

# 多时间尺度气候变化

钱维宏

(北京大学大气与海洋科学系, 北京 100871)

**摘要:** 区域气候变化受到了滞后于规则和非规则强迫的日循环、年循环、年际、十年际、年代际和世纪等多时间尺度气候自然变化分量的影响。在20世纪, 全球平均气温变化大部分属于自然的气候变化, 还有一小部分属于人类活动对区域和城市气候变化的影响。21世纪之交的一个暖平台形成于多个时间尺度自然气候变化中暖位相的叠加。对年代际全球平均气温起调节作用的分量可能来自季风范围的变化。

**关键词:** 气候变化, 时间尺度, 人类活动, 自然气候变率, 季风范围

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.02.004

## Climate Change of Multiple Timescales

Qian Weihong

(Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Peking University, Beijing 100871)

**Abstract:** A regional climate change consists of many components of the regular (periodic) and irregular forcing from diurnal cycle, annual cycle, inter-annual, decadal, inter-decadal and centennial timescales while every component is phase-lagged in its force. In the twentieth century, most of the global temperature increase belongs to the natural climate variability, and there is a small part of human activity impacts on regional and urban climate changes. Early in this century, a warm flat was the overlap of several temperature components. On the inter-decadal timescale, regulating global-mean temperature variation is associated with the expansion of monsoon domain.

**keywords:** climate change, time scale, human activity, natural climate variability, monsoon domain

### 1 引言

现代气候描述的是一段时期内气象要素和天气现象的平均或统计状态, 一段时期为月、季、年、数年到数百年以上的尺度。气候以气温(冷、暖)和降水(干、湿)两个基本的要素表示, 通常用某一时段的平均值和离差值表征。气候是某一时段内热平衡下的大气多要素状态分布。

依照现代气候描述, 气候的最短时间尺度为月。不同月、不同季、不同年、不同的十年、不同的百年, 这些时间段上的气候是不同的, 所以就出现了气候变化。在这些时段上, 当气候变化的幅度较大并且出现了灾害时, 这样的气候称为异常气候事件。

现代气候的描述与欧洲古代气候的描述完全不同。气候(climate)一词源自希腊语中的klima, 意思是倾斜, 指的是地平线上太阳光线倾斜的角度。古希腊人早已知道气候的冷暖与太阳的入射倾角有关, 极地入射倾角小则冷, 赤道上入射倾角大则暖。

现代人有了比古代人更精确的气象观测数据。本文试图用古希腊人的思想, 还气候及其变化一个合理的描述与认识, 因为只有把气候及其变化客观地认识了, 对极端天气事件和异常气候事件的预报才有可能。

### 2 规则外源强迫引起的气候变化

依照古希腊人的气候(冷暖)与太阳入射倾角有关的描述, 我们可以得到下列循环的气候变化。每天, 从日出、正午到日落, 太阳高度角随时间有周日变化, 地球上各地气温有日循环变化。正常(无天气系统影响)的日最高气温在正午太阳辐射最大值之后, 在下午14~15时, 而日最低气温出现在日出前。一地24h内的气温日较差可以达到10℃以上, 平均每小时的温度变化在1℃左右, 有些地区和时段甚至大于1℃/h。一地区气温随时间的24h变化也导致了相邻地区的温差, 最高温度随地理位置的移动就像潮汐。这是由于地球自转周日太阳辐射循环引起的气候周日气温循环变化和区域温差变化(温度潮), 其因果关系和变化的幅度都是清楚的。日最高气温滞后太阳辐射最大值的气候响应数学描述是<sup>[1]</sup>:

$$\frac{\partial \bar{S}}{\partial t} = F(t) - (L + D)\bar{S} \quad (1)$$

收稿日期: 2012年1月13日; 修回日期: 2012年3月12日

第一作者: (1957-), Email: qianwh@pku.edu.cn

资助信息: 中国科学院战略性先导科技专项  
(XDA05090400)

其中,  $\bar{S}$  是大气系统中所有大气变量构成的气候部分;  $F(t)$  是外界对大气系统的强迫 (如太阳辐射), 也是时间的函数;  $L$  为线性作用关系;  $D$  为耗散作用。气候随时间的变化  $\bar{S}$  与强迫  $F(t)$  之间在时间上不是同时的对应关系<sup>[1]</sup>, 而有一个时间上的滞后  $-(L+D)\bar{S}$ 。在大气中,  $L$  和  $D$  与大气流体的热力学性质有关, 如扩散过程等。地球上, 一地气候的日气温逐小时变化, 是地球自转太阳辐射量变化的结果。描述大气热力、动力性质的观测变量有多个, 它们的变化既有天气部分的扰动, 也有气候部分的规则变化和观测误差。在一个地方, 这些变量的日循环随时间的变化需要有所认识, 因为这样的认识事关当地逐时相对日循环气候的偏差 (或局地极端) 天气的预报。

地球绕太阳存在周年的公转循环。太阳直射北回归线的时间是在每年的6月22日, 这时北半球接受到的太阳辐射量是全年最多的。可是, 北半球大气温度、湿度、降水和风等量都是在7月底至8月初达到最大值<sup>[2]</sup>。南半球的大气变量最大值也是在太阳直射南回归线之后一个月。在年循环上, 不同纬度的大气变量变化与太阳辐射驱动的滞后关系也遵循式 (1) 描述的动力学特性。地球上, 温度年循环依纬度和地形而变, 可以有  $10\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  的变化幅度。如果按照年循环温度变化  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  分配到每个小时上, 则变化速率是  $6.8\times 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 。显然, 太阳辐射强迫的温度年循环变化速率远小于日循环的温度变化速率。相邻地区年循环的温差驱动了大气环流和气候的年进程。

海气相互作用具有非规则的年际变化, 表现为赤道太平洋海温和气温在年际尺度上有  $3\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  的变化幅度, 其变化速率是  $1.4\times 10^{-4}\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 。相邻地区的年际异常温差形成了大气环流和气候的异常。

为什么要分析这些周期性强迫下的大气变量变化速率? 这是因为大气是一个耗散的非线性系统, 规则强迫下的大气有线性的气候响应, 也会出现非线性的天气尺度扰动。越大的温度变化速率, 它们的非线性效应会越大。从这个角度看, 日循环的强迫对极端天气的作用最大。这就是夏季对流性天气具有强烈的日变化的原因。

太阳活动有一个准11a的周期。太阳活动的这一周期性变化也会影响地球气温的变化。这个周期强迫改变的全球平均温度幅度约为  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[3]</sup>, 变化的速率为  $1.0\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 。全球平均气温的准11a循环变化的位相滞后太阳辐射准11a周期的位相  $1\sim 2\text{a}$ 。此外, 太阳活动和全球平均气温也都有准22a的位相循环周期变化, 气温变化的每小时速率大约是准11a变化的

一半。在全球气温变化的准11a、22a和海气耦合形成的准60a周期中, 准60a周期的气温变化幅度最大, 为  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[4]</sup>, 变化的速率为  $3.8\times 10^{-7}\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 。

地球上, 一地的气温变化, 受到地球自转日循环太阳辐射量变化、地球公转年循环太阳辐射量变化、年际海气非规则变化、太阳活动准11a和准22a周期变化的影响。全球平均气温变化还有准100a和准200a的周期变化<sup>[3]</sup>, 它们的变化幅度分别为  $0.09\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。太阳辐射可能还存在年代际尺度和百年尺度的变化, 但缺少太阳辐射观测序列, 尚不能描述与气温变化的关系。地球相对太阳运行的轨道三参数具有几万年到几十万年的变化, 决定着地球气候的冰期和间冰期的旋回, 称为Milankovich或冰期轨道理论。这些规则的气温变化是规则性外强迫的结果, 多与太阳辐射变化有关。每一个气温分量的变化都是滞后太阳辐射的, 也就是太阳辐射每个分量的变化是气温每个分量变化的前期信号。每个分量的气温是规则变化的, 但不同规则分量叠加后常常出现非规则的变化, 甚至很大的非规则突变。21世纪初的全球平均气温暖平台就是多个周期峰值位相叠加的结果<sup>[3, 4]</sup>。

表1中给出了能够定量表征的几种最大气温变幅及其变率。大气是一部热机, 根据热力学第二定律, 相邻地区的温差决定了大气热机的效率。单位时间内的温度变率越大, 可能对应着相邻地区的温差也越大, 热机效应形成的环流异常和天气气候异常也会越明显。所以, 气温变化的速率是形成大气变量异常波动和异常天气现象 (如强降水等极端事件) 出现的根本原因。由表1, 我们很容易解释日循环的温度变率最大, 能够解释较多的强对流极端事件。其次是年循环的温度变化速率, 暴雨等极端天气和异常气候事件就有年循环的周期。第三位的是年际温度异常, 赤道太平洋海温异常下的大气环流异常和天气、气候异常是人们关注的课题。再其次是11a的温度变化速率, 中国近50a的区域暴雨事件数就有准11a的周期<sup>[5]</sup>。22a、60a和百年尺度的温度变化的速率都比较小了, 也缺少可分析的极端天气和异常气候事件的具体资料。在表1的8个时间尺度中, 温度日循环变率是年循环变率的100倍, 年循环温度变率是年际温度变率的10倍以上, 而其他尺度温度循环变率比年循环变率小1000~1万倍。因此, 日循环的逐时气候和年循环的逐日气候是需要倍加认识的。

### 3 百年气温趋势分解

气候变化受制于外源强迫, 并且在变化位相上滞后于外源。利用近千年和近百年全球平均气温序列,

表1 气温的多时间尺度循环及其变率

时间尺度	日	年	年际	11a	22a	60a	100a	200a
变幅 (°C)	10.0	60	5	0.1	0.1	0.2	0.09	0.13
速率 (°C/h)	$1.0 \times 10^0$	$6.8 \times 10^{-3}$	$1.4 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-7}$	$3.8 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-7}$	$5.0 \times 10^{-8}$

20世纪全球平均气温的增幅是1°C<sup>[3, 4]</sup>。在1°C中，有0.56°C属于自然的规则外强迫结果。需要确认的是：20世纪百年气温增加的另外0.44°C的原因（外强迫）有哪些。引起这一气温趋势的可能原因包括：来自自然的太阳辐射强迫和全球季风降水变化，以及人类活动的影响。我们可以对它们逐一分析。

18世纪，人们普遍认为将温度计放在一个没有炉火的朝北房间里测量室温就足够了，后来放在太阳直射不到的墙体北侧。到19世纪，温度计才进驻到了百叶箱里。用塑料百叶箱代替木质百叶箱和用电子温度计代替酒精温度计后，气温可降低0.4°C。志愿船舶测量海水温度，木质吊桶与帆布吊桶取水和在船的不同部位取水，测量到的海温也可相差0.4~0.5°C。随着城市的发展，原来在郊区的那些气象观测仪器现在已经在城市中心区了。气温升高也受到城市发展的影响，但自然温度的量值难以确定。

同样在一个城市，在水体附近（或公园里）的近几年气温趋势大约是其他观测气温趋势的一半<sup>[5]</sup>。全球（或北半球）的平均气温趋势应该是所有地球表面上气温趋势的面积平均值。一个比较客观的做法是在地球表面用经纬网格点的气温计算得到全球平均气温。然而，那些观测站几乎都不在网格点上。于是，网格点上的气温值是由那些城镇观测站外推（插值）得到的。20世纪早期，大部分陆地上缺少观测站。近年来在高山、荒漠、极地和海岛上增加了一些观测站，但大部分原始气象资料主要还是来自城镇观测。

要得到一条去除城镇发展影响、能够代表百年全球面积平均气温自然变化的序列，仍然是有待探索的课题。

选择美国9个特大城市（纽约、洛杉矶、芝加哥、圣安东尼奥、圣地亚哥、费城、达拉斯、休斯顿、菲尼克斯），以城市中心径向的延长线画圈，得到距离城市中心不同宽度带上的110a（1900—2009年）气温趋势<sup>[5]</sup>。在距离9大城市中心平均50km范围内，百年增温趋势为1.0~1.8°C（图1a）。在距离9大城市中心平均100~500km之间，百年增温趋势是0.6~0.8°C。后者代表了美国中小城镇的平均百年气温趋势，而真正的百年自然温度变化并不知道。

同样，选择中国9个特大城市（上海、北京、重庆、武汉、天津、广州、沈阳、成都、西安），以城市中心径向延长线画圈，得到距离城市中心不同宽度带上的49a（1960—2008年）气温趋势<sup>[5]</sup>。在距离9大城市中心平均50km范围内，每10a增温趋势为0.30~0.35°C（图1b）。在距离9大城市中心平均100~500km之间，每10a平均增温趋势是0.23°C。近50年的特大城市增温速率是1.5~1.8°C，而后者的增暖趋势是1.15°C。显然，大城市的增暖趋势总是大于中小城市的增暖趋势，然而真正的近50a中国自然温度变化并不知道。

百年全球经纬网格点上的自然温度观测数据是没有的。百年全球观测站点上的自然温度资料也是较少的。所以，要得到一条代表全球平均的百年

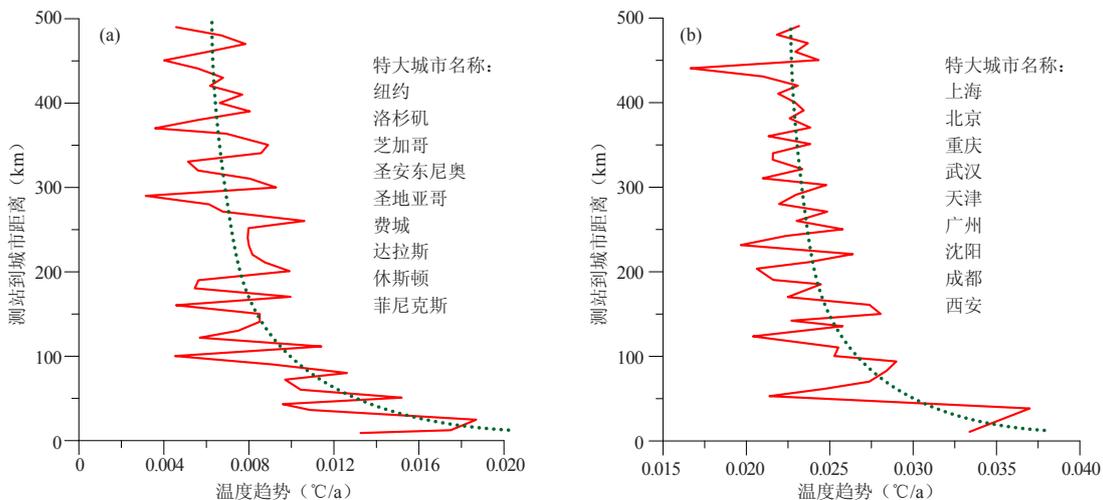


图1 美国 (a) 和中国 (b) 站点温度趋势 (°C/a) 相对9个特大城市中心距离的关系  
美国9个特大城市人口>100万；中国9个特大城市人口>400万

自然气温序列的难度还很大。北京地区20个站在1978—2008年间的观测气温，其中有一半的站位于市区，另外的站在山区和郊区。市区的年平均气温在12~13℃之间，山区和远郊的年平均气温在6~11℃之间<sup>[5]</sup>。1978—1998年，北京地区的平均气温趋势为每10a增暖1℃左右，城区每10a增暖达到1.2~1.3℃。1998—2008年期间，北京地区的平均气温趋势是-0.05℃/10a，与1998—2008年全球平均气温的趋势相当<sup>[4]</sup>。在空间分布上，1998—2008年期间，北京城区仍然有0.1~0.24℃/10a的增暖趋势，其中朝阳站、顺义站、大兴站和北京站的近10年增温趋势分别为0.24，0.23，0.12和0.11℃，而远郊山区有4个站（斋堂、霞云岭、汤河口和上甸子）的降温趋势达到-0.30~-0.40℃/10a<sup>[6]</sup>。其他研究者对中国的城市气温变化有基本相同的估计。Jones等<sup>[7]</sup>得到1951—2004年中国城市化引起的区域增暖大约为0.1℃/10a，而这期间中国区域的增暖为0.81℃。Ren等<sup>[8]</sup>发现，由城市化引起的城市热岛对区域增暖趋势的影响，大城市和小城市分别为0.16℃/10a和0.07℃/10a。Yan等<sup>[9]</sup>得到北京地区1977—2006年的增暖趋势为0.78℃/10a，而与城市热岛相关的偏差为0.20~0.54℃/10a。这些趋势的年份都较短，也只反映了区域性的城市化影响。

20世纪全球平均气温百年增暖的0.44℃趋势中，有多少来自城市发展的影响，是需要进一步研究的课题。另外，近千年的全球平均气温序列中，从中世纪暖期到小冰期，平均气温下降了0.24℃，反映的是300~400a的外强迫气温变化。这种时间尺度的外强迫和全球气温变化还会继续存在，即会出现0.2~0.3℃的自然增温。如此估计，20世纪全球增暖0.44℃中仍然存在几百年长时间尺度自然气温变化的上升支贡献，也有20世纪百年人类活动（包括城镇化）对增暖的贡献。

#### 4 东亚季风与全球气温的变化关系

20世纪百年增暖1℃中有0.56℃属于多源强迫的自然变化，它们由准10a、准20a、准60a和百年尺度的变化组成<sup>[3,4]</sup>。其中准10a、准20a和百年尺度的气温变化与太阳辐射变化有关，只有准60a的气温变化是海气相互作用的结果。

对全球平均气温有影响的一个重要方面是全球雨日的多少。已有的分析认识到在年代际尺度上，中国的雨日数与高温日数呈反比关系<sup>[10]</sup>。近几十年来，我国东部地区南方雨日数和年雨量趋于增多，而北方雨日数和雨量是减少的，这种南北方相反的变化趋势归因为东亚夏季风的减弱<sup>[11]</sup>。全球平均气温与全球季风强度（范围）的年代际自然变化可能是气候变化中的两个主要方面。根据全球季风是“热带大气（三大）水汽中心随赤道气流赤道外季节扩展”的定义<sup>[12]</sup>，全球季风向副热带地区的范围扩展，对应降水范围也扩大，全球平均气温会偏低。但是，目前要证实这一定义下的关系还缺少全球百年尺度季风范围变化和全球降水的观测资料。

在东亚地区，夏季风推进与当地和全球平均气温变化之间存在一些位相上的对应关系。图2给出近千年来中国东部夏季干湿型指数与去长期冷暖气候态平均和趋势后的全球平均温度距平序列<sup>[13]</sup>。中国东部干湿型指数<sup>[14]</sup>是根据当地政府历史文献记录整编的公元950—1980年中国东部夏季（5—9月）逐年干湿模态和1951年以来的观测降水换算的干湿模态。站点上的干湿程度分为5级：干旱，干，正常，湿和洪涝，分布于中国东部的华北、长江和华南地区。器测资料反映出，十年尺度上中国东部干湿型指数高（低）值期，对应北方降水偏多（少），南方降水偏少（多），对应的季风环流表现为来自热带印度洋、热带太平洋和南半球的夏季低层大气气流偏强（弱），到达东亚的水汽输送量多（少）。这1000a干湿分布型序列中主要有年际、十年际和年代际变化的信号，

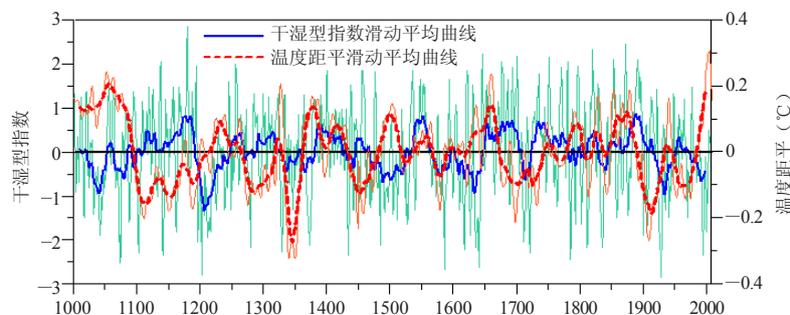


图2 公元1000—2008年东亚夏季风干湿型指数7点（细线）和21点（粗蓝实线）滑动平均序列与去长期冷暖气候态平均和趋势后的全球平均温度距平（红细线）及其21点滑动平均序列（虚粗线，单位：℃）

而难以包含几百年时间尺度的变化信号。这是因为，人的记载可以分辨出年与年和年代与年代之间的气候差异，但难以分辨出几代人之间的气候差异。

为了在时间尺度上与中国东部干湿型指数的变化一致起来，近千年的全球平均温度序列取用了去除中世纪暖期（MWP）、小冰期（LIA）和近代全球增暖期（GWP）期间气候态温度变化后的序列<sup>[3]</sup>。图2中，两条序列之间存在着十年际、年代际和百年尺度的变化，它们之间的变化位相是相反的，同期相关系数值为 $-0.11$ （ $P < 0.01$ ）。它们之间的相反变化关系需要分下列几步进行理解。首先，在强（弱）的全球季风期间，来自热带印度洋、热带太平洋和南半球的夏季低层大气气流偏强（弱），输送到达中国华北的水汽量多（少），对应中国东部干湿型指数高（低），中国北方降水多（少）和南方降水少（多）。其次，中国北方降水多（少）和南方降水少（多），即中国东部干湿型高（低）指数期间，中国气温偏低（高），而中国年代际温度变化与全球平均温度变化是基本同步的<sup>[15]</sup>。中国或东亚位于副热带季风区中，这里季风范围变率是全球最明显的。

## 5 结束语

气候是热平衡下的大气多要素状态分布。表征气候的两个基本量是气温（冷暖）和降水（干湿）。一地的气候及其要素具有日循环、年循环、十年际、年代际、世纪和地球地质时期尺度的连续变化。这些规则的气候及其变化是太阳辐射多时间尺度变化以及地球轨道参数变化的结果。时间尺度越短，单位时间的气候变化速率越大。气候还存在非规则变化，与非规则的外强迫，如年际海气相互作用、人类活动等有关。世纪之交，被认识的几个时间尺度自然气温变化都达到了暖位相，它们的叠加形成了一个暖平台。人类活动对城市化和城镇化的影响也达到了历史最高。自然和人类活动累加的气温必然成为历史新高。

20世纪，全球气温增暖了 $1^{\circ}\text{C}$ ，其中有 $0.56^{\circ}\text{C}$ 属于十年际、年代际和世纪尺度自然气候变化的叠加。另外的 $0.44^{\circ}\text{C}$ 是人们需要进一步认识的部分。人们很难得到覆盖全球的20世纪百年自然气温，得到的气温中已经包含了城镇化发展的影响。从中世纪暖期到小冰

期的降温幅度为 $0.2\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ 。由此预估，几百年的自然气温变化也会出现在近百年的气候变化中。这样，20世纪的百年增暖 $0.44^{\circ}\text{C}$ 中，有部分（ $0.2\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ ）属于人类活动（包括城镇化）的影响。

在十年际、年代际和百年尺度上，中国东部干湿型指数序列与全球平均温度序列之间存在着明显的反相关关系。中国东部干湿型指数与东亚副热带季风推进，与全球季风范围扩展，与全球平均温度变化，它们之间的关系和它们之间的影响机理都需要加以研究。全球季风区主体位于热带和副热带地区，而全球温度变化最敏感的地区是在中高纬度地区。全球季风范围与全球平均温度，它们应该成为描述全球气候变化的两个主要方面。当前的气候变化研究中需要加强全球季风方面的研究。

## 参考文献

- [1] 钱维宏. 如何提高天气预报和气候预测的技巧? 地球物理学报, 2012,55(5): 1532-1540.
- [2] Qian W H, Tang S Q. Identifying global monsoon troughs and global atmospheric centers of action on a pentad scale. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2010, 3(1): 1-6.
- [3] 钱维宏, 陆波. 千年全球气温中的周期性变化及其成因. 科学通报, 2010, 55(32): 3116-3127.
- [4] 钱维宏, 陆波, 祝从文. 全球平均温度在21世纪将怎样变化? 科学通报, 2010, 55(16): 1532-1537.
- [5] 钱维宏. 气候变化与中国极端气候事件图集. 北京: 气象出版社, 2011.
- [6] 钱维宏, 李进. 北京地区长期增暖中的一个减缓期. 气候变化研究进展, 2012,8(3): 178-182.
- [7] Jones P D, Lister D H, Li Q X. Urbanization effects in large-scale temperature records, with an emphasis on China. J Geophys Res, 2008, 113, D16122, doi: 10.1029/2008JD009916.
- [8] Ren G Y, Zhou Y Q, Chu Z Y, et al. Urbanization effects on observed surface air temperature trends in North China. J Climate, 2008, 21: 1333-1348.
- [9] Yan Z W, Li Z, Li Q X, et al. Effects of site change and urbanization in the Beijing temperature series 1977-2006. Int J Climatol, 2010, 30: 1226-1234.
- [10] Ding T, Qian W H, Yan Z W. Changes in hot days and heat waves in China during 1961-2007. Int J Climatol, 2009, doi: 10.1002/joc. 1989.
- [11] Fu J L, Qian W H, et al. Trends in graded precipitation in China from 1961 to 2000. Adv Atm Sci, 2008, 25(2): 267-278.
- [12] Qian W H. Dry/wet alternation and global monsoon. Geophysical Research Letters, 2000, 27(22): 3679-3682.
- [13] 钱维宏, 林祥, 朱亚芬. 东亚夏季风年代际进退与中国和全球温度变化的联系. 科学通报, 2012, 57(26): 2516-2522.
- [14] 钱维宏, 朱亚芬, 汤帅奇. 重建千年东亚夏季风干湿分布型指数. 科学通报, 2011, 56(25): 2075-2086.
- [15] 李学勇, 秦大河, 李家洋, 等. 气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2007.