

DOI: 10.20103/j.stxb.202407221725

宋慧仙,角媛梅,周伟奇,王佳.近七十年云南省气候景观的时空异质性特征研究.生态学报,2025,45(13): - .  
Song H X, Jiao Y M, Zhou W Q, Wang J. Spatial and temporal heterogeneity of climatic landscape in Yunnan Province in recent 70 years. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(13): - .

## 近七十年云南省气候景观的时空异质性特征研究

宋慧仙<sup>1</sup>,角媛梅<sup>1,\*</sup>,周伟奇<sup>2</sup>,王 佳<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 云南师范大学地理学部,昆明 650500

<sup>2</sup> 中国科学院生态环境研究中心区域与城市生态安全全国重点实验室,北京 100085

**摘要:**基于云南省 119 个气象站 1951 年至 2020 年的气温和降水数据,采用 Köppen-Geiger 气候分类法与景观分析方法,系统分析了 70 年来云南省气候景观的时空变化规律。研究结果表明:云南省气候带主要有暖温带(C)、冷温带(D)和极地带(E)三种,以暖温带(C)为主导。云南省气候亚型有九类,包括热夏冬干暖温气候(Cwa)、温夏冬干暖温气候(Cwb)、热夏常湿暖温气候(Cfa)、温夏常湿暖温气候(Cfb)、热夏冬干冷温气候(Dwa)、温夏冬干冷温气候(Dwb)、热夏常湿冷温气候(Dfa)、温夏常湿冷温气候(Dfb)、极地苔原气候(ET)型,其中,Cwa和Cwb为主导型。70年间,气候带的空间分布未发生显著变化,面积占比呈现波动变化。亚型气候类型的组成、面积占比、景观格局、空间分布明显变化,主要表现为夏季炎热的亚类型新增或者面积增加,尤其是Cwb大部分转变为Cwa;气候景观最大斑块面积缩小,形状趋于复杂,破碎化程度加剧;Cwa和Cwb空间位置向北移。解析云南省气候景观时空变化规律,可为揭示气候景观变化对物种分布的潜在影响提供重要参考。

**关键词:**云南省气候;Köppen-Geiger;景观指数;气候景观时空异质性

## Spatial and temporal heterogeneity of climatic landscape in Yunnan Province in recent 70 years

SONG Huixian<sup>1</sup>, JIAO Yuanmei<sup>1,\*</sup>, ZHOU Weiqi<sup>2</sup>, WANG Jia<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China

<sup>2</sup> Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Regional and Urban Ecology, Beijing 100085, China

**Abstract:** This study analyzed temperature and precipitation data from 119 meteorological stations in Yunnan Province (1951–2020). The research applied the Köppen-Geiger classification system combined with landscape pattern analysis to investigate the spatio-temporal dynamics of climate landscapes over the past seven decades. The results indicate that Yunnan Province is primarily characterized by three climate zones: warm temperate (C), cold temperate (D), and polar (E), with the warm temperate zone (C) accounting for the largest proportion. Within these zones, nine distinct climate subtypes are identified: Hot Summer Dry-Winter Warm Temperate Climate (Cwa), Mild Summer Dry-Winter Warm Temperate Climate (Cwb), Hot Summer Humid Warm Temperate Climate (Cfa), Mild Summer Humid Warm Temperate Climate (Cfb), Hot Summer Dry-Winter Cold Temperate Climate (Dwa), Mild Summer Dry-Winter Cold Temperate Climate (Dwb), Hot Summer Humid Cold Temperate Climate (Dfa), Mild Summer Humid Cold Temperate Climate (Dfb), and Polar Tundra Climate (ET), with Cwa and Cwb being the most widespread. Over the past 70 years, although the overall spatial distribution of these climate zones has remained relatively stable, significant fluctuations in areal proportions across zones were documented. Notable changes include shifts in the composition, area proportions, landscape patterns, and spatial distributions of the climate subtypes, particularly the emergence and expansion of hot summer subtypes. A significant trend is the conversion of large portions of Cwb areas to Cwa. Additionally, the maximum patch area of climate landscapes

基金项目:云南省基础研究专项—重点项目(202201AS070024);云南省基础研究专项—重大项目(202201BC070001)

收稿日期:2024-07-22; 网络出版日期:2025-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ymjiao@sina.com

has decreased, patch shapes exhibited increased irregularity, and landscape fragmentation has increased. Furthermore, both Cwa and Cwb zones have shown a clear northward shift. This analysis of the spatio-temporal changes in climate landscapes in Yunnan Province offers critical insights into climate change impacts on regional biodiversity distribution.

**Key Words:** climate of Yunnan Province; Köppen-Geiger; landscape index; spatio-temporal heterogeneity of climate landscape

区域气候类型的增减已成为气候变暖的重要反应之一,气候分类是理解不同气候变量或现象之间复杂时空相互作用的关键步骤<sup>[1]</sup>。气候带的变化可反映区域的气候变化<sup>[2]</sup>,不同区域对气候变化的响应有所差异,呈现出不同的演变,如变暖、变冷、变干或变湿,因此了解气候的时空如何演变对于诊断和预测气候变化,以及对其潜在生态影响至关重要。先前的研究主要集中在不同气候类型基于区域变化的响应或是气候区划方面,气候区划工作在我国开展时间已较长<sup>[3]</sup>,然而很少分析气候变化的空间异质性。同时,在物种分布模型中,气候被认为是影响物种空间范围分布较强的因素<sup>[4]</sup>。然而,由于现有物种数据的缺乏,关于气候变化对物种分布影响的研究不够充分<sup>[5]</sup>。因此,不同的气候分类常被用来反映物种分布的变化,同时产生的气候分类系统对于认识植被分区产生了重大影响<sup>[6]</sup>。气候分类可将气候和植被的定性特征联系起来,目前世界上应用最广、影响最大的气候分类法之一是起源于 1936 年柯本气候,经过不断完善后使用更新的 Köppen-Geiger 气候分类法来反映气候类型的空间分布<sup>[7]</sup>。

Köppen-Geiger 气候分类以气温、降水和季节变化为分类依据,以月平均气温和降水量为分类指标,用于描述植被分布<sup>[8]</sup>。Köppen-Geiger 气候分类的标准严格、界限明晰,可根据简单的气温和降水指标对气候类型进行划分,同时适用于苔原、森林、草原、沙漠等景观带<sup>[3]</sup>,可反映气候和景观的空间变化。国内外学者对 Köppen-Geiger 气候分类开展了多方面的研究,如研究不同时间或不同空间的柯本气候特征<sup>[9]</sup>、不同情景下气候变化特征及未来气候预测<sup>[10]</sup>,以及将该气候分类与生物、土壤相结合研究<sup>[11]</sup>。另外,Köppen-Geiger 分类在气候和生物群落类型的紧密联系方面的相关研究已得到验证<sup>[12]</sup>,说明其分类方法可以反映潜在的生态格局的变化。

景观是由不同生态系统类型所组成的异质性地理单元,景观格局的组成、结构、功能和动态是当前国际景观生态学研究的核心<sup>[13]</sup>。同时,景观格局与生态过程的相互联系是景观生态学的基础,对格局与过程之间关系的理解是深化景观生态学研究的关键<sup>[14]</sup>。另外,研究尺度的变化会使景观格局和生态过程的表征发生变化,从而引起生态现象的改变,形成不同的尺度效应,进而对格局和过程相互关系的结论与机理产生不同的理解<sup>[15]</sup>。由于在不同尺度上生态过程的影响因子与作用机理不同,需要对尺度进行转换,先前的研究将景观指数作为指标来进行尺度转换,进而了解景观现象的空间变化<sup>[16]</sup>。气候带和植被格局之间的空间重叠表明可用不同水热条件的气候斑块组成来反映气候景观格局<sup>[17]</sup>,因此使用景观指数来量化描述气候景观中的结构和功能变化。对气候景观空间结构的量化不仅可以反映气候类型面积的变化,还可以识别物种相对丰富的气候带边缘发生的变化<sup>[18]</sup>。与此同时,也可以反映气候斑块聚集或破碎时,区域的生态物质、能量和信息的源汇对物种生存产生的影响<sup>[19]</sup>。

本研究基于 Köppen-Geiger 气候分类法,提取云南省 1951 年至 2020 年间气候带及其亚类型,并分析其景观特征的时空异质性。首先,基于中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集提取 Köppen-Geiger 气候带及其亚类型;然后,分析气候带及其亚类型空间分布、面积大小的时间变化规律;最后,采用景观生态学方法分析气候景观的动态变化特征,主要聚焦于气候景观的面积、形状、聚集度和多样性等方面的变化。本研究将气候类型与景观格局联系,构建与分析气候景观,可深入理解云南省气候类型及其变化规律,并为解析气候变化对物种分布的潜在影响提供科学参考。

## 1 研究区概况

云南省位于中国西南边陲,地理位置位于 21°08'—29°15'N 和 97°31'—106°11'E 之间,总面积 39.41 万 km<sup>2</sup>。

云南省地形复杂多样,属于山地高原地形,呈现出西北高、东南低的整体趋势。地貌类型以高原、山地和坝子为主,海拔差异显著。云南省气候变化幅度大,类型丰富,区域差异显著,垂直变化尤为突出,具有显著的立体气候特征。云南省的气候类型涵盖了从北热带到寒温带的所有类型。由于地形因素的显著影响,云南省年温差较小,但日温差较大<sup>[20]</sup>。云南省复杂多样的地形地貌和气候环境,使得该区域内植被类型丰富多样,具有常绿阔叶林、硬叶常绿阔叶林、落叶阔叶林、灌丛,以及草甸等主要植被类型。

## 2 数据和方法

### 2.1 数据来源

气象数据来源于中国气象局国家气象信息中心 (<http://data.cma.cn/>) 所提供的“中国地面气候资料日值数据集 (V3.0)”,提取了云南省 1951 年至 2020 年 119 个站点(图 1)的气温和降水数据,该数据经过较为严格的质量控制,主要包括极值控制、缺测站点时间一致性检验,已在业务和科研中得到了广泛应用<sup>[21]</sup>。数字高程模型(DEM)数据源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)。

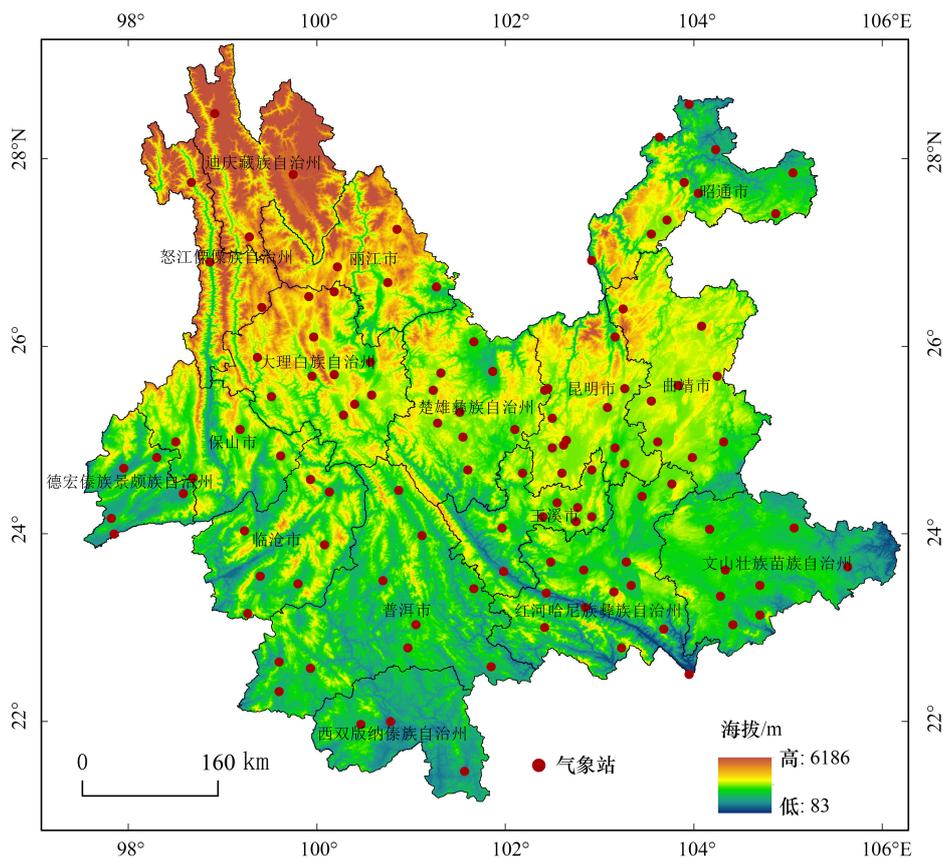


图 1 云南省气象站点分布

Fig.1 Distribution of meteorological stations in Yunnan Province

### 2.2 数据处理

首先,根据所选取的云南省 119 个站点的基础数据,将 1951 到 2020 年以 10 年为一周期划分为 7 个周期(1951—1960 年、1961—1970 年、1971—1980 年、1981—1990 年、1991—2000 年、2001—2010 年和 2011—2020 年),计算各个站点的月平均气温和降水。其次,利用考虑地形的三维薄板样条插值方法(Thin Plate Spline, TPS)对云南省的气候数据进行空间插值,以更精确地反映该地区复杂地形对气候特征的影响。不同于传统的二维插值方法,三维薄板样条方法在插值过程中不仅考虑了常规的空间坐标(经度、纬度),还将海拔高度作为一个重要的输入变量。通过将气温、降水数据与对应的空间坐标,以及海拔高度进行整合,形成空

间数据集,构建三维插值模型。插值过程中通过优化插值函数,使其在空间范围内能够平滑地拟合已知数据点,并根据空间坐标和海拔高度预测其他区域的气候值,从而捕捉地形引起的气温变化和降水差异。这一方法能更准确地反映地形对气候特征的影响,特别是在地形变化显著的地区<sup>[22]</sup>。最后,根据 Köppen-Geiger 气候分类体系和景观指数计算公式,利用 ArcGIS10.8 软件和 Excel 处理得出不同气候类型面积所占比例,进而分析 1951 至 2020 年间气候景观的动态变化。

### 2.3 Köppen-Geiger 气候分类

Köppen-Geiger 气候包含 5 个气候带和 30 个气候亚型(表 1)<sup>[23]</sup>,根据更新的气候分类方案,首先要识别

表 1 Köppen-Geiger 气候符号及标准

Table 1 Köppen-Geiger climate symbol and standard

气候带 Climate zones	气候型 Climate type	气候亚型 Climate subtypes	标准 Criteria	说明 Description	云南省气候带及亚型 Climatic zones and subtypes in Yunnan province
热带 Tropical (A)	热带雨林气候(Af) 热带季风气候(Am) 热带疏林草原气候(Aw)		$T_{\text{cold}} \geq 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{dry}} \geq 60 \text{ mm}$ NOT (Af) & $P_{\text{dry}} \geq (100 - \text{MAP}/25) \text{ mm}$ NOT (Af) & $P_{\text{dry}} < (100 - \text{MAP}/25) \text{ mm}$	-雨林 -季风 -萨凡纳	
干旱 Arid (B)	沙漠气候(BW) 草原气候(BS)		$\text{MAP} < 10 \times P_{\text{threshold}}$ $\text{MAP} < 5 \times P_{\text{threshold}}$ $\text{MAP} \geq 5 \times P_{\text{threshold}}$	-沙漠 -草原	
		热(h) 冷(k)	$\text{MAT} \geq 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\text{MAT} < 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$	-热 -冷	
温暖 Temperate (C)	夏干暖温气候(Cs) 冬干暖温气候(Cw) 常温暖温气候(Cf)		$T_{\text{hot}} > 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ & $0 < T_{\text{cold}} < 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{sdry}} < 40 \text{ mm}$ & $P_{\text{sdry}} < P_{\text{wwet}}/3$ $P_{\text{wdry}} < P_{\text{swet}}/10$ NOT (Cs or (Cw))	-干燥夏季 -干燥冬季 -无旱季	暖温气候带
		热夏(a) 温夏(b) 冷夏(c)	$T_{\text{hot}} \geq 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ NOT (a) & $T_{\text{mon10}} \geq 4$ NOT (a or b) & $1 \leq T_{\text{mon10}} < 4$	-炎热夏天 -温暖夏天 -寒冷夏天	热夏冬干暖温气候、热夏常湿暖温气候 温夏冬干暖温气候、温夏常湿暖温气候
寒冷 Cold (D)	夏干冷温气候(Ds) 冬干冷温气候(Dw) 常湿冷温气候(Df)		$T_{\text{hot}} > 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ & $T_{\text{cold}} \leq 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $P_{\text{sdry}} < 40 \text{ mm}$ & $P_{\text{sdry}} < P_{\text{wwet}}/3$ $P_{\text{wdry}} < P_{\text{swet}}/10$ NOT (Ds) or (Dw)	-干燥夏季 -干燥冬季 -无旱季	冷温气候带
		热夏(a) 温夏(b) 冷夏(c) 寒冬(d)	$T_{\text{hot}} \geq 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ NOT (a) & $T_{\text{mon10}} \geq 4$ NOT (a, b or d) NOT (a or b) & $T_{\text{cold}} < -38 \text{ }^{\circ}\text{C}$	-炎热夏天 -温暖夏天 -寒冷夏天 -寒冷冬季	热夏冬干冷温气候、热夏常湿冷温气候 温夏冬干冷温气候、温夏常湿冷温气候
极地 Highland (E)	苔原气候(ET) 冰原气候(EF)		$T_{\text{hot}} < 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{hot}} > 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{hot}} \leq 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$	-苔原 -霜冻	极地气候带 极地苔原气候

MAP:年平均降水量 Mean annual precipitation/mm; MAT:年平均气温 Mean annual temperature/ $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{hot}}$ :最热月气温 Temperature in the hottest month/ $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{cold}}$ :最冷月气温 Temperature in the coldest month/ $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{mon10}}$ :气温高于 $10^{\circ}\text{C}$ 的月数 Number of months in which the temperature is above 10;  $P_{\text{dry}}$ :最干旱月的降水 Precipitation in the driest month/mm;  $P_{\text{sdry}}$ :夏半年(北半球 4 至 9 月)最干旱月的降水 Precipitation in the driest month in summer/mm;  $P_{\text{wdry}}$ :冬半年(北半球 10 月至次年 3 月)最干旱月的降水 Precipitation in the driest month in winter/mm;  $P_{\text{swet}}$ :夏半年最湿润月的降水 Precipitation in the wettest month in summer/mm;  $P_{\text{wwet}}$ :冬半年最湿润月的降水 Precipitation in the wettest month in winter/mm;  $P_{\text{threshold}}$ :当 70% 以上的全年降水发生在冬半年时 If 70% of the MAP occurs in winter, then  $P_{\text{threshold}} = 2 \times \text{MAT}$ ; 当 70% 以上的降水发生在夏半年 If 70% of the MAP occurs in summer, then  $P_{\text{threshold}} = 2 \times \text{MAT} + 28$ ; 其他情况 Otherwise,  $P_{\text{threshold}} = 2 \times \text{MAT} + 14$ ; NOT:非 Not; &:和 And

干旱气候,因为任何满足干旱气候标准的区域通常也符合其他气候类型的标准<sup>[24]</sup>。对数据集进行处理,得到这 70 年的月平均降水量、月平均气温、年平均降水量、年平均气温、最干月降水量、夏半年最干(湿)月降水量、冬半年最干(湿)月降水量。根据 Köppen-Geiger 气候分类法进行其分类,得出云南省相应的气候带和气候类型。

## 2.4 景观指数

景观指数是反映景观的构成和空间配置的重要指标<sup>[25]</sup>。FRAGSTATS 4.2 是常见的计算景观格局指数软件<sup>[26]</sup>。本研究,分别在景观水平和类别水平下对气候景观进行格局分析。景观水平主要选择的景观格局指数包括最大斑块指数(LPI),景观形状指数(LIS),表示聚集度的蔓延指数(CONTAG)和聚集指数(AI),以及表示多样性的 Shannon 多样性指数(SHDI)和 Simpson 多样性指数(SIDI)<sup>[27]</sup>。类别水平主要选择的景观格局指数包括最大斑块指数(LPI)、景观形状指数(LIS)和聚集指数(AI)。其具体含义见表 2<sup>[5,28]</sup>。

表 2 景观指数描述

Table 2 Description of landscape index

景观指数 Landscape index	缩写/单位 Abbreviate/Unit	计算公式 Calculation formula	指标描述 Index description
最大斑块指数 Largest patch index	LPI/%	$LPI_k = \frac{\text{Max}(a_{ijk})}{A} \times 100$ Max( $a_{ijk}$ )表示第 $k$ 年气候类型 $i$ (从 1 到 $i$ )内 $j$ 斑块的 最大面积, $A$ 是总景观面积。	LPI 是指由最大的气候斑块组成占 总气候景观的百分比,反映气候景 观中的优势斑块类型。
景观形状指数 Landscape shape index	LIS	$LSI_k = \frac{0.25e_k}{\sqrt{A}}$ $e_k$ 表示第 $k$ 年的总边长 $e$	LSI 代表气候景观边缘的总长度, 当气候景观形状变得不规则,LSI 将逐渐增加。
蔓延度指数 Contag index	CONTAG/%	$CONTAG_k = \left\{ 1 + \sum_{i=1}^I \sum_{f=1}^I [(P_{ik}) \times (g_{ijk} / \sum_{f=1}^F g_{ijk})] \times \right.$ $\left. [\ln(P_{ik}) \times (g_{ijk} / \sum_{f=1}^F g_{ijk})] / 2 \ln(I) \right\} \times 100$ $g_{ijk}$ 表示基于 $k$ 年的两次计数法的 $i$ 类和 $f$ 类气候类型之 间的邻接数, $J_i$ 代表 $i$ 区气候斑块的总数,而 $P_{ik}$ 是被 $i$ 类 的气候景观所占的比例。	CONTAG 是针对特定数量的气候 斑块类型,反映气候景观的连通和 延展程度;值越大,表明斑块间的 连通性越好。
聚集指数 Aggregation index	AI/%	$AI_k = \left[ \sum_{i=1}^I \left( \frac{g_{iik}}{\max - g_{iik}} \right) \times P_{ik} \right] \times 100$ $g_{iik}$ 表示 $k$ 年的基于单计数方法的 $i$ 类气候类型之间的 相似邻接关系的数量,max- $g_{iik}$ 是基于单一计数的 $i$ 气 候带类型之间相似邻接的最大数量。	AI 表示气候斑块的聚集程度,随着 不同斑块类型数量的增加而增加, 指数越高,说明同类元素在空间上 越聚集。
Shannon 多样性指数 Shannon's diversity index	SHDI	$SHDI_k = - \sum_{i=1}^I (P_{ik} \times \ln P_{ik})$	SHDI 随着不同斑块类别数量的增 加而增大,值越高说明斑块的类型 丰富度越高。
Simpson 多样性指数 Simpson's diversity index	SIDI	$SIDI_k = 1 - \sum_{i=1}^I P_{ik}^2$	SIDI 表示随机选择的任何两个像 元是不同气候类型类别的概率,值 越大表明均衡化程度越高。

## 3 结果与分析

### 3.1 云南省一级气候景观的时空分布

基于 Köppen-Geiger 气候分类标准,云南省包括三种气候带,即暖温气候带(C)、冷温气候带(D)和极地气候带(E),其中,以暖温气候带(C)为主导,面积占比高于 92%。1951 年至 2020 年间,三种气候带面积占比呈波动变化。空间分布上,C 气候带分布于云南省的南部和中部大部分区域;D 气候带则主要分布在云南省西北部,以迪庆藏族自治州为主,面积占比约为 5.2%左右;E 气候带分布于迪庆藏族自治州的高海拔地区,面

积占比约为 1.6%(图 2 和表 3)。

### 3.2 云南省亚型气候景观类型及空间分布

基于 Köppen-Geiger 气候分类标准,云南省亚型气候类型有 9 种,包括 Cwa、Cwb、Cfa、Cfb、Dwa、Dwb、Dfa、Dfb、ET。其中,Cwa 和 Cwb 型为云南省典型气候类型,面积占比分别约为 25%和 64%。

Cwa 主要分布于云南省南部的西双版纳傣族自治州和普洱市,年降水量在 640—1120mm 之间,年均温介于 13—19℃。Cwb 主要分布于云南省中部的大理市、楚雄彝族自治州、昆明市和曲靖市,年降水量在 570—1000mm 之间,年均温介于 13—16℃。Cfa 和 Cfb 主要分布于云南省红河哈尼彝族自治州,该区域降水丰沛,降水量约 1100mm。Dwb 主要分布在迪庆藏族自治州,年降水量在 620—980mm 之间,年均温介于 7—12℃之间。ET 分布在纬度和海拔较高的怒江傈僳族自治州区域,年均温在 4℃以下(图 3)。

### 3.3 云南省亚型气候景观时空变化分析

1951 年至 2020 年间,云南省亚类气候类型组成、面积占比与空间分布变化明显。1990 年后云南省气候类型亚型新增了 Dwa、Dfa,面积占比分别为 4.38%、1.83%。Cwa 面积占比逐渐增加,Cwb 型面积占比逐渐减少。1951 年至 2020 年间,Cwa 面积占比增加了 11%,相反,Cwb 面积占比减少了 9%。Cwa 和 Cwb 型的空间分布发生了显著变化,其空间位置逐渐向北移动(图 3 和图 4)。

从 1951 年到 2020 年,云南省部分亚类气候类型发生了转变,转变总面积约为 58000km<sup>2</sup>(面积占比 15.3%),尤其以 Cwb 型转向 Cwa 型为主。Cwb 约有 10.93%转移至 Cwa,面积约为 41000km<sup>2</sup>,该转变区域集中分布于云南省的西南部,主要在西双版纳傣族自治州和普洱市地区(图 3 和图 5)。此外,Cwb 也是主要被转向的类型,其中,面积约有 1.2%是由 Cfa、Cfb 和 Dwb 型等转移。新增的 Dwa、Dfa 面积约有 0.05%是由 Cwa 转移。Dfb、Dwa、Dwb 和 ET 气候类型的转变比例较低,但仍显示出一定的动态变化(图 5)。

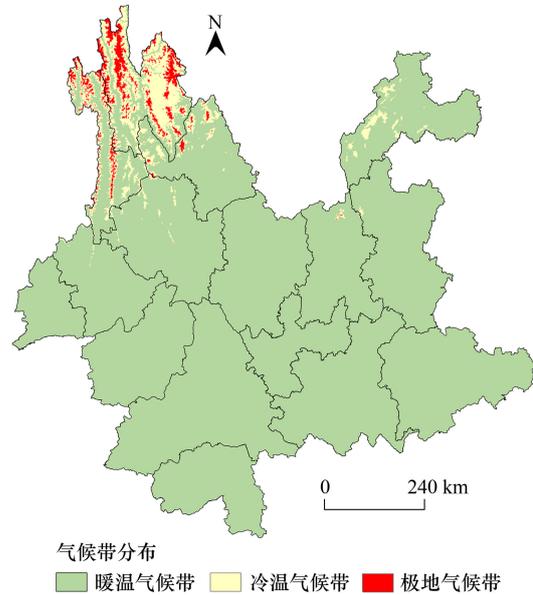


图 2 1951—1960 年云南省 Köppen-Geiger 气候带分布  
Fig.2 Distribution of Köppen-Geiger primary climate zone in Yunnan Province during 1951—1960

表 3 云南省 Köppen-Geiger 气候带面积占比/%

Table 3 Percentage of Köppen-Geiger climate zone area in Yunnan Province

气候带 Climate zones	年份 Years						
	1951—1960 年	1961—1970 年	1971—1980 年	1981—1990 年	1991—2000 年	2001—2010 年	2011—2020 年
暖温气候带 Warm climate zone(C)	92.81	92.50	92.41	92.30	92.98	93.90	92.86
冷温气候带 Cold temperate zone(D)	5.62	5.84	5.80	5.40	5.62	4.42	5.04
极地气候带 Polar climate zone(E)	1.57	1.66	1.79	1.30	1.40	1.67	2.10

### 3.4 云南省气候类型的景观格局特征变化规律

1951 年至 2020 年间,云南省气候景观发生明显变化,气候景观斑块面积减小、形状复杂化、破碎化程度加重。最大斑块面积逐渐下降,LPI 指数从 62.7%下降到 40.7%;形状逐渐复杂,LSI 指数持续上升,由 32.8 增加到 37.09;气候景观在空间分布上的连贯性和集中度减弱,CONTAG 指数在 1951 至 2000 年间表现为上升趋势。

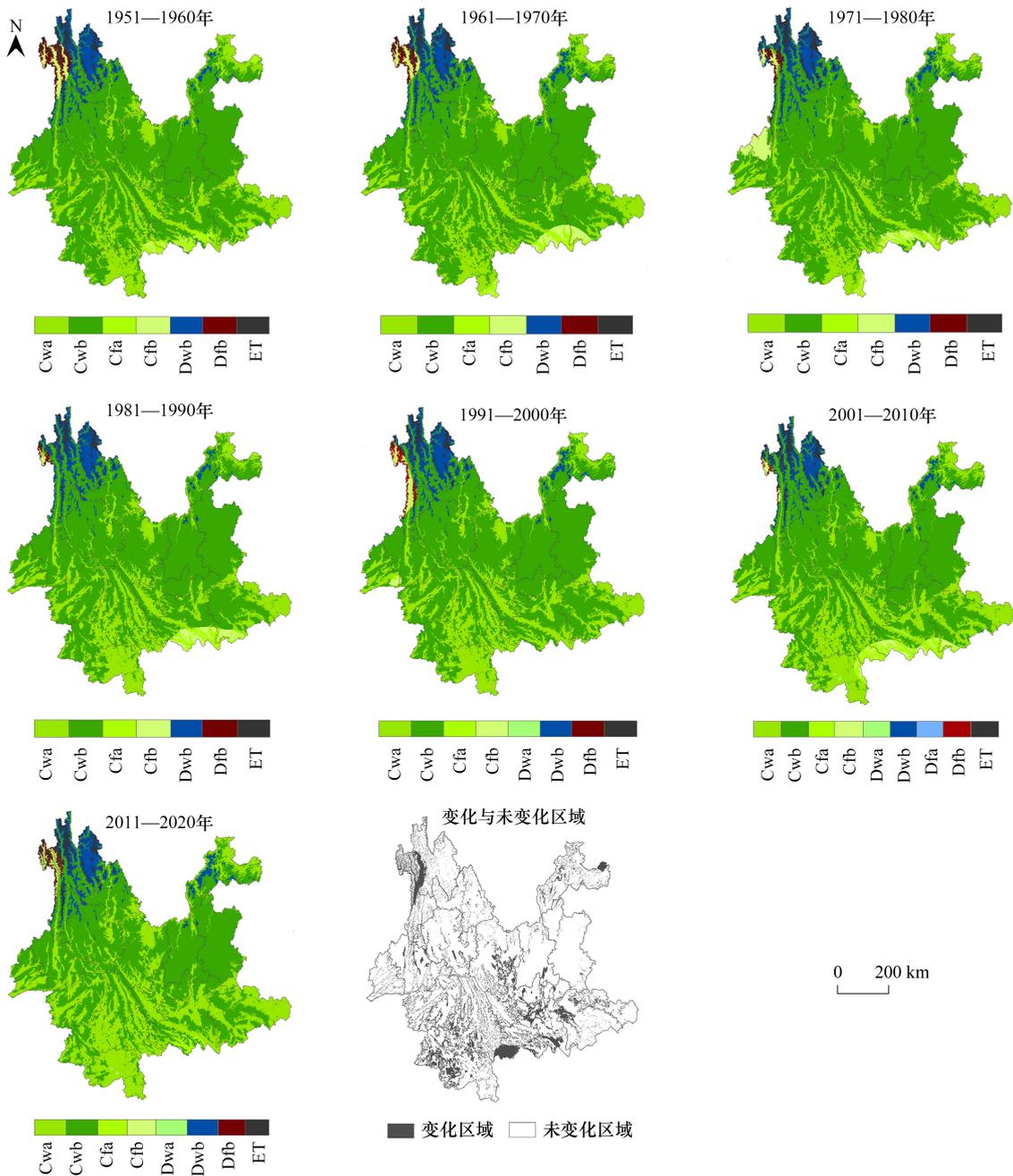


图3 1951—2020年间每十年云南省 Köppen-Geiger 亚型气候类型空间分布及变化

Fig.3 Spatial distribution and changes of climate landscape of Köppen-Geiger subtype in Yunnan Province during each decade from 1951 to 2020

Cwa: 热夏冬干暖温气候 Hot Summer Dry-Winter Warm Temperate Climate; Cwb: 温夏冬干暖温气候 Mild Summer Dry-Winter Warm Temperate Climate; Cfa: 热夏常湿暖温气候 Hot Summer Humid Warm Temperate Climate; Cfb: 温夏常湿暖温气候 Mild Summer Humid Warm Temperate Climate; Dwa: 热夏冬干冷温气候 Hot Summer Dry-Winter Cold Temperate Climate; Dwb: 温夏冬干冷温气候 Mild Summer Dry-Winter Cold Temperate Climate; Dfa: 热夏常湿冷温气候 Hot Summer Humid Cold Temperate Climate; Dfb: 温夏常湿冷温气候 Mild Summer Humid Cold Temperate Climate; ET: 极地苔原气候 Polar Tundra Climate

势,2000年后则出现下降;气候景观斑块逐渐分散和破碎,AI指数呈持续下降趋势,从90.17%下降到88.79%;气候景观类型的多样性增强,SHDI指数呈上升趋势;气候景观类型在空间上的分布趋向均衡化,SIDI指数由0.49上升至0.55(图6)。

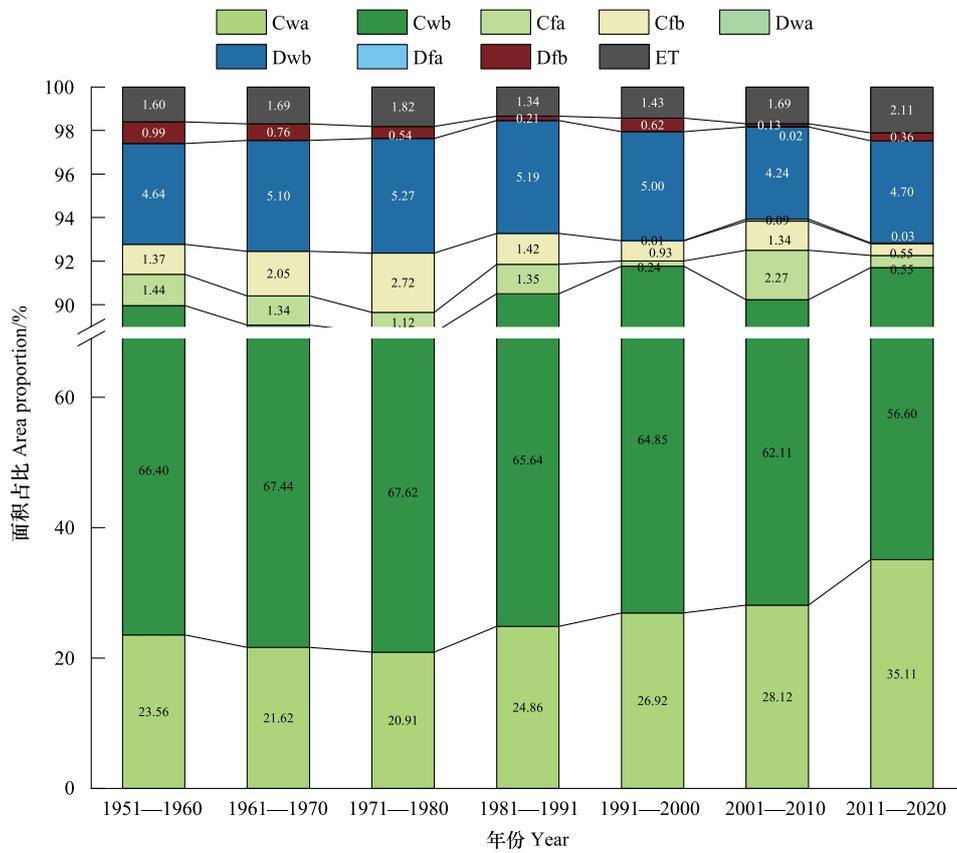


图 4 云南省 Köppen-Geiger 气候亚型面积所占比例/%

Fig.4 Proportion of Köppen-Geiger climate subtype area in Yunnan Province

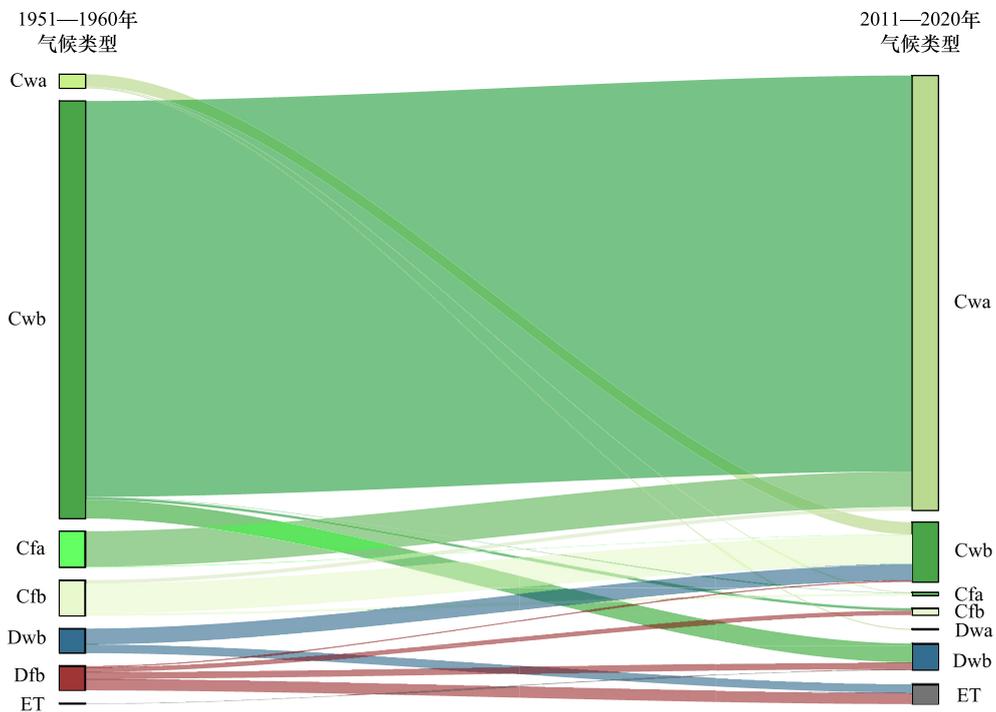


图 5 1951—2020 年气候景观类型面积转换图/%

Fig.5 Climate landscape type area conversion map from 1951 to 2020

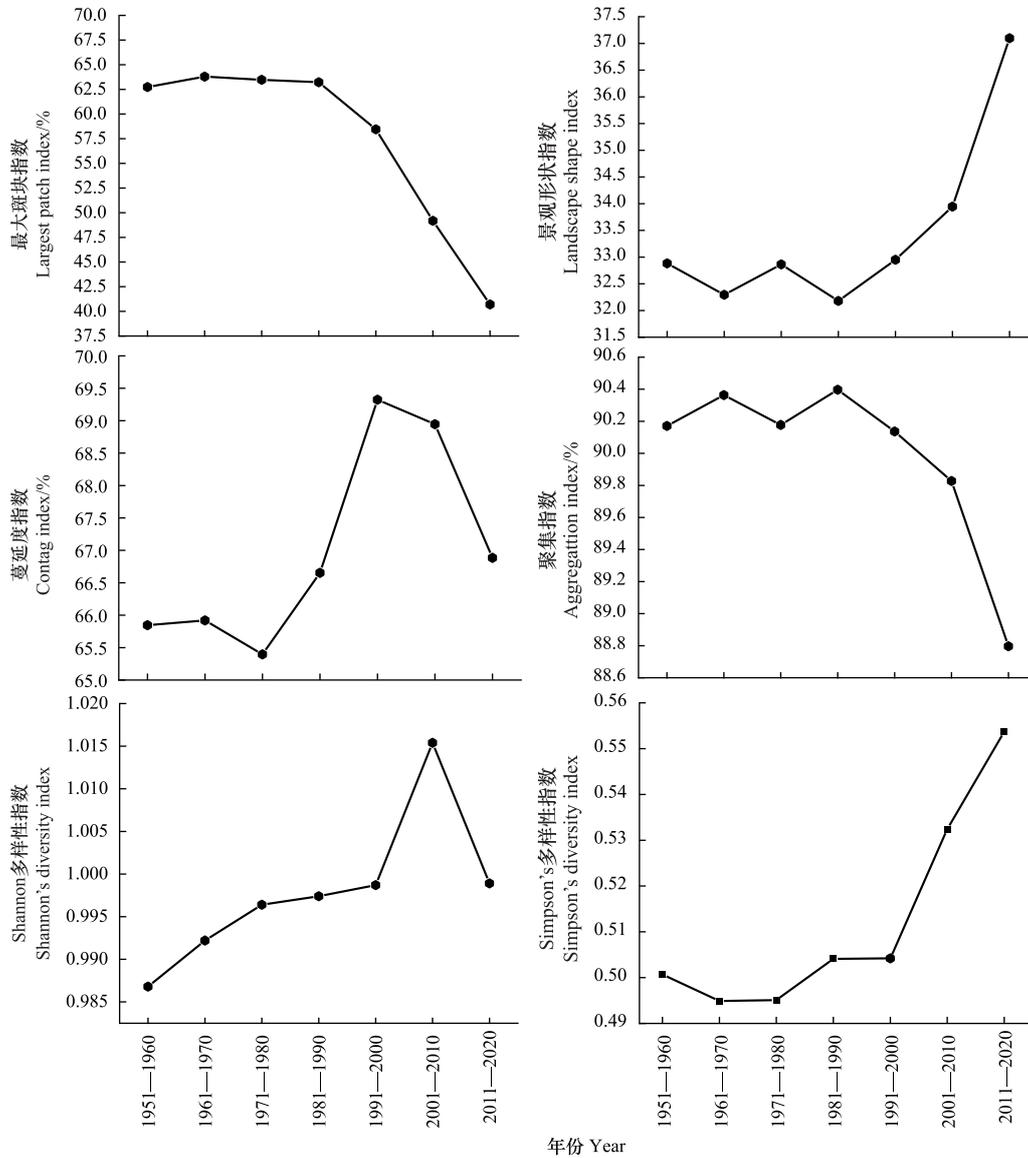


图 6 1951—2020 年气候景观格局指数变化

Fig.6 Change of climatic landscape pattern index during 1951—2020

1951 年至 2020 年,各亚类气候型景观格局特征变化存在差异。其中,Cwa 斑块面积逐渐增加,LPI 值从 6.9% 增加到 15.61%;Cwa 聚集程度提高,AI 值从 84.76% 增加至 87.93%(图 7)。Cwb 斑块面积逐渐减少,LPI 值从 62.73% 下降至 40.7%;Cwb 形状更加复杂化,LSI 值从 32.31 增加至 41.56。Cfb、Dwb、Dfb 和 ET 破碎化程度提高,其中最典型的是 Dfb,AI 值从 72.42% 减少至 42.86%。

### 4 讨论

#### 4.1 气候景观的影响因素

1951—2020 年间,云南省气候景观发生了显著变化。本研究结果显示,云南省气候亚型发生了转变,表现为夏季炎热的亚类型新增或者面积增加。这主要是因为长期气候变化背景下,区域气温、降水的变化导致了云南省气候亚类型的变化。云南省南部靠近孟加拉湾和南海,受印度季风、东亚季风及青藏高原气团的共同影响,对气候变化表现出高度敏感性和脆弱性。在 20 世纪 90 年代,云南省的气温和降水均出现明显突

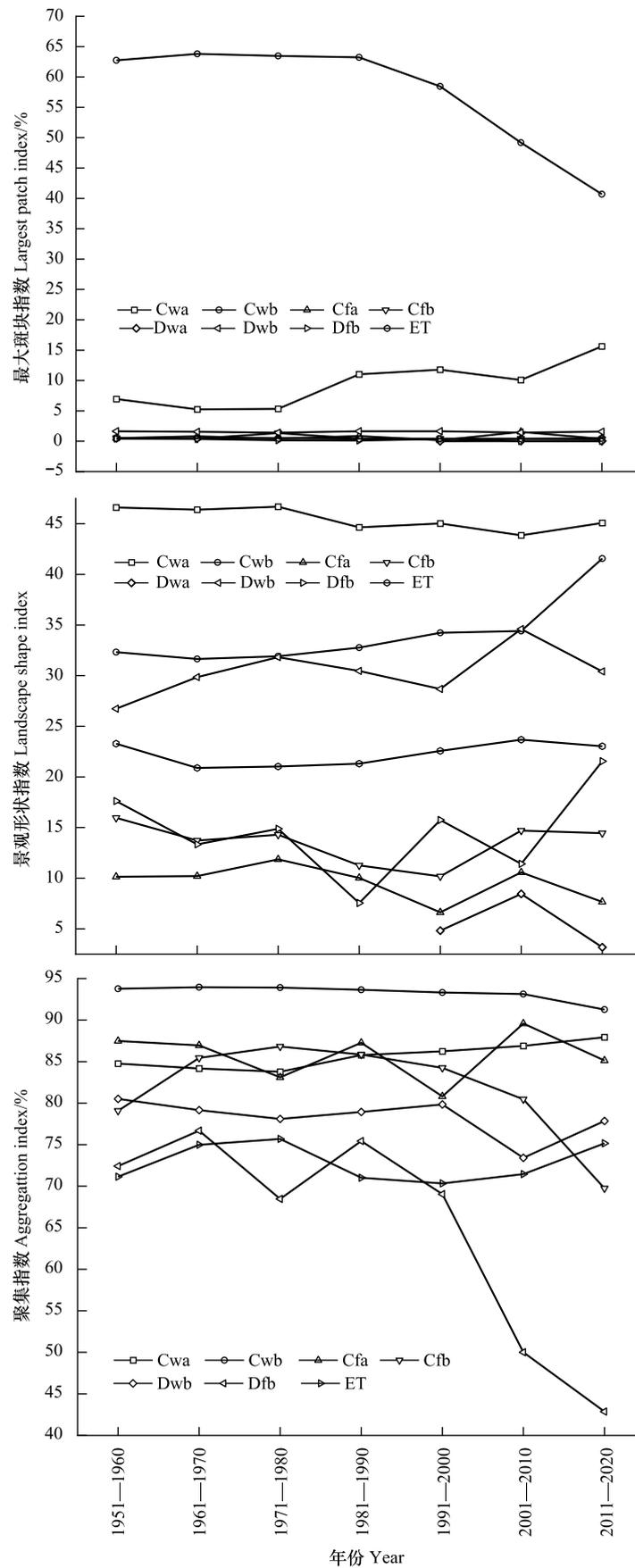


图 7 1951—2020 年气候亚型景观格局指数变化

Fig.7 Change of landscape pattern index of climate subtypes during 1951—2020

变,气温和降水均有所增加,且温度变化的幅度较降水变化更为显著<sup>[29]</sup>。气温的升高使得云南省的气候景观大部分由温夏型(Cwb)向热夏型(Cwa)转变,导致原本较冷的地区出现较为温暖的气候类型。本研究选取了Cwb转变为Cwa的现象较为突出的西双版纳傣族自治州作为典型区域,分析其气温和降水在1951—2020年间的变化,结果发现该区域气温呈不断上升趋势和降水呈波动变化趋势(图8),从而解释了该区域气候景观的变化。

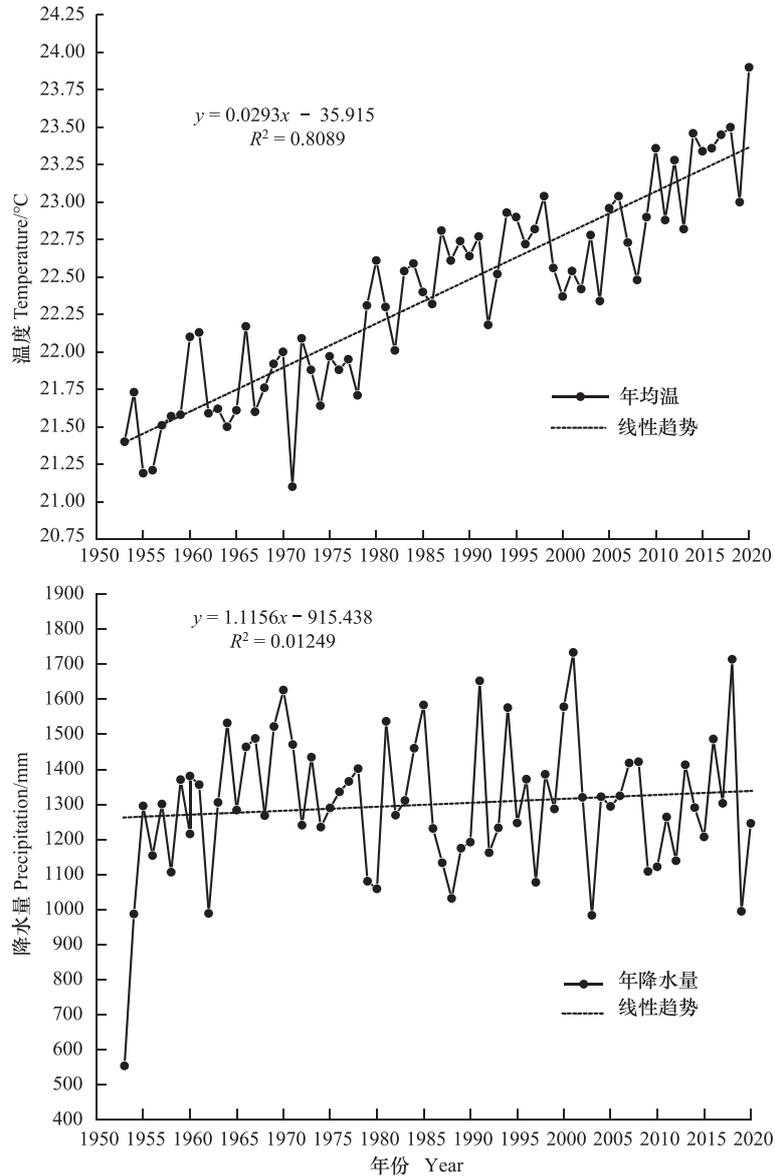


图8 西双版纳地区气温与降水量的年变化图

Fig.8 Annual Fluctuations in Temperature and Precipitation in Xishuangbanna

#### 4.2 气候景观变化的潜在应用

本研究结果显示,在气候变化背景下,云南省1951—2020年间气温、降水的显著变化导致了气候景观的动态变化,表现为热夏的亚类型面积增加,如Cwb向Cwa转移;气候景观破碎化程度明显增加,结构聚集性和功能多样性等也发生了变化,尤其明显的是Cwb亚类型。气候景观的动态变化将会影响区域范围内原有气候的稳定性,导致生活在该区域范围内或周边的物种在迁移、繁殖发生变化<sup>[30]</sup>,从而影响该区域物种的动态变化。尽管气候景观时空动态变化并不等同于物种分布的动态变化,但可反映气候变化对生态系统及生物多

样性可能造成的影响。已有研究表明,气候变化对云南省及其周边地区物种分布产生了显著影响。例如,He 等人研究发现,在气候变化背景下,云南省气候逐渐暖化,横断山脉地区的高山植物分布范围逐渐向更高海拔迁移<sup>[31]</sup>。Robert 的研究发现气候变化会引发物种分布适宜的气候景观发生变化,云南省亚热带和高山地区的物种向着更高海拔或气候条件更适宜的区域迁移<sup>[32]</sup>。此外,Lian 的研究发现随着云南省西部山区降水量的增加,云南省稀有濒危物种的分布空间逐渐向该处迁移<sup>[33]</sup>。因此,分析气候景观的时空动态变化对于解析物种分布的变化极为重要,也与目前生态地理区划理念相契合<sup>[34]</sup>,即在气候变化影响下,一些区域的物种分布范围以及相应的生态地理特征出现一定程度变化<sup>[35]</sup>,这为应对气候变化对物种分布带来的潜在影响提供科学参考<sup>[36]</sup>。

#### 4.3 研究不足

本研究存在以下不足之处:1)气候资料的质量对气候景观分类具有重要影响。尽管云南省气象站点在空间分布上覆盖了大部分区域,但部分站点仍可能受到观测设备更新、站址迁移以及城市化影响等因素的干扰。站点迁移可能导致历史数据的偏差,原有的气候特征发生变化,从而影响数据的连贯性和准确性<sup>[37-38]</sup>。另外,位于城市及其周边的气象站点,其温度数据可能受到城市化影响,从而影响气候景观分类的准确性。2)精细的观测资料对气候景观分类具有重要影响。尽管采用三维薄板样条插值方法在一定程度上弥补了气象站点分布较为稀疏区域的缺陷,但在一些偏远或地形复杂的区域,站点密度仍然较低。为进一步提高气候景观变化研究的精度,未来研究需要结合更精细的观测资料,以更好地反映气象站点稀疏地区气候景观的多样性和变化趋势。

## 5 结论

将气候变化与景观生态学进行有机结合,量化云南省气候景观的时空格局。结果得出在 1951 年至 2020 年间云南省的气候景观以暖温气候带(C)为主导,亚型气候景观发生了显著变化,其中 Cwb 型气候面积减少,Cwa 和 Dwb 型气候面积增加,且新增加了 Dwa 和 Dfa 类型,该变化受区域气温和降水变化的影响。另外,Cwb 型大部分转变为 Cwa 型,反映该区域气候呈现出变暖和湿润化的趋势。气候景观的量化结果表明云南省气候斑块变得分散和破碎,形状变得复杂,气候多样性增加,气候系统的不稳定性增强。由于物种分布受气候影响,且不同气候类型的连接或重叠会形成区域生物生境,因此需考虑气候的不稳定性对区域生物生境的潜在影响。由此,本研究结果有助于揭示气候变化对区域生态的潜在影响,为区域物种保护规划的制定和管理提供新的视角。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Lu H W, Guan Y L, He L, Adhikari H, Pellikka P, Heiskanen J, Maeda E. Patch aggregation trends of the global climate landscape under future global warming scenario. *International Journal of Climatology*, 2020, 40(5): 2674-2685.
- [ 2 ] 郑景云, 方修琦, 吴绍洪. 中国自然地理学中的气候变化研究前沿进展. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 16-27.
- [ 3 ] 朱耿睿, 李育. 基于柯本气候分类的 1961—2013 年我国气候区类型及变化. *干旱区地理*, 2015, 38(6): 1121-1132.
- [ 4 ] Pecl G T, Araújo M B, Bell J D, Blanchard J, Bonebrake T C, Chen I C, Clark T D, Colwell R K, Danielsen F, Evengård B, Falconi L, Ferrier S, Frusher S, Garcia R A, Griffis R B, Hobday A J, Janion-Scheepers C, Jarzyna M A, Jennings S, Lenoir J, Linnetved H I, Martin V Y, McCormack P C, McDonald J, Mitchell N J, Mustonen T, Pandolfi J M, Pettoelli N, Popova E, Robinson S A, Scheffers B R, Shaw J D, Sorte C J B, Strugnell J M, Sunday J M, Tuanmu M N, Vergés A, Villanueva C, Wernberg T, Wapstra E, Williams S E. Biodiversity redistribution under climate change: impacts on ecosystems and human well-being. *Science*, 2017, 355(6332): eaai9214.
- [ 5 ] Guan Y L, Liu J G, Wang K, Cao W F, Jiang Y L, Lu H W, Heiskanen J. From a spatial structure perspective: spatial-temporal variation of climate redistribution of China based on the Köppen-geiger classification. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(15): e2022GL099319.
- [ 6 ] Mucina L. Biome: evolution of a crucial ecological and biogeographical concept. *New Phytologist*, 2019, 222(1): 97-114.
- [ 7 ] Peel M C, Finlayson B L, McMahon T A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, 11(5): 1633-1644.
- [ 8 ] Lasantha V, Oki T, Tokuda D. Data-Driven versus Köppen-Geiger Systems of Climate Classification. *Advances in Meteorology*, 2022, 2022(1): 3581299..

- [ 9 ] de S Junior A, de Carvalho L G, da Silva F F, de Carvalho Alves M. Application of the Köppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 2012, 108(1): 1-7.
- [ 10 ] Beck H E, Zimmermann N E, McVicar T R, Vergopolan N, Berg A, Wood E F. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 2018, 5: 180214.
- [ 11 ] Rohli R V, Joyner T A, Reynolds S J, Ballinger T J. Overlap of global Köppen-Geiger climates, biomes, and soil orders. *Physical Geography*, 2015, 36(2): 158-175.
- [ 12 ] Rohli R V, Andrew Joyner T, Reynolds S J, Shaw C, Vázquez J R. Globally Extended Köppen-Geiger climate classification and temporal shifts in terrestrial climatic types. *Physical Geography*, 2015, 36(2): 142-157.
- [ 13 ] 陈利顶, 李秀珍, 傅伯杰, 肖笃宁, 赵文武. 中国景观生态学发展历程与未来研究重点. *生态学报*, 2014, 34(12): 3129-3141.
- [ 14 ] 傅伯杰. 地理学综合研究的途径与方法: 格局与过程耦合. *地理学报*, 2014, 69(8): 1052-1059.
- [ 15 ] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 王仰麟. 景观生态学原理及应用. 2 版. 北京: 科学出版社, 2011.
- [ 16 ] Dungan J L, Perry J N, Dale M R T, Legendre P, Citron-Pousty S, Fortin M J, Jakomulska A, Miriti M, Rosenberg M S. A balanced view of scale in spatial statistical analysis. *Ecography*, 2002, 25(5): 626-640.
- [ 17 ] Guan Y L, Lu H W, Jiang Y L, Tian P P, Qiu L H, Pellikka P, Heiskanen J. Changes in global climate heterogeneity under the 21st century global warming. *Ecological Indicators*, 2021, 130: 108075.
- [ 18 ] Maeda E E, Nunes M H, Calders K, de Moura Y M, Raunonen P, Tuomisto H, Verley P, Vincent G, Zuquim G, Camargo J L. Shifts in structural diversity of Amazonian forest edges detected using terrestrial laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 271: 112895.
- [ 19 ] Senf C, Seidl R. Natural disturbances are spatially diverse but temporally synchronized across temperate forest landscapes in Europe. *Global Change Biology*, 2018, 24(3): 1201-1211.
- [ 20 ] 张永永, 税伟, 孙晓瑞, 孙祥. 云南省植被水分利用效率时空变化及影响因素. *生态学报*, 2022, 42(6): 2405-2417.
- [ 21 ] 任芝花, 余予, 邹凤玲, 许艳. 部分地面要素历史基础气象资料质量检测. *应用气象学报*, 2012, 23(6): 739-747.
- [ 22 ] 杜国明. 基于地形要素的三维薄板样条插值方法研究——以广东省降水量空间分布为例. *灌溉排水学报*, 2016, 35(1): 74-78.
- [ 23 ] Beck H E, McVicar T R, Vergopolan N, Berg A, Lutsko N J, Dufour A, Zeng Z, Jiang X, Van Dijk A I J M, Miralles D G. High-resolution (1 km) Köppen-Geiger maps for 1901—2099 based on constrained CMIP6 projections. *Scientific data*, 2023, 10(1): 724.
- [ 24 ] Guan Y L, Lu H W, He L, Adhikari H, Pellikka P, Maeda E, Heiskanen J. Intensification of the dispersion of the global climatic landscape and its potential as a new climate change indicator. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(11): 114032.
- [ 25 ] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级. 高等教育出版社, 2007.
- [ 26 ] Kupfer J A. Landscape ecology and biogeography: Rethinking landscape metrics in a post-FRAGSTATS landscape. *Progress in physical geography*, 2012, 36(3): 400-420.
- [ 27 ] Szilassi P, Bata T, Szab S, Czc B, Molnár Z, Mezsi G. The link between landscape pattern and vegetation naturalness on a regional scale. *Ecological Indicators*, 2017, 81: 252-259.
- [ 28 ] 李秀珍, 布仁仓, 常禹, 胡远满, 问青春, 王绪高, 徐崇刚, 李月辉, 贺红仕. 景观格局指标对不同景观格局的反应. *生态学报*, 2004, 24(1): 123-134.
- [ 29 ] Xu Z X, Yang X J, Zuo D P, Chu Q, Liu W F. Spatiotemporal characteristics of extreme precipitation and temperature: a case study in Yunnan Province, China. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2015, 369: 121-127.
- [ 30 ] Pearson R G. Climate change and the migration capacity of species. *Trends in Ecology & Evolution*, 2006, 21(3): 111-113.
- [ 31 ] He Y L, Xiong Q L, Yu L, Yan W B, Qu X X. Impact of climate change on potential distribution patterns of alpine vegetation in the Hengduan mountains region, China. *Mountain Research and Development*, 2020, 40(3): R48-R54.
- [ 32 ] Zomer R J, Xu J C, Wang M C, Trabucco A, Li Z Q. Projected impact of climate change on the effectiveness of the existing protected area network for biodiversity conservation within Yunnan Province, China. *Biological Conservation*, 2015, 184: 335-345.
- [ 33 ] Lian Y W, Bai Y, Huang Z D, Ali M, Wang J, Chen H R. Spatio-temporal changes and habitats of rare and endangered species in Yunnan province based on MaxEnt model. *Land*, 2024, 13(2): 240.
- [ 34 ] 王芳, 李炳元, 田思雨, 郑度, 葛全胜. 中国生态地理区划更新和优化. *地理学报*, 2024, 79(1): 3-16.
- [ 35 ] Fine P V A. Ecological and evolutionary drivers of geographic variation in species diversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2015, 46(1): 369-392.
- [ 36 ] Garcia R A, Cabeza M, Rahbek C, Araújo M B. Multiple dimensions of climate change and their implications for biodiversity. *Science*, 2014, 344(6183): 1247579.
- [ 37 ] Yang Y J, Wu B W, Shi C E, Zhang J H, Li Y B, Tang W A, Wen H Y, Zhang H Q, Shi T. Impacts of urbanization and station-relocation on surface air temperature series in Anhui Province, China. *Pure and Applied Geophysics*, 2013, 170(11): 1969-1983.
- [ 38 ] Knerr I, Dienst M, Lindn J, Dobrovoln P, Geletic J, Bntgen U, Esper J. Addressing the relocation bias in a long temperature record by means of land cover assessment. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 137(3): 2853-2863.