

耦合遥感与地面监测的陕西省热环境时空分异及其影响因素研究

冯晓刚, 李 萌, 李凤霞, 周在辉

(西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 以陕西省 1970—2013 年 60 个地面气象观测数据为主, 以 MODIS 数据为辅助, 采用构建的热环境分异指数, 进行陕西省 44 年间热环境时空分异特征研究; 基于地理探测方法, 从自然和社会经济两个方面展开陕西省热环境时空分异特征的成因分析。结果表明: (1) 陕西省月平均温度, 陕北变幅最大, 关中次之, 陕南最小。2000 年后月平均温度较 1990 年前变化显著, 60 个观测台站中 79.8% 的月份为正增长。陕南、关中和陕北地区的四季平均气温变化呈现春秋两季增温显著, 夏冬两季变幅最小。月平均最高温度表现为持续走高; 冬季平均最低温度呈现走低趋势, 而其他三季则表现为缓慢上升。(2) 1970—2013 年典型年份的温度时空分布呈现由南向北、由东向西依次减弱的趋势, 其中, 关中地区变化最为显著, 陕北次之, 陕南最小。(3) 关中地区热环境整体状况最差, 陕北次之, 陕南较好, 整体呈现加剧的趋势; TD 指数变化较大, 呈现跌宕起伏的趋势, 表明 44 年间陕西省不同地区的热环境分异因区位的不同而不同。(4) 地理探测结果表明: 影响陕西省大气温度变化的主要自然因素是海拔、蒸发量和相对湿度; 主要社会经济因素是人均公园面积、绿化覆盖率和城市化率。

关键词: 热环境; GIS 空间分析; 时空分异; 地理探测器; 陕西省

中图分类号: TU 985.12

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)03-0423-08

Spatiotemporal variation and its causes of thermal environment in Shaanxi province coupled with remote sensing and ground monitoring

FENG Xiaogang, LI Meng, LI Fengxia, ZHOU Zaihui

(School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Based on the data of 60 ground meteorological observation stations from 1970 to 2013 in Shaanxi Province, and assisted by MODIS data, the spatiotemporal variation characteristics of thermal environment in Shaanxi Province during 44 years were studied by using the constructed thermal environment differentiation index, and the causes of spatiotemporal variation of thermal environment were analyzed from two aspects of nature and social economy by means of the geographical detection method. The results showed that: (1) The monthly average temperature in Shaanxi province had the largest variation in northern Shaanxi, followed by the Central area and the smallest in southern Shaanxi. The monthly average temperature after 2000 changed significantly from that before 1990, with a positive increase of 79.8 per cent in the month of 60 observation stations. The variation of average temperature of four seasons in the Southern, Central and Northern areas showed that the temperature increased significantly in spring and autumn, and the variation was the smallest in summer and winter. Meanwhile, the lowest temperature in winter showed a downward trend, while the other three seasons showed an upward trend slightly. (2) The temporal and spatial distribution of temperature in typical years from 1970 to 2013 showed a decreasing trend from south to north and from east to west. Among them, the Central area had the most significant changes, followed by northern Shaanxi, and southern Shaanxi the smallest. (3) The overall thermal environment in the Central area was the worst, followed by northern Shaanxi, southern Shaanxi was better, and the overall trend was increasing. The TD index changed greatly, showing a trend of ups and downs, indicating that the thermal environment differentiation in different regions of Shaanxi Province in 44 years was different due to different

收稿日期: 2021-04-15 **修改稿日期:** 2022-01-10

基金项目: 十三五国家重点研发计划基金资助子课题(2018YFC0704505); 陕西省自然科学基金面上基金(2018JM5073); 西安建筑科技大学自然科学基金专项基金(ZR19001)

第一作者: 冯晓刚(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事环境遥感及智慧城市设计与开发。E-mail: fendao_ren@163.com

locations. (4) Geographical detection results showed that the main natural factors affecting the atmospheric temperature change in Shaanxi Province were altitude, evaporation and relative humidity, and the main socio-economic factors were park area per capita, greening coverage rate and urbanization rate.

Key words: thermal environment; GIS spatial analysis; spatiotemporal variability; geo-explorer; Shaanxi province

在全球气候变暖和城市热岛效应不断加剧的双重背景下,城市人居环境恶化已经成为当下快速城镇化过程中最为关注的热点之一^[1-2]。针对这一问题,国内外学者已经就城市热环境演变过程、驱动机制与影响因素做过诸多研究,并取得了显著的研究成果^[3-4]。

目前,城市热环境评价方法主要有气象站观测法^[5]和热红外遥感定量反演法^[6]。气象观测通常具有连续性,能够有效提供不同时间尺度的观测数据,有利于深入剖析城市热环境与局地气候间的相关关系,但容易受到地面观测站时空分布的影响^[7]。而热红外数据恰能克服气象站观测的这一不足,提供完整的面域数据^[6-7],但由于热红外数据通常受卫星的空间分辨率和时间分辨率等因素的影响,无法提供连续、实时的对地观测数据。因此,气候研究多以地面气象站观测数据为主^[7-8],以热红外数据为辅进行区域尺度热环境时空格局的演变特征分析^[6]。同时,针对城市级别的热环境整体量化评价指标有待进一步完善。为了有效评价城市整体热环境分异特征,本文借鉴景观分析中的聚集度指数构建了用以表征城市整体热环境分异特征的热质量指数和热分异指数^[11]。以陕西省1970—2013年44年间60个地面气象站观测数据为主,以MODIS温度数据为辅,基于热质量指数和热分异指数深入剖析了陕南、关中和陕北地区城镇化进程中的城市热环境分异的演变特征。最后,采用地理探测器^[9]方法从影响大气温度的自然要素和社会经济要素两个方面深入剖析其成因,以期能够为陕西省进一步制定改善策略和规划措施提供科学参考。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区域概况

陕西省地处中国内陆腹地,省会西安市,属黄河中游和长江上游流域。介于东经105°29′~111°15′,北纬31°42′~39°35′之间,自然区划上因秦岭-淮河一线而横跨南方与北方。陕西全省总面积20.58万km²,截至2020年底,全省总人口3952.89万。陕西省南北气候差异显著,以秦岭为界,陕西南部即陕南地区地处亚热带湿润季风气候区,陕西中部即关中地区属暖温带半湿润季风

气候区,陕西北部即陕北地区属温带半干旱季风气候区,陕北冬冷夏热,气候多变;关中冬夏较长,四季分明;陕南温暖湿润,雨量充沛。全省年均气温7~16℃,年均降水量300~700mm,无霜期通常有150~270d^[9]。

1.2 数据源与研究方法

以陕西省境内分布的60个气象站及其1970年1月1日至2013年12月31日44年间日气象观测数据为主,辅以2000和2013年MODIS地表温度数据、地形图数据及相应年份的陕西省及各市、区县统计年鉴数据等。外业数据采用温度平距法对逐月和逐年数据分别进行系统分析;将研究区按照地域特征划分为陕南、关中、陕北三个不同地区,进行由南北纵向及东西横向分别进行对比剖析,并利用本文构建的热环境质量指数和分异指数展开城市热环境及分异特征评价。最后,基于地理探测^[9]原理,采用主成分分析的方法从自然因素和社会经济因素两个方面共计筛选了13个影响因子进行相关性分析,以期深入剖析影响陕西省热环境时空演变的成因。

2 模型构建方法

2.1 热环境分异模型构建

借鉴景观生态学中的聚集度指数(CONTAG),构建了用以表征城市热环境质量特征的热质量指数(Thermal Quality, TQ)和表达其空间分布差异特征的热分异指数(Thermal Differentiation, TD)。该模型表达为(1)~(3)。

$$CONTAG = \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij} \ln(P_i)}{2 \ln(n)} \right] \times 100 \quad (1)$$

$$TQ = \sum_{i=1}^m S_i \times I_i \sum_{i=1}^m S_i \quad (2)$$

$$TD = TQ / CONTAG \quad (3)$$

式中:CONTAG为聚集度指数(0<CONTAG≤100), p_i 是表示随机抽取的栅格细胞属于斑块类型*i*的概率, p_{ij} 表示斑块类型*i*和斑块类型*j*之间所有邻接的栅格数目, n 为景观类型数。TQ为不同热岛类型面积与热岛类型乘积之和与研究区面积之比。比值越大热环境分异数量特征越明显; I_i 代表不同热岛类型, $i=-2,-1,0,1,2$,其

中: -2 代表超低温区、-1 代表低温区、0 代表常温区、1 代表高温区、2 代表超高温区。当热岛类型为正值时表示其对城市热环境呈现正贡献,反之则为负贡献,0 表示热环境无变化不计入贡献度; S_i 代表不同温度类型的面积。TD 为 TQ 与景观聚集度指数(CONTAG)的比值。聚集度越高比值越小,表明热环境分异程度越低;比值越大,表明热环境分异越明显。

2.2 地理探测器模型

借鉴地理探测器模型^[9],引入热环境发生率分异决定力指标 q 。假定研究区域存在热环境发生概率 y 。 y 被采集在研究区域内,采样单元 $i(i=1, 2, \dots, n, n$ 为总采样单元数)组成的格点系统,假设 $A=\{A_h\}$ 是可能存在的一种影响城市热环境分异的因素, $h=1, 2, \dots, L, L$ 为因素分类数, A_h 代表因素 A 不同的类型。一个类型 h 对应空间上一个或多个子区域。为了探测因素 A 与城市热环境发生率 y 的空间相关性,将城市热环境图层与因素 A 图层叠置,在因素 A 的第 h 类型, y 的离散方差被记为 σ_h^2 , 因素 A 对城市热环境发生率 y 的决定力大小为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (4)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, SST = N \sigma^2 \quad (5)$$

式中: n_h 为在因素 A 的类型 h 内的样本数; n 为在整个研究区域 H 内的所有样本数, $n = \sum_{h=1}^L n_h$; L 为因素 A 分类数; σ^2 为整个区域的离散方差。当各因素对城市热环境发生具有决定力时,每个类型的离散方差 σ_h^2 会较小;反之,类型之间的离散方差就会较大。当离散方差 σ_h^2 趋近 0 时,因素 A 的决定力 $q=1$, 是热环境发生分异完全由因素 A 决定的理想状态;当因素 A 的决定力 $q=0$ 时,城市热环境发生率随机分布,因素 A 对热环境发生分异没有影响力;决定力值 q 越大,表明因素对城市热环境发生空间分异的影响越大。最后通过比较因素决定力的大小,探测出城市热环境空间分异的主导因素。

3 结果与分析

3.1 温度演变特征分析

3.1.1 月温度演变特征分析

(1)月平均温度变化分析

以月份为最小分析单元,从南至北分别探讨

陕南、关中和陕北三个不同地理区位的月平均温度变化情况。结果表明:陕南地区 1~6 月和 8~11 月中月平均温度为正增长,其中 3 月增幅最大、11 月最小,累计增幅为 6.37 °C 和 0.16 °C;7 月和 12 月均为负增长,增幅为 -0.27 °C 和 -0.25 °C,综合分析该地区月平均温度累计增幅为 1.43 °C;关中地区 1~6 月和 8~12 月中月平均温度为正增长,3 月增幅最大,12 月最小,累计增幅为 7.93 °C 和 0.49 °C;7 月为负增长,增幅 -0.65 °C,关中地区月平均温度累计增加 2.37 °C。陕北地区 1~6 月和 8~12 月中月平均温度为正增长,3 月增幅最大,12 月最小,分别为 8.00 °C 和 1.27 °C,7 月与陕南和关中相同,表现为月平均温度减少的趋势,累计减少 0.91 °C,陕北地区月平均温度累计增加 2.46 °C。因此,陕西省月平均温度中变幅最大为陕北地区、关中次之、陕南最小,这一变化规律与姜创业等的研究结果相一致^[10]。最后,经统计分析 60 个观测台站中 79.8% 的月份在 2000 年后均表现为正增长。

(2)月最高-最低温度变化特征分析

分析月平均最高温度变化发现:1970—2013 年间 1~5 月中,陕南地区 92% 以上的台站月平均最高温度始终高于关中和陕北地区,高幅 0.09~3.94 °C;1970—1990 年间 5~7 月中,陕北地区平均最高温度高于陕南和关中地区,高幅 0.12~2.0 °C,表明夏季陕北地区的月平均最高温度最高;8~12 月中,陕南地区的温度高于关中和陕北地区,其中 12 月最为显著,高幅 1.35~5.01 °C,造成这种现象的根本原因在于陕南和陕北所处的地理纬度及其海拔差异。

分析月平均最低温度变化发现:1970—2013 年,最低月平均温度在 1990 年前后波动明显。陕南 44 年中的 3~11 月,月平均最低温度表现为走高的趋势;2000 年后变化最为明显,最低温度进一步走低;关中 44 年间月平均最低温度表现为走高的趋势,1990 年前后有一次较为明显的跌宕起伏,之后整体走高;陕北 44 年间月平均最低温度表现为走高的趋势,增幅 1.04~5.93 °C,是整个陕西地区不同月份平均最低温变化最为剧烈的区域。

3.1.2 四季温度演变特征分析

以月温度数据为基础,分别统计了春、夏、秋、冬四季温度变化情况(表 1),采用温度差平距方法制作了陕西省 1970—2013 年 44 年间四季平均温度与年均温度之差及四季温度变化图(图 1 和图 2)。

表1 1970—2013年陕南、关中、陕北地区春夏秋冬四季典型年份温度统计表

Tab.1 The average temperature of Southern, Central and Northern areas of Shaanxi province from 1970 to 2013

年份	陕南地区				关中地区				陕北地区			
	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季
1970	12.66	23.85	13.04	2.69	11.90	24.44	11.76	0.17	9.39	21.79	8.64	-4.18
1980	12.60	22.34	13.31	1.66	13.81	24.30	13.78	0.25	10.53	21.87	10.54	-4.38
1990	13.59	23.76	14.71	2.51	12.96	24.49	13.93	-0.17	10.88	22.39	11.60	-3.00
2000	16.09	24.05	13.29	3.05	15.48	24.64	11.88	0.23	12.81	22.84	9.83	-2.99
2013	15.96	24.39	14.30	3.30	16.67	25.86	14.03	1.21	13.99	23.11	10.79	-2.40

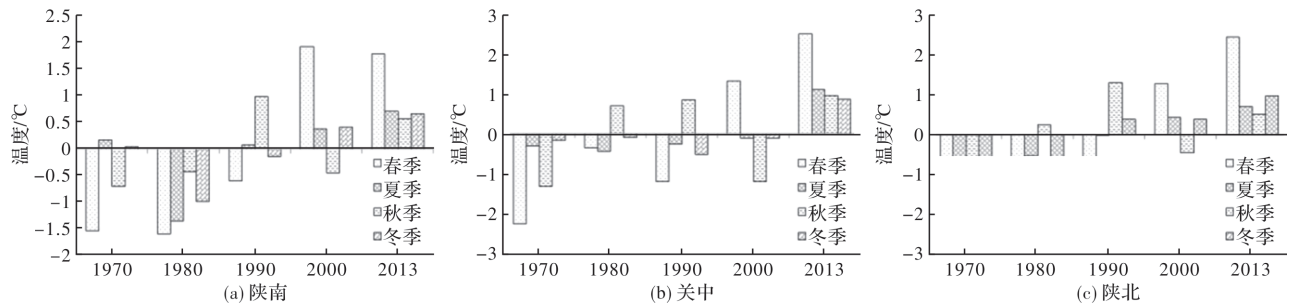


图1 陕西省1970—2013年44年间春夏秋冬四季平均温度与年均温度之差的平距图

Fig.1 The difference between the four-season average temperature and the annual average temperature from 1970 to 2013 in Shaanxi province

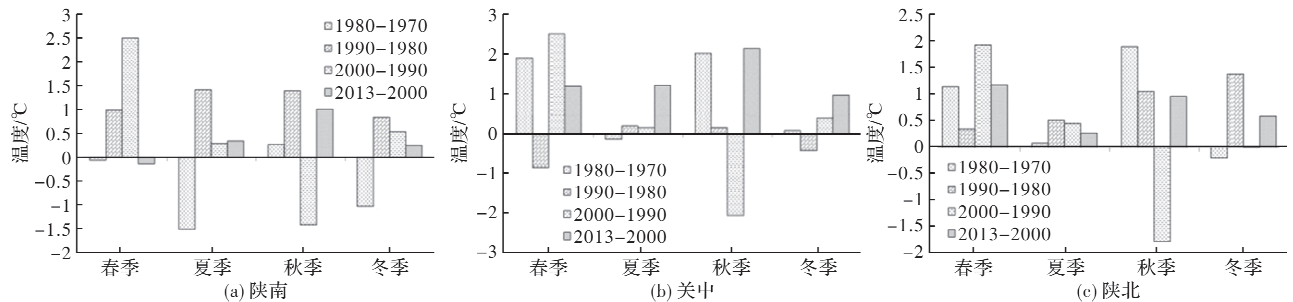


图2 陕西省1970—2013年春夏秋冬四季典型年份温度变化图

Fig.2 The changes of the four-season average temperature from 1970 to 2013 in Shaanxi province

分析结果表明:44年间陕南、关中和陕北地区四季平均气温变化呈现增加的趋势,春季变化最为显著,夏冬两季最小。陕南地区,44年间春季温度累计增加 3.3°C ,其次为秋季,夏冬两季增幅分别为 0.54°C 和 0.61°C 。关中地区,44年间春季温度累计增加 4.77°C ,其次为秋季,累计增加 2.27°C ,夏冬两季增幅微弱,分别为 1.42°C 和 1.04°C 。陕北地区,44年间春季温度累计增加 4.60°C ,其次为秋季、冬季和夏季,增幅分别为 2.15°C 、 1.78°C 和 1.32°C 。分析图1和图2发现,陕南、关中和陕北三地的四季平均气温以1990年为时间节点,陕南地区在1980—1990年时间段内变化最为明显,均呈现正增长,增幅分别为 0.09°C 、 0.14°C 、 0.14°C 和 0.08°C ,表明改革开放后的近10年是陕南地区气候变化最为显著的时间节点。关中地区气温在

2000—2013年时间段内变化最为显著,均呈现正增长,增幅分别为 0.12°C 、 0.12°C 、 0.22°C 和 0.1°C 。陕北地区1980—1990年和2000—2013年时间段内平均温度均呈现正增长。该结论与史帆等人的研究结论相一致^[6]。表明在过去的44年里,陕北地区的气温变化整体增幅高于陕南和关中地区,系陕西省气温变化最为剧烈的区域。

3.1.3 年温度演变特征分析

(1)年平均温度变化分析

以月平均温度为基础,分别计算年平均气温、年最高和年最低温度(表2),并以年平均温度与44年间的整体平均温度分别计算温度差,基于计算结果绘制了典型年份年平均温度差异变化图(图3)。

表 2 1970—2013 年 44 年间陕南、关中、陕北年均气温、最高和最低年温度统计表

Tab. 2 Annual average temperature, maximum and minimum temperature of Southern, Central and Northern area during the 44 years from 1970 to 2013

年份	陕南			关中			陕北		
	各年平均 温度	各年平均 最高温度	各年平均 最低温度	各年平均 温度	各年平均 最高温度	各年平均 最低温度	各年平均 温度	各年平均 最高温度	各年平均 最低温度
1970	13.06	17.30	8.30	12.07	16.11	6.14	8.91	16.29	3.25
1980	12.48	18.28	8.19	13.04	15.89	6.38	9.64	17.47	4.71
1990	13.64	18.76	9.82	12.80	17.55	7.01	10.47	17.76	5.55
2000	14.12	17.92	10.01	13.06	19.93	7.44	10.62	18.01	6.15
2013	14.61	18.84	9.29	14.73	20.21	5.61	11.72	19.83	6.24

结果表明(表 2): 1970—2013 年, 陕南地区的年平均温度表现为增加趋势, 其中, 佛坪增幅最大, 略阳次之, 柞水最小, 增幅分别为 2.55、2.39 和 0.1 °C, 陕南地区年平均温度累计增加 1.03 °C; 关中地区年平均温度持续走高, 华山增幅最大, 永寿和耀州区次之, 华县最小, 增幅分别为 4.3、2.6 和 1.44 °C, 关中地区年均温度累计增加 1.95 °C; 陕北地区除了长武站外, 其余地区 44 年间均表现为正增长, 其中靖边增幅最大, 榆林次之, 延安最小, 增幅分别为 7.24、2.5 和 1.15 °C. 长武站结果表明 44 年间年均温度累计下降 1.84 °C, 是陕西所有观测台站中唯一一个 44 年间年均温度降低的区域.

图 3 表明: 陕南、关中和陕北地区的年平均温度差异表现为整体上升的趋势. 陕南地区和关中的温度在 1980 年前后波动明显, 其中陕南整体小幅下降, 之后表现为增加的趋势, 至 2010 年达到最高点; 关中部分台站年平均温度为小幅降低的趋势, 如秦都、蒲城等; 部分台站观测结果与 1970 年前后持平, 如太白、韩城等; 除了华山 1990—2000 年间累计值为负增长外, 其余均表现为正增长; 陕北地区年平均温度变化主要发生在 1970—1980 年之间, 该时间段内多数区域均表现为负增长, 之后除了延安和定边在 2013 年较 2000 年为负增长外, 其余地区的年均温度变化均为正增长.

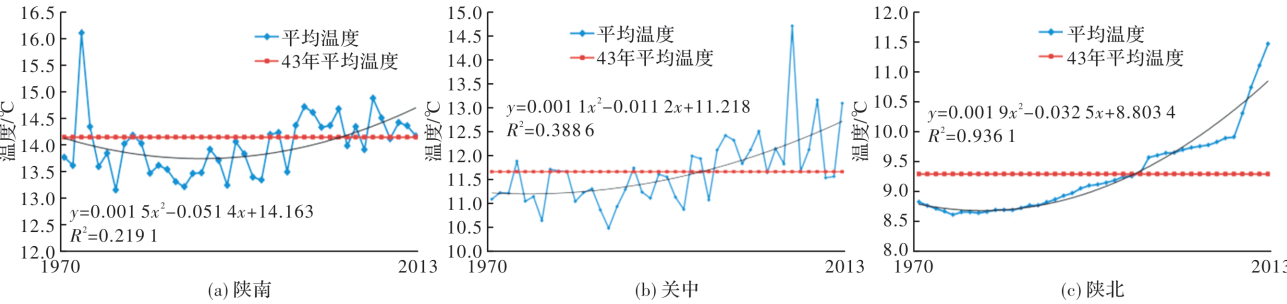


图 3 典型年份陕南、关中和陕北年均气温与 44 年平均温度差异图

Fig. 3 The difference between the average temperature and the 44 years average temperature of Shaanxi Province

(2) 年最高-最低温度变化特征分析

图 4 表明: 陕南地区的最高温度差整体表现为小幅线性增加的趋势. 汉中、略阳、镇安及柞水等地的最高温度差表现为略微减小的趋势, 相反陕南其他地区最高温度表现在小幅增加的趋势, 最大温度差 4.34~11.91 °C; 关中地区最大温度差 3.69~7.1 °C, 华县 2013 年最高温度和平均温度差值最大, 达到 7.1 °C, 关中平均最高温度差为 5.96 °C, 较陕南地区略低; 陕北地区最大温度差 5.77~11.64 °C, 长武 1970 年最高温度和平均温

度差值最大为 11.64 °C, 其余地区平均最高温度差为 7.08 °C. 陕南、关中和陕北地区的最高温度差整体表现为跌宕上行的走势.

同时, 陕南地区 44 年间的最低平均温度差约为 4.2 °C, 表现为小幅上升的趋势; 关中地区最低平均温度差约为 4.8 °C, 2000 年前表现为跌宕起伏并上行的趋势, 2000 年后最高和最低温度均发生较为显著的变化, 之后为上行趋势; 陕北地区最低平均温度差约为 5.6 °C, 在 2010 年后最低和最高温度差变化较为明显, 且表现缓慢上行的趋势.

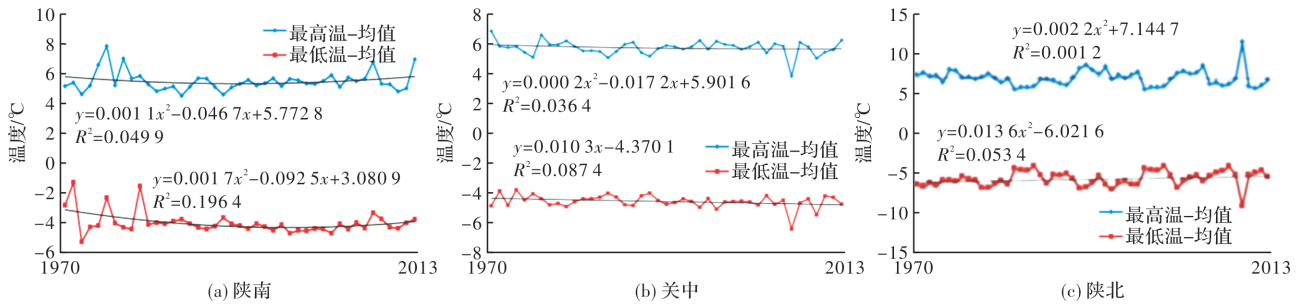


图4 1970—2013年陕西省年均最高温和最低温与年均值差异变化图

Fig. 4 The difference between annual maximum temperature, minimum temperature and annual average temperature in Shaanxi Province from 1970 to 2013

3.2 年均温度面域时空分布演变特征

利用克里格插值法制作了陕西省5个典型年的温度面域时空图^[11](图5). 经与获取的2010和2013年MODIS LST温度产品相比较, 气象差值结果与LST温度产品表现趋势相一致. 由图5可知, 陕西省1970—2013年44年间的面域温度时空分布整体东南高, 依次向西北方向递减. 陕南地区以安康为中心形成一个持久的高温中心, 该地区常年平均温度较周边地区的紫阳、旬阳等地高出0.5~1.2℃; 汉中作为陕西与四川的门户, 地处中国南北气候分界线秦岭南麓, 雨量充沛. 因此, 该地区常年平均温度低且变化幅度小, 是陕

南地区最适宜人居的城市. 44年间关中地区城市温度整体表现为走高的趋势, 是除了安康热力中心外整个陕西平均温度最高的地区, 且温度呈现由东向西依次降低的趋势. 关中东部为关中平原, 人口数量大、工业密集, 土地承载力大, 相应地大气平均温度较高, 而关中西部地区为丘陵地貌, 植被密度大, 人口稀少, 因此对应的大气平均温度较低. 44年间陕北地区整体平均温度表现为较低的趋势, 且从东向西依次降低. 东西年平均温度差最高达4.7℃. 因此, 陕北为整个陕西大气平均温度面域分布中的“绿岛”, 是陕西人夏季避暑的首选之地.

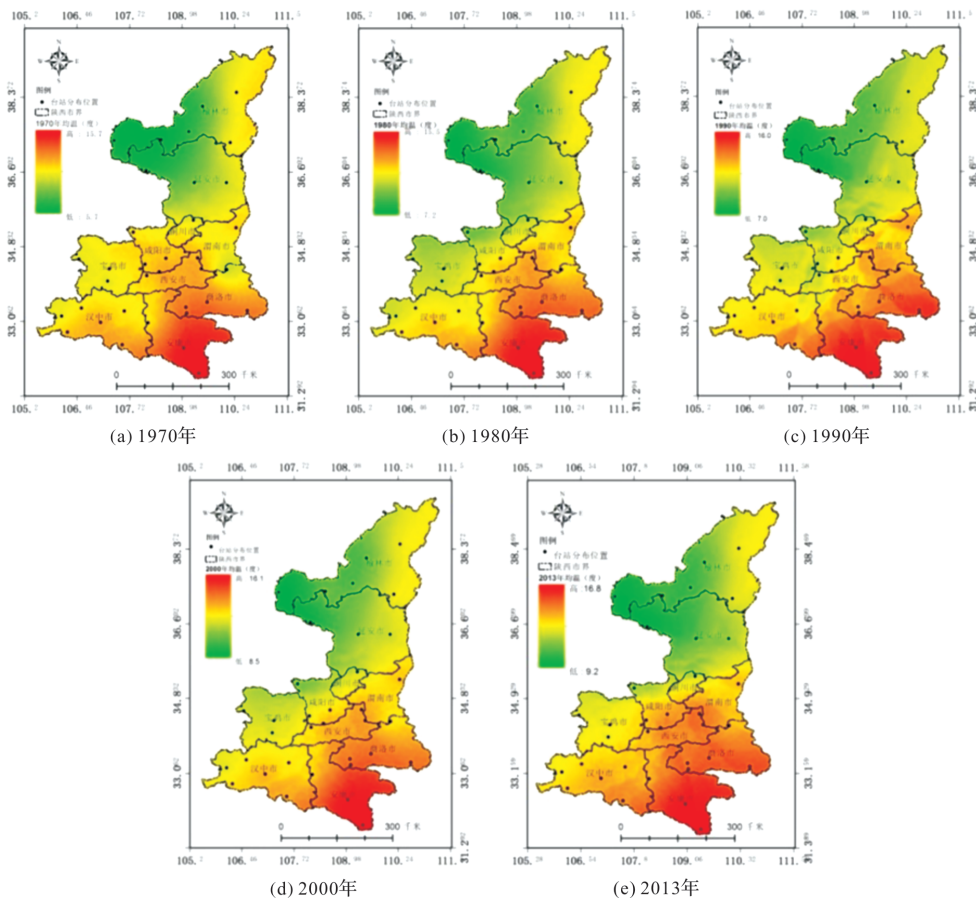


图5 1970—2013年典型年份陕西省面域年平均温度图

Fig. 5 The spatial chart of annual average temperature of Shaanxi Province in typical years from 1970 to 2013

3.3 热环境分异特征分析

利用本文构建的 TQ 和 TD 指数分别计算了 1970—2013 年陕南、关中和陕北地区热环境质量和热分异指数变化结果(表 3)。

表 3 典型年份陕南、关中和陕北地区热环境分异指数变化统计表

Tab. 3 The TQ and TD of thermal environment of Southern, Central and Northern areas in Shaanxi province in typical years

年份	地区					
	陕南地区		关中地区		陕北地区	
	TQ	TD	TQ	TD	TQ	TD
1970-1970 年	0.15	0.15	0.20	0.02	0.26	0.47
1980-1990 年	-0.08	-0.23	0.31	0.26	0.43	0.19
1990-2000 年	0.07	0.15	-0.12	-0.09	0.04	-0.22
2000-2013 年	0.17	0.1	0.09	0.24	0.08	0.35
1970-2013 年	0.31	0.48	0.43	0.57	0.81	0.79

表 3 可知: TQ 指数以 1980 年为时间节点,且在陕南、关中和陕北三地表现为异质性加剧的趋势。陕南 TQ 指数表现为跌宕起伏,1980 年前上行趋势明显, TQ 指数累计增加 0.15; 1980 年后, TQ 指数与陕南地区整体 TQ 指数持平; 1990—2000 年陕南地区 TQ 指数增加 0.07, 增幅较小, 表明 1980—2000 年间, 陕南地区的热状况变幅小, 整体热质量状况处于低位。2000 年后, TQ 指数增幅较大, 累计增加 0.17, 表明 2000 年后, 陕南城市热环境小幅加剧。关中地区 1970—1980 年间 TQ 指数基本持平; 1980—1990 年间 TQ 指数增幅较大, 累计增加 0.26, 表明这一时期关中地区的热环境状况整体恶化; 1990—2000 年 TQ 指数跌宕下行; 2000 年后, TQ 指数增幅明显, 累计增加 0.24, 根本原因是土地覆盖急剧变化导致城市热环境进一步恶化。陕北地区 1970—1990 年间 TQ 指数增幅显著, 累计增加 0.39; 1990—2013 年间 TQ 指数先小幅攀升后整体下降, 累计变化 -0.02,

究其原因在于陕北地区绿化率大幅提高的结果。整体分析陕西省 44 年间 TQ 指数发现: 关中地区热环境整体状况最差, 陕北次之, 陕南最好。

陕南地区 1970—1990 年 TD 指数增加明显(表 3), 累计增加 0.51, 1990—2000 年累计减少 0.12, 后 TD 指数呈现平稳趋势, 44 年间 TD 指数累计增加 0.48, 表明这一时期陕南地区城市热环境分异呈现加剧趋势。关中地区 1970—1980 年 TD 指数增幅明显, 累计增加 0.23; 1980—2000 年 TD 指数呈现跌宕下行, 累计减少 0.07; 2000 年后呈现大幅增加的 trend, 累计增加 0.41, 表明这一时段关中地区热环境分异显著。陕北地区 1970—1990 年 TD 指数变化明显, 累计增加 0.66, 是陕西地区这一历史时期变化最为剧烈的区域。1990—2000 年 TD 指数小幅下降, 累计减少 0.22, 表明这一时期陕北地区的热环境分异趋于好转。2000 年后, TD 增加 0.12, 变幅远小于关中地区。因此, 关中地区由于人口分布集中, 经济发展多元且迅速, 使得关中地区成为了整个陕西省热环境变化最为剧烈的区域, 且热环境分异程度最高。

3.4 温度时空演变成因分析

本文在选取 7 个自然因素和 6 个社会经济因素基础上, 采用地理探测方法^[8]对陕南、关中和陕北不同地域的气温变化与影响因子进行相关性分析。结果表明(表 4 和表 5):

(1)陕南地区, 影响大气温度的关键因素依次为降雨量、海拔与蒸发量; 关中地区, 影响因素依次为大气相对湿度、地表温度和海拔; 陕北地区, 影响因素依次为蒸发量、海拔和相对湿度。因此, 陕西省不同地域范围影响大气温度的因素根据地域的不同而不同, 影响陕西区域大气温度分布的自然因素主要为海拔、蒸发量和相对湿度, q 值^[8]分别为: 0.625、0.612、0.538。

表 4 陕南、关中和陕北地区自然因素影响大气温度的 7 个主要参数地理探测结果

Tab. 4 Geographical detection results of seven main parameters of natural factors affecting atmospheric temperature in Southern, Central and Northern area of Shaanxi province

影响因子	陕南地区			关中地区			陕北地区		
	q 值	p 值	q 值排序	q 值	p 值	q 值排序	q 值	p 值	q 值排序
相对湿度	0.010	1.000	7	0.428	1.000	1	0.177	0.947	3
地表温度	0.128	1.000	6	0.387	1.000	2	0.061	1.000	5
蒸发量	0.249	0.999	2	0.089	1.000	4	0.547	0.000	1
日照时数	0.176	0.144	4	0.000	1.000	7	0.159	1.000	4
平均风速	0.158	1.000	5	0.056	1.000	5	0.026	1.000	6
降水量	0.629	0.007	1	0.023	1.000	6	0.000	1.000	7
平均海拔	0.235	1.000	3	0.355	1.000	3	0.432	0.999	2

表5 陕南、关中和陕北地区社会经济因素影响大气温度的6个主要参数地理探测结果

Tab. 5 Geographical detection results of six main parameters affecting atmospheric temperature by socioeconomic factors in Southern, Central and Northern area of Shaanxi province

因子	陕南地区			关中地区			陕北地区		
	q 值	p 值	q 值排序	q 值	p 值	q 值排序	q 值	p 值	q 值排序
人口数量	0.022	1.000	5	0.085	1.000	5	0.025	1.000	6
GDP 总量	0.003	1.000	6	0.149	1.000	4	0.322	0.627	2
城市化率	0.033	1.000	4	0.046	1.000	6	0.377	0.999	1
建成区面积	0.318	0.003	2	0.200	1.000	2	0.224	1.000	3
绿化覆盖率	0.078	1.000	3	0.189	1.000	3	0.031	1.000	5
人均公园面积	0.653	0.000	1	0.478	0.988	1	0.034	1.000	4

(2)陕南地区和关中地区,影响大气温度的主要的因素是人均公园面积和建成区面积两个要素.陕北地区,影响大气温度的主要因子是城市化率、GDP 总量和建成区面积三个要素.对整个陕西省地域进行地理探测分析表明:影响陕西省区域大气温度分布的主要社会经济因素为人均公园面积、绿化覆盖率和城市化率三个要素, q 值^[8]分别为:0.692、0.613 和 0.517.

4 结论

(1)陕西省月平均温度,陕北变化最大,关下次之,陕南最小,月平均变幅分别为 2.46 °C、2.37 °C 和 1.43 °C;2000 年后各月平均温度较 1990 年前变化显著,60 个观测台站中 79.8% 的月份在 2000 年后均表现为正增长.陕南、关中和陕北地区的春夏秋冬平均气温变化呈现春秋两季增温显著,夏冬两季变幅较小的特点,且整体呈现上升趋势.陕南、关中和陕北地区的平均最低温度在不同季节表现各异,三地的平均最低温度冬季表现为走低趋势,其他三季则表现为缓慢上行的趋势;

(2)陕西省面域温度时空分布整体呈现由东南向西北依次递减、由东向西依次减弱的趋势,其中关中地区变化最为显著,陕北次之,陕南最小;

(3) TQ 指数表明:关中地区热环境状况最弱,陕北次之,陕南变幅最小; TD 指数整体变大,呈现跌宕起伏的趋势,表明 44 年间陕西省三地的热环境分异因地理区位的不同而不同.2000 年后,陕西省整体热环境分异加剧;

(4)地理探测表明:影响陕西省大气温度变化的主要自然因素和社会经济要素分别是:海拔、蒸发量、相对湿度、人均公园面积、绿化覆盖率和城市化率.

参考文献 References

- [1] 中国气象局气候变化中心近百年来地表气温变化|中国气候变化监测公报(2016 年)[M]. 北京:科学出版社,2017.
Climate Change Center of China Meteorological Administration. The change of surface temperature in the past century, China climate change monitoring bulletin (2016)[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [2] 王钊,罗慧,李亚丽,等.近 50 年秦岭南北不均匀增温及对城市化响应[J].应用气象学报,2016,27(1):85-94.
WANG Zhao, LUO Hui, LI Hongmei, et al. Effects of urbanization on temperatures over the Qinling mountains in the past 50 years[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2016,27(1):85-94.
- [3] 高蓓,栗珂,李艳丽.陕西近 40 年气候变化特征的分析[J].成都信息工程学院学报,2006,21(2):290-295.
GAO Bei, LI Ke, LI Yanli. Analysis of Shaanxi climate changes during past 40 years[J]. Journal of Chendu University of Information Technology, 2006, 21(2):290-295.
- [4] 旭恺,张强.近半个世纪我国干旱变化的初步研究[J].应用气象学报,2008,19(6):679-687.
ZOU Xukai, ZHANG Qiang. Preliminary studies on variations in droughts over China during past 50 years[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(6):679-687.
- [5] 孙珂,陈圣波.基于遗传算法综合 Terra/Aqua MODIS 热红外数据反演地表组分温度[J].红外与毫米波学报,2012,31(5):462-468.
SUN Ke, CHEN Shengbo. Genetic algorithm-based surface component temperatures retrieval by integrating MODIS TIR data from terra and aqua satellites[J]. Journal Infrared Millimeter Waves, 2012, 31(5):462-468.

(下转第 458 页)

- The General Office of the National Development and Reform Commission. Carrying out assessment and assessment of responsibility for reducing Carbon dioxide Emissions per Unit of GDP in 2014 - Climate {2015} No. 958 [EB/OL]. (2015-04-27). https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201504/t20150427_963810.html.
- [25] 张博通. 关中地区城市常见行道树生态效益定量分析研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2020.
- ZHANG Botong. Quantitative analysis of ecological benefits on common street trees in the Guanzhong Area [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020.
- [26] 董延梅. 杭州花港观鱼公园 57 种园林树木固碳效益测算及应用研究[D]. 杭州:浙江农林大学, 2013.
- DONG Yanmei. Research on the measure of carbon fixation benefit and appliance of 57 garden species in Hangzhou Huagangguanyu Park[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2013.
- [27] 熊向艳, 韩永伟, 高馨婷, 等. 北京市城乡结合部 17 种常用绿化植物固碳释氧功能研究[J]. 环境工程技术学报, 2014, 4(3):248-255.
- XIONG Xiangyan, HAN Yongwei, GAO Xinting, et al. Analysis of carbon fixation and oxygen release capabilities of 17 afforestation plants in rural-urban fringe in Beijing[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2014, 4(3):248-255.
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市居住区规划设计标准:GB50180-2018[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2018.
- MOHURD. Standard for urban residential area planning and design: GB50180-2018[S]. Beijing: China Architecture Publishing & Media Co. Ltd., 2018.
- [29] 陈自新, 苏雪痕, 刘少宗, 等. 北京城市园林绿化生态效益的研究(5)[J]. 中国园林, 1998, (5):57-60.
- CHEN Zixin, SU Xuehen, LIU Shaozong, et al. Ecological benefit of gardens' afforestation in Beijing(5) [J]. Chinese Landscape Architecture, 1998, (5): 57-60.

(编辑 吴海西 沈 波)

(上接第 430 页)

- [6] 史帆, 赵景波. 1960—2013 年陕南地区极端气温指数变化研究[J]. 江西农业学报, 2016, 28(7):96-104.
- SHI Fan, ZHAO Jingbo. Research on changes in extreme air temperature indexes of southern Shaanxi region during 1960-2013[J]. Acta Agriculture Jiangxi, 2016, 28(7):96-104.
- [7] 齐贵增, 白红英, 孟清, 等. 1959—2018 年秦岭南北春季气候时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2019(5): 1079-1091.
- QI Guizeng, BAI Hongying, MENG Qing, et al. Climate change in the Qinling mountains in Spring during 1959 to 2018 [J]. Arid Zone Research, 2019(5): 1079-1091.
- [8] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1):116-134.
- WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. ACTA Geographica SINICA, 2017, 72(1):116-134.
- [9] 陕西省地方志编纂委员会. 陕西省志·地理志[M]. 西安:陕西人民出版社, 2000.
- Local Chronicle Compilation Committee of Shaanxi Province, Records and Geography of Shaanxi province [M]. Xi'an: Shaanxi People's Press, 2000.
- [10] 姜创业, 魏娜, 程肖侠, 等. 1961—2008 年陕西省年际气温和降水区域性变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1):197-200.
- JIANG Chuangye, WEI Na, CHENG Xiaoxia, et al. Analysis of inter-annual temperature and precipitation regional change during 1961—2008 in Shaanxi province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(1):197-200.
- [11] 冯晓刚, 周在辉, 李凤霞, 等. 西咸一体化驱动的咸阳市热力景观格局时空分异分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(3):413-419.
- FENG Xiaogang, ZHOU Zaihui, LI Fengxia, et al. Spatiotemporal differentiation of thermal landscape pattern in Xiyang city driven by integration of Xi'an and Xianyang[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. and Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53(3):413-419.

(编辑 吴海西 沈 波)