学报, 2010, 1(3): 219-225. (LI Y T, LI X Y, CUI B L. Response of shallow geotemperature to global change over Qinghai Lake Basin from 1961 to 2007 [J]. Journal of Earth Environment, 2010, 1(3): 219-225. (in Chinese))
- [12] 王佳琳, 潘志华, 韩国琳, 等. 1961-2010年中国0cm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. (WANG J L, PAN Z H, HAN G L, et al. Variation in ground temperature at a depth of 0 cm and the relationship with air temperature in China from 1961 to 2010 [J]. Resources Science, 2016, 38(9): 1733-1741 (in Chinese)) DOI: 10.18402/resci.2016.09.11.
- [13] 张波, 谷晓平, 易俊莲. 1961-2010年贵州省高温气候的时空分布特征[J]. 贵州农业科学, 2015, 43(6): 210-213. (ZHANG B, GU X P, YI J L, et al. Spatial and temporal distribution characteristic of high temperature in Guizhou during 1961-2010 [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2015, 43(6): 210-213. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-3601.2015.06.052.
- [14] 陈学凯, 徐建新, 胡娟萍, 等. 1961-2012年贵州省极端降水时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(4): 50-61. (CHEN X K, XU J X, HU H J, et al. Feature of spatial and temporal variation of extreme precipitation in Guizhou Province from 1961 to 2012 [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(4): 50-61. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2015.04.10.
- [15] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 63-66. (WEI F Y. Modern technology of statistics diagnosis and prediction for climate [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 63-66. (in Chinese))
- [16] FOUFOULA-GEORGIOU E, KUMAR P. Wavelet analysis in geophysics: an introduction [J]. Wavelet Analysis and Its Applications, 1994, 4: 1-43. DOI: org/10.1016/B978-0-08-052087-2.50007-4.
- [17] 胡丹桂, 舒红. 基于协同克里金空气湿度空间插值研究[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(9): 2045-2049. (HU D G, SU H. Air Humidity Based on Co-Kriging Interpolation [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2014, 53(9): 2045-2049. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0439-8114.2014.09.018.
- [18] 孙然好, 刘清丽, 陈利顶. 基于地统计学方法的降水空间插值研究[J]. 水文, 2010, 30(1): 14-17. (SUN R H, LIU Q L, CHEN L D. Study on precipitation interpolation based on the geostatistical analyst method [J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(1): 14-13. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2010.01.003.
- [19] 许民, 王雁, 周兆叶, 等. 长江流域逐月气温空间插值方法的探讨[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(3): 327-333. (XU M, WANG Y, ZHOU Z Y, et al. Discussion of methods of spatial interpolation for monthly temperature data in the yangtze river basin [J]. Resources & Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(3): 327-333. (in Chinese))
- [20] SHAO J A, LI Y B, NI L P. The characteristics of temperature variability with terrain, latitude and longitude in Sichuan Chongqing Region [J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(2): 223-244. DOI: 10.1007/s11442-012-0923-4.
- [21] 吴晓娜, 孙照渤. 欧亚大陆夏季地表温度的气候特征及与大气环流的联系[J]. 大气科学学报, 2015, 38(2): 195-204. (WU X N, SUN Z B. Climatic features of summer land surface temperature in Eurasian continent and its relationship with atmospheric circulation [J]. Transactions of Atmos Science, 2015, 38(2): 195-204. (in Chinese)) DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130525001.
- [22] 赵红岩, 杨瑜峰, 张久林, 等. 夏季西太平洋副高位置与中国地温场的关系[J]. 高原气象, 2007, 26(5): 1119-1122. (ZHAO H Y, YANG Y F, ZHANG J L, et al. The relationships between the position of west pacific subtropical high and ground temperature field of China Summer [J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(5): 1119-1122. (in Chinese))
- [23] 段旭, 李英, 孙晓东. 昆明准静止锋结构[J]. 高原气象, 2002, 21(2): 205-209. (DUAN X, LI Y, SUN X D. The structure of Kunming quasi-stationary front [J]. Plateau Meteorology, 2002, 21(2): 205-209. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-0534.2002.02.014.
- [24] 杜小玲, 蓝伟. 两次滇黔准静止锋区结构的对比分析[J]. 高原气象, 2010, 29(5): 1183-1195. (DU X L, LAN W. Contrastive analysis on frontal structure of quasi-stationary front in two precipitation processes of Yunnan Guizhou [J]. Plateau Meteorology, 2010, 29(5): 1183-1195. (in Chinese))