

气候变化背景下成都都市圈蓝绿空间格局演变特征及机制

Evolution Characteristics and Mechanisms of Blue-Green Space Patterns in the Chengdu Metropolitan Area Under the Context of Climate Change

王倩娜 廖奕晴 贺思敏 赵雲竹 何瑞 沈一*
WANG Qianna LIAO Yiqing HE Simin ZHAO Yunzhu HE Rui SHEN Yi*

(四川大学建筑与环境学院, 成都 610065)
(College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu, Sichuan, China, 610065)

文章编号: 1000-0283(2025)01-0004-10
DOI: 10.12193/j.laing.2025.01.0004.001
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2024-02-21
修回日期: 2024-05-06

摘要

在气候变化加剧的背景下, 探明气候因素对蓝绿空间格局演变的驱动机制, 对实现可持续发展具有重要意义。利用 1980 年、2000 年、2020 年三期土地利用数据和 1980–2020 年气候数据, 基于气候倾向率、动态变化模型、马尔科夫转移矩阵、景观格局指数等方法, 借助 ArcGIS 和 FRAGSTATS 软件, 分析成都都市圈蓝绿空间气候因素及景观格局的时空演变特征, 并通过灰色关联度法探讨气候因素对景观格局变化的驱动机制。结果表明: (1) 1980–2020 年成都都市圈年均气温、降水量和潜在蒸散量均与时间呈正相关, 仅年均日照时数与时间呈负相关; 空间分布上, 降水量趋于均匀分布, 其余气候因素在山脉和城镇区域的差异化加剧; (2) 成都都市圈蓝绿空间面积在 1980–2000 年减少 22.74 km², 在 2000–2020 年增加 62.45 km², 蓝绿空间破碎化加剧, 斑块边缘复杂度加重, 景观类型增加且分布愈加均匀; (3) 气候因子与蓝绿空间景观格局指数关联度均值由大到小依次为年均潜在蒸散量 (0.78)、年均日照时数 (0.76)、年均降水量 (0.74)、年均气温 (0.72), 表明气候因素变化对蓝绿空间景观格局演变具有较强的驱动作用。研究结果可为成都都市圈蓝绿空间规划和管理、气候适应型格局构建提供科学依据和参考。后续拟纳入自然地理、社会经济等因素进行驱动机制的对比分析, 并进一步围绕气候适应型景观格局构建、气候变化风险评估、多尺度气候适应型响应等方面进行探索。

关键词

气候变化; 景观格局演变; 驱动机制; 成都都市圈; 蓝绿空间

Abstract

In the context of intensified climate change, exploring the driving mechanism of climate factors on the evolution of blue-green spatial patterns is significant for achieving sustainable development. This study uses three periods of land use data from 1980, 2000, and 2020 and climate data from 1980 to 2020. Based on methods such as climate tendency rate, dynamic change model, Markov transition matrix, and landscape pattern index. Using ArcGIS and FRAGSTATS software, the spatiotemporal evolution characteristics of climate factors and landscape patterns in the blue-green space of the Chengdu metropolitan area are analyzed, and the driving mechanism of climate factors on landscape pattern changes is explored through the grey correlation method. The results show that: (1) From 1980 to 2020, the average annual temperature, precipitation, and potential evapotranspiration in the Chengdu metropolitan area were positively correlated with time, with only a negative correlation between the average annual sunshine hours and time. In terms of spatial distribution, the evolution of four meteorological factors mainly occurred in mountainous and urban areas. (2) The blue-green space area in the Chengdu metropolitan area decreased by 22.74 km² from 1980 to 2000 and increased by 62.45 km² from 2000 to 2020. The fragmentation of blue-green space intensified, the complexity of patch edges increased, the landscape types increased, and the distribution became more uniform. (3) The average correlation between climate factors and the blue-green spatial landscape pattern index, in descending order, was annual potential evapo-

王倩娜

1986年生/女/重庆人/博士/副教授/研究方向为生态空间规划、绿色基础设施、新能源景观

廖奕晴

1999年生/女/四川成都人/硕士/研究方向为城市热环境、蓝绿基础设施

沈一

1964年生/女/江苏南京人/教授/研究方向为风景园林规划设计

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: 925344448@qq.com

基金项目:
国家自然科学基金面上项目“气候适应型成渝地区景观格局构建与规划设计响应”(编号: 32371942)

transpiration (0.78), annual sunshine hours (0.76), annual precipitation (0.74), and annual temperature (0.72), indicating that climate factor changes had a strong driving effect on the evolution of blue-green spatial landscape patterns. The research results can provide a scientific basis and reference for planning and managing blue-green space in the Chengdu metropolitan area and constructing a climate adaptive pattern. Subsequently, it is intended to include factors such as natural geography and socio-economic factors for comparative analysis of driving mechanisms. It will also explore areas such as climate adaptive landscape pattern construction, climate change risk assessment, and multi-scale climate adaptive response.

Keywords

climate change; landscape pattern evolution; driving mechanism; Chengdu metropolitan area; blue-green space

都市圈是从经济角度对大都市地域空间进行组织的新模式，由一个或多个核心城市构成^[1]。成都都市圈是中国中西部首个都市圈规划^[2]，是长江上游重要的生态屏障区和经济中心，具有“在优化提升生态功能的同时，为成渝双城经济圈建设提供有力支撑”^[3]的发展要求。目前，对成都都市圈的研究主要集中于经济^[4]、空间结构^[5]、交通^[6]等方面，生态^[7]及气候变化视角下的研究较少。

随着全球气候变化，世界范围内气温不断升高，极端天气事件增多，城市热岛效应增强、气候季节性模式改变。气候变化使生物多样性和生态系统的稳定性受到了负面影响，也对人类社会的经济发展与生活质量构成了威胁，应对气候变化已成为全人类共同的挑战。近年来，成都都市圈工业化、城镇化进程不断加快，经济不断发展，但区域内气象灾害频发，自然生态系统受到的影响日趋严重。而蓝绿空间是构建可持续、有弹性、适应性强的城市生态系统的关键^[8]，指国土空间中各类水域、湿地、绿地等开敞空间所组成的空间系统，对城市生物多样性的提升^[9]、空气质量的改善^[10]、城市气候的调节、热岛效应的缓解^[11]等方面产生积极影响。探究区域蓝绿空间景观格局演变特征及机制，对改善区域生态环境、维持生物多样性、推动可持续发展具有积极意义。近年来，城

市蓝绿空间已成为国内外的研究热点，许浩等^[12]基于景观动态度、景观转移矩阵法和景观指数法对苏锡常都市圈的蓝绿空间规模和景观格局进行动态分析；崔洁等^[13]利用景观格局指数及土地转移矩阵研究了徐州城乡绿地生态网络演变及其异质性；Voskamp等^[14]研究并提出了一套利用蓝绿空间提升城市气候适应性的措施框架；Gunawardena等^[11]利用元分析方法研究了蓝绿空间对城市的降温效益。但目前相关研究多以蓝绿空间演变过程的分析为主，对其景观格局变化的驱动机制研究不足，在蓝绿空间与气候的关系方面，也仅限于蓝绿空间的降温效应，极少考虑其余气候因素对其格局演变的影响。

鉴于此，本文选取成都都市圈作为研究对象，分析1980年、2000年、2020年成都都市圈内气候变化、蓝绿空间的规模与景观格局变化，并探索两者之间的关系，提出保护策略，以期在成都都市圈规划和管理、气候适应型格局构建提供科学依据，亦可为其他都市圈提供参考和样本。

1 研究区概况

成都都市圈(102° 49' — 105° 27' E, 29° 15' — 31° 42' N)包括成都、德阳、眉山、资阳4市全域，共17区、18县(市)，总面积3.31万km²^[23]，是四川省经济核心区和带

动西部经济社会发展的重要增长极。研究区属于亚热带季风性湿润气候，热量充足，雨量丰富，四季分明，雨热同期。域内地势西高东低，山体众多，河网纵横，耕地面积广阔，自然资源丰富，生态本底良好(图1)。20世纪80年代，是成都平原平均气温最低的10年^[15]，但随着社会经济的发展，成都市平均气温快速上升，在2000年达到了有气象记录以来的气温极高值^[16]，高温限电长达半月。2020年，《成德眉资同城化发展暨成都都市圈建设三年行动计划(2020—2022年)》发布，为成都都市圈未来发展提供了行动指南，截至2020年，成都都市圈地区生产总值(GDP) 2.23万亿元，常住人口2 966.31万人^[17]。伴随经济的迅速发展，气候变暖、极端天气事件频发，导致人类健康、生态系统和社会经济均受到严重威胁。鉴于此，研究1980—2020年气候变化背景下成都都市圈蓝绿空间景观格局演变对构建气候适应型都市圈具有重要意义。

2 研究方法

2.1 数据来源及预处理

研究使用的基础数据包括：行政边界矢量数据、数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据、土地利用栅格数据；气象数据方面结合张歆越等^[18]的研究及2014年气候变

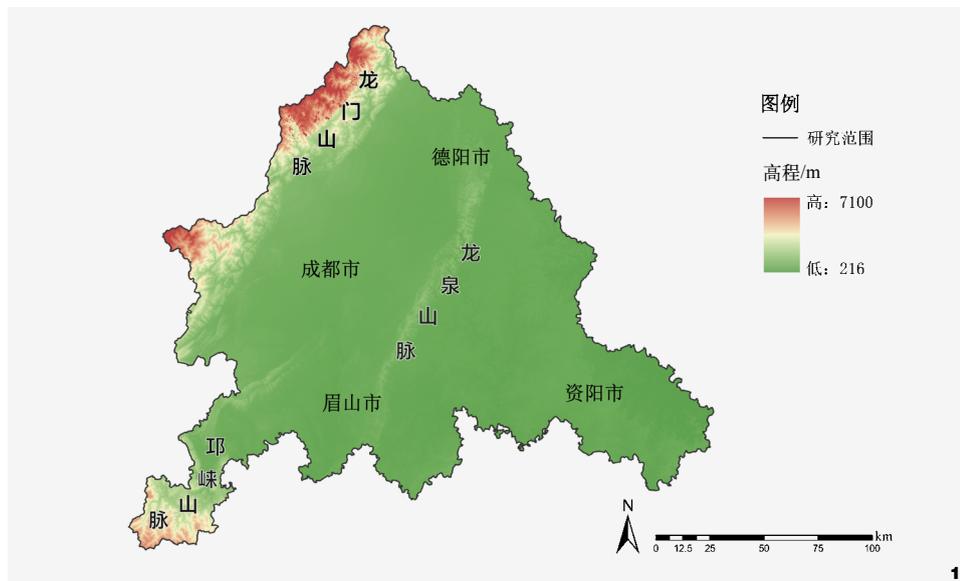


图1 成都都市圈高程
Fig. 1 Elevation of Chengdu metropolitan area

化第5次评估报告^[9], 选择了对蓝绿空间格局影响较大的4个气候因素作为本次研究对象, 包括: 年均气温、年均降水量、逐月潜在蒸散量、年累计日照时数, 数据来源见表1。

利用ArcGIS10.8软件将1980年、2000年、2020年三期土地利用数据重分类为绿色空间、蓝色空间和非蓝绿空间三大类, 其中绿色空间包括林地、草地, 蓝色空间为水体, 非蓝绿空间主要指耕地、建设用地和未利用

土地^[14]。年均日照时数由年累计日照时数数据在Excel软件中计算所得, 年均潜在蒸散量数据由逐月数据在ArcGIS10.8软件中通过像元统计所得。

2.2 气候因素时间序列趋势分析

2.2.1 气候倾向率

采用线性回归方法建立气候因素与时间的一元线性回归方程^[20], 见公式(1)。

$$y_i = a + bt_i \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中, y_i 为气象要素, t_i 为时间, b 为回归系数, a 为回归常数。线性回归方程系数 b 用来描述气象要素的变化趋势, 若 $b > 0$, 表示气候因素随时间递增, 若 $b < 0$, 表示气候因素随时间递减, 并以线性回归系数 b 的10倍作为气候倾向率, 气候倾向率的绝对值越大其趋势越明显。

a 和 b 可以用最小二乘法进行计算, 见公式(2)和(3)。

$$a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - b \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (2)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i t_i - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i) (\sum_{i=1}^n t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n t_i)^2} \quad (3)$$

2.2.2 线性相关系数

为了解气象因素的长期趋势变化, 采用计算气候因素与时间之间的相关系数 r (趋势系数), 来检验气候因素在时间序列波动情况的显著性^[21], 见公式(4)。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(t_i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}} \quad (4)$$

表1 数据类型及来源
Tab. 1 Data types and sources

数据类型 Data type	数据名称 Data name	年份 Year	数据来源 Data source	单位 Unit	分辨率 Resolution ratio
基础数据	行政边界	2020	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn/)		矢量数据
	DEM数据	2020	地理空间数据云 (https://www.gscloud.cn/)	m	30 m
	土地利用	1980、2000、2020	中国科学院资源环境科学数据中心 (https://www.resdc.cn/)	—	30 m
气象数据	年均气温	1980–2020	国家青藏高原数据中心 (https://data.tpdc.ac.cn/)	—	—
	年均降水量			—	—
	逐月潜在蒸散量			—	—
	年累计日照时数			—	—
			地球资源数据云 (http://www.gis5g.com)	h/a	

r 的取值范围是 $[-1, 1]$, 当 $r > 0$ 时, 气候因素的变化与时间序列呈正相关; 当 $r < 0$ 时, 气候因素的变化与时间序列呈负相关; 且当 $|r|$ 越接近1, 则气候因素变化与时间序列关系越大, 波动越显著。

2.3 景观格局演变分析

2.3.1 动态变化模型

本研究利用动态变化幅度模型^[13], 分析研究区1980年、2000年、2020年蓝绿空间的变化幅度, 见公式(5)。

$$F = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (5)$$

式中, F 为蓝绿空间的变化幅度, U_a 和 U_b 分别表示研究初期和末期蓝绿空间的面积, T 为研究时段。

2.3.2 马尔科夫转移矩阵

马尔科夫转移矩阵能够分析研究区的土地利用变化特征和转移方向, 反映土地利用类型的转移趋势^[22]。本研究利用马尔科夫转移矩阵法, 对研究区蓝绿空间与非蓝绿空间之间的转化情况进行分析, 见公式(6)。

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, n 表示研究区土地利用类型总数; i 和 j 分别表示转移前后的土地利用类型; S_{ij} 表示研究时段内 i 类土地类型转为 j 类土地类型的面积。

2.3.3 景观格局指数

景观格局指数高度浓缩了格局信息, 通过对比不同年份间景观格局指数的变化, 可以定量描述景观格局的演变规律^[23]。为能够全面、准确掌握景观格局的总体变化特

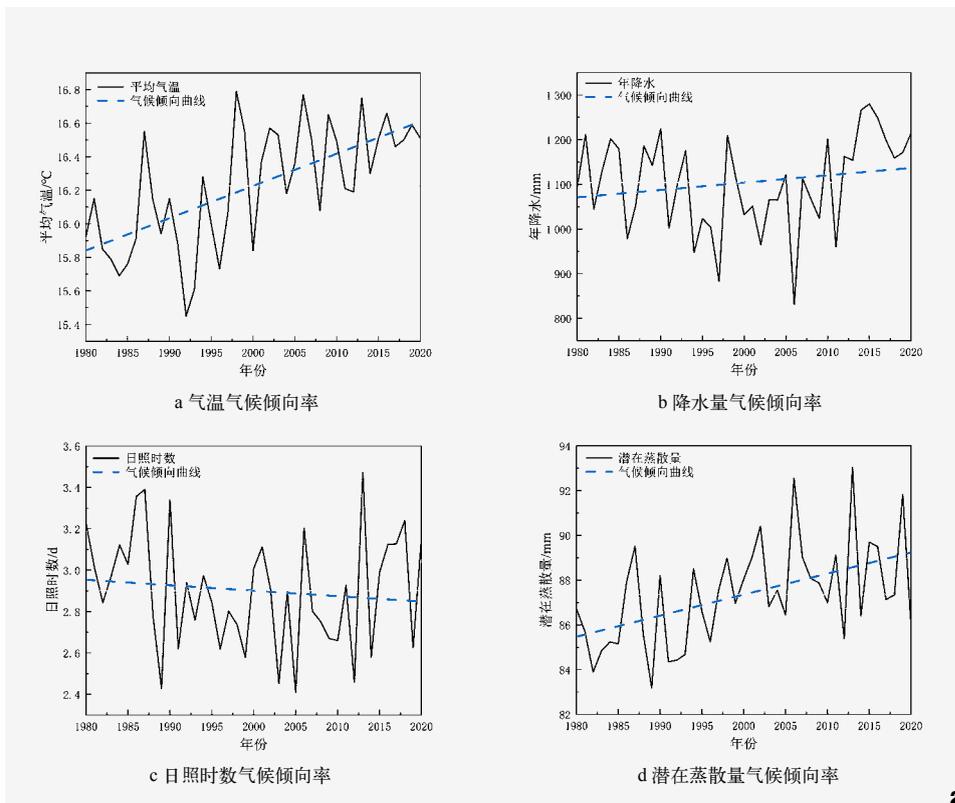


图2 1980–2020年研究区气候因素时间序列变化趋势
Fig. 2 Time series trends of climate factors in the study area from 1980 to 2020

征, 结合曾琬莹等^[24-26]的既往研究, 基于Fragstats软件选取并计算了斑块数量(NP)、斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、景观分离度(DIVISION)、边缘密度(ED)、形状指数(LSI)、蔓延度(CONTAG)、周长—面积分形维数(PAFRAC)、香农多样性指数(SHDI)、香农均匀度指数(SHEI) 10个指数, 从景观破碎化程度、形状、多样性特征的角度探究蓝绿空间景观格局演变特征。

2.4 灰色关联度分析

灰色关联法是通过事物之间变化态势的相似和差异程度来计算事物之间的关联程度(灰色关联度)^[27]。本研究将气候驱动因子(分辨率为1 km)作为参考序列, 景观格局指数(分辨率为30 m)作为比较序列, 首先采用初值法对原始数据进行无量纲化处理, 再在SPSS软件中利用灰色关联法计算气候因素驱动因子与景观格局指数间的关联度。通过参考序列去映射系统状况, 用灰色关联系数来表示参考指标和比较指标之间的关系, 关联系数越高, 表示比较指标对参考指标的影响越大, 反之越小, 见公式(7)。

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |y(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |y(k) - x_i(k)|}{|y(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |y(k) - x_i(k)|} \quad (7)$$

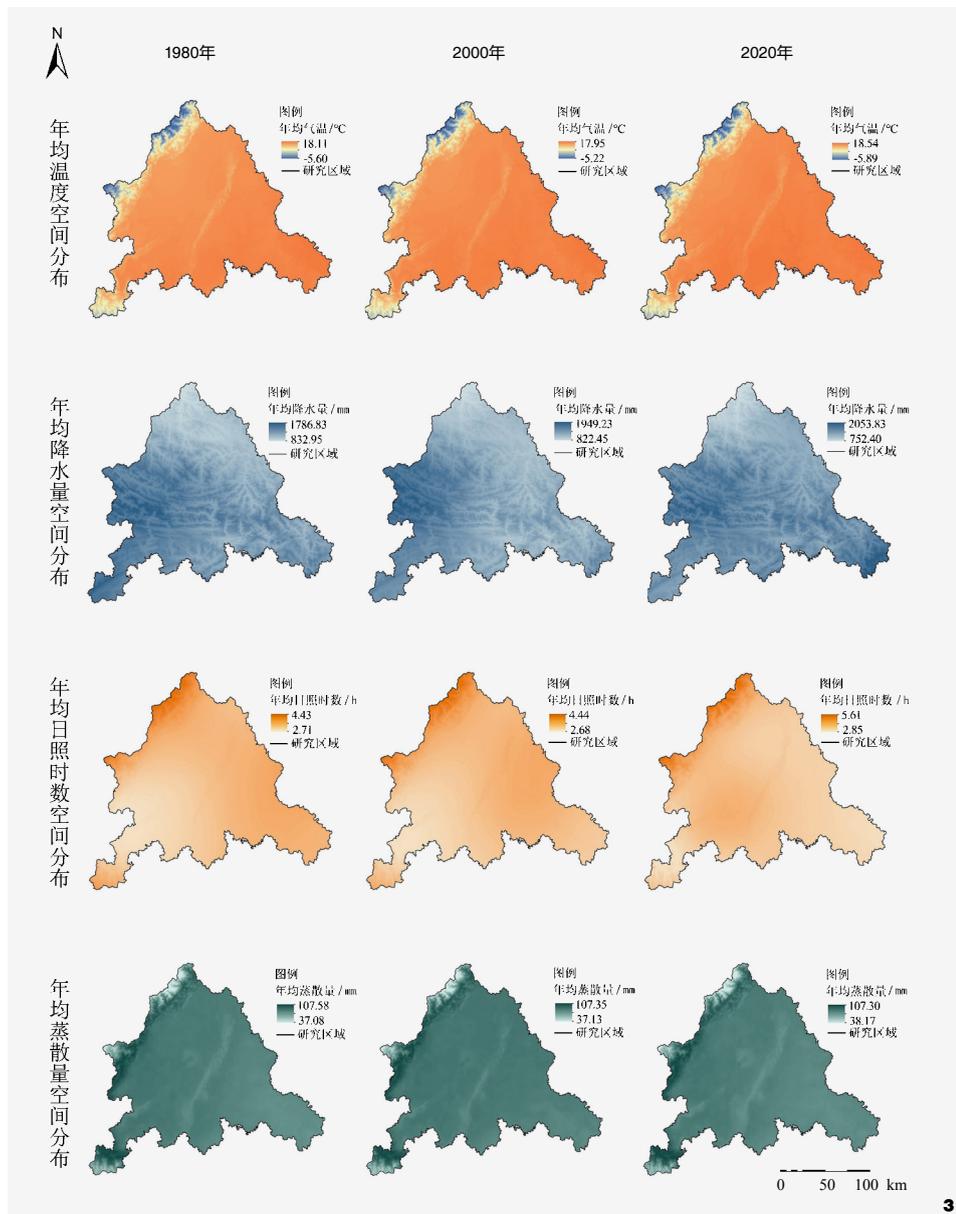


图3 1980-2020年研究区气候因素空间分布格局
Fig. 3 Spatial distribution patterns of climate factors in the study area from 1980 to 2020

表2 1980-2020年研究区气候因素变化的气候倾向率及线性相关系数
Tab. 2 Climate tendencies and linear correlation coefficients of climate factor changes in the study area from 1980 to 2020

	年均气温 Annual average temperature	年均降水量 Annual average precipitation	年均日照时数 Annual average sunshine hours	年均潜在蒸散量 Annual potential evapotranspiration
气候倾向率 / (10a)	0.19°C	16.48 mm	-0.02 d	0.94 mm
线性相关系数 / %	3.60	0.41	-4.86	1.16

式中, ρ 为分辨系数, 取值为0.5; $|y(k) - x_i(k)|$ 为比较指标和参考指标在时间序列上(1980年、2000年、2020年)差值的绝对值, $\min, \min_k |y(k) - x_i(k)|$ 和 $\max, \max_k |y(k) - x_i(k)|$ 分别表示差值绝对值的最小值和最大值。

3 结果分析

3.1 成都市都市圈气候变化特征

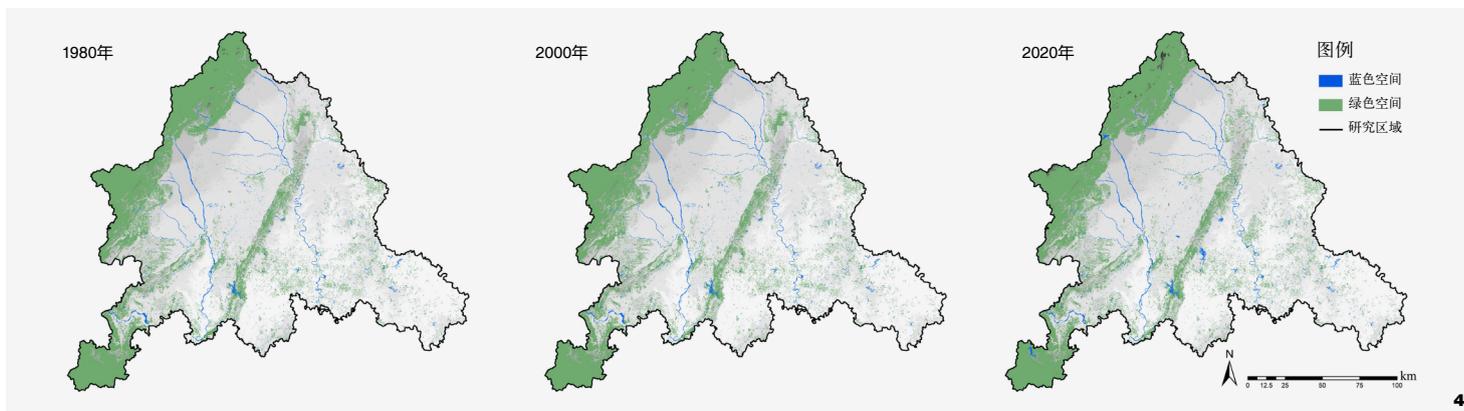
3.1.1 气候因素时序变化特征

1980-2020年, 成都市都市圈气候因素随时间序列变化的趋势(图2)可以看出, 年均气温、降水量和潜在蒸散量都与时间序列呈正相关, 年均日照时数与时间序列呈负相关。

气候倾向率及线性相关系数(表2)表明, 年均气温的气候倾向率为 $0.19^\circ\text{C} / (10\text{a})$ (即平均每10年升温 0.19°C), 线性相关系数为3.60%, 升温趋势较为明显, 从图2-a中可以看出, 1980-2000年间气温呈波动上升趋势, 2000年之后升温加剧。年均降雨量的气候倾向率为 $16.48 \text{ mm} / (10\text{a})$, 线性相关系数为0.41%, 从图2-b可以看出整体增多趋势并不明显, 但在2010年之后降水量显著增加。年均日照时数的气候倾向率为 $-0.02 \text{ d} / (10\text{a})$, 线性相关系数为-4.86%, 减少趋势较为明显, 从图2-c中可以看出1990-2010年期间日照时数明显减少。年均潜在蒸散量的气候倾向率为 $0.94 \text{ mm} / (10\text{a})$, 线性相关系数为1.16%, 有一定增加趋势, 从图2-d中可以看出, 从1980-2000年潜在蒸散量逐步增加, 且在2000年之后加剧增加。整体来看, 气候因素时序变化具有研究期后20年比前20年变化更加明显的特点。

3.1.2 气候因素空间分布格局

从成都市都市圈1980年、2000年、2020年年均气温、降水量、日照时数及蒸散量分布



情况(图3)可以看出,气温较低区域主要集中在西部,向城镇区域过渡气温逐渐升高,整体而言40年间的平均气温呈上升趋势;降水量南部高于北部、西部高于东部,且整体呈上升趋势,2020年降水量分布更加均匀,且东南部的降水量明显增多;日照时数较多的区域一直集中在西北部,逐步向城镇区域降低,但是城镇中日照时数较多的区域逐步从东南部转移到西南部;蒸散量较低的区域主要集中在西部,城镇中蒸散量分布较为均匀,但是在山区与城镇交界处蒸散量明显增多。总体来看,成都都市圈内降水量的空间分布趋于均匀,其余气候因素在山区和城镇区域的差异化加剧。

3.2 成都都市圈蓝绿空间景观格局演变特征

3.2.1 景观转移特征

从成都都市圈1980年、2000年、2020年蓝绿空间分布情况(图4)可以看出,成都都市圈蓝绿空间在西部和中部山脉区域较为集中,在其他区域布局较为零碎。从蓝绿空间动态变化分布(图5)可知,1980-2000年成都都市圈蓝绿空间呈减少的趋势,2000-2020年成都都市圈蓝绿空间呈增加的趋势,且前20年的减少程度小于后20年的增加程度。空

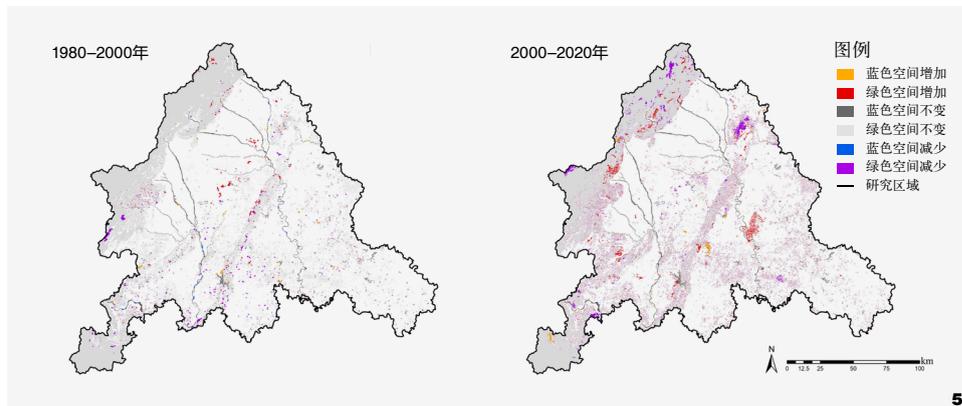


图4 1980-2020年研究区蓝绿空间分布图
Fig. 4 Blue-green space distribution maps of the study area from 1980 to 2020

图5 1980-2020年研究区蓝绿空间动态变化分布
Fig. 5 Dynamic distributions of blue-green space in the study area from 1980 to 2020

间上,1980-2000年蓝绿空间变化的区域分布较为零散,其中蓝色空间增加和减少的区域都较为集中在中部;绿色空间减少的区域,南部多于北部,增加的区域,北部多于南部。2000-2020年蓝绿空间变化的区域集中分布于边界区域和中部山脉区域,其中蓝色空间增加和减少的区域分布零碎,绿色空间增加和

减少的区域均较为集中,主要在西部、南部和中部部分区域。总体上,研究期前20年蓝绿空间变化的区域分布零散,而后20年较为集中。

从研究区蓝绿空间动态变化(表3)可以看出,1980-2000年,成都都市圈蓝绿空间动态变化幅度为-0.28%,蓝色空间增加,绿色

表3 1980-2020年研究区蓝绿空间动态变化
Tab. 3 Dynamic changes of blue-green space in the study area from 1980 to 2020

景观类型 Landscape type	1980-2000年		2000-2020年	
	面积变化 /km ² Area change	动态变化幅度 /% Dynamic degree	面积变化 /km ² Area change	动态变化幅度 /% Dynamic degree
蓝色空间	1.81	0.37	46.78	9.43
绿色空间	-24.55	-0.33	15.67	0.21
蓝绿空间	-22.74	-0.28	62.45	0.78

表4 1980–2020年研究区蓝绿空间景观转移矩阵 (单位: km²)
Tab. 4 Transformation matrices of blue-green space in the study area from 1980 to 2020

时间阶段 Time stage	景观类型 Landscape type	用地类型 Land use type	转入 / 转出 Transfer in/out	林地 Forest	草地 Grass	水域 Water	耕地 Farmland	建设用地 Land for construction	未利用地 Barren land	转移总量 Transfer total
1980–2000年	绿色空间	林地	转出	6 113.20	13.62	0.46	44.66	1.94	0.00	60.68
			转入	—	6.73	1.12	14.80	0.01	1.57	24.23
		草地	转出	6.73	1 315.55	0.01	1.51	1.03	0.00	9.28
			转入	13.62	—	0.00	6.11	0.09	1.45	21.26
	蓝色空间	水域	转出	1.12	0.00	486.96	4.69	0.49	0.99	7.30
			转入	0.46	0.01	—	8.57	0.07	0.00	9.11
2000–2020年	绿色空间	林地	转出	5 484.71	90.63	27.28	437.12	34.13	63.52	652.68
			转入	—	122.47	6.47	585.46	14.60	0.10	729.10
		草地	转出	122.47	1 118.29	5.78	52.36	32.75	5.17	218.53
			转入	90.63	—	0.81	64.82	1.49	0.00	157.75
	蓝色空间	水域	转出	6.47	0.81	413.97	53.41	20.92	0.49	82.10
			转入	27.28	5.78	—	84.93	9.64	1.25	128.88

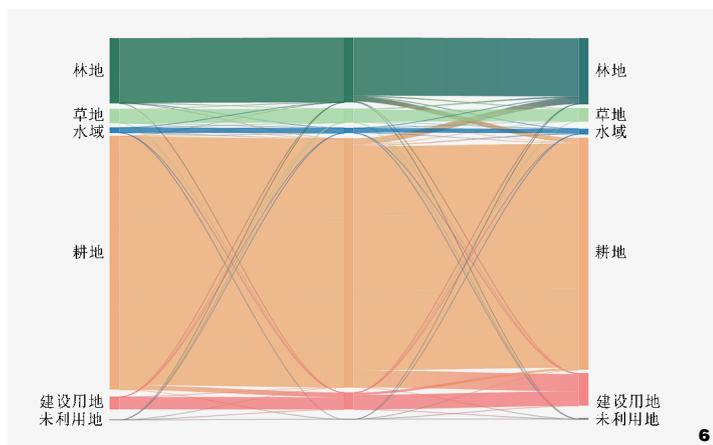


图6 1980–2020年研究区景观转移桑基图
Fig. 6 Sankey map of landscape transfer in the study area from 1980 to 2020

空间减少, 其中蓝色空间面积增加了1.81 km², 动态变化幅度为0.37%; 绿色空间面积减少了24.55 km², 动态变化幅度为-0.33%。2000–2020年, 成都都市圈蓝绿空间动态变化幅度为0.78%, 蓝色空间和绿色空间均增加, 其中蓝色空间变化较大, 面积增加了46.78 km², 动态变化幅度为9.43%; 绿色空间面积仅增加了15.67 km², 动态变化幅度为0.21%。总体而言, 蓝绿空间面积经历了先缓慢减少后小幅度增加的过程, 其中蓝色空间的面积变化比绿色空间的面积变化大。

借助ArcGIS10.8的空间叠置分析和统计分析功能, 获得成都都市

圈1980年、2000年、2020年蓝绿空间景观转移矩阵(表4), 并利用Origin软件绘制景观转移桑基图(图6)。结果表明, 1980–2000年在转出方面, 林地的转出量最大, 为60.68 km², 草地和水域转出量较小, 分别为9.28 km²和7.30 km²; 在转入方面, 主要是耕地向林地的转入, 也有少量耕地转为草地和水域, 同时存在蓝绿空间内草地和林地相互转移的现象。2000–2020年, 在转出方面, 林地的转出量最大, 高达652.68 km², 草地其次, 转移面积为218.53 km², 水域最少且仅为林地转出量的12.58%; 在转入方面, 主要由耕地转为林地、草地和水域, 转移量达735.21 km², 其中转为林地的面积最大; 也有少量建设用地转入林地、草地、水域, 同样存在草地和林地互转的现象。总体而言, 成都都市圈蓝绿空间面积在1980–2000年减少22.66 km², 在2000–2020年增加62.42 km², 耕地的转移是造成蓝绿空间面积变化的主要原因。但因耕地未在本次研究界定的蓝绿空间范畴内, 且考虑到耕地变化受气候因素影响较小^[28], 因此本次研究中不对耕地格局的演变特征展开进一步分析。

3.2.2 景观格局演变特征

通过计算蓝色空间、绿色空间和蓝绿空间的景观水平指数分析成都都市圈蓝绿空间景观格局演变规律(表5)。蓝色空间的NP值、PD值、CONTAG值在1980–2020年持续下降, 其中CONTAG显著下降, LPI值、DIVISION值、ED值、LSI值、PAFRAC值、SHDI值、SHEI值持续升高, 其中

表5 1980–2020年研究区蓝绿空间景观格局指数
Tab. 5 Blue-green spatial landscape pattern indexes of the study area from 1980 to 2020

年份 Year	景观类型 Landscape type	斑块数量 / 个 NP	斑块密度 / (个/km ²) PD	最大斑块指数 / % LPI	景观分离度 DIVISION	边缘密度 / (个/km ²) ED	形状指数 LSI	蔓延度 / % CONTAG	周长—面积分形维数 PAFRAC	香农多样性指数 SHDI	香农均匀度指数 SHEI
1980	蓝色空间	1 733	0.0242	53.7911	0.5888	1.2047	9.0628	66.4410	1.4011	0.7261	0.6609
	绿色空间	9 557	0.1334	53.7911	0.5825	5.4456	37.4418	56.5871	1.3684	0.9126	0.8307
	蓝绿空间	11 361	0.3431	31.0661	0.8158	12.8884	61.5915	67.8915	1.4415	0.6087	0.5541
2000	蓝色空间	1 690	0.0236	53.7911	0.5888	1.2151	9.1325	66.4329	1.4183	0.7262	0.6610
	绿色空间	9 353	0.1305	53.7911	0.5824	5.4175	37.2536	56.6295	1.3808	0.9118	0.8300
	蓝绿空间	11 162	0.3371	31.0735	0.8157	12.8689	61.5034	67.9277	1.4563	0.6080	0.5535
2020	蓝色空间	1 644	0.0229	53.7926	0.5892	1.2706	9.5039	66.2895	1.4303	0.7289	0.6635
	绿色空间	9 868	0.1377	53.7926	0.5837	5.8251	39.9810	56.4499	1.4087	0.9134	0.8314
	蓝绿空间	11 619	0.3509	30.8083	0.8134	13.6450	65.0784	67.4338	1.4730	0.6141	0.5590

表6 景观指数与气候因素驱动因子的关联系数
Tab. 6 Correlation coefficients between landscape indexes and climate driving factors

景观指数 Landscape indicators 气候因子 Climate driving factor	斑块数量 NP	斑块密度 PD	最大斑块指数 LPI	景观分离度 DIVISION	边缘密度 ED	形状指数 LSI	蔓延度 CONTAG	周长—面积分形维数 PAFRAC	香农多样性指数 SHDI	香农均匀度指数 SHEI	均值 Average value
年均气温	0.66	0.73	0.67	0.66	0.85	0.83	0.67	0.78	0.68	0.71	0.72
年均降水量	0.72	0.86	0.69	0.69	0.72	0.73	0.70	0.82	0.71	0.77	0.74
年均日照时数	0.76	0.77	0.73	0.73	0.84	0.83	0.73	0.70	0.74	0.75	0.76
年均潜在蒸散量	0.68	0.72	0.89	0.87	0.67	0.67	0.88	0.83	0.83	0.75	0.78
均值	0.70	0.77	0.74	0.74	0.77	0.77	0.74	0.78	0.74	0.75	

ED值和LSI值变化显著,说明蓝色空间的景观破碎化程度和形状复杂度增加,连通性下降,景观类型逐渐丰富且分布向均匀化方向发展。绿色空间的NP值、PD值、DIVISION值、ED值、LSI值、SHDI值、SHEI值在1980–2000年缓慢减小,在2000–2020年显著增加,其中ED值、LSI值增长尤其明显,LPI值、PAFRAC值在1980–2020年持续缓慢增长,而CONTAG值先缓慢增加再急剧下降,说明绿色空间的景观破碎化程度和丰富度先减小后增加,趋于分散和多样化,景观分布呈现先散乱后均匀的趋势。整体而言,蓝绿空间的NP值、PD值、DIVISION值、ED值、LSI值、SHDI值、SHEI值在1980–2000年缓慢减小,在2000–2020年显著增加,LPI值、DIVISION值、CONTAG值在

1980–2000年有轻微波动,2000–2020年显著下降,PAFRAC值在1980–2000年持续增涨,说明蓝绿空间呈破碎化加剧状态,斑块边缘不规则度越来越强,景观类型增加且分布愈加均匀。

3.3 成都都市圈蓝绿空间演变气候因素驱动机制分析

将1980–2020年气候因素指标分别与蓝绿空间景观格局指数进行关联分析,结果如表6所示。整体而言,4个气候因子对蓝绿空间景观格局指数关联度均较大,且关联度均值较为接近,其关联度均值由大到小依次为:年均潜在蒸散量(0.78)、年均日照时数(0.76)、年均降水量(0.74)、年均气温

(0.72)。其中年均气温与ED、LSI的关联度最大(分别达到0.85、0.83),与NP、DIVISION的关联度最小(均为0.66)。年均降水量与PD的关联度最大(0.86),与LPI、DIVISION的关联度最小(均为0.69)。年均日照时数与ED的关联度最大(0.84),与PAFRAC关联度最小(0.70)。年均潜在蒸散量与LPI的关联度最大(0.89),与ED、LSI的关联度最小(均为0.67)。

针对蓝绿空间景观格局指数而言,整体上各指数与气候因子的关联度均值都较高,且各值相差较小,PAFRAC受气候因子的影响最大,关联度均值为0.78,NP受气候因子的影响相对最小,关联度均值为0.70。其中LPI与潜在蒸散量的关联度为0.89,是所有关联度中的最大值,NP、DIVISION与气温的关联度

为0.66,是所有关联度中的最大值。

整体而言,1980–2020年成都都市圈气候总体呈现变暖特征,区域内蓝绿空间的破碎化增加、不规则度增强,分布愈加均匀。气候因素对蓝绿空间格局的演变有较强影响,升温会使水体的蒸发量增加^[29],调节径流能力减低,土壤质量变差^[30],从而抑制植被生长;降水增加有利于补充地下水和地表水资源,益于植被生长和动植物的生存,维持生态系统的稳定性和生物多样性,但大量降水又可能导致土壤侵蚀和城市内涝;而日照时数增加有利于植被生长和动植物的活动,并会影响土壤湿度和温度,进而影响生态系统的结构和功能;高蒸散量可能导致土地水分流失和植被覆盖减少,加剧土地荒漠化。总体而言,气候因子影响了植物的生长过程、地表径流的蒸散发与水循环、土壤水分及质量等过程,改变了区域的生态系统,进而影响区域蓝绿空间格局^[16]。

4 讨论

研究结果显示,研究区蓝绿空间格局演变在后20年比前20年更剧烈,与气候因素的变化特点相似,说明气候变化过程会在一定程度上影响自然环境,进而影响蓝绿空间景观格局,这与其他有关研究结果基本一致^[24]。2000–2020年,非蓝绿空间小幅度向蓝绿空间转移,蓝绿空间的景观破碎化、复杂度加剧,景观丰富度增加,这与赵桐等^[31]、郭淑婷等^[32]研究结果相印证。利用灰色关联分析得出4个气候因子对蓝绿空间景观格局指数的关联度均大于0.7,表明降水充足、暖湿化加剧是影响研究区景观格局的重要因素,这与赵志强等^[25]、杨烜涵等^[33]、闻译竣等^[23]的研究结果一致。此外,蒸散量与景观格局指数的关联度最大,这是因为气温升高会导致

蒸散量增加,土壤含水量降低,从而影响研究区生态平衡,引起景观格局复杂化,与Zhang等^[34]研究结果一致。但也有相关研究^[35]认为,景观格局的演变更受人口、GDP等社会因素影响,这可能是由于驱动因素的选择不同,且因素会随城市特点不同而存在异质性造成的。结合研究结论与研究区的实际情况,对气候适应型格局构建提出以下建议:

(1) 生态网络规划。建立基于生态网络的景观规划,通过连接和保护生态廊道、绿色通道等生态要素,增强蓝绿空间的连通性和稳定性,增强其对气候变化的适应能力。

(2) 生态工程技术。采用生态工程技术,如人工湿地建设、雨水收集利用系统等,增加蓝绿空间的水源补给和水循环能力,助力缓解气候变化引发的干旱和水资源紧缺问题,提高景观格局的适应性。

(3) 蓝绿空间规划设计。采用多功能景观设计原则,将蓝绿空间规划为具有多种生态功能的区域,包括生态保护、景观美化、休闲娱乐等,提高蓝绿空间的多样性和弹性。

(4) 生态保护与恢复。加强生态保护与恢复工作,保护和恢复重要的生态系统,如湿地、森林等,增加蓝绿空间的生物多样性和生态稳定性,有助于提高景观格局韧性,减轻气候变化对生态系统的冲击。

5 结论与展望

本研究利用1980年、2000年、2020年三期土地利用数据和1980–2020年气温、降水量、日照时数和潜在蒸散量4个气候数据,基于气候倾向率、动态变化模型、景观转移矩阵、景观格局指数等方法,借助ArcGIS和FRAGSTATS软件,分析成都都市圈蓝绿空间气候因素及景观格局的时空演变特征,并通过灰色关联度法探讨气候因素对景观格局变化

的驱动机制。主要研究结果如下:

(1) 1980–2020年成都都市圈年均气温、降水量和潜在蒸散量随时间呈上升趋势,气候倾向率分别为 $0.19^{\circ}\text{C}/(10\text{a})$ 、 $16.48\text{ mm}/(10\text{a})$ 、 $0.94\text{ mm}/(10\text{a})$,仅年均日照时数与时间序列呈负相关,气候倾向率为 $-0.02\text{ d}/(10\text{a})$;空间分布上,降水量趋于均匀分布,其余气候因素在山脉和城镇区域的差异化加剧。

(2) 1980–2020年,成都都市圈蓝绿空间面积先缓慢减少后小幅度增加,空间破碎化加剧,斑块边缘不规则度加强,景观类型增加且分布愈加均匀。成都都市圈蓝绿空间面积在1980–2000年减少 22.66 km^2 ,主要是大量林地转出为耕地,在2000–2020年增加 62.42 km^2 ,主要为大量耕地和少量建设用地转入林地、草地和水域;景观格局方面,蓝绿空间破碎化程度在加剧,斑块边缘复杂度增加,斑块类型更加多样化且各斑块类型在都市圈中均匀分布。

(3) 4个气候因子对蓝绿空间景观格局指数关联度均较大,关联度均值由大到小依次为:年均潜在蒸散量(0.78)、年均日照时数(0.76)、年均降水量(0.74)、年均气温(0.72)。对于蓝绿空间景观格局指数而言,PAFRAC受气候因子的影响最大,关联度均值为0.78,NP受气候因子的影响相对最小,关联度均值为0.70。

本研究将气候变化引入蓝绿空间格局演变分析,关注成都都市圈气候因素与蓝绿空间格局演变的相关性,有助于深化对气候变化影响下区域景观格局演变的认识。其研究结果可为成都都市圈蓝绿空间规划和管理、气候适应型区域景观格局构建提供技术方法和参考。但本次研究暂未考虑自然地理、社会经济等因素对成都都市圈蓝绿空间格局演变的驱动机制,后续拟纳入其他因素进行驱

动机制的对比分析。此外，未来将进一步开展气候因素与蓝绿空间格局的关联研究，拟围绕气候适应型景观格局构建、气候变化风险评估、多尺度气候适应型响应等方面进行探索。

注：文中图表均由作者绘制。

参考文献

- [1] 袁家冬,周筠,黄伟. 我国都市圈理论与规划实践中的若干误区[J]. 地理研究, 2006(01): 112-120.
- [2] 中国新闻网. 《成都都市圈发展规划》出炉系中国中西部唯一一个都市圈规划[EB/OL]. (2021-11-30) [2024-01-31]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1717823031718589626&wfr=spider&for=pc>
- [3] 四川省人民政府. 关于印发《成都都市圈发展规划》的通知: 川府发[2021]34号[EB/OL]. (2021-11-29) [2024-01-31]. <https://www.sc.gov.cn/10462/zfwjts/2021/11/29/40678782564141e68f4d1d27180befb9.shtml>
- [4] 崔宏凯,张林,王子健,等. 物流产业发展和区域经济增长的关联效应研究——基于长江经济带三大都市圈的面板数据[J]. 经济问题, 2021(03): 78-85.
- [5] 代鑫,刘前媛,唐鹏,等. 城市群空间结构演变规律及优化方向研究——以成都平原经济区为例[J]. 城市规划, 2022, 46(10): 104-114.
- [6] 王超深. 轨道交通线网影响下的大都市区空间结构模式研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- [7] 庄子薛,谢梦晴,张文萍,等. 基于FLUS-InVEST模型的碳储量时空变迁及多情景模拟预测——以成都眉资地区为例[J]. 风景园林, 2022, 29(05): 38-44.
- [8] 谢慧. 城市边缘区蓝绿空间规划与建设研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- [9] DONATI G F A, BOLLIGER J, PSOMAS A, et al. Reconciling Cities with Nature: Identifying Local Blue-Green Infrastructure Interventions for Regional Biodiversity Enhancement[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 316: 115254.
- [10] MANES F, INCERTI G, SALVATORIE, et al. Urban Ecosystem Services: Tree Diversity and Stability of Tropospheric Ozone Removal[J]. Ecological Applications, 2012, 22(1): 349-360.
- [11] GUNAWARDENA K R, WELLS M J, KERSHAW T. Utilising Green and Bluespace to Mitigate Urban Heat Island Intensity[J]. Science of the Total Environment, 2017, 584: 1040-1055.
- [12] 许浩,金婷,刘伟. 苏锡常都市圈蓝绿空间规模与格局演变特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(01): 219-226.
- [13] 崔洁,许浩,刘伟. 近20年徐州都市圈蓝绿空间景观格局演变分析[J]. 园林, 2022, 39(07): 75-81.
- [14] VOSKAMP I M, VAN DE VEN F H M. Planning Support System for Climate Adaptation: Composing Effective Sets of Blue-green Measures to Reduce Urban Vulnerability to Extreme Weather Events[J]. Building and Environment, 2015, 83: 159-167.
- [15] 张祿英,毛文书,庞波. 成都平原气候变化特征[J]. 成都信息工程大学学报, 2020, 35(02): 179-187.
- [16] 郝丽萍. 成都市近50年气候变化特征及其热岛效应研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007.
- [17] 刘轶,王倩娜,廖奕晴. 成都都市圈生态与社会经济系统耦合协调动态演化、多情景模拟及其政策启示[J]. 自然资源学报, 2023, 38(10): 2599-2618.
- [18] 张歆越,高晓路,柴琪,等. 中国地级城市建成区蓝绿空间时空格局及其气候影响因素分析[J]. 地球信息科学学报, 2023, 25(01): 190-207.
- [19] FIELD C B, BARROS V R, DOKKEN D J, et al. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Summaries, Frequently Asked Questions, and Cross-Chapter Boxes. A Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2014
- [20] 程清平,王平,谭小爱. 1961-2013年贵州省地面温度时空变化特征[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(02): 122-131.
- [21] 王丽平,段四波,张霄羽,等. 2003-2018年中国地表温度年最大值的时空分布及变化特征[J]. 干旱区地理, 2021, 44(05): 1299-1308.
- [22] 丁金华,吴忻. 苏南水网地区景观格局演变分析及其驱动因素探究——以七都镇为例[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(02): 257-264.
- [23] 闻译竣,石超,王树伟,等. 近35年石羊河流域景观格局演变及其驱动因素[J]. 草业科学, 2023, 40(01): 303-317.
- [24] 曾琬莹,谢梦晴,王倩娜. 区域尺度下道路网络对生态格局及生态网络的影响: 以成渝城市群为例[J]. 西部林业科学, 2023, 52(6): 132-141.
- [25] 赵志强,许晓龙,袁青,等. 2000-2020年哈尔滨松花江湿地景观格局演变及驱动因素分析[J/OL]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(02): 219-226.
- [26] 蒋德平,季翔,王东. 盐城市景观格局演变特征及驱动因素研究[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(6): 243-251.
- [27] 谢念斯. 城市绿地空间格局的动态变化及其驱动力研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
- [28] 姜佳乐. 1986-2020年黄河流域十大孔兑土地利用与植被覆盖时空演变及影响因素研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [29] 聂文彬,裴辉,庞利伟,等. 区域蓝绿空间时空演变及驱动力[J]. 浙江大学学报(工学版), 2023, 57(11): 2266-2276.
- [30] 刘强,尉飞鸿,夏雪,等. 1980-2020年窟野河流域土地利用景观格局演变及其驱动力[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 335-341.
- [31] 赵桐,蒙吉军. 基于土地利用变化的成都平原经济区碳储量时空演变与情景模拟[J]. 山地学报, 2023, 41(5): 648-661.
- [32] 郭淑婷,王诗源,王倩娜,等. 蓝绿基础设施多功能对景观格局的时空响应及风险区分级——以四川天府新区为例[J]. 西北林学院学报, 2024(2): 1-11.
- [33] 杨炬涵,付晖,秦煜姬,等. 近20年来海口湿地景观格局演变及其驱动因子[J]. 中国城市林业, 2023, 21(3): 28-35.
- [34] ZHANG X J, WANG G Q. Dynamic Landscapes and the Driving Forces in the Yellow River Delta Wetland Region in the Past Four Decades[J]. Science of the Total Environment, 2021, 787: 147644.
- [35] 郑婷婷,李苑菱,陈宗铸,等. 2000-2020年海南岛流域景观格局时空演变及其推动因素分析[J]. 热带林业, 2023, 51(4): 67-73.