

引用格式:王晶,赵龙,吴辉,董欣,曹芝毓,马明国.西南地区城市化进程加剧局地气象条件的空间差异[J].山地学报,2022,40(1):120-135.
WANG Jing, ZHAO Long, WU Hui, DONG Xin, CAO Zhiyu, MA Mingguo. Urbanization magnifies spatial variations of local meteorological conditions in southwest China [J]. Mountain Research, 2022, 40(1):120-135.

西南地区城市化进程加剧局地气象条件的空间差异

王晶^{1a,1b,1c},赵龙^{1a,1b,1c*},吴辉²,董欣^{1a},曹芝毓^{1a},马明国^{1a,1b,1c}

(1. 西南大学 a. 地理科学学院; b. 重庆金佛山喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站;

c. 遥感大数据应用重庆市工程研究中心, 重庆 400715; 2. 北京弘象科技有限公司, 北京 100081)

摘要:土地利用覆被变化对于局地气象条件的演变具有重要影响。在过去几十年我国西南地区经历了较为明显的土地利用变化,而该区域土地利用转变背景下局地气象要素的时空差异尚缺乏定量研究。本文利用中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC)以及中国区域地面气象要素驱动数据集(CMFD),基于土地利用转移矩阵和距平分析方法,量化了西南地区1980—2018年的土地利用转变及典型区域下的气象要素(近地面气温、风速、向下长波辐射、降水)时间变化特征和空间差异。结果表明:(1)西南地区近四十年以城市化进程为主导,建设用地整体增加10 133 km²,重庆、成都以及昆明大城市面积扩张了2~4倍;(2)以城市化进程明显的0.5°网格为中心区,3°网格为背景场,可有效刻画土地利用变化背景下的局地气象要素时空演变差异,且该差异在上述三个城市呈现出明显的地域性特征。具体来说,成都在2000年后的城市化快速发展期呈现出较大的气象条件空间差异,2000—2010年气温、长波辐射距平以及风速和降水相对变化量中心区与背景场的最大差值分别为-0.69 K、-5.2 w·m⁻²、+22%、+20%,而2010—2018年二者差异反向,最大差值分别为+0.78 K、+4.3 w·m⁻²、-17%、-13%。重庆大部分气象要素时空差异与成都相近,但风速呈先减小后增大的趋势,1995—2009年间中心区高于背景场达22%。昆明的土地利用较为复杂,各气象要素变化较成都与重庆存在一定差异。这可能是因为较大面积的水体对气象要素的时空变化有一定的缓冲和调节作用。本研究可为西南地区土地利用尤其是城市化发展下的用地管理和城镇规划提供参考。

关键词:城市化;气象要素;空间差异;西南地区

中图分类号: P467

文献标志码: A

土地利用是人类改造和利用自然的主要方式,人类活动影响下的土地利用覆被变化(Land Use and Land Cover Change, LUCC)对全球环境变化具有显著影响,其与物种多样性变化、生态系统演化等密切相关,且可以通过影响净辐射、感热和潜热以及土壤水分、蒸散发和降水等影响区域气候^[1-3]。

国际上对LUCC的研究起步较早,其研究内容主要围绕土地利用/覆被变化的规律及过程、土地利

用/覆被变化驱动原理分析、土地利用/覆被变化影响等方面,研究方向具有较强的综合性和区域性^[4]。在区域土地利用变化及其气候响应机制的研究上,我国学者侧重以城市发展^[5-6]、植被生长状况^[7]等方面为切入点,且主要倾向于特定气象要素变化特征的分析,例如风速^[8]、降水^[9]、气温^[10]等。已有研究发现LUCC减缓了气候变化对淮河流域年平均流量增加的影响,但会放大大气变化对极端流

收稿日期(Received date):2021-08-21;改回日期(Accepted date):2022-02-11

基金项目(Foundation item):国家自然科学基金青年基金(41805133)。[Youth Fund of National Natural Science Foundation of China (41805133)]

作者简介(Biography):王晶(1998-),女,云南玉溪人,硕士研究生,主要研究方向:水文气象。[WANG Jing(1998-),female,born in Yuxi, Yunnan province, M. Sc. candidate, research on hydrometeorological analysis] E-mail: wjswu1106@163.com

* 通讯作者(Corresponding author):赵龙(1985-),男,博士,副教授,主要研究方向:水文气象与陆面数据同化。[ZHAO Long(1985-),male, Ph. D., associate professor, research on hydrometeorology and land data assimilation] E-mail: zhaol04@swu.edu.cn

量增加的影响^[11]。亦有学者利用模型从气候和土地利用对水文变化的影响进行综合建模,发现不同土地利用类型组分及其变化对水文要素在空间上存在较大差异^[12-13]。上述研究揭示了土地利用变化及其气候响应的差异性和复杂性,但多针对单一或少数气象气候要素,在区域上多集中于我国北部及东部区域。

西南地区包括云南、贵州、四川和重庆四省(市),地形复杂、物种丰富,是我国重要的生态安全屏障地区,也是多条河流的上游和源头地区。同时,该地区土地覆盖景观异质性强、水土流失严重,泥石流、地震等地质灾害频繁,是我国重要的气候变化敏感区和生态环境脆弱区^[14]。近年来,西南地区发生过数次异常干旱,现有研究从热带西太平洋和印度洋热力异常出发分析了干旱成因^[15]。此外,还有学者从热力环流^[16-18]、植被变化^[20-21]等不同角度揭示了西南地区的气象气候变化及响应特征。上述研究大多从自然气象条件作为切入点,针对当地土地利用变化及其气候响应的研究仍显薄弱。该地区土地利用类型主要为林地、农田和草地,近年来受城市化、退耕还林政策等因素影响,土地利用格局产生了显著变化。已有研究表明,2000—2015年西南地区农田减少最多,减少面积约为6211 km²,建设用地则明显增加,增加面积达5874 km²^[22]。在西南地区开展典型土地利用变化背景下气温、降水等多个关键水文气象要素的时空变异特征研究,是保护当地生态环境、防范水文地质灾害、保障农业生产的迫切需求。本文基于土地利用转移矩阵和距平分析方法,对西南地区1980—2018年近四十年土地利用情况进行分析,选取重庆、成都以及昆明三个城市中心区为典型区域,探究其土地利用变化下对于局地气象要素的影响,以期对西南地区土地利用尤其是城市化发展下的用地管理和城镇规划提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

西南地区包括四川省、贵州省、云南省和重庆直辖市(97°19'E~110°12'E, 21°6'N~34°21'N;如图1所示),区域总面积约为 1.14×10^6 km²,是中国重要的农业生产区,人口分布稠密^[23-24]。地形上,以高原、山地、丘陵为主,平原面积狭小,岩溶地貌分布广

泛,植被类型主要为森林、农田和草地^[25-26]。该区域内地形条件极为复杂,西北部横断山区平均海拔在4000 m以上,南部云贵高原地势崎岖,海拔大多在2000~4000 m^[27]。受太平洋季风和印度季风影响,西南地区为典型的亚热带季风区,属亚热带季风气候,年平均气温15°C~20°C,以同期的降雨和热量为主。年均降雨量一般在1100~1400 mm,且降雨集中在5—9月^[28-29]。基于西南地区土地利用变化情况,本研究选取成都、重庆、昆明三个城市化扩张尤为显著的城市中心区作为典型土地利用转变特征的研究区。

1.2 研究数据

1.2.1 土地利用数据

本研究使用的土地利用数据源自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)的“中国多时期土地遥感数据监测数据集”(China Multi-Period Land Use Land Cover Remote Sensing Monitoring Dataset, CNLUCC)。该产品是以Landsat TM/ETM+/OLI遥感影像为主要数据源,经图像预处理和增强等处理以及人机交互目视解译而成,其将全国土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、居民地和未利用土地6个一级类型以及25个二级类型,其中一级类型分类综合精度达到93%以上,二级类型分类综合精度达90%以上^[30-31]。本研究选取1980、1990、1995、2000、2005、2010、2015和2018年分辨率为1 km的西南地区土地利用数据。图1a、1b分别显示了1980年和2018年西南地区土地利用类型。可见,西南地区林地和草地为主要用地类型,在局部区域建设用地扩张较为明显。

1.2.2 CMFD气象数据

本研究重点探究土地利用变化下气象要素包括风速、气温、长波辐射、及降水的影响,采用的气象数据来源于“国家青藏高原科学数据中心”(<http://data.tpdc.ac.cn>)2019年发布的“中国区域地面气象要素驱动数据集(China Meteorological Forcing Dataset, CMFD)”。该数据集是在现有的再分析资料以及卫星数据等的基础上,进一步融合了中国气象局的观测数据制作而成,总体精度评估表现上要优于GLDAS(Global Land Data Assimilation System)再分析资料^[32]。该数据集时间分辨率为3 h,水平空间分辨率为0.1°,时间跨度为1979—2018年,包括近地面气温、近地面气压、近地面空气比湿、近地

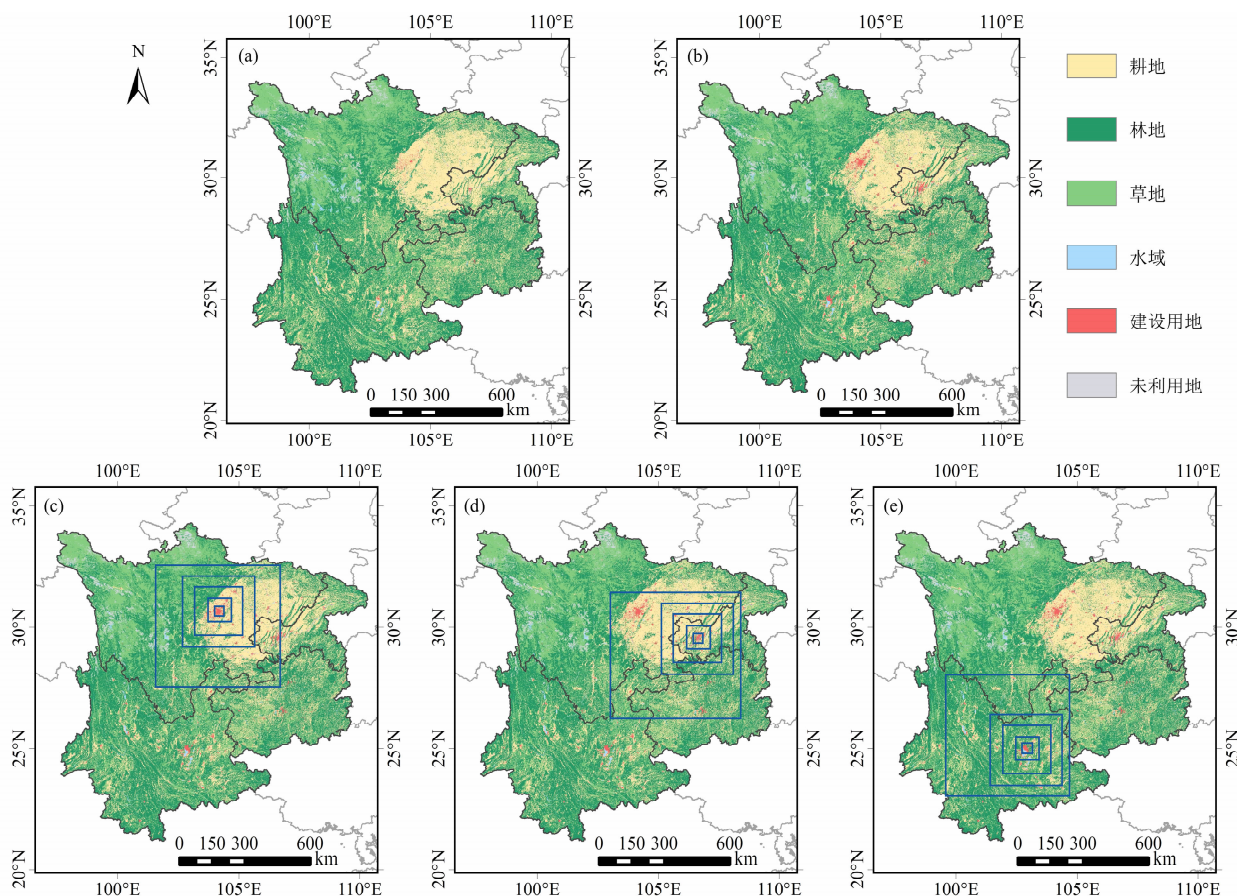


图 1 西南地区土地利用空间分布:(a)1980 年;(b)2018 年;(c)成都;(d)重庆;(e)昆明

Fig. 1 Spatial distribution of land use in southwest China: (a) 1980; (b) 2018; (c) Chengdu; (d) Chongqing; (e) Kunming

面全风速、地面向下短波辐射、地面向下长波辐射、地面降水率共 7 个要素。需要注意的是,为便于长时间尺度的气候分析,该数据集还配套生成了上述各气象要素月平均的数据。目前,已有学者利用 CMFD 针对不同流域、不同方向和不同气象要素进行应用与评估,结果表明 CMFD 数据与实测数据总体误差较小,具有较好的一致性^[33-35]。考虑到各气象要素自身的特点,本研究最终选取了该数据集中逐月的近地面气温、近地面全风速、地面向下长波辐射、地面降水率 4 个变量探讨土地利用变化背景下气象要素时空响应特征。

1.3 研究方法

本研究首先基于西南地区 8 期的土地利用数据,采用土地利用转移矩阵等方法,分析该区域内近四十年的土地利用变化情况。在此基础上选取土地利用变化较为显著的区域作为典型研究区,计算各气象要素的距平及相对变化量反映局地气象变化趋势。同时,为了去除西南地区气候变化整体趋势的

影响,本研究针对各典型研究区通过比较不同空间范围的气象要素趋势来确定背景场的范围,以此提取出土地利用类型转变影响下的局地气象要素变化。

1.3.1 土地利用转移矩阵

本研究采用土地利用转移矩阵分析 1980—2018 年西南地区用地的变化情况,以总体把握该区域土地利用转型特征。土地利用转移矩阵的数学形式为:

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

式中, n 为土地利用的类型数; S_{ij} 为研究时期 i 到 j 土地利用转移的面积(km^2)。后续分析中主要介绍了土地利用转移较为频繁的 1980—1990、2000—2005、2010—2015 年的情况。

1.3.2 气象要素距平及相对变化量

本研究针对典型研究区,对所选取的 4 个气象

要素通过计算距平或相对变化量来减小时间序列整体趋势的影响。距平是某一数值中的某一个数值与平均值的差,距平的大小可表示某一变量常年的变动情况。本研究对近地面气温、地面向下长波辐射计算距平,得到研究区及背景场气象要素距平变化。由于风速、降水易受区域地形、植被等要素影响,存在着明显的地域差异特征,因此以计算相对变化量来表征 1979—2018 年风速、降水的变化趋势。

1.3.3 背景场范围

在全球和区域气候变化的大背景下,为了提取局地土地利用变化引起的气象要素响应,需要对西南地区整体气候变化趋势进行去除。在确定研究中心区和背景场的空间范围时,主要有以下几点考虑:首先,中心区范围不能太小,以确保涵盖过去四十年土地利用发生变化的主要区域;同时也不能太大,以突出该区域土地利用类型转变的主导作用。其次,背景场的范围不能太小,以降低局地土地利用转变带来的整体影响;而同时也不能过大,以免囊括其他土地利用转变明显的区域(如成都和重庆),增加分析不确定性。本研究确定以 0.5° 网格用于表征城市化主导下的建设用地扩张的中心区,而限定背景场的最大空间范围为 5° 网格。在此划分范围内,本研究进一步比较了以三个城市为中心区域不同空间

范围(0.5° 、 1° 、 2° 、 3° 、 5° 网格;图 1c、1d、1e)的近地面气温距平来确定最终的背景场范围。

2 结果与分析

2.1 西南地区土地利用变化

通过对西南地区土地利用情况分析整理,得到不同时期(1980、1990、1995、2000、2005、2010、2015、2018 年)的土地利用现状图。图 1a、1b 所示分别为 1980 年、2018 年西南地区土地利用。可见,西南地区主要土地利用类型为林地,约占该区域总面积的 45%,建设用地、水域和未利用地的面积占比较小,分别约占总面积的 1%、1% 和 2%。过去四十年间,西南地区以城市化为典型的土地利用转变较为明显,形成了以成都、重庆、昆明、贵阳等地为中心的城市群。图 2 统计了西南地区主要土地利用类型的年际变化,其中变化最大的是耕地以及建设用地。耕地呈现逐年减少的趋势,1980—2018 年减少了 8231 km^2 (图 2a);林地年际变化波动较大,1995—2000 年的减少和 2015—2018 年的增加尤为显著,总体呈增长态势,1980—2018 年共增加了 4982 km^2 (图 2b);草地在 2015 年前变化呈平稳态势,2015—2018 年草地减少了 9539 km^2 (图 2c);水域面积除 1980—1990 年呈减少的趋势(减少面

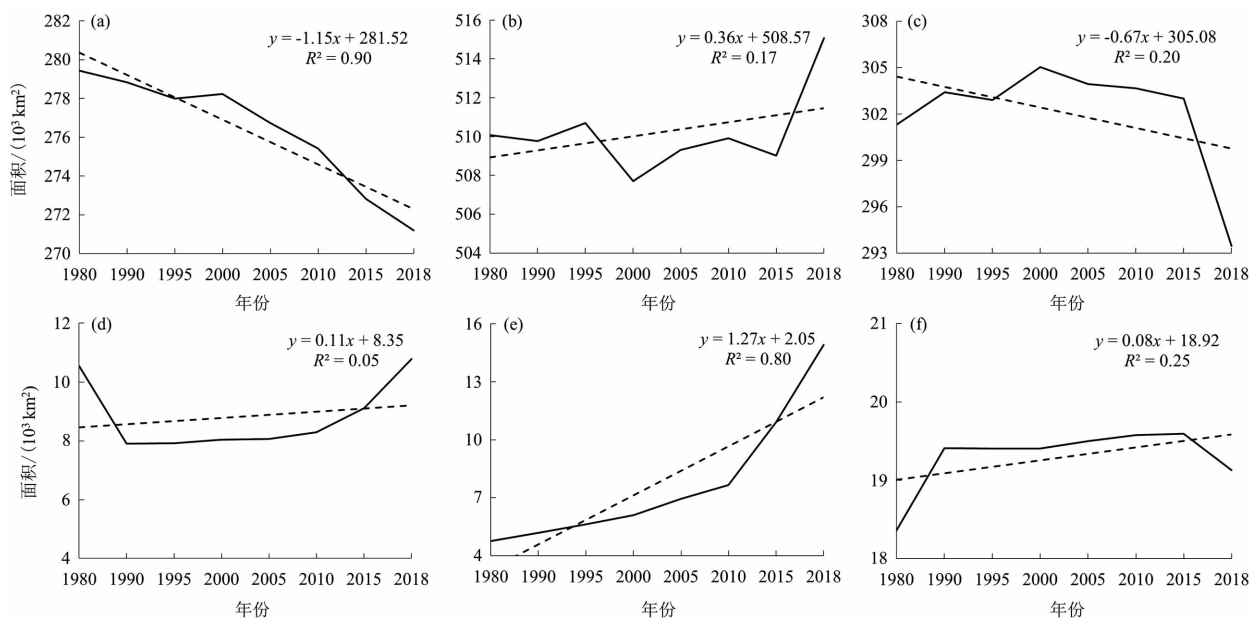


图 2 1980—2018 年西南地区土地利用变化情况:(a)耕地;(b)林地;(c)草地;(d)水域;(e)建设用地;(f)未利用地

Fig.2 Land use changes in southwest China from 1980 to 2018;

(a) cropland; (b) woodland; (c) grassland; (d) waterbody; (e) built-up land; (f) unused land

积为 2635 km²), 其余年份均表现为增加(图 2d); 建设用地总体呈增长趋势, 1980—2018 年共增加了 10 133 km², 且 2010—2018 年增长明显(图 2e); 未利用地面积 1980—1990 年增长最为显著, 共增加 1054 km², 而 2015—2018 年减少 464 km²(图 2f)。

为全面了解西南地区土地利用空间格局变迁, 表 1 进一步展示了 1980—1990、2000—2005、2010—2015 年三个时段的该区域土地利用转移情况。1980—1990 年, 西南地区耕地总转出面积为 1254 km², 主要向草地和建设用地转移, 转移面积分别占总转出面积的 33% 和 29%; 林地总转出 1034 km², 主要转移为草地, 占总转出面积的 67%; 草地总转出 857 km², 主要转移为耕地和林地, 分别占总转出面积的 35% 和 44%; 水域总转出 2901 km², 主要转移为草地, 占总转出面积的 63%; 建设用地和未利用地的转出较少。2000—2005 年, 西南地区耕地总转出 2236 km², 主要转移为林地和

建设用地, 分别占总转出面积的 48% 和 34%; 林地总转出面积 956 km², 主要转移为草地, 占总转出面积的 69%; 草地总转出 2179 km², 主要转移为林地, 占总转出面积的 68%; 水域、建设用地和未利用地的转出较少。2010—2015 年, 西南地区耕地总转出 2632 km², 主要转移为建设用地, 占总转出面积的 87%; 林地总转出面积 865 km², 主要转移为建设用地, 占总转出面积的 60%; 草地总转出 730 km², 主要转移为建设用地和水域, 分别占总转出面积的 55% 和 36%。

从西南地区各土地利用类型的年际变化来看, 耕地以及建设用地的变化占主导地位。从 1980—1990、2000—2005、2010—2015 这三个时期的土地利用转移矩阵来看, 在早期年份间耕地、林地和草地三种土地利用类型之间的转移较为频繁, 建设用地面积存在一定程度的增加, 而在后期年份中以建设用地的增多为主, 各土地利用类型的转出为建设用

表 1 西南地区近四十年不同时段土地利用转移矩阵

Tab. 1 Land use transition matrix of different time periods for the past four decades in southwest China

(单位: km²)

时间段	土地利用面积						
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
1980—1990 年	耕地	278 181	251	408	206	369	24
	林地	302	509 053	690	6	10	26
	草地	297	380	300 464	53	45	82
	水域	46	90	1829	7638	2	934
	建设用地	8	0	1	0	4754	0
	未利用地	0	1	10	1	0	18 343
2000—2005 年	耕地	275 997	1066	394	23	753	0
	林地	223	506 747	658	8	51	16
	草地	511	1487	302 839	9	43	129
	水域	6	5	5	8012	9	0
	建设用地	3	4	2	3	6095	0
	未利用地	1	8	42	2	0	19 352
2010—2015 年	耕地	272 790	8	12	326	2284	2
	林地	14	509 052	50	279	522	0
	草地	15	6	302 915	265	440	4
	水域	13	0	14	8225	19	15
	建设用地	1	0	0	13	7643	0
	未利用地	0	1	0	2	4	19 570

地的面积在逐年增加并且水域、建设用地和未利用地的转出较少。

2.2 典型研究区背景场的确定

综合上述西南地区土地利用变化情况,本研究选取以城市化扩张为典型土地利用转变特征的区域开展气象要素响应分析。研究区包含以成都、重庆、昆明为中心的三个 0.5° 网格,其地理位置及范围如图 1c、1d、1e 所示。旨在去除西南地区整体气候趋势的影响,本研究通过分析不同范围背景场下的近地面气温距平,确定背景场最终范围。

2.2.1 不同范围成都、重庆和昆明城市中心区土地利用类型统计

图 3 中分别显示了本研究选取的以成都、重庆和昆明为中心的 0.5° 和 3° 网格空间范围下的土地利用情况。由图 3a 可知,成都中心区内 1980—2018 年土地利用变化主要表现为耕地向建设用地的转移,共增长了 712 km^2 ,建设用地扩张面积为 1980 年面积的 2.6 倍,其中 2000—2005 年以及 2015—2018 年的增长较为显著。从土地利用组成来看, 0.5° 成都中心区土地利用类型较单一,主要包括耕地和建设用地两种类型;随着范围的扩大, 3° 区域内包括了耕地、林地、草地、建设用地等土地利用

类型并且构成较为稳定,从时间序列上看,各土地利用类型未发生明显变化。重庆的情况类似,如图 3b 所示, 0.5° 重庆中心区内 1980—2018 年土地利用变化主要表现为耕地以及少部分林地向建设用地的转移,1980—1995 年建设用地增长较为缓慢,1995—2018 年各区域建设用地呈现稳步增长,1980—2018 年间建设用地共增长了 531 km^2 ,建设用地增长面积为 1980 年面积的 3.5 倍。重庆 3° 区域耕地为主要用地类型,其次是林地。昆明的土地利用情况与成都和重庆不同,如图 3c 所示,其 0.5° 中心区内 1980—2018 年土地利用变化主要表现为耕地、林地向建设用地的转移,大多数年份土地利用变化情况较为稳定,而 2015—2018 年间草地、耕地的减少和建设用地的增加较为明显。与成都、重庆城市中心区相比,昆明 0.5° 范围内城市化进程较为缓慢,1980—2018 年间建设用地共增长了 382 km^2 ,增长面积为 1980 年建设用地面积的 2 倍,且土地利用类型较复杂,存在滇池等大型湖泊。总的来说,三个典型区域在 0.5° 中心区内不同程度的城市化主导了过去几十年的土地利用类型转变,但随着背景场空间范围的扩大,其土地利用转变空间占比逐步减小并且组成较为稳定。

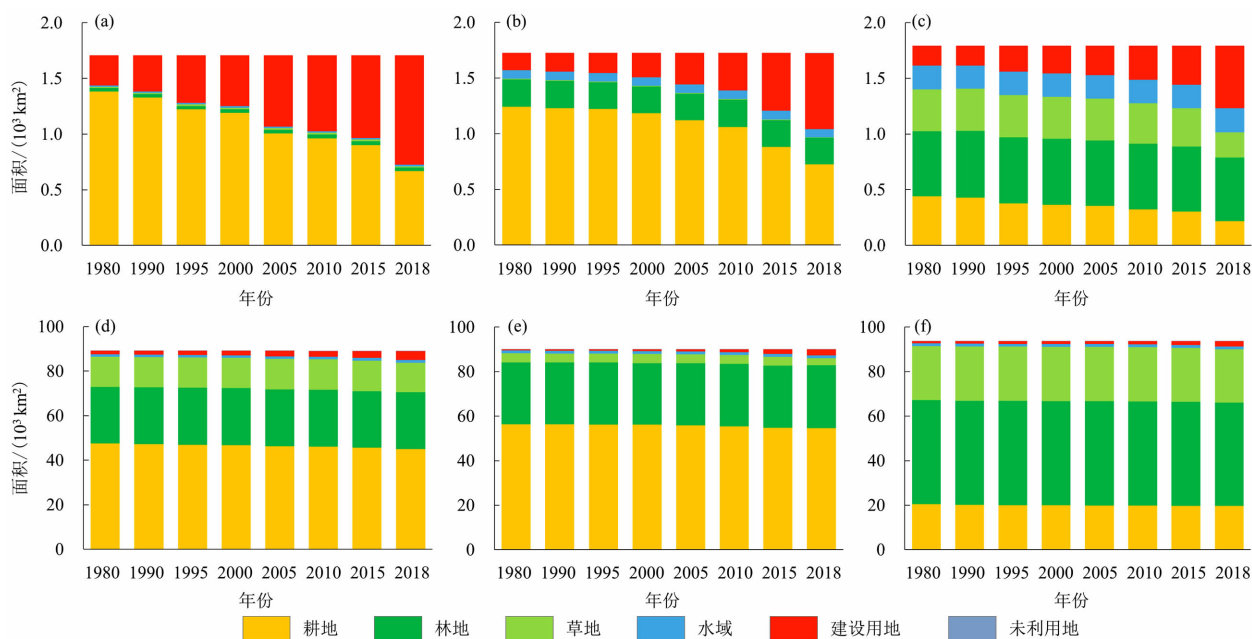


图 3 研究区不同空间范围下的土地利用变化情况:

(a)、(b)、(c) 分别为成都、重庆、昆明 0.5° 网格范围;(d)、(e)、(f) 分别为成都、重庆、昆明 3° 网格范围

Fig. 3 Land use changes within different spatial extents: (a), (b), and (c) the 0.5° urban center of Chengdu, Chongqing, and Kunming, respectively; (d), (e), and (f) the 3° background area of Chengdu, Chongqing, and Kunming, respectively

2.2.2 基于近地面气温距平分析确定背景场范围

本研究通过比较近地面气温距平来确定最终的研究区背景场范围。以成都 0.5° 网格中心区为例,图 4 中分别显示了以该区域为中心的 0.5° 、 1° 、 2° 、 3° 和 5° 网格范围内近地面气温距平变化(图 4a、4b)以及各尺度网格与 5° 、 3° 区域的近地面气温均方根偏差(Root Mean Squared Deviation, RMSD)(图 4c、4d)。从图 4a、4b 可以看到,不同空间范围的气温距平变化在 2000 年之前基本一致,而伴随城市化进程在 2000 年之后距平差异较为明显,此外, 3° 和 5° 范围距平变化较为一致。进一步计算不同空间范围与 5° 网格近地面气温距平 RMSD 可以发现,成都和昆明研究区随着范围的扩大,与 5° 范围的 RMSD 在逐渐减小,而重庆研究区不同范围 RMSD 变化趋势呈先增大后减小(图 4c)。重庆区域 RMSD 趋势与成都、昆明研究区不同的原因是其 5° 范围内包括了成都区域的大部分建设用地,其对背景场影响较大。

本研究进一步计算了不同范围与 3° 区域的气温距平 RMSD,发现三个研究区的 RMSD 都随范围的扩大而减小。据此,本研究最终选取 0.5° 网格范围为土地利用变化研究中心区, 3° 网格空间范围提供区域气候变化背景场。

2.3 局部土地利用变化下的水文气象响应

2.3.1 成都研究区土地利用变化下的气象要素变化特征

图 5 所示为以成都为中心的 0.5° 中心区和 3° 背景场范围内的各气象要素距平及相对变化量。对比发现:

(1)从图 5a 近地面气温距平来看,成都 0.5° 中心区与 3° 背景场范围均呈现上升趋势。在 2000 年之前,成都中心区近地面气温距平与背景场变化相似,结合图 3a 可以发现该时段内成都研究区土地利用单一,主要土地利用类型和背景场一致均为耕地,并且建设用地的变化较小。2000—2010 年,成都研

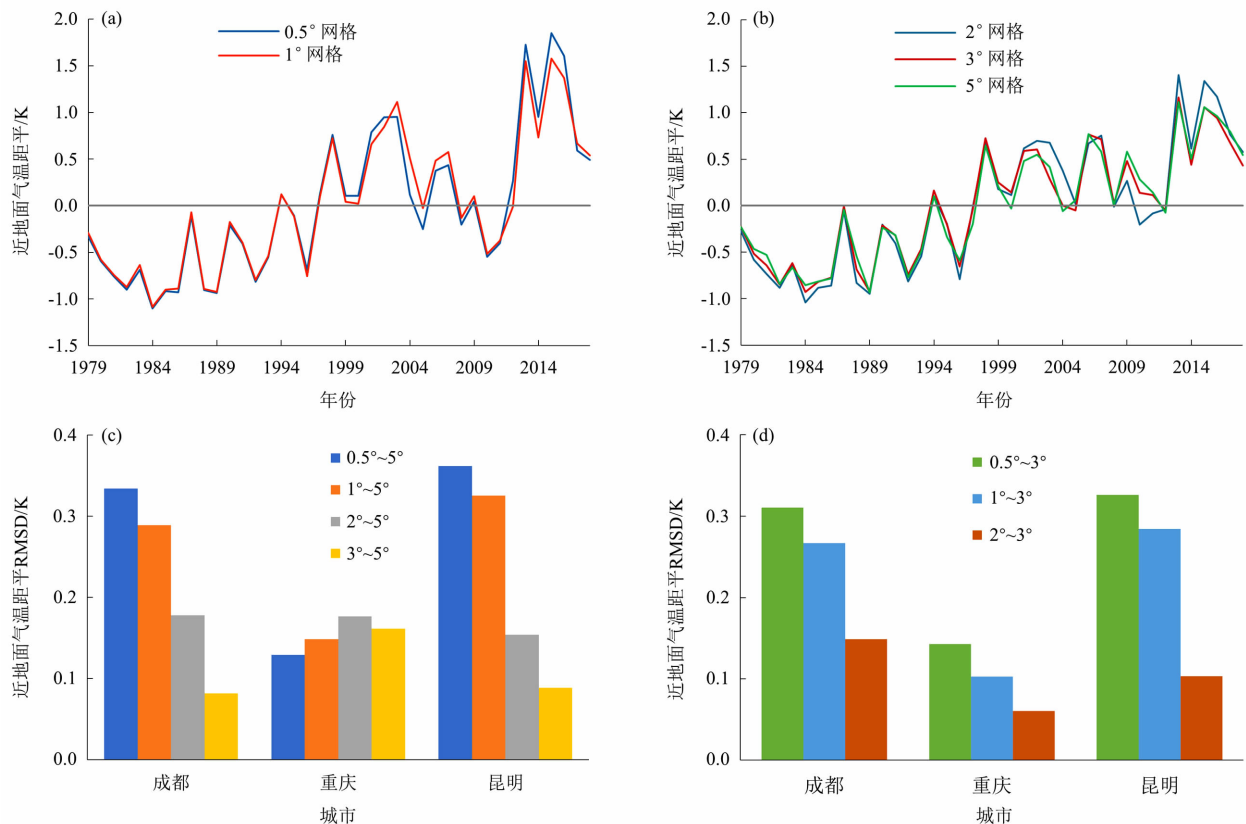


图 4 研究区不同周边范围内近地面气温距平分析:(a)成都 0.5° 、 1° 网格年际变化;(b)成都 2° 、 3° 、 5° 网格区域年际变化;

(c) 成都、重庆、昆明 0.5° 、 1° 、 2° 、 3° 和 5° 网格区域 RMSD;(d) 成都、重庆、昆明 0.5° 、 1° 、 2° 和 3° 网格区域 RMSD

Fig. 4 Results of anomaly analysis on near-surface air temperature in different range grids of the study areas: (a) interannual variations within the 0.5° and 1° grids in Chengdu; (b) interannual variations within the 2° , 3° , and 5° grids in Chengdu; (c) RMSD between the 0.5° , 1° , 2° , 3° , and 5° grids in Chengdu, Chongqing, and Kunming; (d) RMSD between the 0.5° , 1° , 2° , and 3° grids in Chengdu, Chongqing, and Kunming

究区以及背景场区域的近地面气温距平均出现明显波动且高于多年平均,但朝降温趋势发展,与此同时,研究区内波动范围更大且低于了背景场,两块区域近地面气温距平差值最大达 0.69 K。2010 年后,气温距平呈上升趋势且研究区内升温幅度较大,期间成都研究区建设用地增加了 300 km² 且大于前面两个时期建设用地的扩张面积,期间成都研究区气温距平高于了背景场并且最大差值达到了 0.78 K。2000 年后,研究区内气温距平变化较为波动,易产生较大幅度的升温或降温现象,并且与背景场的差异加大,其原因是受研究区建设用地增加以及土地利用类型组成较单一的影响,研究区内易受外界条件影响而造成气温的起伏变化,而背景场土地利用构成较复杂且空间分布基本稳定,因此其区域近地面气温变化较平稳。

(2)从图 5b 地面向下长波辐射来看,整体趋势与气温距平变化相近,两块区域呈现较大差异的年份与近地面气温距平变化具有较强的一致性。存在

变化一致性的主要原因是地面气温和长波辐射两者相互影响,地面气温升高导致长波辐射增强,而城市上空易聚集较多气溶胶,大气能够吸收大部分长波辐射而又作用于地面从而起到对地面的保温作用。2000—2010 年,研究区长波辐射距平低于了背景场,最大差值达到了 5.2 W·m⁻²。2012—2017 年,研究区长波辐射距平高于了背景场,该时段内两块区域的耕地都有所减少,但研究区建设用地占比较多且气温较高的影响,易存在较强的长波辐射,两块区域差值最高达 4.3 W·m⁻²。

(3)从图 5c 风速相对变化量来看,成都研究区以及背景场整体呈现上升趋势,在 2000 年之前风速未存在明显变化且均低于多年平均。1984—1995 年两块区域风速变化较为一致,该时段内研究区土地利用单一,以耕地为主要用地类型且土地利用构成与背景场较为类似。1995 年以后,近地面风速开始增加且高于了背景场,两区域差值最大达 22%,该期间内研究区建设用地增加,而背景场耕地、草地

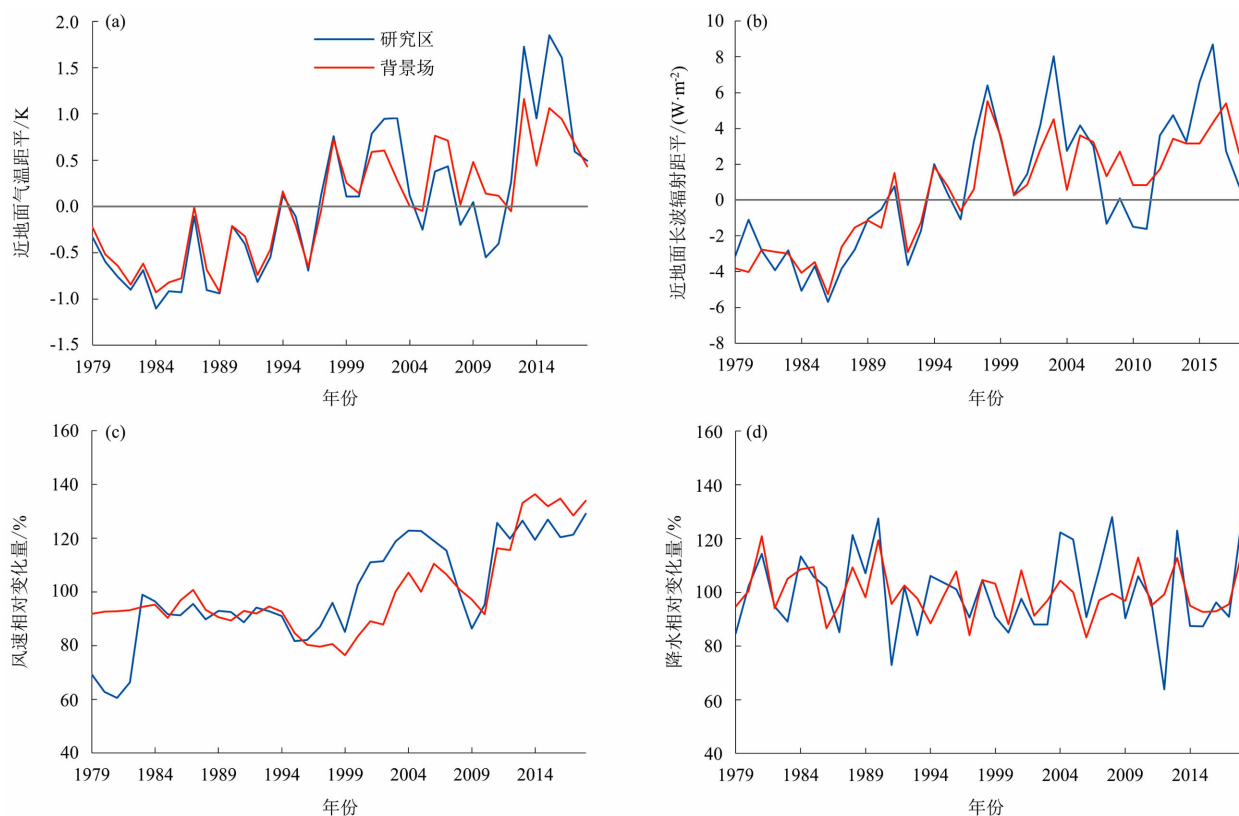


图 5 1979—2018 年成都 0.5° 和 3° 网格范围气象要素统计量变化趋势:

(a) 气温距平; (b) 长波辐射距平; (c) 风速相对变化量; (d) 降水相对变化量

Fig. 5 Temporal evolution of meteorological statistics for the 0.5° and 3° grids in Chengdu from 1979 to 2018; (a) air temperature anomaly;

(b) longwave radiation anomaly; (c) relative difference of wind speed; (d) relative difference of precipitation

面积减少。于 2007 年左右,两块区域近地面全风速变化逐渐趋于一致,此时研究区建设用地增长减缓,其他土地利用变化趋于平稳。2010 年后,近地面风速低于背景场,最大差值为 17%,在后期两区域差值稳定到 10% 左右,该时段内成都城市化进程导致地面粗糙度的增大以及城市下垫面热力特征发生改变使得其风速变化相对是减小的,从而导致了研究区内较弱的风速变化量。

(4)从图 5d 降水相对变化量来看,成都研究区及背景场整体波动明显。在 2000 年后,两块区域的降水相对变化量差异较为显著。在 2004 年后研究区降水波动最为剧烈且与背景场的差值较大,2000—2010 年间成都研究区降水相对变化量高于背景场,最大差值达到了 20%。在 2010—2018 年,成都研究区降水相对变化量低于背景场,最大差值达到了 17%。成都研究区内降水量的过强波动性,这可能是该区域内降水频次减少而集中性降水累计量增大所导致的,从而使得降水变化较大并且其相

对变化量的差异增大,1979—2018 年间降水最大相对变化量和最大差值为 130% 和 40%。

2.3.2 重庆研究区土地利用变化下的气象要素变化特征

图 6 所示为以重庆为中心的 0.5° 中心区和 3° 背景场范围内的各气象要素变化对比。从这 4 个气象要素的整体变化趋势来看,重庆区域与成都区域存在相似特征,但重庆研究区与背景场的气象要素差异较小,变化趋势也较平稳。

(1)图 6a 为近地面气温距平变化。在 2000 年之前,重庆背景场近地面气温距平略高于研究区且均低于各自区域的多年平均,该时段内两区域各类土地利用转变未存在明显变化。2000 年以后,研究区与背景场气温距平均大于多年平均而且研究区气温距平高于了背景场,两块区域最大差值达 0.40 K 。两块区域气温差异增大存在两方面的原因:研究区内不断增加的建筑用地所导致较大幅度的升温;背景场包含更大面积的林地,进而对升温存在一定的

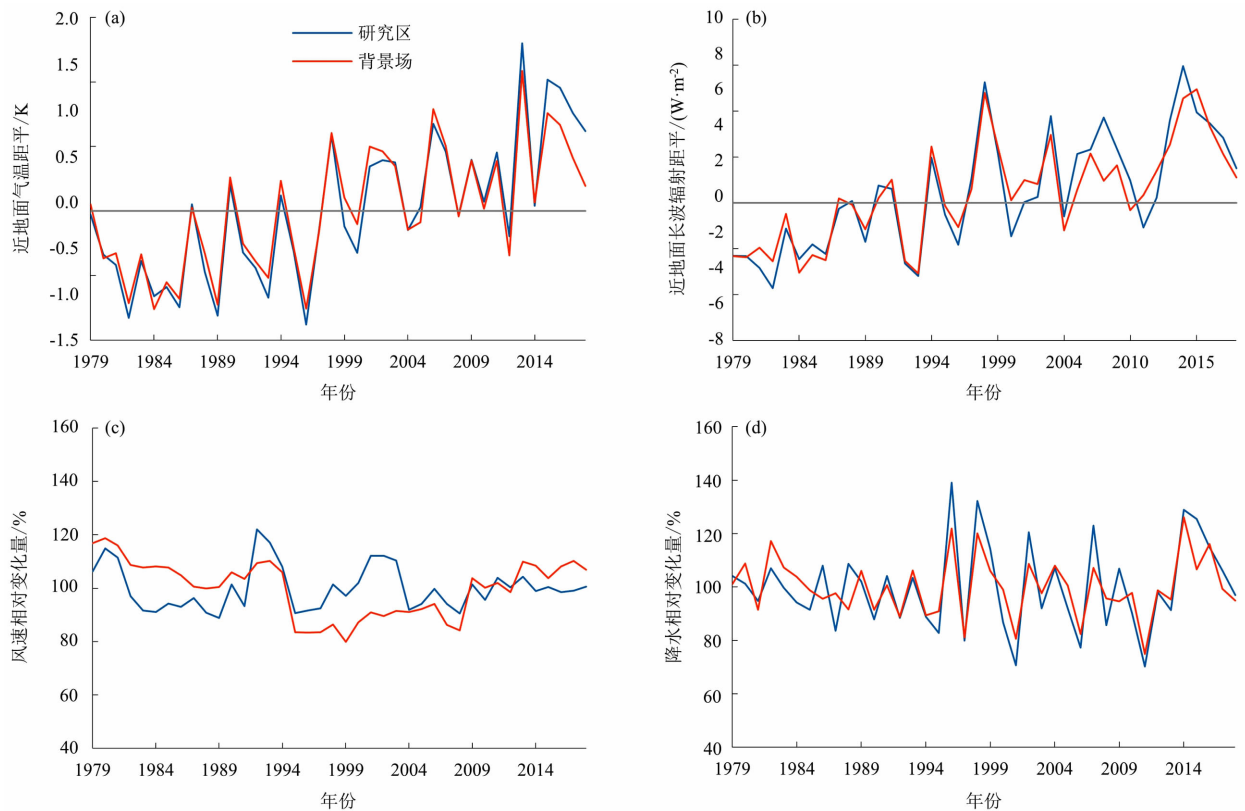


图 6 1979—2018 年重庆 0.5° 和 3° 网格范围气象要素统计量变化趋势:

(a) 气温距平; (b) 长波辐射距平; (c) 风速相对变化量; (d) 降水相对变化量

Fig. 6 Temporal evolution of meteorological statistics for the 0.5° and 3° grids in Chongqing from 1979 to 2018: (a) air temperature anomaly; (b) longwave radiation anomaly; (c) relative difference of wind speed; (d) relative difference of precipitation

抑制作用。从图 6b 地面向下长波辐射来看,两块区域的变化基本一致,后期年份其变化幅度较大,最大差值达 $1.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

(2)从图 6c 风速相对变化量来看,重庆研究区和背景场均整体呈下降趋势且前期变化波动较大,2009 年后变化较相近。1995 年前,研究区风速相对变化量大部分时间是低于背景场,差值最大达 13%,期间土地利用变化不明显,建筑用地有略微的增加。1995—2009 年,研究区风速相对变化量高于了背景场,差值最大达 22%,期间存在耕地等植被转移为建筑用地,该时段内风速的变化与建筑用地的增多以及耕地等植被的减少有一定关联。2009—2018 年,研究区风速相对变化量低于了背景场,差值稳定在 10% 左右,期间研究区仍是耕地向建筑用地的转移,而背景场表现为林地向耕地和建筑用地的转移。

(3)从图 6d 降水相对变化量来看,相较成都区域波动性更大,最大相对变化量可达 140%。1995

年前两块区域波动较小且有略微下降趋势,2000 年后波动较剧烈且研究区降水较多。

2.3.3 昆明研究区土地利用变化下的气象要素变化特征

图 7 为昆明研究区及背景场各气象要素变化,其变化与前两个研究区较为不同,昆明研究区域与背景场差异更为显著。

(1)从图 7a 近地面气温距平来看,两块区域内气温波动变化较剧烈且整体呈上升趋势。在 2010 年之前,研究区气温距平与背景场相差较大,其原因与早期研究区内滇池等水体与大气的热交换占主导地位有一定关联,两块区域气温差值最高达 0.58 K。1993—2010 年研究区气温距平高于背景场,期间背景场耕地面积减少,昆明城市化的发展导致研究区建筑用地面积的增加进而促使气温升高。2010 年以后,研究区气温距平与背景场变化较为相似,2010—2018 年间研究区与背景场的建筑用地面积增加且增长较缓慢平稳,而研究区内水体面积增

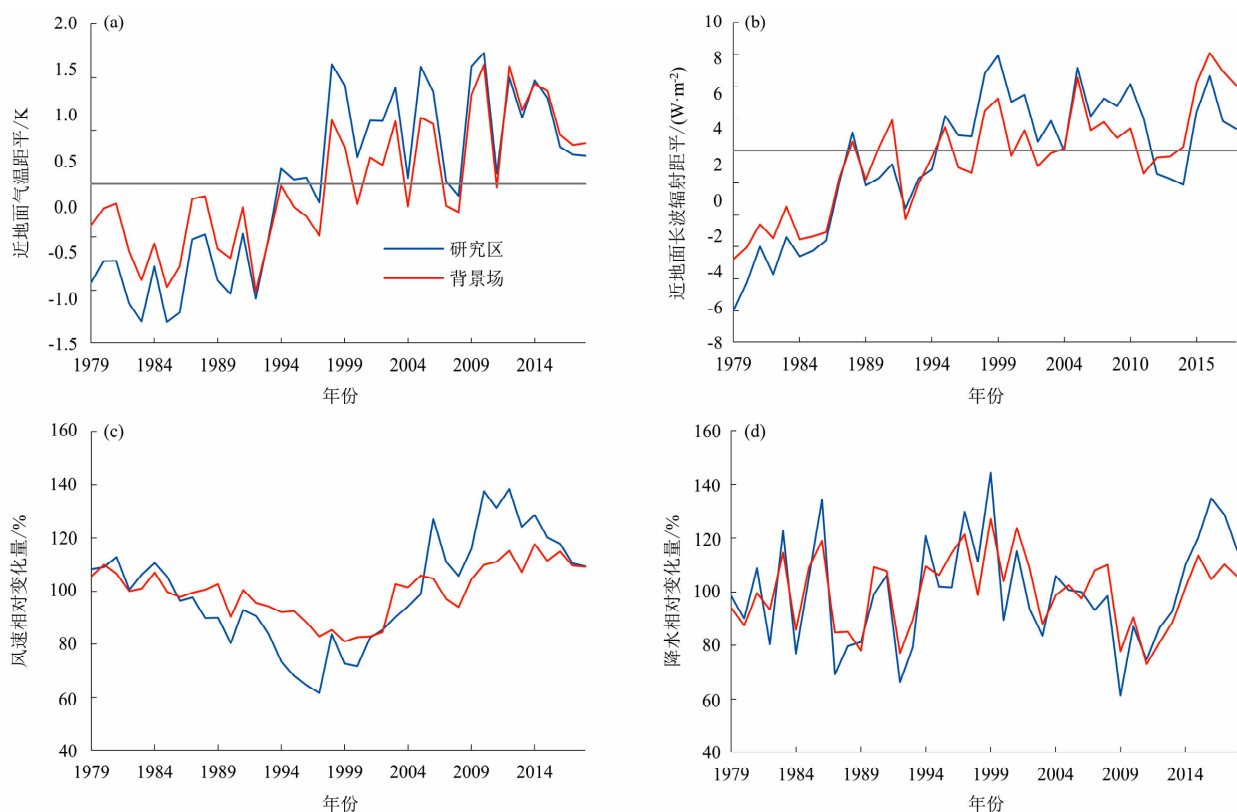


图 7 1979—2018 年昆明 0.5° 和 3° 网格范围气象要素统计量变化趋势:

(a) 气温距平; (b) 长波辐射距平; (c) 风速相对变化量; (d) 降水相对变化量

Fig. 7 Temporal evolution of meteorological statistics for the 0.5° and 3° grids in Kunming from 1979 to 2018: (a) air temperature anomaly;

(b) longwave radiation anomaly; (c) relative difference of wind speed; (d) relative difference of precipitation

大可能导致其对局地气候影响加强,气温逐渐趋于背景场水平。从图 7b 长波辐射来看,两块区域变化较为剧烈且差异较大,差值最大达 $3.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

(2)从图 7c 风速相对变化量来看,两块区域均呈现先下降后升高的趋势,研究区整体趋势变化更为剧烈。2000 年之前由于昆明水域面积缩小,水体与大气热力差异以及对气候的调节作用减弱。同时,建筑用地面积增多增大了地面粗糙度,使得近地面风速减小,两区域差值增大且最高达 20%。2000—2015 年,研究区各土地利用类型均未发生明显变化但水体面积有略微增加,水体与上层大气热力作用形成较强的湖陆风,从而导致昆明研究区风速增大,与背景场差值最大达 27%。2015—2018 年研究区近地面风速逐步减小至趋近于背景场,这可能是该时期研究区和背景场的建筑用地增加而草地减少,使得地面粗糙度增加而进一步减弱了研究区风速。

(3)昆明研究区及背景场的土地利用类型构成

复杂因而降水变化趋势均较波动,从图 7d 降水相对变化量来看,研究区降水相对更多,2015 年往后其差异在增大,这可能与研究区水体面积增大其与大气活动更加频繁易产生更多降水存在一定关联,差值最高达 30%。

3 讨论

3.1 不同研究区土地利用变化对气候影响的横向比较

为了进一步分析土地利用变化对气象要素的综合影响,本研究计算了前面三个以城市为中心 0.5° 和 3° 范围的各气象要素差值,以探究其在不同城市中心区下气象要素的响应规律。虽然在不同区域,城市化发展过程中气象要素的变化不尽相同,但从长年的变化趋势能发现相似规律。图 8 为不同研究区气象要素差值的时间序列,可以看出,各气象要素差值整体均呈现一定程度的上升趋势,其中昆明研

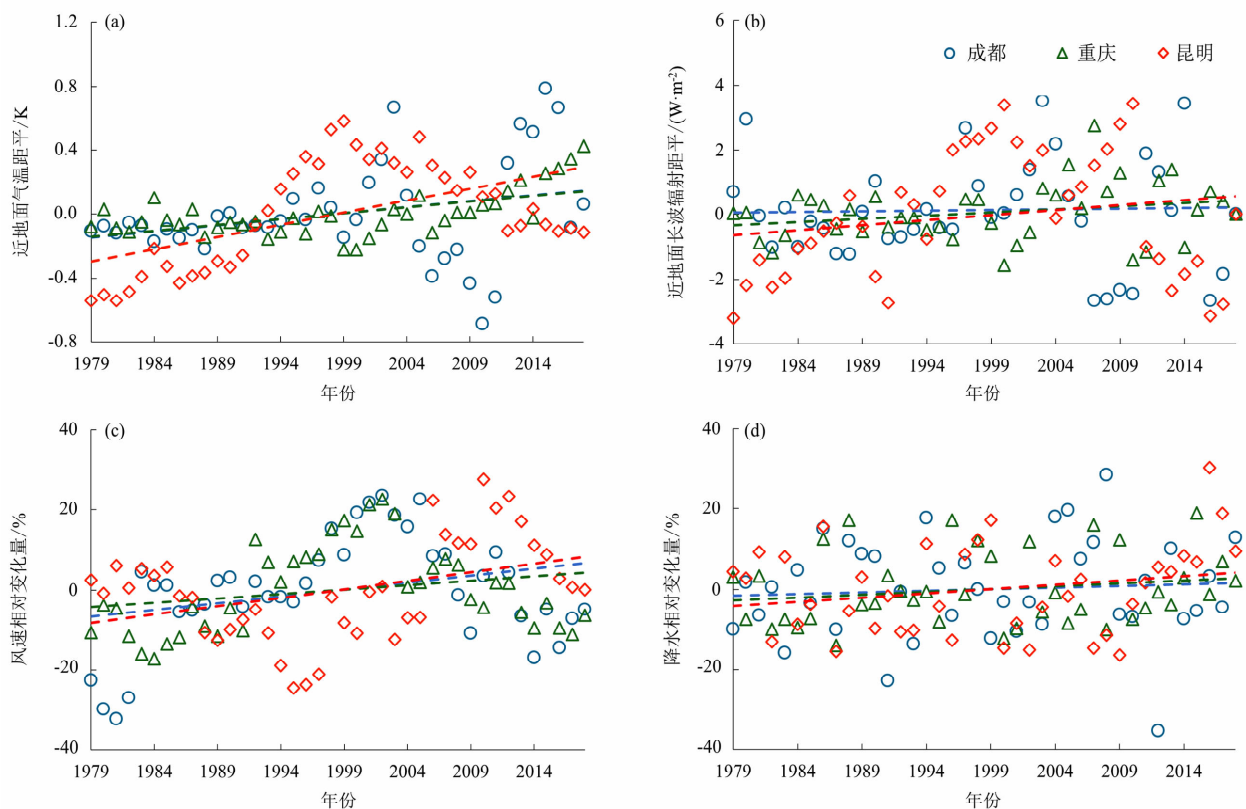


图 8 1979—2018 年研究区 0.5° 和 3° 网格范围气象要素统计量差异变化趋势:

(a) 气温距平; (b) 近地面长波辐射距平; (c) 风速相对变化量; (d) 降水相对变化量

Fig. 8 Temporal evolution of meteorological differences between the 0.5° and 3° grids from 1979 to 2018: (a) air temperature anomaly;

(b) longwave radiation anomaly; (c) relative difference of wind speed; (d) relative difference of precipitation

究区在各气象要素差值变化中变化速率较大,而成都与重庆研究区的气温、长波辐射以及降水的差值变化相似。昆明研究区相较于其他两个研究区在一些气象要素上存在变化差异,如近地面气温距平逐年上升,但是与背景场的差异更接近了,风速呈现先下降再升高的趋势。这可能与昆明区域有着滇池等水体对于气候的调节作用有关,具体原因都还需要进一步的探讨。

3.2 背景场选取的合理性分析

本研究中对比了有限个不同范围的背景场,同时在前面的分析中并未考虑到划分形状的问题,因此,这里对背景场选取范围及形状的合理性进行讨论。

随着背景场划分范围的扩大,主要考虑的是气象要素变化的差异性,当范围足够大时,在较大范围内的气象要素变化趋于一致。从图 4b、4d 成都 2°、3°、5° 网格范围近地面气温距平来看,3° 和 5° 范围的距平变化在年际变化上较为一致并且 RMSD 较小。从图 9a 等距离划分的情况下与 0.5° 网格气温距平 RMSD 来看,随着划分范围的扩大,RMSD 的值越来越大。当背景场范围大于 3° 时,气温距平 RMSD 的值相近,因此选定背景场范围为 3° 是合理的。

在前面研究中,为了便于数据的处理以及分析,研究区和背景场是以矩形划分的。但是从土地利用对于气候的实际影响范围来看,以圆形范围划分也存在一定的合理性,因此针对不同划分形状(矩形、圆形)下的气象要素变化影响进行了如下分析,从图 9b 可以看出,在 0.5° 范围内不同划分形状(圆

形、矩形)下的气温距平变化高度重合。当范围扩大到 3° 时,矩形和圆形划分形状下的距平变化也较为一致。从不同划分形状 0.5° 和 3° 范围的距平差值来看,数值整体相近,分析中不涉及具体到特定年份的差值,所以结果并未存在较大差异。因此,在针对研究区以及背景场各气象要素的分析对于划分形状并不敏感。与此同时,将成都 3° 背景场中研究区范围去除计算得到的气温距平变化与未去除的结果高度重合。在 3° 网格范围内而言,城市中心区建设用地占比较小,基本可以忽略。从这点来看,是否包含背景场对于结果分析及结论的影响较小。另一方面,大的背景场实际上也应包含中心研究区的多年变化信息。综合以上考虑,本研究在提取背景场信息时未对中心区单独做去除处理。

3.3 国内其他区域同类研究横向对比

重庆和成都研究区的近地面气温距平、长波辐射距平和降水相对变化量的变化较为相似,均呈现出上升并且与背景场差异增大的趋势。城市化对于局地气温的影响与前人的发现一致,如早期研究发现石家庄 1965—2012 年城市化对于升温的贡献率为 100%,且城市年均温度的增加完全是由城市化引起的^[36]。从降水来看,两个城市中心区降水相对变化量在 90 年代末均表现波动,整体波动范围较大。其他研究从更小时间尺度得到了相似的结果,如前期研究发现长三角热岛活动通过加强城市化地区的辐合和上升气流,增加了夏季极端降水的发生频率^[37]。此外,有研究发现城市化对降水的影响随城市化类型的不同而不同,在 2011—2015 年北京市

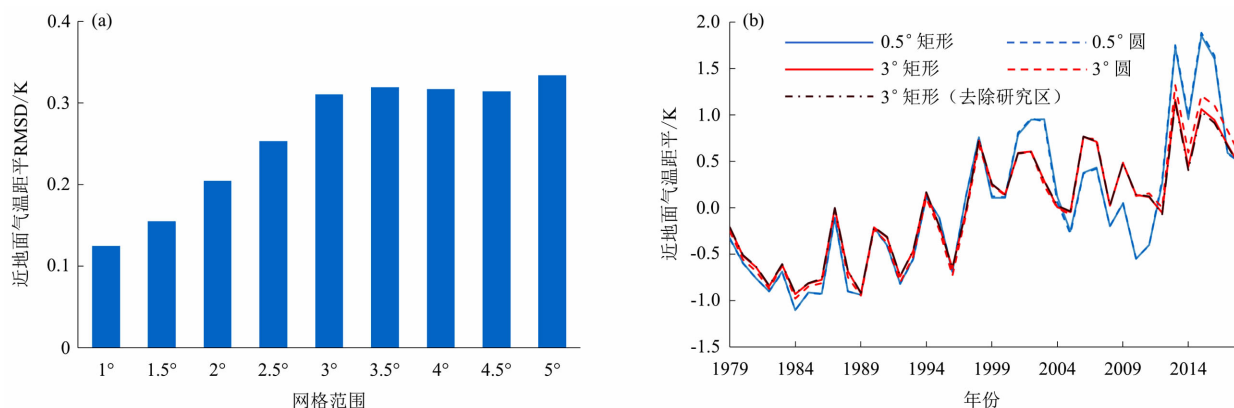


图9 成都 0.5° 与不同范围网格近地面气温距平分析:

(a) 不同范围网格和 0.5° 网格 RMSD; (b) 不同形状 0.5° 和 3° 网格的年际变化

Fig. 9 Results of anomaly analysis on near-surface air temperature between 0.5° and different range grids in Chengdu:

(a) RMSD between the different range grids and 0.5° grid; (b) interannual variations within different shapes of the 0.5° and 3° grids

人口密度最高的城区主要是降水持续时间稍长,降水强度较高,降水量较大,连续干旱日延长^[38]。在针对城市风速的变化研究中,不同学者发现随着城市的不断发展和建筑高度的提升,其总体平均风速逐渐下降^[39-40]。本研究发现成都研究区局地风速相比于周边区域在 1979—2018 年呈现上升趋势(2013—2018 年相对变化量小于背景场),这可能与整个四川盆地以及周边青藏高原大地形背景下的大尺度天气气候系统有关。同时,前述昆明研究区与成都和重庆在各气象要素局地空间特征上的差异还可能与当地复杂的土地利用情况有关。这些地形和复杂土地利用情形下的土地利用转变对局地气象要素的影响还有待进一步探讨。

4 结论与展望

本研究通过对西南地区近四十年土地利用情况进行分析,选取了成都、重庆以及昆明三个典型城市中心区探究其土地利用变化下对局地气象要素的影响。主要结论如下:

(1)西南地区主要用地类型为林地,约占该区域总面积的 45%。在 1980—2018 年间,西南地区土地利用变化主要表现为耕地减少,减少面积约为 8231 km²,建设用地增加,增加面积约为 10 133 km²。早期耕地、林地和草地三种土地利用类型的转移较为频繁,其中 2000—2005 年间草地转移为林地最为显著,转移面积为 1487 km²。2010—2015 年间各土地利用类型转移为建设用地较为显著,其中耕地转移面积最大为 2284 km²。

(2)成都、重庆、昆明区域的土地利用尤其是城市化进程对局地气象要素产生了不同程度的影响。随着城市化进程加快,这三个城市升温速率增大且气温距平高于多年平均,其中成都研究区与背景场差异最大达 0.78 K。长波辐射变化趋势与地面气温的变化基本一致。风速、降水差异整体呈上升趋势,年际波动更大,且存在较强的地域差异。成都、重庆、昆明研究区分别与背景场风速的最大差值为 22%、10%、27%,成都、昆明研究区降水差异最大值为 40%、30%,重庆研究区降水差异较小。与此同时,昆明由于本身土地利用的复杂性尤其是大面积水体的存在而呈现出与成都和重庆不同的局地气象影响空间差异。

本研究还存在一定局限性。首先,本研究所使用的再分析数据,虽然融合了地面站点的数据,但其产品精度和不确定性在整个西南区域,尤其是稀疏地面观测地区,仍有待评估。其次,本研究重点关注城市化背景下的气象要素,而其他土地利用类型转变下的影响有待进一步探究。

总体而言,西南地区的土地利用变化尤其是城市化进程加剧了局地气象条件的空间差异。西南地区土地利用覆被复杂,同时也是重要的生态屏障,气候变化与区域环境变化以及人民生活等一系列重大问题息息相关。城镇发展往往涉及各类土地利用覆被类型的变化,需结合当地的气候气象特征并考虑未来气象变化的发展趋势进行充分调研,系统分析不同土地利用背景下的陆气反馈,科学合理地进行用地管理和城镇规划。

参考文献 (References)

- [1] 华文剑,陈海山,李兴. 中国土地利用/覆盖变化及其气候效应的研究综述[J]. 地球科学进展, 2014, **29**(9): 1025 - 1036. [HUA Wenjian, CHEN Haishan, LI Xing. Review of land use and land cover change in China and associated climatic effects [J]. Advances in Earth Science, 2014, **29**(9): 1025 - 1036] DOI: 10.11867/j. issn. 1001 - 8166. 2014. 09. 1025
- [2] 陈佑启,杨鹏. 国际上土地利用/土地覆盖变化研究的新进展[J]. 经济地理, 2001, **21**(1): 95 - 100. [CHEN Youqi, YANG Peng. Recent progresses of international study on land use and land cover change (LUCC) [J]. Economic Geography, 2001, **21**(1): 95 - 100] DOI: 10.15957/j. cnki. jjdl. 2001. 01. 021
- [3] FOLEY J A, DEFRIES R, ASNER G P, et al. Global consequences of land use [J]. Science, 2005, **309**(5734): 570 - 574. DOI: 10.1126/science.1111772
- [4] 熊勇珍,陈传明. 土地利用与土地覆被变化研究综述[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版), 2008, **8**(6): 117 - 121. [XIONG Yongzhen, CHEN Chuanming. Preliminary study of LUCC [J]. Journal of Langfang Normal University (Natural Science Edition), 2008, **8**(6): 117 - 121]
- [5] 张耀存,傅小锋. 苏南地区土地利用状况变化对区域气候环境的可能影响[J]. 地球科学进展, 1998, **13**(4): 409 - 411. [ZHANG Yaocun, FU Xiaofeng. The possible impacts of land use change on the regional climate and environment in southern Jiangsu [J]. Advances in Earth Science, 1998, **13**(4): 409 - 411] DOI: 10.3321/j. issn:1001 - 8166. 1998. 04. 016
- [6] ZHOU L M, DICKINSON R E, TIAN Y H, et al. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, **101**(26): 9540 - 9544. DOI: 10.1073/pnas.

0400357101

- [7] 李艳菊,丁建丽,张钧泳,等. 2001—2015 年天山北坡植被覆盖对干旱的响应——基于土地利用/土地覆盖分析[J]. 生态学报,2019,**39**(17):6206–6217. [LI Yanju, DING Jianli, ZHANG Junyong, et al. Response of vegetation cover to drought in the northern slope of the Tianshan Mountains during 2001—2015 based on the land-use and land-cover change [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(17):6206–6217] DOI: 10.5846/stxb201811112442
- [8] 敖雪,翟晴飞,崔妍,等. 城市化对辽宁省近地面风速的影响分析[J]. 气象,2020,**46**(9):1153–1164. [AO Xue, ZHAI Qingfei, CUI Yan, et al. Analysis of urbanization effect on near-surface wind speed change in Liaoning province [J]. *Meteorological Monthly*, 2020, **46**(9):1153–1164] DOI: 10.7519/j.issn.1000–0526.2020.09.003
- [9] 路中,雷国平,郭一洋,等. 不同空间尺度松嫩平原土地利用强度变化及其对气候因子的影响[J]. 生态学报,2021,**41**(5):1894–1906. [LU Zhong, LEI Guoping, GUO Yiyang, et al. Changes of land use intensity in the Songnen Plain of different spatial scales and their effects on climatic factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(5):1894–1906] DOI: 10.5846/stxb201911022309
- [10] 翟俊,邵全琴,刘纪远. 内蒙古高原土地利用/覆被变化对气温变化的影响分析[J]. 自然资源学报,2014,**29**(6):967–978. [ZHAI Jun, SHAO Quanqin, LIU Jiyuan. Impact analysis of climate change from land use/cover change in Inner Mongolia Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, **29**(6):967–978] DOI: 10.11849/zrzyxb.2014.06.006
- [11] 杨满根. 气候变化和土地利用变化背景下淮河流域中上游径流变化研究[D]. 南京:南京大学,2014:132–146. [YANG Mangen. The runoff change under climate change and land-use and land-cover change in the Huaihe River Basin [D]. Nanjing: Nanjing University, 2014:132–146]
- [12] HU Jingyi, WU Yiping, WANG Lijing, et al. Impacts of land-use conversions on the water cycle in a typical watershed in the southern Chinese Loess Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, **593**:125741. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125741
- [13] HUNTINGTON T G. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, **319**(1):83–95. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.07.003
- [14] SONG Lisheng, LI Yan, REN Yanghang, et al. Divergent vegetation responses to extreme spring and summer droughts in southwestern China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, **279**(15):107703. DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.107703
- [15] 黄荣辉,刘永,王林,等. 2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析[J]. 大气科学,2012,**36**(3):443–457. [HUANG Ronghui, LIU Yong, WANG Lin, et al. Analyses of the causes of severe drought occurring in southwest China from the fall of 2009 to the spring of 2010 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2012, **36**(3):443–457]
- [16] 黄小梅,仕仁睿,刘思佳,等. 西南地区夏季高温热浪时空分布特征及其成因[J]. 高原山地气象研究,2020,**40**(3):59–65. [HUANG Xiaomei, SHI Renrui, LIU Sijia, et al. Spatial-temporal characteristics and causes of summer heat waves in southwest China [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2020, **40**(3):59–65] DOI: 10.3969/j.issn.1674–2184.2020.03.009
- [17] 包浪,王楠,倪志耀,等. 青藏高原隆升对我国西南地区气候的影响——从季风角度研究[J]. 地球环境学报,2018,**9**(5):444–454. [BAO Lang, WANG Nan, NI Zhiyao, et al. Influence of the Tibetan Plateau uplift on climate evolution in southwestern China: From the monsoon perspective [J]. *Journal of Earth Environment*, 2018, **9**(5):444–454] DOI: 10.7515/JEE181006
- [18] 龙园,严锐,任倩,等. 我国西南地区春季降水对前期青藏高原热力作用的响应[J]. 中低纬山地气象,2019,**43**(4):10–16. [LONG Yuan, YAN Rui, REN Qian, et al. The response of spring precipitation over southwest China to surface heating effect of Qinghai–Tibet Plateau [J]. *Mid-low Latitude Mountain Meteorology*, 2019, **43**(4):10–16] DOI: 10.3969/j.issn.1003–6598.2019.04.002
- [19] 陆双飞,陈禹衡,周斯怡,等. 西南地区松属乔木对气候变化的响应[J]. 森林与环境学报,2020,**40**(5):466–477. [LU Shuangfei, CHEN Yuheng, ZHOU Siyi, et al. Responses of pinus species to climate change in southwestern China [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2020, **40**(5):466–477] DOI: 10.13324/j.cnki.jfcf.2020.05.003
- [20] 张曦月. 西南地区不同植被类型对气候变化及季风系统的响应[D]. 北京:北京林业大学,2020:33–47. [ZHANG Xiyue. Responses of different vegetation types to climate change and monsoon systems in southwest China [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020:33–47]
- [21] 曹云,钱永兰,孙应龙,等. 基于 MODIS NDVI 的西南森林植被时空变化特征及其气候响应分析[J]. 生态环境学报,2020,**29**(5):857–865. [CAO Yun, QIAN Yonglan, SUN Yinglong, et al. Spatial-temporal variations of forest vegetation and climatic driving force analysis in southwest China based on MODIS NDVI and climate data [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, **29**(5):857–865] DOI: 10.16258/j.cnki.1674–5906.2020.05.001
- [22] 马海云,张林林,魏学琼,等. 2000–2015 年西南地区土地利用与植被覆盖的时空变化[J]. 应用生态学报,2021,**32**(2):618–628. [MA Haiyun, ZHANG Linlin, WEI Xueqiong, et al. Spatial and temporal variations of land use and vegetation cover in southwest China from 2000 to 2015 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(2):618–628] DOI: 10.13287/j.1001–9332.202102.017
- [23] 贺敏,宋立生,王展鹏,等. 基于多源数据的干旱监测指数对比研究:以西南地区为例[J]. 自然资源学报,2018,**33**(7):

- 1257 – 1269. [HE Min, SONG Lisheng, WANG Zhanpeng, et al. Evaluation of drought monitoring indices based on multi-source data in southwest China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, **33**(7):1257 – 1269] DOI: 10.31497/zrzyxb.20170526
- [24] WANG Lin, CHEN Wen, ZHOU Wen, et al. Drought in southwest China: A review [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2015, **8**(6):339 – 344. DOI: 10.3878/AOSL20150043
- [25] 杨庆媛. 西南丘陵山区土地整理与区域生态安全研究[J]. *地理研究*, 2003, **22**(6):698 – 708. [YANG Qingyuan. A study on the issue of land consolidation and eco-security in hilly and mountainous regions of southwest China [J]. *Geographical Research*, 2003, **22**(6):698 – 708]
- [26] 林子雁, 肖斌, 饶恩明, 等. 中国西南地区不同类型生态系统服务的关系[J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(3):978 – 986. [LIN Ziyang, XIAO Yi, RAO Enming, et al. Relationships among different types of ecosystem service in southwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(3):978 – 986] DOI: 10.13287/j.1001 – 9332.202003.015
- [27] 刘晓琼, 孙曦亮, 刘彦随, 等. 基于 REOF – EEMD 的西南地区气候变化区域分异特征[J]. *地理研究*, 2020, **39**(5):1215 – 1232. [LIU Xiaoqiong, SUN Xiliang, LIU Yansui, et al. Spatial division of climate change and its evolution characteristics in southwest China based on REOF – EEMD [J]. *Geographical Research*, 2020, **39**(5):1215 – 1232] DOI: 10.11821/dlyj020190387
- [28] 朱林富, 谢世友, 杨华, 等. 基于 MODIS EVI 的重庆植被覆盖变化的地形效应[J]. *自然资源学报*, 2017, **32**(12):2023 – 2033. [ZHU Linfu, XIE Shiyu, YANG Hua, et al. The response of dynamic change in vegetation coverage to topography in Chongqing based on MODIS EVI [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, **32**(12):2023 – 2033] DOI: 10.11849/zrzyxb.20161215
- [29] 陶云, 唐川, 段旭. 云南滑坡泥石流灾害及其与降水特征的关系[J]. *自然灾害学报*, 2009, **18**(1):180 – 186. [TAO Yun, TANG Chuan, DUAN Xu. Landslide and debris flow hazards in Yunnan and their relationship with precipitation characteristics [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2009, **18**(1):180 – 186] DOI: 10.13577/j.jnd.2009.0128
- [30] 刘纪远, 张增祥, 徐新良, 等. 21 世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J]. *地理学报*, 2009, **64**(12):1411 – 1420. [LIU Jiyuan, ZHANG Zengxiang, XU Xinliang, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China in the early 21st century [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, **64**(12):1411 – 1420]
- [31] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010 – 2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J]. *地理学报*, 2018, **73**(5):789 – 802. [LIU Jiyuan, NING Jia, KUANG Wenhui, et al. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010 – 2015 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(5):789 – 802] DOI: 10.11821/dlxb201805001
- [32] HE Jie, YANG Kun, TANG Wenjun, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China [J]. *Scientific Data*, 2020, **7**(25):1 – 10. DOI: 10.1038/s41597 – 020 – 0369 – y
- [33] XUE Baolin, WANG Lei, YANG Kun, et al. Modeling the land surface water and energy cycles of a mesoscale watershed in the central Tibetan Plateau during summer with a distributed hydrological model [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(16):8857 – 8868. DOI: 10.1002/jgrd.50696
- [34] 赵捷, 徐宗学, 左德鹏. 黑河流域潜在蒸散发量时空变化特征分析[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2013, **49**(2/3):164 – 169. [ZHAO Jie, XU Zongxue, ZUO Depeng. Spatiotemporal variation of potential evapotranspiration in the Heihe River basin [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2013, **49**(2/3):164 – 169]
- [35] 王留杰, 张行南, 方园皓, 等. 中国区域地面气象要素数据集在长江上游流域的适用性评估[J]. *水力发电*, 2017, **43**(3):18 – 22. [WANG Liujie, ZHANG Xingnan, FANG Yuanhao, et al. Applicability assessment of China meteorological forcing dataset in upper Yangtze River basin [J]. *Water Power*, 2017, **43**(3):18 – 22] DOI: 10.3969/j.issn.0559 – 9342.2017.03.005
- [36] BIAN Tao, REN Guoyu, YUE Yanxia. Effect of urbanization on land-surface temperature at an urban climate station in north China [J]. *Boundary – Layer Meteorology*, 2017, **165**(3):553 – 567. DOI: 10.1007/s10546 – 017 – 0282 – x
- [37] ZHONG Shi, QIAN Yun, ZHAO Chun, et al. Urbanization-induced urban heat island and aerosol effects on climate extremes in the Yangtze River Delta region of China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(8):5439 – 5457. DOI: 10.5194/acp – 17 – 5439 – 2017
- [38] ZHU Xiudi, ZHANG Qiang, SUN Peng, et al. Impact of urbanization on hourly precipitation in Beijing, China: Spatiotemporal patterns and causes [J]. *Global and Planetary Change*, 2019, **172**:307 – 324. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2018.10.018
- [39] LI Zhen, YAN Zhongwei, TU Kai, et al. Changes in wind speed and extremes in Beijing during 1960 – 2008 based on homogenized observations [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, **28**(2):408 – 420. DOI: 10.1007/s00376 – 010 – 0018 – z
- [40] LI Zhengquan, SONG Lili, MA Hao, et al. Observed surface wind speed declining induced by urbanization in east China [J]. *Climate Dynamics*, 2018, **50**(3 – 4):735 – 749. DOI: 10.1007/s00382 – 017 – 3637 – 6

Urbanization Magnifies Spatial Variations of Local Meteorological Conditions in Southwest China

WANG Jing^{1a,1b,1c}, ZHAO Long^{1a,1b,1c*}, WU Hui², DONG Xin^{1a},
CAO Zhiyu^{1a}, MA Mingguo^{1a,1b,1c}

(1. a. School of Geographical Sciences; b. Chongqing Jinpo Mountain Karst Ecosystem National Observation and Research Station;
c. Chongqing Engineering Research Center for Remote Sensing Big Data Application, Southwest University, Chongqing 400715, China;
2. Beijing Hongxiang Technology Co., LTD, Beijing 100081, China)

Abstract: Land use and land cover change (LUCC) heavily influence local meteorological and climatic conditions. Southwest China has experienced significant land use change in the past decades, but spatial variations in key meteorological factors in this region remain unclear. This study investigated LUCC in southwest China from 1980 to 2018 by land use transition matrix, based on land use data from the China Multi-Period Land Use Land Cover Remote Sensing Monitoring Dataset (CNLUCC). Over typical regions, spatial variations of local meteorological factors, i. e. near-surface air temperature, wind speed, downward longwave radiation and precipitation, were quantified by anomaly analysis, based on meteorological information from the China Meteorological Forcing Dataset (CMFD). The results suggested: (1) urbanization dominated the LUCC, with an increase of 10 133 km² in built-up areas, and large cities like Chongqing, Chengdu, and Kunming expanded by 2 ~ 4 times; (2) the spatial variations of local meteorological factors could be effectively characterized by comparing the 0.5° grid urban center with the 3° grid background area, and they were found to be different among the aforementioned cities. Specifically, Chengdu exhibited large spatial variations in meteorological factors during the rapid urbanization process. From 2000 to 2010, the differences between urban center and background area, in terms of anomaly of air temperature and downward longwave radiation, and relative changes in wind speed and precipitation, were up to -0.69 K, -5.2 w · m⁻², +22%, and +20%, respectively. However, from 2010 to 2018 these differences were reversed, with maximum of +0.78 K, +4.3 w · m⁻², -17%, and -13%, respectively. The temporal and spatial differences of most meteorological factors in Chongqing were similar to those in Chengdu except for wind speed, which decreased first and then increased for the entire study period, and was 22% larger in the urban center as compared to the background area from 1995 to 2009. Compared to Chengdu and Chongqing, LUCC in Kunming was more complicated, and the spatial variations of meteorological factors exhibited different patterns. This was probably due to large waterbody, which moderated the spatiotemporal evolution of local meteorological factors in this area. The findings of this study are expected to support the local development and future land use management under the context of LUCC, especially urbanization, in southwest China.

Key words: urbanization; meteorological factors; spatial variations; southwest China