从特定温度段天数变化研究中国对全球变暖的响应

刘　新[1,2],杜中波[1],杜　珺[1],郭林熹[1]

(1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院,山东 青岛 266590;
2. 山东科技大学 山东省基础地理信息与数字化技术重点实验室,山东 青岛 266590)

摘　要:在全球变暖大背景下,为了研究中国对全球变暖的响应,提出一种通过分析气温 0 ℃以下温度段和 25 ℃以上温度段的天数变化情况,反映中国气温变化的研究方法。采用 1980—2014 年我国大陆范围内 184 个气象站点的日平均气温值,结合有效的统计学方法及插值方法,以 0 ℃以下温度段和 25 ℃以上温度段的年总天数值以及每个站点在两温度段的天数值为依据,研究 1980 年以来中国大陆范围内气温变化对全球变暖的响应。结果表明,我国大陆区域对全球变暖的响应明显。且不同区域存在差异,对全球变暖响应明显的是新疆地区、青海地区、内蒙古地区、东北地区以及我国 40 °N 以南中东部区域,35 °N 附近区域不明显。

关键词:全球变暖;中国;温度段;天数;响应

中图分类号:TN929.5　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1672-3767(2017)02-0019-08

Response of Mainland China to Global Warming Based on Changes of Days Within Specific Temperature Ranges

LIU Xin[1,2], DU Zhongbo[1], DU Jun[1], GUO Linxi[1]

(1. College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;
2. Key Laboratory of Fundamental Geographic Information and Digital Technology of Shandong Province, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: In order to investigate the response of the mainland of China to global warming in the context of global warming, a new research method was proposed to study the temperature changes in China by analyzing the changes of days within the ranges of temperature below 0 ℃ and above 25 ℃. In situ temperature records of 184 meteorological stations in the mainland of China from 1980 to 2014 were used. The total number of days of each year and the number of days on each meteorological station at two temperature ranges were computed. The temperature changes in China since 1980 as a response to global warming were studied by combining effective statistical method and interpolation methods. The results show that there are obvious responses over the mainland of China to global warming, but there are regional differences. Regions including Xinjiang, Qinghai, Inner Mongolia, Northeast China, and the middle east region south of 40 °N, show more conspicuous response to global warming while regions in the vicinity of 35 °N show less responses.

Key words: global warming; China; temperature ranges; the number of days; response

政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,IPCC)第五次评估报告[1]指出过去 130 年全球升温 0.85 ℃。研究我国对全球变暖的响应,有助于掌握我国气候变化的规律,提高对全

收稿日期:2016-04-19
基金项目:国家自然科学基金项目(41201381)
作者简介:刘　新(1969—),女,山东肥城人,副教授,主要从事空间数据挖掘和空间数据共享等方面研究.
E-mail:xinliu1969@126.com

球升温的适应能力，实现社会、经济和环境的可持续、协调发展。

研究表明，中国各区域气温均呈上升趋势，特别是东北地区升温趋势最快[2]。我国干旱区年平均气温也呈明显上升趋势[3]。35 °N 纬线附近是冬夏季节差异最小的地带，从这一地带开始，向南和向北，气温变化的季节差异均趋于增大，变化最大的是冬季，其次是秋季和夏季，春季变化最小[4-5]。对中国不同地域近 50 年的气温变化进行相关分析[3,6-8]发现，中国近 50 年来温度显著升高，20 世纪 80 年代末中国西南地区出现大幅升温，而长江中下游地区则出现夏季降温现象。不同区域气候增暖趋势具有地域特征，预计 21 世纪前期中国将继续保持增暖趋势，北方地区和青藏高原的升温要大于除西南地区之外的南方地区[9]。

以往研究人员是从气温的区域变化稳定性[10]、气温的概率分布[11]、气温的区域变化(包括干旱半干旱区域[3]，西南区域[7]，东北区域[8]等)以及在气温变化的特征[4]等方面研究我国气温变化，但没有涉及不同温度段的天数变化。理论上，气温的变化在气温数轴的两端最大，研究两端温度段的天数变化能反映我国气温变化的基本趋势。本文根据 184 个我国大陆气象站温度数据，分析我国气温 0 ℃和 25 ℃以上实际天数，研究我国大陆区域气温变化对全球变暖的响应。

1 数据与方法

1.1 数据

1.1.1 温度数据

研究数据来源于中国地面国际交换站气候资料，是由各省、市、自治区气候资料处理部门逐月上报的气温日均数据集，时间分辨率为天。该资料数据按“地面气象观测规范”的要求进行观测，经过严格的质量控制，统计结果经过极值检验和时间一致性检验。

本研究选取了大陆范围内 184 个气象站点，其分布如图 1 所示。由图 1 可以看出，我国中东部气象站点分布较均匀，西部站点较为稀疏，特别是在西藏自治区站点更为稀少。因此除西藏地区插值精度难以保证外，其余地区气象站的分布能够满足插值精度要求。由于西藏地区的研究结果可信度不高，故本次研究不包括此区域。

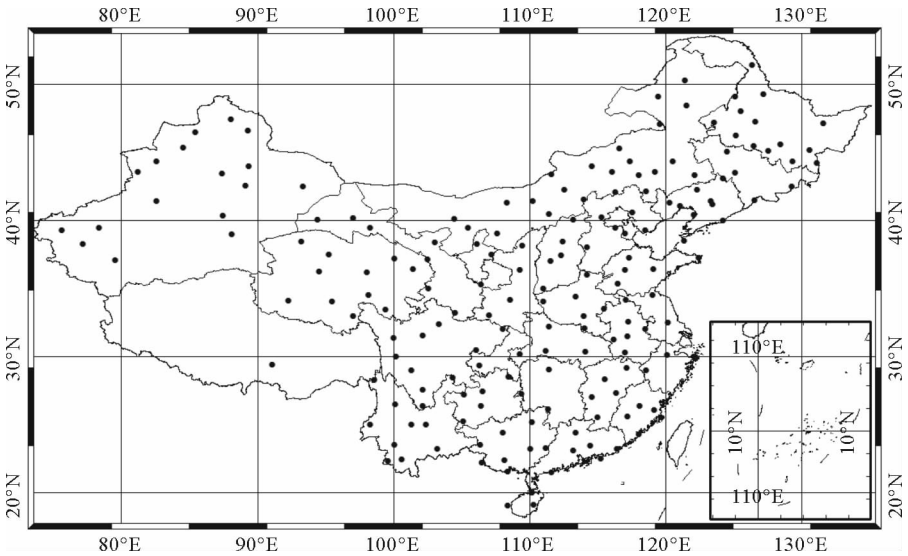


图 1 中国大陆区域内 184 个气象站点分布

Fig. 1 Geographical distribution of 184 meteorological stations over Chinese mainland

1.1.2 数据预处理

气象站气温日值数据集的数据存储格式为文本格式，对其进行格式转换，以便在相关数据处理软件中处

理。采用分类筛选等方法处理数据集的日平均气温值，得到不同年份 184 个站点 0 ℃以下温度段和 25 ℃以上温度段的年总天数值，并计算每个站点在两温度段的天数值，这里我们分别以“冬天”年总天数和“夏天”年总天数以及每个站点的“冬天”天数和“夏天”天数加以区分。“冬天”年总天数是指一年内 184 个站点记录的日平均气温在 0 ℃以下天数总和；“夏天”年总天数是指一年内 184 个站点记录的日平均气温在 25 ℃以上天数总和；“冬天”天数是指一个站点一年中日平均气温在 0 ℃以下天数；“夏天”天数是指一个站点一年中日平均气温在 25 ℃以上天数。

气象站气温数据集中的缺省值指调查、实验、内容分析等实证数据中“拒答”、“不知道”、“无意见”等没有实际信息的值。传统的处理方法将其排除在外，或者用均值或中位数取代。本文采用统计学中的缺省值分析(missing value analysis，MVA)方法处理气象数据集中存在的观测缺省值情况。MVA 是一种 data-driven(数据导向)而非 theory-driven(理论导向)的方法，即根据不含缺省值的个案相关信息预测含缺省值的个案中的缺省值。

1.2　分析方法

1.2.1　距平分析

距平是某一系列数值中的某个数值与该系列数值平均值的差，分为正距平和负距平。本文采用每年“冬天”年总天数和“夏天”年总天数与 35 年的平均“冬天”年总天数和平均“夏天”年总天数的差值作为年总天数距平值。其中第 i 年“夏天”年总天数距平值 S_i 计算公式为：

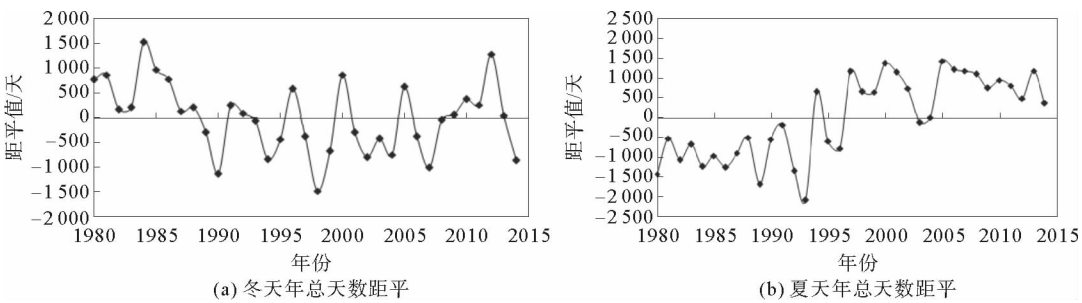
$$S_i = T_i - \sum_{i=1}^{n} T_i / n \ , \tag{1}$$

第 j 年“冬天”年总天数距平值 W_j 计算公式为：

$$W_j = P_j - \sum_{\alpha=1}^{n} P_\alpha / n \ 。 \tag{2}$$

其中，T_i 与 T_α 分别为气象站点在第 i 或 α 年的“夏天”年总天数值，如 $i=1$ 或 $\alpha=1$，T_1 表示 1980 年的“夏天”年总天数值；P_j 与 P_α 分别为气象站点在第 j 或 α 年的“冬天”年总天数值，如 $j=1$ 或 $\alpha=1$，P_1 表示 1980 年的“冬天”年总天数值；n 表示从 1980 年到 2014 年总年数，即 $n=35$。

年总天数距平值为正，说明该年两温度段年总天数大于 35 年的平均年总天数；年总天数距平为负，情况相反。年总天数距平值绝对值越大，则相应时间段内的气温变化越显著。图 2 给出了冬天和夏天总天数距平结果。



(a) 冬天年总天数距平　　(b) 夏天年总天数距平

图 2　年总天数距平

Fig. 2　Departure of the total days

1.2.2　一元线性趋势分析

气候要素的变化趋势一般采用一元线性回归模型描述，即：

$$y = ax + b \ 。 \tag{3}$$

式中，y 为气温，x 为时间(本研究中为 1980—2014 年)，a 为线性趋势项，可定量分析气候要素变化的线性趋势。

根据式(3),采用最小二乘法线性拟合 1980—2014 年每个站点 0 ℃以下温度段及 25 ℃以上温度段天数的回归方程,并根据趋势项分析我国 0 ℃以下温度段天数的变化趋势和 25 ℃以上温度段天数的变化趋势。

1.2.3 空间插值分析

克里金(Kriging)插值法[12]不仅考虑待估点位置与已知数据位置的相互关系,而且还考虑变量的空间相关性,因此克里金方法是一种空间自协方差最佳插值法。普通克里金插值是对区域化变量的线性估计,假设数据成正态分布,认为区域化变量的期望值是未知的,通过确定待插点周围采样点的权重求取待插点的近似值。克里金插值方法插值无偏性、插值精度高且能够反映数值的空间结构性,因此本研究采用克里金插值方法根据气象站点的"冬天"天数和"夏天"天数值在我国大陆范围内插值。

径向基函数(radial basis function,RBF)插值方法[13]是一系列精确差值方法的组合,通过对采样点数据训练,利用训练值计算未知点数数据。RBF 方法不同于全局和多项式插值器,RBF 方法可预测大于最大测量值和小于最小测量值的值。RBF 插值方法具有计算格式简单、节点配置灵活、精度高等优点,因此本研究采用径向基函数插值方法,根据一元线性趋势分析中气象站点"冬天"天数和"夏天"天数拟合回归直线的趋势项在大陆范围内插值。

2 数据分析

2.1 两温度段天数的时间变化

统计 1980—2014 年"冬天"年总天数和"夏天"年总天数,绘制不同年份年总天数散点曲线图,见图 3。

根据图 3,两温度段年总天数存在波动。据一元线性趋势分析得到"冬天"年总天数线性回归方程为

$$y = -41.477x + 14\ 313, \tag{4}$$

"夏天"年总天数的线性回归方程为

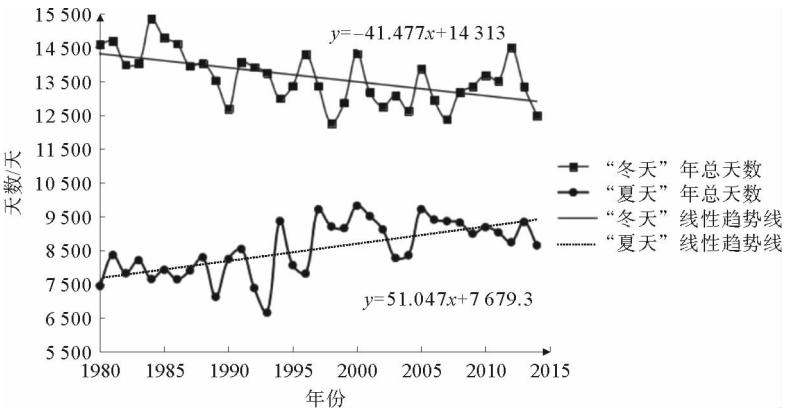


图 3 0 ℃以下温度段和 25 ℃以上温度段的年总天数

Fig. 3 Total number of days of each year within the ranges of temperature below 0 ℃ and above 25 ℃

$$y = 51.047x + 7\ 679.3。 \tag{5}$$

式中,x 为年,y 为天数。式(4)、式(5)的趋势项表明,35 年间"冬天"年总天数值随时间呈下降趋势,年变率为−41.477 天/年;"夏天"年总天数值随时间呈上升趋势,其年变率为 51.047 天/年,两者趋势相反。这些表明我国大陆总体上"冬天"缩短,"夏天"变长,也表明了我国气候变暖的趋势。这一结论与 IPCC[1]、韩翠华[2]、张世轩[5]、王遵娅[6]、马振峰[7]、王澄海[9]、唐国利[14]等得到的中国气候变暖的结论一致。

"冬天"年总天数曲线显示"冬天"年总天数最多的年份是 1984 年,之后各年的年总天数在波动中呈下降的趋势,而且在 80 年代末到 90 年代末有一个明显的下降过程。据图 2(a)所示,1988 年以前距平值为正,80 年代末以后距平值为负的情况大量出现,特别是在 1989 年至 2008 年期间,这表明此段时间 0 ℃以下温度段年总天数下降较为明显。

"夏天"年总天数曲线显示在 80 年代天数变化虽有波动,但总体上维持平稳状态。从 90 年代中期,特别是从 1996 年开始,出现明显的快速上升过程,2005 年达到最大峰值,之后数年维持高数值水平。据图 2(b)所示,距平值呈现两极分化,以 1995 年为界,之前距平值为负,之后距平值为正,表明 1995 年之后 25 ℃以上温度段的年总天数上升较快。

根据图 3,80 年代末到 90 年代末两温度段天数存在明显的增减变化过程,这一结论与魏凤英等[11]在中国冬半年最低气温概率分布特征研究上得到的结论一致。具体表现为"冬天"年总天数减少,"夏天"年总天

数增多；90 年代末以来气温变化较为稳定，但“冬天”天数在减少，“夏天”天数在增加的总趋势没有改变。

2.2　两温度段天数的空间变化

利用气象站点不同年份两个温度段的天数值，采用克里金插值方法进行我国大陆范围内天数插值，得到“冬天”天数和“夏天”天数插值图，每隔 7 年选取一幅插值图进行空间分析，如图 4 和图 5 所示。

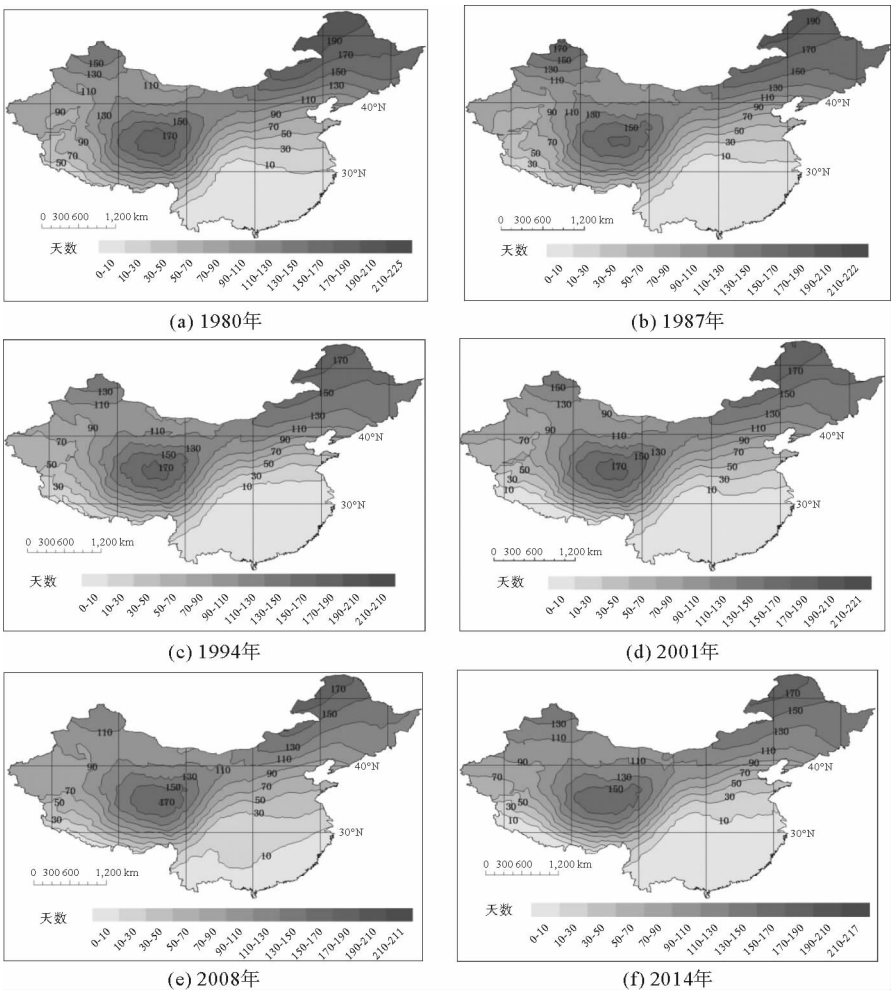


图 4　不同年份“冬天”天数

Fig. 4　Number of days within the range of temperature below 0 ℃ in different years

根据图 4，“冬天”天数变化较为明显的区域是东北三省、新疆地区、内蒙古地区以及青海地区。0 ℃以下天数在 110 天以上的区域，集中分布在 30 °N 以北，其面积逐年减小，说明我国对全球变暖的响应明显。其具体表现为：东北地区天数大于 190 的区域面积在 1980 年最大，之后该区域面积逐渐缩小，直至消失；在 150 和 170 天数区间，其区域面积也在逐年递减。新疆北部地区与青海地区 35 年间其色带变化由复杂变得单调，该区域 0 ℃以下天数大于 170 的区域逐渐消失，其他天数区域面积也在逐年递减，表明新疆北部地区和青海地区对全球变暖的响应明显，这一结论与马振锋[7]、郎咸梅[15]等在青藏高原研究上得到结论相一致。

根据图 5，“夏天”天数变化最大的区域为新疆地区和我国 40 °N 以南中东部区域。新疆地区主要以新疆中部变化最为明显，天数大于 70 的区域面积大小虽有波动，但整体维持逐年增加的态势。40 °N 以南中东部存在一个深色区域，该区域气温大于 25 ℃的天数在不同天数层的面积有一个明显变化过程。具体变现为：从图5(a)到图 5(c)的 50、70、90 天数区域面积逐年增加，但是从图 5(c)到图 5(f)此区域面积却在缩小，可以推测该区域存在先升温后降温的过程，此变化过程验证了王遵娅等[6]关于长江流域出现夏季降温的结论。

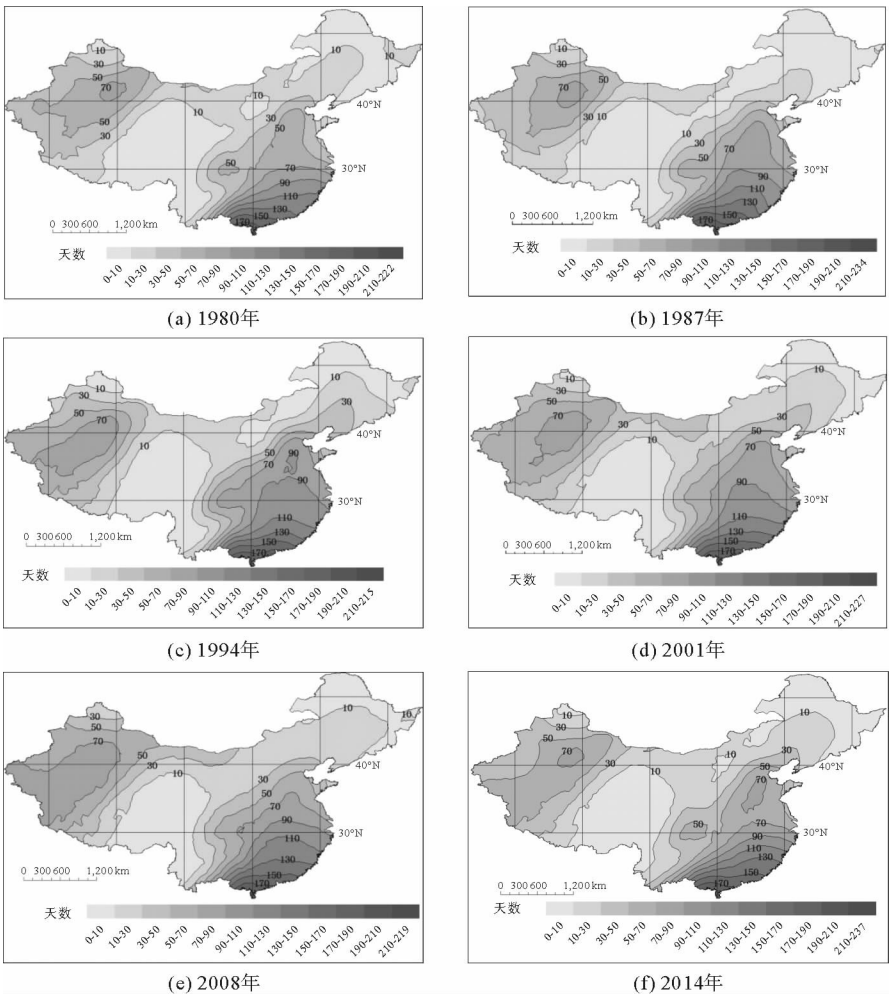


图 5　不同年份“夏天”天数

Fig. 5　Number of days within the range of temperature above 25 ℃ in different years

根据图 4 和图 5，发现我国 35 °N 附近的中东部地区是天数变化最小的地带，这一地带在气候变化上具有稳定性。这一地带是一个明显的分界线，从 35 °N 开始，向南和向北，天数变化都趋于增大。该地带的稳定性也表现在百年尺度的气温变化[7]上，这一结论与卢爱刚等[10]发现 20 世纪的气温变化中，35 °N 左右是气温突变最晚的地带的结论是一致的。

2.3　天数区域变化趋势分析

利用气象站点不同年份在两温度段的天数数值，采用最小二乘法线性拟合“冬天”天数回归直线和“夏天”天数回归直线。根据线性回归直线的趋势项值，采用 RBF 插值方法绘制我国大陆“冬天”天数变化趋势和“夏天”天数变化趋势，如图 6 所示。

图 6(a)中斜线区域表示回归直线趋势项为正，即表示该区域在 35 年间“冬天”天数呈上升趋势，其他区域表示回归直线趋势项为负，即表示该区域在 35 年间“冬天”天数呈下降趋势。图 6(b)中斜线区域表示回归直线趋势项为负，即表示该区域在 35 年间“夏天”天数呈下降趋势，其他区域表示斜率为正，即表示该区域在 35 年间“夏天”天数呈上升趋势。我国大陆区域 184 个气象站点中，“冬天”天数呈下降趋势的有 168 个，占总数的 91.3%；“夏天”天数呈上升趋势的有 170 个站点，占总数的 92.4%。这表明我国大陆区域 90%以上区域“冬天”天数呈下降趋势，“夏天”天数呈上升趋势，即我国大陆区域绝大部分地区“冬天”缩短，“夏天”变长。我国北部区域“冬天”天数下降较快，特别是东北三省、青海、内蒙古、新疆北部地区；新疆中部及我国大陆 40 °N 以南的中东部区域“夏天”天数上升较快。

3　结论

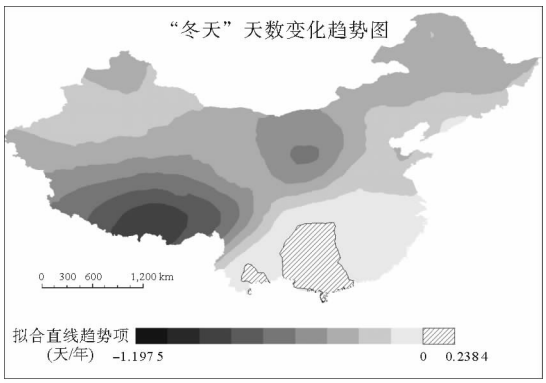
本研究提出一种通过气温数轴两端温度段天数变化情况研究中国大陆区域对全球变暖的响应方法，利用我国大陆范围内 184 个气象站点的日平均气温值，统计分析 1980—2014 年不同年份 0 ℃以下温度段和 25 ℃以上温度段的年总天数值以及每个站点在两温度段的天数值，以天数变化为依据研究了 1980 年以来中国全国范围内气温变化对全球变暖的响应：

1）20 世纪 80 年代以来，在全球变暖的背景下，我国对全球变暖的响应比较明显。

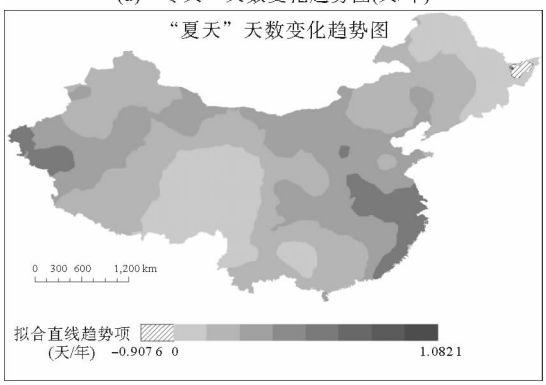
2）1980 年以来 0 ℃以下温度段的年总天数呈现下降趋势，其年变率为－41.477 天/年；25 ℃以上温度段的年总天数呈现上升趋势，其年变率为 51.047 天/年，两者的趋势相反。验证了我国气候变暖的基本趋势，也表明我国某些地区“冬天”在缩短，“夏天”在变长。

3）距平分析结果表明：1989 年到 2008 年期间，0 ℃以下温度段年总天数下降较快；1995 年之后，25 ℃以上温度段的年总天数上升较快。

4）新疆中部地区和 40 °N 以南的中东部区域 25 ℃以上温度段天数上升较快；东北三省，新疆地区北部，内蒙古地区以及青海地区在 0 ℃以下温度段天数下降较快。总体上我国大陆范围 90%以上的区域在 0 ℃以下温度段天数呈下降趋势，在 25 ℃以上温度段天数呈上升趋势。



(a)“冬天”天数变化趋势图(天/年)



(b)“夏天”天数变化趋势图(天/年)

图 6　中国大陆 0 ℃以下和 25 ℃以上温度段天数变化趋势

Fig. 6　Trend of number of days within the ranges of temperature below 0 ℃ and above 25 ℃

5）对全球变暖响应最明显的区域是东北地区、新疆地区、内蒙古地区、青海和 35 °N 以南中东部区域。我国 35 °N 附近中东部区域天数变化最小，该区域气候较为稳定。由于受气象站点分布的影响，研究过程中青藏高原部分地区的气温变化情况并不准确，是今后研究改进的重点。

参考文献：

[1]IPCC. Climate change 2014：Mitigation of climate change[M]. Cambridge：Cambridge University Press，2014.

[2]韩翠华，郝志新，郑景云. 1951—2010 年中国气温变化分区及其区域特征[J]. 地理科学进展，2013，32(6)：887-896.
HAN Cuihua，HAO Zhixin，ZHENG Jingyun. Regionalization of temperature changes in China and characteristics of temperature in different regions during 1951-2010[J]. Progress in Geography，2013，32(6)：887-896.

[3]张雪芹，孙杨，毛炜峄，等. 中国干旱区气温变化对全球变暖的区域响应[J]. 干旱区研究，2010，27(4)：592-599.
ZHANG Xueqin，SUN Yang，MAO Weiyi，et al. Regional response of temperature change in the arid regions of China to global warming[J]. Arid Zone Research，2010，27(4)：592-599.

[4]郭志梅，缪启龙，李雄. 中国北方地区近 50 年来气温变化特征的研究[J]. 地理科学，2005，25(4)：448-454.
GUO Zhimei，MIAO Qilong，LI Xiong. Variation characteristics of temperature over northern China in recent 50 years[J]. Scientia Geographica Sinica，2005，25(4)：448-454.

[5]张世轩，张璐，孙树鹏，等. 全球变暖情况下中国季节的变化[J]. 高原气象，2011，30(3)：659-667.
ZHANG Shixuan，ZHANG Lu，SUN Shupeng，et al. Changes of the seasons in mainland China under global warming[J]. Plateau Meteorology，2011，30(3)：659-667.

[6]王遵娅，丁一汇，何金海，等. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析[J]. 气象学报，2004，62(2)：229-236.

WANG Zunya, DING Yihui, HE Jinhai, et al. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2004, 62(2): 229-236.

[7]马振锋,彭骏,高文良,等. 近40年西南地区的气候变化事实[J]. 高原气象,2006,25(4):633-642.
MA Zhenfeng, PENG Jun, GAO Wenliang, et al. Climate variation of southwest China in recent 40 years[J]. Plateau Meteorology, 2006, 25(4): 633-642.

[8]贺伟,布仁仓,熊在平,等. 1961—2005年东北地区气温和降水变化趋势[J]. 生态学报,2013,33(2):519-531.
HE Wei, BU Rencang, XIONG Zaiping, et al. Characteristics of temperature and precipitation in northeastern China from 1961 to 2005 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 519-531.

[9]王澄海,李健,许晓光. 中国近50年气温变化准3年周期的普遍性及气温未来的可能变化趋势[J]. 高原气象,2012,31(1):126-136.
WANG Chenhai, LI Jian, XU Xiaoguang. Universality of quasi-3-year period of temperature in last 50 years and change in next 20 years in China[J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(1): 126-136.

[10]卢爱刚,庞德谦,康世昌,等. 全球升温下中国温度区域变化的稳定性[J]. 生态环境,2007,16(2):275-279.
LU Aigang, PANG Deqian, KANG Shichang, et al. Regional stability of temperature change across China under global warmin [J]. Ecology and Environment, 2007, 16(2): 275-279.

[11]魏凤英. 中国冬半年最低气温概率分布特征[J]. 气候变化研究进展,2008,4(1):8-11.
WEI Fengying. Probability distribution of minimum temperature in winter half years in China[J]. Advances in Climate Change Research, 2008, 4(1): 8-11.

[12]李俊晓,李朝奎,殷智慧. 基于ArcGIS的克里金插值方法及其应用[J]. 测绘通报,2013(9):87-90.
LI Junxiao, LI Chaokui, YIN Zhihui. ArcGIS based Kriging interpolation method and its application[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(9): 87-90.

[13]刘艳,白俊强,华俊. 基于RBF插值技术的CFD/CSD非线性藕合分析方法研究[J]. 计算力学学报,2014,31(1):120-127.
LIU Yan, BAI Junqiang, HUA Jun. An approach to CFD/CSD non-linear coupling based on RBF interpolation technology [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2014, 31(1): 120-127.

[14]唐国利,丁一汇,王绍武,等. 中国近百年温度曲线的对比分析[J]. 气候变化研究进展,2009,5(2):71-78.
TANG Guoli, DING Yihui, WANG Shaowu, et al. Comparative analysis of the time series of surface air temperature over China for the last 100 years[J]. Advances in Climate Change Research, 2009, 5(2): 71-78.

[15]郎咸梅,隋月. 全球变暖2 ℃情景下中国平均气温和极端气候事件变化预估[J]. 科学通报,2013,58(8):734-742.
LANG Xianmei, SUI Yue. Changes in mean and extreme climates over China with a 2 ℃ global warming[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(8): 734-742.

(责任编辑:高丽华)