

战云健, 任国玉, 等. 2013. 1951~2009年东亚地区日降水趋势特征分析 [J]. 气候与环境研究, 18 (6): 767~780, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12152. Zhan Yunjian, Ren Guoyu, Ren Yuyu, et al. 2013. Changes in daily precipitation over East Asia during 1951~2009 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (6): 767~780.

## 1951~2009年东亚地区日降水趋势特征分析

战云健<sup>1,2</sup> 任国玉<sup>2</sup> 任玉玉<sup>2</sup> 李娇<sup>3</sup>

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 国家气候中心中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

3 铁岭市气象局, 铁岭 112000

**摘要** 研究大陆或次大陆尺度日降水长期趋势变化规律, 对于检测、理解区域气候和陆地水循环对全球气候变暖的响应特征十分重要。利用美国国家气候资料中心(NCDC)和中国基准气候站、基本气象站网降水观测资料, 在对该站点资料进行基本质量控制基础上, 选取东亚地区619个站1951~2009年日降水数据, 按照百分位阈值对降水进行分级, 共分为弱、中、强、极强4个级别, 用经纬度网格面积加权平均方法构建区域平均的时间序列, 分析了各类降水事件长期变化趋势的时空特征。结果表明: 东亚地区近59年平均总降水量表现出不显著下降趋势, 降水日数没有出现趋势性变化, 平均日降水强度略有减小; 区域平均的年降水量、降水日数和日降水强度在中国北方大部、蒙古东部、俄罗斯远东地区南部和日本列岛多呈减少趋势, 而在俄罗斯中西伯利亚南部、朝鲜半岛南部和中国长江中下游流域一般表现为增加。从季节上看, 近59年东亚区域平均的冬、春季降水量、降水日数和日降水强度均呈增加趋势, 而夏、秋季一般呈减少趋势, 仅夏季日降水强度略有增加。降水的年内分配出现均匀化趋势。从不同级别降水事件看, 近59年来东亚区域平均的各级别降水量均为下降趋势, 中降水、强降水和极强降水日数也呈现下降趋势, 弱降水日数表现出较明显增加; 仅有全区秋季强降水量、日数减少趋势和冬季中降水量、日数增加趋势通过了显著性水平检验。分析还发现, 近30年(1980~2009年)东亚地区日降水趋势变化出现了新的特征, 主要表现为大部分地区降水日数呈现增加, 日降水强度减少, 45°N以南多数台站降水量也增加, 全区降水有向非极端化方向发展趋势。

**关键词** 东亚地区 日降水 降水量 降水日数 降水强度 弱降水 强降水 气候变化

**文章编号** 1006-9585(2013)06-0767-14

**中图分类号** P467

**文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12152

## Changes in Daily Precipitation over East Asia during 1951–2009

ZHAN Yunjian<sup>1,2</sup>, REN Guoyu<sup>2</sup>, REN Yuyu<sup>2</sup>, and LI Jiao<sup>3</sup>

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Tieling Meteorological Bureau, Tieling 112000

**Abstract** Atmospheric precipitation is a critical component of the terrestrial water cycle. For detecting and understanding the response of the water cycle to global warming at the regional scale, it is important to analyze the temporal and spatial variations in daily precipitation at the continental or subcontinental scale. In this study, daily precipitation data from the US National Climate Data Center (NCDC) and the China National Reference Climate and Basic Meteorological Stations for the period of 1951–2009 were used to analyze the long-term variations in precipitation

收稿日期 2012-08-27 收到, 2013-04-27 收到修定稿

资助项目 国家公益性行业专项 GYHY201206012

作者简介 战云健, 男, 1987年出生, 硕士研究生, 主要从事气候变化研究。E-mail: zhanyunjian@foxmail.com

通讯作者 任国玉, E-mail: guoyoo@cma.gov.cn

over East Asia ( $25^{\circ}\text{N}$ – $55^{\circ}\text{N}$ ,  $105^{\circ}\text{E}$ – $145^{\circ}\text{E}$ ). After basic quality control, 619 stations were chosen. Based on the percentile thresholds, the daily rainfall was classified into light, moderate, intense, and very intense. The regional average time series were obtained by the method of the area-weighted average for the grids. The spatial and temporal patterns of the long-term changes in all kinds of precipitation events were also analyzed.

The results showed that the average regional precipitation and precipitation intensity decreased during the last 59 years (1951–2009), whereas the rainy days exhibited no prominent trend. In most of northern China, eastern Mongolia, southern Russian-Far East, and most of Japan, the amount, frequency, and intensity of annual precipitation generally decreased. However, the southern part of Middle Siberia, the Korean Peninsula, and the Yangtze River basin witnessed increasing trends of the precipitation index series. The amount, frequency, and intensity of seasonal precipitation increased in winter and spring, and decreased in the summer and autumn except for the summer precipitation intensity. The annual seasonal precipitation variability in the last decade was gentler than the previous.

The regional average precipitation decreased in all categories in 1951–2009. The moderate precipitation decreased faster than the precipitation frequency, whereas the intense and very intense precipitation decreased slightly slower than the precipitation frequency. The moderate, intense, and very intense precipitation frequencies decreased during the last 59 years, and only the light precipitation frequency increased. Note that for the last 30 years (1980–2009), the overall precipitation intensity decreased, whereas the overall precipitation frequency increased for most areas in the study region. Most of the stations south of the  $45^{\circ}\text{N}$  latitude recorded increased annual precipitation; however, the daily precipitation intensity was less extreme.

**Keywords** East Asia, Daily precipitation data, Precipitation, Precipitation frequency, Precipitation intensity, Light precipitation, Intense precipitation, Climate change

## 1 引言

东亚地区由中国东部、日本列岛、朝鲜半岛、蒙古东部及俄罗斯西伯利亚的远东区域组成，区内人口、城市稠密，经济发达。东亚地区位于中纬度欧亚大陆东侧，为全球著名的温带和亚热带季风气候区。在季风环流的影响下，东亚气候四季分明、冬季干寒、夏季湿热、雨热同季、年际变异性很强（Ren, 1991；黄荣辉和杜振彩，2010），在为农业生产和其他人类活动提供得天独厚的水热资源条件的同时，也带来了无可避免的频繁水旱灾害。研究这个地区的降水事件长期变化规律，对于理解在全球气候变化背景下区域气候和陆地水循环演化特征及原因，具有重要科学意义；对于认识区域气象灾害发生和演化的成因、评价气候变化的影响，具有实际价值。

当前，利用地面观测资料对东亚地区作为一个整体的降水趋势变化研究还很少。对全球陆地降水变化的研究发现，近 100 年来东亚中高纬的西伯利亚、蒙古等地区年总降水量和极端强降水事件频率一般增加，而处于中纬度的中国华北和东北、日本列岛大部年降水量和极端强降水事件频率一般减少（IPCC, 2007；翟盘茂等，2007）。东亚地区中国以外的国家和地区，20 世纪中期以来降水变化趋

势大致与中国东部相似，如日本降水日数减少，各极端降水指数趋于增加（Manton et al., 2001）；韩国夏季降水量增加显著，暴雨强度增加（Choi et al., 2008, 2009）；近 30 年，俄罗斯远东地区和朝鲜北部夏季各级别降水和总降水量显著减少（Yao et al., 2008）。

对 20 世纪 50 年代以来中国东部降水变化特征的分析工作很多。这些研究一般发现：在年降水量变化方面，东部呈现出“北旱南涝”特征，华北地区和东北中南部降水量明显减少（任国玉等，2000, 2005；丁一汇等，2007；翟盘茂等，2007；Tu et al., 2010）；冬季总降水量和极端降水量大多增加而秋季大多减少（Wang and Yan, 2009）；东部多数地区小雨降水频率和降水量均显著减少，中雨变化趋势弱，强降水和极强降水事件频率变化趋势不明显，但强度有所增大，极端强降水量占总降水量的比例有所增加（翟盘茂和潘晓华，2003；王颖等，2006；翟盘茂等，2007；闵岫和钱永甫，2008；王小玲和翟盘茂，2008；任国玉等，2010），总体平均降水强度也有增加（王颖等，2006；翟盘茂等，2007）；全国大范围降水日数减少，其减少趋势大大超过了总降水量的下降（王颖等，2006），说明降水日数的趋势变化机理不完全等同于降水量，可能主要与造成小雨频数显著减少的控制因子有关（闵岫和钱永甫，2008；任国玉等，2010）。对降

水年代尺度变异分析表明, 20世纪50年代以来, 中国东部的降水量经历了20世纪50年代的相对丰沛期, 20世纪60年代初至80年代中的偏少期, 以及20世纪80年代中至90年代末的丰水期(Zhai et al., 2005); Qian and Zhu(2001)发现, 近百年来中国东部降水存在长期振荡和20年左右的年代际振荡; Ren et al.(2011)指出, 中国东部年和夏季降水量没有明显长期趋势变化, 但长江中下游与华北地区降水存在较明显的反相趋势和波动。

因此, 目前对东亚地区蒙古国和俄罗斯西伯利亚、远东等区域的研究很少, 尤其缺乏对东亚地区作为一个整体的长期降水趋势变化研究。

本文采用1951~2009年的日降水资料, 对东亚地区的总降水及各级别降水事件趋势变化特征进行分析。本文的分析发现东亚其他国家和地区降水趋势变化既存在与中国东部区域相似的特征, 也具有一定的独特性。

## 2 数据处理与分析方法

### 2.1 数据处理和选站

东亚地区范围定义为( $25^{\circ}\text{N} \sim 55^{\circ}\text{N}$ ,  $105^{\circ}\text{E} \sim 145^{\circ}\text{E}$ ), 主要包括中国东部、朝鲜、韩国、日本、蒙古大部和俄罗斯中西伯利亚南部与远东地区南部。所用数据为美国国家气候资料中心(NCDC)和中国基准气候站、基本气象站网日降水观测资料, 资料时段为1951~2009年。由于各测站的数据质量参差不齐, 缺测情况不同, 对原始降水资料进行了质量控制, 包括极值检查、错误数据排除、连续无变化检查和缺测值处理。

**极值检查:** 对大于500 mm的全部台站逐日降水记录进行了检查, 发现两类错误: (1) 999.99, 在蒙古国和西伯利亚出现多次, 为缺测值(9999.9)小数点错位所致; (2) 2000.0, 共出现3次, 均在中国, 其超过全球日降水量极值1828.8 mm, 为记录错误。将以上两种日降水量记录改为缺测值。除去这两类记录错误, 东亚地区日降水量极大值为806 mm, 出现在1968年9月日本东南沿海的一个观测站。经过比较附近观测站资料, 确认其为当日真实降水记录。

**错误数据排除:** 蒙古和朝鲜两国的资料质量略差, 有几个特殊值(蒙古41.9、42.9、43.9、74.9、91.9 mm; 朝鲜1973年以前的74.9 mm和150.1 mm)

多次重复出现。这些数据出现年份没有其他降水记录, 可认为数据有误, 将全年数据改为缺测。其中蒙古所有站点1961年之前的记录全部为缺测。此外, 蒙古国有些站点还多次出现明显偏高的100 mm以上的日降水记录, 经检验对比NCEP再分析可降水量和实际降水量资料, 确认其中200 mm以上的均为错误记录。由于这些站点的异常偏高的100 mm以上数据出现多次且无规律, 难以定性为缺测值、错误或正确降水记录, 故将这些存在异常的100 mm以上日降水量记录的站点剔除。

**连续无变化检查:** 根据降水多寡, 设定标准如下: 俄罗斯西伯利亚地区和蒙古国[( $40^{\circ}\text{N}, 105^{\circ}\text{E}$ )、( $55^{\circ}\text{N}, 130^{\circ}\text{E}$ )两点连线以西北]连续二日降水量超过50 mm, 其他地区连续二日降水量超过100 mm, 则认为后一日降水记录有误, 可能由于雨量计倾倒不及时等原因造成, 将后一日降水改为缺测值。检查发现, 在日本本州岛最西端的下关市1990年9月出现一次连续二日130.0 mm, 对比NCEP再分析可降水量和实际降水量资料, 确认第二日降水量错误。其余检查结果均为上一步被剔除站点的明显数据错误。

**缺测值处理:** 规定在降水日数较少的俄罗斯西伯利亚地区和蒙古国地区[( $40^{\circ}\text{N}, 105^{\circ}\text{E}$ )、( $55^{\circ}\text{N}, 130^{\circ}\text{E}$ )两点连线以西北], 如果某站某月缺测天数达到50%以上, 则该年年降水量记为缺测; 其他地区月缺测8 d以上算作全年缺测。月缺测不到以上标准时, 由于降水量的插补不准确, 缺测值不参与计算。

在上述质量控制处理后, 设立选站标准如下: 研究时段(1951~2009年)内至少有33年记录且标准气候参考期(1971~2000年)内至少有20年记录。根据此标准, 全区最终选用619个站, 各国家选用测站数: 中国343个、日本145个、韩国20个、朝鲜6个、蒙古2个、俄罗斯103个, 具体分布情况如图1a。全区长序列观测站点分布比较均匀, 密度也较高, 其中日本站点密度最高, 蒙古国最低。后者由于数据质量较差, 最终只有2个站入选。

在最终入选的测站中, 各台站记录长短和缺测情况还有差异。统计每年有观测的台站数(图1b)表明, 1951年有观测记录的台站数不到300, 此后逐渐增加, 到1961年有观测记录的台站数增加到500以上, 此后直到2000年台站数均维持在500以

上。但是, 2000 年和 2001 年台站大幅减少, 2001 年台站数不足最多年份的一半, 俄罗斯的西伯利亚和库页岛地区减少的台站最多(图 1a 灰色测站所示)。这导致俄罗斯东部沿海(包括库页岛)缺少记录完整的整个时期观测资料。2002 年以后全区有观测台站数回升到 400 个左右。

## 2.2 分析方法

本文主要分析东亚地区降水量、降水日数和降水强度长期趋势变化特征。由于国外未对 1 mm 以下的降水做记录, 降水日数定义为日降水量大于等于 1 mm 的天数, 单位为 d。年降水量为每年全部降水日降水量的总和, 单位为 mm。年降水强度为年降水量与年降水日数之比, 单位为 mm/d。

由于研究区域广, 各地降水气候特征差异较大, 为增强不同地区各级别降水事件之间的可比性, 采用相对阈值法对降水进行分级。参考 Karl and Knight (1998) 以及闵岫和钱永甫 (2008) 的方法, 按照百分位阈值对降水进行分级。将标准气候参考期(1971~2000 年)30 年所有 1 mm 以上降水从小到大排序, 取第 95 百分位的降水记录所对应的降水量定义为极强降水阈值, 大于此阈值的降水为极强降水; 同样, 定义介于第 80~95(含)百分位阈值之间的降水为强降水, 第 50~80(含)百分位阈值之间的降水为中降水, 第 50 及以下百分位阈值的降水为弱降水。以此方法划分的弱、中、强和极强降水, 大体对应中国江淮流域以绝对阈值定义的小雨、中雨、大雨、暴雨。

按夏季为 6~8 月、冬季为 1~2 月和上年 12 月、春季为 3~5 月、秋季为 9~11 月的标准划分四季, 分别分析了各季节各类降水指标的趋势变化特征。由于某些站点的标准参考期内干季(尤其是冬季)有降水记录较少, 对每个季节确定百分位阈值误差较大, 对降水量分级时没有区分季节, 全年采用了同样的阈值。因此, 降水量较小的冬、春两个季节缺乏部分较强级别的降水记录。其中春季缺乏全部年份的极强降水记录, 冬季缺乏全部年份的强和极强降水记录以及 1953~1999 年共 47 年的中降水记录。因此, 春季的强降水和冬季的中降水实际上已成为该季节的最强级别降水。

本文对各降水指标计算线性变化趋势时, 采用各台站分别计算和划分经纬度网格建立区域平均序列计算两种方法。在台站基础上, 为减小记录缺测的影响, 在计算 1951~2009 年线性趋势时, 选

取至少具有 55 年记录的台站, 对于这些台站的少量缺测, 用 1951~2009 年的平均值替补; 在计算 1980~2009 年近 30 年线性趋势时, 选取至少具有 27 年记录的台站, 并用 1980~2009 年的平均值替补缺测年份记录。以此方法计算降水线性趋势时所选用的站点分布情况见下文结果分析部分, 俄罗斯东部沿海及库页岛的多数站点因为资料缺测而未能入选。

区域平均序列构建采用 Jones et al. (1999) 提出的经纬度网格面积加权平均方法。首先将研究区域按经纬度划分网格。为保证每个网格内每年有至少 1 个测站的记录, 将研究区域划分为 5°(纬度) × 5°(经度) 的 48 个网格。然后计算每年所有台站各指标值相对标准参考期(1971~2000 年)的距平百分率, 并对每个网格求算术平均, 得到网格内的算术平均距平百分率时间序列。其中网格平均降水强度值是由该网格内所有有观测站点的总降水量除以总降水日数得到。如果某网格某年没有观测记录, 则该年该网格视为空网格。1951~2009 年拥有完整 59 年序列长度的网格如图 1c 黑色实心圆所示, 其中 H5、G6、H6 等 3 个位于海上的网格没有任何站点。由于资料缺测, 还有一些网格不具有完整的时间序列, 但多数只有少数年份没观测值, 对其做了插补处理: 如果缺测少于 5 年(即至少有 55 年观测长度), 则将该网格所有缺测年补以有观测值年份的平均值。插补后增加了 C1、F1、B3、G3、E4 等网格(图 1c 灰色实心圆所示)。

得到网格算术平均的距平百分率时间序列后, 进行区域面积平均的计算: 用各网格的距平百分率的算术平均值, 乘以各自网格的中心纬度的余弦后相加, 再除以参与计算的各网格中心纬度的余弦之和, 便得到区域平均的距平百分率值时间序列。计算区域平均时间序列线性变化趋势, 并采用 F 检验和相关系数( $r$ )检验方法进行显著性检验。

## 3 结果分析

### 3.1 年降水变化

图 2 表示 1951~2009 年东亚区域平均年降水量、降水日数和降水强度距平百分率的时间序列; 表 1 列出了同期年降水量、降水日数和降水强度的线性趋势及其显著性检验结果。全区年降水量由 20 世纪 50 年代到 60 年代中期的正距平为主, 转变为

70 年代的负距平为主, 其中 70 年代初到 80 年代初连续 9 年降水量为负距平, 为东亚地区近 59 年最干时期。20 世纪 80 年代年降水量回升到多年平均值附近, 90 年代多数年份为正距平, 其中 1998 年降水量达到整个时期最高水平。此后年降水量总体变化趋势不明显, 尤其自 2000 年以来降水量的年际波动还非常小(图 2)。总体来看, 59 年间东亚地区年降水量变化为弱的负趋势, 变化速率为  $-0.479\% (10 \text{ a})^{-1}$ , 没有通过 0.05 显著性水平检验(表 1)。

2000 年之前, 东亚区域平均年降水日数的变化趋势与年降水量较为接近; 但此后降水日数呈现显著增加, 近 10 年有 9 年为正距平, 仅 1 年为很弱的负距平。59 年间全区平均年降水日数变化趋势很弱, 只有  $0.033\% (10 \text{ a})^{-1}$ , 没有通过 0.05 显著性水平检验(表 1)。

东亚地区年平均降水强度在 20 世纪 50 至 60 年代总体变化不大, 70 年代以负距平为主, 80 至 90 年代呈现增加趋势, 90 年代降水强度多呈正距平, 而 2000 年以来则突然下降, 全部年份均为负距平。整个分析时期东亚地区年降水强度表现为下降趋势, 下降速率为  $-0.421\% (10 \text{ a})^{-1}$ , 未通过 0.05 显著性水平检验(表 1)。

值得注意的是, 2000 年以来东亚地区降水发生了令人瞩目的变化, 主要表现在降水量年际波动很小, 降水日数多变为明显的正距平, 致使降水强度呈现较大幅度下降(图 2)。近 10 多年东亚地区降水较之从前特别是 20 世纪 90 年代具有向非极端化方向演化特点。

图 3 表示东亚地区近 59 年降水量、降水日数和降水强度距平百分率的线性趋势空间分布情况。在 1951~2009 年期间, 俄罗斯中西伯利亚大部份地区年降水量、降水日数和降水强度一般呈不显著

增加趋势; 中国东北东部降水量变化不明显, 降水日数大多增加, 而降水强度大多减少, 各降水指标长期趋势变化总体上均不显著; 中国东北西部和南部以及华北地区, 年降水量、降水日数和降水强度一般呈减少趋势, 部分站点显著减少; 内蒙古西部年降水量、降水日数和降水强度均以增加为主; 长江和淮河流域年降水量、降水日数和降水强度多呈增加趋势, 部分站点的降水量和降水日数显著增加; 朝鲜半岛西部的 2 个站年降水量增加, 降水日数减少或显著减少, 降水强度增加或显著增加; 日本北海道岛降水量和降水强度减少, 其中西部显著减少, 降水日数则无明显变化趋势; 日本本州岛东部沿海降水强度增加或显著增加, 降水日数则多呈减少趋势, 而本州岛西南部地区年降水量、降水日数和降水强度一般均显著减少, 九州岛和四国岛年降水量、降水日数和降水强度也呈减少趋势, 但变化不显著。

图 4 给出东亚地区近 30 年(1980~2009 年)的降水量、降水日数和降水强度线性趋势空间分布情况。1980~2009 年期间,  $45^\circ\text{N}$  以北大部分地区年降水量和降水强度明显减少。与近 59 年比较, 年降水量减少区域向北迁移, 主要出现在中国东北北部、俄罗斯和蒙古国。除了中国东北北部和东部, 这些区域年降水日数一般也呈减少趋势。蒙古国东部和中西伯利亚地区年降水量减少速率超过  $-10\% (10 \text{ a})^{-1}$ , 降水日数减少速率超过  $-5\% (10 \text{ a})^{-1}$ 。 $45^\circ\text{N}$  以南大部分地区年降水量和降水日数增加, 中国北方黄淮流域降水日数增加明显, 山东省增加趋势更明显, 超过  $10\% (10 \text{ a})^{-1}$ , 但东南沿海地区和韩国、日本西部降水日数一般减少(图 4a、5b)。

东亚地区近 30 年大部分站点年平均降水强度呈减少趋势, 中国东北北部和日本列岛西部减少明

表 1 1951~2009 年东亚地区各季节不同级别降水变化趋势

Table 1 Linear trends of different categories of precipitation in the four seasons and the whole year in East Asia during 1951–2009

	降水量变化趋势					降水日数变化趋势					总降水强度 ( $10 \text{ a})^{-1}$
	弱降水	中降水	强降水	极强降水	总降水	弱降水	中降水	强降水	极强降水	总降水	
春季	0.086%	0.251%	0.037%		0.505%	0.66%	0.301%	0.159%		0.557%	0.243%
夏季	-0.421%	-0.59%	-0.074%	-0.456%	-0.35%	0.128%	-0.563%	-0.062%	-0.617%	-0.173%	0.162%
秋季	-0.499%	-0.84%	-2.190%*	-2.405%	-1.149%	0.053%	-0.859%	-2.150%*	-2.244%	-0.538%	-0.367%
冬季	1.135%	5.579%*			1.59%	1.776%	5.054%*			1.803%	0.656%
全年	-0.271%	-0.407%	-0.772%	-0.418%	-0.479%	0.557%	-0.348%	-0.942%	-0.622%	0.033%	-0.421%

\*代表通过 0.05 显著性水平检验, 表中所有趋势均未通过 0.01 显著性水平检验。

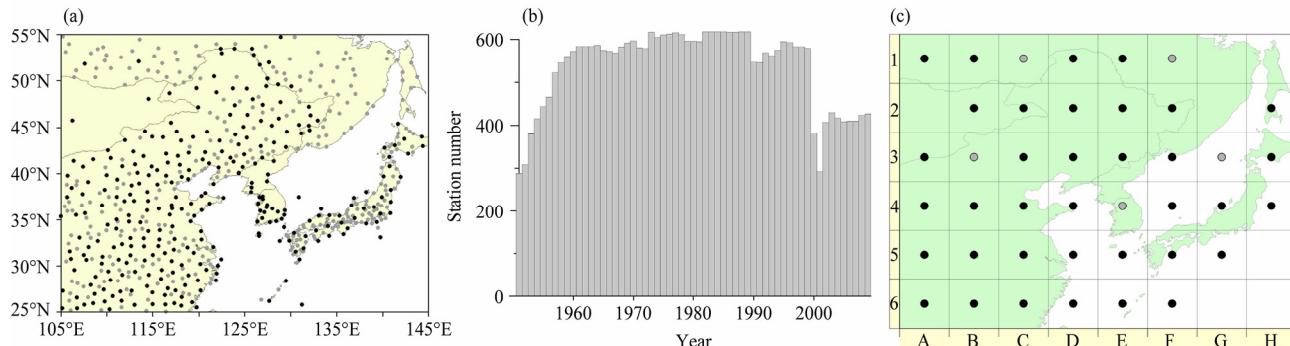


图 1 东亚地区 (a) 降水观测站地理分布 (灰色代表 2001 年缺测的观测站)、(b) 降水观测站数随时间变化、(c) 插补前 1951~2009 年拥有完整序列长度的网格点 (黑色) 和插补后增加的 1951~2009 年拥有完整序列长度的网格点 (灰色)

Fig. 1 (a) Spatial distribution of precipitation stations in East Asia (grey dots are stations without data in 2001); (b) precipitation station numbers in East Asia; (c) grids (black filled circles) with complete time series before interpolation during 1951–2009 and additional grids (grey filled circles) with complete time series after interpolation during 1951–2009

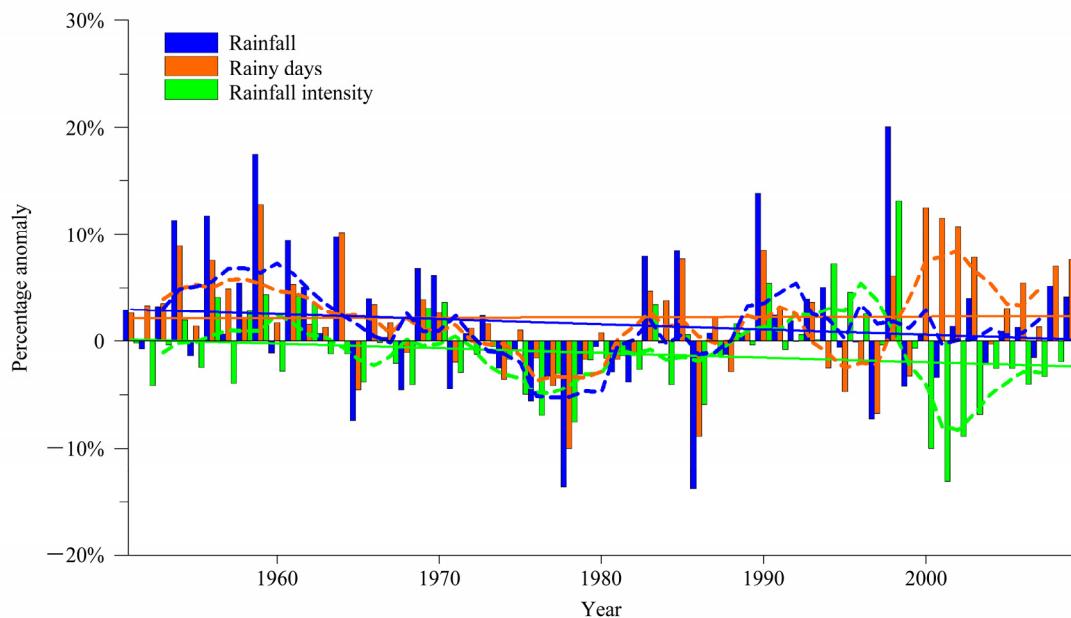


图 2 1951~2009 年东亚区域平均年降水量 (蓝色)、降水日数 (橙色) 和降水强度 (绿色) 距平百分率 (虚曲线为 5 年滑动平均, 实直线为线性趋势)  
Fig. 2 The average anomaly percentage of rainfall (blue), rainy days (orange), and rainfall intensity (green) in East Asia during 1951–2009. Dashed line is five-year moving average, and solid line is linear trend

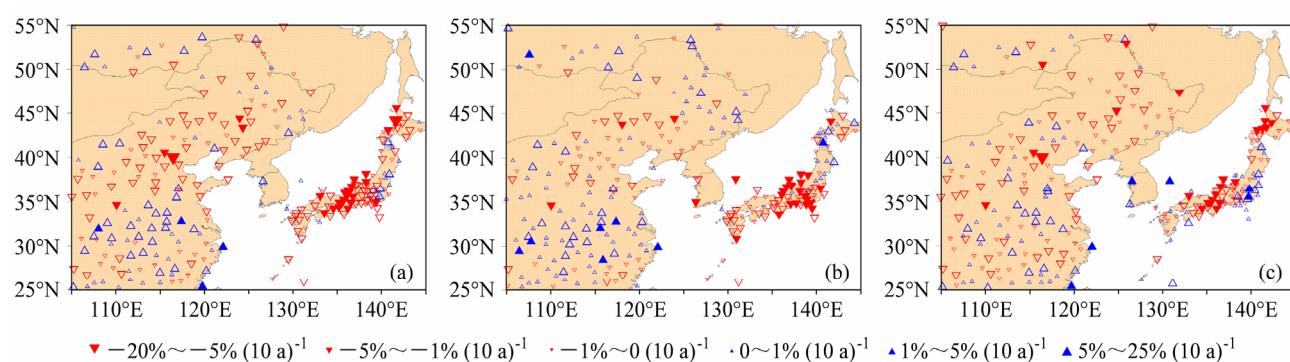


图 3 1951~2009 年东亚地区各站点 (a) 降水量、(b) 降水日数和 (c) 降水强度变化趋势 (其中的实心三角表示通过显著性水平为 0.05 的检验)  
Fig. 3 The variation trends of (a) rainfall, (b) rainy days, and (c) rainfall intensity in East Asia during 1951–2009. Filled symbols represent statistically significant trends at 0.05 significance level

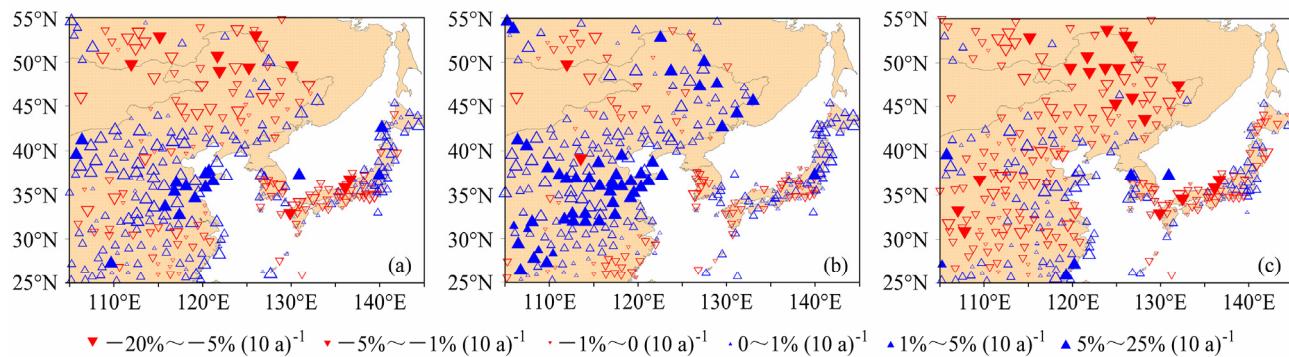


图 4 1980~2009 年东亚地区各站点 (a) 降水量、(b) 降水日数和 (c) 降水强度变化趋势 (其中的实心三角表示通过显著性水平为 0.05 的检验)

Fig. 4 The variation trends of (a) rainfall, (b) rain day, and (c) rainfall intensity in East Asia during 1980–2009. Filled symbols represent statistically significant trends at 0.05 significance level

显 (图 4c)。东北北部降水强度的减少主要源于降水量下降和降水日数增加的共同影响, 而日本西部的减少主要与降水量的明显下降有关。内蒙古西部、华北地区年降水强度有增有减, 多数站点趋势未通过显著性检验。长江流域降水强度以减少为主, 主要是由于降水日数增加引起; 但东南沿海地区降水强度出现较明显增加, 主要是降水量上升和降水日数减少共同作用的结果。日本北部降水强度变化不明显。因此, 从最近 30 年来看, 东亚大部分地区年平均降水强度减弱, 降水具有非极端化倾向。

### 3.2 季节降水变化

图 5 表示 1951~2009 年间东亚区域平均的季节降水量、降水日数和降水强度距平百分率年际和年代际变化, 表 1 中还列出了同时期各季节不同级别的降水量、降水日数的线性趋势及其显著性检验结果, 表 2、表 3 和表 4 则分别给出 1951~2009 年东亚地区各个季节和年降水量、降水日数和降水强度之间的相关矩阵。

表 2 1951~2009 年东亚地区区域平均季节和年降水量之间的相关矩阵

**Table 2 Correlation coefficients between the average rainfall in the four seasons and the whole year in East Asia during 1951–2009**

相关系数					
年平均降水量	春季平均降水量	夏季平均降水量	秋季平均降水量	冬季平均降水量	
1.000					
春季平均降水量	0.534** 1.000				
夏季平均降水量	0.758** 0.196	1.000			
秋季平均降水量	0.575** 0.101	0.152	1.000		
冬季平均降水量	0.290* 0.062	0.100	0.094	1.000	

\*表示通过 0.05 显著性水平检验, \*\*表示通过 0.01 显著性水平检验。

表 3 1951~2009 年东亚地区区域平均季节和年降水日数之间的相关矩阵

**Table 3 Correlation coefficients between the average rainy days in the four seasons and the whole year in East Asia during 1951–2009**

相关系数					
年平均降水日数	春季平均降水日数	夏季平均降水日数	秋季平均降水日数	冬季平均降水日数	
1.000					
春季平均降水日数	0.570** 1.000				
夏季平均降水日数	0.685** 0.222	1.000			
秋季平均降水日数	0.540** 0.022	0.177	1.000		
冬季平均降水日数	0.587** 0.205	0.220	0.107	1.000	

\*表示通过 0.05 显著性水平检验, \*\* 表示通过 0.01 显著性水平检验。

表 4 1951~2009 年东亚地区区域平均季节和年降水强度之间的相关矩阵

**Table 4 Correlation coefficients between the average rainfall intensity in the four seasons and the whole year in East Asia during 1951–2009**

相关系数					
年平均降水强度	春季平均降水强度	夏季平均降水强度	秋季平均降水强度	冬季平均降水强度	
1.000					
春季平均降水强度	0.634** 1.000				
夏季平均降水强度	0.745** 0.349**	1.000			
秋季平均降水强度	0.513** 0.283*	0.355*	1.000		
冬季平均降水强度	0.063 0.040	0.098	0.058	1.000	

\* 表示通过 0.05 显著性水平检验, \*\* 表示通过 0.01 显著性水平检验。

东亚地区冬、春两季的降水量、降水日数和降水强度均呈增加趋势, 其中冬季的增加趋势大于春季; 秋季的降水量、降水日数和降水强度均呈减少趋势; 夏季的降水量和降水日数也趋于减少, 但减

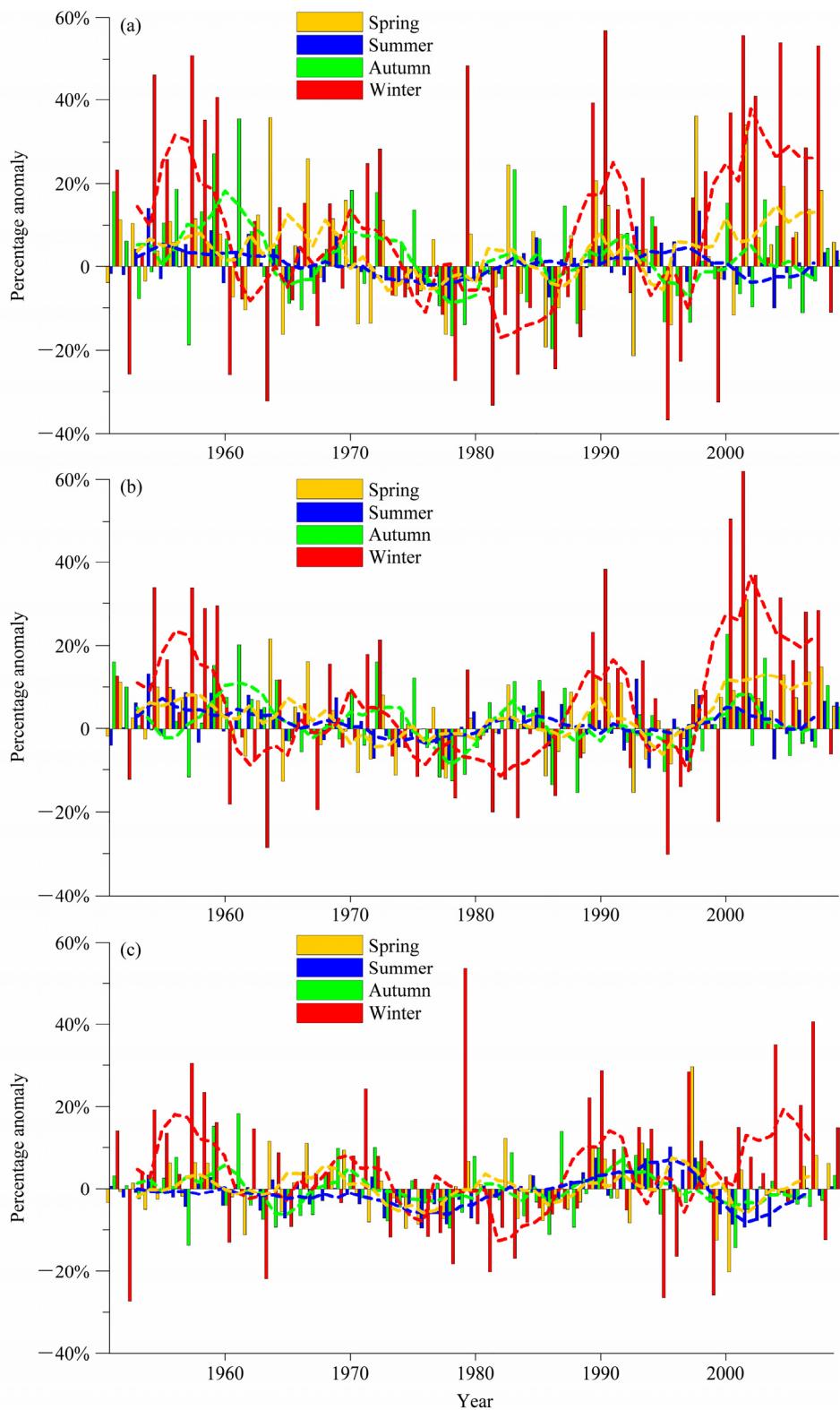


图 5 1951~2009 年东亚区域平均的各季节 (a) 降水量距平百分率、(b) 降水日数距平百分率和 (c) 降水强度距平百分率 (虚曲线为 5 年滑动平均)

Fig. 5 The average anomaly percentage of (a) rainfall, (b) rainy days, and (c) rainfall intensity in the four seasons in East Asia during 1951–2009. Dashed line is the five-year moving average

少趋势弱于秋季, 降水强度表现为增加。所有上述降水指标趋势均未通过 0.05 显著性水平检验(表 1)。秋季的强、极强降水量和降水日数下降趋势最明显, 冬季的中、弱降水量则呈较明显上升趋势, 其中秋季的强降水量、降水日数和冬季的中降水量、降水日数变化趋势均通过了显著性检验(表 1)。从 1951~2009 年各季节降水量和日数对全年的贡献率来看, 冬、春两季的降水量和降水日数的贡献率均增加, 而夏、秋两季均减少, 但趋势均不显著(表 5)。因此, 由于降水偏少的冬春季节的降水量和日数趋于增多, 而多雨的夏秋季节降水量和日数趋于减少, 东亚地区降水年内分布趋向于均匀, 降水季节性对比减弱。

**表 5 1951~2009 年东亚地区各季节降水量和降水日数贡献率变化趋势**

**Table 5 The variation trends of contribution rate of seasonal precipitation amount and frequency to the whole year in East Asia during 1951–2009**

	降水量贡献率变化 趋势/ $(10 \text{ a})^{-1}$	降水日数贡献率变化 趋势/ $(10 \text{ a})^{-1}$
春季	0.091%	0.093%
夏季	-0.090%	-0.222%
秋季	-0.189%	-0.162%
冬季	0.177%	0.279%

冬季各降水指标的年际和年代际波动明显大于其他季节, 距平百分率在-40%~60%之间起伏, 夏季波动幅度较小。在年际尺度上, 东亚地区作为一个整体, 各个季节的降水量、降水日数和降水强度与年值之间一般存在显著的正相关性, 夏季和年之间的相关性最高, 夏季降水对年降水的贡献率最大(图 5、表 2、表 3 和表 4)。但各个季节降水指标之间的相关性均很弱, 说明相邻季节之间降水的持续性不明显(表 2、表 3 和表 4)。

冬季的降水量、降水日数和降水强度存在较明显的年代际波动, 在 1955、1970、1990、2003 年附近有相对高值中心, 在 1962、1980、1995 年附近为低值中心; 夏季的各降水指标波动幅度明显小于冬季, 2000 年之前降水量和降水日数在 20 世纪 50 至 60 年代偏多, 70 年代偏少, 90 年代偏多, 但 21 世纪前 10 年夏季降水量偏少, 降水日数略偏多, 降水强度从 20 世纪 90 年代的正距平迅速转变为负距平。夏季降水强度总体增加趋势主要是来自于 20 世纪 70 至 90 年代期间的明显增加。

20 世纪 90 年代末以来, 东亚地区冬季降水量和降水日数都强烈增加, 个别年份距平百分率超过 40%。同期春季的降水日数正距平也达 10%以上, 而夏、秋两季降水日数距平较小, 均不超过 10%。最近 10 年全年降水日数增加主要来自于冬、春季降水日数增加。

### 3.3 不同级别降水变化

图 6 给出 1951~2009 年东亚区域平均的各级别降水量和降水日数距平百分率, 表 1 中列出了东亚地区 1951~2009 年全年和季节不同级别降水量和降水日数的线性趋势及其显著性检验结果。

总体上看, 在每个级别上降水量和降水日数的年际和趋势变化特点非常相似(图 6 和表 1)。各级别降水量以及中、强和极强降水日数变化均为下降趋势, 中降水量的下降趋势比降水日数下降趋势明显, 而强和极强降水日数的下降趋势略大于降水量下降趋势; 强降水量下降趋势最快, 其次为中降水量和极强降水量, 弱降水量下降最慢(表 1)。强、极强降水日数下降趋势明显, 中降水日数下降趋势较小, 弱降水日数则呈上升趋势(表 1)。全区弱降水日数的增加, 主要和 1999~2002 年期间的异常偏多有关(图 6)。

从年际和年代际波动看, 各级别降水量和降水日数在 20 世纪 50 至 60 年代偏多, 70 年代到 80 年代初偏少。20 世纪 50 至 60 年代各级别降水量和降水日数多为正距平, 到 70 年代转变为负距平, 并一直延续到 80 年代中期; 20 世纪 90 年代初期多呈正距平, 90 年代末期极强降水量和降水日数为较强的正距平, 1998 年极强降水量和降水日数达到近 59 年最高值, 其他级别降水则为较弱的负距平; 2000 年以来, 弱和中降水量、降水日数为强正距平, 极强降水量和降水日数则为负距平。弱、中和强降水量和降水日数距平百分率一般变动在-10%~20%, 而极强降水降水量和降水日数距平百分率年际波动在-20%~30%。

20 世纪 90 年中以来, 各级别降水量和降水日数的距平百分率差异变大。弱、中降水量和降水日数在 20 世纪 90 年代末为低值期, 21 世纪前 10 年为高值期; 强降水在 20 世纪 90 年代初为明显高值期, 90 年代末为低值期, 21 世纪前 10 年变化较小; 极强降水的位相恰好和弱、中降水相反, 20 世纪 90 年代达到高值期, 21 世纪前 10 年进入低值期。可见, 主要由于极强降水量和降水日数变化背离了

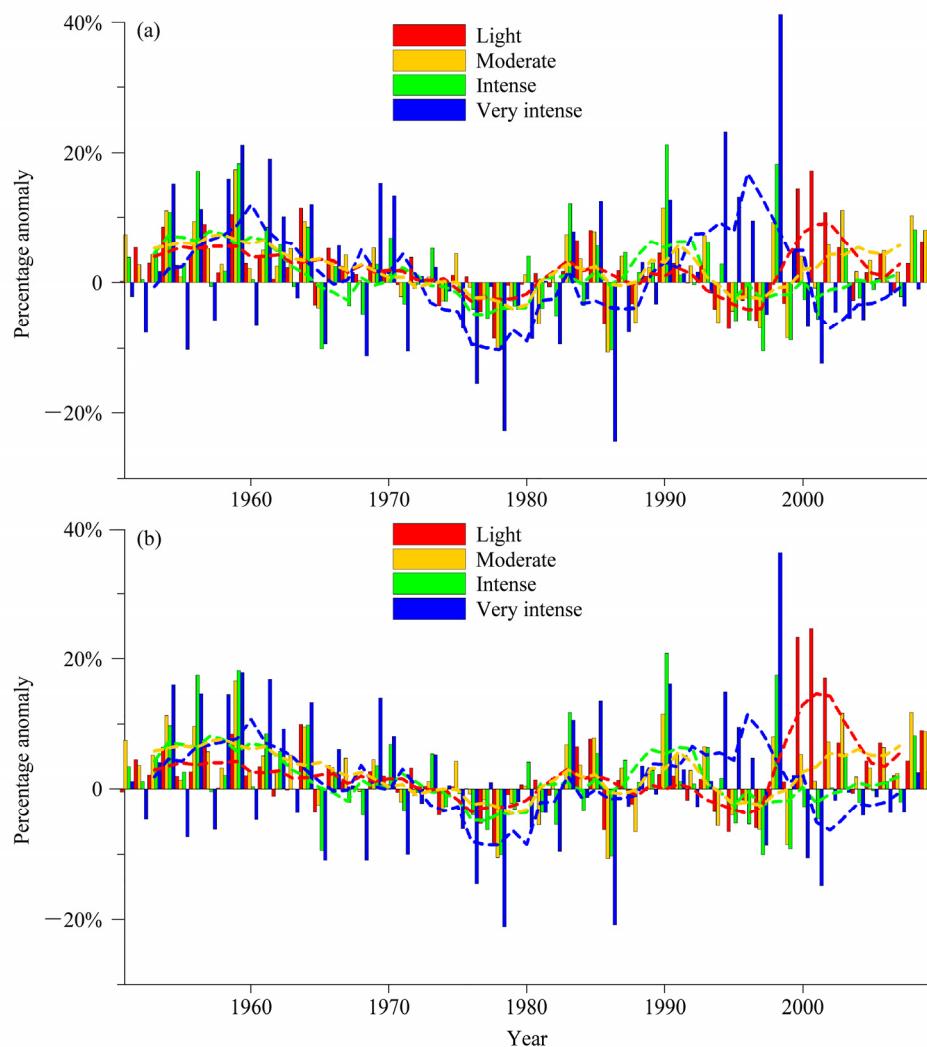


图 6 1951~2009 年东亚区域平均弱、中、强和极端强 (a) 降水量距平百分率和 (b) 降水日数距平百分率 (虚曲线为 5 年滑动平均)

Fig. 6 The average anomaly percentage of light, moderate, intense, and very intense (a) rainfall and (b) rainy days in East Asia during 1951–2009. Dashed line is the five-year moving average

其他级别降水波动位相，以及弱降水日数变化幅度显著加大，造成不同级别降水年代变化之间出现明显不一致。这也反映出，2000 年之后东亚地区降水具有迅速向非极端化方向演化趋势。

图 7 表示东亚地区近 59 年各级别年降水量和降水日数的线性趋势分布。中西伯利亚地区极强降水量和日数增加，其中降水量增加较明显，弱降水日数增加也较明显；中国东北和华北地区各级别降水量一般减少，其中强降水和极强降水量、降水日数减少比较显著，但东北北部和东部弱降水和中降水量、降水日数增加；长江和淮河流域大部地区各级别降水量和降水日数增加，其中弱和极强降水量、降水日数增加比较明显；朝鲜半岛西部弱降水量和日数显著减少，强降水量和日数略有减少，中

降水和极强降水增加；日本列岛大部中、强降水量和降水日数呈现一致性显著减少，在全区各级别降水变化中十分独特，弱降水量亦多减少，但弱降水日数变化趋势不明显；日本本州岛极强降水事件变化出现明显的东增西减特点，降水量的对比尤其明显，增加最显著的台站出现在东京都市圈附近。

#### 4 讨论

本文研究范围为东亚地区，中国东部占据了研究区的大部分，因此降水变化分析结果和针对中国东部或全国的研究应具有可比性和一致性。但实际上，本文对东亚降水变化的分析结果同前人有关中国东部的结论有一致性，也存在若干明显差异。

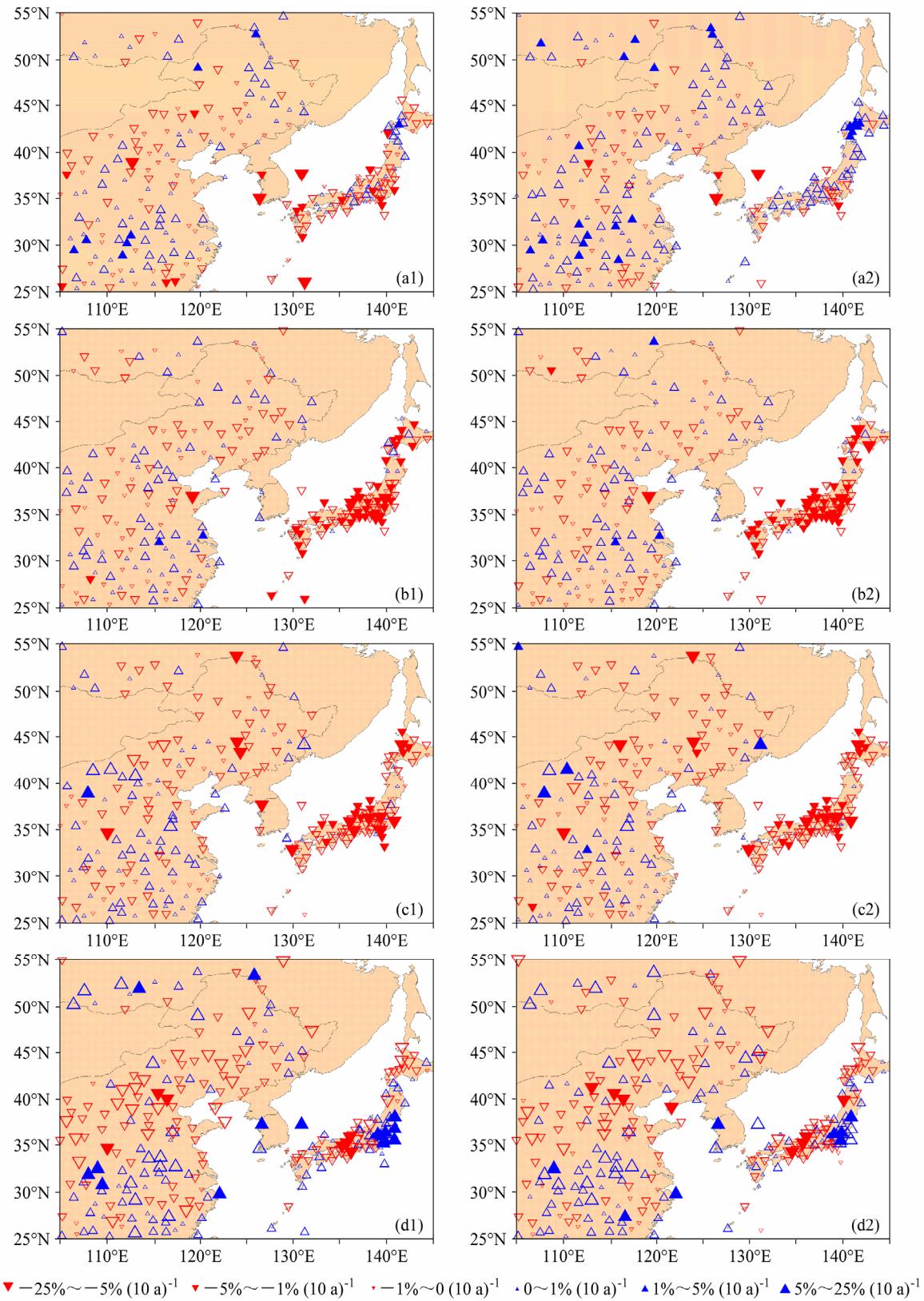


图 7 1951~2009 年东亚地区 (a1, a2) 弱、(b1, b2) 中、(c1, c2) 强和 (d1, d2) 极强降水量 (左列) 和降水日数 (右列) 变化趋势 (其中的实心三角表示通过显著性水平为 0.05 的检验)

Fig. 7 The variation trends of rainfall amount (left column) and rainy days (right column) of (a1, a2) light, (b1, b2) moderate, (c1, c2) intense, and (d1, d2) very intense rainfall in East Asia during 1951–2009. Filled symbols represent statistically significant trends at 0.05 significance level

从总降水量和极端强降水频率长期变化看, 东亚地区与我国全国或东部地区基本一致, 过去几十年里均没有表现出明显的上升或下降趋势, 这与不同纬度地带经历了相反的或互补的变化有关(任国玉等, 2005)。因此, 东亚地区降水变化与地面气温长期趋于显著增暖现象截然不同, 说明前者没有表现出明显的对大气中温室气体浓度增加等外强迫因子作用的响应信号。

另一方面, 多数研究指出, 中国东部地区和全国降水日数明显减少, 小雨日数减少更显著, 中雨日数减少趋势较弱, 强降水事件频率变化趋势不明显, 但强度有所增大(王颖等, 2006; 翟盘茂等, 2007)。还有研究指出, 中国地区秋季极端强降水事件频率减少, 冬季极端强降水事件频率增加, 夏季南方和西部极端强降水事件也增加, 北方极端强降水减少, 极端降水量与降水总量的比值在全国多数地区有所增加, 说明降水量存在向极端化方向发展的趋势(Zhai et al., 2005; 翟盘茂等, 2007; 闵岫和钱永甫等, 2008; 杨金虎等, 2008)。但是, 本文分析表明, 在近几十年中, 东亚地区多数站点降水日数没有表现出显著减少, 弱降水日数减少也不明显, 年平均降水强度总体呈现轻微下降趋势, 多数站点没有表现出明显增高, 降水的季节性差异一般趋于减小。最近几十年东亚地区降水总体上具有向非极端化方向演化特征。

造成这些分析结论差异的原因是多方面的。除了研究时段和范围不一致外, 一个重要原因在于对降水日定义的差异。国内业务上和研究中把日降水量大于等于 $0.1\text{ mm}$ 作为一个降水日, 还有研究者采用大于等于 $0.0\text{ mm}$ 的降水日定义, 而本文采用日降水量大于等于 $1.0\text{ mm}$ 的标准。最近研究发现,

中国东部或全国降水日数的减少, 主要是由于小雨和微量降水事件频率显著下降造成的(Qian et al., 2007; 任国玉等, 2010; Liu et al., 2011)。小雨和微量降水事件频率显著下降则可能与中国东部地区大气气溶胶浓度增加有关(Qian et al., 2009; Bennartz et al., 2011)。因此, 如果也采用国际上的降水日标准, 中国东部或全国平均年降水日数长期减少趋势将不会显著, 基于日降水资料计算的平均降水强度长期变化也将不会出现明显增加趋势。本文分析表明, 不论是近59年还是近30年, 中国东部地区多数台站年降水强度趋势变化实际上是下降的(图3、图4)。

分析时段更新对造成上述差异也有一定影响。20世纪90年代末以后, 降水日数特别是弱降水日数突然增加, 并维持在相对高的水平上, 在一定程度上造成平均降水强度减少, 这对区域平均降水日数和降水强度长期变化趋势, 尤其是近30年的变化趋势, 带来了较大影响。先前的研究部分没有包括最近10年的观测资料, 因而区域平均的降水日数减少和降水强度增加趋势显得更为明显。

另外, 20世纪90年代末至21世纪初降水日数的突然增加现象, 还与本文研究范围包括了中国以外的东亚区域有关。以位于降水日数距平百分率峰值附近的2001年为例, 当年东亚地区降水日数增加最明显的区域出现在日本和俄罗斯西伯利亚地区, 中国东北和内蒙古大部分地区降水日数则为负距平(图8)。包括了中国东部以外区域, 可能有助于减弱降水日数长期减少趋势和降水强度长期增加趋势。

本文分析结果的主要不确定性来自观测资料质量。尽管已经对降水资料进行了初步质量控

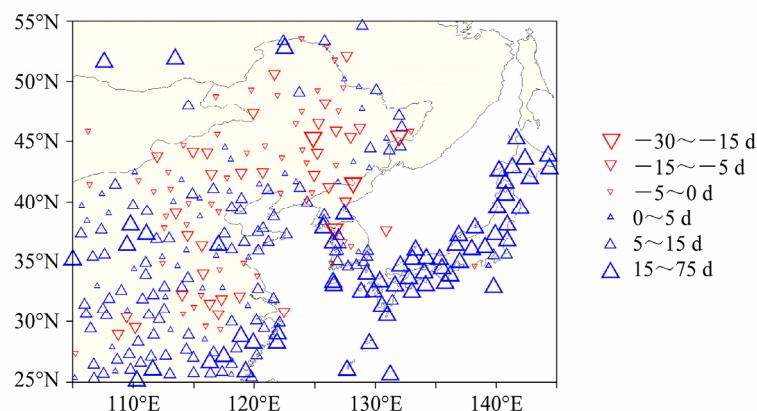


图8 2001年东亚地区降水日数距平分布(单位: d)

Fig. 8 The spatial distribution of annual rainy days anomalies (d) in East Asia in 2000

制, 但部分地区观测站点稀少, 缺测记录较多, 资料质量不佳, 对分析结果仍有一定影响。由于资料质量问题, 蒙古国境内只有 2 个站观测数据可以利用; 全区 2001 年前后观测站点缺失较严重, 其中俄罗斯西伯利亚远东区 2001 年全部站点缺失(图 8), 3 个网格无法参与计算。Yao et al. (2008) 指出, 俄罗斯远东区域近 30 年夏季降水存在显著减少趋势, 遗憾的是, 本文分析无法检验这一结果。同时, 各网格内台站数量有差别。如图 1c 中, 蒙古国东部的 B2 网格, 只有 2 个观测站; 日本南部海上的 F6 网格, 只有一个观测站; 主体位于日本海上的 G3 网格, 只有 2 个观测站; 俄罗斯地区 2000~2009 年期间以及 1956 年之前许多网格测站数目较少, 参与计算的网格平均序列方差有差别, 在全部区域平均后, 站少的网格反而对总的方差贡献较大。但是, 由于本文重点关注网格和区域平均序列的趋势变化, 估计上述计算方法对结果的影响比较小。此外, 在数据处理时缺测值不参与计算, 会造成该站降水日数绝对和相对数量偏少, 并可能对其他降水指标的计算分析结果产生误差。

## 5 结论

采用 1951~2009 年的日降水资料, 对东亚地区的降水时空变化规律进行分析, 得到以下主要结论:

(1) 从东亚区域平均来看, 年降水量由 20 世纪 50 年代至 60 年代中期以偏多为主, 70 年代偏少, 80 年代接近均值, 90 年代多数年份偏多, 此后再接近均值。59 年间年降水量变化趋势为不显著的负趋势, 变化速率为  $-0.479\% (10 \text{ a})^{-1}$ 。年降水日数年代际变化与降水量相似, 但 20 世纪 90 年代末以来表现出更显著的增加, 59 年间总体变化趋势很弱, 只有  $0.033\% (10 \text{ a})^{-1}$ 。降水强度年代际变化在 20 世纪 90 年代末之前与降水量和降水日数相近, 此后转变为明显的负距平。整个时期降水强度呈下降趋势, 下降速率为  $-0.421\% (10 \text{ a})^{-1}$ , 未通过 0.05 显著性检验。

(2) 近 59 年, 俄罗斯中西伯利亚、内蒙古西部、江淮流域年降水量、日数和强度以增加趋势为主, 中国东北西部和南部、华北地区、日本本州岛西南部、九州岛和四国岛年降水量、日数和强度多为减少; 中国东北东部降水日数一般增加, 降水强

度多呈减少趋势; 日本北海道岛降水量和降水强度减少, 西部减少显著, 本州岛东部降水日数减少, 降水强度出现较显著增加。近 30 年期间,  $45^{\circ}\text{N}$  以北大部分地区年降水量、日数和强度一般明显减少, 以南大部分地区年降水量和降水日数增加, 但东南沿海和韩国、日本西部降水日数多为减少; 近 30 年大部分站点年平均降水强度呈减少趋势, 降水出现非极端化倾向。

(3) 从不同级别降水变化看, 近 59 年东亚区域平均的弱、中、强和极强降水量、降水日数总体表现出下降趋势; 中降水量的下降趋势比降水日数下降趋势明显, 而强和极强降水日数的下降趋势略大于降水量下降趋势; 强降水量下降趋势最快, 其次为中降水量和极强降水量, 弱降水量下降最慢; 强、极强降水日数下降趋势明显, 中降水日数下降趋势较小, 弱降水日数则呈上升趋势。

(4) 中西伯利亚地区极强降水量和日数增加, 弱降水日数也增加; 中国东北、华北地区强降水和极强降水量、降水日数减少较显著; 长江和淮河流域大部地区弱和极强降水量、降水日数增加较明显; 朝鲜半岛西部弱降水量和日数显著减少; 日本列岛中、强降水量和降水日数呈一致性显著减少趋势, 弱降水量亦有减少, 本州岛极强降水变化出现明显的东增西减特点; 中国东部沿海极强降水量和日数多显著增加。

(5) 从各个季节看, 无论总降水还是各级别降水, 冬、春季各降水指标均呈较显著上升趋势, 其中冬季中降水量和日数增加趋势分别为  $5.58\% (10 \text{ a})^{-1}$  和  $5.05\% (10 \text{ a})^{-1}$ , 通过了显著性检验; 夏、秋季各降水指标多呈下降趋势, 秋季降水量、日数和强度均呈减少趋势, 其中强降水量  $[-2.19\% (10 \text{ a})^{-1}]$  和日数  $[-2.15\% (10 \text{ a})^{-1}]$  变化趋势通过了显著性检验。由于降水偏少季节降水量和日数趋于增多, 而多雨季节降水量和日数趋于减少, 东亚地区降水的季节性对比趋向减弱。

## 参考文献 (References)

- Bennartz R, Fan J, Rausch J, et al. 2011. Pollution from China increases cloud droplet number, suppresses rain over the East China Sea [J]. Geophys. Res. Lett., 38 (9): L09704.
- Choi G, Kwon W T, Boo K O, et al. 2008. Recent spatial and temporal changes in means and extreme events of temperature and precipitation across the Republic of Korea [J]. Journal of the Korean Geographical

- Society, 43: 681–700.
- Choi G, Collins D, Ren G Y, et al. 2009. Changes in means and extreme events of temperature and precipitation in the Asia-Pacific network region, 1955–2007 [J]. International Journal of Climatology, 29 (13): 1906–1925.
- 丁一汇, 任国玉, 赵宗慈, 等. 2007. 中国气候变化的检测及预估 [J]. 沙漠与绿洲气象, 1 (1): 1–10. Ding Yihui, Ren Guoyu, Zhao Zongci, et al. 2007. Detection, attribution and projection of climate change over China [J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese), 1 (1): 1–10.
- 黄荣辉, 杜振彩. 2010. 全球变暖背景下中国旱涝灾害的演变特征及趋势 [J]. 自然杂志, 32 (4): 187–195, 201. Huang Ronghui, Du Zhencai. 2010. Evolution characteristics and trend of droughts and floods in China under the background of global warming [J]. Chinese Journal of Nature (in Chinese), 32 (4): 187–195, 201.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [M]. Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 996pp.
- Jones P D, Horton E B, Folland C K, et al. 1999. The use of indices to identify changes in climatic extremes [J]. Climatic Change, 42 (1): 131–149.
- Karl T R, Knight R W. 1998. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 79 (2): 231–241.
- Liu B H, Xu M, Henderson M. 2011. Where have all the showers gone? Regional declines in light precipitation events in China, 1960–2000 [J]. International Journal of Climatology, 31 (8): 1177–1191.
- Manton M J, Della-Marta P M, Haylock M R, et al. 2001. Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific: 1961–1998 [J]. International Journal of Climatology, 21 (3): 269–284.
- 闵岫, 钱永甫. 2008. 我国近40年各类降水事件的变化趋势 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 47 (3): 105–110. Min Shen, Qian Yongfu. 2008. Trends in all kinds of precipitation events in China over the past 40 years [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (in Chinese), 47 (3): 105–110.
- Qian W H, Zhu Y F. 2001. Climate change in China from 1880 to 1998 and its impact on the environmental condition [J]. Climatic Change, 50 (4): 419–444.
- Qian W H, Fu J L, Yan Z W. 2007. Decrease of light rain events in summer associated with a warming environment in China during 1961–2005 [J]. Geophys. Res. Lett., 34 (11): L11705.
- Qian Y, Gong D Y, Fan J W, et al. 2009. Heavy pollution suppresses light rain in China: Observations and modeling [J]. J. Geophys. Res., 114 (D7): D00K02.
- Ren G Y. 1991. A new discovery in the comparison of the heat resources of temperate areas between China and the United States [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 72 (2): 239–241.
- 任国玉, 吴虹, 陈正洪. 2000. 我国降水变化趋势的空间特征 [J]. 应用气象学报, 11 (3): 322–330. Ren Guoyu, Wu Hong, Chen Zhenghong. 2000. Spatial patterns of change trend in rainfall of China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 11 (3): 322–330.
- 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 2005. 近50年中国地面气候变化基本特征 [J]. 气象学报, 63 (6): 942–956. Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. 2005. Climate changes of China's mainland over the past half century [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (6): 942–956.
- 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 main land China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 337–353.
- Ren G Y, Liu H B, Chu Z Y, et al. 2011. Multi-time-scale climatic variations over eastern China and implications for the south–north water diversion project [J]. Journal of Hydrometeorology, 12 (8): 600–617.
- Tu K, Yan Z W, Dong W J. 2010. Climatic jumps in precipitation and extremes in drying North China during 1954–2006 [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 88 (1): 29–42.
- 王小玲, 翟盘茂. 2008. 1957~2004年中国不同强度级别降水的变化趋势特征 [J]. 热带气象学报, 24 (5): 459–466. Wang Xiaoling, Zhai Panmao. 2008. Changes in China's precipitation in various categories during 1957–2004 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 24 (5): 459–466.
- Wang Y, Yan Z W. 2009. Trends in seasonal precipitation over China during 1961–2007 [J]. Atmospheric and Ocean Science Letters, 2 (3): 165–171.
- 王颖, 施能, 顾俊强, 等. 2006. 中国雨日的气候变化 [J]. 大气科学, 30(1): 162–170. Wang Ying, Shi Neng, Gu Junqiang, et al. 2006. Climatic variations of wet days in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (1): 162–170.
- 杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等. 2008. 中国年极端降水事件的时空分布特征 [J]. 气候与环境研究, 13 (1): 75–83. Yang Jinhu, Jiang Zihong, Wang Pengxiang, et al. 2008. Temporal and spatial characteristic of extreme precipitation event in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (1): 75–83.
- Yao C, Yang S, Qian W H, et al. 2008. Regional summer precipitation events in Asia and their changes in the past decades [J]. J. Geophys. Res., 113 (D17): D17107.
- 翟盘茂, 潘晓华. 2003. 中国北方近50年温度和降水极端事件变化 [J]. 地理学报, 58 (增刊): 1–10. Zhai Panmao, Pan Xiaohua. 2003. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58 (suppl.): 1–10.
- 翟盘茂, 王萃萃, 李威. 2007. 极端降水事件变化的观测研究 [J]. 气候变化研究进展, 3 (3): 144–148. Zhai Panmao, Wang Cuicui, Li Wei. 2007. A review on study of change in precipitation extremes [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3 (3): 144–148.
- Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. J. Climate, 18 (7): 1096–1108.