

1960—2013年云南地面温度时空变化特征

程清平, 王平, 徐强

(云南师范大学 旅游与地理科学学院, 昆明 650500)

摘要:利用云南省1960—2013年逐日0 cm地面温度观测资料,运用Mann-Kendall趋势和突变检验法、小波分析法等分析了云南地面温度的空间分布、变化趋势及突变特征、周期变化及可能的影响因素。结果表明:年平均地温、年平均最低地温整体上呈现“南高北低”的分布特点,年平均最高地温呈现出“西北、东北低,中部、南部高;深切河谷高,高原面较低,高耸山地更低”的分布特点;同时,也表现出明显的区域性差异;年平均地温、年平均最高(低)地温高值中心主要分布在元江河谷(元江站),金沙江河谷(元谋站),滇南澜沧江及其支流河谷(景洪站、勐腊站);平均地温、平均最高(低)地温季节分布特点与年际分布大致相似。平均地温、平均最高(低)地温年际、季节及不同气候带均呈增温趋势;年平均地温、年平均最高(低)地温均以冬季增温幅度最大;年平均地温、年平均最低地温以高原气候带增温幅度最大,年平均最高地温以北热带增温幅度最大。年平均地温、年平均最高(低)地温及不同气候带地温均发生显著突变;其中,年平均地温、年平均最高(低)地温显著突变点分别为2000年、2004年、1997年;年平均地温、年平均最高(低)和不同气候带地温均以长周期变化为主周期;其中,年平均地温、年平均最高(低)地温主周期分别为28 a、26 a、26 a。年平均地温、年平均最高(低)地温与纬度和海拔呈极其显著的负相关;1960—2013年亚洲区极涡面积(强度),西太平洋副高西伸脊点指数显著减弱,西太平洋副高面积(强度、脊线)、印缅槽、西藏高原、印度副高面积指数呈显著增加可能是引起云南地温变化的原因之一。

关键词:云南省;地面温度;时空变化;影响因素

中图分类号:S159

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)06-0111-11

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Surface Temperature in Yunnan During 1960—2013

CHENG Qingping, WANG Ping, XU Qiang

(School of Tourism and Geographical Sciences, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: The spatial and temporal characteristics, abrupt change, variation periodic and possible atmospheric circulation influence factor are analyzed through using linear trend, Mann-Kendall nonparametric test, wavelet analysis and the data from 1960 to 2013 of Yunnan Province 0 cm surface temperature. The results showed that: on the whole, the distribution characteristics of annual average surface temperature, annual average minimum surface temperature were low in the northern region and high in the southern region; but the annual average maximum temperature was low in the northwest and northeast, high in the central and southern areas, high in deep valley, low in the plateau area, lower in the high mountain region. at the same time, there were differences on the regional scales, the annual average surface temperature, annual average maximum (minimum) surface temperature high value center mainly distributed in Jinsha River valley (Yuanmou meteorological station) and Yuanjiang River valley (Yuanjiang meteorological station), the Valley South Lancang River and its tributaries (Jinghong and Mengla meteorological station); the seasonal distributions of annual average surface temperature, annual average maximum (minimum) surface temperature were similar to the annual. The annual average surface temperature, annual average maximum (minimum) surface temperature and different climate zone showed significant warming trend, from the seasons, the most increase occurred in winter; from the different climatic zones, the warming trend was obvious in the plateau climatic zone of the annual average surface temperature and annual average minimum surface temperature, the annual average maximum surface temperature was observed in the north tropical zone. Annual average surface tem-

perature, annual average maximum (minimum) surface temperature and different climate zone significantly mutated warming; among them, annual average surface temperature, annual average maximum (minimum) surface temperature marked mutation in 2000, 2004, 1997, respectively. The variation period was mainly long time scale of annual average surface temperature, annual average maximum (minimum) surface temperature and different climate zone; among them, the mainly variation period of annual average surface temperature, annual average maximum (minimum) surface temperature are 28 a, 26 a, 26 a, respectively. The annual average surface temperature, annual average maximum (minimum) surface temperature had significant negatively correlation with latitude and elevation; Asia polar vortex area (strength), Western Pacific deputy high west ridge point index significantly reduced, and the Western Pacific subtropical high pressure (extent, intensity, ridge line, north side), the India Burma trough, Tibet plateau, India subtropical high area index showed significant increase in 1961—2013, which may be the reasons for the surface temperature change of Yunnan Province.

Keywords: Yunnan Province; surface temperature; temporal and spatial characteristics; influence factor

地球表面作为地球和大气能量交换的直接界面,能量交换过程势必对大气环流和气候变化过程产生极其重要的影响^[1],地面温度(指地面 0 cm 温度,以下简称地温)是表征地表自然生态环境的一个重要物理量,并决定地表向大气长波能量的辐射能力,也是气候系统变化的一个重要参数^[1-2]。气象因子的变化必然引起地表温度的变化;反之,地表反照率、地表温度和湿度又对大气环流和气候变化有重要影响^[1,3];因此,地表温度和大气环流之间是相互作用、相互影响的^[4]。地温的变化实际上反映气候变化对土壤热状况的影响,是地球资源监测和地表生态系统研究的重要指标,同时也是全球和区域尺度地表物理过程的一个关键因子,可以反映土壤—植被—大气系统能量流动、物质交换^[3,5]和气候变化幅度^[6]。因而,地温也是气候学、水文学、生态学、生物化学等研究领域的重要要素之一^[7],而且在农业气象、地表能量通量、热惯量计算等方面也有重要的应用价值^[8]。近年来,有不少学者对地温变化特点及与大气环流的关系做了研究,并得到了一些有意义的结果。周章等^[9]对海南岛尖峰岭林区 1957—2005 年热量因子的研究表明,年平均地温、年平均最高(低)地温升高趋势显著;丁文魁等^[4]对河西走廊 1961—2010 年 0 cm 地温研究得出,年平均地温、年平均最高(低)地温增温趋势显著;张焕平等^[10]对青海 1971—2010 年 5—20 cm 研究表明,5—20 cm 土层年平均地温及四季地温均呈增温趋势;杨晓玲等^[11]对石羊河流域 1961—2013 年 0—20 cm 地温研究指出,年及各季地温均呈显著的增温趋势;张文纲等^[12]利用青藏高原 1960—2005 年土壤温度观测资料研究指出,青藏高原浅层(5—20 cm)土壤温度自 1970 年以来增温趋势明显;杨智等^[13]利用云南 0 cm 地温和气温资料计算地气温差并分析得出,云南地气温差值夏季最大,其次分别为秋季、春

季、冬季;蒙桂云等^[14]对 1961—2005 年西双版纳景洪站 0—20 cm 浅层地温研究得出,年、季浅层平均地温均呈现极显著的增温趋势;吴晓娜等^[15]利用 1960—2010 年 NCEP/NCAR 逐月再分析资料研究指出,西风环流指数的变化与地表温度的增温密切相关,而欧亚遥相关型指数与中高纬度地区地表温度异常的分布类型密切相关。赵红岩等^[16]发现夏季西太平洋副热带高压位置的变化与中国深层地温的变化有明显关系,西太平洋副热带高压脊线偏北年份深层地温偏高,偏南年份地温偏低。

对于云南平均气温^[17-19]和极端气温^[20-21]已有不少研究并取得了许多有价值的研究成果,但也有一些不足;例如,站点数量较少^[21]或者空间插值方法^[20-21](反距离权重插值法)上并不能很好的体现云南特殊地形、地貌影响下地温的分布特点,且目前对于云南空气温度的研究较多,而对地面温度的研究未见报道。因此,本文利用云南省 35 个国家基准/基本气象站逐日 0 cm 地温资料,分析云南地温的年际、季节时空变化特点,并对地温与大气环流之间的相关性做尝试性讨论,可为完善和全面认识云南气候变化特点,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 研究区概况

云南地处我国西南边陲,北回归线横贯南部,属低纬高原地区,总面积 39.4 万 km²。北依广袤的亚洲大陆,南临辽阔的印度洋和太平洋,同时与被称为世界屋脊的青藏高原相邻。云南特殊的地理位置及独特地貌环境使得云南气候差异明显,呈“一山分四季,十里不同天”的立体气候特征。同时受东亚、南亚两支季风的共同作用,形成了鲜明的区域气候特征^[22]。研究站点基本信息见表 1。

表 1 研究站点基本信息

站名	经度 E/(°)	纬度 N/(°)	海拔/m	站名	经度 E/(°)	纬度 N/(°)	海拔/m
保山	99.18	25.12	1652.2	勐腊	101.57	21.47	631.9
楚雄	101.55	25.03	1824.1	屏边	103.68	22.98	1414.1
大理	100.18	25.70	1990.5	普洱	100.98	22.78	1302.1
德钦	98.92	28.48	3319.0	瑞丽	97.85	24.00	776.6
耿马	99.40	23.55	1104.9	双江	99.80	23.47	1044.1
贡山	98.67	27.75	1583.3	太华山	102.62	24.95	2358.3
广南	105.07	24.07	1249.6	腾冲	98.51	24.98	1654.6
华坪	101.27	26.63	1244.8	维西	99.28	27.17	2326.1
会泽	103.25	26.40	2110.5	香格里拉	99.73	28.02	3276.1
江城	101.85	22.58	1120.5	砚山	104.32	23.62	1561.1
景东	100.87	24.47	1162.3	永善	103.63	28.23	877.2
景洪	100.78	22.00	582.0	玉溪	102.55	24.33	1716.9
昆明	102.65	25.00	1892.4	元江	101.98	23.60	400.9
澜沧	99.93	22.57	1054.8	元谋	101.87	25.73	1120.6
丽江	100.22	26.85	2392.4	沾益	103.83	25.58	1898.7
临沧	100.08	23.88	1502.4	昭通	103.72	27.35	1949.5
泸西	103.77	24.53	1704.3	镇雄	104.87	27.42	1668.0
蒙自	103.38	23.38	1300.7				

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

资料来源于中国气象局国家气象信息中心(<http://www.nmic.gov.cn/>)—中国地面气候资料日值数据集(V3.0)提供的逐日 0 cm 平均地温、平均最高(低)地温,所有站点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 1960 年 1 月 1 日—2014 年 2 月 28 日逐日 0 cm 地温数据。高程数据为分辨率 90 m(DEM)的 SRTM,来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。利用泰森多边形方法获得云南地温平均状况(其中,屏边站平均地温、平均最高(最低)地温缺 1960 年,太华山站平均最高最低地温缺 1960 年,镇雄站平均最高地温缺 1960 年,则该站该年不参与计算)。参照已有研究结果^[23],将云南气候划分为高原气候带、温带、北亚热带、中亚热带、南亚热带、北热带。大气环流指数来自国家气候中心提供的 74 项环流指数。按照气候统计上的春季(3—5 月),夏季(6—8 月),秋季(9—11 月),冬季(12 月—翌年 2 月)统计各季地温。

2.2.1 时间变化研究方法

(1) M-K 趋势和突变检测法。为了检测地温时间序列的演变趋势和突变特点,采用世界气象组织推荐的 Mann-kendall (M-K) 趋势检验和突变检验法^[24],它不需要样本遵从一定的分布也不受少数异常值的干扰。同时,结合滑动 t 检验突变点。M-K 趋势检验法通过统计量 Z 值来确定变化趋势,对于

统计量 Z 值,大于 0 表示时间序列呈上升趋势;小于 0 时时间序列呈下降趋势。Z 绝对值 $\geq 1.65, 1.96, 2.58, 3.29$ 时,分别表示通过了显著性水平 $\alpha=0.1, 0.05, 0.01, 0.001$ 的检验。同时,由于 Sen 式斜率能避免时间序列数据缺失及数据分布形态对分析结果的影响,并剔除异常值对时间序列的干扰^[25],因此采用 Sen 式斜率计算云南省各站点地温变化趋势幅度。

(2) 小波分析。Morlet 连续复小波^[26]基函数 (Complex Morlet Wavelet)在 matlab 系统中简称为 cmor,其表达

$$\text{comr}(x)=\frac{\sigma^{2i\pi xF_c}\times\frac{x^2}{F_b}}{\sqrt{\pi F_b}}$$

(1)

式中: F_b 是频带宽度系数; F_c 是 wavelet 的中心频率; π, e 为常数。将小波系数的平方值在时间平移域(b)上积分,可得到小波方差 var,即

$$\text{var}(a)=\int_{-\infty}^{\infty}w_f|(a,b)|^2db$$

(2)

var 随时间周期 a 的变化分布图,称为小波方差分布图。它能直观地反映信号波动能量随周期的分布,可用于确定不同振荡周期的相对强度和振荡主周期。

2.2.2 空间插值方法 有关学者^[27-29]对气温、降水、相对湿度等要素采用多种空间插值方法对比分析得出,协同克里金插值方法由于考虑到经度、纬度、地貌等因子的影响,相较于反距离权重插值、普通克里金插值、张力样条插值等插值效果更佳^[29-30]。同时,胡丹桂等^[27]也指出,协同克里金插值法在站点数量少插值时较站点数量多插值时均方根误差更小,插值效果更佳。因而,对于站点数量少,采用协同克里金插

值方法效果更理想。综合以上,在此以 DEM 高程作为协同因子进行地温的空间插值。

3 地温时空变化特征

3.1 年际、季节平均地温

3.1.1 空间分布 云南年平均地温变化幅度 $9.3 \sim 27.9^{\circ}\text{C}$, 平均值为 19.3°C , 整体表现为“南高北低”的空间分布特点, 呈现出随纬度的降低而升高, 同时也表现出明显的区域差异(附图 1)。最高值未出现在最南端的勐腊站(25.6°C), 而是元江干热河谷中的元江站(27.9°C); 金沙江干热河谷的元谋站(25.3°C), 怒江下游河谷和伊洛瓦底江支流河谷(瑞丽站 24.1°C)地温也较高。研究站点中仅迪庆州 3 个站低于 15°C 。除冬季外, 春、夏、秋季平均地温与年平均

地温空间分布一致(图略, 下同), 均随着纬度的降低而升高, 且最高值均未出现在纬度最南端。春季最高值为元江站(30.2°C), 次高值为元谋站(28.5°C), 最低值为德钦站(8.9°C), 次低值为香格里拉站(9.7°C)。夏季最高值为元江站(32.7°C), 次高值为元谋站(30.6°C), 滇西北的华坪站(27.5°C)地温也较高; 最低值为香格里拉站(17.1°C), 次低值为德钦站(18.0°C)。秋季最高值为元江站(17.7°C), 次高值为澜沧江下游的景洪站(26.8°C), 最低值为香格里拉站(9.6°C), 次低值为德钦站(10.6°C)。冬季平均地温随着纬度增加而降低, 最高值为最南端的勐腊站(21.2°C), 元江站(20.8°C)和元谋站(17.9°C)也是两个高值中心; 最低值为香格里拉站(0.5°C), 次低值为德钦站(1.0°C)。

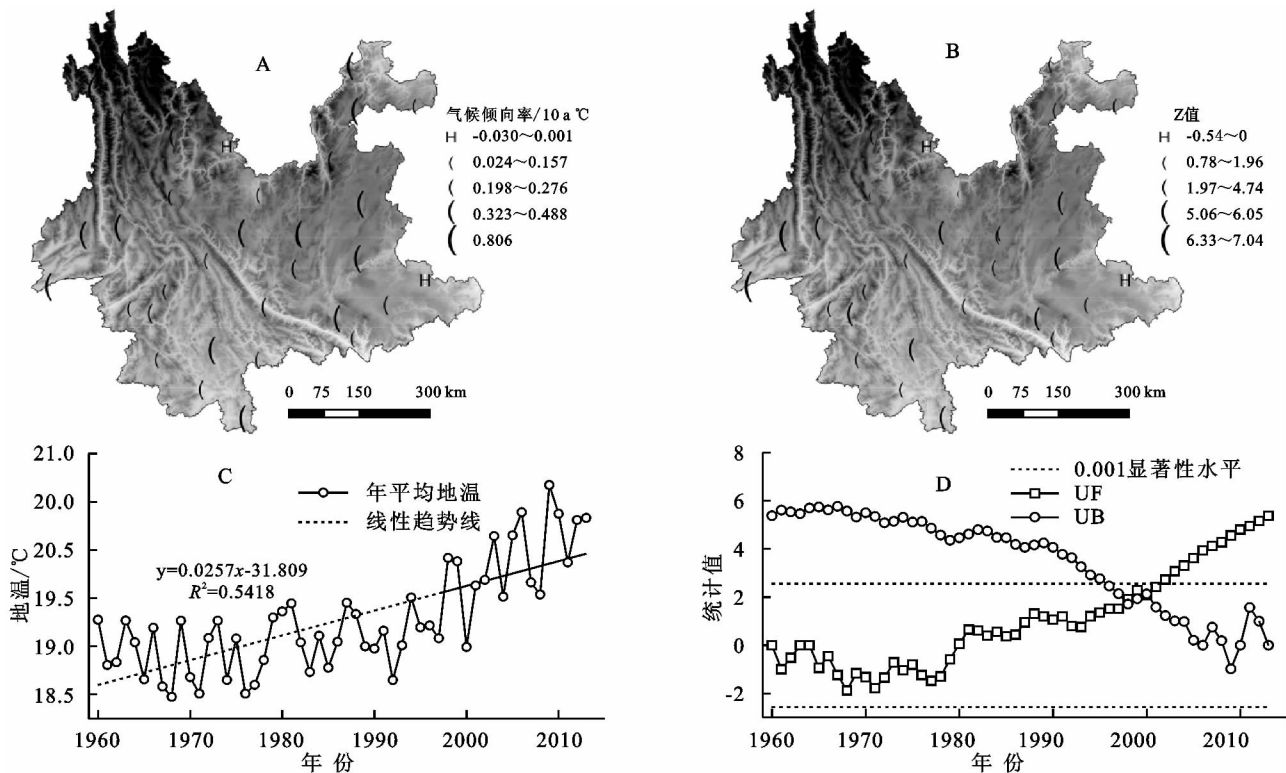


图1 1960—2013年云南年平均地温变化趋势与突变检验

3.1.2 变化趋势及突变特征 从图 1A 可知云南年平均地温仅有 2 个站点呈下降趋势, 分别是华坪 ($-0.03^{\circ}\text{C}/10\text{a}$) 和广南 ($-0.004^{\circ}\text{C}/10\text{a}$), 且下降趋势不显著(图 1B)。增温幅度以滇西北(包括迪庆州、怒江州、丽江市, 下同)的德钦站($0.806^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)最大; 滇西南(包括普洱市、临沧市、西双版纳州、保山市, 下同)的腾冲站($0.488^{\circ}\text{C}/10\text{a}$), 滇东北(包括昭通市、曲靖市, 下同)的永善站($0.474^{\circ}\text{C}/10\text{a}$), 滇中(昆明市、楚雄州、玉溪市, 下同)的楚雄站($0.456^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)增温幅度也较大。整体来看, 云南年平均地温倾向率为 $0.257^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ (图 1C, $Z=5.31$), 上升趋势十分显著。所研究的 35

个站点中仅有江城、华坪、元谋、广南、会泽站 Z 绝对值 < 1.96 未通过显著性检验(图 1B), 其余站点均通过 0.05 及以上的显著性检验。从不同气候带来看(图略, 下同), 增温幅度表现为高原气候带($0.585^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $Z=7.05$) $>$ 北亚热带($0.29^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $Z=4.96$) $>$ 中亚热带($0.262^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $Z=5.11$) $>$ 温带($0.246^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $Z=4.08$) $>$ 北热带($0.221^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $Z=4.59$) $>$ 南亚热带($0.183^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $Z=5.25$)。四季平均地温也呈极其显著的增温趋势(图略, 下同), 呈现冬季 $0.384^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ($Z=4.90$) $>$ 秋季 $0.236^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ($Z=4.01$) $>$ 春季 $0.229^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ($Z=3.64$) $>$ 夏季

0.188℃/10 a($Z=4.24$)。

年平均地温在顺序列 UF 和逆序列 UB 曲线之间于 2000 年交于一点,并于 2002—2013 年突破 2.58 的临界线,通过 0.01 的显著性检验,这种突变是由相对低温到相对高温的突变,经滑动 t 检验知 2000 年为显著突变点(图 1D)。四季平均地温与年平均地温一致,呈突变增温趋势(表 2),且均通过 0.01 的显著性检验。春、夏、秋、冬季突变点分别为 2003 年、2001 年、2000 年、1996 年;秋季突变年份与年一致,冬季突变超前于春、夏、秋季。

从不同气候带来看(年际突变特点,下同),高原气候带在顺序列 UF 和逆序列 UB 之间虽有交点,但交点

位于信度线外,没有发生突变;温带、北亚热带、中亚热带均于 2001 年发生突变(表 3),均超过 0.01 的临界线,突变增温趋势显著。南亚热带显著突变点为 1997 年,北热带为 1994 年,高原气候带、南亚热带、北热带突变于 90 年代,超前于温带、北亚热带、中亚热带。

表 2 1960—2013 年云南年平均地温、年平均最高地温、年平均最低地温季节突变年份

项目	春	夏	秋	冬
平均地温	2003**	2001**	2000**	1996**
平均最高地温		2004**	2002**	1993**
平均最低地温	1999***	1997**	1998**	1996***

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,下同。

表 3 1960—2013 年云南不同气候带年平均地温、年平均最高地温、年平均最低地温突变年份

项目	高原气候区	温带	北亚热带	中亚热带	南亚热带	北热带
平均地温	1993***	2001**	2001**	2001**	1997**	1994**
平均最高地温	2001**	2004**	2005**	2003**	1989**	2001**
平均最低地温		1998**	1996***	1995***	1998**	2001**

3.1.3 周期变化 从图 2A 可知,年平均地温存在贯穿整个研究时段的 2~5 a 左右的短周期变化和 20~30 a 左右的长周期变化,20 世纪 70—80 年代存在 6~9 a 左右的短周期变化,60 年代前期及 80 年代相对偏暖,60 年代后期至 70 年代前期、90 年代相

对偏冷,21 世纪以来相对偏暖,且曲线未封闭,这表明未来一段时间这种偏暖趋势仍将继续。

从小波方差(图 2B)知,年平均地温存在 4 a 和 8 a 的短周期变化和 26 a 的长周期变化,以 28 a 长周期变化为第一主周期。

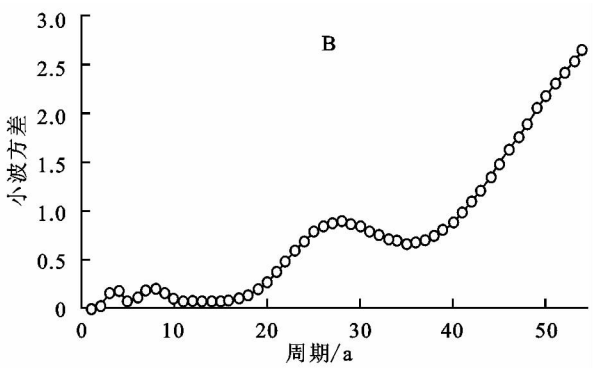
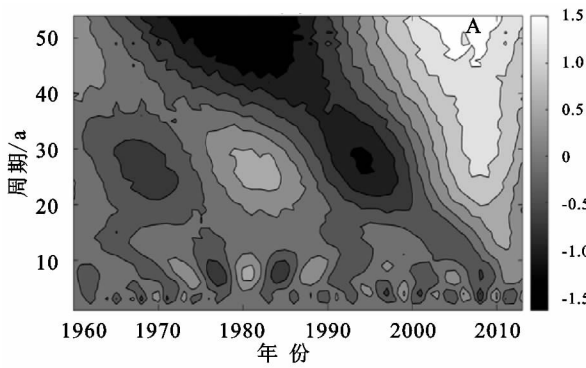


图 2 1960—2013 年云南年平均地温小波变换系数(A)和小波方差(B)

从不同季节来看(表 4),春、秋、冬季年平均地温均存在一致的 8 a 短周期变化和 28 a 长周期变化;此外,春、冬季还存在一致的 4 a 短周期变化;夏季存在 5 a 短周期和 27 a 长周期变化;各季节均以长周期变化为以第一主周期。

从表 5 可知(年际周期变化,下同),高原气候带以 26 a 长周期变化为主周期,不存在短周期变化;温带、北热带、中亚热带、南亚热带存在一致的 4 a 短周期变化;中亚热带、南亚热带、北热带存在一致的 8 a 短周期变化;温带和中亚热带存在一致的 28 a 长周期变化;南亚热带和北热带存在一致的 27 a 长周期变化;北亚热带存在 30 a 长周期变化;各气候带与全省一致,均以长周期变化为第一主周期。

表 4 1960—2013 年云南年平均地温、平均最高地温、平均最低地温季节周期变化

项目	春/周期	夏/周期	秋/周期	冬/周期
平均地温/℃	4/8/28	5/27	8/28	4/8/28
平均最高地温/℃	4/8/16/26	5/27	3/26	5/12/28
平均最低地温/℃	4/28	7/14/25	8/25	7/24

注:下划线为主周期,下同。

表 5 1960—2013 年云南不同气候带年平均地温、平均最高地温、平均最低地温周期变化

项目	高原气候带/周期	温带/周期	北亚热带/周期	中亚热带/周期	南亚热带/周期	北热带/周期
平均地温/℃	26	4/9/28	4/7/30	4/8/28	4/8/27	3/8/27
平均最高地温/℃	2/26	3/9/20	4/8/30	7/25	4/27	3/8/28
平均最低地温/℃	8/26	8/24	8/26	8/28	8/25	8/24

3.2 年际、季节平均最高地温

3.2.1 空间分布 云南年平均最高地温变化范围为 $30.2\sim 49.0^{\circ}\text{C}$,平均 38.8°C ,呈现出“西北、东北低,中部、南部高;深切河谷高,高原面较低,高耸山地更低”等分布特点(附图2);最高值为元江站 49.0°C ,次高值为元谋站 47.0°C ,而纬度最南端的景洪站(45.8°C)和勐腊站(42.9°C)均低于干热河谷的元江站和元谋站;最低值为滇东北的镇雄站(30.2°C)和永善站(30.3°C),次低值为滇西北的德钦站(31.5°C)和香格里拉站(31.9°C);低于 35°C 的区域主要出现在滇西北、滇东北。

四季与年平均最高地温变化一致,最高值均未出现在纬度最南端。春季最高值为元谋站(55.0°C),次高值是元江站(54.3°C),滇西北的华坪站(53.0°C)是继元江站和元谋站之外的另一高值中心;最低值出现在滇西北的贡山站(30.4°C),而不是纬度最北的德钦站(31.3°C),次低值是滇东北的镇雄站(33.3°C)。夏季最高值为元江站(53.1°C),次高值为元谋站(49.4°C);最低值为滇中太华山站(35.8°C),而不是纬度最北的德钦站(39.1°C)。秋季最高值为元江站(47.5°C),次高值为景洪站(44.1°C);最低值为滇东北的永善站(28.2°C);冬季最高值为滇南的景洪站(42.8°C),元江(41.6°C)和元谋站(41.3°C)也较高;最低值为滇东北的镇雄站(16.0°C)。

3.2.2 变化趋势及突变特征 从图3A和图3B可知,云南年平均最高地温变化较为复杂。35个站点中有17个站点 Z 绝对值 ≥ 2.58 通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验,其中15个站点呈显著的增温趋势,2个站点呈显著的降温趋势,分别是华坪和江城站;4个站点 Z 绝对值 ≥ 1.96 通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,其中2个站点呈增温趋势,2个站点呈降温趋势;有4个站点 Z 绝对值 ≥ 1.65 通过0.1的显著性检验;其余10个站点未通过显著性检验,其中8个站点呈增温趋势,2个站点呈降温趋势。从图3C可知,云南年平均最高地温倾向率为 $0.314^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ($Z=3.48$),上升趋势十分显著。以南盘江流域的沾益站($1.274^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)增温幅度最大,其次是德钦站($0.969^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)和勐腊站($0.881^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)。各气候带也呈显著的增温趋势,其倾向率呈北热带($0.58^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $Z=4.84$)>高原气候带($0.556^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $Z=3.56$)>北亚热带($0.29^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $Z=3.13$)>中亚热带($0.284^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $Z=2.61$)>温带($0.243^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $Z=2.12$)>南亚热带($0.14^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $Z=1.86$)。四季平均最高地温与年平均地温一

致,呈增温趋势;其中,冬季增温趋势极其显著,其倾向率为 $0.535^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ($Z=3.06$),其次是秋季($0.34^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $Z=2.40$)和夏季($0.258^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $Z=2.08$),春季增温幅度最小($0.109^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, $Z=0.85$),且增温趋势不显著。

从图3D知,云南年平均最高地温54a来发生了显著的突变增温,顺序列UF曲线在1977年以前呈波动减少趋势,1977年以后呈波动上升趋势,且在1985年以后顺序列UF曲线一直在0以上,并于2004年与逆序列UB交于一点,结合滑动t检验知2004年为显著突变点。突变时间区域为2010—2014年,突变后较突变前升高了 1.5°C 。四季中春季在顺序列UF和逆序列UB之间于2003年交于一点,但位于端点处,一般不可取,因此,春季未发生突变。夏、秋、冬季均发生显著的突变增温,突变点分别为2004年、2002年、1993年(表2),冬季突变超前于夏、秋季。不同气候带突变特征与年一致(表3),均发生显著的突变。结合经滑动t检验知,高原气候带与北热带显著突变点均为2001年,温带、北亚热带、中亚热带、南亚热带显著突变点分别为2004年、2005年、2003年、1989年,南亚热带超前与温带、北亚热带和中亚热带,呈非对称性变化。

3.2.3 周期变化 年平均最高地温存在2~5a、6~9a、20~30a左右的周期变化,其中,20~30a左右的长周期变化贯穿整个研究时段,且20世纪90年代相对偏冷较为明显;6~9a左右的短周期变化主要发生在70—80年代(图4A)。从小波方差(图4B)可知,年平均最高地温以26a长周期变化为第一主周期,并存在3a和8a短周期变化。从不同季节来看(表4),春季有4a、8a、16a和26a的周期变化,以26a长周期变化为第一主周期;夏季有5a短周期和27a长周期变化,以27a长周期变化为第一主周期;春、秋季一致,以26a长周期变化为第一主周期;冬季以28a长周期变化为第一主周期,同时还存在5a和12a的周期变化。不同气候带也存在明显的周期变化(表5),高原气候带以26a长周期变化为第一主周期,同时还存在2a短周期变化;温带以20a长周期变化为第一主周期,3a和9a短周期变化为第二、三周期;北热带以30a长周期变化为第一主周期,8a、4a短周期变化分别为第二、第三周期;南亚热带以27a长周期变化为第一主周期,4a短周期变化为第二主周期;中亚热带以25a长周期变化为第一主周期,7a短周期变化为第二周期;北热带以28a长周期变化为第一主周期,3a、8a短周期变化为第二、三周期。

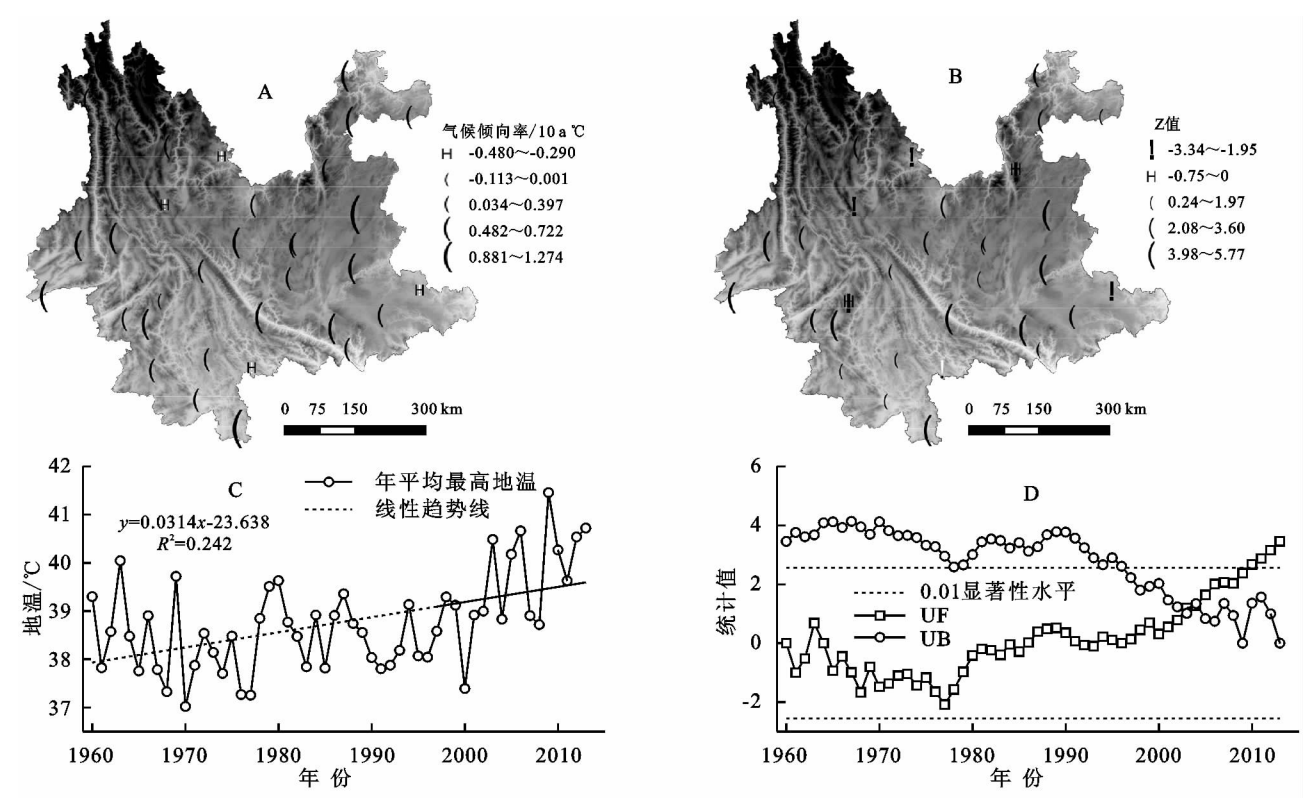


图 3 1960—2013 年云南年平均最高地温变化趋势与突变检验

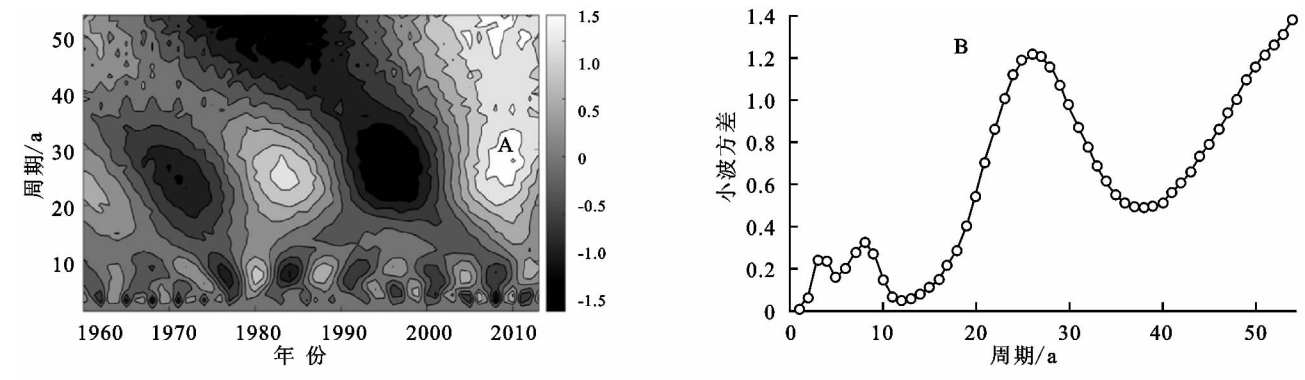


图 4 1960—2013 年云南年平均最高地温小波变换系数(A)和小波方差(B)

3.3 年际、季节平均最低地温

3.3.1 空间分布 云南年平均最低地温 $-0.9 \sim 18.6^{\circ}\text{C}$,平均 10.6°C ,呈现出“南高北低”的空间分布特点(附图 3)。滇西北的香格里拉站(-0.9°C)最低,最高值为元江河谷的元江站(18.6°C),而没有出现在纬度最南端的勐腊站(18.1°C);此外,金沙江流域的元谋站(14.7°C)也较高。研究站点中最高值与最低值极差 19.5°C ,大于 10°C 的区域主要在南部区域和元谋干热河谷。春、夏季平均最低地温空间分布特征与年相似,高值中心均出现在元江站(春季为 19.1°C ,夏季为 24.7°C),而最南端的勐腊站(春季为 17.7°C ,夏季为 22.7°C)相较于元江站低;再者,元谋站春(24.7°C)、夏(22.0°C)季平均最低地温也较高;低值中心均出现在滇西北的香格里拉站(春季为 -1.9°C ,夏季为 8.9°C);此外,滇东北的昭通站

(6.6°C)和会泽站(7.0°C)春季平均地温也较低,而滇中太华山站夏季(13.2°C)平均最低地温也较低。秋、冬季平均最低地温随纬度的升高而降低,最高值均位于最南端的景洪站(秋季为 19.6°C ,冬季为 11.2°C)和勐腊站(秋季为 19.5°C ,冬季为 12.1°C),而元江站(秋季为 19.5°C ,冬季为 11.0°C)也较高;最低值均为香格里拉站(秋季 0°C ,冬季为 -10.6°C)。

3.3.2 变化趋势及突变特征 从图 5A 和图 5B 可知,云南各站点年平均最低地温均呈上升趋势,35 个站点中除元谋站($Z=1.02$),沾益站($Z=1.35$)增温趋势不显著和屏边站增温趋势通过 0.05 的显著性检验外,其余站点均通过 0.001 的显著检验,增温趋势十分显著。整体来看,云南年平均最低地温倾向率为 $0.344^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ($Z=6.69$),呈十分显著的上升趋势(图 5C);以澜沧江上游的德钦站($1.02^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)和金

沙江上游的香格里拉站($0.636^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)以及滇中的楚雄站($0.748^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)增温幅度最明显。而南盘江上游的沾益站($0.043^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)和金沙江中游的元谋站($0.078^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)增温幅度最小。从不同气候带来看,各气候带均呈极其显著的增温趋势,增温幅度为高原气候带($0.825^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, $Z=7.66$)>中亚热带($0.386^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, $Z=7.07$)>北亚热带($0.326^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, $Z=$

6.62)>南亚热带($0.311^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, $Z=6.09$)>温带($0.285^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, $Z=5.34$)>北热带($0.202^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, $Z=4.35$)。四季平均最低地温与年一致,呈极其显著的增温趋势,以冬季($0.453^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, $Z=6.30$)增温幅度最大,其次是春季($0.415^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, $Z=6.72$),秋季($0.268^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, $Z=4.75$),夏季($0.241^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, $Z=5.87$)增温幅度较小。

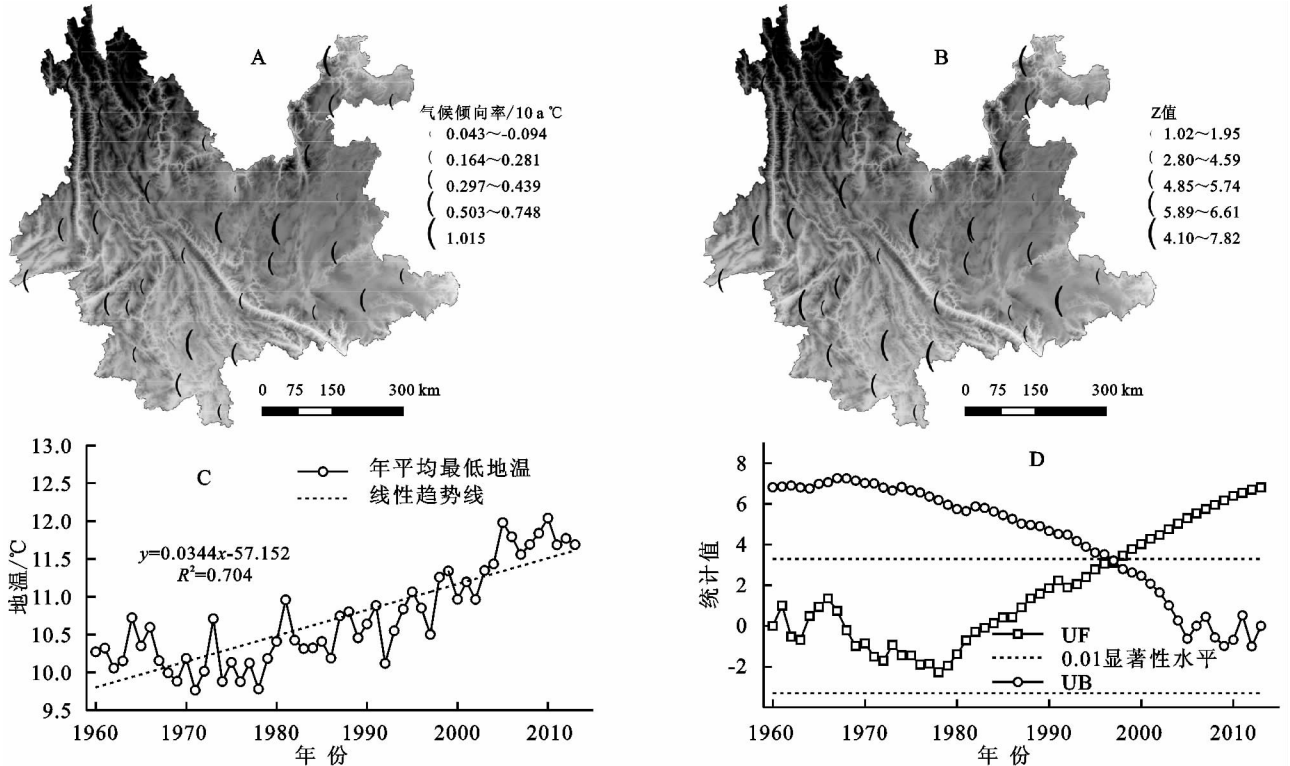


图 5 1960—2013 年云南年平均最低地温变化趋势与突变检验

从突变特征来看,云南年平均最低地温在顺序列 UF 和逆序列 UB 曲线之间于 1997 年交于一点,并于 1998—2013 年突破临界线,突变增温趋势极其显著,结合经滑动 t 检验知 1997 年为显著突变点(图 5D)。四季也发生显著的突变增温,夏、秋季通过 0.01 的显著性检验,春、冬季通过 0.001 的显著检验(表 2)。

结合经滑动 t 检验知,春、夏、秋、冬季显著突变点分别为 1999 年、1997 年、1998 年和 1996 年。从不同气候带来看(表 3),除高原气候带未发生突变外,温带、北亚热带、中亚热带、南亚热带、北热带显著突变点分别为 1998 年、1996 年、1995 年、1998 年、2001 年,且北亚热带、中亚热带通过 0.001 的显著性检验。

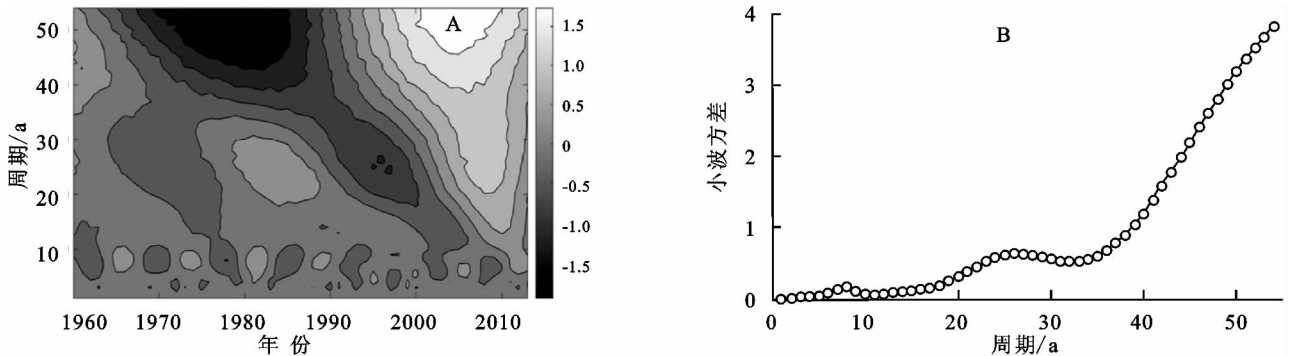


图 6 1960—2013 年云南年平均最低地温小波变换系数(A)和小波方差(B)

3.3.3 周期变化 从图 6A 可知,云南年平均最低地温存在 5~10 a 和 20~30 a 左右的周期变化;5~10 a 短周期变化贯穿整个时段,且正负相位交替出现。从图 6B

小波方差知,年平均最低地温在 26 a 时间尺度上振荡最强,振幅最大,为年平均最低地温第一主周期;此外,还存在 8 a 短周期变化。从季节来看(表 4),夏、秋季均以

25 a 长周期变化为第一主周期;同时,夏季还存在 7 a 短周期和 14 a 长周期变化,秋季还存在 8 a 短周期变化。春、冬季分别存在 28 a 和 24 a 的长周期变化,且为第一主周期。同时,春、冬季还分别存在 4 a 和 7 a 短周期变化。从不同气候带来看(表 5),高原气候带、温带、北亚热带、中亚热带、南亚热带、北热带周期均以长周期变化为第一主周期,分别为 26 a,24 a,26 a,28 a,25 a,24 a,同时各气候带还存在一致的 8 a 短周期变化。

表 6 云南年平均地温与同期大气环流指数相关关系	
指数	年平均地温
西太平洋副高面积(110°—180°E)	0.641**
西太平洋副高强度(110°—180°E)	0.629**
西太平洋副高脊线(110°—150°E)	0.333*
西太平洋副高北界(110°—150°E)	0.648**
西太平洋副高西伸脊点(110°—150°E)	-0.556**
印缅槽(15°—20°N,80°—100°E)	0.466**
西藏高原(25°—35°N,80°—100°E)	0.466**
亚洲区极涡面积(60°—150°E)	-0.538**
亚洲区极涡强度(60°—150°E)	-0.543**
印度副高脊线(65°—95°E)	-0.159
印度副高面积强度(65°—95°E)	0.260
印度副高面积(65°—95°E)	0.273*

注:“*”在 0.05 显著,“**”在 0.01 显著。

4 结论与讨论

(1) 总体来看,云南年平均地温、年平均最低地温大致随着纬度的降低而升高,而年平均最高地温表现为“西北、东北低,中部、南部高;深切河谷高,高原面较低,高耸山地更低”的空间分布特点;同时也表现出明显的区域差异,这种分布特点与云南年平均气温^[19]和年极端最高(低)气温^[20]的分布相似。四季平均地温最高(低)值与年平均地温空间分布相似,最高值均未出现在最南端,而冬季最高值出现在最南端,最低值出现在最北端。平均最高地温四季空间分布与年一致。平均最低地温春、夏季与年空间分布相似,秋、冬季最高值均出现在最南端,最低值均出现在最北端。54 a 来年平均地温和年平均最高地温最高值分别为 20.7℃和 41.3℃均出现 2009 年,年平均最低地温最高值为 2010 年的 12℃。从季节来看,年平均地温秋、冬季最高值分别为 21.3℃和 14.2℃,均出现在 2009 年。年平均最高地温秋、冬季最高值分别为 41.8℃和 37.3℃,均出现在 2009 年。年平均最低地温秋、冬季最高值分别为 13.2℃和 3.9℃,均出现在 2010 年。可见,2009—2010 年云南发生百年一遇的特大干旱^[31]与地温的偏高有一定的关系。

(2) 年平均地温、年平均最高(低)地温均发生显著的突变增温,突变点分别为 2000 年、2004 年和

1997 年,尤以年平均最低地温突变极其显著,且突变超前于年平均地温和年平均最高地温。除年平均最高地温春季未发生突变外,年平均地温和年平均最高(低)地温各季节均发生显著的突变增温。除高原气候区年平均最低地温未发生突变外,不同气候带年平均地温、年平均最高(低)地温均发生显著的突变增温。除南亚热带年平均地温突变于 20 世纪 80 年代外,平均地温、平均最高(低)地温年际、季节和不同气候带均突变于二十世纪 90 年代以来,与云南平均气温^[19]和极端气温^[20]的年际、季节和不同气候带^[19]的突变时间相一致。

(3) 平均地温、平均最高(低)地温年际、季节及不同气候带均以长周期变化为主;此外,还存在 2~9 a 短周期变化,与云南平均气温^[19]和极端气温^[20]年、季节和不同气候带均以长周期变化为主,且还存 2~8.7 a 的短周期变化相一致。具体来看,年平均最高(低)地温和年平均最低地温均存在 8 a 短周期和 26 a 长周期变化;年平均最高地温存在 4 a 和 8 a 短周期和 28 a 长周期变化。平均地温、平均最高(低)地温不同季节均表现出 3~8 a 短周期和 12~28 a 长周期变化,而不同气候带表现为 2~9 a 短周期和 20~30 a 长周期变化。

(4) 云南年平均地温、年平均最高(低)地温均呈极其显著的增温趋势,其气候倾向率分别为 0.257℃/10 a,0.314℃/10 a,0.342℃/10 a,同时也存在明显的区域差异。平均地温年、季节及不同气候带的变化趋势与云南平均气温年、季节^[19]及不同气候带^[20]变化趋势一致,即年平均地温均呈显著的增温,均以冬季增温最为明显,且均以高原气候带增温幅度最大;年平均最高地温与年平均最低地温均以冬季增温幅度最大;年平均最高地温以北热带增温幅度最大,而年平均最低地温以高原气候带增温幅度最大,季节变化特点与全国 0 cm 地温^[32]变化特点一致。以上分析表明,年与季节平均地温和平均最高(低)地温变化特点不一致,其形成原因与复杂地形、地貌、坡度、坡向等密切相关,即与“通道—阻隔”作用^[33]有关。例如,位于河谷地区的元谋站和元江站,年平均地温、年平均最高(低)地温均较高;通过相关性分析发现,年平均地温与经度、纬度、海拔相关系数分别为-0.005($\alpha>0.05$),-0.776($\alpha<0.001$),-0.916($\alpha<0.001$);年平均最高地温与经度相关系数为-0.173($\alpha>0.05$),与纬度相关系数为-0.592($\alpha<0.001$),与海拔相关系数为-0.524($\alpha<0.001$);年平均最低地温与经度、纬度、海拔相关系数分别为 0.095($\alpha>0.05$),-0.781($\alpha<0.001$),-0.964($\alpha<0.001$);此外,周刊社等^[34]指出地温的升高起因于

气温的升高。而季节变化特点,张慧智等^[35]指出地温的季节变化会受到太阳辐射、气温、降水量、植被覆盖多方面因素的影响。

(5) 有关学者指出地温的变化与大气环流背景有密切的关系^[15-16,36]。利用国家气候中心提供的74项大气环流指数,选取密切相关的12项环流指数,计算同期环流指数与云南年平均地温的相关关系。从表6得知,云南年平均地温与亚洲极涡面积(强度)呈显著的负相关;这说明亚洲极涡面积越小(大),强度越弱(强),南下云南的冷空气偏弱(强),从而导致云南年平均地温偏高(低);同时副高西伸脊点指数与云南平均地温也呈显著负相关,这意味着副高偏西(东),有利于云南地温偏高(低);西太平洋副高(面积、强度、脊线、北界),印缅槽指数、青藏高原指数、印度副高面积与年平均地温呈显著的正相关,这表明在西太平洋副高面积越大(小),强度越强(弱),脊线和北界偏北(南),印缅槽越弱(强),青藏高原高度越大(小),印度副高面积越大(小)的形势下,云南地温呈偏高(低)。同时计算1960—2013年各指数变化趋势发现,亚洲区极涡面积(强度)、西太平洋副高系数脊点指数呈显著减弱,西太平洋副高面积(强度、脊线、北界)、印缅槽、青藏高原、印度副高面积指数呈显著增加。上述环流因子的共同作用可能是引起云南平均地温变化的主要原因之一。此外,冬半年滇黔准静止锋(昆明准静止锋或西南准静止锋)在东、西部控制时间的长短和影响强度的空间差异^[37-38]对地温也有十分显著的影响;再者,人类活动等的影响也不容忽视。

(6) 浅层地温(0—40 cm)作为一种积蓄在地下的无形自然资源,是地球深部热传导和热对流与太阳辐射共同作用的产物,为浅层土壤温度与距离地表1.5 m处百叶箱温度之间存在常年温差而形成的能量,是两个状态不同的温度场之间存在的势能^[39-40]。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^[41]。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来评估气候变化对农作物的影响的适用性^[42]。在此分析了云南年平均地温和年平均最高(低)地温的年际与季节变化特点,并对其原因做了尝试性探讨。由于对云南1.5 m处百叶箱温度的研究已有许多研究成果和篇幅的限制,因而未对地温与气温的响应关系进行探讨;此外,由于资料的限制,也未对深层次地温进行研究;因此,有必要对

深层地温和气温的响应关系进行研究,才能更好的为云南农业生产、生态环境保护等提供参考。

参考文献:

- [1] 李崇银. 气候动力学引论[M]. 气象出版社, 2000: 290-296.
- [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] 施宁, 张乐英. 冬季平流层北极涛动对江南气温的影响[J]. 大气科学学报, 2013, 36(5): 604-610.
- [4] 丁文魁, 殷玉春, 杨晓玲, 等. 河西走廊东部地表温度的变化趋势及特征分析[J]. 干旱区研究, 2014, 31(6): 1046-1052.
- [5] Li Z L, Becker F. Feasibility of land surface temperature and emissivity determination from AVHRR data[J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 43(1): 67-85.
- [6] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis[C]// Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [7] Qin Z, Karnieli A. Progress in the remote sensing of land surface temperature and ground emissivity using NOAA-AVHRR[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(12): 2367-2393.
- [8] Dash P, Gottsche F M, Olesen F S, et al. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice current trends[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(13): 2563-2594.
- [9] 周璋, 林明献, 李意德, 等. 海南岛尖峰岭林区近50年的热量因子变化特征[J]. 生态环境学报, 2015, 24(4): 575-582.
- [10] 张焕平, 张占峰, 汪青春, 等. 近40年青海浅层地温的变化特征[J]. 中国农业气象, 2013, 34(2): 146-152.
- [11] 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.
- [12] 张文纲, 李述训, 庞强强. 近45年青藏高原土壤温度的变化特征分析[J]. 地理学报, 2008, 63(11): 1151-1159.
- [13] 杨智, 刘志刚, 李娟. 云南省地气温差时空变化特征分析[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2010, (S1): 289-293.
- [14] 蒙桂云, 喻彦. 1961—2005年西双版纳浅层地温对气候变化的响应[J]. 气象科技, 2010, 38(3): 316-320.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 段旭, 陶云. 云南近50年来的气候变化[J]. 热带气象学报, 2012, 28(2): 243-250.
- [18] 郑建萌, 任菊章, 张万诚. 云南近百年来温度雨量的变化特征分析[J]. 灾害学, 2010, 25(4): 24-31.

- [19] 陶云,樊风,段旭,等. 云南不同气候带气温变化特征[J]. 云南大学学报:自然科学版,2013,35(1):652-660.
- [20] 张万诚,郑建萌,马涛,等. 1961—2012年云南省极端气温时空演变规律研究[J]. 资源科学,2015,37(4):710-722.
- [21] 杨晓静,徐宗学,左德鹏,等. 云南省1958—2013年极端气温时空变化特征分析[J]. 长江流域资源与环境,2016,25(3):523-536.
- [22] 秦剑,解明恩,刘瑜,等. 云南气象灾害总论[M]. 北京:气象出版社,1997:1-4.
- [23] 段旭,陶云,段长春. 云南省细网格气候区划及气候代表站选取[J]. 大气科学学报,2011,34(3):336-342.
- [24] 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.
- [25] Gilbert R O. Statistical methods for environmental pollution monitoring[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1987:208-217.
- [26] Kumar P, Foufoula-Georgiou E. Wavelet analysis in geophysics: An introduction[J]. Wavelets in Geophysics, 1994,4: 1-43.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 彭彬,周艳莲,高苹,等. 气温插值中不同空间插值方法的适用性分析:以江苏省为例[J]. 地球信息科学学报,2011,13(4):539-548.
- [31] 郑建萌,张万诚,陈艳,等. 2009—2010年云南特大干旱的气候特征及成因[J]. 大气科学,2015,35(4):488-496.
- [32] 万云霞,张万诚,肖子牛. 近百年云南纵向岭谷区气温的时空变化特征[J]. 自然灾害学报,2009,18(5):183-188.
- [33] 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.
- [34] 周刊社,罗骥翮,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.
- [35] 张慧智,史学正,于东升,等. 中国土壤温度的季节性变化及其区域分异研究[J]. 土壤学报,2009,46(2):227-234.
- [36] 陈月娟,张弘,周任君,等. 西太平洋副热带高压的强度和位置与亚洲地表温度之关系[J]. 大气科学,2001,25(4):515-522.
- [37] 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.
- [38] 杜小玲,蓝伟. 两次滇黔准静止锋锋区结构的对比分析[J]. 高原气象,2010,29(5):1183-1195.
- [39] 卫万顺,郑桂森,栾英波. 北京平原区浅层地温场特征及其影响因素研究[J]. 中国地质,2010,37(6):1733-1739.
- [40] 庞强强,赵林,李述训. 局地因素对青藏公路沿线多年冻土区地温影响分析[J]. 冰川冻土,2011,33(2):349-356.
- [41] 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.
- [42] 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):91-103.

~~~~~

(上接第110页)

- [13] 罗林涛,程杰,王欢元,等. 玉米种植模式下砒砂岩与沙复配土氮素淋失特征[J]. 水土保持学报,2013,27(4):58-61.
- [14] 李娟,韩霁昌,李晓明. 砒砂岩与沙复配成土对小麦光合生理和产量的影响[J]. 麦类作物学报,2014,34(2):203-209.
- [15] 摄晓燕,张兴昌,魏孝荣. 适量砒砂岩改良风沙土的吸水 and 保水特性[J]. 农业工程学报,2014,30(14):115-123.
- [16] 张北赢,徐学选,刘文兆. 黄土丘陵沟壑区不同水保措施条件下土壤水分状况[J]. 农业工程学报,2009,25(4):54-58.
- [17] 孟秦倩,王健. 延安丘陵沟壑区果园土壤储水量动态研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(11):161-164.
- [18] 王进鑫,黄宝龙,罗伟祥. 黄土高原人工林地水分亏缺的补偿与恢复特征[J]. 生态学报,2004,24(11):2395-2401.
- [19] 李玉山,喻宝屏. 土壤深层储水对作物稳产、增产的作用[J]. 中国农业科学,1965,6(3):40-43.
- [20] 韩仕峰. 从土壤的储水能力分析黄土高原的植被建设[J]. 中国水土保持,1992,12(16):45-49.
- [21] 张磊,齐瑞鹏,张应龙,等. 砒砂岩风化物对土壤水分特征曲线及蒸发的影响[J]. 土壤学报,2015,52(1):77-86.
- [22] 金风霞,麻冬梅,刘昊焱,等. 不同种植年限苜蓿地土壤环境效应的研究[J]. 干旱地区农业研究,2014,32(2):73-77.
- [23] Ai C, Liang G, Sun J, et al. Reduced dependence of rhizosphere microbiome on plant-derived carbon in 32-year long-term inorganic and organic fertilized soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015,80(80):70-78.