

彭凯, 邓建明, 张运林, 等. 2019. 1957~2015 年我国春季短期温度波动规律 [J]. 气候与环境研究, 24 (1): 125-134. Peng Kai, Deng Jianming, Zhang Yunlin, et al. 2019. Short-term temperature fluctuation in the spring in China during 1957-2015 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24 (1): 125-134, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17060.

1957~2015 年我国春季短期温度波动规律

彭凯^{1,2} 邓建明¹ 张运林¹ 龚志军¹ 秦伯强¹

1 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 为研究全球变暖背景下我国短期温度波动变化规律, 利用全国 804 个气象站点的逐日气温资料, 计算隔日平均温差大于 1 °C 的天数以及隔日温差的变化幅度, 分析了 1957~2015 年我国短期温度波动频率与波动幅度的时空分布与变化规律, 探讨了春季短期温度波动与经纬度及海拔之间的关系。结果表明: 1957~2015 年我国春季短期温度波动大致分为两个阶段: 1990 年以前我国大部分地区春季短期温度波动频率及幅度没有明显变化趋势, 1990 年以后我国大部分地区 (约 70%) 春季短期温度波动呈上升趋势。此外, 我国春季短期温度波动规律有地域性差异, 表现为与经纬度关系密切, 波动频率与波动幅度与经纬度等线性相关系数较高。结合波动趋势分布与隔日温度波动的地域分布可知, 处于低纬度地区 (如广东、广西等地) 波动天数和波动幅度均增加, 造成人们对于“天气变化无常”的感受强烈。由于生物生长发育等过程与温度密切相关, 因此研究结果提示在讨论气候变化对生态系统长期影响时可能还需要关注短期的温度波动情况。

关键词 短期温度波动 波动频率 波动幅度 波动趋势变化 气候变化

文章编号 1006-9585 (2019) 01-0125-10

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17060

Short-Term Temperature Fluctuation in the Spring in China during 1957-2015

PENG Kai^{1,2}, DENG Jianming¹, ZHANG Yunlin¹, GONG Zhijun¹, and QIN Boqiang¹

1 State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract In order to study the regularity of short-term temperature fluctuation in the context of global warming, daily temperature data collected at the 804 meteorological stations in China are used to count the number of days in which daily average temperature fluctuation is greater than 1 °C and calculate the standard deviation of daily temperature fluctuation. The temporal and spatial distribution and variation of short-term temperature fluctuation days and fluctuation amplitude are analyzed, and the relationships between springtime mean temperature and latitude/longitude/altitude are discussed. The results are as follows. The short-term temperature fluctuation over China in the past six decades can be roughly divided into two stages, i.e., the stage before 1990 when the short-term temperature fluctuation amplitude and fluctuation days did not change in most areas of China, and the stage after 1990 when the short-term temperature

收稿日期 2017-04-02; **网络预出版日期** 2018-08-23

作者简介 彭凯, 男, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要从事底栖生态学研究。E-mail: kpeng@niglas.ac.cn

通讯作者 龚志军, E-mail: zjgong@niglas.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41501215、41230744

Funded by the National Natural Science Foundation of China (Grants 41501215 and 41230744)

fluctuation in most areas of China (about 70%) showed an upward trend. The short-term temperature fluctuation is closely related to latitude and longitude. Combined with regional distribution of the fluctuation trend and fluctuations of daily temperature, it can be seen that the fluctuation amplitude and fluctuation days both increase in the low latitudes, which makes people get a strong feeling about the temperature change. Because the process of biological growth and development is closely related to temperature, results of the present paper suggest that short-term temperature fluctuation may also need to be considered when discussing long-term impacts of climate change on ecosystems.

Keywords Short-term temperature fluctuation, Fluctuation amplitude, Fluctuation days, Fluctuation trend change, Climate change

1 引言

2011 年 IPCC 发布的第五次评估报告指出, 全球变暖是毋庸置疑的 (Stocker et al., 2014), 极端天气现象是气候变化的一个重要特征。研究表明最近 20 年之间全国多数地区极端天气天数在增加 (Zhang et al., 2008); 长江三角洲在 1980 年以来, 随着全球气候的快速增温, 夏季极端高温 (日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$) 天气的发生有增加的趋势 (邓自旺等, 2000)。陈少勇等 (2012) 对中国西北地区 135 个测站 1961~2009 年历年逐日地面最高气温分析认为西北地区极端高温事件响应气候变暖, 表现为高温事件的频率增加、强度增强, 区域平均年极端高温频率以 1.8 d/10 a 的速率显著增多, 特别是从 1980 年代末开始以 5.4 d/10 a 的速率剧烈增。在黄土高原地区, 对 1960~2013 年的温度数据分析表明, 极端高温事件具有增加的趋势, 而极端低温事件有减少的趋势 (Stocker et al., 2014)。

无论温度的增加与波动, 对生态系统都会产生一系列的影响, 全球变化的背景下, 研究者普遍关注于生物对升温的响应, 尤其是陆地生态系统 (Shaver et al., 2000; Price and Waser, 2001; Daufresne et al., 2009; 方精云等, 2018)。而变温同样也会对动植物的生长、繁殖、发育产生一系列的直接影响 (Niederegger et al., 2010; Pushkar et al., 2010; Bahar et al., 2012; Zhang et al., 2012; 赵静等, 2015)。例如变温会造成小菜蛾 (*Plutella xylostella* L.) 及其天敌北美弯尾姬蜂 (*Diadegma insulare* Hellén) 的发育时间缩短, 成虫寿命延长 (Bahar et al., 2012)。在澳大利亚, 对蜥蜴的研究表明, 温度的波动改变不仅会影响生物体的形状, 而且对胚胎的生成有着显著的影响 (Shine and Elphick, 2010)。又如在法医中经常用来计算死亡时间间隔的各种苍蝇, 波动的温度会使得红头丽蝇 (*Calliphora*

vicina Robineau) 和黑颊丽蝇 (*C.vomitorea* L.) 的发育减慢, 麻蝇 (*Sarcophaga argyrostoma* Robineau-Desvoidy) 和亮绿蝇 (*Lucillia illustris* Meigen) 的发育加快 (Niederegger et al., 2010)。温度波动也会对植物造成不同程度的影响, 有研究指出, 在春季的藻类群落演替期间, 温度波动会促进水华蓝藻优势种的更早确立 (Zhang et al., 2012), 同样温度的波动也会对经济农作物的产量产生一系列影响, 在干旱半干旱地区, 谷子、糜黍、大豆和油料作物与生长季节的温度波动呈显著相关性 (孙特生等, 2012) 在全球变化的背景下, 温度波动及其对生态系统产生的影响往往容易被忽略, 因此未来关于气候变化对生物影响的研究可能还需考虑温度波动的变化及其影响。

温度波动按照时间长度来看可以表现为日较差 (昼夜温差) 的变化、短期内温度波动 (隔天或者数日温度变化) 以及极端气候。其中对于日较差的变化以及极端气候研究较多 (严中伟和章名立, 1992; Tam et al., 2009; 周杰等, 2013), 但是由于全球变暖有着夜间增温高于白天增温的特点, 导致大部分地区温度日较差在最近几十年里趋于降低 (Easterling et al., 2005)。这些研究结论与我们的切身体验似乎不完全一致。因为近年来无论是新闻报道还是我们自身感受都觉得温度波动剧烈、变化异常, 例如晋江新闻网 2013-03-12 报道标题以“无序模式”来形容一周内的天气变化现象 (<http://news.ijjnews.com/system/2013/03/12/010026713.shtml> [2017-01-23])。而极端天气作为短期温度波动的特例, 由于其表现较为强烈, 容易引起研究者的关注和重视, 因此国内外已有一系列的研究与报道 (Shaver et al., 2000; Frich et al., 2002; Alexander et al., 2006; Daufresne et al., 2009; 任国玉等, 2010)。相较于短期温度波动, 极端气候由于强度大, 持续时间短, 一般会对生态系统产生直接的、可见的影响, 而短期温度波动变化对生物产生的影响较为隐晦需要投入更多的研究。但是目前我国对于短期温度波动

变化缺乏针对性研究和报道, 温度的短期波动变化规律以及时空差异等的资料尚不充分。同时目前关于温度波动对生物影响的研究中, 温度波动值设置差异较大, 更鲜有基于以全国的温度波动变化为背景下的针对性研究。

因此, 为揭示近 60 年来我国气候短期波动的规律以及时空差异, 本文通过分析全国 804 站点平均气温间的波动以及其长时间的序列变化来分析全国范围内短期温度波动频率和幅度的长时间变化规律及空间差异, 以期为后续的关于温度波动对生物影响研究提供背景资料。

2 资料与方法

本文所使用数据来自于中国气象网(<http://data.cma.cn/>[2016-05-11]) 整编的全国日平均气温数据, 选取了全国范围内有气象记录且观测时间大于 30 年的所有站点共计 804 个, 其中超过 80% 的站点在 1957 年之前就有记录, 95% 的站点在 1960 年之前就拥有记录, 记录时间较晚的站点多为青藏高原地区以及新疆部分地区。各站点分布如图 1 所示。剔除缺失值以待进一步分析。温度短期波动通过计算短期内(例如隔日温度差异)的日平均温度差值大小绝对值来衡量温度波动幅度、计算每年大于一定阈值的天数作为波动频率。在前期的研究中, 我们随机选取 60 个气象站点分别计算间隔 1~5 d 的平均温度差值绝对值分别大于 1~5 °C 的天数, 结果

显示以间隔一天温度差为 1 °C 的时候温度波动变化最为明显; 与此同时, 根据多年逐日气温数据计算的平均值, 一周年内逐日温度波动范围在 ± 1 °C 之间, 因此本文重点讨论隔日温度波动大于 1 °C 的变化情况。文献同样也显示在我国春季是近年来变化最显著的季节(邓建明, 2014), 也是天气最不稳定的季节, 因此本文主要针对春季开展分析。

本文隔日温差定义为: 某日的平均温度减去前一天的平均温度。由于隔日温度变化差值有正有负, 所以取其绝对值代表温度波动的幅度。即

$$\Delta_i X = |X_i - X_{i-1}|, \quad (1)$$

其中, X_i 代表第 i 日的日平均温度; $\Delta_i X$ 代表第 i 日与前一日的隔日温差。

统计一年中 $\Delta_i X$ 大于 1 °C 的天数作为当年短期温度波动的频率。通过计算每年温度波动的方差来表征短期温度波动的幅度。波动天数及波动幅度的长时间变化规律通过 Mann-Kendall 检验。时间序列趋势分析中, Mann-Kendall 检验法是世界气象组织推荐并广泛使用的非参数检验法。此方法的优点在于检验样本不需要遵从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰, 适用于气象等非正态分布的数据(刘元波等, 2012)。该方法具体计算公式可参考文献(Tam et al., 2009; 刘元波等, 2012)。趋势检验中 $\tau > 0$ (τ 表示衡量温度波动的强度指标) 且通过显著性检验($p < 0.05$) 则认为变化趋势为显著上升, $\tau < 0$ 且通过显著性检验($p < 0.05$), 则认为变化趋势为显著下降。

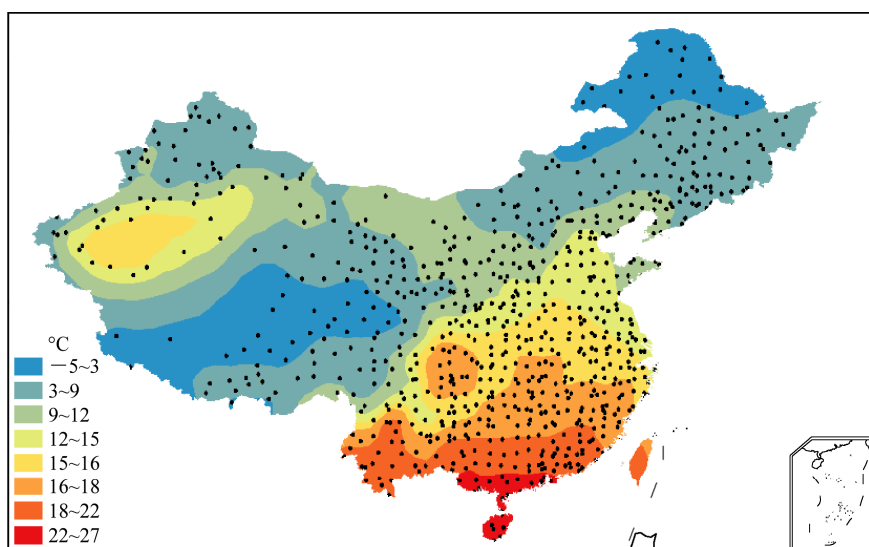


图 1 中国气象站点分布及 1957~2015 各气象站点春季平均温度

Fig. 1 Distribution of the selected stations in China and their temperature in spring averaged during 1957–2015

本文数据分析以及作图使用软件 R-3.2 完成。Mann-Kendall 趋势分析由程序包 Kendall 中的 MannKendall 函数实现。线性回归通过 lm 函数实现。短期温度波动的空间分布规律通过 gstat 程序包中泛克里金插值分析完成 (Pebesma, 2004; Bivand et al., 2008)。泛克里金插值法是一种无偏、最优的插值方法, 插值优于距离加权法和最小二乘法, 近年来已经广泛应用于许多领域, 效果显著 (牛文杰等, 2001)。

3 结果分析

3.1 各站点多年春季平均温度

各站点的春季温度平均值如图 1 所示。在 804 个站点中, 绝大多数站点春季温度均值大于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (777 个), 春季平均温度最高的站点为海南西沙, 为 $27.40\text{ }^{\circ}\text{C}$; 只有少数站点春季平均温度小于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (27 个), 大都分布在我国最北端的黑龙江、内蒙古部分地区以及青藏高原部分地区, 平均温度最低的站点为青海五道梁, 为 $-5.29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。以温度 (T) 与经度 (x)、纬度 (y)、海拔 (z) 以及三者间的交互作用建立回归模型并剔除不显著影响因子 (95% 置信区间), 得出 $T = -0.382x - 0.833y - 0.00581z + 0.00669xy + 0.0000464xz + 0.396$, 调整后相关系数 $R^2 = 0.95$, F 检验结果极显著 ($p < 0.01$), 回归结果表明我国春季温度的分布主要受到纬度、经度、海

拔的影响, 这与人们常识相符。

3.2 隔日温度差数据分布

所有站点的隔日温度差频率分布直方图如图 2 所示, 其中偏态系数 $s_k = -2.6$, 表明数据为偏态分布, 并且为右偏。隔天温度波动中, 95% 分布区间为 $-4.6 \sim 6.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 表明 95% 分布区间以外的极端温度波动中, 降温居多。总体温度波动均值为 $0.0003\text{ }^{\circ}\text{C}$, 接近于 0。由于春季为增温季节, 结合偏态系数和 95% 分布区间以及均值可知, 增温天数多于降温天数, 增温较为“温和”, 多集中在 0 值右侧。峰态系数 $k = 21.8$, 为典型的尖峰分布, 温度波动的幅度多集中于均值附近。

3.3 各站点多年春季隔日温度平均波动天数

所有站点中春季隔日温度波动大于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 天数 (以下简称波动天数) 变化较大, 其中天数最多的为内蒙古的苏尼特左旗, 平均每年春季有 76 天隔日温度波动大于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而隔日温度波动天数最少的为海南西沙, 为 8.31 天, 全部站点温度波动天数大于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 平均天数为 61.58 天。对所有站点每年的温度波动天数进行统计并求平均值, 所有站点的温度波动总体趋势如图 3 所示, 1990 年代以前, 全国范围内波动变化幅度较大, 但是没有明显的增加或者减少的趋势, 而 1990 年代以后, 全国范围内温度波动平均天数上升趋势明显 ($p < 0.01$)。

对波动天数与经纬度、海拔高度及其三者间相互作用进行多元回归, 结果表明波动天数与经纬度

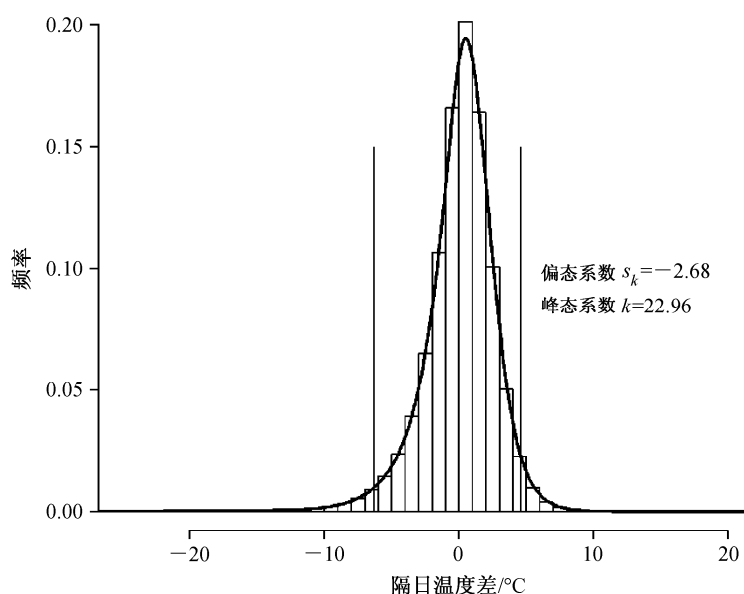


图 2 1957~2015 年中国各站点隔日温度差频率分布直方图

Fig. 2 Frequency distribution histogram of daily mean temperature difference for two consecutive days at all the 804 stations in China during 1957–2015

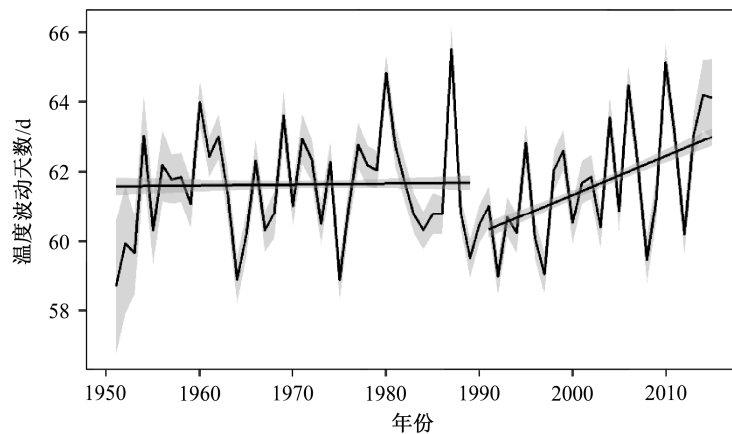


图3 1957~2015 年中国各站点年均波动天数变化序列 (阴影部分为 95%置信区间)

Fig. 3 Average number of fluctuation days at all the stations in China during 1957–2015 (shaded areas indicate the 95% confidence interval)

及经纬度之间的交互作用存在着明显的相关性 ($p < 0.01$), 与海拔之间的相关性不显著 ($p = 0.488$), 对波动天数 (D) 与经度 (x)、纬度 (y)、及其交互作用 (xy) 进行回归, 结果为 $D = 0.688x + 1.411y - 0.022xy - 27.2$, F 检验结果极显著 ($p < 0.01$), 调整后的相关系数 $R^2 = 0.533$, 回归模型表明除三亚、陵水、西沙 3 个站点为异常值外, 残差数据较好的满足正态性、方差齐性、随机性假设等检验。由回归方程可知, 波动天数与经纬度呈显著正相关 ($p < 0.05$), 并且纬度对波动天数的影响更为明显 (回归系数比较)。图 4a 为各站点的多年波动平均天数分布, 与回归方程预测结果相似, 波动天数呈现明显的从西南到东北方向逐渐增加。

3.4 各站点多年春季隔日温度平均波动幅度

通过计算所有站点的各年份波动标准差, 得到近 60 年来各站点的隔日温度波动平均波动幅度 (以下简称波动幅度), 各站点的波动幅度在 0.54~2.61, 其中最小的出现在海南西沙, 最大值出现在内蒙古的西乌珠穆沁, 全部站点波动幅度均值为 1.51。各站点波动天数按照年份求平均值, 变化趋势如图 5 所示。与波动天数相同的是, 1990 年代以后波动幅度趋势也是增加的, 但是变化不显著 ($p = 0.13$), 不同的是波动 1990 年代以前波动幅度略微下降, 但是下降趋势不是很明显 ($p > 0.05$), 并且不同年份之间波动幅度差异较大, 1990 年代以后虽然波动幅度略微增加, 但是增加趋势没有波动天数增加明显。

多元回归结果表明, 波动幅度不仅与经、纬度之间存在着较强的相关性 ($p < 0.01$), 与海拔之间

也存在着显著的相关性 ($p < 0.001$)。对波动幅度 (f) 与经度 (x)、纬度 (y)、海拔 (z) 及其交互作用 (xy 、 xyz) 进行多元回归, 回归方程为 $f = 0.0145x + 0.0277y - 0.0002z - 0.000504xy + 0.000000513xyz + 0.810$, F 检验结果极显著 ($p < 0.01$), 校正后的相关系数 $R^2 = 0.446$, 回归模型残差数据较好的服从正态性、方差齐性、随机性假设等检验。各站点的波动幅度大小如图 4b 所示, 和波动天数相似, 波动幅度与经、纬度均呈正相关, 从西北地区向东北地区波动幅度逐渐增加并且纬度对波动幅度的响应份量高于经度对波动幅度的响应份量。与波动天数不同的是在湖南、广西、广东三省交界处波动幅度明显高于周边站点, 由回归模型可知海拔每增加 100 m 波动幅度约增加 0.05, 海拔 (每增加 100 m) 对波动幅度的影响高于纬度与经度 (每增加 1°), 造成该地区波动幅度大于其它地区。

波动幅度与波动天数之间也有着明显的相关性 (图 6)。对波动幅度取对数后与波动天数进行回归, 结果如图 6b 所示, 线性拟合的相关系数为 0.732。事实上, 波动天数越多, 也就表明温度波动较大值较多, 从而造成波动幅度增加, 这与回归结果相符合。

3.5 短期温度波动天数及趋势变化的空间分布

对各站点每年的温度波动天数进行 Mann Kendall 趋势检验, 得到每个站点有记录的年份以来的温度波动强度指标 τ 值以及 p 值。所有站点中, 1951~2016 年, 我国波动天数上升的 ($\tau < 0$) 站点共有 384 个, 其中显著上升的 ($p < 0.05$) 站点共计 302 个, 波动天数下降的 ($\tau < 0$) 站点共有 422 个,

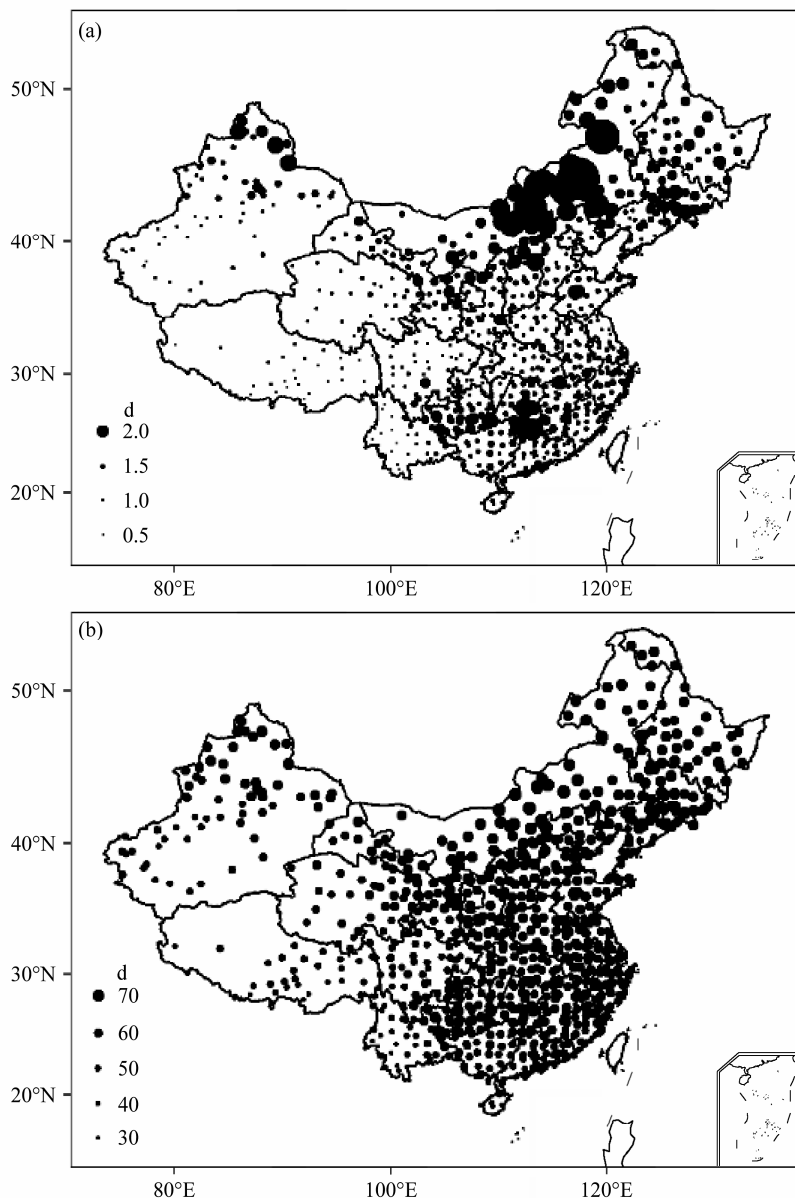


图4 1957~2015年中国各站点多年平均温度 (a) 波动天数和 (b) 波动幅度分布

Fig. 4 The annual averages of (a) fluctuation days and (b) fluctuation amplitudes at individual stations in China during 1957–2015

其中显著下降的 ($p < 0.05$) 站点共有 328 个。总体来看, 1957~2015 年波动下降的站点略多于波动上升的站点; 显著变化的站点中, 虽然波动下降的站点仍然多于波动上升的站点, 但是两者相差更少。通过对波动天数的 τ 值进行插值, 得到结果如图 7a 所示。东北地区与西部地区波动趋势均为下降, 除东北沿海地区以外的沿海地区以及内蒙古中部地区波动趋势显著上升, 广西四川部分地区波动趋势也是显著上升的。从插值图上来看, 波动下降的区域明显多于波动上升的区域, 与从 τ 值得出的下降站点略微高于上升的站点的结果有差异, 这是因为

全国范围内站点布设密度不同, 西北部地区站点较少, 而在中部地区以及东南沿海地区站点数较多所造成的。

1990 年以来温度波动趋势中, 上升的 ($\tau > 0$) 站点有 575 个, 其中显著上升的 ($p < 0.05$) 的站点共计 425 个, 波动天数下降的 ($\tau < 0$) 的站点共有 224 个, 其中显著下降的 ($p < 0.05$) 站点共有 113 个。波动天数变化趋势上升的站点是下降站点的 2 倍之多, 而显著变化的站点中, 上升的站点数量更多于下降的站点, 接近于波动下降站点的 4 倍。从插值结果来看, 全国大部分地区波动都是上升的, 大范

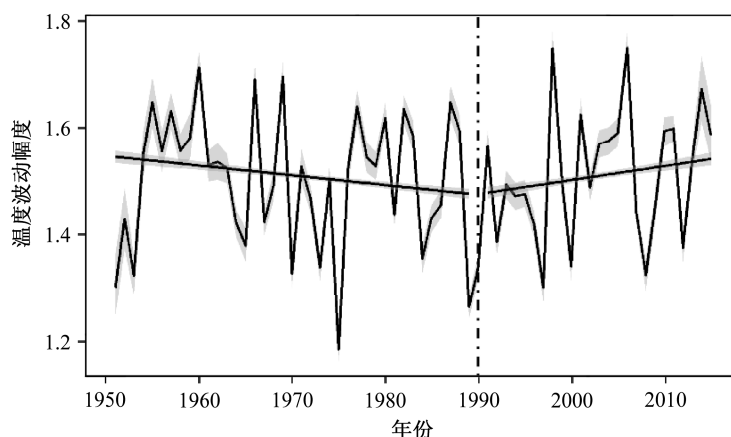


图5 1957~2015 年中国各站点平均温度波动幅度

Fig. 5 Annual mean fluctuation amplitude averaged over all the stations in China during 1957–2015

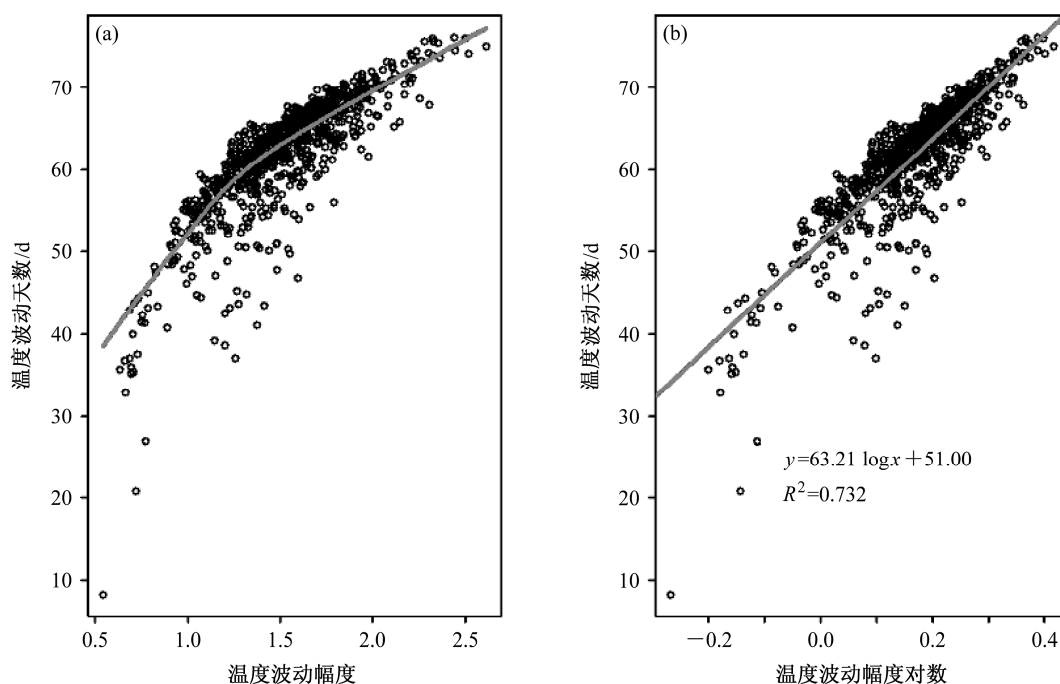


图6 1957~2015 年中国各站点波动天数与 (a) 温度波动幅度和 (b) 温度波动幅度对数关系

Fig. 6 Relationship between the numbers of fluctuation days and (a) fluctuation amplitudes, (b) the logarithm of fluctuation amplitudes in China during 1957–2015

围波动下降的区域有最东北部的黑龙江以及内蒙部分地区，以及西藏地区，河北、河南部分地区波动趋势也是下降。对比全部年份的波动趋势变化可知，1990~2015 年全国大部分地区的温度波动天数都是上升，而在 1990 年前，大部分地区（除沿海一带以及内蒙古中部地区）波动天数变化趋势均为下降。

3.6 隔日温度波动幅度及变化趋势的空间分布

所有站点中，1951~2016 年波动幅度上升 ($\tau > 0$) 的站点共有 383 个，其中显著上升的 ($p < 0.05$)

的站点共计 287 个；波动幅度下降的 ($\tau < 0$) 的站点共有 422 个，其中显著下降的 ($p < 0.05$) 站点共有 319 个。波动下降的站点略多于波动上升的站点，显著下降的站点数目同样也是多于波动上升的站点。从图 8a 来看整个东北地区、内蒙古中东部地区以及整个华北地区、西藏西南部地区波动趋势都是下降的，而云南、四川部分地区波动趋势是下降的，波动下降的站点大约占据了全国一大半地区。

1990 年来波动幅度趋势变化中，波动幅度上升

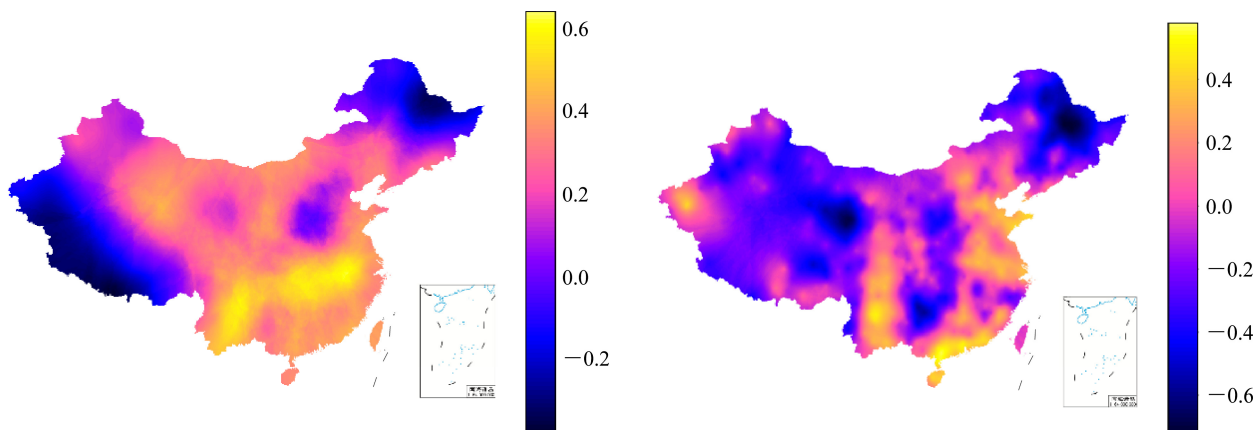


图7 (a) 1957~2015 年和 (b) 1990~2015 中国各站点温度波动天数变化趋势 (τ 值)

Fig. 7 Trends of fluctuation days (τ value) at individual station in China during (a) 1957-2015 and (b) 1990-2015

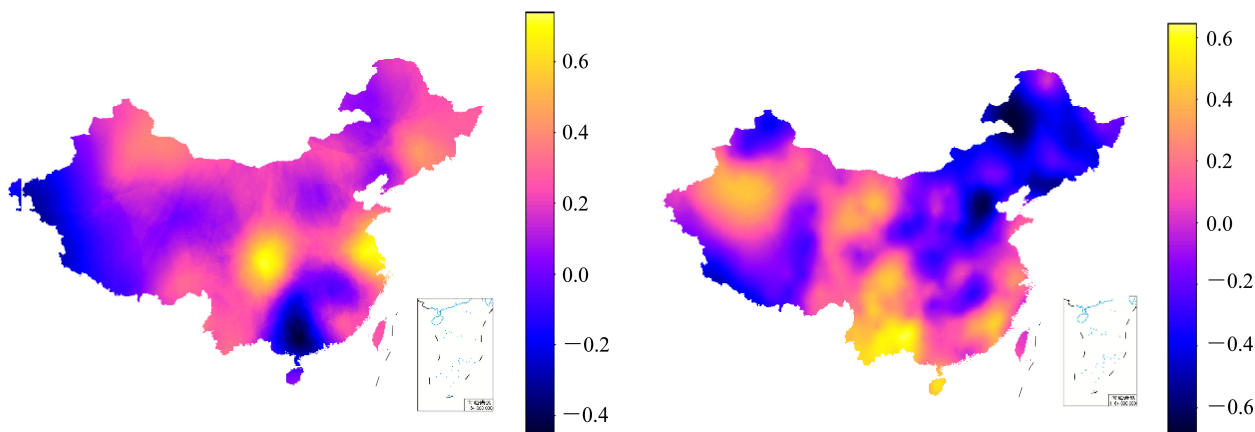


图8 (a) 1957~2015 年和 (b) 1990~2015 年中国各站点波动幅度变化趋势 (τ 值)

Fig. 8 Trends of fluctuation amplitude (τ value) at individual station in China during (a) 1957-2015 and (b) 1990-2015

的 ($\tau > 0$) 的站点共有 550 个, 其中显著上升的 ($p < 0.05$) 的站点共计 359 个; 波动幅度下降的 ($\tau < 0$) 的站点共有 254 个, 其中显著下降的 ($p < 0.05$) 站点共有 129 个。全国近 70% 的站点波动幅度在近 25 年来都是上升的, 但是近 40% 的站点波动趋势都是不显著的, 说明波动幅度上升程度较小, 这也正好说明全国波动幅度均值变化趋势上升较平缓(图 5)。从插值图的结果来看, 1990~2015 年全国大部分地区以红色为主, 表明大部分地区短期温度波动幅度趋势变化不是很明显, 全国范围内没有波动幅度上升或者下降集中的区域。

1951~2016 年各站点波动趋势变化中, 温度波动下降的站点个数相近, 并且都略多于波动上升的站点。从分布区域来看, 我国最北端地区与西藏地区无论波动天数还是波动幅度变化趋势都是下降的, 而西南沿海地区以及云南地区都是上升的, 其余地区波动天数与波动幅度变化趋势不一致。从

1990~2015 年的变化来看, 波动幅度与波动天数上升的站点明显多于波动下降的站点。全国大部分地区都是波动上升的, 但是变化程度不一样, 波动天数上升较为明显, 而波动幅度上升幅度较小, 很大一部分变化不显著。从分布区域来看, 波动幅度与波动天数都下降的区域只有西藏西南部地区。

4 结论与讨论

春季温度缓慢回升, 是万物生长的季节, 此时的生物必然会对温度波动较为敏感, 气候变化背景下的温度波动理应受到更多的关注。本文通过对我国建国以来的春季隔日温差的计算与分析, 理清了全国范围内的春季短期温度波动变化的时空分布规律, 其主要结论如下:

从时间序列上来说, 我国春季温度短期波动变化可以以 1990 年划分为两个阶段。1990 年以

前,无论是波动幅度还是波动天数波动都比较平稳,没有显著的变化。1990 年以后,波动天数上升趋势显著,而波动幅度也有上升趋势,但是变化不显著。

空间上,1957~2015 年无论是波动天数还是波动幅度变化都有明显的空间分布规律,并且波动上升与波动下降站点数相近。1990~2015 年,全国大部分站点波动天数与波动幅度均是上升的,波动天数变化较为显著,而波动幅度在大部分地区都只是微弱上升。从不同地区来看,东北地区和青藏高原大部分地区多年来波动幅度和波动天数都是降低的,尤其是最近 25 年以来,在全国大部分站点温度波动都处于上升的情况下,这两个地区温度波动尤为突出。东南沿海地区在近 60 年来温度波动大都是一直在增加。处在低纬度的东部沿海地区波动天数较低,由波动天数与波动幅度之间的关系可知在低于波动均值时,波动天数增加相同的天数时波动幅度增加更大,因此在全国大部分地区波动天数都处于明显增加的情况下,处于低纬度的我国东南地区波动幅度增加更大,更容易让人感受到温度的波动变化以及对天气“无序播放”。

对于温度的波动的这种变化,其形成原因机理尚不清楚,也鲜有前人研究,而这种变化是否会像全球变暖一样在未来会持续进行,这些都应该受到更多的关注和研究。温度的波动变化首当其冲的就是自然界中的生物。例如,我国的幅员广阔人口众多,保障粮食产量安全历来受到重视,而温度的波动幅度与波动天数增加对农作物的生长以及产量的影响如何;另外,受人类活动干扰等原因,我国很多地区的生态系统抵抗力稳定性与恢复力稳定性都变得非常脆弱,在此基础上,温度波动变化无疑会使得脆弱的生态系统雪上加霜,如何有效的评估生态系统对温度波动变化的影响确保不发生诸如富营养化的大规模生态危机事件,这些都是未来研究的重中之重。

参考文献 (References)

- Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. *J. Geophys. Res.*, 111 (D5): D05109, doi:10.1029/2005JD006290.
- Bahar M H, Soroka J J, Dosdall L M. 2012. Constant versus fluctuating temperatures in the interactions between *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) and its larval parasitoid *Diadegma insulare* (Hymenoptera: Ichneumonidae)[J]. *Environmental Entomology*, 41 (6): 1653–1661, doi:10.1603/EN12156.
- Bivand R S, Pebesma E J, Gómez-Rubio V. 2008. *Applied Spatial Data Analysis with R* [M]. New York: Springer.
- 陈少勇, 王劲松, 郭俊庭, 等. 2012. 中国西北地区 1961—2009 年极端高温事件的演变特征 [J]. *自然资源学报*, 27 (5): 832–844. Chen Shaoyong, Wang Jinsong, Guo Juntong, et al. 2012. Evolution Characteristics of the extreme high temperature event in Northwest China from 1961 to 2009 [J]. *Journal of Natural Resources (in Chinese)*, 27 (5): 832–884, doi:10.11849/zrzyxb.2012.05.012.
- Daufresne M, Lengfellner K, Sommer U. 2009. Global warming benefits the small in aquatic ecosystems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106 (31): 12788–12793, doi:10.1073/pnas.0902080106.
- 邓建明. 2014. 浮游植物群落结构对全球变暖与富营养化双重影响的响应 [D]. 北京: 中国科学院大学博士学位论文, 32–34. Deng Jianming. 2014. Response of phytoplankton community to dual effects of climate warming and eutrophication [D] Ph.D. Dissertation (in Chinese), University of Chinese Academy of Sciences, 32–34.
- 邓自旺, 丁裕国, 陈业国. 2000. 全球气候变暖对长江三角洲极端高温事件概率的影响 [J]. *南京气象学院学报*, 23 (1): 42–47. Deng Ziwang, Ding Yuguo, Chen Yeguo. 2000. Effects of global warming on the probability of extreme high temperature event in the Yangtze Delta [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 23 (1): 42–47, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2000.01.007.
- Easterling D R, Horton B, Jones P D, et al. 2005. Maximum and Minimum Temperature Trends for the Globe [J]. *Science*, 277 (5324): 364–367.
- 方精云, 朱江玲, 石岳. 2018. 生态系统对全球变暖的响应 [J]. *科学通报*, 63 (2): 136–140. Fang Jingyun, Zhu Jiangling, Shi Yue. 2018. The responses of ecosystems to global warming. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 63 (2): 136–140, doi:10.1360/N972017-00916.
- Frich P L, Alexander P, Dellamarta B, et al. 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century [J]. *Climate Research*, 19 (3): 193–212, doi:10.3354/cr019193.
- 刘元波, 张奇, 刘健, 等. 2012. 鄱阳湖流域气候水文过程及水环境效应 [M]. 北京: 科学出版社, 25–26. Liu Yuanbo, Zhang Qi, Liu Jiang, et al. 2012. Climatic, Hydrologic and Environmental Change in Poyang Lake Basin (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 25–26.
- Niederegger S, Pastuschek J, Mall G. 2010. Preliminary studies of the influence of fluctuating temperatures on the development of various forensically relevant flies [J]. *Forensic Science International*, 199 (1–3): 72–78, doi:10.1016/j.forsciint.2010.03.015.
- 牛文杰, 朱大培, 陈其明. 2001. 泛克里金插值法的研究 [J]. *计算机工程与应用*, 37 (3): 73–75, 99. Niu Wenjie, Zhu Dapei, Chen Qiming. 2001. Research of universal Kriging [J]. *Computer Engineering and Applications (in Chinese)*, 37 (3): 73–75, 99, doi:10.3321/j.issn:1002-8331.2001.13.025.
- Pebesma E J. 2004. Multivariable geostatistics in S: The gstat package [J]. *Computers & Geosciences*, 30 (7): 683–691, doi:10.1016/j.cageo.2004.03.012.
- Price M V, Waser N M. 2001. Global warming and terrestrial ecosystems [J]. *Bioscience*, 51 (5): 332, doi:10.1641/0006-3568(2001)051[0332:GWATE]2.0.CO;2.

- Pushkar V Y, Zdanovich V V, Kelekhsaev M Z. 2010. Influence of short-term periodic fluctuations of temperature on the productional indicators of aquatic organisms by the example of *Oreochromis niloticus* (L.) and *Pistia stratiotes* (L.) [J]. *Journal Water Biology*, 3: 282–290.
- 任国玉, 封国林, 严中伟. 2010. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望 [J]. *气候与环境研究* 15 (4): 337–353. Ren Guoyu, Feng Guolin, Yan Zhongwei. 2010. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 15 (4): 337–353.
- Shaver G R, Canadell J, Chapin III F S, et al. 2000. Global warming and terrestrial ecosystems: A conceptual framework for analysis [J]. *Bioscience*, 50 (10): 871–882, doi:10.1641/0006-3568(2000)050[0871:GWATEA]2.0.CO;2.
- Shine R, Elphick M J. 2001. The effect of short - term weather fluctuations on temperatures inside lizard nests, and on the phenotypic traits of hatchling lizard [J]. *Biological Journal of the Linnean Society*, 72 (4): 555–565, doi:10.1006/bjrl.2000.0516.
- Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. 2014. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [R]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- 孙特生, 李波, 张新时. 2012. 北方农牧交错区农业生态系统生产力对气候波动的响应——以准格尔旗为例 [J]. *生态学报*, 32 (19): 6155–6167. Sun Tesheng, Li Bo, Zhang Xinshi. 2012. The response of agroecosystem productivity to climatic fluctuations in the farming-pastoral ecotone of northern China: A case study in Zhunger County [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 32 (19): 6155–6167, doi:10.5846/stxb201106030748.
- Tam W W S, Wong T W, Chair S Y, et al. 2009. Diurnal temperature range and daily cardiovascular mortalities among the elderly in Hong Kong [J]. *Archives of Environmental & Occupational Health*, 64 (3): 202–206, doi:10.1080/19338240903241192.
- 严中伟, 章名立. 1992. 近年我国温度及其日较差的变化问题 [J]. *科学通报*, 37 (14): 1295–1298. Yan Zhongwei, Zhang Mingli. 1992. On the trends of temperature and daily range in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 38 (1): 54–58, doi:10.1360/sb1993-38-1-54.
- Zhang F, Gao H, Cui X. 2008. Frequency of extreme high temperature days in China, 1961–2003 [J]. *Weather*, 63 (2): 46–49, doi:10.1002/wea.136.
- Zhang M, Yu Y, Yang Z, et al. 2012. Photochemical responses of phytoplankton to rapid increasing-temperature process [J]. *Phycological Research*, 60 (3): 199–207, doi:10.1111/j.1440-1835.2012.00654.x.
- 赵静, 肖达, 张帆, 等. 2015. 恒温 and 温室波动温度下异色瓢虫种群生命表 [J]. *中国农业科学*, 48 (16): 3176–3185. Zhao Jing, Xiao Da, Zhang Fang, et al. 2015. Life Tables of *Harmonia axyridis* Pallas under laboratory constant and greenhouse fluctuating temperatures [J]. *Scientia Agricultura Sinica* (in Chinese), 48 (16): 3176–3185, doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2015.16.008.
- 周杰, 邵海燕, 吴永萍, 等. 2013. 华北地区气温日较差的时空特征和气候变化 [J]. *扬州大学学报 (自然科学版)*, (3): 35–40. Zhou Jie, Shao Haiyan, Wu Yongping, et al. 2013. Spatial and temporal characteristics of diurnal temperature range in North China [J] *Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition)*, (3): 35–40.