

任妍, 赵巧华. 2017. 1971~2013年我国四季开始日期及生长期长度的变化特征分析 [J]. 气候与环境研究, 22 (2): 203-211. Ren Yan, Zhao Qiaohua. 2017. Analysis of changes in starting dates of the four seasons and the length of the growing season in China during 1971 to 2013 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (2): 203-211, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16030.

1971~2013年我国四季开始日期及生长期长度的变化特征分析

任妍¹ 赵巧华²

¹ 南京信息工程大学地理与遥感学院, 南京 210044

² 南京信息工程大学水文气象学院, 南京 210044

摘要 利用中国气象局国家气象信息中心提供的中国584个气象站点1971~2013年的逐日气温数据,采用线性倾向估计和经验模态分解(EMD)等方法,以地理信息系统为数据处理平台,分析我国43年来四季起始日以及生长期的变化特征。结果表明:新疆、云南和四川地区的四季起始日变化呈现明显的南北差异;全国大部分地区春、夏季起始日提前,春季比夏季提前趋势更明显,江苏、安徽、湖北大部 and 云南北部春季提前显著,提前率为4.1~7.2 d/10 a;夏季提前的区域更广,新疆东部、甘肃西部、华南大部 and 云南南部夏季提前显著,提前率为2.9~4.6 d/10 a;全国大部分地区秋、冬季起始日推迟,秋季比冬季推迟的范围更大,新疆南部和四川西部秋季推迟明显,推迟率为4.4~8.6 d/10 a;冬季推迟趋势更显著,新疆东南部和青海大部冬季推迟明显,推迟率为4.7~13.8 d/10 a;全国各地区生长期均有延长,最显著的是云川交界处和新疆东南部地区,延长率为20.1 d/10 a。EMD和线性倾向估计的结果基本一致,但EMD得到的春季起始日推迟地区的范围更大,夏、秋、冬季起始日以及生长期的变化趋势更显著。

关键词 四季起始日 生长期 气候趋势系数

文章编号 1006-9585 (2017) 02-0203-09

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16030

Analysis of Changes in Starting Dates of the Four Seasons and the Length of the Growing Season in China during 1971 to 2013

REN Yan¹ and ZHAO Qiaohua²

¹ Graduate School of Geography and Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² Hydrology and Meteorology Institute, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract Linear trend estimation and empirical mode decomposition (EMD) etc. were applied to analyze daily temperature data during 1971–2013 collected at 584 standard meteorological stations and provided by the National Meteorological Information Center, China Meteorological Administration. Based on the geographic information system data processing platform, the variation trends of starting dates of the four seasons and the length of the growing season in the recent 43 years were analyzed. The results show that changes in starting dates of seasons in Xinjiang, Yunnan, and Sichuan showed significant differences between the north and south. The starting dates of spring and summer advanced in most regions of China, particularly for the spring. In Jiangsu, Anhui, Hubei, and northern Yunnan, the starting date of

收稿日期 2016-01-28; **网络预出版日期** 2016-05-30

作者简介 任妍, 女, 1991年出生, 硕士研究生, 主要从事气候变化方面的研究。E-mail: 15251718686@163.com

通讯作者 赵巧华, E-mail: qhzhao@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目(41371222), 青蓝工程, 六大大才高峰

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41371222), Blue Project, Six Talent Peaks Project

spring advanced by 4.1–7.2 d/10 a. The area with advanced starting date of summer was wider than that with advanced spring. Eastern Xinjiang, western Gansu, southern Yunnan, and South China experienced the most significant advancement of summer, which could reach 2.9–4.6 d/10 a. The starting dates of autumn and winter delayed in most areas of China. The autumn season started late by 4.4–8.6 d/10 a in southern Xinjiang and western Sichuan fall, while later starting of the winter was even more significant, particularly in southeastern Xinjiang and Qinghai, where the winter started late by 4.7–13.8 d/10 a. The length of growing season became longer in various regions, with the largest increase of 9.7–20.1 d/10 a occurring at the border of Sichuan and Yunnan and southeastern Xinjiang. EMD and linear tendency estimate results basically were identical, but the area of late spring starting was bigger in EMD result than in linear tendency estimate results. Changes in the starting dates of summer, autumn, winter were more prominent than that in the length of growing season.

Keywords Starting dates of seasons, Growing season, Climate trend coefficient

1 引言

根据 IPCC 第 5 次评估报告, 全球气候系统变暖的事实是毋庸置疑的, 报告指出 1880~2012 年全球平均温度已升高 0.85 °C, 在过去的 30 a 里, 每 10 a 地表温度的增暖幅度是 1850 年以来史无前例的 (IPCC, 2013)。在全球变暖的背景下, 我国气候变化趋势与全球变化总趋势基本一致, 我国四季已经发生了显著变化, 目前对四季起始日的研究有很多, 其中变化最显著的是春季, Qian et al. (2011) 对中国北方地区春季开始日的周期变化进行研究, 发现中国北方春季开始日都明显提前, 尤其是东北部提前趋势最显著; 郁珍艳等 (2010) 指出在 1961~2007 年四季开始日发生显著变化, 春季和夏季提早, 秋季和冬季推迟, 其中以夏季的变化最为明显; Dong et al. (2010) 研究发现从 1950 年代以来, 我国大部分地区夏季起始日在提前, 冬季起始日在推迟; 张世轩等 (2011) 采用非线性相似度量方法对中国四季进行划分, 研究表明中国春、夏季起始时间呈现提前趋势, 而秋、冬季呈现推后趋势, 尤其在 20 世纪 80 年代中后期以后变化更为明显; 钱诚等 (2011) 提出比四季更详细的 24 节气中春、夏节气提前, 秋、冬节气推迟。同时也有很多学者对我国局部地区的四季变化进行研究, 张克新等 (2011) 发现河西地区东部春季开始日比中西部提早趋势明显, 而中部夏、秋季开始日提早趋势大于东西部, 东部冬季开始日推迟趋势远大于中西部; 范思睿等 (2013) 研究发现青藏高原的四季变化主要表现为春、夏季的提前, 秋季和冬季的推后, 其中春、冬季变化显著; 王雷等 (2014) 对东北地区研究发现春、夏季的开始日在明显提前, 秋、冬季的开始日明显推迟。国内对生长期变化趋

势的研究也有不少 (Yan et al., 2011), 徐铭志和任国玉 (2004) 将中国分为青藏高原、南方和北方研究了 1961~2000 年气候生长期的变化趋势; Song et al. (2011) 对 1951~2007 年我国 114 个站点数据分析发现北方比南方生长期变化更显著, 且生长期的增长是由春季提前造成的; Xia and Yan (2014) 对我国东部 16 个站点的生长期进行研究, 发现当地 1909~2012 年的生长期平均每年增长 1.5 d。由以上可知, 我国四季和生长期的变化存在明显的时空差异, 并不完全统一。因此, 本文采用常用的线性倾向估计和提取非平稳、非线性数据序列趋势更好的经验模态分解 (EMD) (Huang et al., 1998, 1999) 自适应趋势统计方法, 对四季起始日和生长期进行研究, 旨在更加精细化的反应其不同区域的变化特征, 有助于更好地认识全球气候变暖背景下的中国气候变化区域特征; 确定不同地区的四季起始日和生长期, 也可以为国家因地制宜的建设生态环境、调整农业结构、促进社会经济可持续发展以及城市规划决策等提供重要的科学依据。

本文与郁珍艳等 (2010) 采用相同的四季划分标准, 区别在于研究时段不同, 采用了近几年的数据, 对生长期的变化趋势也进行了分析, 此外还采用 EMD 非线性趋势分析的方法对四季初始日和生长期的变化趋势进行研究。

2 数据来源与研究方法

2.1 资料来源

本文采用中国气象局国家气象信息中心资料室提供的经过均一化处理的全国 753 个台站 1950~2013 年逐日平均气温资料。由于各个站点存在建站时间不同、资料长度不一、环境差异以及迁站等原因, 为了统一资料长度, 减少插值引入的误

差并保证连续的记录, 最终选取了全国 584 个站点 (图 1) 1971~2013 年的资料用于本次研究。因每个站点所处的地理位置不同而导致四季的情况有所不同, 例如华南一些站点几乎全年皆夏, 而东北北部以及青藏高原地区几乎没有夏季, 同一地区在不同年份也有差异, 所以, 最后计算得到的四季起始日以及生长期长度的结果并不是都包括了 584 个站点。

2.2 研究方法

惯常情况下, 我们根据阳历把 3~5 月作为春季, 6~8 月作为夏季, 9~11 月作为秋季, 12 月至次年 2 月作为冬季。这种划分四季的标准和方法虽然简便, 但也死板生硬, 常与实际气候状况有很大出入。为了使四季的划分更符合作物生长规律, 本文采用了根据平均气温和物候间关系而确定的气候季节划分方法 (陈正洪等, 2009), 即以候 (5 d) 平均气温为指标: 平均气温 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 的首日定义为冬季起始日, 平均气温 $\geq 22^{\circ}\text{C}$ 的首日定义为夏季起始日, 平均气温在 $10\sim 22^{\circ}\text{C}$ 的首日定义为春、秋季起始日。

计算 5 d 滑动平均数据, 再以滑动平均中满足上述四季温度阈值的第一天作为四季起始日 (钟保彝, 1995), 得到每个站点每年的四季起始日和生长期长度 (冬季起始日—季起始日)。对各个台站 43 年来的四季起始日距平值分别利用线性倾向估计和 EMD 方法提取趋势项后计算四季起始日变化率, 即倾向率 (单位: $\text{d}/10\text{ a}$), 再以地理信息系统为数据处理平台, 采用反距离加权插值法 (IDW) 得到中国四季起始日变化率分布图, 对两种方法得到的结果进行综合对比分析。

3 结果分析

从图 2a 可见, 利用线性倾向估计的结果中国春季起始日推迟区集中在 30°N 以南, 包括广东和广西大部, 推迟率在 $1.5\text{ d}/10\text{ a}$ 以内。中国大部分地区春季起始日都存在不同程度的提前, 其中云南、湖北、安徽、江苏以及浙江北部和河南北部提前最明显, 提前率在 $4.1\sim 7.2\text{ d}/10\text{ a}$, 这与沙万英等 (2002) 提出的我国有“北暖南冷”的变化趋势一致。黑龙江东部、北京和天津春季起始日变化很小, 剩余地区的春季提前率都在 $1.1\sim 4\text{ d}/10\text{ a}$, 通过 0.05 的显著性水平的地区有华东大部、新疆东

部、内蒙古西部、河北南部、山西、甘肃和云南; 从图 2c 可见, 利用 EMD 方法提取趋势项的结果与利用线性倾向估计的结果相比, 黑龙江北部、辽宁大部和新疆东北角春季提前率降低, 并且广东和广西春季起始日也没有出现成片的推迟区域, 而是稍有提前, EMD 方法提取趋势项的结果中国更多地区春季的提前率在 $1.4\sim 2.7\text{ d}/10\text{ a}$ 。

由图 3a 可以看出, 利用线性倾向估计的结果全国只有极少数点有 $0.1\sim 1.2\text{ d}/10\text{ a}$ 的夏季推迟率, 零星分布在广西和广东的南部、新疆牧场区、云南北部。华东大部、云南南部、甘肃西部、新疆东部、海南、广西东北部以及江西南部夏季提前明显, 提前率为 $2.9\sim 4.6\text{ d}/10\text{ a}$, 其中安徽和江苏交界处以及云南南部夏季提前率高达 $4.7\sim 8.8\text{ d}/10\text{ a}$ 。通过 0.05 的显著性水平的地区有新疆东部、甘肃西部、内蒙古东部、山东大部、华东大部和河北; 从图 3c 可见, 利用 EMD 方法提取趋势项的结果与利用线性倾向估计的结果差别不大, 陕西南部、重庆大部、贵州西部、云南北部和湖北西部夏季稍有提前的区域变大。广东和广西夏季推迟的区域不但扩大, 并且推迟率增加到 $1.7\sim 4.3\text{ d}/10\text{ a}$ 。夏季提前率最大的区域除了云南南部还有湖南中部和湖北北部, EMD 方法提取趋势项的结果中国更多地区夏季的提前率在 $1.6\sim 3.1\text{ d}/10\text{ a}$ 。

中国秋季起始日变化率的分布比较复杂, 从图 4a 可见, 利用线性倾向估计的结果新疆中部和东部、甘肃西部、四川北部以及云南南部秋季推迟率最高, 为 $4.4\sim 8.6\text{ d}/10\text{ a}$, 新疆南部、内蒙古西部、江苏南部、浙江大部、山西中部、云南大部、天津和沿海地区秋季推迟比较明显, 推迟率为 $2.2\sim 4.3\text{ d}/10\text{ a}$ 。然而新疆北部、黑龙江北部、吉林南部、山东西部、四川南部、湖南南部、甘肃东部和河南的秋季起始日却在提前, 提前率为 $1.7\sim 3.9\text{ d}/10\text{ a}$, 其中黑龙江北部秋季提前率最大达到 $7.2\text{ d}/10\text{ a}$, 剩余地区秋季都有小幅推迟, 推迟率为 $0.1\sim 2.1\text{ d}/10\text{ a}$ 。通过 0.05 的显著性水平的地区有新疆中南部、甘肃西部、内蒙古中部、黑龙江北部和四川西部; 从图 4c 可见, 利用 EMD 方法提取趋势项的结果与利用线性倾向估计的结果大体相同, 但是, 除了甘肃西部没有成片秋季推迟率很大的区域, 河南北部秋季的提前率有所增加, 黑龙江东部、陕西北部、宁夏、重庆北部、贵州大部、广西北部、湖南南部和安徽北部秋季均有提前, EMD 方法提取趋

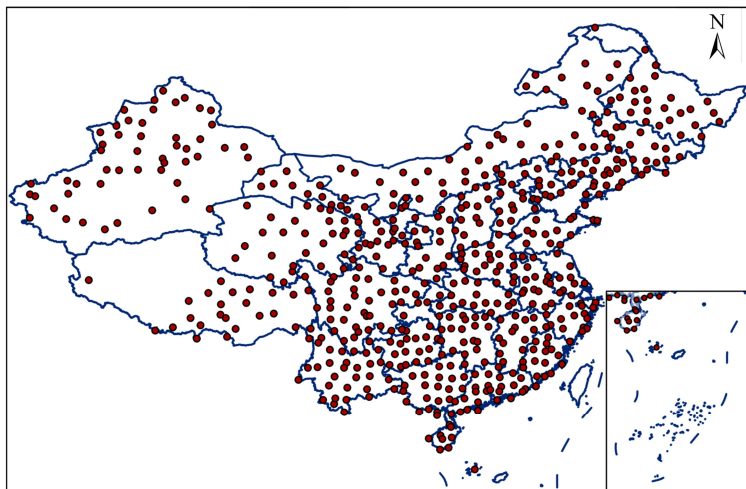


图1 584个气象站点分布图

Fig. 1 Distribution of the 584 meteorological stations

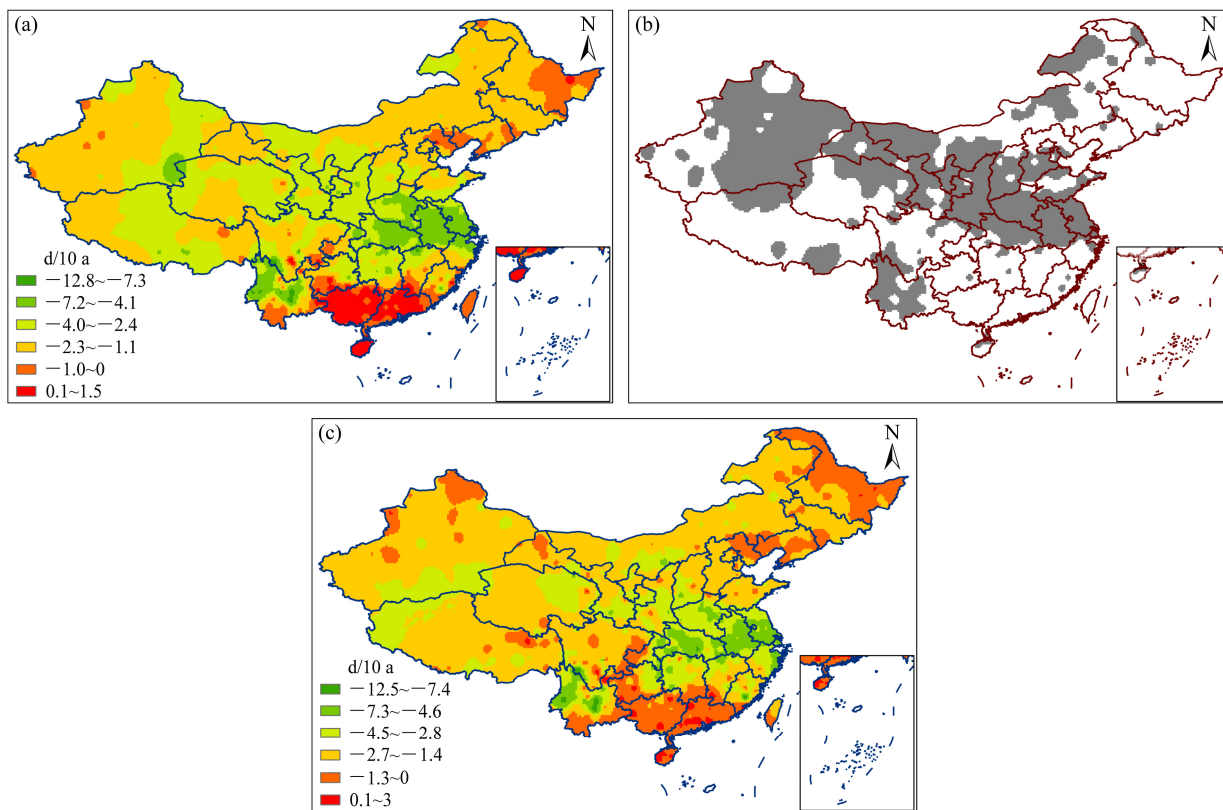


图2 春季起始日 (a) 线性拟合倾向率分类、(b) 线性拟合通过 0.05 的显著性水平的统计检验 (阴影区表示通过检验)、(c) EMD 后线性拟合倾向率分类

Fig. 2 Spring starting date: (a) Linear fitting trend rate classification; (b) linear fitting that passed the significance level of 0.05 (shaded areas); (c) linear fitting trend rate classification after EMD (Empirical Mode Decomposition)

势项的结果中国东部更多地区秋季推迟率在 $0.1 \sim 2.1 \text{ d/10 a}$ 。

从图 5a 可见, 利用线性倾向估计的结果除了新疆塔里木盆地西北部 and 黑龙江北部冬季提前, 提

前率最大为 2.2 d/10 a , 中国冬季起始日普遍在推迟。新疆南部、甘肃西部和东部、黑龙江大部、辽宁南部、河北北部、山西北部、陕西北部、四川东部、重庆和河南冬季推迟不显著, 推迟率低于 1.0 d/10 a 。

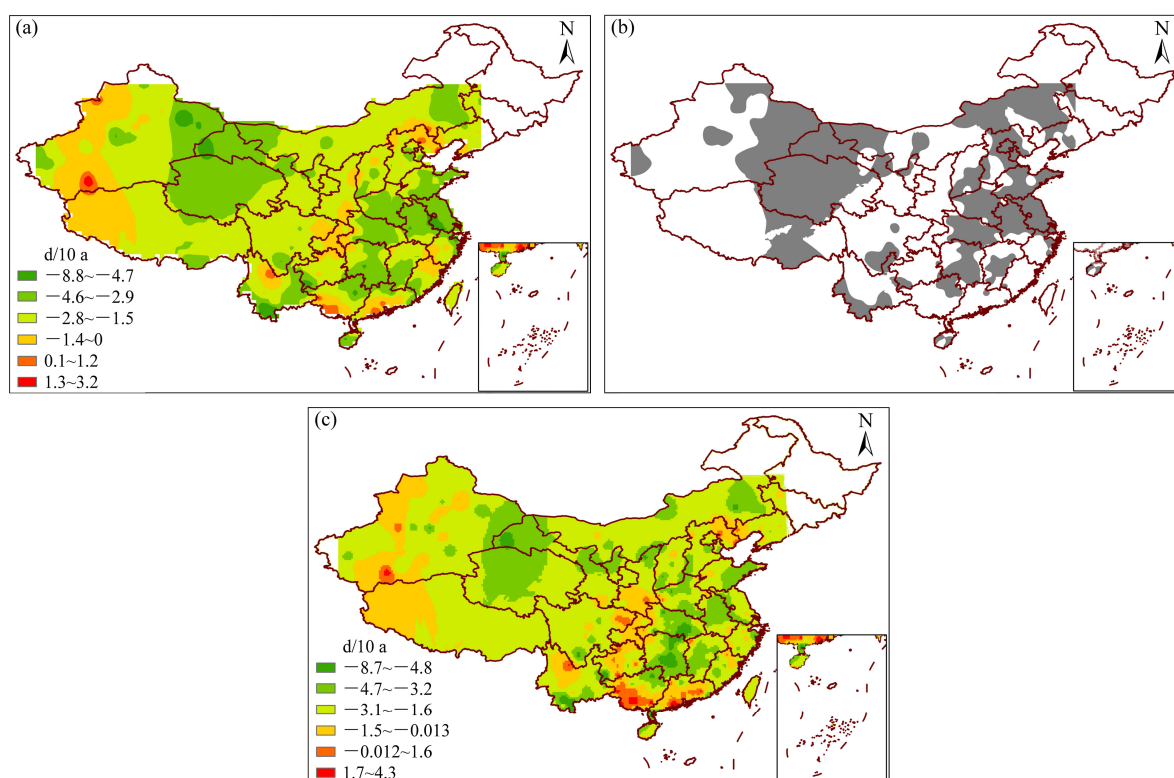


图3 夏季起始日 (a) 线性拟合倾向率分类 (空白区表示无夏)、(b) 线性拟合通过 0.05 的显著性水平的统计检验 (阴影区表示通过检验)、(c) EMD 后线性拟合倾向率分类 (空白区表示无夏)

Fig. 3 Summer starting date: (a) Linear fitting trend rate classification (blank area means no summer); (b) linear fitting that passed the significance level of 0.05 (shaded); (c) the linear fitting trend rate classification after EMD (blank area means no summer)

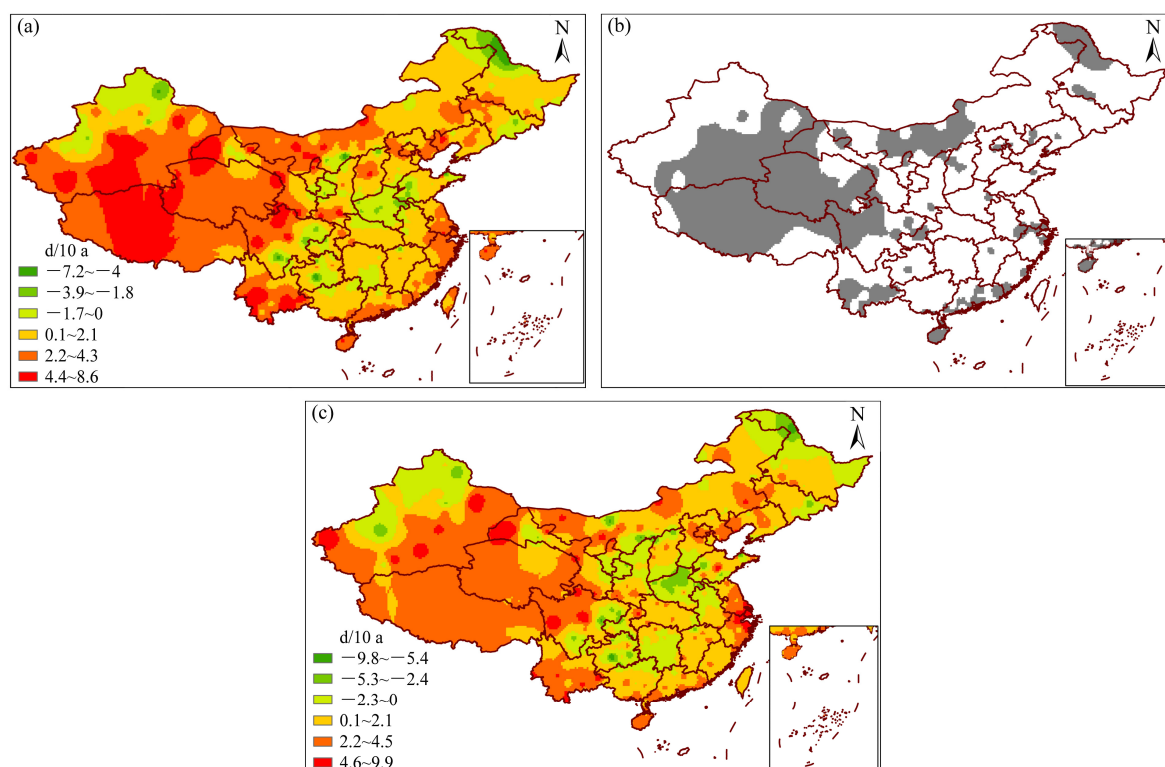


图4 秋季起始日 (a) 线性拟合倾向率分类、(b) 线性拟合通过 0.05 的显著性水平的统计检验 (阴影区表示通过检验)、(c) EMD 后线性拟合倾向率分类

Fig. 4 Autumn starting date: (a) Linear fitting trend rate classification; (b) linear fitting that passed the significance level of 0.05 (shaded); (c) linear fitting trend rate classification after EMD

冬季推迟率较大的区域集中在西南地区,包括西藏、青海、川藏交界处、四川北部和云南西部,推迟率为 2.5~4.6 d/10 a,其中新疆东南部、西藏与青海交界和川藏交界处推迟率为 4.7~7.2 d/10 a,最大有 13.8 d/10 a,其余地区冬季推迟率普遍在 1.1~2.4 d/10 a。通过 0.05 的显著性水平的地区包括疆东南部、西藏南部、青海大部、川藏交界处、四川北部、云南西部、内蒙古东部、吉林东部、山东中部和河北南部;从图 5c 可见,利用 EMD 方法提取趋势项的结果与利用线性倾向估计的结果略有差异,云南东北部和甘肃西部冬季提前明显,青海南部和西藏南部冬季推迟的范围变大,华中大部、广东和广西大部冬季推迟率在 0.1~1.1 d/10 a。

对于生长期的变化,从图 6a 可见,利用线性倾向估计的结果除了黑龙江北部有小范围区域生长期缩减率在 2.1 d/10 a 内,全国生长期都在延长。新疆东南部、青海东部、西藏中部、川藏交界处、云南中西部和江苏南部延长最明显,延长率为 6.1~9.6 d/10 a,其中新疆东南部、川藏交界处和云南西部延长率最高有 20.1 d/10 a。新疆塔里木盆地西北部、广西东北部、广东大部、河北北部和黑龙江东部生长期的延长不明显,延长率低于 1.9 d/10 a,剩余地区生长期的延长率都在 2.0~6.0 d/10 a。通过 0.05 的显著性水平的地区包括新疆东部、西藏大部、青海、内蒙古大部、吉林北部、华南大部、四川西部和福建中部;从图 6c 可见,利用 EMD 方法提取趋势项的结果与利用线性倾向估计的结果差异不大,不过新疆生长期延长率更大,普遍为 1.9~3.7 d/10 a,广西生长期延长率低于 1.8 d/10 a 的范围几乎扩大到全省,云贵川交界处的生长期延长率也低于 1.8 d/10 a。

4 讨论

我国幅员辽阔,南北跨越纬度很广,北至 53°33'N 黑龙江省的漠河,南至 3°52'N 南沙群岛。由于纬度和地形的差异,中国气候变化具有显著的地域差异性,由于逐年气候冷暖不同,四季起始日可能会发生很大变化。因此很多地区针对各自不同的气候环境提出不同的四季划分标准,例如范思睿等(2013)定义“5℃、15℃为划分冬、夏季阈值”为高原大部分地区四季的划分方法;钱诚等(2011)提出用候平均气温 5℃作为冬、春和秋、冬转换的

阈值温度,22℃作为春、夏和夏、秋转换的阈值温度对东北地区进行四季划分。本文考虑到数据的统一性和处理过程的可行性,对全国以统一的“10℃、22℃为划分冬、夏季阈值”的四季划分标准计算四季起始日,不可避免的会造成某些地区一些年份不能达到标准,在高纬度地区,全年最高温度都低于 22℃,出现区无夏的情况,如我国东北部地(图 3);而在低纬度地区,全年最低温度都高于 10℃,出现无冬的情况,如海南等地(图 5),因此分析结果只针对有符合标准站点覆盖的区域进行讨论。另外,由于站点分布的疏密情况不一(东南部站点密集,西北部站点稀疏),插值效果也会受到一定影响。

必须指出,尽管 EMD 方法跟其他统计方法相比具有多分辨、多尺度的优点,但它仍然属于统计方法(孙娴和林振山,2007),所有统计方法对气候变化原因的分析多是半经验的,因此无法分析由气温变化引起的四季开始日期与诸多因素之间的非线性交叉效应。并且,有学者应用 Wu and Huang (2009)提出的对 EMD 的改进方法 EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition),研究了地表温度趋势(Ji et al., 2014)和城市化对热岛效应影响的趋势(Qian, 2016),因此在后续研究中,考虑用 EEMD 方法对四季的变化趋势进行分析,或许会得到更完善的结果。

5 结论

结合线性倾向估计和 EMD 方法提取趋势项后计算四季起始日和生长期变化率,得出以下结论:

(1) 中国近 43 a 来四季起始日的变化主要表现为春、夏季的提前以及秋、冬季的推迟,其中春、冬季的变化相对于夏、秋季的变化更显著,但是夏季比春季提前的区域更广,秋季比冬季推迟的范围更大,另外全国范围内生长期的延长趋势也十分明显。

(2) 春季提前最为明显,且通过 0.05 的显著性水平的区域为江苏、安徽、湖北大部和云南北部,提前率为 4.1~7.2 d/10 a,新疆东部、内蒙古大部和甘肃春季都有 2.4~4 d/10 a 的提前率;夏季提前明显,且通过 0.05 的显著性水平的区域为新疆东部、甘肃西部、华南大部和云南南部,提前率为 2.9~4.6 d/10 a;秋季提前最明显,且通过 0.05 的显著性

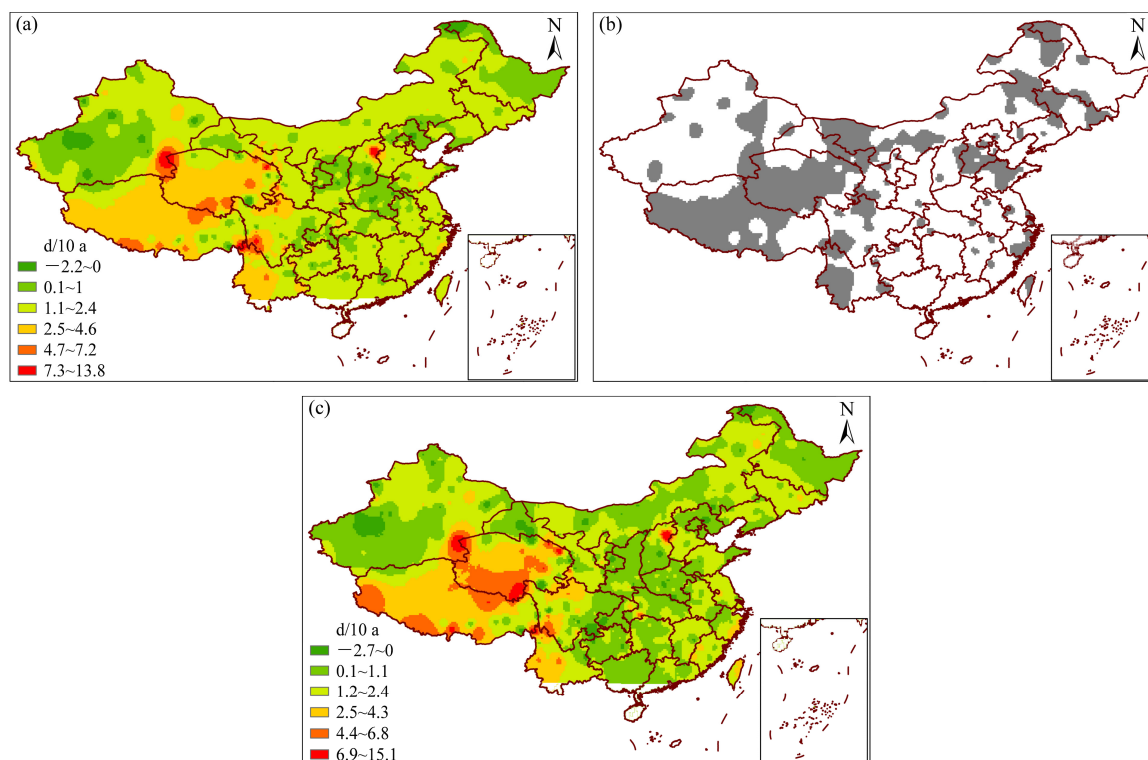


图 5 冬季起始日 (a) 线性拟合倾向率分类 (空白区表示无冬)、(b) 线性拟合通过 0.05 的显著性水平的统计检验 (阴影区表示通过检验)、(c) EMD 后线性拟合倾向率分类 (空白区表示无冬)

Fig. 5 Winter starting date: (a) Linear fitting trend rate classification (blank area means no winter); (b) linear fitting that passed the significance level of 0.05 (shaded); (c) linear fitting trend rate classification after EMD (blank area means no winter)

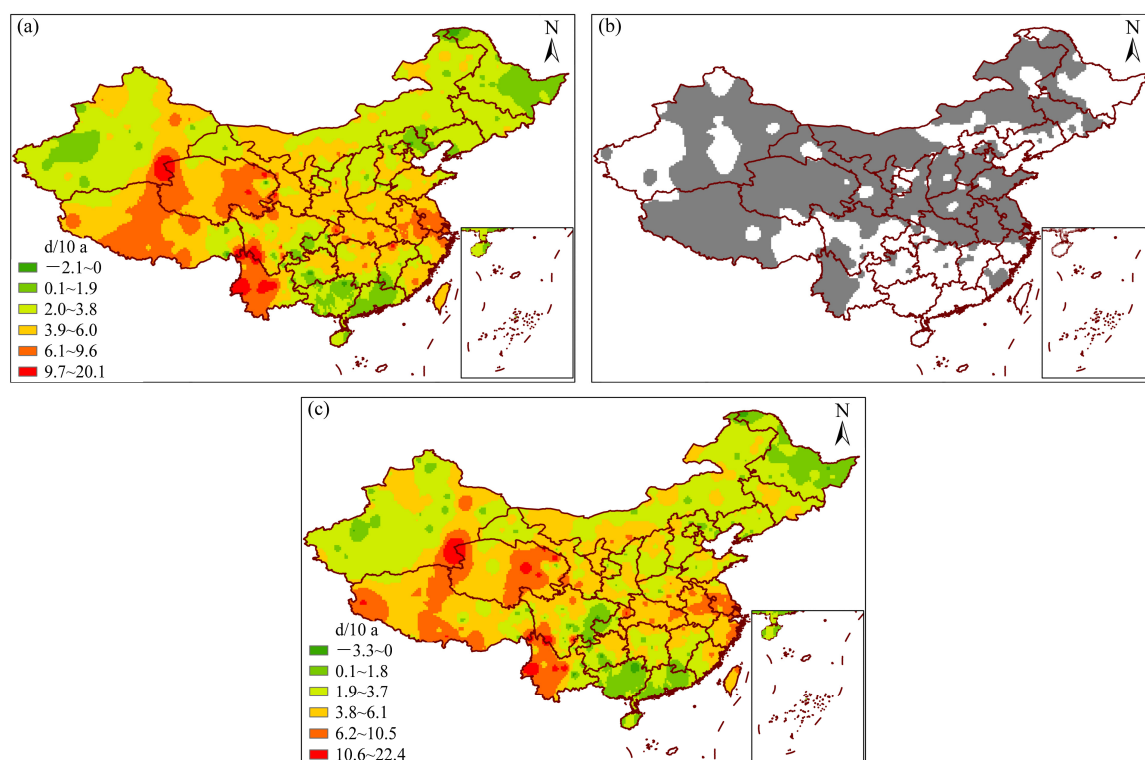


图 6 生长期长度 (a) 线性拟合倾向率分类、(b) 线性拟合通过 0.05 的显著性水平的统计检验 (阴影区表示通过检验)、(c) EMD 后线性拟合倾向率分类
Fig. 6 The length of growing season: (a) Linear fitting trend rate classification; (b) linear fitting that passed the significance level of 0.05 (shaded); (c) linear fitting trend rate classification after EMD

水平的区域为黑龙江北部,提前率为 4.0~7.2 d/10 a,秋季推迟明显,且通过 0.05 的显著性水平的区域为新疆南部和四川西部,推迟率为 4.4~8.6 d/10 a;冬季提前最明显,且通过 0.05 的显著性水平的区域黑龙江北部,提前率为 2.2 d/10 a,冬季推迟最明显,且通过 0.05 的显著性水平的区域为新疆东南部和青海大部,推迟率为 4.7~13.8 d/10 a,河北南部和山东中部冬季也有 1.1~2.4 d/10 a 的推迟率;生长期延长最为明显,且通过 0.05 的显著性水平的区域为新疆东南部、青海大部、云南西部和江苏南部,延长率为 6.1~9.6 d/10 a,其中云川交界处和新疆东南部生长期延长率最大达到 20.1 d/10 a。EMD 和线性倾向估计的结果基本一致,但 EMD 得到的春季起始日推迟地区范围更大,中国更多地区春季提前率在 1.4~2.7 d/10 a 之间;广东和广西夏季推迟区域扩大,全国多数地区夏季提前率在 1.6~3.1 d/10 a;北方秋季推迟率减小,中国东部大部分地区秋季推迟率在 0.1~2.1 d/10 a;云南东北部和甘肃西部冬季提前明显,青海南部和西藏南部冬季推迟范围变大;新疆生长期延长率更大,其中新疆东南角生长期延长率高达 22.4 d/10 a,广西生长期延长率低于 1.8 d/10 a 的范围几乎扩大到全省。

(3) 春、夏季云南存在明显的南北差异,云南北部春、夏季均有明显提前,而南部春、夏季均推迟;秋季新疆存在南北差异,北疆秋季有提前趋势,南疆秋季却明显推迟;秋季四川存在明显的空间差异,四川西北部秋季明显推迟,但东南部却在提前。

参考文献 (References)

陈正洪, 史瑞琴, 陈波. 2009. 季节变化对全球气候变化的响应——以湖北省为例 [J]. 地理科学, 29 (6): 911–916. Chen Zhenghong, Shi Ruiqin, Chen Bo. 2009. Responses of changing of climatic seasons to global warming: A case of Hubei Province in central China [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 29 (6): 911–916.

Dong W J, Jiang Y D, Yang S. 2010. Response of the starting dates and the lengths of seasons in mainland China to global warming[J]. Climate Change, 99 (1–2): 81–91, doi: 10.1007/s10584-009-9669-0.

范思睿, 范广洲, 赖欣, 等. 2013. 1961~2007 年青藏高原四季开始日期的变化趋势分析 [J]. 气候与环境研究, 18 (1): 71–79. Fan Sirui, Fan Guangzhou, Lai Xin, et al. 2013. Analysis on variation trend of season start dates over the Tibetan Plateau during 1961–2007 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (1): 71–79, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11058.

Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary

time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 454 (1971): 903–995, doi: 10.1098/rspa.1998.0193.

Huang N E, Shen Z, Long S R. 1999. A new view of nonlinear water waves: The Hilbert spectrum [J]. Annual Reviews of Fluid Mechanics, 31: 417–457, doi: 10.1146/annurev.fluid.31.1.417.

IPCC. 2013. Summary for policymakers [M]// Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Eds. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press.

Ji F, Wu Z H, Huang J P, et al. 2014. Evolution of land surface air temperature trend [J]. Nature Climate Chang, 4 (6): 462–466, doi: 10.1038/nclimate2223.

Qian C. 2016. On trend estimation and significance testing for non-Gaussian and serially dependent data: Quantifying the urbanization effect on trends in hot extremes in the megacity of Shanghai [J]. Climate Dyn., 47 (1): 329–344, doi: 10.1007/s00382-015-2838-0.

钱诚, 严中伟, 符淙斌. 2011. 1960~2008 年中国二十四节气气候变化 [J]. 科学通报, 56 (35): 3011–3020. Qian Cheng, Yan Zhongwei, Fu Zongbin. 2012. Climatic changes in the Twenty-four Solar Terms during 1960–2008 [J]. Chinese Science Bulletin, 57 (2): 276–286, doi: 10.1007/s11434-011-4724-4.

Qian C, Fu C B, Wu Z H, et al. 2011. The role of changes in the annual cycle in earlier onset of climatic spring in northern China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 28 (2): 284–296, doi: 10.1007/s00376-010-9221-1.

沙万英, 邵雪梅, 黄玫. 2002. 20 世纪 80 年代以来中国的气候变暖及其对自然区域界线的影响 [J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 32 (4): 317–326. Sha Wanying, Shao Xuemei, Huang Mei. 2002. Climate warming and its impact on natural regional boundaries in China in the 1980s [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 45 (12): 1099–1113, doi: 10.1360/02yd9107.

Song Y L, Linderholm H W, Chen D L, et al. 2010. Trends of the thermal growing season in China, 1951–2007 [J]. International Journal of Climatology, 30 (1): 33–43, doi: 10.1002/joc.1868.

孙娴, 林振山. 2007. 经验模态分解下中国气温变化趋势的区域特征 [J]. 地理学报, 62 (11): 1132–1141. Sun Xian, Lin Zhenshan. 2007. The regional features of temperature variation trends over China by empirical mode decomposition method[J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 62 (11): 1132–1141.

王雷, 吴正方, 杜海波, 等. 2014. 1961~2010 年东北地区四季开始日及长短变化特征分析 [J]. 气象科学, 34 (5): 499–507. Wang Lei, Wu Zhengfang, Du Haibo, et al. 2014. Variation characteristics of the starting date and length of seasons over Northeast China during 1961 to 2010 [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 34 (5): 499–507.

Wu Z H, Huang N E. 2009. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 1 (1): 1–41, doi: 10.1142/S1793536909000047.

Xia J J, Yan Z W. 2014. Changes in the local growing season in eastern China during 1909–2012 [J]. Scientific Online Letters on the Atmosphere, 10: 163–166.

- 徐铭志, 任国玉. 2004. 近 40 年中国气候生长期的变化 [J]. 应用气象学报, 15 (3): 306–312. Xu Mingzhi, Ren Guoyu. 2004. Change in growing season over China: 1961–2000 [J]. Journal of Applied Meteorological Sciences (in Chinese), 15 (3): 306–312.
- Yan Z W, Xia J J, Qian C, et al. 2011. Changes in seasonal cycle and extremes in China during the period 1960–2008 [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 28 (2): 269–283, doi: 10.1007/s00376-010-0006-3.
- 郁珍艳, 范广洲, 华维, 等. 2010. 气候变暖背景下我国四季开始时间的变化特征 [J]. 气候与环境研究, 15 (1): 73–82. Yu Zhenyan, Fan Guangzhou, Hua Wei, et al. 2010. Variation characteristics of season start dates over China under the global warming [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (1): 73–82, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2010.01.08.
- 张克新, 刘普幸, 张锐, 等. 2011. 近 55 年来河西地区季节开始日及长短变化特征 [J]. 地理研究, 30 (3): 547–554. Zhang Kexin, Liu Puxing, Zhang Rui, et al. 2011. Analysis of four seasons and their length changes in Hexi area in recent 55 years [J]. Geographical Research (in Chinese), 30 (3): 547–554, doi: 10.11821/yj2011030016.
- 张世轩, 张璐, 孙树鹏, 等. 2011. 全球变暖情况下中国季节的变化 [J]. 高原气象, 30 (3): 659–667. Zhang Shixuan, Zhang Lu, Sun Shupeng, et al. 2011. Changes of the seasons in mainland China under global warming [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30 (3): 659–667.
- 钟保舜. 1995. 用 5 天滑动平均气温作深圳市的四季划分 [J]. 气象, 21 (6): 22–23. Zhong Baolin. 1995. Division of seasons at Shenzhen based on 5 days running mean temperature [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 21 (6): 22–23.