

引用格式:李涛辉,张文翔,吕爱锋,刘永毫. 云南省农业生长季热量资源的时空特征[J]. 山地学报, 2023, 41(3): 361-374.
LI Taohui, ZHANG Wenxiang, LYU Aifeng, LIU Yonghao. Temporal and spatial characteristics of heat resources in growing season in Yunnan province, China [J]. Mountain Research, 2023, 41(3): 361-374.

云南省农业生长季热量资源的时空特征

李涛辉¹, 张文翔^{1*}, 吕爱锋², 刘永毫¹

(1. 云南师范大学 云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 昆明 650500;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘要: 云南省是中国典型的湿润型雨养农业区, 农业发展受热量资源变化影响显著。然而, 当前对湿润型雨养农业区热量资源的研究较为缺乏, 尤其是对区域内不同海拔梯度下各界限温度的积温研究仍有待深入。本研究基于云南省 27 个气象站近 50 年逐日气象数据, 采用气候倾向率、小波分析以及 Mann-Kendall 检验等研究方法, 分析了云南省不同海拔地区生长季 ≥ 0 °C、 ≥ 10 °C 及 ≥ 20 °C 积温的时空特征, 并探讨了各积温的周期演变特征与气候变化的响应。结果表明: (1) 近 50 年, 云南省不同海拔地区的各类积温均表现出稳定增加的趋势, 峰值都出现在近 5 年, 谷值出现在 20 世纪 70 年代中期。(2) 除滇中城市群区域内呈现出显著性增温现象之外, 不同海拔地区的各类积温呈现出高海拔地区增温趋势高于低海拔地区的特征。(3) 在海拔因素、城市热岛效应和气候变暖的协同影响下, 云南省气温增长多发生在 ≥ 10 °C 的天数上, ≥ 20 °C 积温在不同海拔地区的空间分布差异性极大, 增温趋势显著大于 0 °C 积温和 10 °C 积温。(4) 不同海拔地区各类积温都存在 15~25 a 和 40~50 a 两个变化周期, 且各类积温基本在 20 世纪 90 年代出现突变点, 即各类积温在近 20 a 的增温趋势得到显著性增强。研究结果可为云南省农业气象分析提供相对客观的农业热量资源依据, 并为雨养农业区现代化农业结构的调整提供参考。

关键词: 雨养农业区; 积温; 海拔梯度; 周期变化; 时空演变; 云南省

中图分类号: P4

文献标志码: A

全球变暖导致热量资源变化^[1-2], 并通过作用于农作物的生长发育、种植方式以及相关农事活动等, 对地方粮食安全和农业分布产生深远影响^[3-6]。研究表明^[7-11], 在全球气候变暖的背景下, 整个中国区域的活动积温呈现出显著性的上升趋势, 尤其在西北干旱区、青藏高原以及东北地区等特殊区域, 活动积温的年均等值线出现北移的现象更为显著。同样, 云南省作为中国典型的雨养农业区(雨季为 5—10 月), 其农作物多为喜温植物(生长季为 5—9

月), 受热量资源变化影响显著^[12-13]。开展区域内不同海拔梯度下生长季稳定通过 0 °C、10 °C 和 20 °C 的积温分析, 对揭示区域热量资源的分配格局、指导农业布局和作物种类调整具有重要意义^[14-16]。

云南省海拔差异显著, 气温随地势高低垂直变化明显^[13, 17]。相关学者^[12, 18-20]采用年均气温和活动积温等指标对其热量资源的时空演变特征研究发现, 云南省热量资源在年际尺度上呈现出显著增加

收稿日期 (Received date): 2022-07-05; **改回日期** (Accepted date): 2023-06-12

基金项目 (Foundation item): 云南省科技计划重点项目(202101AS070019); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20010201-1)。[Key Projects of Yunnan Provincial Science and Technology Plan(202101AS070019); Chinese Academy of Sciences Strategic Leading Science and Technology Project(XDA20010201-1)]

作者简介 (Biography): 李涛辉(1998-), 男, 广东梅州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 气候资源与农业生态环境。[LI Taohui (1998-), male, born in Meizhou, Guangdong province. M. Sc. candidate, research on climate resources and agricultural ecological environment] E-mail: taohui0813@foxmail.com

* **通讯作者** (Corresponding author): 张文翔(1979-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 环境变化与地球化学。[ZHANG Wenxiang (1979-), male, Ph. D., professor, research on environmental change and geochemistry] E-mail: wenxiangzhang@ynu.edu.cn

趋势^[12,18-20]。然而,受限于农业种植结构与技术,研究大多集中于对热量资源的时空变化特征分析^[19-20]。作物的结构多元化与往高海拔区域移动,缺乏对海拔梯度变化下各界限温度的积温研究探讨^[12,18],使得无法全面阐释导致其时空变化的深层次原因。因此,亟需开展对云南省不同海拔下生长季各界限温度的积温研究。

本文利用云南省近 50 年的 27 个气象站逐日气温数据,计算其在不同海拔下生长季各界限温度的积温,并对云南省生长季各界限温度的积温空间演变进行分析,再结合各积温在长时间序列上的周期演变探究云南省近 50 年来生长季热量资源的时空演变规律。研究结果可为云南省农业气象分析提供相对客观的农业热量资源依据,并为雨养农业区现代化农业结构调整提供参考。

1 研究数据和方法

1.1 研究区域

云南省位于中国西南地区(图 1),总面积 $39.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。以高原山地地形为主,山地面积占全省总

面积的 88.64%,东部为云贵高原延伸区,西部为横断山脉谷区^[19]。由于特殊的地理位置,同时受到来自东亚和印度季风的交叉影响,云南气候差异明显,立体气候非常显著^[20]。在独特地貌环境和西藏高原区的影响下,形成了干湿季分明的亚热带高原季风气候,具有年温差小、日温差大、气温随地势高低垂直变化异常明显的特征^[19-20]。

云南省整体海拔呈现出西北向东南递减的地势分布,由北至南,每 1 km 水平直线距离其海拔平均降低 6 m。本研究根据云南省每个县级行政区的平均海拔高度,通过地势走向将云南省自西北往东南划分为三个区域(图 1a、图 1b、图 1c)。三个区域分别为 2 km 以上的海拔地区(主要为滇西北地区)、1~2 km 海拔地区(主要为滇中及滇东北地区)、0~1 km 海拔地区(主要为滇南地区)。

1.2 数据来源

本研究使用的云南省 27 个气象站 1972—2019 年的日均气温数据,均来自于国家气象科学数据中心所公布的逐日气温数据集。其中数据集中所缺失的部分,本文统一采用相邻年份数据进行线性插补,并经过一致性检验,以确保数据集中数据趋势的真

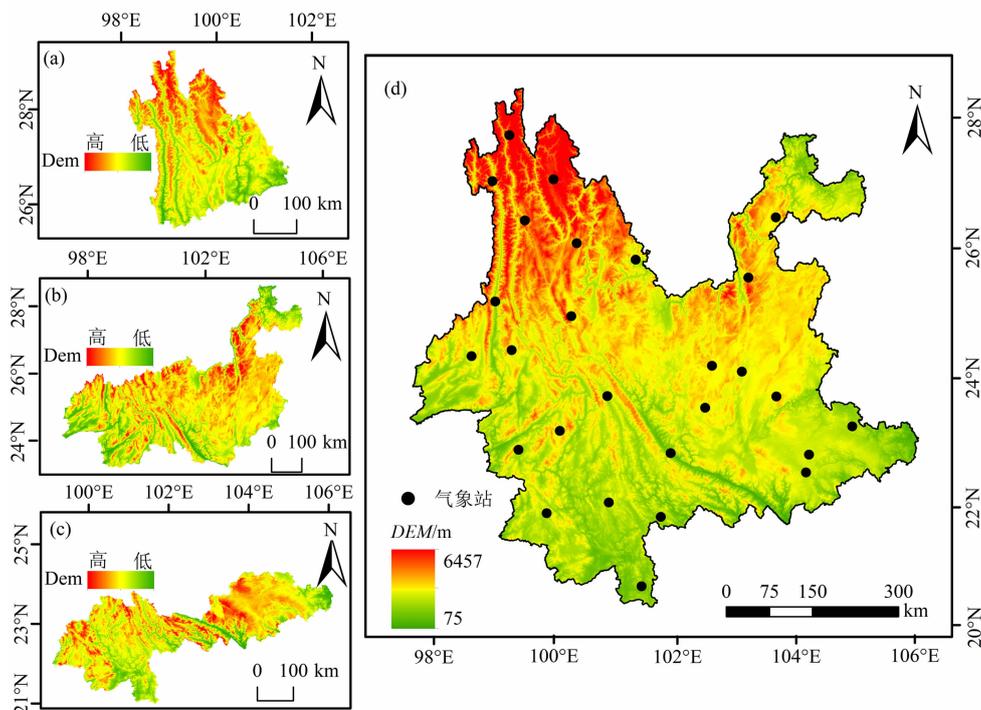


图 1 研究区区位图:(a) ≥ 2 km 海拔;(b) 1~2 km 海拔;(c) 0~1 km 海拔

Fig. 1 Location of study area:(a) ≥ 2 km altitude;(b) 1~2 km altitude;(c) 0~1 km altitude

实性。区划数据统一采用自然资源部 2019 年监制的中国省市标准地图。云南省的高程数据来源于地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn>), 分辨率为 90 m。

1.3 研究方法

选取云南省 27 个气象观测站 1972—2019 年日均气温资料, 计算不同海拔地区生长季(5—9 月)稳定通过 ≥ 0 °C、 ≥ 10 °C 和 ≥ 20 °C 的不同界限温度的积温, 再通过气候倾向率^[21] 结合克里金空间插值^[22-23] 对云南省 1990—2019 年积温趋势变化的时空特征进行分析。最后, 采用 Morlet 小波^[24] 结合 Mann-Kendall 检验^[25-26] 分析通过不同界限温度的各积温周期变化特征及与气候变化的响应。

1.3.1 空间插值分析

克里金空间插值法是建立在变异函数和结构分析上的一种空间插值方法, 该方法所确定的权重系数是根据插值过程中某种趋势函数的变动来决定的^[22-23]。普通克里金插值的具体函数表达式为:

$$Z(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \quad (1)$$

式中, X_0 为待估位置; $Z(X_0)$ 及 $Z(X_i)$ 分别为待估位置值和已知位置值; λ_i 为观测位置 X_i 所分配的权重; n 为观测值个数。

1.3.2 小波分析

本研究使用 Morlet 连续复小波^[24,27] 的基函数即 cmor 函数来计算小波实部, 其函数表达式为:

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

式中, e 和 π 为基本常数项; F_e 为中心频率; X 为小波系数; F_b 为频带宽度系数。为了更好表示其周期变化频率, 对其小波方差进行计算, 其函数表达式为:

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega_f | (a, b) |^2 db \quad (3)$$

式中, Var 为小波方差, 它可以在时间平移域(b)上通过把小波系数平方值进行积分获得; a 为尺度因子($a \neq 0$), 反映频域特征; b 为时间因子, 反映时域特征; ω_f 为小波变换系数, 是连续小波在尺度 a 、时间 b 上与信号的内积, 表示信号与该点所代表的小波的相似程度。

1.3.3 Mann-Kendall 突变检验法

Mann-Kendall 突变检验是一种非参数检验方法, 可以用来检验基于时间序列增加和减少趋势^[25-26]。其优点是不用对数据系列进行特定的分布检验, 也不受少数异常值的干扰, 更适用于类型变量和顺序变量。计算如下:

$$S_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leq x_j \end{cases} \quad j = 1, 2, 3, \dots, i \quad (5)$$

式中, 秩序列 S_k 为 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的和, 可知 $k=1$ 时, $S_1=0$; x 为数据系列的指标变量。在时间序列随机独立的假定下, 定义统计变量为:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

式中, UF_k 为定义的统计量, $UF_1 = 0$; $E(S_k)$ 、 $\text{Var}(S_k)$ 为累计数 S_k 的均值和方差, 在 X_1, X_2, \dots, X_n 相互独立且有相同连续分布时, 可通过以下公式进行计算:

$$\begin{cases} E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4} \\ \text{Var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \end{cases} \quad (7)$$

UF 通过时间序列 X_1, X_2, \dots, X_n 的顺序计算其统计量, UB 通过时间序列 X 的逆序计算。给定显著水平 $\alpha = 0.05$, 临界值为 1.96。若 $|UF| > 1.96$, 则表明序列存在显著的变化趋势。若 $UF > 0$, 表明序列呈现上升趋势, $UF < 0$ 表明呈下降趋势, $UF = 0$ 表明无变化趋势。若 $UF > 1.96$, 则序列有显著上升趋势; $UF < -1.96$, 则序列有显著下降趋势。若 UF 与 UB 在临界值之间出现交点, 则交点对应的时刻为突变开始时间。

2 结果与分析

2.1 不同海拔地区下热量资源的线性趋势分析

本文通过近 50 年不同海拔下生长季各界限温度的积温进行计算, 结合线性拟合分析其年际变化趋势。由图 2 可知, 0~1 km 海拔地区、1~2 km 海拔地区及 2 km 以上的海拔地区生长季各界限温度的积温都呈现出较显著的上升趋势, 且各海拔区域不同积温的峰值都出现在近 5 年, 其最低值出现在

20 世纪 70 年代中期,且不同海拔地区的年均气温结果也呈现出相同的规律。这与已有研究结果一致,即云南省近 50 年来的气候变化整体呈现年平均气温明显上升的特征^[17-18,28]。

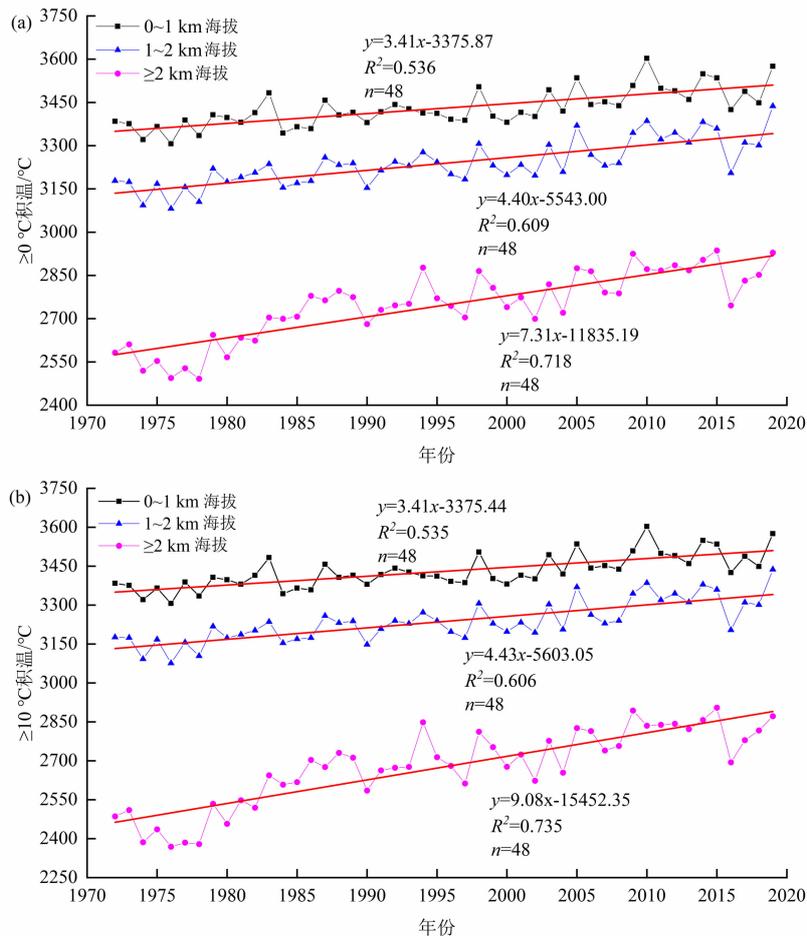
其中,同一海拔地区 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温和 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的增长速率(方程一次项系数)近似,而 $\geq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的增长的值明显高于 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温。这是由于云南省位于热带与亚热带之间,其生长季的日均温基本在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,极少部分地区的日均温在 $0\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,故此 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的变化趋势基本近似。并且因为云南省夏季气温多处于 $15\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,大于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 日气温较少,随着气温上升,这类天数得到了明显增加,特别是在高海拔地区,导致 $\geq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的增幅最大。总体而言,生长季 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的总体波动趋势近似,基本都在波动中稳定增长,并没出现显著的极值现象。这表明云南省近 50 年来,其生长季热量资源的增长趋势较为稳定,而生长季热量资源的稳定增长对云南省热带和亚热带农业结构会产生一定促

进作用,可以提高当地农产品的生长速率,并在一定程度上影响当地的农业布局,改变当地的作物种植结构。

2.2 不同海拔地区下热量资源的气候倾向率分析

2.2.1 不同海拔地区下 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的气候倾向率

不同海拔下 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的平均气候倾向率(图 3)均为正值,其中,2 km 以上的海拔地区(图 3a)、1~2 km 海拔地区(图 3d)及 0~1 km 海拔地区(图 3g)的平均气候倾向率分别为 73.10 、 44.01 和 $34.11\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。从图 3a 中的 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温可看出 2 km 以上海拔地区的气候倾向率呈现出从北向南逐渐递减的趋势变化,其中以西北部的气候倾向率最高,为 $88.66\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。这符合高海拔地区对气候变暖现象有着更显著的响应特征;1~2 km 海拔地区的气候倾向率呈现出以宜良和昆明等地为中心向四周递减的趋势,其中以宜良地区的气候倾向率最高,为 $175.33\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。本文认为这与滇中城市群的发展有关,城市热岛效应导致该地区增温显著;0~1 km 海拔地区的气候倾向率呈现以普洱及广南



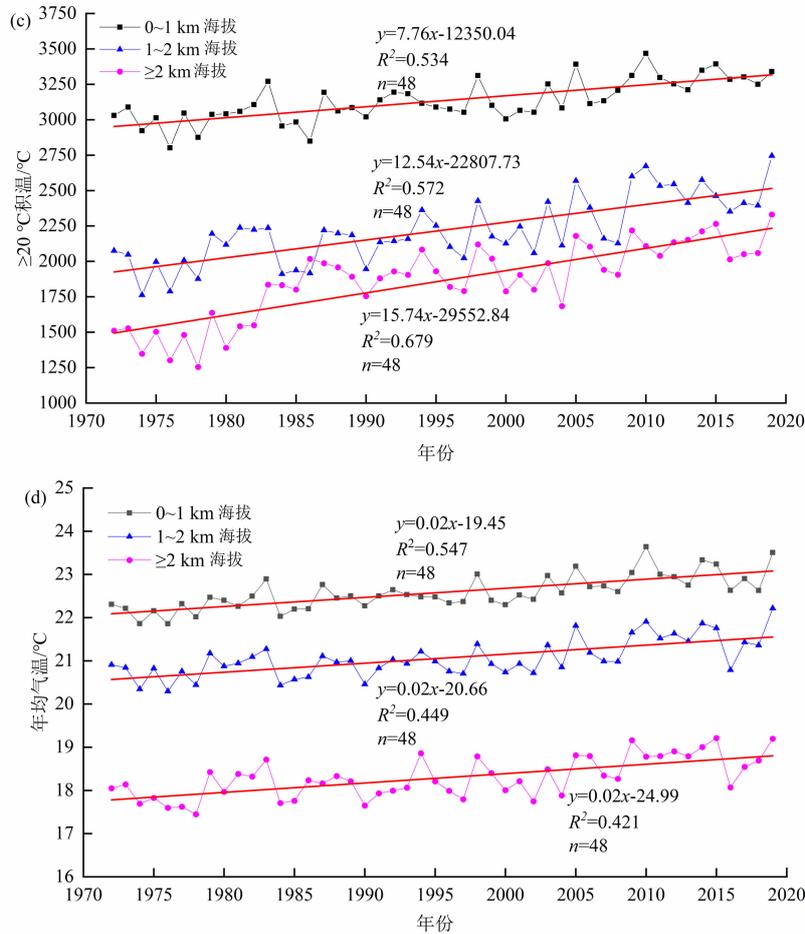


图2 1972—2019年云南省不同海拔下生长季各积温及年均气温的年际变化

(a) ≥ 0 °C 积温; (b) ≥ 10 °C 积温; (c) ≥ 20 °C 积温; (d) 年均气温

Fig. 2 Interannual Variation of accumulated temperature and average annual temperature during growing season at different altitudes in Yunnan province from 1972 to 2019; (a) accumulated temperatures of ≥ 0 °C;

(b) accumulated temperatures of ≥ 10 °C; (c) accumulated temperatures of ≥ 20 °C; (d) accumulated annual temperature

地区为高值中心向四周递减的趋势,其中以普洱地区的气候倾向率最高,为 50.60 °C/10a。由于低海拔地区全年气温基本偏高,所以 ≥ 0 °C 积温在低海拔地区的增温趋势不显著。

2.2.2 不同海拔地区下 ≥ 10 °C 积温的气候倾向率

不同海拔下 ≥ 10 °C 积温的平均气候倾向率(图 3)均为正值,其中,2 km 以上的海拔地区(图 3b)、1~2 km 海拔地区(图 3e)及 0~1 km 海拔地区(图 3h)的平均气候倾向率分别为 90.80、44.30 和 34.10 °C/10a。从图 3 中的 ≥ 10 °C 积温可看出 2 km 以上的海拔地区的气候倾向率呈现出从北向南逐渐递减的趋势,其中以西北部的气候倾向率最高,为 158.04 °C/10a;1~2 km 海拔地区的气候倾向率呈现出以宜良和昆明等地为中心向四周

递减趋势,其中以宜良地区的气候倾向率最高,为 175.27 °C/10a;0~1 km 海拔地区的气候倾向率呈现以普洱及广南地区为高值中心向四周递减的趋势,其中以普洱地区的气候倾向率最高,为 50.60 °C/10a。总体而言, ≥ 10 °C 积温在不同海拔地区的分布趋势与 ≥ 0 °C 积温近似,这是由于云南省受到东亚和印度季风的交叉影响,全年气温基本处于 10 °C 以上。所以在海拔因素和气候变暖的综合影响下,云南省气温增长多发生在 ≥ 10 °C 的天数上。

2.2.3 不同海拔地区下 ≥ 20 °C 积温的气候倾向率

不同海拔下 ≥ 20 °C 积温的平均气候倾向率(图 3)均为正值,其中,2 km 以上的海拔地区(图 3c)、1~2 km 海拔地区(图 3f)及 0~1 km 海拔

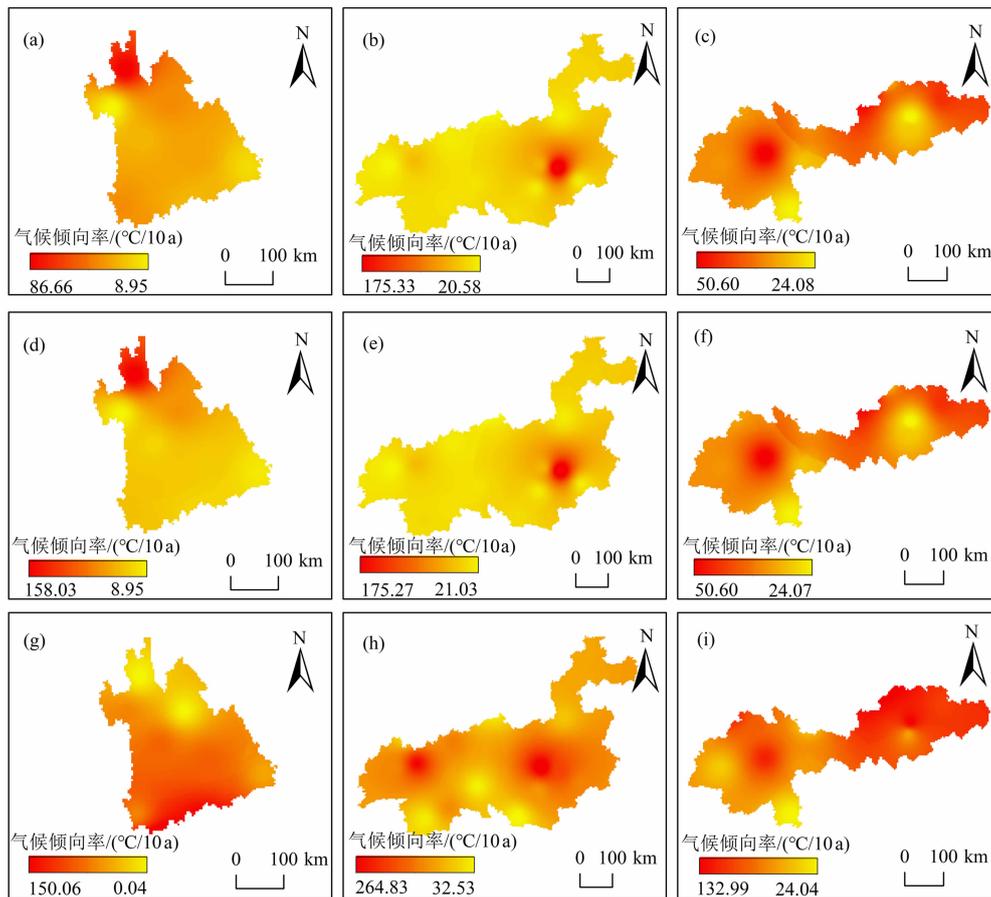


图3 1972—2019年云南省不同海拔地区生长季各积温气候倾向率的空间分布:

(a~c) ≥ 0 °C 积温; (d~f) ≥ 10 °C 积温; (g~i) ≥ 20 °C 积温

Fig. 3 Spatial distribution of accumulated temperature climatic tendency rates during the growing season at different elevations in Yunnan province from 1972 to 2019: (a~c) accumulated temperatures of ≥ 0 °C;

(d~f) accumulated temperatures of ≥ 10 °C; (g~i) accumulated temperatures of ≥ 20 °C

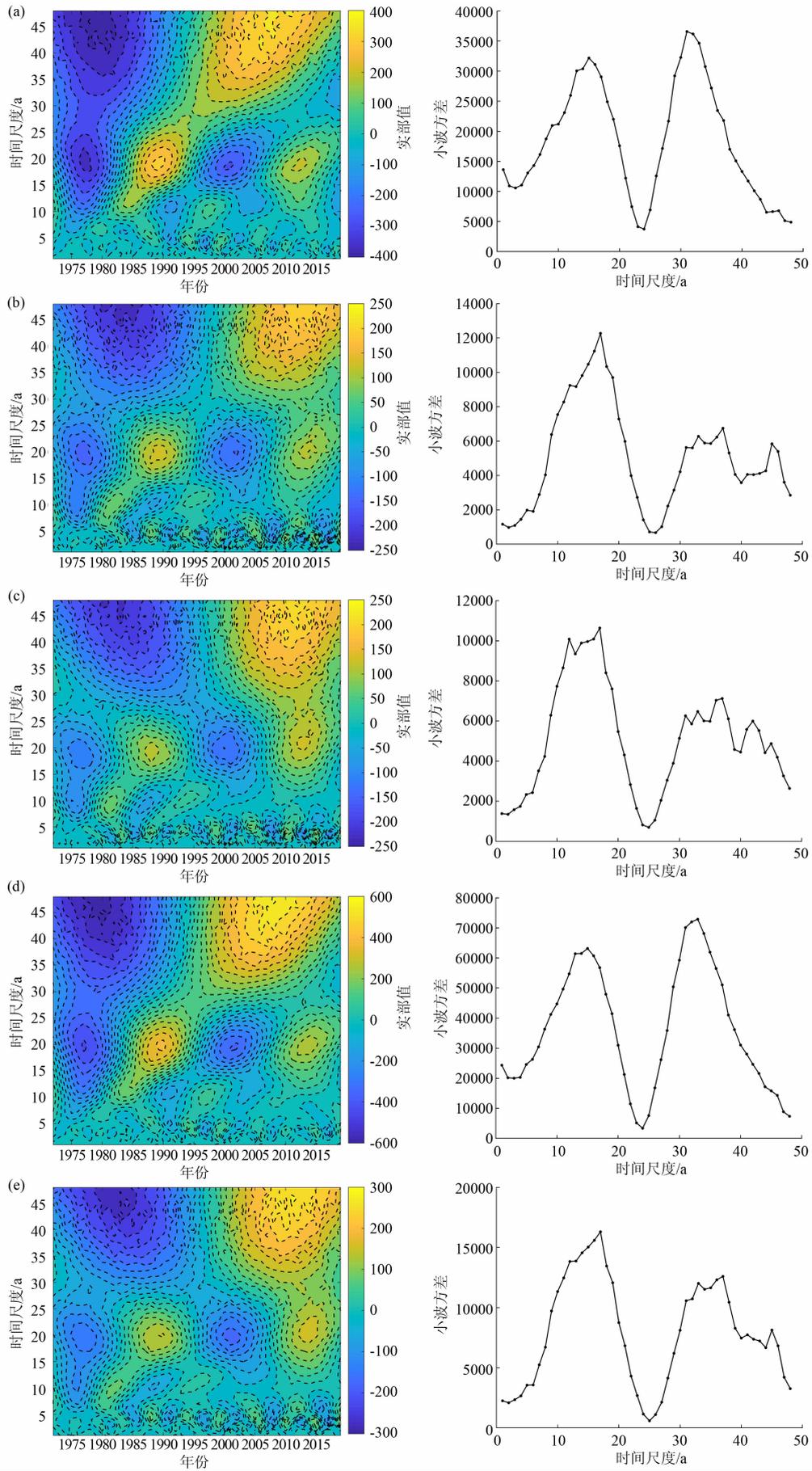
地区(图3i)的平均气候倾向率分别为157.43、125.42和77.60 °C/10a。从图3中的 ≥ 20 °C积温可看出2 km以上的海拔地区的气候倾向率呈现出从北向南递增的趋势变化,其中以南部的气候倾向率最高,为150.06 °C/10a,这说明城市热岛效应是导致极高气温事件产生的原因。1~2 km海拔地区的气候倾向率呈现出以保山与昆明地区为中心向四周递减趋势,其中以昆明地区的气候倾向率最高,为264.83 °C/10a。0~1 km海拔地区的气候倾向率总体呈现出东部较高、西部较低的趋势,其中以砚山地区的气候倾向率最高,为132.99 °C/10a。总体而言, ≥ 20 °C积温在不同海拔地区的空间分布差异性极大,并且增温趋势显著大于0 °C积温和10 °C积温。因此,在云南省 ≥ 20 °C积温增温显著的趋势下,本文认为未来云南省的农

业结构应该进行适当的调整,以水稻等适合20 °C气温生长的主要农作物为主。

2.3 不同海拔地区下热量资源的时间系列演变特征

本文采用Morlet小波变化函数,对云南省近50年不同海拔地区 ≥ 0 °C、 ≥ 10 °C和 ≥ 20 °C积温距平值的时间系列进行分析,得到不同海拔地区各积温距平值的不同小波实部等值线(图4),并对各积温进行Mann-Kendall检验(图5)其突变年份,结合小波结果分析积温对气候变化的响应特征。

根据不同海拔地区 ≥ 0 °C、 ≥ 10 °C和 ≥ 20 °C积温的周期特征分析(图4)以及其小波方差的计算结果(表1、图4)表明,在近50年的年际尺度演变中,同一海拔地区的三类积温在1972—2019年都存在明显的年代际周期变化。在2 km海拔以上的地区,三类积温的频谱图显示中心频域尺度主要集中在



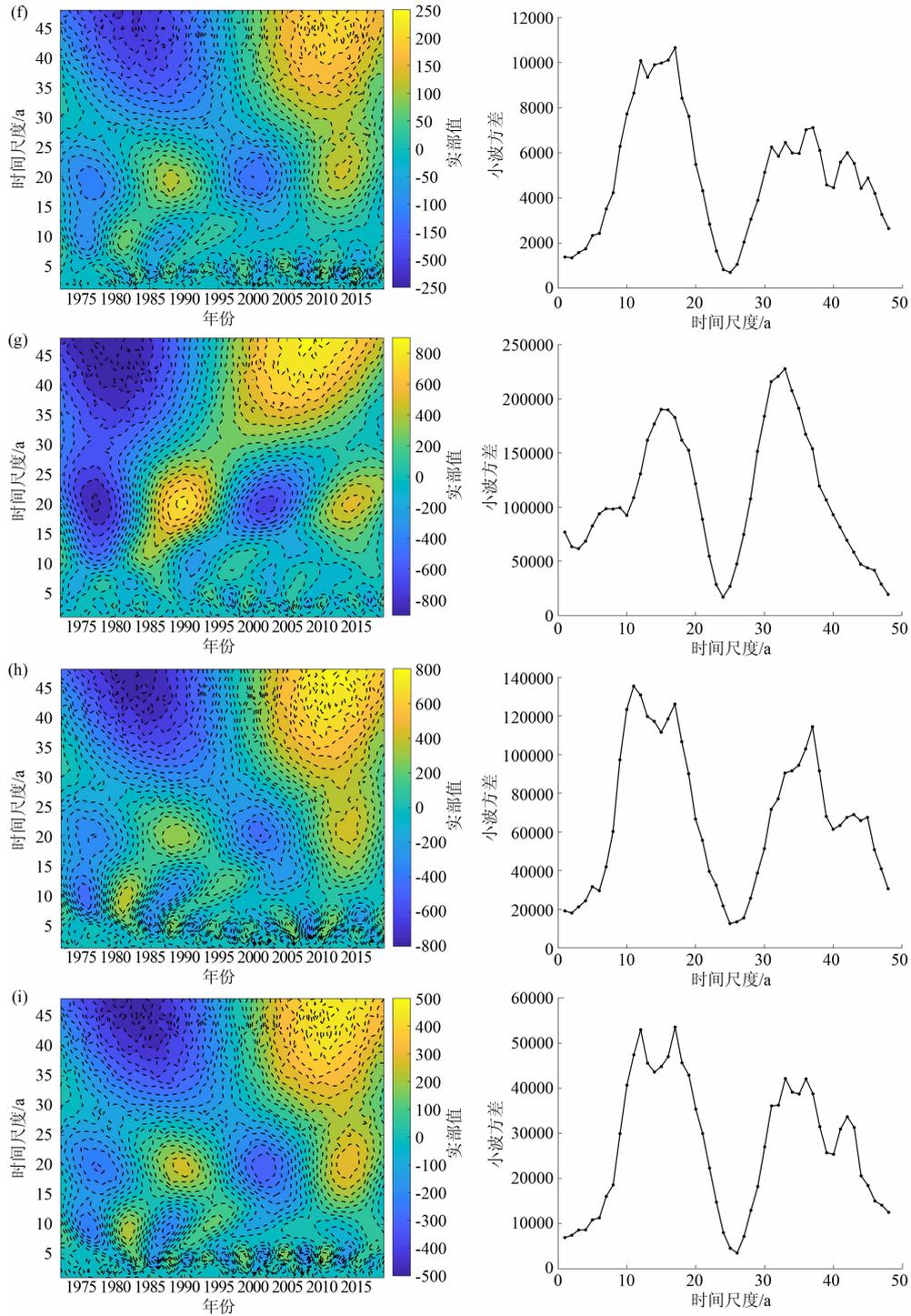


图 4 1972—2019 年云南省不同海拔下生长季积温距平值的小波分析:(a~c) ≥ 0 °C 积温(≥ 20 km, 1~2 km, 0~1 km); (d~f) ≥ 10 °C 积温(≥ 20 km, 1~2 km, 0~1 km); (g~i) ≥ 20 °C 积温(≥ 20 km, 1~2 km, 0~1 km)

Fig. 4 Wavelet analysis of accumulated temperature anomalies of growing season at different elevations in Yunnan province from 1972 to 2019: (a~c) accumulated temperatures of ≥ 0 °C (≥ 20 km, 1~2 km, 0~1 km); (d~f) accumulated temperatures of ≥ 10 °C (≥ 20 km, 1~2 km, 0~1 km); (g~i) accumulated temperatures of ≥ 20 °C (≥ 20 km, 1~2 km, 0~1 km)

15~25 a 和 40~50 a,并且在中心频域尺度中15 a 对应的小波方差最大,说明 15 a 是 2 km 海拔以上的地区三类积温的振荡主周期;在 1~2 km 海拔的

地区,三类积温的频谱图显示中心频域尺度主要集中在 6~13 a、15~25 a 和 40~50 a,并且通过小波方差结果表明, ≥ 0 °C 和 ≥ 10 °C 积温的振荡主周期

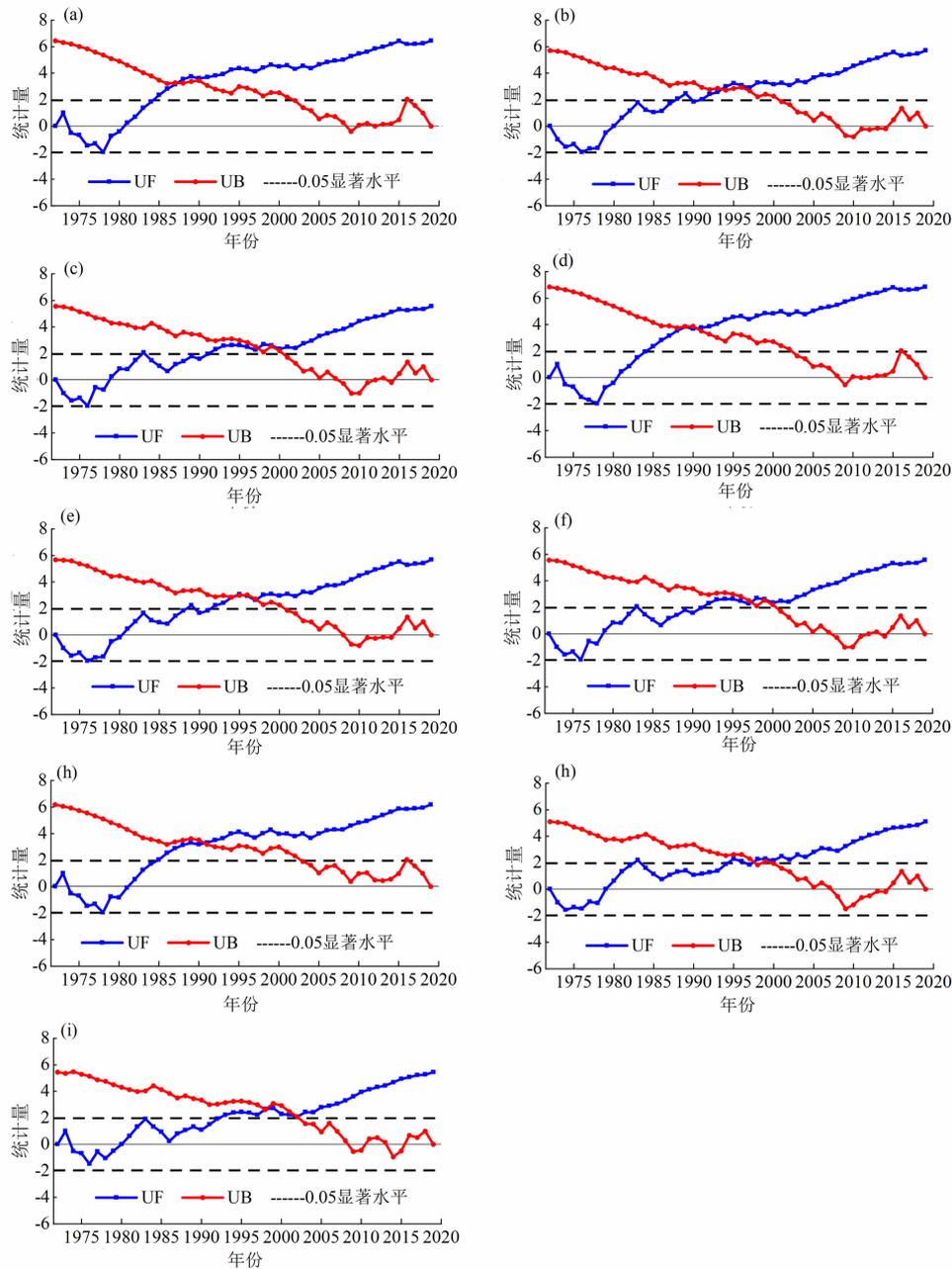


图5 云南省不同海拔下生长季积温序列的 Mann-Kendall 突变检测: (a~c) ≥ 0 °C 积温 (≥ 20 km, 1~2 km, 0~1 km); (d~f) ≥ 10 °C 积温 (≥ 20 km, 1~2 km, 0~1 km); (g~i) ≥ 20 °C 积温 (≥ 20 km, 1~2 km, 0~1 km)

Fig. 5 Mann-Kendall Mutation detection of accumulated temperature series in growing season at different elevations in Yunnan province: (a~c) accumulated temperatures of ≥ 0 °C (≥ 20 km, 1~2 km, 0~1 km); (d~f) accumulated temperatures of ≥ 10 °C (≥ 20 km, 1~2 km, 0~1 km); (g~i) accumulated temperatures of ≥ 20 °C (≥ 20 km, 1~2 km, 0~1 km)

为 17 a, ≥ 20 °C 积温的振荡主周期为 11 a; 在 0~1 km 海拔以上的地区, 三类积温的频谱图显示中心频域尺度主要集中在 6~13a、15~25 a 和 40~50 a, 并且在中心频域尺度中 17 a 对应的小波方差最大, 说明 17 a 是 2 km 海拔以上的地区三类积温的振荡主周期。结合第 2.1 节的研究结果表

明: 云南省不同海拔地区生长季热量资源逐年递增, 且具有稳定的周期性变化。

为了进一步探讨和阐明过去 50 年中不同海拔地区 ≥ 0 °C、 ≥ 10 °C 和 ≥ 20 °C 积温的递增趋势, 采用 Mann-Kendall 检验其突变年份 (表 1、图 5)。结果表明: 在 2 km 海拔以上的地区, 三类积温均在

表 1 1972—2019 年云南省不同海拔地区生长季积温的时间演变特征

Tab. 1 Temporal evolution of accumulated temperature during growing season at different elevations in Yunnan province from 1972 to 2019

海拔/m	积温类型	中心频域尺度	振荡主周期/a	突变年份	突变年份的 UF 值	变化趋势
>2	≥ 0 °C	15 ~ 25 a, 40 ~ 50 a	15	1987 年	>1.96	显著增加
	≥ 10 °C		15	1989 年		
	≥ 20 °C		15	1991 年		
1 ~ 2	≥ 0 °C	6 ~ 13 a, 15 ~ 25 a 和 40 ~ 50 a	17	1993 年	>1.96	显著增加
	≥ 10 °C		17	1995 年		
	≥ 20 °C		17	1997 年		
0 ~ 1	≥ 0 °C	6 ~ 13 a, 15 ~ 25 a 和 40 ~ 50 a	17	1997 年	>1.96	显著增加
	≥ 10 °C		17	1997 年		
	≥ 20 °C		17	2002 年		

1981 年之后呈现出增加趋势 ($UF > 0$), 且 ≥ 0 °C、 ≥ 10 °C 和 ≥ 20 °C 积温在 1972—2019 年的突变年份分别为 1987 年、1989 年和 1991 年 ($UF > 1.96$), 表明在突变年份之后三类积温的增加趋势达到显著程度。在 1 ~ 2 km 海拔地区, ≥ 0 °C、 ≥ 10 °C 和 ≥ 20 °C 积温分别在 1981 年、1981 年和 1980 年之后呈现出增加趋势 ($UF > 0$), ≥ 0 °C、 ≥ 10 °C 积温和 ≥ 20 °C 积温的突变年份分别为 1993 年、1995 年和 1997 年 ($UF > 1.96$), 这表明 ≥ 0 °C、 ≥ 10 °C 和 ≥ 20 °C 积温分别在 1993 年、1995 年和 1997 年之后呈现出显著增加趋势。在 0 ~ 1 km 海拔地区, ≥ 0 °C、 ≥ 10 °C 和 ≥ 20 °C 积温分别在 1979 年、1979 年和 1981 年之后呈现出增加趋势 ($UF > 0$), ≥ 0 °C 和 ≥ 10 °C 积温的突变年份均为 1997 年 ($UF > 1.96$), ≥ 20 °C 积温的突变年份为 2002 年, 这表明 ≥ 0 °C 和 ≥ 10 °C 积温在 1997 年之后呈现出显著增加趋势, 而 ≥ 20 °C 积温在 2002 年呈现出显著增加趋势。总体而言, 20 世纪 90 年代之后 1 ~ 2 km 海拔地区三类积温的增加趋势达到显著程度。以上结果表明, 三类积温在不同海拔地区的突变年份基本分布于 20 世纪 90 年代左右, 该结果符合 20 世纪 90 年代之后全球显著性变暖的研究结论^[2]。

3 讨论

气候变暖对不同农作物物候的影响各自相异, 而认知气候变化的具体过程及影响是农业发展应对全球变暖的关键。云南省是典型的雨养农业区, 属于干湿季分明的高原季风气候, 且立体气候显著。许多学者^[12, 18-20]对云南省热量资源的时空变化进

行了研究分析, 但是更多的研究是通过日均温的变化或极端温度事件反映云南省的气候变化。由于云南省农作物多为喜温作物且海拔差异大, 在全球变暖的背景下, 不同海拔区域的气候变化差距显著。故此, 本文使用稳定通过 0 °C、10 °C 和 20 °C 积温的指标, 对不同海拔地区的时空演变特征和周期变化对气候变化的响应进行研究分析, 以期更好地揭示不同海拔地区近 50 年热量资源的周期性变化对农业的影响, 这对指导云南省现有农业分布格局和作物种类调整有重要意义。

本研究结果显示, 近 50 年来云南省不同海拔地区生长季积温呈现稳定增长的趋势, 即近 50 年云南省的热量资源呈现明显上升的趋势, 且不同海拔地区 ≥ 20 °C 的积温增长趋势相比 ≥ 0 °C 和 ≥ 10 °C 的积温增长趋势更显著。其中, 滇中地区不同积温的气候倾向率相对于其他地区更大, 这表明滇中地区的增温趋势更为显著, 这一结果与已有研究^[17-18]结论大体相一致。个别地区存在差异性的原因可能是在于所选指标或研究时段的不同, 例如部分学者^[29-31]使用长时间序列的逐月均温、逐日 0 cm 地温以及逐日最高气温和最低气温等不同指标研究了云南省热量资源的时空演变特征, 研究结果显示在滇中和滇西北地区存在热量资源的变化差异。以上研究由于所用指标的不同, 虽然在大尺度时空规律上的结果都呈现出显著增温的趋势, 但是在小尺度会受到云南省局部特殊地形、水系以及人类活动等的影响, 从而导致个别区域上热量资源的时空变化会有所偏差^[19-20]。

基于气候变化与农作物物候变化互为表征的现象^[32-33], 本文利用云南省生长季(5—9 月)稳定通

过不同界限温度的积温数据,分析了云南省不同海拔下生长季热量资源的时空演变。但是热量资源并非是非是农业发展唯一的气候限制因素^[32,34],本文的研究对于雨养农业区现有或将来的农业布局所提供的依据有限。因此,进一步的研究拟采用不同海拔下雨养农业区生长季的降水、日照时长和太阳辐射等不同气候指标相结合,以此更准确地评估云南省农业气候资源的时空演变特征,为云南省以及其他雨养农业区未来农业结构和作物调整提供数据和理论支持。

4 结论

本文采用气候倾向率、小波分析和 Mann-Kendall 突变检验等研究方法,对云南省不同海拔地区近 50 a 稳定通过 0 °C、10 °C 和 20 °C 积温的时空演变进行研究分析,得到以下四点结论:

(1) 近 50 年来,云南省不同海拔地区的 ≥ 0 °C、 ≥ 10 °C 和 ≥ 20 °C 积温均表现出稳定增加的趋势,并且不同海拔地区三类积温的波动趋势总体近似,各类积温的峰值都出现在近 5 年,其谷值出现在 20 世纪 70 年代中期。

(2) 在空间分布上,除滇中城市群区域内呈现出显著性增温现象之外,不同海拔地区各类积温的增长趋势呈现出高海拔地区显著高于低海拔地区,即平均气候倾向率呈现出 2 km 以上的海拔地区 $> 1 \sim 2$ km 的海拔地区 $> 0 \sim 1$ km 的海拔地区。

(3) 对比三类积温的趋势结果发现,在海拔因素和气候变暖的影响下,云南省气温增长多发生在 ≥ 10 °C 的天数上,导致 ≥ 0 °C 和 ≥ 10 °C 积温在不同海拔地区的空间分布趋势近似。由于城市热岛效应, ≥ 20 °C 积温在不同海拔地区的空间分布差异性极大,增温趋势显著大于 0 °C 积温和 10 °C 积温。

(4) 在时间演变上,云南省不同海拔地区的各类积温基本在 20 世纪 90 年代出现突变,即各类积温在近 20 年的增温趋势得到显著性增强。小波分析显示,不同海拔地区各类积温都存在 15 ~ 25 a 和 40 ~ 50 a 两个变化周期,其中 ≥ 10 °C 和 ≥ 20 °C 积温还存在 6 ~ 13 a 的变化周期。

参考文献 (References)

[1] DING Jinzhi, WANG Tao, WANG Yuyang, et al. New

understanding of the response of permafrost carbon cycling to climate warming [J]. *Science Bulletin*, 2022, **67** (13): 1322 - 1325.

DOI: 10.1016/j.scib.2022.05.022

- [2] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势 [J]. *气候变化研究进展*, 2006, **2** (1): 3 - 8 + 50. [DING Yihui, REN Guoyu, SHI Guangyu, et al. National assessment report of climate change (I): Climate change in China and its future trend [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, **2** (1): 3 - 8 + 50] DOI: 10.3969/j.issn.1673-1719.2006.01.001
- [3] 蔡福, 张玉书, 陈鹏狮, 等. 近 50 年辽宁热量资源时空演变特征分析 [J]. *自然资源学报*, 2009, **24** (9): 1635 - 1646. [CAI Fu, ZHANG Yushu, CHEN Pengshi, et al. Spatio-temporal characteristics of Liaoning thermal resources in recent 50 years [J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, **24** (9): 1635 - 1646] DOI: 10.11849/zrzyxb.2009.09.013
- [4] 徐飞, 张汶海, 赵玲玲, 等. 1960—2018 年珠江流域极端气温时空变化特征 [J]. *山地学报*, 2022, **40** (3): 343 - 354. [XU Fei, ZHANG Wenhai, ZHAO Lingling, et al. Spatio-temporal variability in extreme temperature from 1960 to 2018 in the Pearl River basin, China [J]. *Mountain Research*, 2022, **40** (3): 343 - 354] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000676
- [5] 邓振镭, 张强, 王强, 等. 高原地区农作物水热指标与特点的研究进展 [J]. *冰川冻土*, 2012, **34** (1): 177 - 185. [DENG Zhenyong, ZHANG Qiang, WANG Qiang, et al. A review of studies on water and heat index and characteristics of crops in plateau regions [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34** (1): 177 - 185] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2012.0023
- [6] 张厚琮, 张翼. 中国活动积温对气候变暖的响应 [J]. *地理学报*, 1994, **49** (1): 27 - 36. [ZHANG Houxuan, ZHANG Yi. Preliminary discussion on the response of active accumulated temperature of China to Climate warming [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1994, **49** (1): 27 - 36] DOI: 10.11821/xb199401004
- [7] 徐超, 杨晓光, 李勇, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化 III: 西北干旱区农业气候资源时空变化特征 [J]. *应用生态学报*, 2011, **22** (3): 763 - 772. [XU Chao, YANG Xiaoguang, LI Yong, et al. Changes of China agricultural climate resources under the background of climate change III: Spatiotemporal change characteristics of agricultural climate resources in northwest arid area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22** (3): 763 - 772] DOI: 10.13287/j.1001-9332.2011.0145
- [8] 黄芳芳, 马伟强, 李茂善, 等. 藏北高原地表温度对气候变化响应的初步分析 [J]. *高原气象*, 2016, **35** (1): 55 - 63. [HUANG Fangfang, MA Weiqiang, LI Maoshan, et al. Analysis on responses of land surface temperature on the Northern Tibetan Plateau to climate change [J]. *Plateau Meteorology*, 2016, **35** (1): 55 - 63] DOI: 10.7522/J. ISSN. 1000-0534. 2015.00075
- [9] 李帅, 张勃, 马彬, 等. 基于格点数据的中国 1961—2016 年 ≥ 5 °C、 ≥ 10 °C 有效积温时空演变 [J]. *自然资源学报*, 2020,

- 35(5): 1216 - 1227. [LI Shuai, ZHANG Bo, MA Bin, et al. Spatiotemporal evolution of effective accumulated temperatures of $\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ based on grid data in China from 1961 to 2016 [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(5): 1216 - 1227] DOI: 10.31497/zrzyxb.20200516
- [10] 刘洋, 王占海, 姜文来, 等. 1956—2009 年东北地区热量资源时空变化特征分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2013, 34(2): 12 - 19. [LIU Yang, WANG Zhanhai, JIANG Wenlai, et al. Spatio-temporal characteristics of thermal resources in Northeast China during 1956 - 2009 [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2013, 34(2): 12 - 19] DOI: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20130203
- [11] 和骅芸, 胡琦, 唐书玥, 等. 基于站点数据分析中国大陆区域喜凉/温作物界限温度的时空演变[J]. *中国农业气象*, 2023, 44(2): 85 - 95. [HE Huayun, HU Qi, TANG Shuyue, et al. Analysis of spatio-temporal evolution of the boundary temperature of chimonophilous/thermophilic crops in Chinese mainland based on site data [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2023, 44(2): 85 - 95] DOI: 10.3969/j.issn.1000-6362.2023.02.001
- [12] 程建刚, 解明恩. 近 50 年云南区域气候变化特征分析[J]. *地理科学进展*, 2008, 27(5): 19 - 26. [CHENG Jiangan, XIE Ming'en. The analysis of regional climate change features over Yunnan in recent 50 years [J]. *Progress in Geography*, 2008, 27(5): 19 - 26] DOI: 10.1007/s10499-007-9164-4
- [13] 秦剑, 琚建华, 解明恩. 低纬度高原天气气候[M]. 北京: 气象出版社, 1997: 18 - 20. [QIN Jian, JU Jianhua, XIE Ming'en. *Low latitude plateau weather and climate* [M]. Beijing: Meteorological Press, 1997: 18 - 20]
- [14] 王艳华, 任传友, 韩亚东, 等. 东北地区活动积温和极端持续低温的时空分布特征及其对粮食产量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(9): 1742 - 1748. [WANG Yanhua, REN Chuanyou, HAN Yadong, et al. The tempo-spatial patterns of active accumulated and consecutive extreme low temperature and their impacts on grain crop yield in Northeast China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(9): 1742 - 1748]
- [15] 朱世峰, 王卫光, 丁一民, 等. 基于 CMIP6 的长江中下游未来水稻高温热害时空变化特征[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(3): 113 - 122. [ZHU Shifeng, WANG Weiguang, DING Yimin, et al. Spatiotemporal variation of future heat damage of rice in the middle and lower reaches of the Yangtze River using CMIP6 projections [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(3): 113 - 122] DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.202210077
- [16] 吕金莹, 闫超, 贾天宇, 等. 松嫩平原活动积温变化及其对作物产量的影响[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(11): 3349 - 3356. [LYU Jinying, YAN Chao, JIA Tianyu, et al. The variation of accumulated temperature in Songnen Plain and its impact on crop yield [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(11): 3349 - 3356] DOI: 10.13292/j.1000-4890.201911.025
- [17] 刘建华. 中国气象灾害大典: 云南卷[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 10 - 15. [LIU Jianhua. *China meteorological disaster ceremony: Yunnan volume* [M]. Beijing: Meteorological Press, 2006: 10 - 15]
- [18] 何华, 陶云, 肖子牛, 等. 纵向岭谷作用下云南热量的时空特征[J]. *南京气象学院学报*, 2007, 30(1): 120 - 127. [HE Hua, TAO Yun, XIAO Ziniu, et al. Spatial and temporal distribution of thermal resources in Yunnan under the effect of the longitudinal range-gorge [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2007, 30(1): 120 - 127] DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxb.2007.01.017
- [19] 王学锋, 吉文娟, 张茂松, 等. 近 53 年来云南干热河谷热量资源变化的比较性特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(S1): 92 - 97. [WANG Xuefeng, JI Wenjuan, ZHANG Maosong, et al. Comparative characteristics of heat resources in the dry-hot valleys in Yunnan province in recent 50 years [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(S1): 92 - 97] DOI: 10.11870/cjlyzyyhj2015Z10013
- [20] 曹言, 王杰, 柴素盈, 等. 1970—2014 年云南省气温日较差变化特征及影响因子[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(6): 100 - 108. [CAO Yan, WANG Jie, CHAI Suying, et al. Variation characteristics of diurnal temperature range and its influencing factors in Yunnan province from 1970 to 2014 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(6): 100 - 108] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2018.06.015
- [21] 林婧婧, 张强. 中国西北地区气候态变化对极端天气监测的影响[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(6): 1659 - 1665. [LIN Jingjing, ZHANG Qiang. Influence of climate state change to weather extreme monitoring in Northwest China [J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(6): 1659 - 1665] DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2015.00252
- [22] 孟庆香, 刘国彬, 杨勤科. 基于 GIS 的黄土高原气象要素空间插值方法[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(1): 10 - 14. [MENG Qingxiang, LIU Guobin, YANG Qinke. Spatial interpolation methods of weather data on Loess Plateau based on GIS [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(1): 10 - 14]
- [23] 李俊晓, 李朝奎, 殷智慧. 基于 ArcGIS 的克里金插值方法及其应用[J]. *测绘通报*, 2013(9): 87 - 90 + 97. [LI Junxiao, LI Chaokui, YIN Zhihui. ArcGIS based Kriging interpolation method and its application [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2013(9): 87 - 90 + 97] DOI: 10.1007/s12204-013-1367-4
- [24] SOUZA ECHER M P, ECHER E, NORDEMANN D J, et al. Wavelet analysis of a centennial (1895 - 1994) southern Brazil rainfall series (Pelotas, $31^{\circ}46'19''\text{S}$ $52^{\circ}20'33''\text{W}$) [J]. *Climatic Chang*, 2008, 87(3): 489 - 497. DOI: 10.1007/s10584-007-9296-6
- [25] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. *大气科学*, 1992, 16(4): 482 - 493. [FU Congbin, WANG Qiang. The

- definition and detection of the abrupt climatic change [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1992, **16**(4): 482–493] DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1992.04.11
- [26] 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: 69–72. [WEI Fengying. Modern climate statistical diagnosis and prediction techniques [M]. Beijing: Meteorological Press, 1999: 69–72]
- [27] LI Taohui, LYU Aifeng, ZHANG Wenxiang, et al. Spatiotemporal characteristics of watershed warming and wetting: The response to atmospheric circulation in arid areas of Northwest China [J]. Atmosphere, 2023, **14**(1): 151. DOI: 10.3390/ATMOS14010151
- [28] 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. [DUAN Xu, TAO Yun. The climate change of Yunnan over the last 50 years [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2012, **28**(2): 243–250] DOI: 10.3969/j.issn.1004-4965.2012.02.012
- [29] 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. [ZHANG Wancheng, ZHENG Jianmeng, MA Tao, et al. Temporal and spatial distribution and variation of extreme temperatures in Yunnan province from 1961 to 2012 [J]. Resources Science, 2015, **37**(4): 710–722]
- [30] 程清平, 王平, 徐强. 1960—2013 年云南地面温度时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2017, **24**(6): 111–121+397. [CHENG Qingping, WANG Ping, XU Qiang. Temporal and spatial variation characteristics of surface temperature in Yunnan during 1960–2013 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, **24**(6): 111–121+397] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2017.06.018
- [31] 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. [YANG Xiaojing, XU Zongxue, ZUO Depeng, et al. Spatiotemporal characteristics of extreme air temperature in Yunnan province during 1958—2013 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, **25**(3): 523–536] DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201603020
- [32] 刘志林, 丁银平, 角媛梅. 中国西南——东南季风交汇区降水时空格局变化及其对食物产量的影响[J]. 地理学报, 2021, **76**(9): 2297–2311. [LIU Zhilin, DING Yinping, JIAO Yuanmei. Spatiotemporal patterns of precipitation changes and their impacts on food supply in Southwest China from 1988 to 2018: A case study in Yunnan province [J]. Acta Geographica Sinica, 2021, **76**(9): 2297–2311] DOI: 10.11821/dlxb202109018
- [33] 李涛辉, 张文翔, 吕爱锋, 等. 1978—2019 年云南省气候生产潜力的时空演变及粮食产量响应[J]. 中国农学通报, 2023, **39**(17): 55–63. [LI Taohui, ZHANG Wenxiang, LYU Aifeng, et al. Temporal and spatial evolution of climatic potential productivity and response characteristics of grain yield in Yunnan province from 1978 to 2019 [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, **39**(17): 55–63] DOI: 10.11924/j.issn.1000-6850.casb2022-0441
- [34] 王亚蕾, 董晔. 1968—2018 年辽河流域生长季潜散量变化及主控气象因素[J]. 水土保持研究, 2021, **28**(6): 162–167. [WANG Yalei, DONG Ye. Spatiotemporal distribution of potential evapotranspiration and its main meteorological factors in Liaohe River basin during growing season from 1968 to 2018 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, **28**(6): 162–167] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2021.06.013

Temporal and Spatial Characteristics of Heat Resources in Growing Season in Yunnan Province, China

LI Taohui¹, ZHANG Wenxiang^{1*}, LYU Aifeng², LIU Yonghao¹

(1. Key Laboratory of Plateau Geographic Processes and Environment Change of Yunnan Province, Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101)

Abstract: Yunnan province is a typical humid rain-fed agricultural area in China, and its agricultural development is significantly affected by changes in heat resources, which had not been highly concerned by agricultural professionals, particularly the investigation into the accumulated temperature of each boundary temperature under different altitude gradients in the region, which needs to be further discussed.

In this study, it collected the daily meteorological data of past 50 years at 27 meteorological stations in Yunnan province; the temporal and spatial characteristics of accumulated temperatures separately at $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\geq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the growing season at different elevations were analysed using methods including climate tendency rate, wavelet analysis and the Mann-Kendall test; then the periodic evolution pattern of accumulated temperatures and their responses to climate change were discussed.

It had following findings. (1) In the last 50 years, all types of accumulated temperatures at different elevations in Yunnan province had a steadily increasing trend, with peak values occurring in the last five years and a trough value appearing in the mid-1970s. (2) In addition to the significant warming phenomenon in the urban agglomeration area of central Yunnan, the accumulated temperatures at different elevations showed a higher warming trend in high-altitude regions than those in low-altitude regions. (3) Under the joint influences of altitude, urban heat island effect and climate warming, the temperature increase in Yunnan province mostly occurred at some such days with temperatures above $10\text{ }^{\circ}\text{C}$; the spatial distributions of accumulated temperatures above $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ differed greatly at various elevations. In addition, the trend of temperature increase was considerably higher than one at $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature and $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature. (4) There were two periodic variation cycles, 15 - 25 years and 40 - 50 years, which characterized various accumulated temperatures at different altitudes. There was a mutation point for all accumulated temperature types in the 1990s, suggesting that the warming trend in these accumulated temperature types significantly enhanced by the last 20 years.

This study provides a relatively objective evaluation of agricultural heat resources in Yunnan province for agrometeorological analysis. And it also provides a more accurate reference for adjusting modernized agriculture structure in rain-fed agricultural areas.

Key words: rain-fed agricultural areas; accumulated temperature; altitudinal gradient; periodic change; spatio-temporal variation; Yunnan province

(责任编辑 李嵘)