

基于格点数据的1961—2016年中国气候季节时空变化

马彬,张勃

(西北师范大学地理与环境科学学院,兰州 730070)

摘要: 研究基于中国气象局发布的气候季节划分标准(QX/T152—2012),选取国家气象信息中心发布的中国地面气温日值 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 格点数据集(V2.0),运用改进的多元回归模型解释了中国常年气候季节空间变化,通过线性趋势和极点经验模态分解(ESMD)分析了1961—2016年气候季节分布面积、持续日数及其开始日期的变化趋势。结果显示:中国大陆分布的主要气候季节有常冬区、无冬区、无夏区以及四季分明区,常夏区和常春区暂无分布;根据常年和多年气候季节分区面积变化来看,常冬区分布范围呈显著缩小趋势,无冬区范围显著扩大,无夏区和四季分明区范围变化不明显,常年气候季节范围变化区域主要集中在青藏高原和内蒙古高原海拔较高地区,其余地区几乎没有变化;常年和多年气候季节的四季持续日数变化显著区域主要集中在北方地区,夏季开始日期的提前导致内蒙古高原中西部、河西走廊以及新疆东部的持续日数变化显著增加,冬季开始日期的推后造成这些地区冬季持续日数减少,高海拔地区持续日数变化比平原地区更显著。研究揭示的中国气候季节的分布和变化特征可以为气象预报以及气候区划提供参考。

关键词: 气候季节;多元回归模型;时空分布;中国

DOI: 10.11821/dlxb202003002

1 引言

伴随全球气温纪录的不断刷新^[1-3],气温升高不仅诱发全球和区域极端气候事件频率增加^[4-6],同时大气辐射强迫的间接作用也致使热量累积效应增强,与热量相关的植被季物候期、作物生长季也因起讫日期的变化而改变^[7-14]。季节作为每年循环出现的地理景观相差较大的几个时间段,热量也是影响该要素变化的重要因素之一^[15-16]。与人类生产、生活息息相关的农业生产、穿衣饮食都与季节变化有着紧密的联系,因此在全球气候变化背景下分析季节的变化特征,不仅有利于提高人类对全球气候变化的认识,对于制定适应气候变化策略也有很好的借鉴。

季节划分通常有天文、气象、节气、农历、物候、候温等多种方法,其中天文、气象、农历以及节气划分法都是以固定的时间节点为界,这些划分方法有一个共同点就是在不同气候区以相同时间界定某一季节的开始,这显然不尽合理。季节的变化离不开热量的驱动,在相同时间段内不同区域的热量累积是不一样的。国外学者有关季节的研究多以气象划分法为主,有关物候或者候温方法的研究很少涉及,Jaagus等在结合中欧地

收稿日期: 2018-11-26; 修订日期: 2020-01-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41561024, 31760241) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41561024; No.31760241]

作者简介: 马彬(1990-),男,甘肃敦煌人,博士生,研究方向为区域环境与资源开发。E-mail: mabin0937@163.com

通讯作者: 张勃(1963-),男,甘肃华池人,博士,教授,博士生导师,研究方向为区域环境与资源开发。

E-mail: zhangbo@nwnu.edu.cn

区物候观察数据定义了适合该地区的季节划分方法,以日平均气温 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为界划分了该地区的四季^[15-16]。而在中国相关的研究开展较早,1934年张宝堃先生提出用候平均方法来划分四季^[17],即以候平均气温 $<10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为冬, $10\sim 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为春秋, $>22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为夏。该方法在中国得到了广泛的应用,严登华等研究发现北方地区1960年以来春夏起始日期提前,秋季推迟,冬季整体变化不大,多数地区春季、秋季和冬季变短,夏季变长^[18];缪启龙等分析1951年以来中国四季变化发现春季和夏季起始日期基本呈现从南向北逐渐推迟,秋季和冬季起始日期基本呈现从北向南逐渐推迟^[19]。Dong等分析中国四季发现全球变暖背景下多数地区普遍存在夏季日数延长,冬季日数缩短^[20]。以上学者都是基于气候和物候来划分季节,这些研究在一定程度上揭示了区域季节的变化特征,但是在划分时并未考虑短时间气候波动对季节初始时间的影响,容易产生误判。为了规范标准和业务需要,国家气候中心2012年颁布气象行业标准气候季节划分标准(QX/T152—2012)^[21],该标准对于季节有了统一的定义,在确定起止日期增加了二次判断,避免了异常天气所导致的误判。该标准颁布以来,气象部门在日常的气象预报和气候变化监测报告中都开展了相关业务^[22],一些学者也在中国的部分区域开展了相关研究^[23-25]。这些研究都是针对省域或者市域,中国幅员辽阔,气候差异大,对于中国气候季节的空间总体分布研究甚少,同时还需要用合理的方法进行空间解释,这对于气象公众服务和气候变化研究有很重要的科学价值。

基于以上对气候季节研究进展以及不足,本文选择国家气象中心发布的中国地面气温日值 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 格点数据集(V2.0),参照气候季节划分标准(QX/T152—2012),利用改进的多元回归模型对1961—2016年中国的气候季节空间分布、不同季节的持续日数及其时间变化规律进行分析。这不仅对气候区划有参考价值,同时对规范相关业务和公众气象服务,具有十分重要的科学意义和应用价值。

2 资料来源与方法

2.1 数据来源

研究中使用数据涉及地面气温日值 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 格点数据、中国地面气候资料日值数据集(V3.0)中699个气象站逐日平均气温数据,其中地面气温日值 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 格点数据来自中国气象局国家气象信息中心提供的中国地面气温日值 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 格点数据集(V2.0),台湾省资料暂缺,该数据集经验证后发现所选用的插值模型对气温场的插值效果较好,插值精度较高^[26]。海拔高程数据选取美国地质勘探局(United States Geological Survey)提供的Global 30 Arc-Second Elevation(GTOPO 30)数据集,分辨率为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 。

2.2 研究方法

2.2.1 多元回归栅格法 气候要素变化往往与地理环境有直接关系,而地理环境宏观因子(纬度、经度、海拔、坡度、坡向)对气候要素的分布起到了决定性作用^[27-28],气候要素与地理宏观因子之间存在线形或者非线性关系。在构建函数关系时,判断各宏观因子与气候要素之间的函数关系,运用逐步回归分析法剔除相关性较低因子,选取拟合度较高($R^2 > 0.8$)的参数构建气候要素与地理宏观因子之间的函数关系式:

$$Y = a_1\theta + a_2\theta^2 + a_3\theta^3 + a_4\sin\theta + a_5\ln\theta + b_1\varphi + \dots + c_1h + \dots + f(\varepsilon) \quad (1)$$

式中:Y为所求气候要素; θ 、 φ 、 h 分别表示纬度、经度和海拔; $f(\varepsilon)$ 为残差(模拟值与实测值之间的误差)。分别将各地理宏观因子构建栅格图层,在ArcGIS中利用栅格计算器模块输入函数关系式计算。

研究中所选择的 0.5° 分辨率格点数据集是基于 30 m 分辨率数字高程模型DEM,采用

ANUSPLIN 软件的薄盘样条法计算获得，原始序列分辨率是 30 m，数据制作者为了方便存储，相对于原始序列进行了抽稀。为了更加清楚的解释气候季节的空间表达，在空间插值过程中加入多元回归模型进行降尺度分析，所有涉及计算栅格数据均处理成 0.0833°×0.0833° (1 km) 分辨率。通过回归分析将拟合度较高的参数纳入构建气象要素与地理宏观要素的关系式。本文中划分气候季节的标准是以气候季节的持续天数为标准，因此在构建模型时将气候季节的天数与地理宏观要素进行多元回归计算。同时为了检验 0.5°分辨率格点的气候季节持续天数的插值精度，这里专门选取中国气象局国家气象信息服务中心下载的中国地面气候资料日值数据集 (V3.0) 中 699 个气象站逐日平均气温计算的站点气候季节持续天数进行验证。根据表 1 中公式和图 1a 中计算所得的复相关系数以及图 1b 中以气候基准期为参考期的平均相对误差，可以发现在青藏高原一些海拔相对较高站点模拟精度较低，其他地区的误差均控制在 5 天以内，说明改进后的模型在戴声佩等^[27]研究基础上对气象要素的模拟精度有了显著提高，尤其是对时间和空间连续性较好的气象要素。

2.2.2 常年气温序列计算 对选定的 30 年气温序列，计算同日平均气温的常年值，得到常年气温序列^[21]。某日平均气温常年值计算见式：

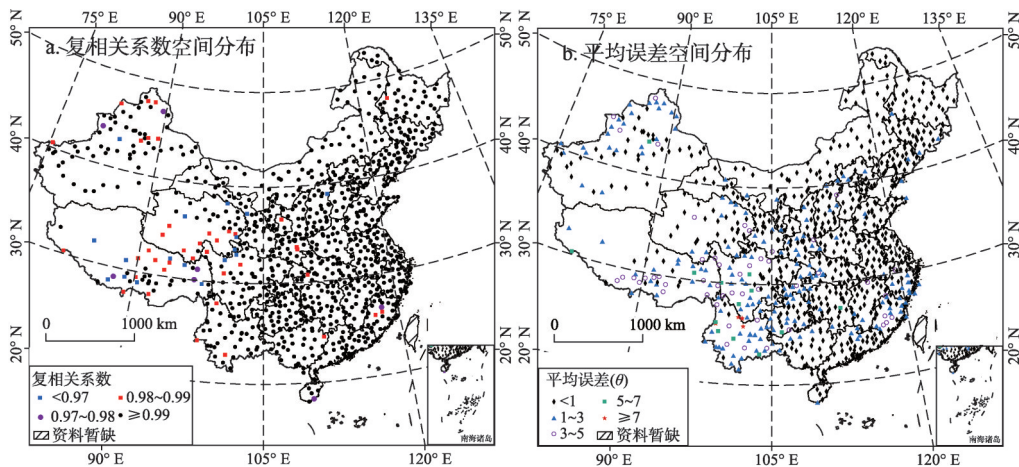
$$T_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n t_{ij} \tag{2}$$

式中： T_i 为第*j*日的平均气温常年值 (°C)； t_{ij} 第*i*年第*j*日平均气温 (°C)；*n*为选定年份长

表 1 不同气候基准期中国气候季节长度的多元回归模拟

Tab. 1 Multiple regression models for the duration of climatic seasons in China for different climate normals

气候基准期	气温界限(°C)	多元回归模型	R ²	显著性水平
1961—1990 年	10	$Y = 3670.94 + 46.96\theta - 0.003\theta^3 - 1.76 \sin \theta - 1351.9 \ln \theta - 119.33 \ln \varphi - 0.02h$	0.97	0.001
	22	$Y = 396.03 + 60.16\theta - 0.005\theta^2 + 2.42 \sin \theta - 1466.7 \ln \theta - 121.4 \ln \varphi - 0.11h$	0.958	0.001
1971—2000 年	10	$Y = 3664.61 + 46.48\theta - 0.004\theta^3 - 1.98 \sin \theta - 1347.7 \ln \theta - 118.44 \ln \varphi - 0.017h$	0.97	0.001
	22	$Y = 733.87 + 65.55\theta - 0.74\theta^2 + 1.75 \sin \theta - 1591.49 \ln \theta - 165.82 \ln \varphi - 0.11h$	0.958	0.001
1981—2010 年	10	$Y = 3500.66 + 42.68\theta - 0.003\theta^3 - 2.11 \sin \theta - 1265.95 \ln \theta - 114.2 \ln \varphi - 0.02h$	0.97	0.001
	22	$Y = -814.78 + 67.93\theta - 0.012\theta^2 + 2.1 \sin \theta - 855.36 \ln \theta - 147 \ln \varphi - 0.11h$	0.959	0.001



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2885号的标准地图制作，底图无修改。

图 1 多元回归模型模拟结果验证图

Fig. 1 Verification on the simulation results of the multiple regression model

度, 本文中 n 取30。

2.2.3 常年滑动平均气温序列计算 依据常年气温序列计算5 d滑动平均值, 得到常年滑动平均气温序列^[21]。5 d滑动平均值计算见式:

$$TM_j = \frac{t_{j-4} + t_{j-3} + t_{j-2} + t_{j-1} + t_j}{5} \quad (3)$$

式中: TM_j 第 j 日的5 d滑动平均气温(°C); 第 j 日平均气温(°C)。

2.2.4 常年气候季节起始日确定 在气候季节划分标准(QX/T152—2012)中^[21], 当常年滑动平均气温序列连续5 d大于或等于10 °C, 则以其所对应的常年气温序列中第一个大于或等于10 °C的日期作为春季起始日; 当常年滑动平均气温序列连续5 d大于或等于22 °C, 则以其所对应的常年气温序列中第一个大于或等于22 °C的日期作为夏季起始日。秋季起始日: 当常年滑动平均气温序列连续5 d小于22 °C, 则以其所对应的常年气温序列中第一个小于22 °C的日期作为秋季起始日; 当常年滑动平均气温序列连续5 d小于10 °C, 则以其所对应的常年气温序列中第一个小于10 °C的日期作为冬季起始日。如果秋季起始日后的滑动平均气温序列不满足冬季指标, 则从春季起始日前的序列中确定。

2.2.5 当年气候季节起始日期确定 根据气候季节划分标准(QX/T152—2012)^[21], 基于当年气温序列计算5 d滑动平均气温, 如果初次判断的起始日期比常年日期偏早15 d以上, 需要进行起始日期的二次判断。如果初次满足季节指标的5 d连续过程后至常年起始日之间, 滑动平均气温序列均满足季节指标, 则当年季节起始日按初次判断的日期确定。如果初次5 d连续过程后滑动平均气温序列有不满足季节指标的, 则需计算至序列再次连续5 d满足季节指标。当两次连续过程之间, 满足季节指标的累计天数大于或等于不满足的天数, 则以初次判断的起始日作为该气候季节的开始日期; 否则, 按第二次判断的起始日确定。

2.2.6 常年气候季节区的确定 参照气候季节划分标准(QX/T152—2012)中不同气候季节区的划分定义^[21], 分别以常年滑动平均气温序列10 °C和22 °C为阈值划分常年气候季节区。如果常年滑动平均气温序列无连续5 d大于或等于10 °C, 则该地为常冬区, 不做季节划分; 常年滑动平均气温序列无连续5 d小于22 °C, 则该地为常夏区, 不做季节划分; 常年滑动平均气温序列无连续5 d小于10 °C和大于或等于22 °C, 则该地为常春区, 不做季节划分; 常年滑动平均气温序列无连续5 d小于10 °C, 则该地为无冬区, 只做春季、夏季和秋季划分; 常年滑动平均气温序列无连续5 d大于或等于22 °C, 则该地为无夏区, 只做春季、秋季和冬季划分; 除以上5种情况外, 该地为四季分明区, 划分春季、夏季、秋季和冬季。

3 结果与分析

3.1 不同气候基准期中国气候季节时空分布变化

结合气候季节划分标准(QX/T152—2012)常年气候季节界定方法(2.2.4)划分中国气候季节, 通过统计可以发现除南海地区部分低纬度地区岛屿为常夏区之外, 中国大陆典型常年气候季节有常冬区、无冬区、无夏区以及四季分明区, 未发现有常夏区和常春区分布。

统计1961—1990年、1971—2000年、1981—2010年不同气候基准期中国典型气候季节持续时长, 利用多元回归法制作全国不同气候季节栅格图层, 从图2可以看出各气候季节空间分布以及其占全国国土面积百分比。其中, 无冬区主要分布在广西、广东省北

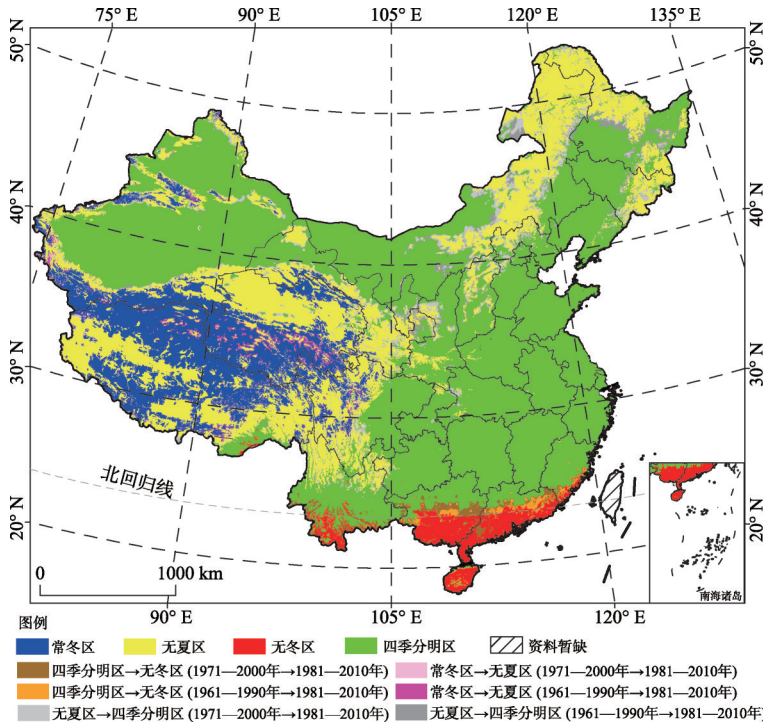
回归线以南区域、海南岛以及云南省海拔较低的河谷地区，多年平均分布面积占到全国面积的4%，该区域常年日平均气温 > 10 ℃，春季和秋季持续时间较短，夏季持续时间较长；常冬区主要分布在祁连山、天山、喀喇昆仑山、冈底斯山脉以及喜马拉雅山脉拔高于4000 m的地区，多年平均分布面积占全国的10.5%，该区域属于高寒地区，常年日平均气温低于10 ℃；无夏区主要分布在高海拔和高纬度地区，其中青藏高原、天山山脉、阿尔泰山脉海拔以及周边海拔高于2500 m区域、东北大小兴安岭以及长白山区均有分布，多年平均分布面积占到全国的27.5%；上述气候季节区之外为四季分明区，多年平均分布面积占到了全国的58%。

气候季节区在不同气候基准期的变化不是很明显，只在局部区域发生变化，结合图2可以看出无冬区分布面积占比在逐期上升，1981—2010年较1961—1980年增加0.7%；常冬区和无夏区逐年减小，其中常冬区1981—2010年较1961—1980年分布面积减少0.89%，无夏区减少0.51%；四季分明区分布面积占比在1961—1990年最低，之后开始增加但幅度不大。

空间位置上来看无冬区面积扩展区域主要集中在广西和广东省中部24°N以北地区和福建省南部地区；常冬区分布范围缩减部分出现在祁连山、阿尼玛卿山和巴颜喀拉山东段，无夏区分布范围缩减区域出现在陇东黄土高原和大兴安岭西南麓。中国区域气候季节分区整体出现无冬区范围扩大，常冬区、无夏区范围缩小趋势，其中常冬区范围缩减最为显著。

3.2 1961—2016年中国气候季节分布面积变化趋势分析

根据2.2.5中的计算方法，结合常年气候季节对当年气候季节的起止日期进行二次判



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2885号的标准地图制作，底图无修改。

图2 不同气候基准期中国气候季节空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of climatic seasonal divisions in different climate normals in China

断(不同年代际选择相对应的常年气候季节: 1961—1970年选择1961—1990年、1971—1980年选择1971—2000年、1981—2016年选择1981—2010年)。运用多元回归模型对经过二次计算后的当年气候季节进行空间插值, 统计不同气候季节分区的面积占比。图3a和表2可以看出1961—2016年常冬区分布范围以0.69%/10a的趋势显著减少($p < 0.001$), 无冬区分布范围以0.22%/10a的趋势显著增加($p < 0.01$), 无夏区和四季分明区均出现面积占比增加趋势, 但未通过统计学显著性检验。对比各气候季节分区面积比例变化可以看出四类气候季节分区波动变化明显, 其中四季分明区自1999年以来面积占比一直保持在60%以上, 1998年以后常冬区面积占比的均值较之前低了3%。

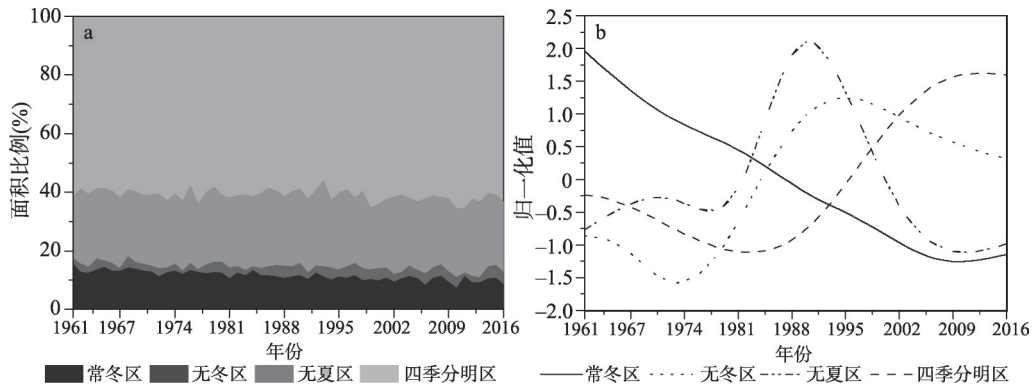


图3 1961—2016年各气候季节分区面积占中国大陆面积比例及其变化趋势

Fig. 3 The area proportions of different climatic seasonal divisions and the variation trend in China from 1961 to 2016

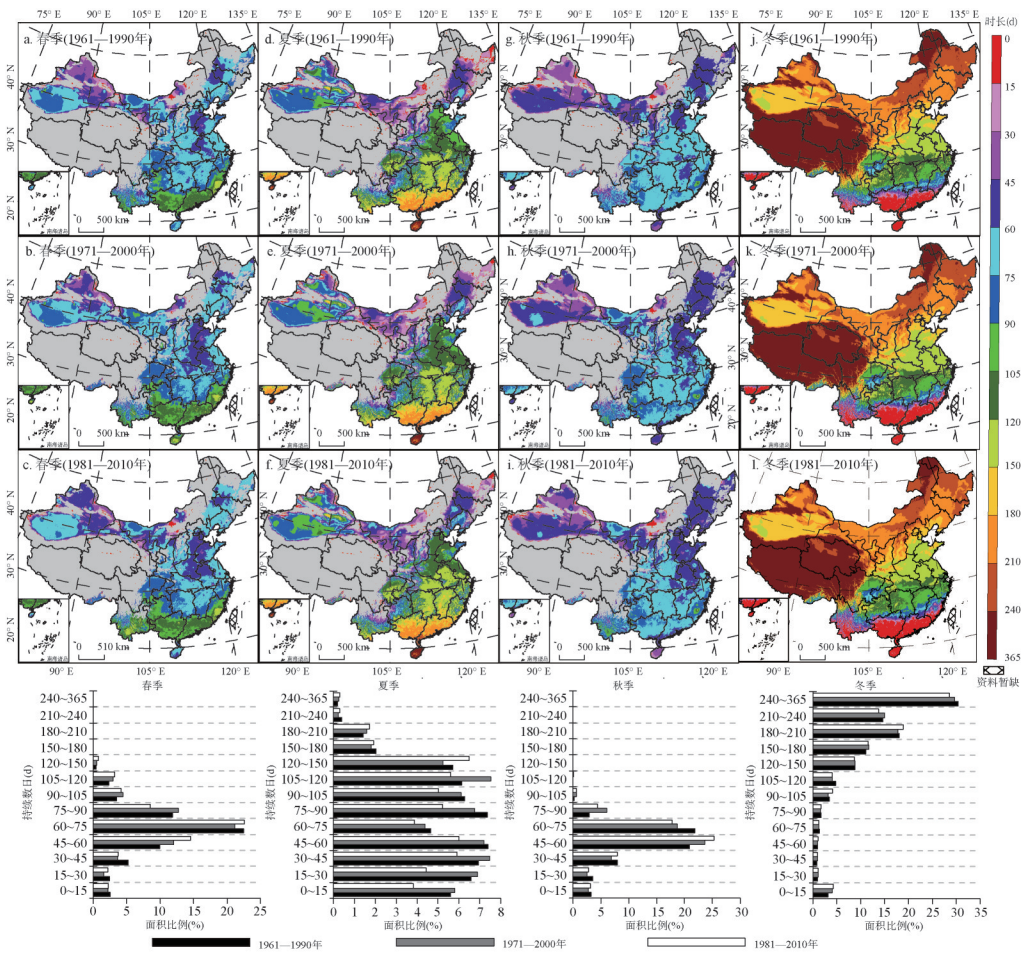
分别对四类气候季节分区的面积占比进行标准化处理, 结合解释趋势项较好的极点模态经验分解^[29-31], 并保留最后一个模态趋势项(R)。从图3b可以看出常冬区从1961年开始一直处于下降趋势; 无冬区在1974年下降至最低水平后持续上升, 1994年之后面积占比开始下降; 无夏区在1978—2005年这一时段面积占比较高, 而该时段前后面积占比大致相同; 四季分明区在1985年之后出现持续上升。

3.3 不同气候基准期中国四季持续时长变化

根据气候季节划分定义, 研究中涉及的春季、夏季、秋季持续日数只在四季分明区和无夏区中统计。对不同气候基准期四季的持续时长进行多元回归插值, 计算出不同季节的持续日数的空间分布。从图4a~4c中可以看出: 春季的持续天数在60~75 d的区域范围最大, 其次是45~60 d和75~90 d, 对比不同气候基准期发现春季持续日数在45~60 d的范围在持续扩大, 其中1981—2010年较1961—1990年增加4.6%, 这些区域主要集中在华北平原地区和新疆东部, 春季持续日数在75~90 d的范围减少最多, 1981—2010年较1961—1990年减少3.28%, 主要分布在塔里木盆地南部, 其余地区变化不大; 图4d~4f中1981—2010年夏季持续120~150 d的区域较之前两个基准期范围从长江中游延伸至淮河流域, 面积增加0.7%, 夏季持续日数低于120 d的区域在持续缩减, 其中持续日数在75~90 d和15~30 d的范围减少最多, 均在2.1%左右, 这些地区主要集中在塔里木盆地和内蒙古高原; 图4g~4i中秋季持续时间主要在30~75 d之间, 其中变化幅度最大的是60~

表2 1961—2016年各气候季节分区面积变化倾向率
Tab. 2 The area-changing tendency rate of the climatic seasonal divisions in China from 1961 to 2016

	常冬区	无冬区	无夏区	四季分明区
倾向率(%/10a)	-0.69	0.22	0.08	0.39
R^2	0.69	0.15	0.01	0.18
显著性水平	0.001	0.01	无	无



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2885号的标准地图制作，底图无修改。

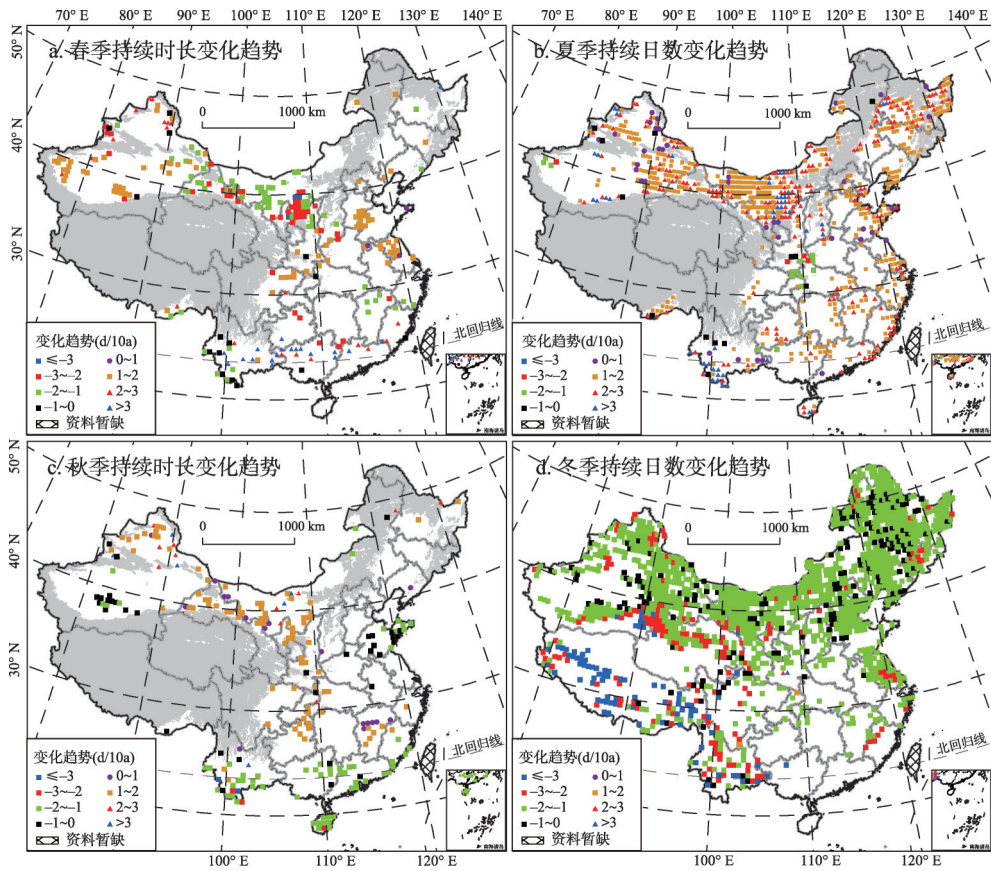
图4 不同气候基准期中中国气候季节的持续时长

Fig. 4 Durations of the climatic seasons in different climate normals in China

75 d减少至45~60 d的华北平原地区，变化面积占到了全国总面积的4%，其余天数变化不大；在图4j~4l中，冬季持续日数减少最多是大于240 d的区域，1961—1990年较1981—2010年减少1.7%，这些地区主要集中在青藏高原和大兴安岭北部，范围变化第二的是冬季持续日数为180~210 d的东北平原地区，减少了0.9%，长江中游（105~120 d）和华北（150~180 d）的冬季持续时间缩短，范围变化比例分别占全国面积的0.73%和0.79%。对比不同季节持续天数发现，春季比秋季长，尤其是塔里木盆地南部、四川盆地以及东北平原。

3.4 1961—2016年四季持续日数变化趋势

对气候基准期的四个季节持续日数分析可以看出不同区域在相对稳定的气候基准期变化相对较大，因此对1961—2016年每年四季的持续日数进行线性趋势分析，只统计变化趋势通过显著性 ($p < 0.05$) 检验的格点，图5中可以看出1961—2016年四个季节持续日数的整体变化情况：显著变化格点数量看冬季最多，夏季次之，春季和秋季相对较少，空间上北方多，南方少；从持续日数变化情况来看在黄土高原北部和河西走廊有部分区域春季持续日数出现1~3 d/10a的减少趋势，华北平原中部和南部、塔里木盆地南部



注: 该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2885号的标准地图制作, 底图无修改。

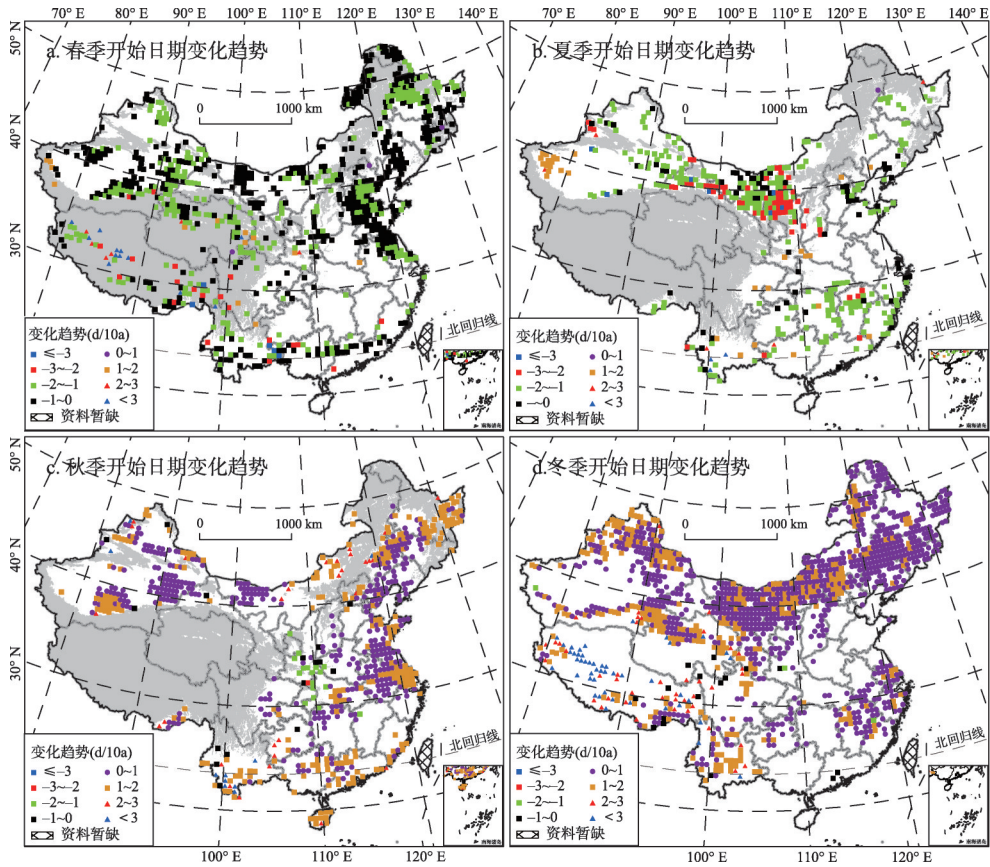
图5 1961—2016年中国春、夏、秋、冬季持续日数变化趋势

Fig. 5 Durations of spring, summer, autumn and winter in China from 1961 to 2016

有零星格点春季持续日数出现2~3 d/10a的增加趋势, 总体上看春季持续日数显著变化的格点较少且分布较稀疏; 夏季持续日数显著变化的格点主要分布在塔里木盆地东缘、河西走廊、阿拉善高原、鄂尔多斯高原、环渤海以及东北平原地区, 而南方地区则零星分布, 从持续日数的变化情况看多数区域出现1~2 d/10a的增加趋势, 其次是2~3 d/10a的增加趋势; 秋季持续日数显著变化格点与春季一样, 但数量相对更少, 在准噶尔盆地西缘、河西走廊、云贵高原部分地区零散出现1~2 d/10a的持续日数增加, 山东半岛以及海南岛出现1~2 d/10a持续日数减少; 冬季持续日数显著变化区域更加集中, 在中国北方大部分地区出现1~2 d/10a的减少趋势, 而在青藏高原则出现大于3 d/10a的持续日数减少, 南方地区显著变化区域相对较少。

3.5 1961—2016年四季开始日期变化趋势

通过分析可以看出夏季和冬季的持续日数变化最为剧烈, 因此, 研究中又对影响季节持续日数变化较大的季节起始日期进行线性趋势分析, 从图6中可以看出, 春季开始日期整体呈提前趋势, 变化显著的格点以提前0~1 d/10a和1~2 d/10a为主, 集中分布在华北平原东部、塔里木盆地东缘、柴达木盆地以及三江平原; 夏季开始日期显著变化较为集中的区域分布在塔里木盆地东缘、内蒙古高原中部、河西走廊以及30°N与北回归线之间的江南丘陵, 除塔里木盆地西缘以1~2 d/10a显著推迟外, 其余区域多出现提前1~



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2885号的标准地图制作,底图无修改。

图6 1961—2016年中国春、夏、秋、冬季当年开始日期变化趋势

Fig. 6 The starting dates of spring, summer, autumn and winter in China from 1961 to 2016

2 d/10a, 鄂尔多斯高原和河西走廊地区出现提前2~3 d/10a; 秋季开始日期显著变化区域出现5个典型分布区, 其中在塔里木盆地南部以1~2 d/10a推迟, 盆地东部和阿拉善高原北部地区出现0~1 d/10a推迟趋势, 自三江平原至长江中下游平原出现以推迟0~1 d/10a、1~2 d/10a的横跨20个纬度的交错带, 在北回归线及其以南区域则多以推迟1~2 d/10a为主; 冬季开始日期变化显著区域大致与冬季持续日数显著变化的区域一致, 开始日期推迟0~1 d/10a的区域最多, 其次是1~2 d/10a。

通过以上两节对1961—2016年气候季节的持续日数及其开始日期的变化分析可以发现北方地区变化的显著区域多于南方, 而且在高海拔地区变化的趋势大于平原区。从持续日数的变化可以看出春季和秋季、冬季整体出现缩减, 夏季持续日数增加幅度最大, 从影响持续日数的季节起止日期来看, 夏季持续日数的增加与夏季开始日期的提前有关, 而冬季持续日数的减少与其开始日期的推后关系密切。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文采用中国气象局发布的气候季节划分标准(QX/T152—2012), 选取国家气象信

息中心发布的0.5°分辨率再分析逐日平均气温格点数据,同时利用改进的多元回归模型模拟了气候季节的空间分布,通过分析得出了以下主要结论:①改进后的多元回归模型增加了非线性成分,拟合度较先前的研究提高很多,能够对时间和空间连续性较好的气象要素的空间分布进行更加准确地解释;②中国大陆分布的主要气候季节有分布在青藏高原的常冬区、北回归线及其以南的无冬区、青藏高原和大小兴安岭的无夏区以及四季分明区,常夏区和常春区暂无分布;③多年气候季节分区的面积变化来看,常冬区分布范围以0.69%/10a的趋势显著缩小,无冬区以0.22%/10a趋势显著扩大,无夏区和四季分明区范围变化不明显,常年气候季节变化主要集中在青藏高原和内蒙古高原海拔较高地区,其余地区几乎没有变化;④常年和多年气候季节的四季持续日数变化显著区域主要集中在北方地区,内蒙古高原中西部、河西走廊以及新疆东部夏季开始日期的提前导致这些地区夏季持续日数变化显著增加,北方大部分地区冬季开始日期的推后造成冬季持续日数减少,青藏高原减少天数相比低海拔地区更多,而春季和秋季持续日数显著变化区域分布零散。

4.2 讨论

四季的划分通常有天文、气象、节气、农历、物候、候温等多种方法,而中国幅员辽阔,地理环境差异明显,用相同的时间去界定季节的起止显然不合理。研究中所使用的气候季节划分行业标准发布之初得到了广泛的应用。有学者发现在部分地区出现与实际季节特征不相符的情况^[24],或者是气候季节起止日期判断标准有待改进^[25],这些研究都是基于区域气候特征去考虑,对于全国大范围的气象预报和气候区划代表性不强,不具有普适应。此外,也有学者提出用非线性相似度方法划分中国的四季^[32],该方法计算涉及气象要素多,物理机制复杂,但是其在大众中的接受程度有限,气象预报业务中推广难度大。

改进后的气候季节划分标准较先前基础上增加的当年气候季节起止日期的二次判断,消除了因气候异常产生的误判。划分标准中常年气候季节作为一个稳定的气候态能够为气候区划提供参考,同时在空间分布的解释方法中引入改进后的多元回归栅格法,相较之前研究,该方法在空间上更能合理的反映连续性较好的地理要素分布。

参考文献(References)

- [1] Netz B, Davidson O R, Bosch P R, et al. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers. Computational Geometry, 2007, 18(2): 95-123.
- [2] Hartfield G, Blunden J, Arndt D S. State of the climate in 2017. Bulletin of the American Meteorological Society, 2018, 99(8): Si-S310.
- [3] Blunden J, Arndt D, Macias Fauria M. State of the climate in 2016. Bulletin of the American Meteorological Society, 2011, 87(6): 17-21.
- [4] Fischer E M, Knutti R. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. Nature Climate Change, 2015, 5(6): 560-564.
- [5] Gensini V A, Mote T L. Downscaled estimates of late 21st century severe weather from CCSM3. Climatic Change, 2015, 129(1): 307-321.
- [6] Omid M, Amir A K. Substantial increase in concurrent droughts and heatwaves in the United States. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(37): 11484-11489.
- [7] Jiang Fengqing, Hu Ruji, Zhang Yanwei, et al. Variations and trends of onset, cessation and length of climatic growing season over Xinjiang, NW China. Theoretical & Applied Climatology, 2011, 106(3): 449-458.
- [8] Vitasse Y, François C, Delpierre N, et al. Assessing the effects of climate change on the phenology of European temperate trees. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(7): 969-980.
- [9] Wang Xuhui, Piao Shilong, Ciais P, et al. Spring temperature change and its implication in the change of vegetation

- growth in North America from 1982 to 2006. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(4): 1240-1245.
- [10] Liang Liang, Zhang Xiaoyang. Coupled spatiotemporal variability of temperature and spring phenology in the Eastern United States. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(4): 1744-1754.
- [11] Choi Y S, Gim H J, Ho C H, et al. Climatic influence on corn sowing date in the Midwestern United States. *International Journal of Climatology*, 2016, 37(3): 1595-1602.
- [12] Allen M, Sheridan S. Evaluating changes in season length, onset, and end dates across the United States (1948-2012). *International Journal of Climatology*, 2016, 36(3): 1268-1277.
- [13] Erlat E, Türkeş M. Dates of frost onset, frost end and the frost-free season in Turkey: Trends, variability and links to the North Atlantic and Arctic Oscillation indices, 1950-2013. *Climate Research*, 2016, 69(2): 155-176.
- [14] Wypych A, Ustrnul Z, Sulikowska A, et al. Spatial and temporal variability of the frost-free season in Central Europe and its circulation background. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(8): 3340-3352.
- [15] Jaagus J, Ahas R. Space-time variations of climate seasons and their correlation with the phenological development of nature in Estonia. *Climate Research*, 2000, 15(3): 207-219.
- [16] Jaagus J, Truu J, Ahas R, et al. Spatial and temporal variability of climatic seasons on the East European Plain in relation to large-scale atmospheric circulation. *Climate Research*, 2003, 23(2): 111-129.
- [17] Chang Paokun. The duration of four seasons in China. *Acta Geographica Sinica*, 1934(1): 29-74. [张宝堃. 中国四季之分配. *地理学报*, 1934, 1: 29-74.]
- [18] Yan Denghua, Geng Simin, Luo Xianxiang, et al. Spatial and temporal variation characteristics of the four seasons in the northern China. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 29(9): 1105-1110. [严登华, 耿思敏, 罗先香, 等. 中国北方地区四季的时空演变特征. *地理科学*, 2011, 29(9): 1105-1110.]
- [19] Miao Qilong, Wang Yong. Analysis of the division of four seasons in China and its changing characteristics// *Proceedings of the Climate Change Subcommittee of the 2007 Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society*. Guangzhou: Chinese Meteorological Society, 2007: 693-701. [缪启龙, 王勇. 中国四季的划分及其变化特征分析//中国气象学会2007年年会气候变化分会场论文集. 广州: 中国气象学会, 2007: 693-701.]
- [20] Dong Wenjie, Jiang Yundi, Song Yang. Response of the starting dates and the lengths of seasons in Mainland China to global warming. *Climatic Change*, 2010, 99(1): 81-91.
- [21] Department of Policies, Laws and Regulations of China Meteorological Administration. *Assembling for Meteorological Standards 2012*//Chen Yu, Jiang Yundi, Chen Xianyan, et al. *Division of Climatic Season*. Beijing: China Meteorological Press, 2013: 18-26. [中国气象局政策法规司. *气象标准汇编2012*//陈峪, 姜允迪, 陈鲜艳, 等. *气候季节划分*. 北京: 气象出版社, 2013: 18-26.]
- [22] China Meteorological Administration. *China Climate Change Bulletin in 2016*. Beijing: Science Press, 2017. [中国气象局气候. *中国气候变化监测报告(2016)*. 北京: 科学出版社, 2017.]
- [23] Liu Yulian. Temporal and spatial distribution of climatic season and its variation from 1961 to 2010 in Heilongjiang province. *Journal of Meteorology and Environment*, 2015, 31(2): 89-96. [刘玉莲. 1961—2010年黑龙江省气候季节时空分布及其变化特征. *气象与环境学报*, 2015, 31(2): 89-96.]
- [24] Cheng Yuqin, You Li, Zu Yu, et al. Climate season division and its application in Chifeng Region. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(4): 171-177. [程玉琴, 尤莉, 朱宇, 等. 赤峰市气候季节划分方法及应用. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(4): 171-177.]
- [25] Chen Cheng, Gu Degao, Lu Yang. Change of climatic seasons between urban area and suburb in Wuhan from 1960 to 2009. *Journal of Meteorology and Environment*, 2015, 31(1): 96-100. [陈城, 谷德高, 卢洋. 1960—2009年武汉城区与郊区气候季节的变化. *气象与环境学报*, 2015, 31(1): 96-100.]
- [26] Xu Yan, Tang Guoli, Zhang Qiang. Analysis of the variation of the air temperature over China during the global warming hiatus period. *Climate Change Research*, 2017, 13(6): 569-577. [许艳, 唐国利, 张强. 基于均一化格点资料的全球变暖趋缓期中国气温变化特征分析. *气候变化研究进展*, 2017, 13(6): 569-577.]
- [27] Dai Shengpei, Li Hailiang, Luo Hongxia, et al. The spatio-temporal change of active accumulated temperature $\geq 10^{\circ}\text{C}$ in southern China from 1960 to 2011. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 69(10): 650-660. [戴声佩, 李海亮, 罗红霞, 等. 1960—2011年华南地区界限温度 10°C 积温时空变化分析. *地理学报*, 2015, 69(10): 650-660.]
- [28] Flocas A A, Giles B D, Angouridakis V E, et al. On the estimation of annual and monthly mean values of air temperature over Greece using stepwise multiple regression analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 1983, 32(2): 287-295.
- [29] Wang Jinliang, Li Zongjun. *Extreme-point Symmetric Mode Decomposition: The New Way of Data Analysis and Scientific Exploration*. Beijing: Higher Education Press, 2015. [王金良, 李宗军. *极点对称模态分解方法: 数据分析与*

科学探索的新途径. 北京: 高等教育出版社, 2015.]

- [30] Li Shuangshuang, Lu Jiayu, Yan Junping, et al. Spatiotemporal variability of temperature in northern and southern Qinling Mountains and its influence on climatic boundary. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(1): 13-23. [李双双, 芦佳玉, 延军平, 等. 1970—2015年秦岭南北气温时空变化及其气候分界意义. *地理学报*, 2018, 73(1): 13-23.]
- [31] Wang Fei, Wang Zongmin, Yang Haibo, et al. Study of the temporal and spatial patterns of drought in the Yellow River Basin based on SPEI. *Science China Earth Sciences*, 2018, 48(9): 1169-1183. [王飞, 王宗敏, 杨海波, 等. 基于SPEI的黄河流域干旱时空格局研究. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(9): 1169-1183.]
- [32] Zhang Shixuan, Zhang Lu, Sun Shupeng, et al. Changes of the seasons in Mainland China under global warming. *Plateau Meteorology*, 2011, 30(3): 659-667. [张世轩, 张璐, 孙树鹏, 等. 全球变暖情况下中国季节的变化. *高原气象*, 2011, 30(3): 659-667.]

Spatio-temporal distribution of the climatic seasons in China from 1961 to 2016

MA Bin, ZHANG Bo

(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In this study, the spatio-temporal distribution characteristics of the climatic seasons in China from 1961 to 2016 are analyzed by using the climatic seasonal division standard (QX/T152-2012) issued by the China Meteorological Administration, the Chinese daily surface temperature dataset (V2.0, $0.5^\circ \times 0.5^\circ$) issued by the National Meteorological Information Center, and the revised multiple regression model. The linear trend and extreme-point symmetric mode decomposition method (ESMD) are used to analyze the variations in the distribution area, durations, and start date of the climatic seasons. The main results are as follows. There are four climatic seasonal regions in China, namely, the perennial-winter, no-winter, no-summer and discernible regions, while there are no perennial-summer or perennial-spring regions. Considering the area variation of each region, the range of the perennial-winter region is significantly narrower, and the area of no-winter region increases, while the areas of no-summer and discernible regions have no significant changes. The regions with significant changes in the normal climatic seasons are mainly distributed in the Qinghai-Tibet Plateau and the Inner Mongolia Plateau. The regions with significant changes in the durations of the climatic seasons are mainly found in the northern China. The advance of the summer start date has led to a significant increase in the durations of climatic seasons in the central and western Inner Mongolia, Hexi Corridor and Xinjiang, and the postponement of the winter start date has resulted in a decrease in the number of winter days in these areas. In general, the climatic seasons at high altitudes in western China have more significant changes than those in the eastern coastal plains. Overall, the distribution and changes of the climatic seasons in China are revealed by this investigation, which could provide a reference for operational weather forecasting and climatic region division.

Keywords: climatic seasons; multiple regression model; spatio-temporal distribution; China