

1978—2019年云南省气候生产潜力的时空演变及 粮食产量响应

李涛辉¹, 张文翔¹, 吕爱锋², 刘永毫¹

(¹云南师范大学地理学部, 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“雨养农业”地区, 在全球变暖背景下探讨云南省气候生产潜力时空演变及粮食产量响应, 对于“雨养农业”地区的农业发展有重要意义。基于Miami和Thornthwaite Memorial模型, 利用云南省1978—2019年气象站点数据, 通过气候倾向率、M-K检验和反距离权重插值等方法研究云南省气候生产潜力时空演变及粮食产量响应。结果表明: 在时间系列上, 1978—2019年云南省气温、降水的多年平均均值分别为16.3℃、1098.1 mm, 气温呈现显著上升趋势, 降水呈现不显著下降趋势; y_t 、 y_r 、 y_e 的年均值分别为1953、1550、1477 kg/(hm²·a), 其中 y_t 、 y_e 呈现波动上升趋势, y_r 呈现波动下降趋势。在空间分布上, 气温、降水的分布趋势与 y_t 、 y_r 相似, 均呈现出由滇西南往滇西北递减的趋势, 且 y_e 与 y_t 的空间分布近似程度高于 y_r , 其空间范围分别为843~1861、1065~2470、980~2287 kg/(hm²·a)。气候资源利用率整体呈现显著上升趋势, 从1978—1987年的16.94%提升到2018—2019年的31.71%, 平均每10 a以3.66%的速度增长。在全球变化背景下, 云南省呈现暖干的趋势, 气候资源利用率显著提高, 其中降水是制约气候生产潜力的主因。

关键词: 云南省; Miami模型; Thornthwaite Memorial模型; 气候生产潜力; 气候资源利用率; 时空演变
中图分类号: P4 **文献标志码:** A **论文编号:** casb2022-0441

Temporal and Spatial Evolution of Climatic Potential Productivity and Response Characteristics of Grain Yield in Yunnan Province from 1978 to 2019

LI Taohui¹, ZHANG Wenxiang¹, LV Aifeng², LIU Yonghao¹

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

Abstract: Yunnan Province is a typical area of rain-fed agriculture in China. In the context of global warming, it is of great significance to explore the temporal and spatial evolution of climate potential productivity and the response of grain yield in Yunnan Province, which is important to the agricultural development in rain-fed agriculture regions. Based on the Miami and Thornthwaite Memorial model, this paper used the meteorological data from 1978 to 2019 to study the temporal and spatial evolution of climatic potential productivity and the response of grain yield in Yunnan Province by using climate tendency rate, M-K test and inverse distance weight interpolation. The results showed that in the time series, the average temperature of Yunnan Province from 1978 to 2019 was 16.3° C, which showed a significant upward trend; the multi-year average of

基金项目: 国家重点研发计划课题“大范围大深度土壤水分连续精准监测研究”(2021YFC3000201)。

第一作者简介: 李涛辉, 男, 1998年出生, 广东梅州人, 硕士研究生, 主要从事气候变化与光热资源方面的研究。通信地址: 650500 云南省昆明市呈贡区云南师范大学, E-mail: 1020738064@qq.com。

通信作者: 张文翔, 男, 1979年出生, 安徽合肥人, 教授, 博士, 主要从事环境变化与地球化学方面的研究。通信地址: 650500 云南省昆明市呈贡区云南师范大学, E-mail: wenxiangzhang@ynnu.edu.cn。

收稿日期: 2022-05-27, **修回日期:** 2022-08-16。

precipitation in Yunnan Province from 1978 to 2019 was 1098.1 mm, which showed a insignificant downtrend. The annual mean value of y_i , y_r and y_e was 1953, 1550 and 1477 kg/(hm² · a), respectively, of which y_i and y_e showed fluctuating upward trend, and y_r showed a fluctuating downward trend. In terms of spatial distribution, the distribution trend of temperature and precipitation were similar to those of y_i and y_r , both showing a decreasing trend from southwest Yunnan to northwest Yunnan, and the spatial distribution of y_e was more similar to that of y_i than y_r , with the spatial range of 843–1861, 1065–2470 and 980–2287 kg/(hm² · a), respectively. The overall utilization rate of climate resources showed a significant upward trend, increasing from 16.94% in 1978–1987 to 31.71% in 2018–2019, with an average growth rate of 3.66% of per decade. In the context of global climate changes, Yunnan Province showed a warm and dry trend with a significant increase in climate resource utilization, where precipitation was the main factor limiting climate potential productivity.

Keywords: Yunnan Province; Miami model; Thornthwaite Memorial model; climatic potential productivity; climate resource utilization; temporal and spatial evolution

0 引言

气候是粮食生产的主要影响因素,农作物通过光合作用,利用光、热、水等资源为其生长发育提供必要的能量物质^[1]。农业是受气候变化最敏感的系统之一,气候变化在农业结构、粮食产量上有着重要的影响,尤其为全球变暖效应^[2-3]。在气候变化的背景之下,极端气候出现的频率和灾害程度都可能造成农业结构的改变、粮食产量的减少等问题,而中国耕地人均面积仅有0.08 hm²,气候变化将会对国家粮食安全造成严重的威胁^[4-7]。中国西南地区降水丰沛,但耕地水分保蓄能力低,是典型的“雨养农业”地区。而云南省更是西南地区雨养农业发展的典型代表,其农业是全省经济的重要来源,且位于中国气候的脆弱带,气候变化对云南省的粮食生产有着显著影响^[8-9]。故此,在全球变暖的背景下探讨云南省气候生产潜力时空演变及粮食产量响应,不仅对“雨养地区”的农业发展有重要意义,更为西南地区的农业产值结构提供现实意义。许多学者也针对气候变化对云南农业生产的影响做了相关研究,并且为量化分析气候变化对农业的影响,通过气候生产潜力来描述分析气候变化与农业之间的关系,可以更好地描述在理想气候条件下植物的最大产量^[10-11]。例如李蒙等^[12]、李振杰等^[13]研究了云南省气候生产潜力的时空变化,并通过敏感性分析模拟了未来气候生产潜力的变化,认为云南省未来将出现“暖干型”气候,但没有深入分析云南省气候资源利用率的变化趋势及与粮食产量之间的响应关系。故此,在前人的基础上,本研究深入去探讨了1978—2019年云南省气候生产潜力资源利用率的变化,及其与云南省粮食产量的响应关系。本研究利用云南省1978—2019年27个气象站的年均气温和年降水量数据,运用Miami和Thornthwaite Memorial模型分别计算云南省气温、

降水和蒸散量生产潜力,并结合气候倾向率、皮尔逊系数、反距离权重插值和M-K检验等方法,探讨分析了云南省气候生产潜力的时空演变特征,揭示云南省气候资源利用率的变化趋势及与粮食产量的响应关系,对如何充分利用气候生产潜力,提高西南地区气候资源利用率,指导提升粮食生产能力等具有重要的理论依据和现实意义。

1 资料和方法

1.1 研究区概况

云南省处于中国西南地区,总面积约为39.4万km²(图1),其整体呈现出西北向东南递减的地势分布。它是以农业经济为主的省份,也是全国重要的茶叶、橡胶等热带和亚热带农作物的产出省份,土壤质地以红壤为主,农业种植类型多样,但大部分地区的农业生产能力较弱,且在东亚季风和印度季风的影响下形成干湿季分明的亚热带高原季风气候,是一个典型的“雨养农业”地区。全省的年均气温基本在16℃左右波动,而年降水量的地域分布是有较大差异的,其中年降水量最多的区域达到2000 mm以上,最少的仅有600 mm左右,但绝大部分地区处于1000~2000 mm之间。其水热条件非常适合大多数亚热带和热带农作物的种植^[14-15]。

1.2 数据来源

本研究所使用的数据包括气象数据和粮食单产数据。云南省27个气象站1978—2019年的气象日均值数据集均从国家气象科学数据中心所获取的,其中对于部分年份所缺失的数据通过相邻年份的数据进行线性插补,并通过一致性检验,确保数据的准确性;云南省1978—2019年的粮食单产数据来源于《云南省统计年鉴》,包含了1978—2019年云南省各地州市的粮食单产数据。

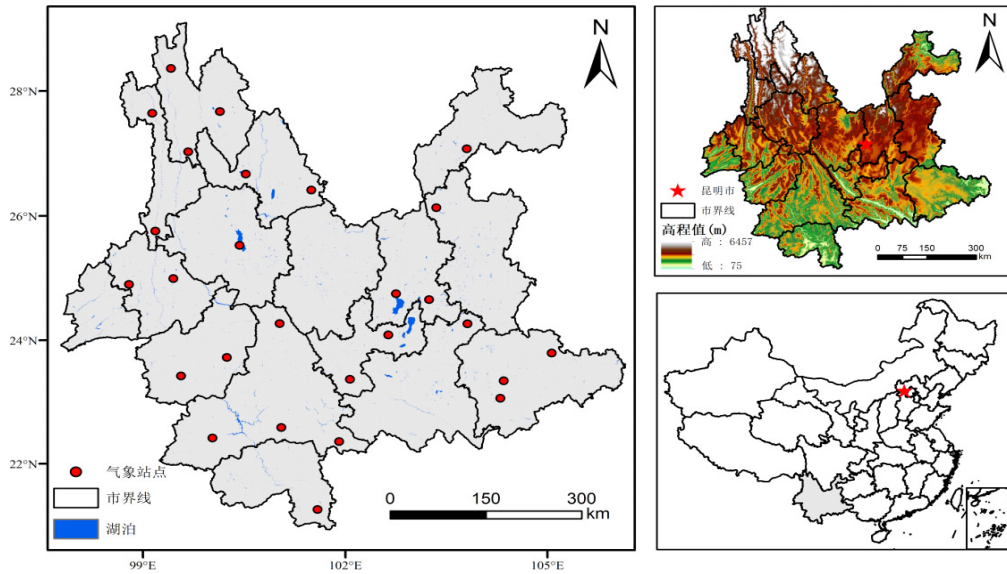


图1 云南省区域概况图

1.3 研究方法

1.3.1 气候生产潜力模型

(1)Miami 模型。根据对植物生长及其生物量形成的温度和降水2个关键气候因子来计算相应的气候生产潜力,得到气温生产潜力和降水生产潜力^[16]。其计算公式如式(1)~(2)所示。

$$y_t = 3000 / (1 + e^{1.315 - 0.119t}) \quad (1)$$

$$y_r = 3000 / (1 - e^{-0.00064r}) \quad (2)$$

式中, t 为年平均气温($^{\circ}\text{C}$); r 为年降水量(mm); y_t 和 y_r 分别为温度生产潜力和降水生产潜力 $[\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$;3000是经统计得到的地球自然植物每年在单位面积土地上的最高干物质产量 (kg/hm^2) 。

(2)Thorntwaite Memorial 模型。依据蒸散量与温度、降水和植被之间的函数关系来计算蒸散生产潜力^[17]。其计算公式如式(3)~(5)所示。

$$y_e = 3000 [1 - e^{-0.0009695(t-20)}] \quad (3)$$

其中:

$$V = \frac{1.05r}{\sqrt{1 + \left(\frac{1.05r}{L}\right)^2}} \quad (4)$$

$$L = 300 + 25t + 0.05t^2 \quad (5)$$

式中, t 为年平均气温($^{\circ}\text{C}$); r 为年降水量(mm); y_e 为蒸散生产潜力 $[\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$; V 为实际年平均蒸散量(mm), L 为年均最大蒸散量(mm)。

1.3.2 标准气候生产潜力 根据Liebig 最小因素定律,将通过计算所得该区域的气温生产潜力、降水生产潜力和蒸散量生产潜力取最小值,作为该区域的标准气

候生产潜力^[18-19]。其计算公式如(6)所示。

$$y_b = \min(y_t, y_r, y_e) \quad (6)$$

1.3.3 气候资源利用率 气候资源利用率为该区域内的粮食实际单产与气候生产潜力之间的比值百分率^[20]。其计算公式如(7)所示。

$$\text{气候资源利用率} = \frac{\text{粮食实际单产}}{\text{气候生产潜力}} \times 100\% \quad (7)$$

1.3.4 其他分析方法 本文的研究还采用气候倾向率、皮尔逊系数、Mann-Kendall 检验与反距离权重差值等分析方法,具体参考相关文献^[21-24]。

2 结果与分析

2.1 云南省气候时空变化特征

2.1.1 年均气温和年降水量的时间变化 通过图2可看出云南省自1978—2019年年均气温和年降水量的年际变化趋势。其中,年均气温呈现出波动上升的趋势,年均气温多年平均值为 16.3°C ,年均气温的最低值、最高值分别出现在1992年(15.44°C)、2019年(17.28°C),两者的差值为 1.84°C ;年降雨量呈现出波动小幅度下降趋势,年降水量的多年平均值为 1098.1 mm ,年降水量的最高值、最低值分别出现在2001年(1240.7 mm)、2019年(883.3 mm),两者的差值为 357.4 mm 。根据云南省气候变化的年际趋势表明,1978—2019年云南省的增温现象比较显著,其增温幅度与全球变暖趋势基本一致,总体呈现出显著上升的趋势;但是1978—2019年的降水年际变化呈现出不显著减少,且极个别相邻年份出现极不稳定的波动变化。这与孔锋等^[25]在1900—2010年全球陆地表面的年降雨量呈现减少趋势的结论是一致的。

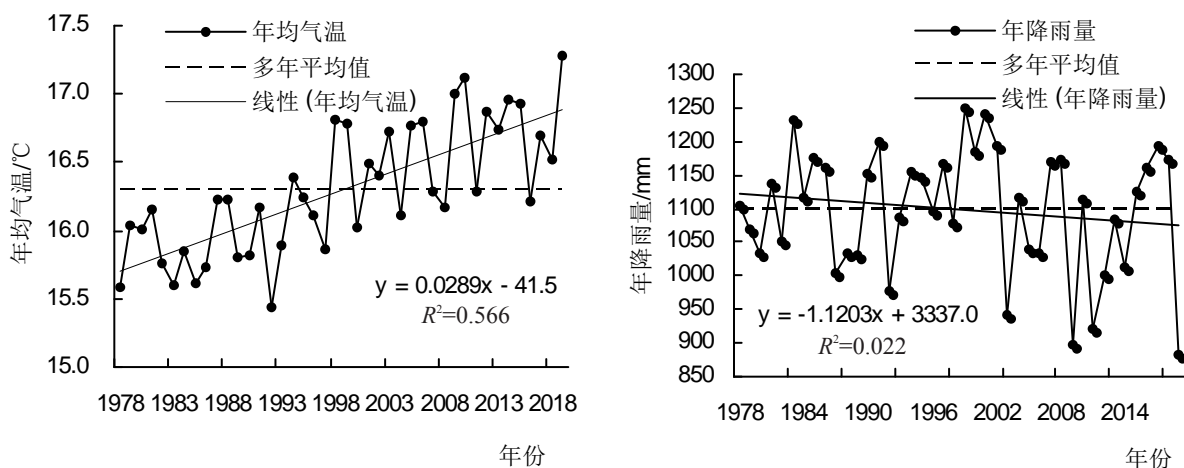


图2 1978—2019年云南省年均气温和年降水量年际变化趋势

2.1.2 年均气温和年降水量的空间变化 云南省年均气温和年降水量的空间分布如图3所示,从中可以看出,年均气温和年降水量在整体上呈现出从滇西南地区往滇东北、西北地区递减的趋势,基本表现出与当今的全球变化一致的趋势。年均气温和年降雨量的最高值都出现在滇南的玉溪、红河和普洱的三角地区,其最低值均出现在滇西北的迪庆地区。这与李蒙等^[12]、李振杰等^[13]在对云南省年均气温和年降水量的空间变化结论是近似一致的。并且这种空间趋势的出现可能与云南省的地形因素有较大关系,滇西北地区处于横断山区且海拔较高,其气候变化差相对较大,且云南省整体地形从北部向南部是递减的。

2.2 云南省气候生产潜力时空变化特征

2.2.1 气候生产潜力的时间变化特征 气候生产潜力主要受到于光、温和水等气候因素的综合作用的影响,所

以其时空变化较为复杂。本研究通过 Thornthwaite Memorial 模型和 Miami 模型计算云南省 1978—2019 年的蒸散量、气温和降水 3 个气候生产潜力,其结果(图4)表明:蒸散量生产潜力的曲线波动趋势与降水生产潜力近似一致,而气温生产潜力则呈现显著的增加趋势。蒸散量、气温和降水生产潜力平均值分别为 1477、1953、1550 kg/(hm²·a),三者的均值与李振杰等^[13]的研究相比近似相同,其中的偏值可能是由于气象数据的时间尺度和气象站点的数量多少及空间分布有关。

本研究通过使用 M-K 检验,对云南省气温、降水和蒸散量生产潜力的时间序列进行突变检验,最终从图4的结果中可以看出,气温生产潜力的 Ufk 和 Ufb 曲线在 1998 年出现相交,且经过 0.05 的显著性检验,说明气温生产潜力在 1998 年发生突变,在之后呈现显著

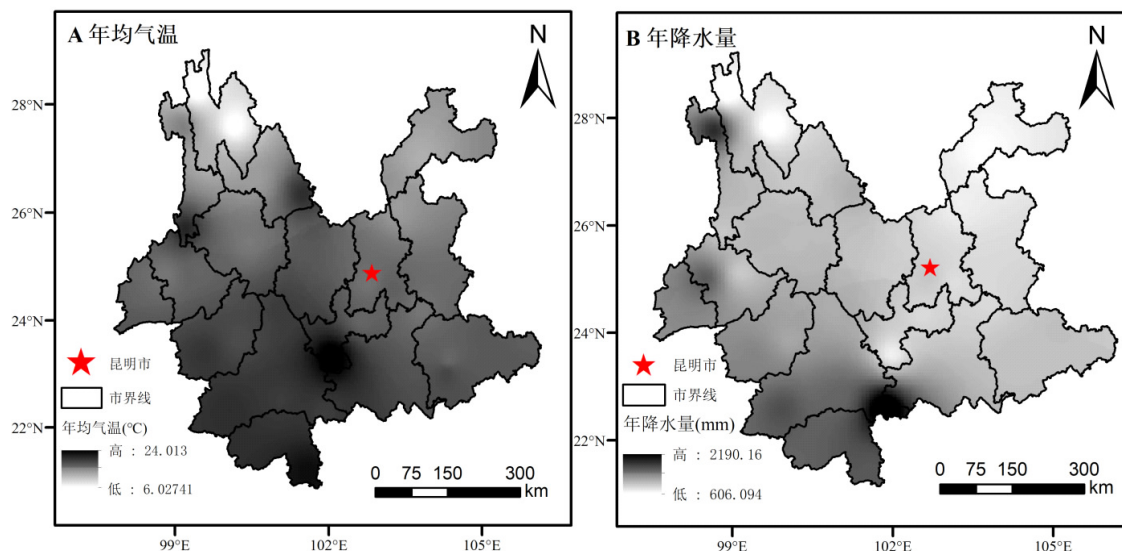


图3 1978—2019年年均气温和年降水量空间分布

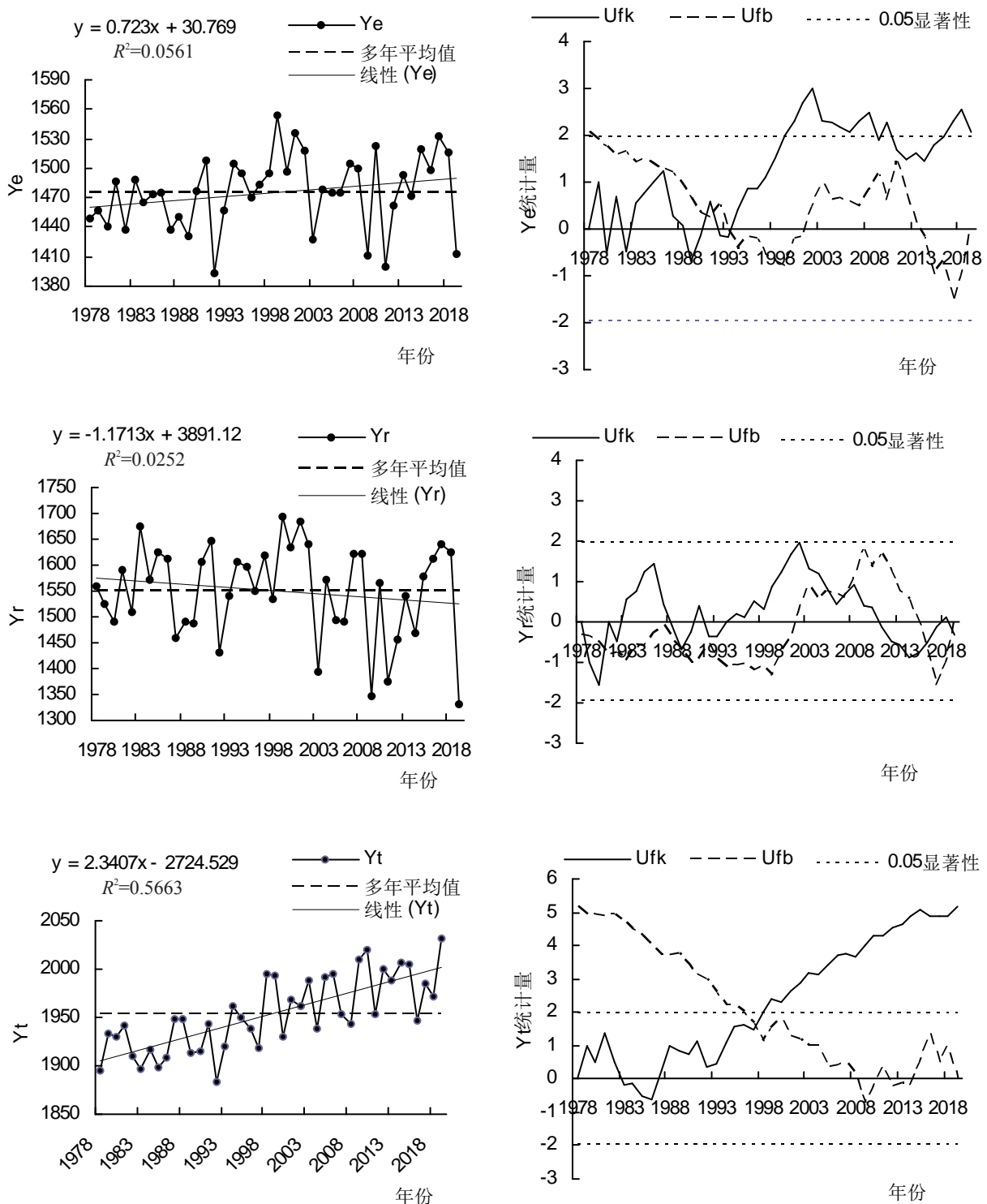


图4 1978—2019年气候生产潜力变化趋势及突变检验

上升的趋势。而蒸散量和降水生产潜力的 U_{fk} 和 U_{fb} 曲线在1978—2019年的时间尺度上基本处于 ± 1.96 的临界值之内,这表明两者在这个时间尺度之内没有显著的增加或减小趋势。并且在这个时间尺度之内,蒸散量和降水生产潜力的 U_{fk} 和 U_{fb} 曲线有多次的相交

点,表明在这些相交点年份蒸散量和降水生产潜力可能发生突变。并通过对其进行滑动 t 检验(图略),并结合突变检验,结果表明降水生产潜力仅在2005年发生1次明显突变,蒸散量生产潜力并没有发生显著突变。

2.2.2 气候生产潜力的空间变化特征 通过云南省气候生产潜力的空间分布(图5)表明,云南省气温生产潜力、降水生产潜力和蒸散量生产潜力的空间分布特征近似,整体呈现出南高北低、从滇西南地区往滇西北地区递减。蒸散量生产潜力年均空间变化范围为843~1861 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,气温生产潜力年均空间变化范围为1065~2470 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,降水生产潜力年均空间变化范围为980~2287 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。但是在空间分布上存在显著的不均衡性,3个气候生产潜力最大的地区是滇西南的西双版纳州、普洱市和红河州的三角地区,气候生产潜力最小的地区处于滇东北的迪庆州。

其中,蒸散量生产潜力与降水生产潜力的空间分布相似程度高于气温生产潜力的空间分布。通过皮尔逊相关分析(图略),云南省蒸散量生产潜力与年均气温、年降雨量相关关系的结果表明,蒸散量生产潜力与年均气温的相关系数为0.23,与年降水量的相关系数为0.85,并且均通过0.05的显著性水平,这说明降水对云南省蒸散量生产潜力的影响变化较大。

通过图5的云南省气候生产潜力的变化倾向率结果表明,气温、降水和蒸散量气候生产潜力的平均气候倾向率分别为6.3、-10.4、22.7 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。气温气候生产潜力的气候倾向率为正值,与云南省气候增温的现

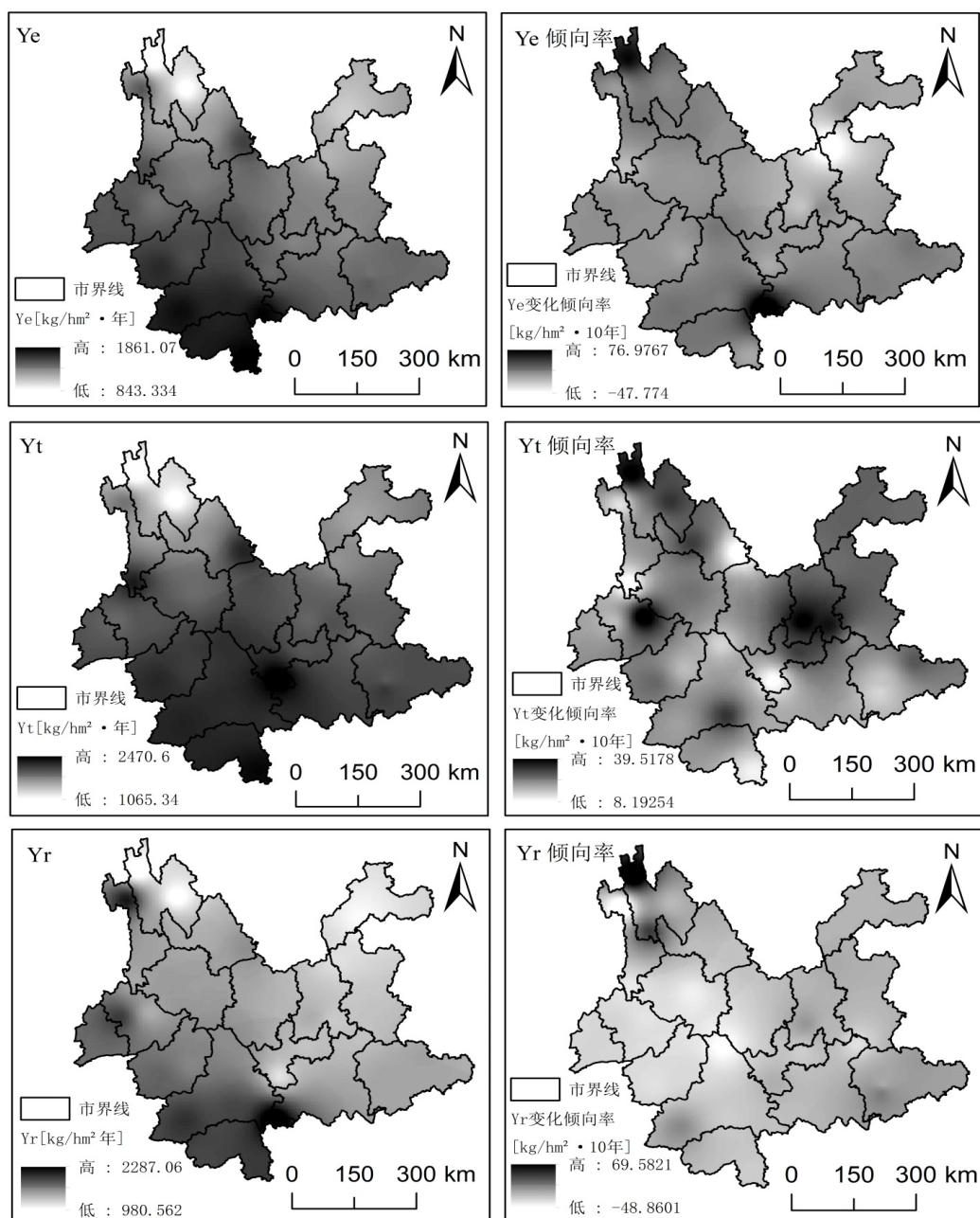


图5 1978—2019年云南省气候生产潜力及气候倾向率的空间分布

象^[26]相对应;降水生产潜力的气候倾向率为负值,与云南省气候降雨微量减弱的现象^[27]相对应;蒸散量生产潜力的气候倾向率为正值,原因是云南省气候增温幅度与降雨减弱幅度的不对称,且云南省的气候增温占据主导因素,所以使得蒸散量生产潜力呈现出微弱上升的趋势。其中,降水生产潜力的变化率最高值出现在滇西北地区,这可能与云南省的地形和海拔因素有关;气温生产潜力的变化率最高值出现在滇中城市群和滇西北地区,这可能是城市热岛效应和海拔因素造成的地区增温趋势和降温趋势显著,从而使得气温变化率高于其他地区;而蒸散量生产潜力变化率最高的是滇南地区和滇西北地区的。这表明降水生产潜力的变化倾向率与蒸散量生产潜力的变化倾向率的空间相似程度更高,而气温生产潜力的变化倾向率与其他两种的变化倾向率空间相似程度较低,说明降水对云南省蒸散量生产潜力的影响大于气温对云南省蒸散量生产潜力的影响。

2.3 粮食产量对云南省气候生产潜力的响应

气候资源利用率代表着通过社会劳动对气候资源的利用程度,其中粮食产量是气候资源利用率的最显著表现形式。故此根据最小因素定律^[18],将3个气候生产潜力的最低值作为云南省的标准气候生产潜力,并通过对标准气候生产潜力与粮食实际生产力之间的比值计算,得到云南省1978—2019年的气候资源利用率。其结果(表1)表明云南省各年代的气候资源利用率呈现出显著上升的趋势,从1978—1987年的16.94%提升到2018—2019年的31.71%,平均每10年以3.66%的速度增长,粮食单产水平随着时间的推移在快速增长,而标准气候生产潜力并没有出现显著的增加或减少。

通过对云南省粮食单产年际变化的研究发现,1978—2019年云南省粮食单产水平呈现出显著上升趋势(如图6),2018—2019年云南省的平均粮食单产达到4515.39 kg/hm²,较于20世纪80年代云南省粮食

表1 1978—2019年云南省气候资源利用率年代际变化

年份	粮食单产/(kg/hm ²)	标准气候生产潜力/[kg/(hm ² ·a)]	气候资源利用率/%
1978—1987	2475.81	14613.26	16.94
1988—1997	3104.87	14668.21	21.17
1998—2007	3526.86	14927.48	23.63
2008—2017	4256.69	14707.20	28.94
2018—2019	4515.39	14240.73	31.71

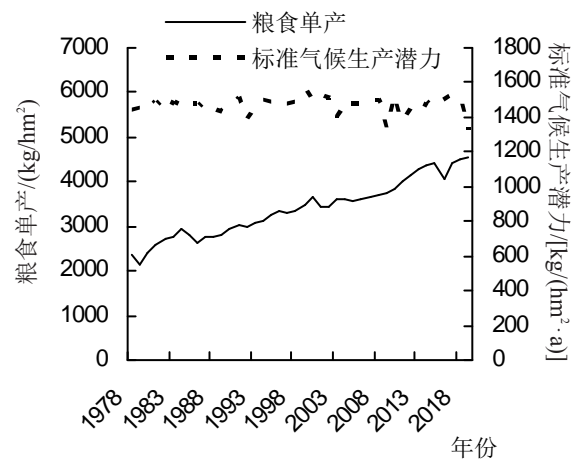


图6 1978—2019年云南省粮食单产与标准气候生产潜力的年际变化

单产净增产2039.58 kg/hm²,并且粮食单产平均每10 a以509.895 kg/hm²的速度增长,表明在同一时期中粮食单产的变化幅度是显著高于标准气候生产潜力的变化

幅度。

并通过云南省1978—2019年气候资源利用率分别与粮食单产、标准气候生产潜力进行相关性分析,其结果(图7)表明:气候资源利用率与粮食单产之间呈现极显著的正相关关系,其相关系数高达0.929;而气候资源利用率与标准气候生产潜力之间呈现不显著的负相关关系,相关系数为0.017。这说明云南省气候资源利用率的波动幅度,主要由粮食单产因素所决定的,而标准气候生产潜力不是决定气候资源利用率的主要因素。藉此说明云南省气候资源利用率的上升趋势,可能主要是随着时代变化,科技水平、肥料利用率、作物优势品种等得到显著提升,进而促使粮食单产的提高。但是就整体而言,云南省的气候资源利用率依旧偏低,仅达到31.71%。其原因可能是由于云南省耕地质量不高、农业人口迁出比例高、土地利用模式单一等原因造成的。因此,云南省气候资源利用率的提高从短期来看需要从人地两方面进行协调性调整,改善土地耕种模式和耕种质量,提高农业人口的积极性;从长

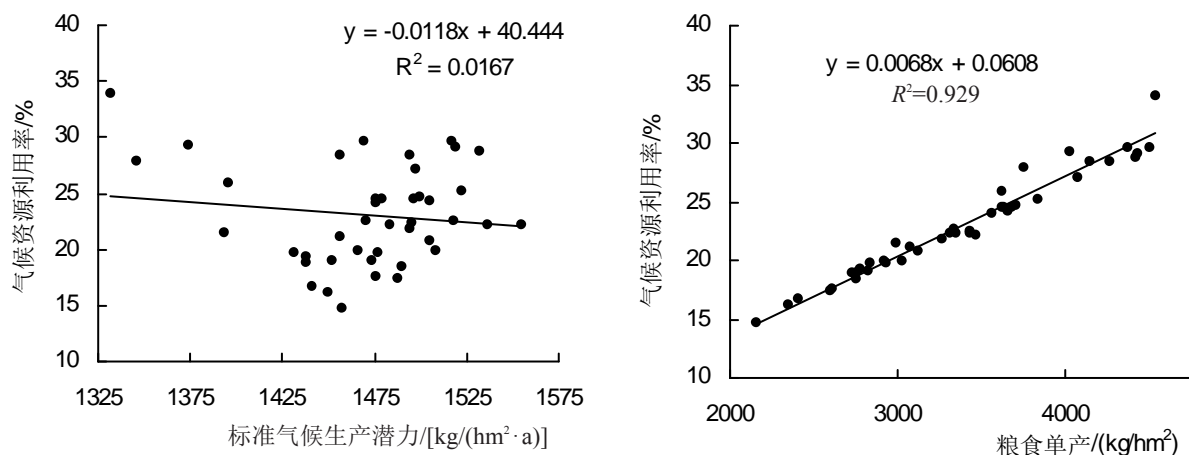


图7 1978—2019年云南省气候资源利用率的相关性趋势

远来看需要在农业科学技术的提高、农作物优良品种的培育、土壤肥力水平的利用等方面着手。

3 结论

基于云南省1978—2019年的27个气象站点数据、Miami模型与Thornthwaite Memorial模型等,本研究分析了在气候变化背景下云南省气候和3种生产潜力的时空演变特征,及与粮食产量的响应,主要研究结论如下。

(1)1978—2019年云南省年均气温多年平均值为16.3℃,呈现显著上升的趋势,40 a间的最大波动幅度在1.84℃;年降雨量多年平均值为1098.1 mm,呈现不明显下降趋势,研究期内的最大波动幅度为357.4 mm。

(2)云南省气温生产潜力呈现显著上升趋势,蒸散量和标准气候生产潜力均呈现出不显著上升趋势,而降水生产潜力呈现出不显著下降趋势。并通过M-K检验结果表明:气温生产潜力在1998年发生突变,出现显著增加的趋势;而降水生产潜力则仅在2005年发生突变,蒸散量生产潜力和标准气候生产潜力无明显突变的现象。

(3)云南省气温、降水和蒸散量生产潜力均呈现出滇西南地区往滇西北地区减小的整体趋势,但是降水和蒸散量生产潜力空间分布的相似程度高于气温生产潜力。通过皮尔逊相关性分析,降水与蒸散量生产潜力的相关系数为0.85,气温与蒸散量生产潜力的相关系数为0.23,这表明降水对云南省蒸散量生产潜力的影响变化较大。

(4)1978—2019年云南省的气候资源利用率和粮食单产总体上均呈现出明显增加的趋势,并分别每10年以平均3.66%、509.895 kg/hm²的速度增长。在

2018—2019年云南省的气候资源利用率达到31.71%,且与粮食单产呈现极显著的正相关关系,这表明云南省未来气候资源利用率的提高取决于粮食单产水平的提高。

4 讨论

本研究通过Miami模型和Thornthwaite Memorial模型去探讨分析了1978—2019年云南省气候及3种生产潜力的时空变化,其结果表明40 a来云南省气温呈现显著上升趋势,降水呈现波动减小的趋势,总体气候变化呈现“暖干化”趋势。本文的研究结果与李蒙等^[12]、李振杰等^[13]的研究结论相一致,并且他们通过敏感性分析表明未来云南省气候变化为“暖干”的背景,将不利于农业生产。而本研究也通过皮尔逊相关性证明在全球变暖的趋势之下,降水对气候生产潜力的主导性会更强。

通过本研究发现,云南省气候生产潜力呈现不明显波动上升趋势,且与降雨生产潜力的空间分布特征有很高的相似程度,说明大部分地区气候生产潜力都受到降水因素的主导。并且本研究使用标准气候生产潜力进行计算气候资源利用率,可以在一定程度上保证云南省气候资源的最低利用率,消除不同因子影响下的波幅误差,提高最终结果的准确性。最后通过对云南省气候资源利用率的分析表明,未来提高气候资源利用率的关键是粮食单产的提高,且这与文想成等^[28]在长江中下游地区的研究结果基本一致。因此在未来需要进一步加强水源涵养、农业水利设施建设、发展节水型农业及推广耐旱作物品种等措施,以保证云南省在未来气候变化背景下农业的稳定发展,提高云南省的气候资源利用率水平。

但是本研究在数据及模型上尚存在局限性。首先

本研究所使用的气象站点相对较少,且滇东北和滇中地区的站点分布不均匀,导致气象数据在空间插值上会存在较大的误差。因此,本研究通过对1978—2019年长时间尺度的云南省气候和气候生产潜力时空变化的分析,以期能降低由于站点数量稀少、分布不均所造成的结果误差性。其次在模型的选择上,本研究使用的两种气候统计模型都是通过拟合植被净初级生产力与气候因子之间的经验关系所得出的^[29-30]。但是云南省地形地貌复杂、立体气候显著,仅讨论气温、降水条件对农业的影响,在实际意义上可能无法很好地反映云南省气候生产潜力的时空变化。未来需要进一步探讨不同因子下的气候模型重建,提高气候模型的普适性,以提高研究结果的准确性。

参考文献

- [1] 罗海平,邹楠,王圣云. 1981—2015年我国粮食主产区气候生产潜力的时空分异与演化[J]. 长江流域资源与环境,2021,30(7):1724-1733.
- [2] GAY C, ESTRADA F, CONDE C, et al. Potential impacts of climate change on agriculture: a case of study of coffee production in veracruz, Mexico[J]. Climatic change, 2006, 79(3): 259-288.
- [3] KANG Y, MA X, KHAN S. Predicting climate change impacts on maize crop productivity and water use efficiency in the loess plateau [J]. Irrigation and drainage, 2014, 63(3): 394-404.
- [4] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J]. 应用气象学报, 2015, 26(1): 1-11.
- [5] 唐国平,李秀彬, GUENTHER F, 等. 气候变化对中国农业生产的影响[J]. 地理学报, 2000(2): 129-138.
- [6] YANG X G, CHEN F, LIN X M, et al. Potential benefits of climate change for crop productivity in China [J]. Agricultural and forest meteorology, 2015, 208: 76-84.
- [7] 张林林. 1982—2016年西南地区变干、变绿趋势分析[J]. 西南农业学报, 2021, 34(9): 1994-2003.
- [8] 李蒙,朱勇,周建琴,等. 基于气候生产潜力的云南人粮关系及其未来变化[J]. 中国农业气象, 2019, 40(2): 96-104.
- [9] 秦剑. 气候因子与云南粮食生产的关系[J]. 应用气象学报, 2000(2): 213-220.
- [10] 姚玉璧,李耀辉,王毅荣,等. 黄土高原气候与气候生产力对全球气候变化的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2005(2): 202-208.
- [11] 罗海平,邹楠,胡学英,等. 1980—2019年中国粮食主产区主要粮食作物气候生产潜力与气候资源利用效率[J]. 资源科学, 2021, 43(6): 1234-1247.
- [12] 李蒙,朱勇,黄玮. 气候变化对云南气候生产潜力的影响[J]. 中国农业气象, 2010, 31(3): 442-446.
- [13] 李振杰,段长春,金莉莉,等. 云南省气候生产潜力的时空变化[J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2181-2190.
- [14] 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.
- [15] 刘建华. 2006. 中国气象灾害大典:云南卷[M]. 北京:气象出版社.
- [16] LEITH H. Modeling the primary productivity of the world[J]. Nature and resources, 1972, 8(2): 5-10.
- [17] LIETH H, BOX E. Evapotranspiration and primary production: CW Thornthwaite Memorial Mode[J]. Publications in climatology, 1972, 25(2): 37-46.
- [18] 赵慧颖,田宝星,宫丽娟,等. 近308年来大兴安岭北部森林植被气候生产潜力及其对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2017, 37(6): 1900-1911.
- [19] 张锐. 甘青新1959—2008年草地气候生产潜力的变化特征与预测研究[D]. 兰州:西北师范大学, 2011.
- [20] 吴宜进,熊安元,杨荆安,等. 湖北的气候生产力与农业持续发展[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 31(5): 723-730.
- [21] JONES P D. Hemispheric surface air temperature variations: recent trend and update to 1978[J]. Journal of climate, 1998, 11: 654-660.
- [22] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992(4): 482-493.
- [23] 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: 468.
- [24] 符静,易臻照,赵莎. 基于GIS空间插值的降水分布模拟方法比较研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(1): 94-97, 104.
- [25] 孔锋,王一飞,吕丽莉,等. 近百年来全球、大洲和区域尺度降雨时空变化诊断(1900—2010)[J]. 灾害学, 2018, 33(1): 81-88, 95.
- [26] 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(5): 19-26.
- [27] 刘荫今,张万诚,陈艳,等. 云南50年降水均一性与变化趋势分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2016, 38(6): 888-896.
- [28] 文想成,张泰,王学梅,等. 长江中下游地区气候生产潜力及粮食产量响应[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(6): 196-203.
- [29] ZHAN X L, XIAO W H, WANG Y C, et al. Spatial-temporal changes in NPP and its relationship with climate factors based on sensitivity analysis in the Shiyang River Basin[J]. Journal of earth system science, 2020, 129: 24.
- [30] CHENT, BAO A, JIAPAER G, et al. Disentangling the relative impacts of climate change and human activities on arid and semiarid grasslands in Central Asia during 1982-2015[J]. Science of the total environment, 2019, 653(25): 1311-1325.