



1960~2008年中国二十四节气气候变化

钱诚^①, 严中伟^{①*}, 符淙斌^{①②}

① 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室, 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;

② 南京大学气候与全球变化研究院, 南京大学大气科学学院, 南京 210093

* 联系人, E-mail: yzw@tea.ac.cn

2011-03-28 收稿, 2011-07-11 接受

国家重点基础研究发展计划(2011CB952000, 2009CB421401)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA05090100)和国家自然科学基金(41005039, 40810059003)资助项目

摘要 采用非平稳时间序列分析技术——集合经验模分解(EEMD)方法, 基于 1960~2008 年中国 549 站近地面气温观测的均一化序列, 确定了全国平均温度的二十四个气候节气的阈值温度和时间, 分析了各节气平均温度及其在季节循环中的时间节点演变趋势. 全国平均而言, 小寒、大寒天气减少, 近 10 年(1998~2007 年)达到大寒的天数比 20 世纪 60 年代减少 56.8%; 大暑天气增多, 近 10 年达到大暑的天数比 20 世纪 60 年代增加 81.4%; 季节性升温阶段的气候节气显著提前 6 d 以上, 其中雨水节气提前最多, 达 15 d; 而季节性降温阶段的气候节气则都显著推迟 5~6 d. 这主要是由于在变暖的大背景下整个季节循环趋于整体抬升所致, 但在二十四节气中, 位于春季位相者的增温趋势普遍大于位于秋季位相者. 其中雨水、立春、惊蛰节气的增温最快, 全国平均在 1961~2007 年间分别增暖了 2.43, 2.37 和 2.21℃. 惊蛰、清明、小满和芒种这 4 个反映物候的气候节气在全国各地普遍提前, 尤其在北方半干旱区均显著提前, 分别达 12~16, 4~8, 4~8 和 8~12 d. 这些定量化的节气气候变化分析结果, 可为适应气候变化、适时调整相应农事活动和节能措施等提供决策依据.

关键词

二十四节气
气候变化
EEMD
人类适应

二十四节气细致地反映了我国四季交替的气候特征, 含有时令顺序、物候变化、农作物生长情况等方面的标志性意义, 特别是与农业生产活动紧密相连. 我国是个农业大国, 根据各地节气的气候特征总结出的农业谚语, 为我国农业发展立了大功, 至今仍对农业生产活动具有参考价值. 现代农业气象学产生以后, 很多地区将二十四节气与现代农业气象资料相结合, 编制农业气候历、农事历或农事活动表, 参照古人的经验把它与现代科学技术结合, 与时俱进地进行修改和补充, 使它在现代农业生产中继续发挥作用.

二十四节气的概念起源于古代的黄河流域, 当时该地区是我国社会经济最发达的地区. 早在春秋时期, 古人定出仲春、仲夏、仲秋和仲冬 4 个节气. 以

后经过不断地改进与完善, 到西汉初期, 二十四节气在《淮南子》的《天文训》中被完整地记载下来. 公元前 104 年的西汉, 我国第一部有完整文字记载的历法——《太初历》开始把二十四节气订为历法, 明确了二十四节气的天文位置. 以地球围绕太阳公转的一个周期作为一个轮回, 太阳从黄经零度起, 沿黄经每运行 15°所处的日子被命名为一个节气; 每年运行 360°, 共经历 24 个节气, 每月 2 个. 这种天文二十四节气反映了地球公转所产生的周期变化, 所以每个节气在现行的公历中日期基本固定, “上半年来六廿一, 下半年来八廿三”(上半年多在公历的 6 日、21 日, 下半年多在公历的 8 日、23 日), 前后只差 1~2 d. 然而, 节气对于人类活动有指导意义的内涵主要在于其相应的气候特征. 本文旨在探讨在 1960 年以来气

英文版见: Qian C, Yan Z W, Fu C B. Climatic changes in the Twenty-four Solar Terms during 1960–2008. Chin Sci Bull, 2012, 57, doi: 10.1007/s11434-011-4724-4

气候变化背景下的二十四节气气候变化特征,为此首先需要恰当地定义气候学的二十四节气。

在过去的 100 (1906~2005 年)年中,全球平均温度上升了 $(0.74 \pm 0.18)^\circ\text{C}$ ^[1]。就北半球而言,有资料显示,近几十年很多地区(包括中国)的“自然”春天的开始时间提前了若干天,比如欧美地区鸟类下蛋、筑巢和迁徙提前^[2,3]、动植物的生长周期出现显著变化^[4-6]、河流解冻提前^[7]等。相应地,“气候”的入春时间也存在显著的提前趋势^[8,9]。从中国的气温资料来看,四季的平均温度升高了^[10]、生长期延长了^[9,11-13]、霜期缩短了^[12,14]、四季的起始时间提前或推迟了^[9,15-17]。那么在全球变暖的大背景下,“气候”二十四节气是如何变化的?显然,随着气候变暖,许多与节气相关的农谚和经验,可能会变得不再适宜。

本文基于逐日气温观测资料,借助近年来发展的时间序列分析方法——集合经验模分解(EEMD)^[18],从二十四节气的角度来研究 1960~2008 年中国气温变化特征,刻画气候二十四节气的变化特征,以图适应气候变化、指导相关人类活动提供科学基础。

1 数据和方法

(i) 气温数据. 本文所用的近地面气温资料是新近发展的中国 549 个气象站(站点分布见图 5) 1960~2008 年均一化逐日序列集^[19]中的日平均温度。该数据集已就迁站和观测系统变化等非自然原因造成的非均一性进行了订正,因此,它比原始数据更适合于研究大尺度的气候变化。对闰年的处理方法参照 Qian 等人^[20]: 去掉 2 月 29 日,2 月 28 日的值用 28 日和 29 日的平均值代替。这样既考虑了闰年的影响,又使每年都是 365 个值,便于进行矩阵运算和分析。

(ii) EEMD 方法简介. 本文借助 EEMD^[18]方法来原因气候二十四节气。EEMD 是一种近年来发展的时间上局部的自适应时间序列分析技术,适合于分析非线性、非平稳的时间序列,如气候数据。它把一个复杂的数据分解为有限个不同时间尺度的振荡分量,这种分解是基于数据本身的,没有事先引入基函数。因此,简单地说,它就是一个自适应的滤波器。它是经验模分解(EMD)^[21,22]的改进版,改进了 EMD 的“模态(尺度)混合(mode mixing)”问题^[18],而且使分解结果更稳定。EMD 方法通过一个筛选过程^[21](即把原数据或已减去若干个振荡分量后的序列的局部极大值和极小值用 3 次样条函数连起来形成上、下两条

包络线,用原数据减去两条包络线的局部均值,经过反复计算直到局部均值处处为零,得到某周期的振荡分量),把原数据表示成有限个周期成分(IMF^[21])和一个趋势项的叠加。而 EEMD 方法是利用多次测量取平均值的原理,通过在原数据中加入适当大小的白噪音来模拟多次观测的情景,经多次计算后作集合平均。近年来,国内学者已应用 EEMD 方法开展了若干有关气候变化的研究工作,如分析气候春季的提前趋势^[8,9]、气温的多尺度分析^[23]、天气/气候极值的变化趋势^[20]、四季起止时间的变化趋势^[17]、气温年循环的振幅变化^[24]等。

(iii) 节气阈值定义和趋势分析方案. 由于天气波动的存在,在采用阈值的方式来原因气候节气的时间节点时,会面临因天气波动造成的原始气温与阈值有多个交点而使时间节点有多个选择的困难^[8,9]。因此,本文采用 Qian 等人^[8]提出的基于 EEMD 的方法来“自适应且唯一地”确定这些分析变量(图 1)。就全国平均气温而言,每个气候节气的阈值确定步骤为: (1) 将 1960~2008 年全国平均气温的逐日序列进行 EEMD 处理(信噪比取 0.3,集合次数取 1000 次),滤去年内尺度的高频分量,得到年循环及更长时间尺度分量(ALC^[8])的光滑序列,即 EEMD 的第 6~14 个分量之和(如图 1(a))。为减小边界效应的影响,本文参照 Qian 等人^[23]取分析时段为 1961~2007 年,即 EEMD 处理结果的第一年和最后一年不进行分析。(2) 计算 ALC 序列的 1961~1990 年期间的同日气候平均值,构成一个 365 d 的光滑序列(如图 1(b)),然后取它的每个节气时间(表 1)的平均气温(例如,立春一般是在 2 月 3~5 日,取这 3 d 的平均)作为该气候节气的阈值(所得结果见图 1(b)和表 1)。确定阈值后,每年的 ALC 序列和每个气候节气(大寒、小寒、立春、冬至、小暑、立秋和大暑这 7 个节气除外)阈值的交点(每年有 2 个,前半年节气取第 1 个,后半年节气取第 2 个)所在的日期便是每年每个气候节气的时间。为研究方便,这些日期都以它在 1~365 d 中的时间序号进行排列(如图 3)。分别计算这些时间点的线性趋势,得到每个气候节气的提前或推迟趋势,并以 Mann-Kendall 检验方法判断其统计显著性(结果见表 1)。而大寒、小寒、立春、冬至、小暑、立秋和大暑这 7 个节气有个别年份会出现未达阈值的情况(如图 2),因此本文不对这 7 个节气进行上述分析。此外,我们还计算了全国平均气温序列的二十四节

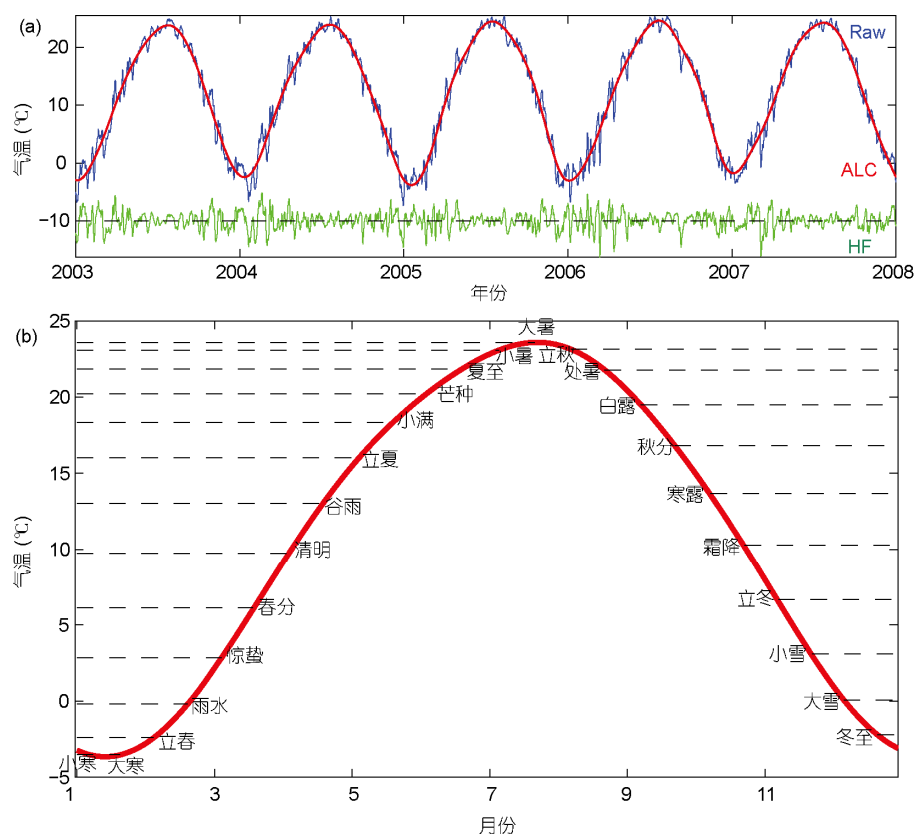


图1 全国平均地表气温的二十四节气及对应阈值定义的示意图

(a) 用 EEMD 方法将逐日气温序列(Raw, 蓝色)分解为季节循环(ALC, 红色)和年内尺度高频分量(HF, 绿色)的示意图, 为直观起见, 只给出研究时段最后 5 年(2003~2007 年); (b) 实线表示 1961~1990 年气候平均的季节循环(图(a)的 ALC 序列), 虚线表示各个节气对应的气温阈值

气温变化趋势, 方法是: 利用 ALC 序列计算每年每个节气的平均气温(例如, 立春一般是在 2 月 3~5 日, 取这 3 d 的平均), 然后计算 1961~2007 年中每个节气各自的气温变化线性趋势, 并以 Mann-Kendall 检验方法判断其统计显著性, 结果见表 1.

除了看全国平均状况外, 我们还单独分析了惊蛰、清明、小满和芒种这 4 个和物候现象密切相关的气候节气在提前和推迟问题上的地理分布特征(如图 5). 为考察每个站点自己的季节循环变化特点, 参照 Yan 等人^[17]“局地阈值”的概念, 这 4 个气候节气的阈值都根据各站点自身的季节循环来定义: (1) 与全国平均气温序列一样, 先将 1960~2008 年各站点的逐日气温序列分别进行 EEMD 处理, 得到各自的 ALC 序列; (2) 计算每个站 ALC 序列的 1961~1990 年气候平均值(常年情况); (3) 如前述, 取这个 365 d 序列的 4 个物候节气时间的平均气温分别作为阈值温度. 这样, 每个站点的气候节气提前(推迟)趋势代表这个站点相对于它自己的常年情况提前(推迟)了.

2 分析

从全国平均的气温资料揭示的二十四节气的特征来看(图 1(b)和表 1), 最冷的节气是大寒(-3.51°C), 最热的节气是大暑(23.59°C), 两千年前我国劳动人民总结出来的这两个季节性极端阶段, 在当前全球变暖的大背景下并没有发生本质改变. 立春(-2.40°C)是二十四节气中头一个节气, 顾名思义, 春天即将开始. 然而就近几十年全国平均而言, 立春的平均气温还在零下. 惊蛰节气平均温度 2.84°C , 蛰伏在地下的虫类, 感受春天的温暖而出动. 此时气温逐渐升高, 土壤化冻, 作物返青. 农谚说: “过了惊蛰节, 春耕不能歇”. 可见, 从物候角度来看, 以惊蛰作为春天的开始较符合实际情况. 俗话说, 春争日, 春分(6.14°C)的到来给从事农业的人们一种时间上的紧迫感. 当前, 气象上普遍采用张宝堃^[25]定义的 10°C 作为春季开始的阈值. 从全国平均来看, 这个温度一般出现在清明(9.76°C)以后, 而春色到了清明, 花柳

表 1 全国平均气温的二十四节气气候变化趋势
(1961~2007 年)

节气	时间	阈值 (°C)	提前趋势 ^{a)} (d/47 a)	增温趋势 (°C/47 a)
立春	2 月 3~5 日	-2.40	-	2.37 (0.01)
雨水	2 月 18~20 日	-0.20	14.6 (0.01)	2.43 (0.01)
惊蛰	3 月 5~7 日	2.84	11.0 (0.01)	2.21 (0.01)
春分	3 月 20~21 日	6.14	8.8 (0.01)	1.25 (0.01)
清明	4 月 4~6 日	9.76	7.2 (0.01)	1.52 (0.01)
谷雨	4 月 19~21 日	13.02	6.2 (0.01)	1.24 (0.01)
立夏	5 月 5~7 日	16.02	6.2 (0.01)	1.02 (0.01)
小满	5 月 20~22 日	18.33	6.8 (0.01)	0.95 (0.01)
芒种	6 月 5~7 日	20.23	8.0 (0.01)	0.96 (0.01)
夏至	6 月 21~22 日	21.83	9.7 (0.01)	0.63 (0.01)
小暑	7 月 6~8 日	23.08	-	0.80 (0.01)
大暑	7 月 22~24 日	23.59	-	0.62 (0.05)
立秋	8 月 7~9 日	23.14	-	0.53 (0.01)
处暑	8 月 22~24 日	21.78	-5.0 (0.01)	0.61 (0.01)
白露	9 月 7~9 日	19.50	-5.5 (0.01)	0.85 (0.01)
秋分	9 月 22~24 日	16.83	-6.1 (0.01)	1.09 (0.01)
寒露	10 月 8~9 日	13.67	-6.0 (0.01)	0.81 (0.01)
霜降	10 月 23~24 日	10.28	-4.5 (0.01)	0.83 (0.01)
立冬	11 月 7~8 日	6.66	-5.0 (0.01)	0.83 (0.01)
小雪	11 月 22~23 日	3.09	-5.2 (0.01)	0.85 (0.01)
大雪	12 月 6~8 日	0.08	-6.5 (0.01)	1.35 (0.01)
冬至	12 月 21~23 日	-2.23	-	1.46 (0.01)
小寒	1 月 5~7 日	-3.50	-	1.77 (0.01)
大寒	1 月 20~21 日	-3.51	-	1.39 (0.01)

a) “提前趋势”中符号为正值表示提前, 负值表示推迟; 括号内为趋势显著水平, “-”为不分析项

都已经十分茂盛了。因此, 从物候角度看, 5°C (一般出现在惊蛰和春分之间) 比 10°C 可能更适合作为春季开始(冬/春转换)的阈值温度。从天文和气象学来说, 夏至(21.83°C)是一个季节转换的节气, 因此, 目前以 22°C 作为夏季开始的阈值温度是符合全国平均情况的。这样, 从夏至到处暑(21.78°C)之间的两个月左右就是夏季。处暑之后, 便进入秋季, 历经白露、秋分、寒露、霜降, 气温逐渐降低。立冬(6.66°C)过后, 日平均气温就下降到 5°C 以下了, 因此, 以 5°C 作为秋/冬季节转换的阈值也是比较符合现代的全国平均情况的。大雪节气之后, 日平均气温下降到 0°C 以下, 接着就是冬至(-2.23°C)的到来。冬至日虽然白天最短, 地面接收的太阳辐射最少, 但由于地面在夏秋储存的热量的热惯性, 这一天并不是一年中最冷的。到了大寒节气左右, 地面储存的热量已经消耗待尽, 这段

时间是一年中最冷的时期。

以上是现代二十四节气的一些平均统计规律。随着近代气候变暖, 二十四节气也在发生一些相应的变化。如图 2 所示, 全国平均气温季节循环中最冷的时段(0°C 以下)呈现整体逐步抬升的趋势。如果以 1961~1990 年气候标准时段的阈值作为参照(常年情况), 则 1987 年以后小寒、大寒特征的天气几乎很少出现了。自 20 世纪 90 年代末期以后, 立春、冬至特征的天气也开始减少。与此同时, 气温季节循环中最热的时段(22°C 以上)在 1997 年以后呈现明显的整体抬升趋势, 连续 11 年都出现达到大暑特征的天气; 1994 年以前还偶有达不到小暑、立秋特征的天气出现, 但之后连续 14 年都出现小暑、立秋特征的天气。达到常年大寒阈值温度的频数(天数)呈显著减少趋势(图 2(c)), 近 10 年(1998~2007 年, 下同)平均的天数(14.0 d/a)比 20 世纪 60 年代(32.4 d/a)减少 56.8%, 2007 年甚至没有 1 d 低于常年大寒阈值温度。而达到常年大暑阈值温度的频数(天数)则呈显著增加趋势(图 2(d)), 近 10 年平均的天数(36.1 d/a)比 20 世纪 60 年代(20.0 d/a)增加 81.4%。除开大寒、小寒、立春、冬至、小暑、立秋、大暑这 7 个节气在 1961~2007 年中有达不到阈值温度的年份出现, 其他 17 个节气每年都能达到阈值, 因此, 可以对这 17 个节气的时间节点变化趋势进行分析。图 3 显示, 气温上升阶段的气候节气除了存在明显的年际变率外, 都有趋于显著(表 1)提前的系统性趋势, 而且在 1961~2007 年的 47 年间总的提前趋势都在 6 d 以上。其中, 雨水、惊蛰和夏至是提前趋势相对较大的, 分别提前 14.6 d (相当于近年到达雨水节气平均气温的日期比 20 世纪 60 年代初期早了近半个月)、11.0 和 9.7 d, 雨水节气提前天数最多。如果以 5°C (此温度是国内外很多文献普遍采用的中高纬度地区生长期开始的阈值温度^[8,9,12,13,26])表示气候入春的阈值, 那么在 1961~2007 年的 47 年间入春提前 9.5 d (图略)。与此同时, 气温下降阶段的气候节气除了也存在明显的年际变率外, 都有趋于显著(表 1)推迟的系统性趋势, 基本上推迟 5~6 d 左右。

气候二十四节气的变化趋势给我们的一个直观感觉是全国平均气温的季节循环呈现一个整体抬升的趋势, 仔细计算每个节气的气温变化趋势的结果(表 1)也证实了这一点。1961~2007 年中, 二十四节气的增温在 0.53~2.43°C 之间, 除大暑(0.62°C)只通过

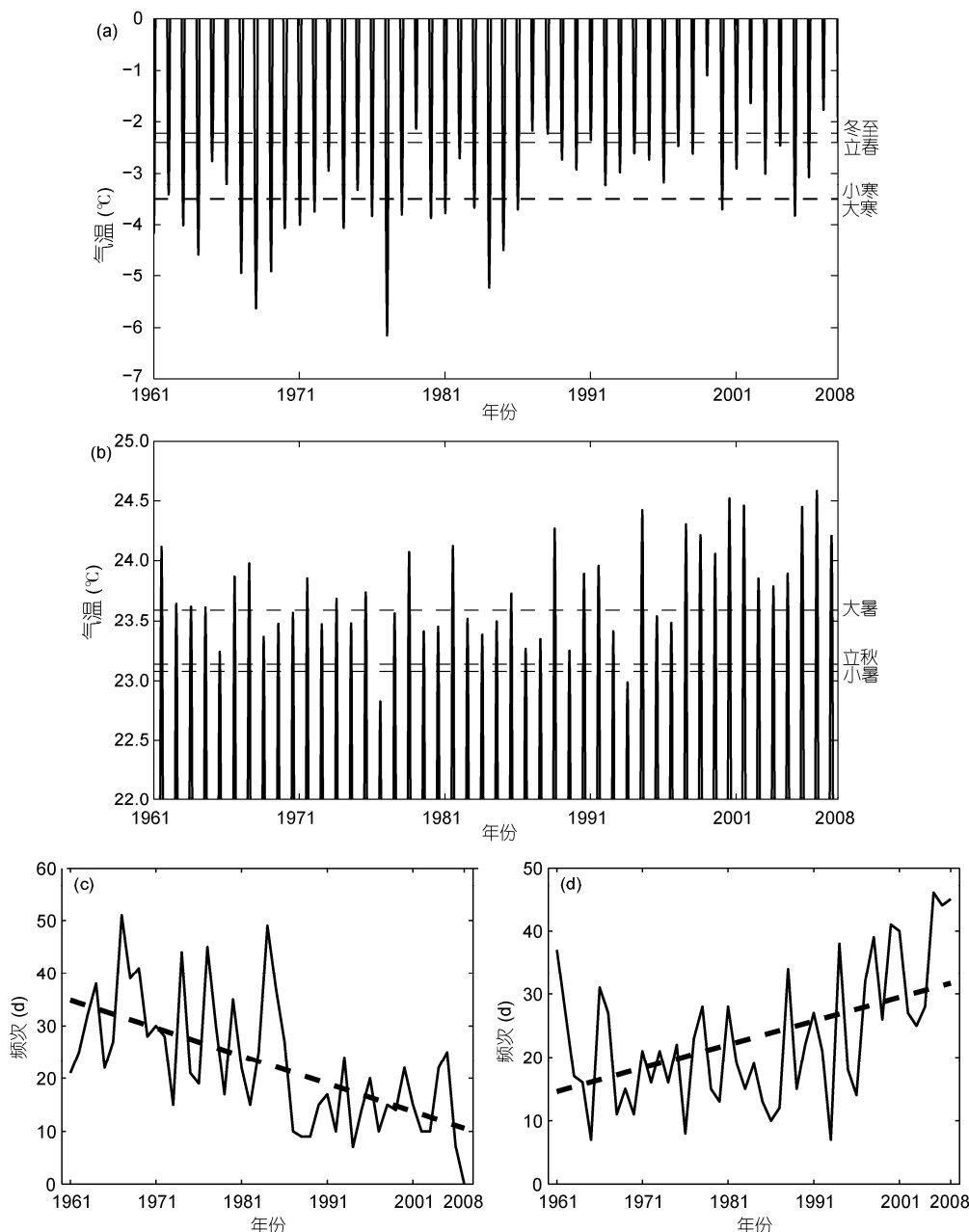


图 2 1961~2007 年全国平均地表气温季节循环中最冷(a)、最热(b)时段的时间演变以及达到大寒(c)、大暑(d)标准的频数趋势 (a)和(b)中实线表示全国平均气温的季节循环(图 1(a)的 ALC 序列), 虚线表示各个节气对应的气温阈值

0.05 的显著水平外, 其余 23 个节气都通过 0.01 的显著水平. 雨水的增温最大(2.43°C), 这与前面提到的雨水节气提前的天数是最多的一致. 立春、雨水、惊蛰这 3 个节气的增温都在 2°C 以上, 比大寒的增温(1.39°C)要大很多. 这可能是由于这 3 个节气的气温都在 0°C 附近, 正值冰雪融化的时期, 全球变暖加速欧亚大陆冷季冰雪融化使地表的反照率降低,

地表吸收本应反射出去的热量增加, 使地表进一步变暖. 相比之下, 大寒时节气温始终保持在 0°C 以下, 冰雪仍然是冰雪, 缺少了冰雪融化-变暖的正反馈过程, 因此, 增温趋势没有立春、雨水和惊蛰这 3 个节气那么大. 同时, 晚冬-早春时期的东亚冬季风减弱也可能对上述 3 个节气增温趋势偏大起了部分作用^[9]. 另一个明显的特征是气温上升阶段的增温要普遍比

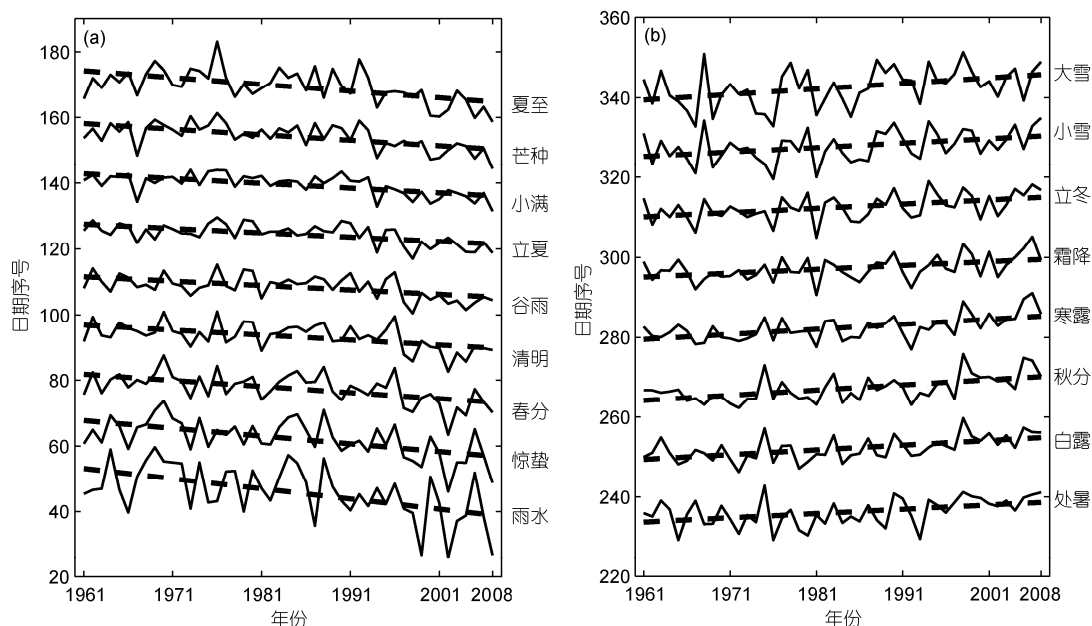


图 3 1961~2007 年全国平均的气候二十四节气的变化

(a) 气温上升的时段; (b) 气温下降的时段. 实线表示各个气候节气每年的时间序号, 虚线表示线性趋势

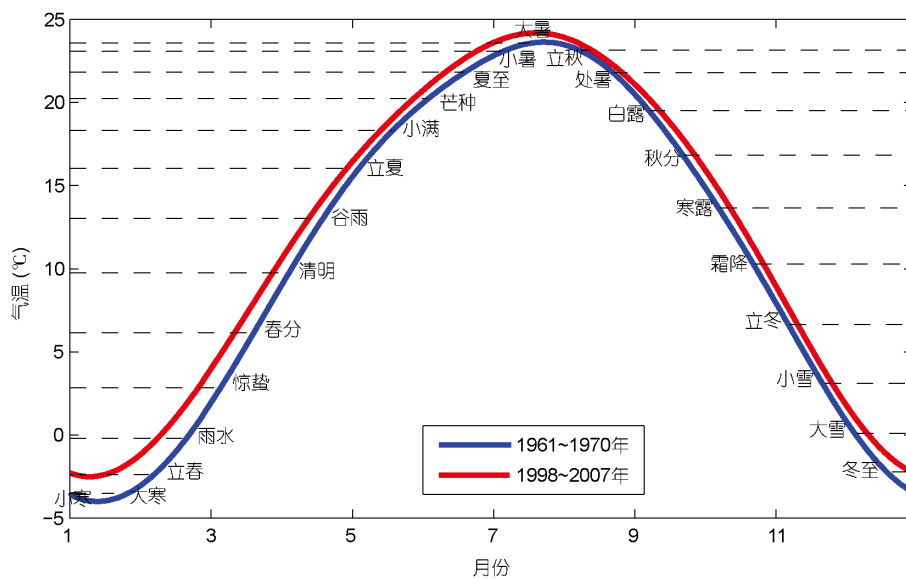


图 4 不同时段的全局平均气温季节循环比较

蓝色, 前 10 年(1961~1970 年)平均; 红色, 后 10 年(1998~2007 年)平均. 二十四节气气温阈值同图 1

下降阶段的增温大, 这与上升阶段的节气提前日数普遍比下降阶段的推迟日数多也是一致的. 这也可能和秋季缺乏冰雪融化-变暖的正反馈机制有关. 此外, 图 4 的前后 10 年对比也支持了近 50 年气温季节循环正在呈现整体增暖的趋势. 由图 4 我们还可以推断出立春、小暑、大暑在趋于提前, 立秋、冬至在趋于推迟, 而小寒、大寒在趋于消失. 因此, 总的来说,

气候二十四节气的提前和推迟趋势是气温季节循环的整体增暖造成的.

4 个反映物候现象的气候节气在全国普遍趋于提前(图 5), 其中, 气候惊蛰的提前趋势最明显. 具体地说, 各地的气候惊蛰(图 5(a))都趋于提前, 最大趋势(16~20 d/47 a)出现在华北地区的北京、天津及邻近站点, 以及云南的西部. 在 33°N 以北的站点几乎

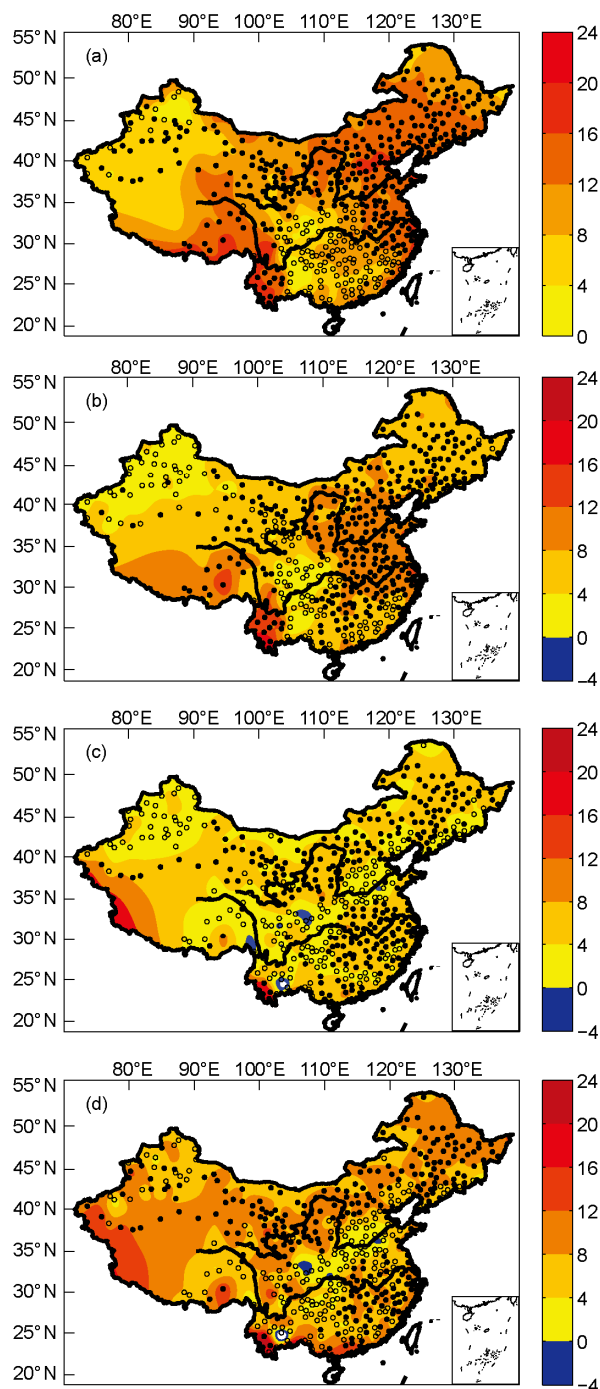


图 5 4 个反映物候的气候节气在 1961~2007 年的趋势分布 (a) 惊蛰; (b) 清明; (c) 小满; (d) 芒种. 暖色系表示提前, 冷色系表示推迟. 实心点表示线性趋势是显著的 ($P < 0.05$), 空心点表示线性趋势未通过显著性检验的站点. 单位: d/47 a

都是显著提前, 而且在东部 (105°E 以东) 比西部显著, 与 Qian 等人^[9]分析北方地区气候入春趋势的分布特征基本一致. Qian 等人^[9]认为东、西部虽然都受全球

变暖的影响, 但是东部更直接地受东亚冬季风减弱的影响, 因而近 50 年东亚冬季风的减弱趋势引起东部早春提前趋势比西部显著. 33°N 以南的中南部地区, 尤其是西南的四川盆地附近和云南东部的站点, 气候惊蛰的提前趋势几乎都不显著. 提前趋势的天数也几乎是全国最少的. 近 50 年中这个地区的春季平均温度增暖不显著, 甚至个别站点是降温趋势^[19]. Li 等人^[27]认为云-气候反馈在青藏高原下游降温趋势中起了重要的作用. 相反, 在青藏高原的东南部, 气候惊蛰是显著提前的, 这和该地区春季平均温度显著升高(图略)是一致的, 反映了变暖背景下青藏高原也在发生一些相应的季节性气候变化. 气候清明(图 5(b))除四川盆地的一个站点(阆中)之外全国都趋于提前, 除新疆西北部、四川、云南东部和东南沿海部分地区之外, 提前趋势几乎都是显著的. 提前趋势最大的地区发生在云南西部 (12~20 d 左右), 其次是华北平原、江淮流域的大片区域以及青藏高原东南部 (8~12 d 左右). 四川、云南以及青藏高原东南部的气候清明变化特征和气候惊蛰基本一致. 气候小满(图 5(c))除了云南、四川、山东的个别站点外, 全国都趋于提前, 最大趋势出现在云南西南部 (12~16 d 左右), 在北方半干旱带、江淮流域、东南部沿海一带都趋于显著提前 (4~8 d 左右). 芒种节气和小满节气只差半个月左右, 因而气候芒种趋势的全国分布特征和气候小满的非常接近, 但普遍比气候小满提前的天数偏多, 如在北方半干旱带、江南多数站点都趋于显著提前 8~12 d 左右.

3 讨论

就四季起始时间的变化而言, 若以立春、立夏、立秋和立冬作为四季转换的时间, 或者以 5°C 和 22°C 作为冬/春、秋/冬和春/夏、夏/秋季节转换的阈值温度, 则本文的研究结果和前人有很多一致的地方. 例如, 四季开始日期在全国范围内表现为春季、夏季趋于提前, 秋季、冬季趋于推迟, 致使夏季趋于延长、冬季趋于缩短; 入春的提前趋势大于入秋的推迟趋势. 这些和 Dong 等人^[15]、郁珍艳等人^[16]和 Yan 等人^[17]的结论是一致的. 以 5°C 和 22°C 的表示法本文得到的 1961~2007 年间夏季延长和冬季缩短约在 14~15 d, 比 Dong 等人^[15]要偏大. 这里有几个可能的原因: (1) 四季起始的定义方式不一样, 本文是通过自适应滤波定义的, 去除了高频波动的干扰; (2) 分

析时段不一样, Dong 等人^[15]为 1951~2000 年, 本文为 1961~2007 年, 增温趋势更大(图略); (3) 本文所用的资料是经过均一化订正的, 减少了个别站点记录的非一致性, 更好地反映大尺度气候变化. 本文研究发现早春(特别是雨水)的提前趋势最为明显, 而 Dong 等人^[15]和郁珍艳等人^[16]的研究认为夏季的变化大于春季. 根据本文的研究结果, 夏至(21.83℃)的提前趋势确实要比清明(9.76℃)的略偏大, 郁珍艳等人^[16]以 5 d 平均温度>10℃阈值(>22℃阈值)来定义春季(夏季)开始所得的结果对本文来说也是成立的, 但本文发现了实际上存在比夏季提前更明显的季节性阶段. 特别是, 本文的 EEMD 方法排除了 5 d 滑动平均方法消除不掉的高频波动的干扰^[9], 所得结果在统计学上更为稳定可靠.

惊蛰节气在农事上有着相当重要的意义, 自古就被视为春耕开始的日子. 到了惊蛰, 中原大部地区进入春耕大忙季节; 华北冬小麦开始返青生长, 但土壤仍冻融交替, 需要及时耙地来减少水分蒸发. 与此同时, 江南小麦已经拔节, 油菜开始见花, 对水、肥的要求均很高, 这时农事上会适时进行追肥. 而华南地区正抓紧进行早稻播种, 同时做秧田防寒工作. 正所谓季节不等人, 一刻值千金, 在气候惊蛰全国普遍趋于提前的大背景下, 各地应当因地制宜, 适应气候变化调整农事活动: 在仅考虑气温变化时, 华北冬小麦区应较常年经验提前(近年相对于 60 年代早期提前 12~16 d 左右)耙地; 江南小麦区应较常年经验提前(近年相对于 60 年代早期提前 8~16 d 左右)追肥; 华南应较常年经验提前(近年相对于 60 年代早期提前 4~12 d 左右)播种早稻.

清明节气也与农业生产有着密切的关系, 如有“清明前后, 点瓜种豆”、“植树造林, 莫过清明”等农谚. 同时, 这个节气又是踏青的时节. 因此, 就华北平原、江淮流域来说, 与清明节气相应的农业生产、踏青活动都应较常年经验提前(近年相对于 60 年代早期提前 8~12 d 左右)开展.

小满节气标志着北方冬麦区的小麦、大麦等夏熟作物籽粒已开始饱满, 但还没成熟. 此时节, 习于农时劳作的人们将为夏收作好各种准备. 特别地对华北而言, 小满时节最怕干热风袭击. 此时, 华北地区正处于干早期, 由于日射强烈, 地面增温很快, 当形成气温高达 30℃、最小相对湿度小于或等于 30%、风速 3~4 m/s 或大于 3~4 m/s 的干热天气时, 所刮的

风称为干热风. 这种灾害对开花到乳熟期间的小麦危害极大, 使其茎叶很快枯萎, 千粒重下降, 一般减产 5%~10%, 严重的减产 30%以上. 鉴于北方半干旱区的气候小满普遍趋于显著提前、半干旱区又是干旱化表现最为剧烈的地区^[28,29]这样的气候变化背景, 这个冬麦区夏收的各种准备工作更应该较常年经验适时提前(近年相对于 60 年代早期提前 4~8 d 左右)开展. 对南方地区而言, 小满的农谚有新的含义, “满”是用来形容雨水的盈缺, 指此时如果田里蓄不满水, 就可能造成田坎干裂, 甚至到芒种也无法栽插水稻. 对华南而言, 小满正是适宜水稻栽插的季节, 有“立夏小满正栽秧”的农谚. 此时, 水稻栽插的迟早, 与单产的高低密切相关. 因此, 鉴于南方的气候小满普遍趋于显著提前的气候变化背景下, 田里蓄满水、华南栽插水稻等相应的农事活动都应当提前开展(近年相对于 60 年代早期提前 4~8 d 左右).

芒种节气标志着北方冬麦区的小麦、大麦等有芒作物种子已经成熟, 抢收十分急迫, 是农事上非常重要的一个节气, 直接关系到农业收成; 同时, 晚谷、黍、稷等夏播作物也正是播种最忙的季节, 因此有“快收快种抢时节”的农谚. 鉴于北方半干旱区的气候芒种普遍趋于显著提前的气候变化背景, 该地区的夏熟作物抢收应较常年经验提前(近年相对于 60 年代早期提前 8~12 d 左右)开展. 同时, 华南栽插中稻也应考虑气候芒种提前的趋势做出相应的提前; 以免因错过农时, 气温继续升高, 水稻营养生长期缩短, 影响产量.

需要指出的是, 本文讨论的只是一种一般的方法, 由于我国幅员辽阔, 各地(比如黄河中下游区和青藏高原高寒气候区)气候和物候特征差异很大, 因此, 具体到每个地区可根据当地气候和物候特点来确定节气阈值进行分析. 而且, 以上讨论的惊蛰、清明、小满和芒种节气变化的农业意义和适应对策只是就气温变化而言, 实际工作中还需考虑降水等其他因素的影响; 更进一步还得考虑现代农业技术(尤其是育种技术)的改进等因素^[30~32], 才能提出完善的适应对策.

4 结论

本文采用了 EEMD 方法自适应地从均一化的 1960~2008 年全国平均气温序列中确定“气候”二十四节气的阈值温度和时间, 分析了气候二十四节气时

间节点的线性趋势、二十四节气平均温度的线性趋势以及惊蛰、清明、小满和芒种这4个反映物候现象的气候节气在全国的提前或推迟趋势分布特征,得到如下主要结论:

对全国平均而言,小寒、大寒趋于减少,近10年(1998~2007年)平均的大寒天数(14.0 d/a)比20世纪60年代(32.4 d/a)减少56.8%,2007年甚至没有1 d低于常年大寒阈值温度;大暑趋于增多,近10年平均的大暑天数(36.1 d/a)比20世纪60年代(20.0 d/a)增加81.4%。气温上升阶段的气候节气都倾向于显著提前(6~15 d左右),其中雨水节气提前了大约15 d,为最多;而气温下降阶段的气候节气则都倾向于显著推迟(5~6 d左右)。

在全球变暖的大背景下,全国平均气温的二十四节气都趋于显著增暖,造成整个季节循环趋于整体抬升。二十四节气中,气温上升阶段的增温趋势普遍大于气温下降阶段;雨水、立春、惊蛰节气的增温

最快,在1961~2007年间分别增暖了2.43、2.37和2.21℃。

惊蛰、清明、小满和芒种这4个反映物候现象的气候节气在全国普遍趋于提前,在北方半干旱区都是显著的。气候惊蛰的提前趋势是4个节气中最明显的,除33°N以南的中南部地区外几乎都是显著的,而且在33°N以北,东部(105°E以东)趋势比西部大。气候清明除新疆西北部、四川、云南东部和东南沿海部分地区之外,趋势几乎都是显著的。气候小满和芒种分布特征相似,在北方半干旱带、江淮流域、东南部沿海一带的趋势几乎都是显著的。

在气候惊蛰、清明、小满和芒种全国普遍趋于提前的气候变化大背景下,各地应当因地制宜,适应气候变化,提前布局相应的农事活动。需要指出,二十四节气的气候特征除了温度,还应该考虑降水等其他要素,以更完整地表述气候节气及其变化特征。本文仅从温度分析入手,意在抛砖引玉。

致谢 叶笃正院士最早提出了本研究的基本设想,并在本文写作过程中给予了指导和讨论。

参考文献

- 1 IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2007
- 2 Root T L. Effects of global climate change on North American birds and their communities. In: Biotic Interactions and Global Change. Sunderland: Sinauer Associates, 1993
- 3 Crick H Q P, Sparks T H. Climate change related to egg-laying trends. *Nature*, 1999, 399: 423–424
- 4 Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe. *Nature*, 1999, 397: 659
- 5 郑景云, 葛全胜, 郝志新. 气候增暖对我国近40年植物物候变化的影响. *科学通报*, 2002, 47: 1582–1587
- 6 Zheng J, Ge Q, Hao Z, et al. Spring phenophases in recent decades over Eastern China and its possible link to climate changes. *Clim Change*, 2006, 77: 449–462
- 7 Wang H J, Sun J Q. Variability of Northeast China river break-up date. *Adv Atmos Sci*, 2009, 26: 701–706
- 8 Qian C, Fu C, Wu Z, et al. On the secular change of spring onset at Stockholm. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L12706, doi:10.1029/2009GL038617
- 9 Qian C, Fu C B, Wu Z, et al. The role of changes in the annual cycle in earlier onset of climatic spring in northern China. *Adv Atmos Sci*, 2011, 28: 284–296
- 10 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近50年中国地面气候变化基本特征. *气象学报*, 2005, 63: 942–955
- 11 徐铭志, 任国玉. 近40年中国气候生长期的变化. *应用气象学报*, 2004, 15: 306–312
- 12 Qian W H, Lin X. Regional trends in recent temperature indices in China. *Clim Res*, 2004, 27: 119–134
- 13 Song Y, Linderholm H W, Chen D, et al. Trends of the thermal growing season in China, 1951–2007. *Int J Climatol*, 2010, 30: 33–43
- 14 Zhai P, Pan X. Trends in temperature extremes during 1951–1999 in China. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 1913, doi:10.1029/2003GL018004
- 15 Dong W J, Jiang Y D, Yang S. Response of the starting dates and the lengths of seasons in Mainland China to global warming. *Clim Change*, 2010, 99: 81–91
- 16 郁珍艳, 范广洲, 华维, 等. 气候变暖背景下我国四季开始时间的变化特征. *气候与环境研究*, 15: 73–82

- 17 Yan Z W, Xia J J, Qian C, et al. Changes in seasonal cycle and extremes in China during the period 1960–2008. *Adv Atmos Sci*, 2011, 28: 269–283
- 18 Wu Z, Huang N E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method. *Adv Adapt Data Anal*, 2009, 1: 1–41
- 19 Li Z, Yan Z W. Homogenized daily mean/maximum/minimum temperature series for China from 1960–2008. *Atmos Ocean Sci Lett*, 2009, 2: 237–243
- 20 Qian C, Yan Z W, Wu Z, et al. Trends in temperature extremes in association with weather-intraseasonal fluctuations in eastern China. *Adv Atmos Sci*, 2011, 28: 297–309
- 21 Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis. *Proc R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 1998, 454: 903–995
- 22 Huang N E, Wu Z. A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies. *Rev Geophys*, 2008, 46: RG2006
- 23 Qian C, Wu Z, Fu C B, et al. On multi-timescale variability of temperature in China in modulated annual cycle reference frame. *Adv Atmos Sci*, 2010, 27: 1169–1182
- 24 Qian C, Fu C, Wu Z. Changes in the amplitude of the temperature annual cycle in China and their implication for climate change research. *J Clim*, 2011, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00006.1
- 25 张宝堃. 中国季节之分配. *地理学报*, 1934, 1: 29–74
- 26 Jones P D, Briffa K R, Osborn T J, et al. Relationships between circulation strength and the variability of growing-season and cold-season climate in northern and central Europe. *Holocene*, 2002, 12: 643–656
- 27 Li J, Yu R, Zhou T, et al. Why is there an early spring cooling shift downstream of the Tibetan Plateau? *J Clim*, 2005, 18: 4460–4468
- 28 符淙斌, 安芷生. 我国北方干旱化研究——面向国家需求的全球变化科学问题. *地学前缘*, 2002, 9: 271–275
- 29 马柱国, 符淙斌. 1951~2004 年中国北方干旱化的基本事实. *科学通报*, 2006, 51: 2429–2439
- 30 全国农业生产服务中心. 第二届国家农作物品种审定委员会第二次会议审定通过的品种介绍(V)——大豆(2)、小麦(1). *种子科技*, 2009, 5: 47–51
- 31 全国农业生产服务中心. 第二届国家农作物品种审定委员会第二次会议审定通过的品种介绍(VI)——小麦(2). *种子科技*, 2009, 6: 49–51
- 32 全国农业生产服务中心. 第二届国家农作物品种审定委员会第二次会议审定通过的品种介绍(V)——小麦(2). *种子科技*, 2010, 5: 45–52