胡泽银,王世杰,白晓永,等.近百年来贵州高原气温时空演变特征及趋势[J].中国岩溶,2020,39(5):724-736.
DOI:10.11932/karst20200509

近百年来贵州高原气温时空演变特征及趋势

胡泽银[1,2,3],王世杰[1,3,4],白晓永[1,3],李 琴[1,2,3],吴路华[1,2,3],陈 飞[1,3,5],
杨钰杰[1,3,4],田诗琪[1,3,4],邓元红[1,2,3],李朝君[1,3,4]

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 贵州 普定 562100; 4. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001; 5. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025)

摘 要:在全球气候变暖背景下,气温变化具有显著的地域差异,认识区域气温变化特征,对于生态安全和可持续发展是非常重要的。本文基于CRU、MODIS遥感数据以及气象站观测数据,使用累积距平、一元线性回归、5a滑动平均、线性倾向率、R/S分析等方法,揭示了贵州高原气温的时空演变特征及对生态安全的影响。结果表明:(1)在空间上,贵州高原气温时空演变历史过程具有地域差异性和季节性,总体呈南高北低的空间分布格局,春季和冬季气温空间分布特征比较相似,夏季与春季、冬季特征近似相反,秋季空间分布不明显,主要受到海拔和纬度的影响;(2)1901以来,气温呈现出以−0.31 ℃/century的速率波动下降趋势,且以秋季为主;(3)1951年以来,气温呈现出以0.71 ℃/century的速率波动上升趋势,且以秋季为主;(4)2000年以来,气温呈现出以−5.43 ℃/century的速率波动下降趋势,且以冬季为主,具有一定的年际性和季节性。综上所述,贵州高原气温呈现下降趋势,且主要受到海拔和纬度的双重影响。本研究结果为研究区合理利用气候资源、区域产业结构调整、生态环境保护工程等提供决策支撑。

关键词:贵州高原;气温变化;时空演变;趋势分析;生态安全
中图分类号:P423 **文献标识码**:A
文章编号:1001−4810(2020)05−0724−13 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

0 引 言

全球气候变暖已成为不争的事实,这种变暖的趋势只表示全球气温的平均状况,但不同区域气温变化的表现形式各不相同[1-7]。因此,区域气温变化已逐渐成为研究气候变化的热点,且各国对气候变化可能引起的环境和生态变化问题给予了高度地重视[3,8]。

近几年来,国内外众多学者对美国密西西比河流域、非洲、中国十大区域、中亚干旱区五大流域等区域的气温变化开展了研究[5-6,9-13],取得了丰硕的成果。这些研究数据多采用的是气象站点实测数据,难以实现空间化。若使用空间插值法实现空间化,又很难确保结果的准确性和精度[14-18],误差一般在1~3 ℃[17,19]。也有部分学者将地形要素(即海拔、经度及纬度等对气温有显著影响的因素)纳入到气象站点插值统计模型中[17-18,20],用以提高插值的精度。但是高原地区站点稀少,使得该地区插值结果存在更大

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA23060100&No.XDB40000000);国家重点研发计划(2016YFC0502300&2016YFC0502102);西部之光人才计划(A类)(〔2018〕99号);喀斯特中心联合基金(U1612441);贵州省科技计划(2017−2966)
第一作者简介:胡泽银(1993−),女,硕士,研究方向为喀斯特环境科学与全球化。E-mail:1658591659@qq.com。
通信作者:白晓永(1978−),男,博士,研究员,主要从事喀斯特生态环境及全球变化研究。E-mail:baixiaoyong@vip.skleg.cn。
收稿日期:2019−07−07

万方数据

的不确定性。因此,亟需一种具有空间代表性气温数据来代替传统的气象站点数据。此外,部分国内外学者已采用格点化观测的气温数据弥补气象观测站点数据的不足[21-22]。这些格点化数据主要包括英国东英吉利(East Anglia)大学的气候研究中心(Climatic Research Unit,CRU)开发的CRU格点化气温数据、全球变化科学研究数据出版系统提供的(The Modem Era Retrospective analysis for Research and Applications,MERRA)的气温再分析数据集和美国地球观测系统计划的中等分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer,MODIS)的地表温度数据,它们均具有时间序列较长、空间分辨率较高的特点。但它们的构建方法不同,可能导致不同地区的气温时空变化特征存在一定的差异,进而会直接影响研究结果的可靠性。已有部分研究学者对CRU和MODIS的气温数据的可靠性做了评估,如胡泽银等[23]研究表明,贵州高原MODIS的地表温度与气象站观测数据具有较高的一致性,即决定系数(Adjusted R^2)介于0.74~0.92,标准误差(RMSE)介于2.05~2.32 ℃之间;姚永慧等[24]利用GWR方法,结合MODIS地表温度、气象观测站点数据及DEM数据建立了回归模型,该模型中两组气候决定系数(Adjusted R^2)均达到0.91以上(0.91~0.95),标准误差(RMSE)介于1.16~1.58 ℃,表明利用Modis LST数据估算的气温更精确且能反映更多的空间信息;Cresswell 等[25]利用 Meteosat 夜间的温度数据和太阳天顶角值(Solar zenith angle)并结合若干测站数据,对南非的最低气温进行了估算,超过70%的估算数据误差在3 ℃以内;闻新宇等[26]利用英国CRU高分辨率格点资料揭示了20世纪中国的气候变化;任余龙等[27]利用英国East Anglia大学CRU高分辨率地面温度格点资料揭示青藏高原气温的时空分布特征及近百年来的变化趋势。有鉴于此,本文基于前人研究的基础上选择CRU和MODIS格点化的气温数据为研究数据。

综上可知,以往研究主要集中在下垫面性质相同的区域,针对喀斯特地区气温研究较为少,特别是地形复杂、生态环境脆弱,人类活动频繁的贵州喀斯特高原地区。该区域受到自然因素和人为因素的影响,生态问题极为突出,加之气象站点少,空间分布较为稀疏,资料极度匮乏,常"以点代面,以季节代年"[28-32]。本文选取贵州高原为研究对象,利用具有长时间序列(1901-2014年)的CRU格点化气温数据和具有空间代表性的MODIS(中等分辨率,2000-2014年)地表温度遥感数据,以及气象站点观测数据(1951-2014年),探讨贵州高原近百年来季节、年际和年代际的气温时空演变规律及变化趋势,分析气温变化对生态安全的影响,为今后贵州高原气候变化研究提供科学、可靠的参考,对保护生态环境具有一定的现实意义。

1　研究数据获取及处理

1.1　研究区概况

贵州省位于中国西南腹地,即24°37′~29°13′ N,103°36′~109°35′ E,境内地势西高东低,自西部向北、东、南三面倾斜,平均海拔为1 170 m左右(图1),是中国唯一一个没有平原的省份。全省占地面积约为17.6×10^4 km^2,行政区划上包括贵阳、安顺、遵义、毕节、铜仁、六盘水6市,黔东南、黔西南、黔南3个州。研究区地处副热带东亚大陆的季风区,气候类型属于亚热带湿润季风气候,主要气候特征为南北温差大,气候温和,冬无严寒,夏无酷暑且四季分明,雨量充沛,雨热同期,年降雨量1 100~1 300 mm,一年中无霜期为270 d。研究区气温主要受到大气环流、地形等因素的影响,地域温差较大。

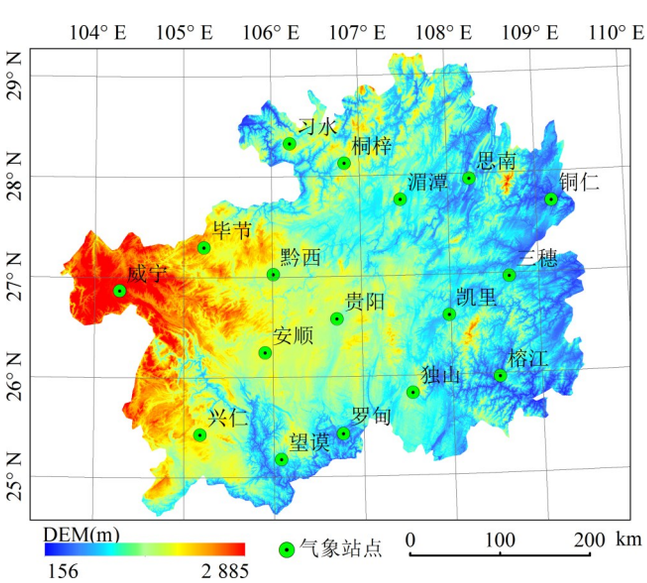

图1　研究区位置图

Fig. 1　Map showing location of the study area

1.2　数据来源及处理

本文研究时段为1901-2014年,研究数据包含矢量数据:贵州行政边界数据;栅格数据:MODIS地表

万方数据

温度，DEM，CRU；气象站观测气温数据，详见表1。首先，将三种气温资料按年、月进行整理；然后，按3-5月为春季、6-8月为夏季、9-11月为秋季、12月至第二年2月为冬季进行季节划分；最后，分时间段对气温资料进行汇总，分析气温的年际和季节的变化趋势与突变特点。

表1 主要数据来源

Table 1 Major data sources

数据类型	来源	网址	时间段
贵州省行政区划图	国家地球系统科学数据共享平台	http://www.geodata.cn/	—
DEM	地理空间数据云	http://www.gscloud.cn/	—
CRU	Center for Environmental Data Analysis	http://www.ceda.ac.uk/	1901/01—2015/02
气象观测数据	中国气象数据网	http://data.cma.cn/site/index.html	1951/01—2015/02
MODIS	地理空间数据云	http://www.gscloud.cn/	2000/01—2015/02

CRU是英国East Anglia大学Climate Research Unit(简称CRU)提供的气温资料，CRU使用数学方法对若干个数据库进行整合和插值并重建了一套高分辨率、无中断的地表气候要素数据集，有较大的可信性。有研究者[13,26]利用CRU资料研究气候变化与气象观测站数据作相关性比较，结果表明CRU资料具有较高的可信度，可靠性及适用性较强。气象站点观测数据方面，因贵州高原地区的气象站点建站时间不一致，且站点存在撤销、迁移等现象，数据的完整性和一致性存在差异，为了建立稳定、均一且为长时间序列的气候数据，确保其完整性和一致性，最终选取研究区13个气象数据(图1)作为半个世纪的数据来源。MODIS月平均地表温度数据在空间和时间上具有高分辨率等特征，但由于云的影响，该数据有部分缺失，缺失数据主要集中在7-9月份，这部分缺失数据主要采用邻近像元的均值来代替。

2 研究方法

本研究主要采用累积距平、一元线性回归、5a滑动平均、R/S分析法、线性倾向率及Mann-Kendall检验等方法，这些方法的具体原理和计算方法详见文献[5,33-35]。趋势监测主要采用累积距平、线性回归和5年滑动平均来描述气温季节和年变化趋势，基于像元计算每个像元的距平值绘制气温的空间差异图。

累积距平是表示气温在某一段时间内的偏离程度，表达式如：

$$LP_i = \sum_{i}^{N}(T_i - \overline{T})$$

式中：LP_i是距平累积值；T_i是第i年的气温值；$\overline{T}$为气温序列的多年平均值[33]。

一元线性回归是一种简单且容易看出时间序列变化趋势的分析方法。

滑动平均法是指在一个长序列的逐年数据中按年序从1901-1905，1902-1906，1903-1907，……，每相应五年的数据计算其平均值。该方法在一定程度上可以消除序列频繁随机起伏的影响，通过平均方式，消除统计序列中的随机波动，用平均值来显示时间序列的变化趋势。对样本量为n的序列x，使气温变化的趋势性或阶段性更直观、明显，其滑动平均序数学表式如下：

$$\hat{X}_j = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{n} X_{i+j-1}(j=1,2\cdots,n-k+1)$$

式中：k为滑动长度，本文采用5年趋势滑动平均来显示其变化趋势[5,33]。

MK检验法是通过计算1901-2014年气温的顺序时间序列的秩序列对应的UB和UF(UF为标准正态分布，它是按研究时段的时间序列顺序1901，1902，1903，…，2014计算出的统计量序列，α=0.05的显著性水平，若|UF|>Uα，则表明序列存在明显的趋势变化；UB是按三个研究时段的时间序列逆序2014，2013，2012，…，1901计算出的统计量序列，即，UB=-UF)，显著性水平为0.05，则气温变化的临界值$U_{0.05}$=±1.96，当UB和UF超过临界直线时，表明上升或下降趋势显著。如果UF和UB两条曲线出现交点，且在临界线之间，则该点称为突变点。

R/S分析法是通过计算气温时间序列的系数值H(0≤H≤1)，H是揭示气温未来的变化趋势，同时根据H的大小来判断趋势性成分的强弱。当H=0.5时，说明时间序列为独立分布的随机序列，即现在的变化对未来没有影响；当0≤H<0.5时，表明该过程具有反持续性，未来变化将与过去总体趋势相反，H越接

万方数据

近0.5反持续性越强;当0.5<H≤1时,时间序列具有长期依赖性,即未来与过去具有相同的变化趋势,H越接近1,持续性越强,数学表达式详见参考文献[34]。值得注意地是,文中使用的三套数据在前人的研究中已有相应的精度验证[12,24-26]。

3　研究结果

3.1　气温的空间演变特征

3.1.1　年际上空间变化

由图2可看出,1901-2014年中国西南的贵州高原气候变化的全过程,其完整的空间覆盖是研究过去气温的有益补充。百年尺度年均气温距平的最高值和最低值分别为3.90 ℃和-3.83 ℃;其中负距平值主要集中在毕节市、六盘水市、贵阳市和铜仁市等区域;正距平值主要集中于兴义、安顺和都匀等区域。气温在空间上的演变特征主要表现为"南高北低"的特点,即从南向北,温度在逐渐减低,其中西南部区域温度较高,西北部区域的温度较低,东北和西南温度较为适宜,气温变化具有地域差异性。进一步统计可得到,近百年来气温下降的区域约占整个研究区总面积的49%,升温面积则约为50%。

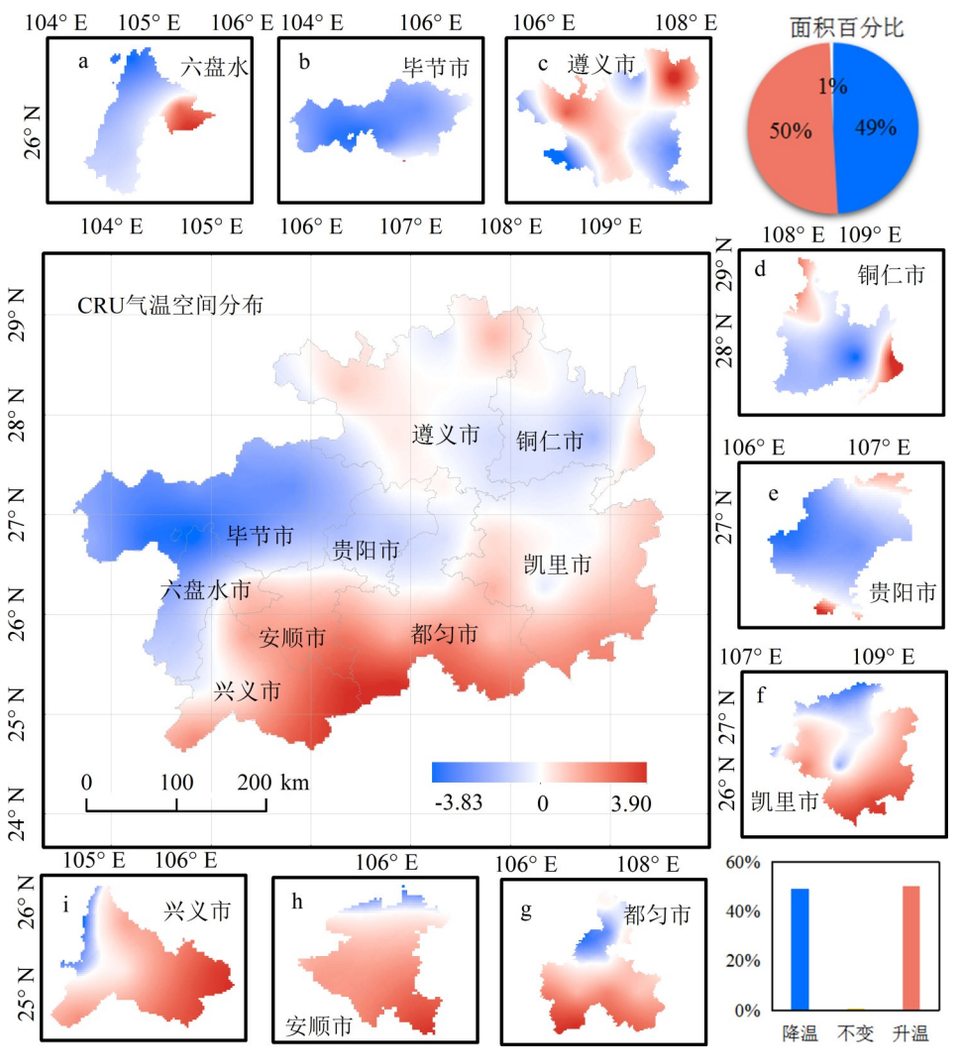

图2　20世纪以来(1901-2014)贵州气温空间分布、面积百分比及各地州市放大示意图

Fig. 2　Annual average temperature spatial distribution in Guizhou and enlarged sketch of percentages of area and each prefecture and city since the 20th century(from 1901 to 2014)

本文采用研究区13个气象观测站点数据进行克里格插值得到了1994-2014年的气温空间分布格局见图3。1951年以来,气温升高区域的面积占研究区的51%,气温下降面积仅为46%,而不变的区域不到10%。在空间上,与图2相比,存在一定的区域差异,尤其是铜仁地区。

万方数据

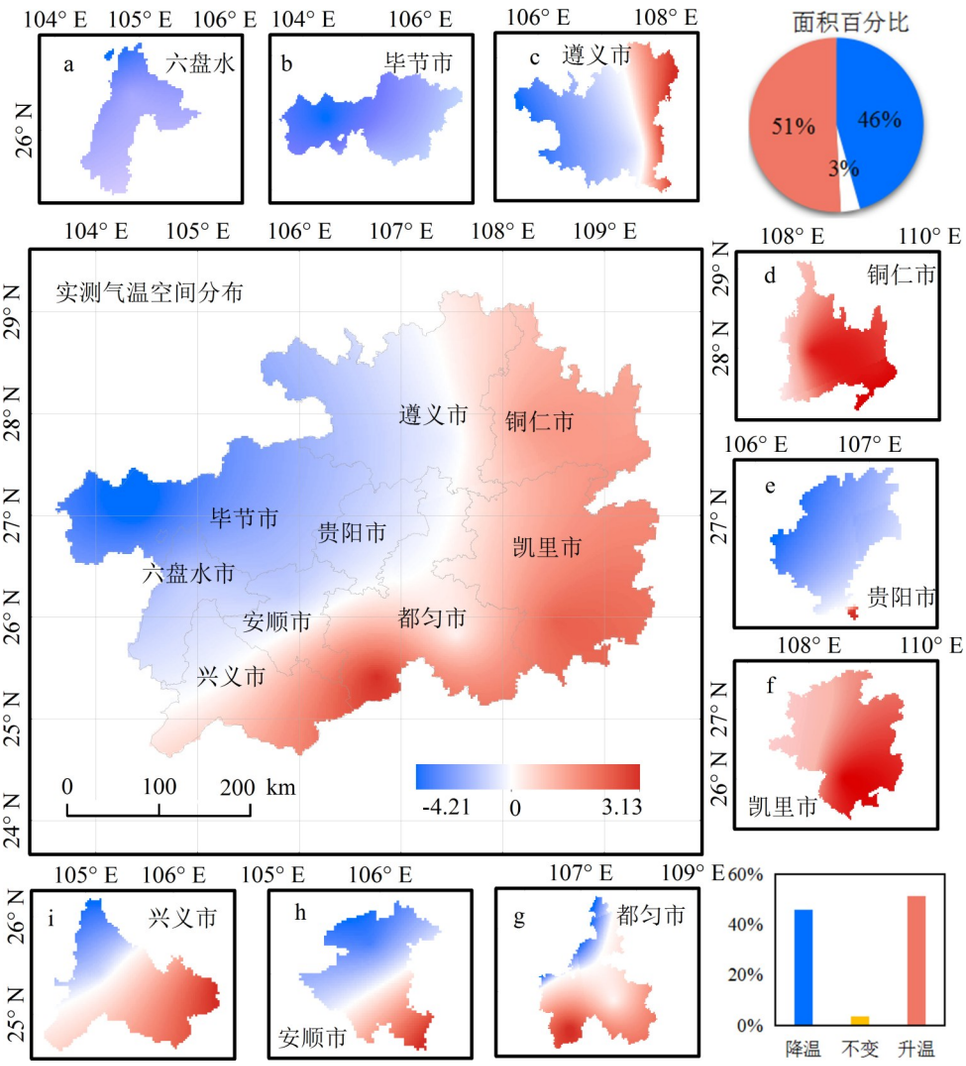

图3 1951–2014年贵州气温年均空间分布、面积百分比及各地州市放大示意图

Fig. 3 Annual average temperature spatial distribution in Guizhou and enlarged sketch of percentages of area and each prefecture and city from 1951 to 2014

由图4可知，21世纪以来，贵州高原气温的空间分布存在显著差异，多年平均温度距平的空间正距平值为6.32 ℃，负距平值为−7.37 ℃；气温整体上表现出西南高，西北低，其中负距平区走向为西南—东北走向，基本上与山脉走向一致，形成了毕节市的威宁和赫章为负距平中心，兴义市东部和安顺市的西部形成的峡谷区为正距平中心；贵州高原21世纪以来降温面积为47%。

综上所述，贵州高原气温在三个年际尺度上均表现出空间的地域性，即“南高北低”的空间分布格局。

3.1.2 季节上空间变化

由图5可以看出20世纪以来（1901–2014年），贵州省春季气温变化特征为南高西低，其正距平值为4.57 ℃，负距平值为−3.32 ℃（图5a）。夏季正距平值为3.80 ℃，负距平值为−5.23 ℃，西部地区的气温较低（图5d）。与夏季相比，秋季气温降低非常明显（图5g），其空间分布特征与春季基本相似，南部温度仍是最高的区域，西部地区的温度仍很低；与春季相比，秋季的丘陵和盆地等低洼地区温度升高不太明显，秋季低温的区域明显小于春季，其正距平值为4.09 ℃，负距平值为−4.17 ℃（图5g）。冬季温度高的地区仍集中在西南河谷区，北部仍是低温区，温度是从北向南逐渐升温（图5j）。冬季气温最低，温度变化较其他时期西北部地区气温下降较为明显。

半个世纪以来（1951–2014年）贵州省四季气温空间变化。由图5b可以看出，研究区春季温度在空间上演变特征表现为南高西低，正距平值为4.66 ℃，负

万方数据

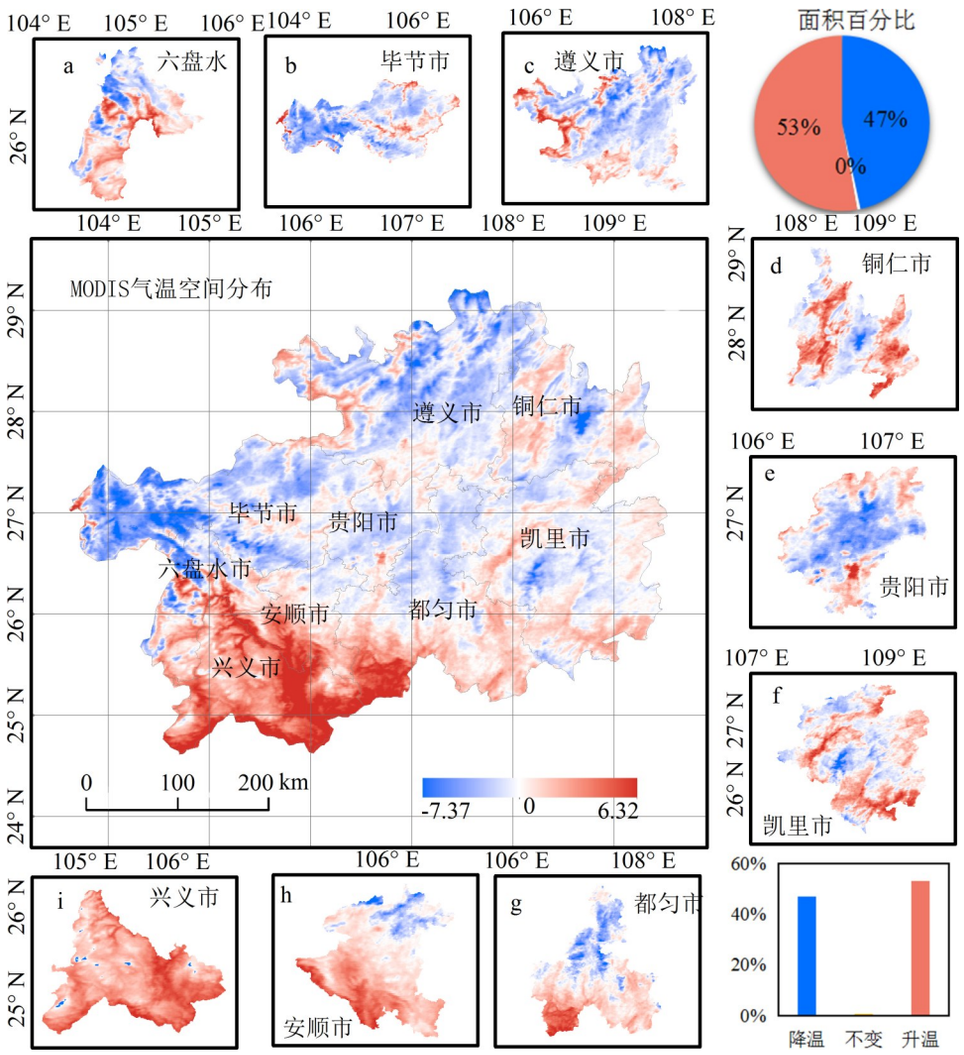

图 4　2000–2014 贵州气温空间分布、面积百分比及各地州市放大示意图

Fig. 4　Annual average temperature spatial distribution in Guizhou and enlarged sketch of percentages of area and each prefecture and city from 2000 to 2014

距平值为-5.43 ℃。夏季正距平值为 3.36 ℃,负距平值为-6.38 ℃,西部地区的气温较低(图 5e)。秋季正距平值为 3.96 ℃,负距平值为-5.43 ℃(图 5h),结合图 5a,b 可知,春季降温的区域明显比秋季的区域大。冬季高温区仍集中在西南峡谷区,北部仍是低温区,温度是从北向南逐渐升温(图 5k)。冬季是四个季节中温度最低的一个季节,其空间分布与年平均和春秋季的空间分布基本一致。

21 世纪以来(2000–2014 年)贵州省四季气温空间变化。由图 5c 可知,春季气温正距平为 7.87 ℃,负距平值为-8.18 ℃。夏季气温的空间分布与春季分布截然相反,正距平区主要分布在东北部区域;负距平区主要分布在中部和西北部区域(图 5f)。对比图 5c 和图 5f 可知,在春、夏季之间贵阳市和都匀市的北部始终为低温区。秋季气温的空间分布(图 5i)与多年年均气温空间分布(图 4)情况基本类似,主要表现在负距平区是西部高海拔地区、凯里雷公山以及铜仁的梵净山等山区,正距平区是南部和北部的低热河谷区。秋季正距平为 4.96 ℃,负距平值为-6.86 ℃,正距平区主要分布在南部区域,负距平区主要分布在北部区域(图 5i)。冬季正距平为 2.35 ℃,负距平为-1.23 ℃,正距平区主要分布在南部和北部的低热河谷区,负距平区则主要分布在中部以及东部区域(图 5l)。

综上所述,无论是百年尺度、半个世纪以来还是 21 世纪以来,贵州省气温变化均具有季节性和地域性,且四季分明;负距平区以毕节和贵阳为主,正距平区以西南低热谷区为主;春季和冬季的空间气温分布情况基本类似,均呈现南高西低的空间分布格局。

万方数据

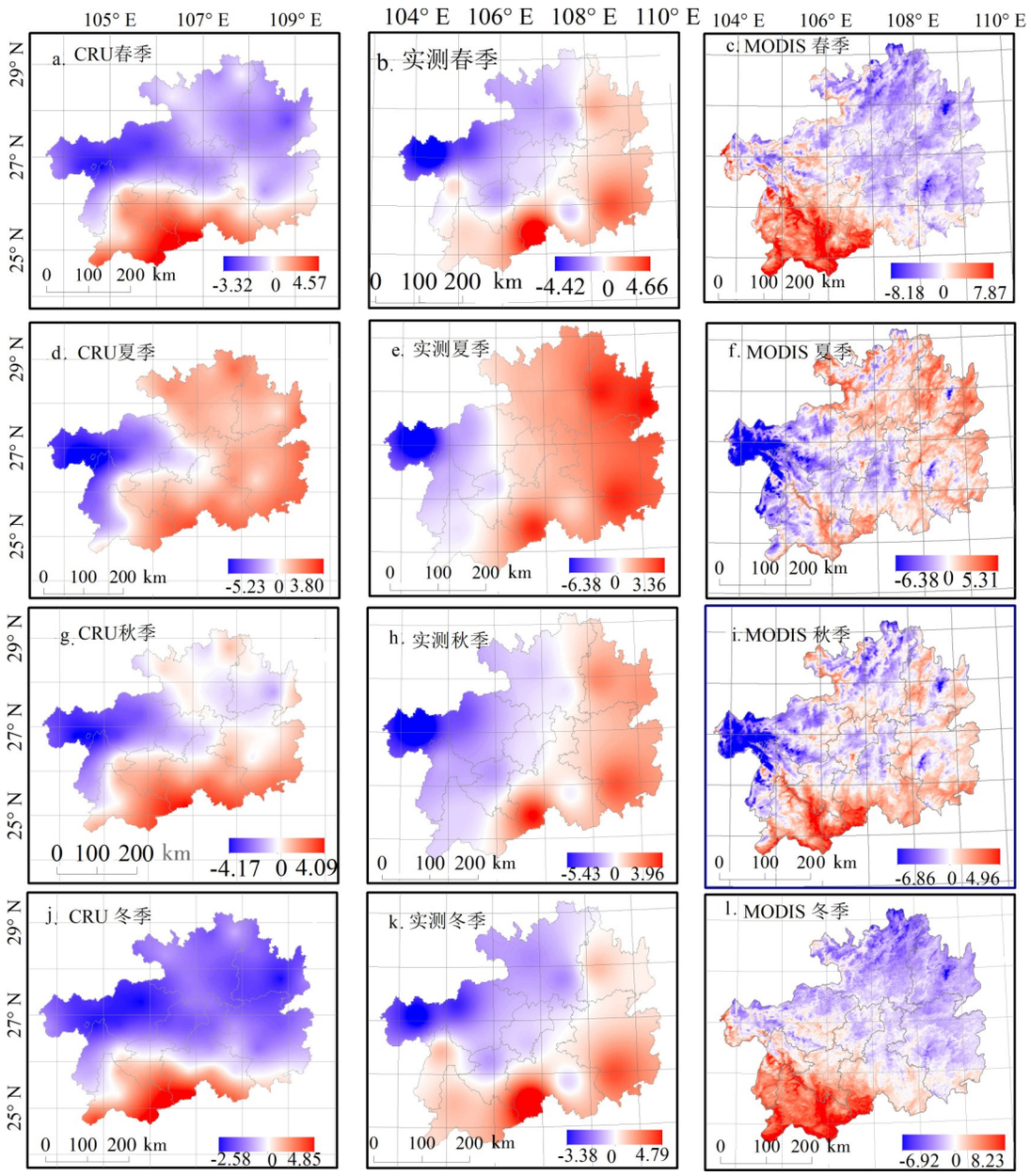

图5 贵州省四季气温空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of air temperature for four seasons in Guizhou province

（注：左边是1901－2014年CRU气温分布情况，中间是1951－2014年实测气温，右边是2000－2014年MODSI气温）

3.2 气温的变化趋势

3.2.1 年际变化趋势

图6为贵州高原气温年际气温变化趋势。在百年尺度下（图6a），贵州高原平均气温以-0.31 ℃（100 a^{-1}）的速率呈明显的下降趋势，在20世纪20年代及之前研究区处于偏冷时期；20世纪20年代到50年代，研究区温度开始上升；20世纪50年代到90年代处于偏冷时期；20世纪90年代之后处于偏暖时期，但与20~50年代的偏暖期相比其是偏低的。图6（b）是半个世纪以来气象观测温度时间序列距平，重点在于1951-2014年研究区温度变化的时间演变特征。1951-2014年间以0.71 ℃（100 a^{-1}）的速率呈现上升趋势，且以冷暖交替式的上升。图6c是21世纪以来，四季平均气温的线性回归21世纪以来，贵州高原多年平均气温以-0.543 ℃（100 a^{-1}）的速率呈现下降趋势。

3.2.2 季节变化趋势

1901-2014年间，气温在春、夏、秋、冬季节的变化速率分别为-0.06 ℃（100 a^{-1}）、-0.09 ℃（100 a^{-1}）、

万方数据

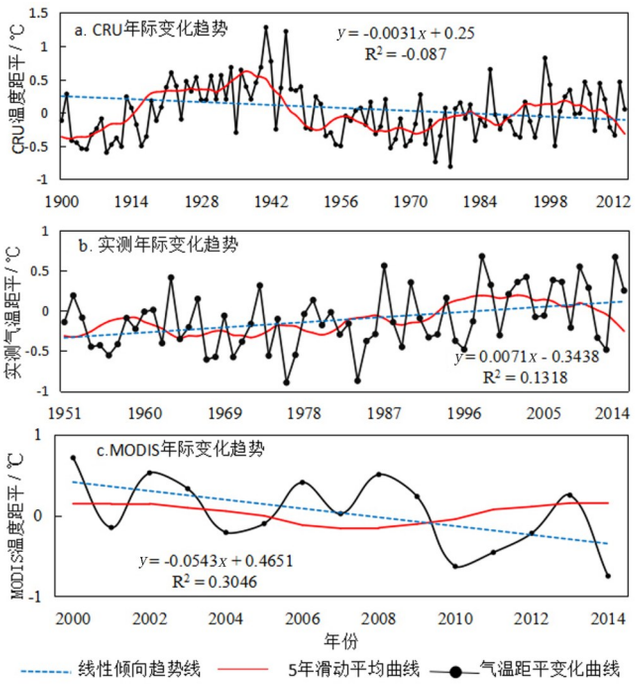

图 6　1901–2014 年贵州高原气温年际气温变化趋势

Fig. 6　Variation trends of annual temperature in Guizhou plateau from 1901 to 2014

−0.08 ℃(100 a^{-1})和−0.01 ℃(100 a^{-1})(表 2),且均呈轻微的下降趋势(图 7a,d,g,j),其中夏季的下降速率相对较大,这说明秋季温度的快速下降是贵州高原年平均温度下降的主要贡献;其中夏季的冷暖时期与年际变化保持一致(图 7 和图 5d),而秋季和冬季均呈冷暖交替式变化。

1951–2014 年间,结合表 2 和图 7b,e,h,k 可知,春、夏、秋、冬的平均气温上升的速率分别为:0.7、0.54、1.19、0.1 ℃(100 a^{-1}),且上升速率由小到大依次为:冬、夏、春、秋,秋季速率最大,说明秋季气温增幅对年平均气温影响最大,且均以冷暖交替式的变化,没有明显的冷时期和暖时期。总体而言,半个世纪以来贵州高原气温呈缓慢的上升趋势。

2000–2014 年,结合表 2 和图 7c,f,i,l 春、夏、秋、冬季分别以−0.11 ℃(100 a^{-1})、−0.09 ℃(100 a^{-1})、−0.204 ℃(100 a^{-1})、−1.274 ℃(100 a^{-1})的速率呈下降趋势,下降的速率由小到大依次为:冬、秋、春、夏,其中冬季的速率最大,说明冬季气温降幅对年平均气温的影响最大,21 世纪以来,研究区均以冷暖交替式的变化,且没有明显的冷时期和暖时期。由此可知,21 世纪以来贵州气温呈现下降趋势。

3.3　气温突变特征

在 95% 的显著水平下,贵州高原 CRU、气象站观测气温数据均发生了突变(图 8),但突变时间存在显著差异,而 MODIS 温度没有发生突变,MODIS 的 UF 和 UB 曲线均在 0.05 显著性水平区间,呈现下降趋势。CRU 的 UF 和 UB 曲线有多个交点,在 1924 年 CRU 气温超过 0.05 置信区间,说明贵州高原气温发生显著的突变,在超出置信区间前多年平均值为 15.04 ℃,而超出后多年平均值 15.24 ℃,超出后比超出前上升了 0.2 ℃;但 CRU 气温在 1961 年低于 0.05 置信区间,表明贵州高原气温再一次的发生突变,在低于置信区间前多年平均值为 15.27 ℃,而低于置信区间后多年均值为 15.12 ℃,前者比后者下降了 0.15 ℃。同理,气象站观测的气温数据在 2006 年超过 0.05 置信区间,在超出置信区间前多年平均值为 15.53 ℃,而超出置信区间后多年平均值 15.67 ℃,后者比前者上升了 0.14 ℃,即气温发生突变之后呈上升趋势,可能受到全球变暖的影响。

3.4　气温未来变化趋势分析

就研究区而言,虽然 CRU 数据和气象观测站点数据均具有长时间序列的特点,但该类数据只能代表相应站点的气温变化趋势;而 MODIS 数据不仅具有时间分辨率,还有高空间分辨率,因此本文选择

表 2　不同时间尺度下气温的变化趋势方程及决定系数

Table 2　Variation trend equations and determination coefficients of air temperature at different time scales

	1901 年−2014 年		1951 年−2014 年		2000 年−2014 年	
	线性方程	决定系数	线性方程	决定系数	线性方程	决定系数
春季	$y=-0.000\,6x-0.008\,9$	−0.000 8	$y=0.007x-0.31$	0.03	$y=-0.011x+0.092\,3$	0.012 5
夏季	$y=-0.000\,9x+0.051\,8$	0.004 2	$y=0.005\,4x-0.39$	0.05	$y=-0.009x+0.101\,6$	0.005 5
秋季	$y=-0.000\,8x-0.154\,3$	0.002 7	$y=0.011\,9x-0.55$	0.14	$y=-0.0204x+0.031$	0.02
冬季	$y=-0.001x+0.063\,5$	0.001 4	$y=0.01x-0.40$	0.03	$y=-0.1274x+0.904\,5$	0.141 8

万方数据

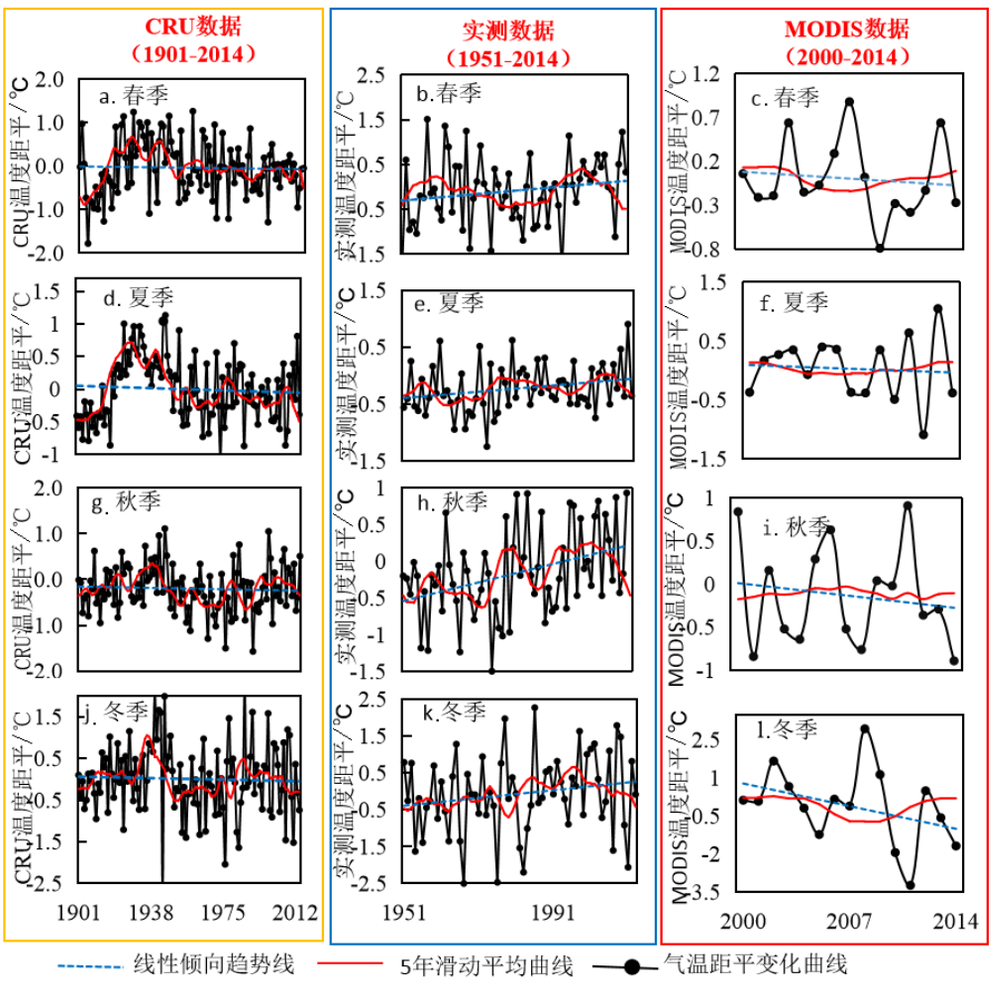

图7 百年以来(1901–2014年)贵州高原季节气温的变化趋势

Fig. 7 Variation trends of seasonal temperature in Guizhou Plateau over the past 100 years(from 1901 to 2014)

MODIS数据分析贵州高原气温未来变化趋势。基于像元尺度采用Hurst指法，结合栅格计算器，计算2000–2014年贵州高原的气温空间变化趋势，预测未来的变化趋势见图10。结果显示，贵州高原气温变化范围为-1.94~1.08 ℃(100 a^{-1})，在空间上贵州高原气温变化的变化趋势既存在降温趋势也存在升温趋势(图4)。Hurst指数范围为0.17~0.88，根据Hurst指数的划分[19,34-35]可知研究区气温变化趋势既存在持续性也存在反持续性(图9)。

将图4和图9叠加得到气温未来变化趋势的空间分布格局见图10。从图中可以看出，气温持续降温的区域主要分布于贵阳、都匀的东北部、遵义南部、凯里中部、毕节以及兴义的西南部等地区(图10a)；气温反持续降温的区域集中于铜仁和凯里北部，其他区域也有零星分布(图10b)；气温持续稳定区域集中在遵义西部、毕节、贵阳以及都匀的东北部等地区(图10c)；气温处于不确定的区域零散的分布在整个研究区(图10d)；反持续升温的区域主要集中在安顺、兴义、铜仁和凯里的东北部等地区(图10e)；持续升温的区域零星分布在整个研究区中，其中六盘水、凯里和铜仁等地区分布较为集中(图10f)。

4 讨 论

4.1 气温下降机制及影响

20世纪初到21世纪初，研究区气温呈现持续下降趋势，南高北低的空间分布格局，该分析结果与前人[7]研究该区域气温变化趋势一致。但该分析结果与全球气温变暖[36-37]以及中国气温上升趋势[38]存在着显著的差异。这种差异存在的主要原因是：

(1)区域上，贵州高原四面环山，是中国唯一一个没有平原的省份，具有一种独特的喀斯特地貌类

万方数据

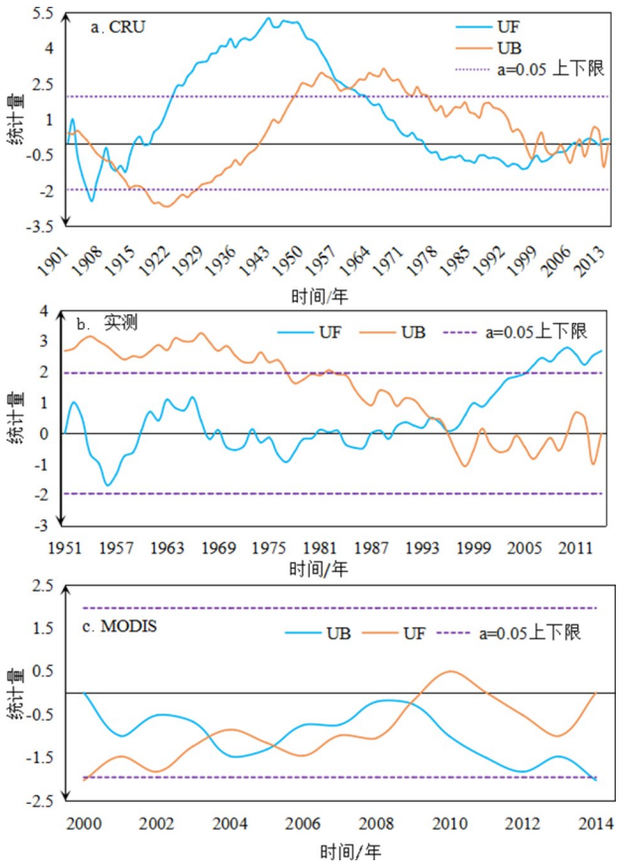

图 8　1901–2014 年间贵州高原气温变化突变特征:(a)CRU (1901–2014 年);(b)气象站实测(1951–2014);(c)MODIS (2000–2014 年).

Fig. 8　Map showing the characteristics of temperature's sudden changes in Guizhou Plateau from 1901 to 2014, a. CRU (1901–2014); b. Meteorological station measured (1951–2014); c. MODIS (2000–2014)

型,其气温变化与中国平均气温变化乃至全球气温变化存在较大差异,具有独特的地域性特征[7];

(2)地形上,贵州省平均海拔 1 100 m 左右,最高海拔为 2 285 m,最低海拔为 156 m,地形起伏显著,且以山地居多,素有"八山一水一分田"之说,因此,海拔因子对贵州气温变化影响显著[39]。此外,坡度、坡向等地形因子对气温变化也有较大的影响[40];

(3)经纬度,研究区地处北纬 24°37′~29°13′,东经 103°36′~109°35′。前人[41-42]研究表明,经度差异对气候的影响主要表现在海陆分布地区,而贵州地处内陆,离海较远,因此经度差异对研究区气温变化影响可忽略;唐圣钧等[43]研究指出纬度因子对贵州气温的贡献较为显著。此外,随着社会经济的发展,国家和地方对生态环境保护和治理工程投入也在不断的增加,这些工程的实施会使植被覆盖度增加[44]、增

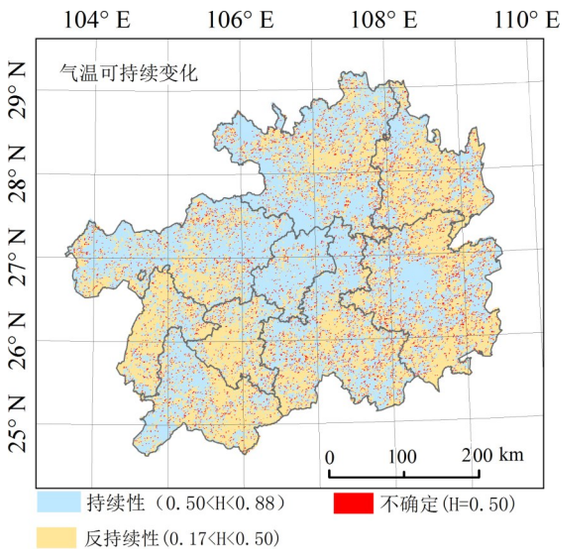

图 9　2000–2014 年气温的可持续性变化空间分布格局

Fig. 9　Spatial distribution pattern of continual temperature variations from 2000 to 2014

强碳汇能力[45]、加速土壤有机质积累[46]等一系列的生态变化,进而导致气温发生变化。

4.2　气温变化对生态安全的影响

根据上述对贵州不同时段气温时空演变特征分析可知,贵州高原气温呈下降趋势。气温下降会限制某些病虫害的滋生与繁殖,可以减缓肥料的分解,减少土壤水分蒸发,促进农作物生长、增收。不仅如此,气温下降还抑制了许多病菌的传播和繁殖,给人们提供了健康安全的生活环境。但气温下降也会导致气管炎、类风湿病和感冒等疾病的频繁发生。贵州气温四季分明,冬无严寒,夏无酷暑,夏季平均气温 22.68 ℃,温度变异系数为 8.05%,表明夏季温度波动幅度较小;这种优越的气候资源及特殊的地理位置,孕育了绚丽的自然风光,创造了宜人的旅游环境,并造就了夏季独特凉爽的避暑优势,促进了研究区旅游业等区域经济的发展。

4.3　气象观测站数据呈升温趋势的原因

气象观测台站主要集中在高原或丘陵等离城镇较近、便于收集数据的地区、位置较为零散。本文通过对比图 2、图 5、图 8 可知,铜仁梵净山、凯里雷山等山区应是降温区域,但受气象台站数量和位置的双重限制,收集到的数据显示该区域气温呈升温趋势,从而影响到整个区域气温均值偏高,造成了有气象站点数据以来气温呈上升趋势。

万方数据

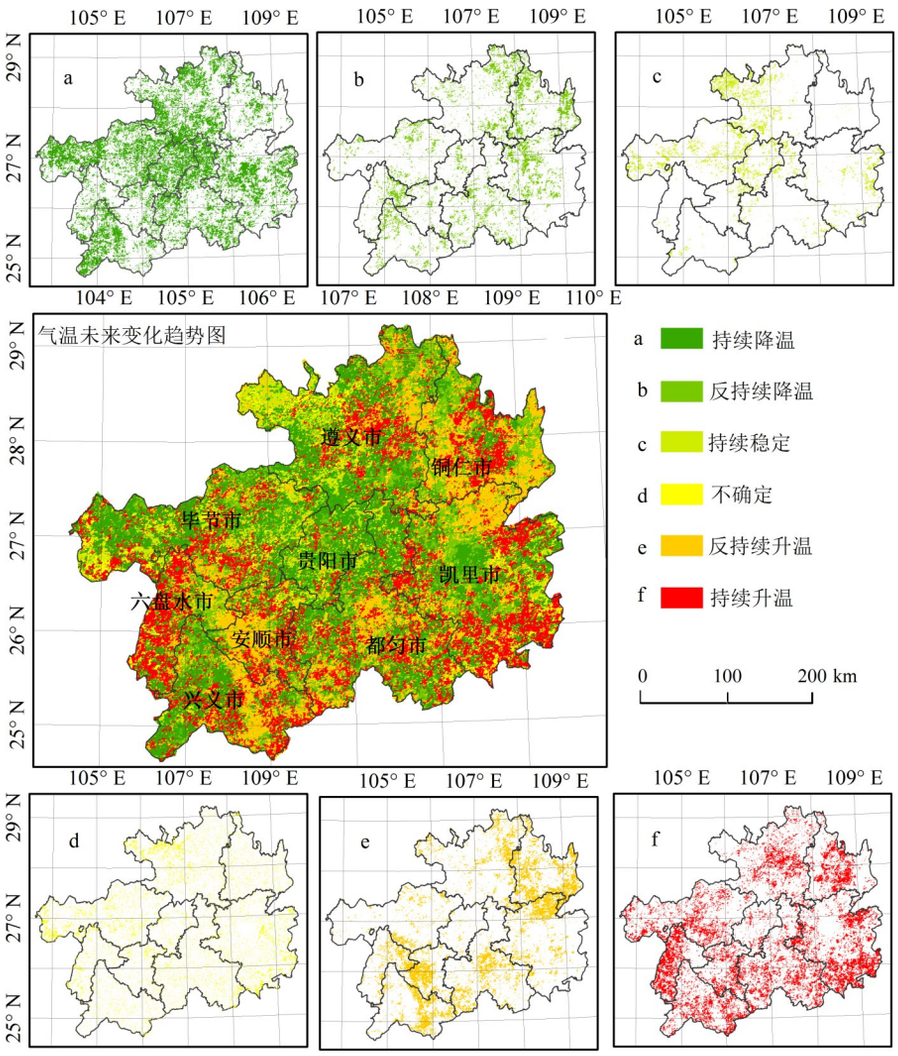

图 10 贵州高原气温未来变化趋势空间分布图

Fig. 10 Spatial distribution of future temperature variation trends in Guizhou plateau

此外，贵州高原受地理位置影响，局地能量收支存在较大的差异，如地形遮蔽、云层等因素，导致MODIS数据部分缺失，对统计结果可能造成一定的误差。此外，本次研究未涉及贵州气温的内在机理，未来可从地理因子（如经度、纬度及海拔等）、自然因素（降水）及人为因素（植被、城市化）等入手，更进一步明确贵州气温事件的发生机理和变化趋势，为贵州资源管理提供科学基础。

5 结 论

本研究将CRU、MODIS与气象台站观测数据结合起来，较精确地估算贵州高原气温变化情况，揭示了贵州高原气温的时空演变规律。

（1）贵州高原气温在百年尺度下—半个世纪以来—21世纪以来的三个阶段，在空间上气温变化均呈现“南高北低”的特点；春冬季气温空间分布特征比较相似，主要表现在东北部气温相对较低，其它地区气温相对较高；夏季气温呈“东高西低”的分布特征；秋季则没有明显变化；

（2）时间上，气温变化存在显著差异。百年尺度下，贵州高原气温以-0.31 ℃/century的速率呈下降趋势；半个世纪以来，气温以0.71 ℃/century的速率呈上升趋势；21世纪以来，气温以-5.23 ℃/century的速率呈下降趋势。在季节上，1901-2014年，春季气温呈上升趋势，夏秋冬季呈现下降趋势，其中秋季下降最显著；1951-2014年，四个季节气温均呈现上升趋势，其中冬季气温上升最显著；2000-2014年，四个季节气温均呈下降趋势，且以冬季气温下降最为显著；

（3）基于MODIS数据，采用Hurst指数模拟贵州

万方数据

高原未来的温度变化趋势,表明在未来大部分区域气温呈现持续下降的变化趋势。

参考文献

[1] 李宗省, 何元庆, 辛慧娟,等. 我国横断山区1960－2008年气温和降水时空变化特征[J]. 地理学报, 2010, 65(5): 563-579.

[2] Deng Y H, Wang S J, Bai X Y, et al. Relationship between Land surface temperature and LUCC and NDVI in typical karst area[J]. Science reports. 2017.

[3] Kael T R, P D Jones , R W Knight . A new perspective on recent global warming: Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1993, 74(6) : 1007-1023.

[4] 王绍武, 叶瑾琳. 近百年全球气候变暖的分析[J]. 大气科学, 1995(5):545-553.

[5] 易湘生, 尹衍雨, 李国胜,等. 青海三江源地区近50年来的气温变化[J]. 地理学报, 2011, 66(11): 1451-1465.

[6] 韩翠华, 郝志新, 郑景云. 1951－2010年中国气温变化分区及其区域特征[J]. 地理科学进展, 2013,32(6): 887-896.

[7] 严小冬, 金建德, 雷云,等. 贵州近50a气温时空分布特征分析[J]. 贵州气象, 2005, 29(2):6-9.

[8] 王绍武, 叶瑾琳. 近百年全球气候变暖的分析. 大气科学, 1995(5):545-553.

[9] Vancutsem C, Ceccato O, Dinku T. Evaluation of MODIS Land Surfance Data to Estimate Air Temperature in Different Ecosystems over Africa[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 114: 449-465.

[10] Mostovoy G V, King R L, Reddy K R. Statistical estimation of daily maximum and minimum air temperatures from MODIS LST data over the state of Mississippi[J]. Giscience &. Remote Sensing, 2006, 43 (1): 78-110.

[11] 姚俊强,刘志辉,杨青,等. 近130年来中亚干旱区典型流域气温变化及其影响因子[J].地理学报,2014,69(3):291-302.

[12] 闻新宇, 王绍武, 朱锦红,等. 英国CRU高分辨率格点资料揭示的20世纪中国气候变化[J]. 大气科学, 2006, 30.

[13] 姚永慧, 张百平. 青藏高原气温空间分布规律及其生态意义[J]. 地理研究, 2015, 34(11):2084-2094.

[14] Anderson S. An evaluation of spatial interpolation methods on air temperature in Phoenix, Arizona State [J]. Department of Geography, Arizona State University, 2002.

[15] Florio E N, Lele S R, Chang Y, Cet al. Integrating AVHRR satellite data and NOAA ground observations to predict surface air temperature: A statistical approach[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(15): 2979-2994.

[16] 李新, 程国栋, 卢玲. 青藏高原气温分布的空间插值方法比较[J]. 高原气象, 2003, 22(6): 565-574.

[17] Vogt J, Viau A A, Paquet F. Mapping regional air temperature fields using satellite derived surface skin temperatures[J]. International Journal of Climatology, 1997, 17: 1559-1579.

[18] Cameron S E, Parra J L, Jones P G, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas[J]. International Journal of Climatology, 2005, 25: 1965-1978.

[19] Willmott C J, Robeson S M. Climatologically aided interpolation (CAI) of terrestrial air temperature[J]. International Journal of Climatology, 1995, 15: 221-229.

[20] Hijmans R J, Cameron S E, Parra J L, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas[J]. International Journal of Climatology, 2005, 25: 1965-1978.

[21] Barrett E C, Curtis L F. Introduction to Environmental Remote Sensing[J]. New York: Chapman and Hall, 1976.

[22] Goward S N. Satellite bioelimatology[J]. J. Clim., 1989, 2: 710-720.

[23] 胡泽银,王世杰,白晓永,等. 贵州省地表温度的遥感反演评价及时空分异规律[J]. 生态学杂志,2018,37(9):2794-2807.

[24] 姚永慧, 张百平. 基于MODIS数据的青藏高原气温与增温效应估算[J]. 地理学报, 2013, 68(1):95-106.

[25] Cresswell M P, Morse A P, Thomson M C et al. Estimating surface air temperatures, from Meteosat land surface temperatures, using an empirical solar zenith angle model[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(6):1125-1132.

[26] 闻新宇,王绍武,朱锦红,等. 英国CRU高分辨率格点资料揭示的20世纪中国气候变化[J]. 大气科学,2006(5):894-904.

[27] 任余龙,石彦军,王劲松,等. 英国CRU高分辨率格点资料揭示的近百年来青藏高原气温变化[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2012,48(6):63-68.

[28] 谢昌卫,丁永建,刘时银. 近50年来长江—黄河源区气候及水文环境变化趋势分[J]. 生态环境, 2004,13(4): 520-523.

[29] Wu L H, Wang S J, Bai X Y, et al. Quantitative assessment of the impacts of climate change and human activities on runoff changes in a typical Karst River Basin, SW China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 601-202(1):1449-1465.

[30] 葛全胜, 王顺兵, 郑景云. 过去 5000 年中国气温变化序列重建[J]. 自然科学进展, 2006,16(6): 689-696.

[31] 王绍武, 闻新宇, 罗勇, 等. 近千年中国温度序列的建立[J]. 科学通报, 2007,52(8): 958-964.

[32] 闫军辉, 葛全胜, 郑景云. 清代华北地区冬半年温度变化重建与分析[J]. 地理科学进展, 2012,31(11): 1426-1432.

[33] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 49-50.

[34] Hurst H E, Hurst Long term storage capacity of reservoirs Reston: Trans [J]. American Society of Civil Engineers, 1951, 116 (12): 776-808.

[35] 喻元, 白建军, 王建博,等. 基于MOD16的关中地区实际蒸散发时空特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 245-253.

[36] IPCC. Summary for Policymakers of Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[J]. Cambridge: Cambridge University Press. 2007, 4-6.

[37] 董思言,高学杰. 长期气候变化－IPCC第五次评估报告解读

万方数据

[J].气候变化研究进展, 2014, 10(1): 56-59.
[38] 周丹, 张勃, 李小亚,等. 1961－2010年中国大陆地面气候要素变化特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(4): 549-558.
[39] 乔丽, 吴林荣, 张高键. 中国近50a地表温度时空变化特征分析[J]. 水土保持通报, 2015, 35(5): 323-326.
[40] 翁笃鸣, 罗哲贤. 山区地形气候[M]. 北京: 气象出版社, 1990:144.
[41] 袁淑杰, 谷晓平, 缪启龙,等. 基于DEM的复杂地形下平均气温分布式模拟研究:以贵州高原为例[J]. 自然资源学报, 2010, 25(5): 859-867.
[42] 李军, 黄经峰. 山区气温空间分布推算方法评述[J]. 山地学报, 2004, 22(1):126-132.
[43] 唐圣钧,程志刚,王东海,等. 基于DEM的贵州山区气温和降水推算方法研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015,37(1): 128-137.
[44] 吴孔运,蒋忠诚,罗为群. 喀斯特石漠化地区生态恢复重建技术及其成果的价值评估:以广西平果县果化示范区为例[J]. 地球与环境,2007,35(2):159-165.
[45] 郭红艳. 石漠化对土壤碳库和碳排放的影响研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院,2013.
[46] 韩媛媛. 西南喀斯特区域峰丛洼地退耕还林(草)的生态效应研究[D]. 南宁:广西大学, 2009.

Analysis of spatial-temporal evolution and trend of the air temperature over Guizhou plateau in the last hundred years

HU Zeyin[1,2,3], WANG Shijie[1,3,4], BAI Xiaoyong[1,3], LI Qin[1,2,3], WU Luhua[1,2,3], CHEN Fei[1,3,5], YANG Yujie[1,3,4], TIAN Shiqi[1,3,4], DENG Yuanhong[1,2,3], LI Chaojun[1,3,4]

(1. *State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou* 550081, *China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; 3. *Puding Karst Ecosystem Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Puding, Guizhou* 562100, *China*; 4. *School of Geography & Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou* 550001, *China*; 5. *College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou* 550025, *China*)

Abstract Under the background of global warming, there are significant regional differences in temperature change. It is very important for ecological security and sustainable development to recognize the characteristics of regional temperature changes. This work builds on CRU, MODIS remote sensing data and observational data from meterological stations. Using trend analysis, cumulative anomalies, one-dimensional linear regression, 5 a sliding average, linear trend rate, and R/S analysis, we examine the spatial-temporal evolution of the air temperature in the Guizhou Plateau and its impact on ecological security. The results show that, (1) spatially,the spatial-temporal evolution process of temperature in the Guizhou plateau has regional and seasonal characteristics. Overall spatial air temperature was high in the south and low in the north. Spatial distributions of temperature in the spring and winter were similar, approximately opposite in summer and spring, and not obvious in autumn, mainly affected by elevations and latitudes; (2) Since 1901, the air temperature declined at a rate of −0.31 ℃/century with fluctuations, especially in autumn; (3)Since 1951, it rose up at a rate of 0.71 ℃ /century mainly in autumn; (4)Since 2000, the temperature has been decreasing at a rate of −5.43 °C/century,and it is mainly in winter, showing a certain interannual and seasonal charatceristics. In summary, the temperature in the Guizhou plateau shows a downward trend, impacted by elevations and latitudes. In this context, relevant countermeasures are proposed to provide decision-making support for the rational use of climate resources,regional industrial restructuring, and environmental protection projects in the study area.

Key words Guizhou plateau, temperature variation, spatial-temporal evolution, trend analysis, ecological security

(编辑 张 玲)

万方数据