

姜江, 姜大膀, 林一骅. 2015. 1961~2009 年中国季风区范围和季风降水变化 [J]. 大气科学, 39 (4): 722-730. Jiang Jiang, Jiang Dabang, Lin Yihua. 2015. Monsoon area and precipitation over China for 1961-2009 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (4): 722-730. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1410.14195.

# 1961~2009 年中国季风区范围和季风降水变化

姜江<sup>1,2,3</sup> 姜大膀<sup>1,4</sup> 林一骅<sup>2</sup>

1 中国科学院大气物理研究所竺可桢-南森国际研究中心, 北京 100029

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体物理学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 中国科学院气候变化研究中心, 北京 100029

**摘 要** 东亚季风对中国气候和环境有重要影响, 以往研究多关注于季风环流和人为给定区域内夏季降水的变化, 对于季风区域变化本身及其相伴的季风降水鲜有涉及。本文使用四套降水观测资料, 其中包括基于 2416 个台站最新资料所得到的中国区域高分辨率降水格点数据, 集中分析了 1961~2009 年中国季风区范围、季风区西北边界、季风降水及其强度变化。结果表明, 季风区约占中国陆地面积的 60%, 研究时段内总体上在缩小; 季风降水无趋势性变化而是表现为一定的年际和年代际变率; 中国季风降水强度平均为  $4.46 \text{ mm d}^{-1}$ 。季风区西北部的东、西边界间区域属于典型的干湿交错带, 季风区西北边界在  $40^\circ\text{N}$  以南整体上表现为  $-0.026^\circ/\text{a}$  的西进趋势, 而在其北部则表现为  $0.041^\circ/\text{a}$  的东退, 这主要是源于区域尺度热力对比、大气环流和水汽通量的变化所致。

**关键词** 季风区域 季风降水 中国

文章编号 1006-9895(2015)04-0722-09

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1410.14195

## Monsoon Area and Precipitation over China for 1961-2009

JIANG Jiang<sup>1,2,3</sup>, JIANG Dabang<sup>1,4</sup>, and LIN Yihua<sup>2</sup>

1 Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

4 Climate Change Research Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

**Abstract** The East Asian monsoon exerts significant impacts on the climate and environment of China. Previous research (Wang, 2001) has focused mostly on monsoon circulation and the summer precipitation in specific areas, although few studies have been conducted on the monsoon area and its precipitation in China (Ding et al., 2009). In study, we employed four observed precipitation datasets, including the high-resolution gridded dataset based on 2416 observation stations across China, to analyze monsoon area, its northwestern boundary, and monsoon precipitation intensity for 1961-2009. The results show that the monsoon area accounts for approximately 60% of mainland China and generally contracts during the period. Monsoon precipitation exhibits apparently interannual and interdecadal variabilities. The average intensity of monsoon precipitation is  $4.46 \text{ mm d}^{-1}$ . The region between the eastern and western boundary of the northwestern monsoon area belongs to a typical dry-wet transitional zone. The northwestern boundary advances

收稿日期 2014-06-05; 网络预出版日期 2014-11-06

资助项目 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目 2012CB955401, 国家自然科学基金项目 41375084、41175072

作者简介 姜江, 女, 1987 年出生, 博士研究生, 主要从事气候变化研究。E-mail: jiangjiang@mail.iap.ac.cn

通讯作者 姜大膀, E-mail: jiangdb@mail.iap.ac.cn

westward south of 40°N (−0.026%) and retreats eastward north of 40°N (0.041%), owing mainly to changes in thermal contrast, atmospheric circulation, and water vapor flux and its divergence.

**Keywords** Monsoon area, Monsoon precipitation, China

## 1 引言

工业化革命以来, 气候系统正在经历一次以变暖为主要特征的显著变化, 1880~2012 年全球平均温度升高了 0.65~1.06°C。极有可能的是, 观测到的 1951~2010 年全球平均地表温度升高的一半以上是由温室气体浓度的人为增加和其他人为强迫共同导致的, 全球气候变化日益受到关注 (IPCC, 2013)。在中国, 过去百年的温度升高水平总体上要略高于全球平均 (Ding et al., 2007), 过去 50 年的区域平均降水表现为不明显的增加趋势 (Zhai et al., 2005), 东部地区出现南涝北旱格局 (Ding et al., 2009)。由于中国东部年降水主要来自于夏季, 近些年来有关东亚夏季风的研究工作一直备受关注 (Wang, 2001; 郭其蕴等, 2004; Yu et al., 2004; Jiang and Wang, 2005; Jiang et al., 2008; Ding et al., 2009), 但大多着眼于季风环流和给定区域内夏季降水量的变化, 对于季风区范围和相应季风降水的关注很少。

以往有关中国季风降水的研究表明, 东亚夏季风的进退伴随着雨带的移动 (高由禧等, 1962), 夏季风强度和范围不仅在很大程度上决定着东部地区旱涝分布 (赵汉光和张先恭, 1996; 黄荣辉, 2010), 同时也是造成中国北方季风边缘区气候异常的主要因子 (苏桂武和张林源, 1998)。但由于缺少相对客观的指标, 中国究竟哪些地区属于季风区? 季风区边界如何变化? 这些问题尚不清楚。考虑到季风的主要特征是冬季偏干而夏季偏湿, 近期有学者采用夏季与冬季降水差别以及夏季降水占年降水的比例来共同定义季风区, 得到了相对合理的全球和区域尺度季风区分布 (Wang and Ding, 2006), 并逐渐在全球季风气候研究中得到应用 (Wang and Ding, 2008; Hsu et al., 2011; Lee and Wang, 2014; Jiang et al., 2015)。鉴于此, 现阶段有必要采用这一指标集中研究中国季风区范围以及相应的季风降水变化。

另外应指出的是, 西南至东北向的中国半干旱和半湿润区是中西部地区主要的农牧交错带, 是气候变化的敏感区域 (史正涛, 1996), 它与季风边

缘区紧密关联 (李世奎, 1987), 东亚夏季风环流强弱及其降水丰枯对于该区域内干湿变化及农牧业有重要影响 (Shi and Ha, 2002; 杨建平, 2005)。之前, 曾分别有学者使用降水、温度、风场和水汽通量来描述东亚季风边缘带 (汤绪等, 2006), 用湿润度指数来定义季风边缘带的上下边界 (富元海和刘宣飞, 2007), 用旬平均气流和降水来刻画东亚夏季风边界 (胡豪然和钱维宏, 2007), 但这些研究主要侧重于气候学意义上的季风边缘带的确定, 至今鲜有关于中国季风区边界时空演化的研究工作。为此, 本文采用最新中国降水格点数据, 集中研究了近几十年来中国季风区范围和季风降水的时空变化特征。

## 2 资料和方法

本文采用了四套月降水资料, 分别是根据 2416 个台站最新资料建立的 1961~2009 年降水数据集 (简称 CN05.2) (吴佳和高学杰, 2013)、全球降水气候学计划 1979~2009 年降水数据 (简称 GPCP) (Huffman et al., 2009)、中国区域 1961~2007 年降水数据 (简称 Xie) (Xie et al., 2007) 和美国普林斯顿大学发展的 1948~2008 年降水数据 (简称 Princeton) (Sheffield et al., 2006)。考虑到前者是根据中国加密台站得到的最新的高分辨率数据, 下文将会作重点分析, 而其他三套资料则主要用于中国季风区范围的比较工作。期间为保证资料分辨率的一致性, 将 GPCP 数据插值到了其余三套资料共有的 0.5°×0.5°水平分辨率上。另外, 还选用了英国东英吉利大学气候研究部研发的 HadCRUT4 地表气温资料, 美国国家环境预测中心/大气研究中心 (简称 NCEP/NCAR) 再分析资料中的风场、比湿、表面气压资料则被用来计算水汽通量及其散度变化。

季风区定义为夏季与冬季降水之差大于 2.0 mm d<sup>-1</sup> 且夏季降水超过全年降水量的 55%, 其中夏季为 5 月至 9 月, 冬季为 11 月至次年 3 月, 年平均为 5 月至次年 4 月 (Wang et al., 2012); 季风降水定义为 5~9 月季风区面积与同期季风区内降水量的乘积; 季风降水强度定义为 5~9 月中国季风

区内平均降水率,目前上述定义已被用于全球季风区范围和季风降水分析与预估工作中(Wang and Ding, 2008; Hsu et al., 2011; Christensen et al., 2013; Lee and Wang, 2014)。

### 3 结果分析

#### 3.1 中国季风区范围

根据四套降水资料共有时段的计算结果,1979~2006年中国季风区的气候态呈现西南至东北向分布,季风区域内的夏季降水总体上表现为从东南向西北递减,这与传统的认识一致(图1)。总体来讲,中国季风区的西北部边界主要由季风区定义的指标之一,即夏季与冬季降水率之差大于 $2.0 \text{ mm d}^{-1}$ 来决定;中国东南部出现的局部空白区域显示这一地区不属于季风区,这是因为那里除夏季以外的其他月份的降水量也很大,夏季降水量并没有达到全年降水量55%这一季风区判定标准。如图1所示,4套观测数据结果中均显示东南局部存在一个或大或小的空白区,大致位于( $25^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ ,  $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ )内。需要指出的是,通过分析东亚纬向海陆热力差异变化、经向风转向以及雨带建立,有研究认为每年3月至4月空白区域的江南春雨具有副

热带季风性质,并指出东亚副热带季风于3月中旬开始建立,是早于而且独立于热带夏季风的(何金海等, 2007; Qi et al., 2008)。因此若将该空白区内3~4月份降水纳入季风降水考虑范围,该区域是可以满足季风降水占全年降水量比例超过55%的这一判定标准,这说明热带和副热带季风系统共同决定着中国季风区域内不同性质降水的时空分布特征。

在大尺度上,中国季风区分布在CN05.2和Xie数据之间大体相仿,而与另外两套资料结果有一定的差别。以( $35^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$ )范围为例,甘肃省中部和青海省东北部伸出的尖角区域(祁连山脉南缘至青海南山北缘)在前两套数据中显示为季风区,而在GPCP以及Princeton数据中则没有体现。GPCP资料是一套卫星反演降水与地面站点雨量计观测相融合的降水资料,其中包括了中国160个地面台站雨量计的资料,而Princeton降水资料在NCEP/NCAR资料中结合了站点资料,同时也同化了GPCP数据和遥感降水资料。这两套资料由于利用到的中国站点相对于CN05.2和Xie降水资料较少,因此未能较好地刻画出尖角区域的细节信息。事实上,这一尖角区域内的降水量以及湿度条件并

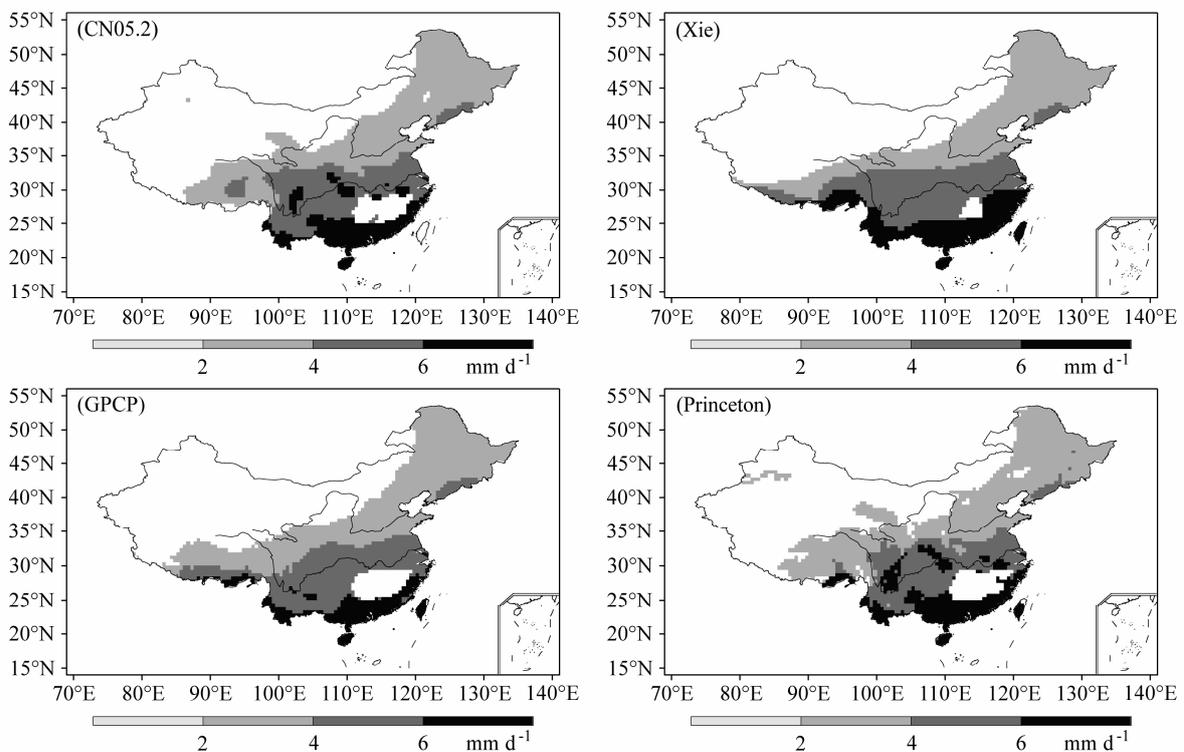


图1 1979~2006年中国季风区平均范围及其区域内夏季降水分布(单位:  $\text{mm d}^{-1}$ )

Fig. 1 Climatological monsoon area and summer precipitation in China for the period of 1979–2006 (units:  $\text{mm d}^{-1}$ )

不同于中国西北的典型干旱区(朴世龙和方精云, 2001)。考虑到植被与降水在时空场上具有很强的耦合性, 以及植被净初级生产力与降水量之间存在较好的相关性, 遥感数据分析表明植被净初级生产力较大值空间分布与图 1 中所示的季风区域具有很好的符合度(肖乾广等, 1996; 朱文泉等, 2007; 智海等, 2009), 因此将这一尖角区划分为季风区域较为合理。综上, 以降水作为季风区域的定义指标相较于以往基于风向反转的季风区域判定标准, 其特色是能够更清楚的刻画季风降水的影响范围。

在气候态上, 尽管各套数据时段不同, 但季风区总面积却彼此间大体一致, 分别占中国陆地总面积的 59% (CN05.2, 1961~2008 年)、59% (Xie, 1961~2006 年)、63% (GPCP, 1979~2008 年) 和 59% (Princeton, 1948~2007 年)。在年际尺度上, 季风区范围并不是恒定的, 而是表现出一定的变率, 并在分析时段内表现为统计上不显著的减小趋势(图 2), 斜率分别为  $-0.53 \times 10^4 \text{ km}^2 (10\text{a})^{-1}$  (CN05.2)、 $-5.77 \times 10^4 \text{ km}^2 (10\text{a})^{-1}$  (Xie)、 $-7.96 \times 10^4 \text{ km}^2 (10\text{a})^{-1}$  (GPCP) 和  $-1.48 \times 10^4 \text{ km}^2 (10\text{a})^{-1}$  (Princeton)。在年代际尺度上, 中国季风区范围也

表现出一定的变率, 特征之一是季风区面积自 1970 年代中期以来有较为清晰的减小趋势; 以上季风区范围的长期变化趋势和年代际尺度变化与近几十年东亚夏季风环流的减弱相对应 (Wang, 2001; Yu et al., 2004; Jiang and Wang, 2005)。在四套数据中, 季风区面积一致偏少的年份出现在 1972 年、1986 年、1997 年和 2001 年; 而季风区面积一致增加的年份为 1970 年、1985 年和 1998 年; 季风区范围最大值在四套数据中均出现在 1998 年, 即中国东部水灾最为严重的那一年。总体上讲, 季风区面积偏大/小的年份与强/弱夏季风年份相对应。

为了理解近几十年来中国季风区面积变化成因, 我们根据季风区定义用 CN05.2 数据计算了夏季与冬季降水量之差以及夏季降水占全年总降水的比值(图 3), 发现两者均存在年际和年代际变率, 在研究时段内总体上都在减小, 线性趋势分别为  $-0.024 \text{ mm d}^{-1} (10\text{a})^{-1}$  和  $-0.002\% (10\text{a})^{-1}$ 。鉴于夏季与冬季降水量之差的下降趋势在量级上要大于夏季降水占全年降水量比值的下降趋势, 可以得出夏季与冬季降水量之差的下降是近几十年来中国季风区范围减少的主因。

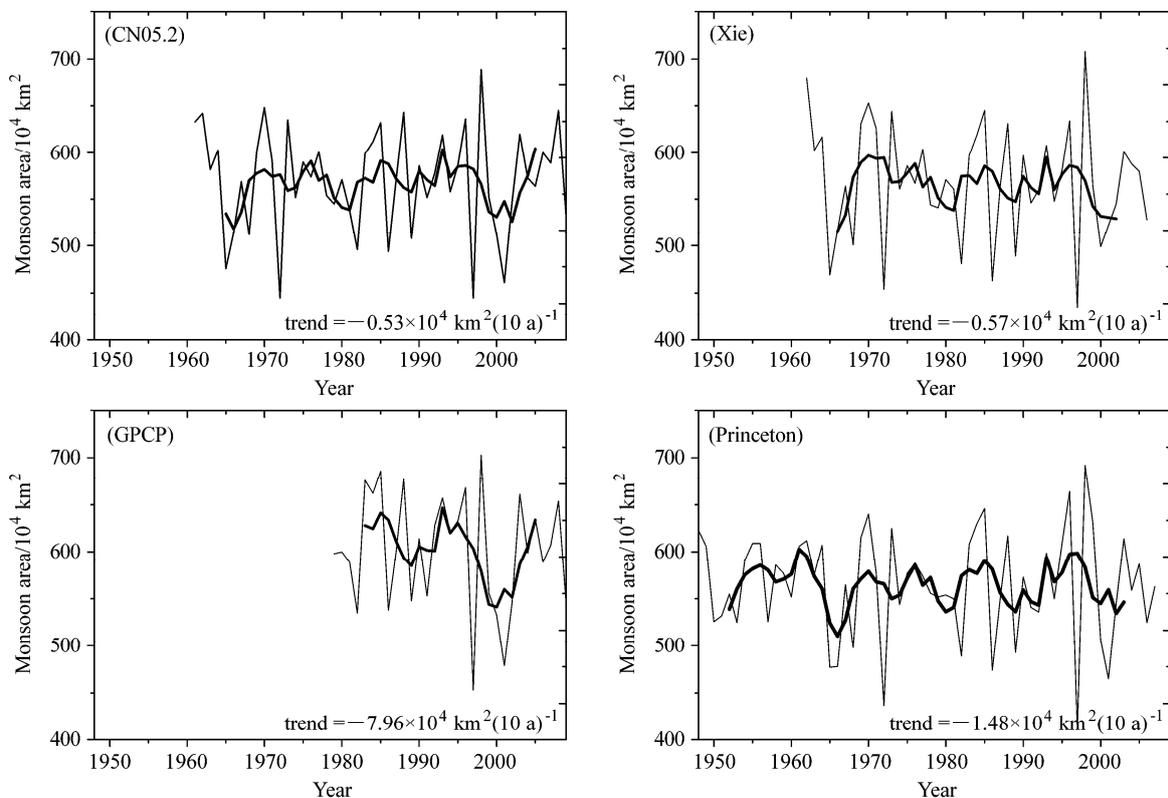


图 2 中国季风区面积年际变化 (单位:  $10^4 \text{ km}^2$ ), 粗黑线为九年滑动平均

Fig. 2 Changes in monsoon-region area (units:  $10^4 \text{ km}^2$ ) for China, in which bold line indicates 9-year running mean

### 3.2 中国季风降水及其强度

在 CN05.2 数据所覆盖的 49 年间, 中国季风降水存在明显的年际变率 (图 4a)。季风降水正异常的年份有 25 年, 负异常的有 24 年, 异常幅度介于 1972 年的  $-26.0\%$  和 1998 年的  $26.1\%$  之间, 这两个年份分别对应着图 2 所示的季风区最小和最大年份。进一步的 Mann-Kendall 突变检验 (Mann, 1945; Kendall, 1970) 以及 10 年为窗口的滑动  $t$  检验结果

表明, 1961~2009 年中国季风降水变化虽然存在着明显的波动变化, 但未出现通过显著性检验的突变点。在整个研究时段, 中国季风降水总体上没有显著的趋势性变化, 斜率仅为  $0.03\%$ 。

作为表征季风区域内夏季平均降水量的指标, 中国季风降水强度主要表现为一定的年际和年代际变率, 整体上并无明显的变化倾向 (图 4b)。1961~2009 年, 中国季风降水强度平均为  $4.46 \text{ mm}$

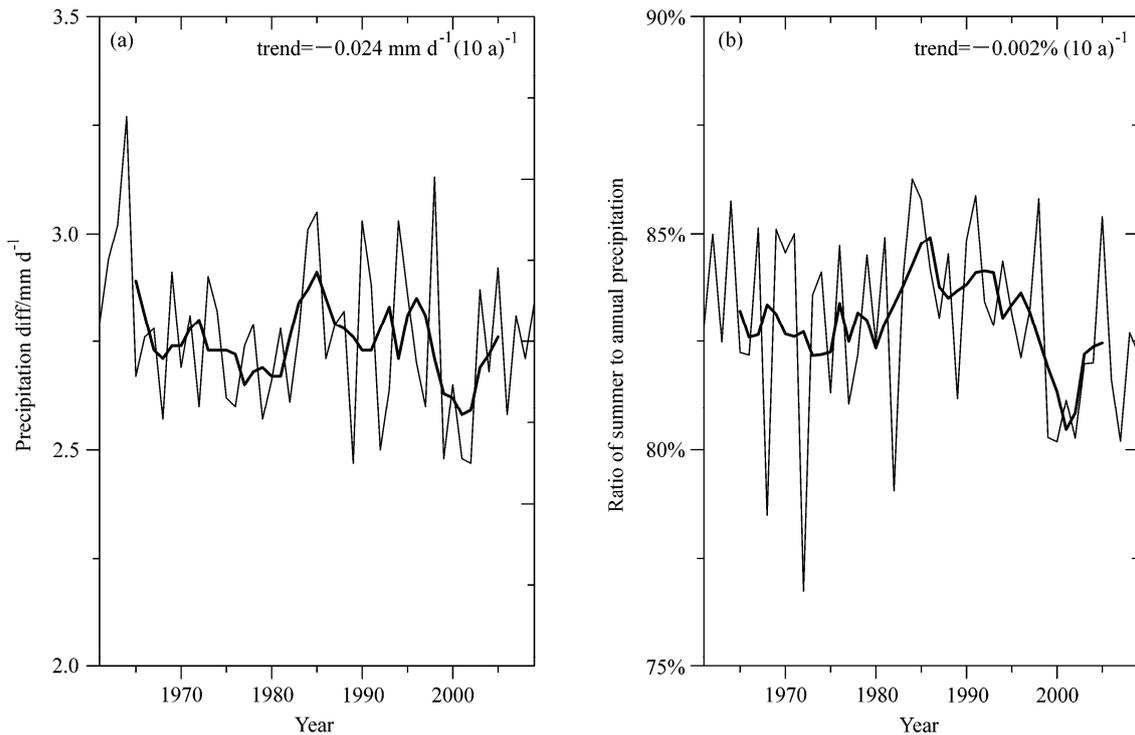


图 3 根据 CN05.2 数据, (a) 1961~2009 年中国夏季与冬季降水量之差 (单位:  $\text{mm d}^{-1}$ ) 和 (b) 夏季降水量占全年降水量的比例变化。粗黑线为九年滑动平均

Fig. 3 Based on CN05.2, (a) the differences between summer and winter precipitation (units:  $\text{mm d}^{-1}$ ) and (b) the ratio of summer to annual precipitation during 1961–2009. Bold line indicates 9-year running mean

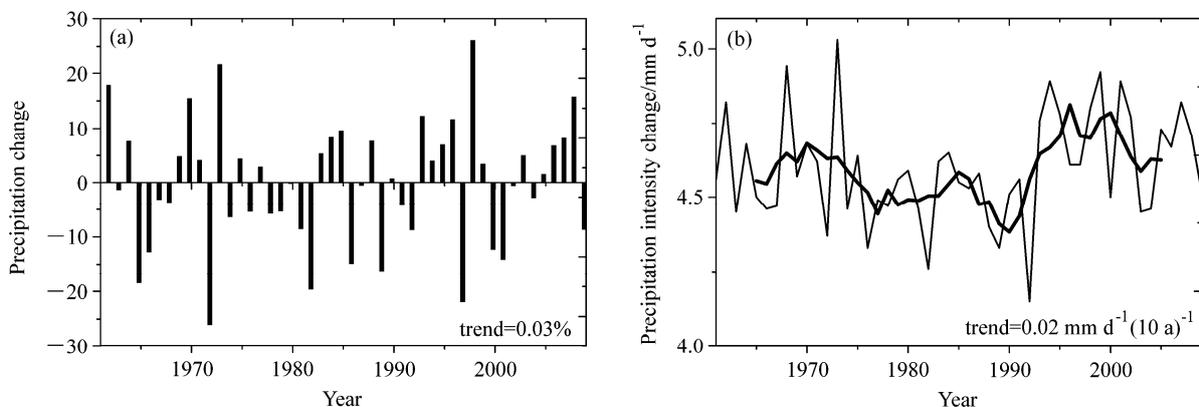


图 4 根据 CN05.2 数据, (a) 1961~2009 年中国季风降水距平百分比和 (b) 中国季风降水强度变化 (单位:  $\text{mm d}^{-1}$ , 粗黑线为九年滑动平均)

Fig. 4 Based on CN05.2, (a) anomaly percentage of monsoon precipitation for China during 1961–2009; (b) changes in monsoon precipitation intensity for China during 1961–2009 (units:  $\text{mm d}^{-1}$ ), in which bold line indicates 9-year running mean

$d^{-1}$ , 线性趋势仅为每十年  $0.02 \text{ mm } d^{-1}$ 。在 1970 年代中期以前, 季风降水强度年际变率相对较大且总体处于高位相, 之后至 1990 年代初期变化相对平缓并处于低水平, 而后则是年际变率增大且强度增加, 这些变化分别与东亚夏季风环流在 1970 年代中期以来的年代际减弱 (Wang, 2001; Yu et al., 2004; Jiang and Wang, 2005) 及其在 1990 年代初期的有所恢复 (Liu et al., 2012) 相对应。在区域上, 中国季风区内降水变化趋势表现出不同的变化特征。1961~2009 年季风降水强度增加区域主要位于  $35^{\circ}\text{N}$  以南, 集中在长江以南区域。而季风降水强度减少的区域主要包括长江中下游地区以及东北大部。

### 3.3 中国季风区西北边界变化

中国西南至东北向的季风边缘区为干旱和半干旱过渡带, 是气候变化的敏感和脆弱区, 季风强弱及其变率对当地农牧业和社会经济有重要影响。尚待深入研究的是, 从气候平均的角度来看究竟哪些地区属于常年季风区、哪些地区为季风边缘区或称之为季风的不稳定影响区。为此, 我们进一步分析了季风区西北边界的变化情况, 期间为获取大尺度上的信息而忽略了前文所述的东南局部地区因夏季以外降水较大而不属于季风区的问题。由图 5 所示的最东边界线可见, 中国东南、西南和东北东南部的大部分地区属于常年季风区, 这与传统的认识一致。其次, 根据季风区西北部的平均边界和最西边界线, 东北大部属于季风区; 而根据季风区西北部的最东边界线, 东北中部和西部大部分地区又不属于常年季风区; 由此表明东北季风区范围的变率很大, 这是因为东北降水主要来自于暖季 (Sui et al., 2013), 受地形因素、西风带、东亚夏季风和西北太平洋气候的综合影响, 其中夏季风北进的强度在很大程度上决定着季风的影响区域。如图 1 所示, 东北降水中心位于长白山, 这一地区仍处于季风的影响范围内。当季风偏强的年份, 季风可以越过燕山山脉和大兴安岭到达图 5 中红线所包围的内蒙古中部地区; 另一方面, 大兴安岭呈东北至西南走向, 是一道天然的水汽屏障, 在季风偏弱的年份会阻止季风携带的水汽进入东北北部区域。还需指出的是, 前文提到的甘肃中部和青海东北部的尖角形状季风区在季风区西北部的最西、平均态和最东边界线中清晰可见 (图 5), 从而表明这一区域的降水条件符合季风区标准; 其次, ( $35^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ ,

$95^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$ ) 区域内的最西、平均态和最东边界线之间的经纬度差异较小, 说明这一季风区的边界较为稳定。

1961~2009 年, 中国季风区西北边界一直处在变化之中 (图 5)。在东西方向上, 季风区西部边界线在各纬度上的变化趋势为  $-0.086^{\circ}/\text{a}$  至  $0.075^{\circ}/\text{a}$ , 并在  $40^{\circ}\text{N}$  南北两侧总体上呈反相变化, 其北部平均趋势为  $0.041^{\circ}/\text{a}$ , 南部为  $-0.026^{\circ}/\text{a}$ 。换言之,  $40^{\circ}\text{N}$  以北季风区西边界所处的经度在增加, 即季风区总体上在向东退缩, 这与已有利用半湿润与湿润区分界线所得的东北地区有逐渐变干趋势、半湿润与湿润区分界线向东南部明显移动的结果相一致 (张淑杰等, 2011)。而在  $40^{\circ}\text{N}$  以南, 季风区西边界所处的经度在减小, 即季风区总体上在向西扩张, 这与以往采用湿润指数所得的结果相符, 即在  $35^{\circ}\text{N}$  以南区域 (图 5 中所示季风区西进较为明显的区域) 有变湿倾向以及东北地区变干的趋势 (张方敏和申双和, 2008)。同时, 北部季风区东退的范围要明显大于南部季风区的西进, 即  $40^{\circ}\text{N}$  以北季风区减小的面积要大于南部季风区扩张的面积, 两者综合导致了近几十年来中国季风区总面积的减少趋势 (图 2)。在南北方向上, 中国季风区北部边界线在各经度上的变化趋势为  $-0.090^{\circ}/\text{a}$  至  $0.047^{\circ}/\text{a}$ 。其中在  $85^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$  主要呈现北上趋势, 在  $100^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$  为微弱的南退, 而在  $115^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E}$  则仅有少数区域表现出一定的南退。在  $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ , 季风区最北边界处于  $33^{\circ}\sim 47^{\circ}\text{N}$  之间, 变化区间要大于早期所得的  $39^{\circ}\sim 47^{\circ}\text{N}$  范围 (江志红等, 2006)。

为进一步理解  $40^{\circ}\text{N}$  南北两侧季风区变化差异原因, 根据季风区定义采用 CN05.2 数据进行了定量化计算, 结果显示在  $40^{\circ}\text{N}$  以北无论是夏季与冬季降水之差还是夏季占全年降水量的比例都在下降; 而在  $40^{\circ}\text{N}$  以南, 夏季占全年降水量的比例却在增加。由此可见, 中国季风区变化在  $40^{\circ}\text{N}$  南北两侧的确存在着不同, 这应该与先前研究工作中有关东亚夏季风在到达  $40^{\circ}\text{N}$  以后会出现短暂停留并随后南退的大尺度进退过程有关联 (陈隆勋等, 2000)。

### 3.4 中国季风区和季风降水变化的动力学分析

1961~2009 年, 全球变暖背景下的中国及其临近地区地表气温以上升为主, 但温度升高水平有明显的区域性差别 (图 6a)。在东北, 中部和南部地

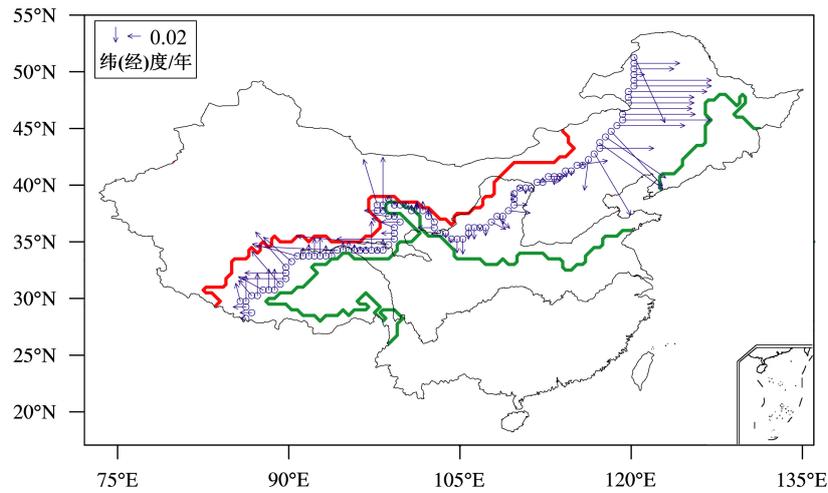


图 5 根据 CN05.2 数据, 1961~2009 年中国季风区西北边界变化。红线和绿线分别代表西北边界的最大和最小范围, 蓝色圆圈为平均态的西北边界, 蓝色矢量箭头表示所在边界点的经向和纬向变化趋势

Fig. 5 Based on CN05.2, changes in the northwestern boundary of monsoon area in China during 1961–2009. Red and green lines indicate the largest and smallest northwestern boundaries, respectively. Blue circles show the average position of the northwestern boundary, and blue arrows indicate the zonal and meridional trends of the northwestern boundary

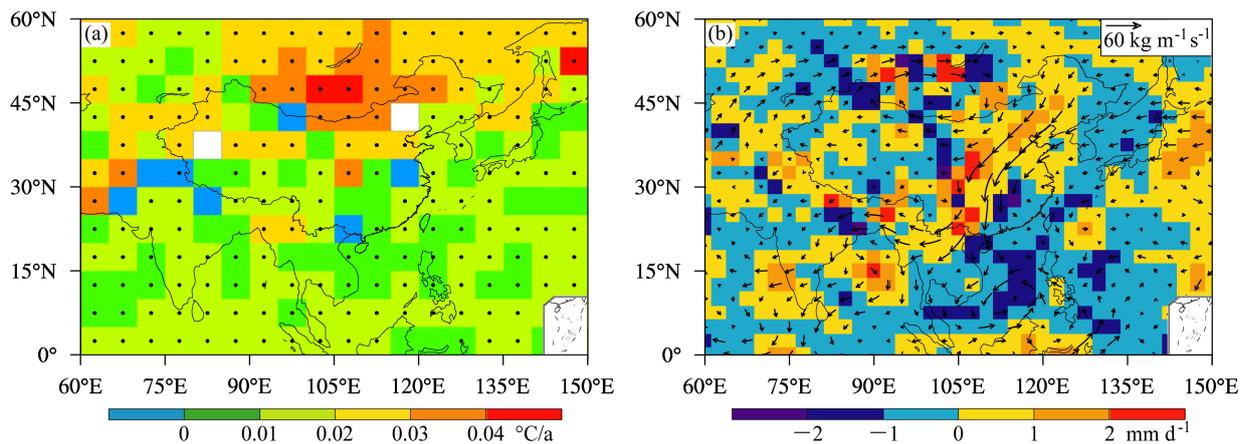


图 6 (a) 根据 HadCRUT4 资料, 1961~2009 年地表气温线性变化趋势 (单位:  $^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ), 打点区表示通过 95% 信度检验; (b) 根据 NCEP/NCAR 再分析资料, 1980~2009 年与 1961~1979 年间夏季水汽通量及其散度差异 (水汽通量单位:  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ , 散度单位:  $\text{mm d}^{-1}$ ), 其中垂直水汽通量从地表积分到 300 hPa, 同时考虑了地形因素的影响, 期间假设水的密度为  $1 \text{ g cm}^{-3}$

Fig. 6 (a) Based on HadCRUT4 data, the trend of surface air temperature for the period of 1961–2009 (units:  $^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ), and areas with confidence levels above 95% are dotted; (b) based on NCEP/NCAR reanalysis data, the differences of summer water vapor fluxes and their divergences between 1980–2009 and 1961–1979 (units:  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$  and  $\text{mm d}^{-1}$ , respectively). The vertical integration of water vapor flux is performed from the surface to 300 hPa, and the impacts of topographic have been taken into account; the units of divergence have been converted assuming that the density of liquid water is  $1 \text{ g cm}^{-3}$

区的变暖幅度总体上要弱于同期东西两侧, 这不利于南方气流的北上及其在该地区的上升辐合; 与此相吻合的是, 近些年来东北中部和南部地区相对于前期为偏北风气流异常和向南的水汽通量异常, 整层水汽通量变化以辐散为主 (图 6b); 以上热力场、环流场、水汽通量及其散度场均不利于夏季东北地区降水, 这与前文所得的东北季风区南退趋势相一致。在约  $35^{\circ}\text{N}$  以南的南方地区, 夏季变暖幅度在约  $100^{\circ}\text{E}$  以西的高原地区总体上要大于其东部地区

(图 6a), 从而有利于东部地区的气流向西输送, 具体表现在图 6b 中华南地区主要以偏东风异常为主, 而且与图 5 所示的  $40^{\circ}\text{N}$  以南季风区西进趋势相匹配, 季风区西北边界线附近总体上以向西气流异常和水汽通量辐合为主。

## 4 结论

本文使用了根据 2416 个台站最新资料所得的中国区域高分辨率降水格点数据, 结合其他三套降

水资料,集中研究了 1961~2009 年中国季风区和季风降水及其强度变化,主要结论是:(1)中国季风区呈西南至东北走向,由常年季风区和季风边缘区组成,面积占中国陆地的 60%左右,季风降水从东南向西北方向递减;1961~2009 年中国季风区有减小趋势,主要原因是夏季与冬季降水量之间的差值在下降;(2)中国季风降水强度主要表现为一定的年际和年代际变率,整体上并无明显的变化倾向。在区域上,中国季风区域内降水强度增加集中在长江以南区域,减少的区域主要包括长江中下游地区以及东北大部;(3)季风区西北边界在 40°N 南北两侧呈反向变化,其南侧表现为季风区向西扩张,而在其北侧则表现为向东退缩,这主要是源于区域尺度上纬向热力对比、大气环流、水汽通量及其散度场变化。

**致谢** 感谢两位审稿人的宝贵审阅意见,感谢国家气候中心提供 CN05.2 数据。

### 参考文献 (References)

- 陈隆勋,李薇,赵平,等. 2000. 东亚地区夏季季风爆发过程 [J]. 气候与环境研究, 5 (4): 345–355. Chen Longxun, Li Wei, Zhao Ping, et al. 2000. On the process of summer monsoon onset over East Asia [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 5 (4): 345–355.
- Christensen J H, Kumar K K, Aldrian E, et al. 2013. Climate phenomena and their relevance for future regional climate change [M]// Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al., Eds. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press.
- Ding Y H, Ren G Y, Zhao Z C, et al. 2007. Detection, causes and projection of climate change over China: An overview of recent progress [J]. Adv. Atmos. Sci., 24 (6): 954–971.
- Ding Y H, Sun Y, Wang Z Y, et al. 2009. Inter-decadal variation of the summer precipitation in China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part II: Possible causes [J]. Int. J. Climatol., 29 (13): 1926–1944.
- 富元海,刘宣飞. 2007. 中国北方季风边缘区边界位置的年代际变化 [J]. 南京气象学院学报, 30 (1): 94–100. Fu Yuanhai, Liu Xuanfei. 2007. Interdecadal fluctuations of the monsoon's boundary zone in the northern China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 30 (1): 94–100.
- 高由禧,徐淑英,郭其蕴,等. 1962. 东亚季风的若干问题 [M]. 北京: 科学出版社. Gao Youxi, Xu Shuying, Guo Qiyun, et al. 1962. Some Problems about East Asian Monsoon (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.
- 郭其蕴,蔡静宁,邵雪梅,等. 2004. 1873~2000 年东亚夏季季风变化的研究 [J]. 大气科学, 28 (2): 206–215. Guo Qiyun, Cai Jingning, Shao Xuemei, et al. 2004. Studies on the variations of East-Asian summer monsoon during A D 1873~2000 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28(2): 206–215.
- 何金海,祁莉,韦晋,等. 2007. 关于东亚副热带季风和热带季风的再认识 [J]. 大气科学, 31 (6): 1257–1265. He Jinhai, Qi Li, Wei Jin, et al. 2007. Reinvestigations on the East Asian subtropical monsoon and tropical monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (6): 1257–1265.
- Hsu P C, Li T, Wang B. 2011. Trends in global monsoon area and precipitation over the past 30 years [J]. Geophys. Res. Lett., 38 (8): L08701, doi:10.1029/2011GL046893.
- 胡豪然,钱维宏. 2007. 东亚夏季风北边缘的确认 [J]. 自然科学进展, 17 (1): 57–65. Hu Haoran, Qian Weihong. 2007. Identification of the northernmost boundary of East Asia summer monsoon [J]. Progress in Natural Science (in Chinese), 17 (1): 57–65.
- 黄荣辉. 2010. 东亚季风气候系统变异和我国重大气候灾害发生机理研究进展 [J]. 中国科学院院刊, 25 (2): 202–206. Huang Ronghui. 2010. Recent progresses in research on the variations of the East Asian monsoon Climate system and occurring mechanism of severe climate disasters in China [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 25 (2): 202–206.
- Huffman G J, Adler R F, Bolvin D T, et al. 2009. Improving the global precipitation record: GPCP version 2.1 [J]. Geophys. Res. Lett., 36 (17): L17808, doi:10.1029/2009GL040000.
- IPCC. 2013. Summary for policymakers [M]// Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al., Eds. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press.
- Jiang D B, Wang H J. 2005. Natural interdecadal weakening of East Asian summer monsoon in the late 20th century [J]. Chin. Sci. Bull., 50 (17): 1923–1929.
- Jiang D B, Tian Z P, Lang X M. 2015. Mid-Holocene global monsoon area and precipitation from PMIP simulations [J]. Climate Dyn., 44 (9–10): 2493–2512, doi:10.1007/s00382-014-2175-8.
- Jiang Z, Yang S, He J, et al. 2008. Interdecadal variations of East Asian summer monsoon northward propagation and influences on summer precipitation over East China [J]. Meteor. Atmos. Phys., 100 (1–4): 101–119.
- 江志红,何金海,李建平,等. 2006. 东亚夏季风推进过程的气候特征及其年代际变化 [J]. 地理学报, 61 (7): 675–686. Jiang Zhihong, He Jinhai, Li Jianping, et al. 2006. Northerly advancement characteristics of the East Asian summer monsoon with its interdecadal variations [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 61 (7): 675–686.
- Kendall M G. 1970. Rank Correlation Methods [M]. London: Charles Griffin.
- Lee J Y, Wang B. 2014. Future change of global monsoon in the CMIP5 [J]. Climate Dyn., 42 (1–2): 101–119.
- 李世奎. 1987. 中国农业气候区划 [J]. 自然资源学报, 2(1): 71–83. Li Shikui. 1987. Agroclimatic regionalization of China [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 2 (1): 71–83.
- Liu H W, Zhou T J, Zhu Y X, et al. 2012. The strengthening East Asia summer monsoon since the early 1990s [J]. Chin. Sci. Bull., 57 (13): 1553–1558.
- Mann H B. 1945. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica, 13 (3): 245–259.
- 朴世龙,方精云. 2001. 最近 18 年来中国植被覆盖的动态变化 [J]. 第四

- 纪研究, 21 (4): 294–302. Piao Shilong, Fang Jingyun. 2001. Dynamic vegetation cover change over the last 18 years in China [J]. *Quaternary Sciences (in Chinese)*, 21 (4): 294–302.
- Qi L, He J H, Zhang Z Q, et al. 2008. Seasonal cycle of the zonal land–sea thermal contrast and East Asian subtropical monsoon circulation [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 53 (1): 131–136.
- Sheffield J, Goteti G, Wood E F. 2006. Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling [J]. *J. Climate*, 19 (13): 3088–3111.
- Shi P J, Ha S. 2002. Comparison between Holocene environmental changes in North China agro-pastoral zone and Africa Sahelian belt [J]. *Earth Science Frontiers*, 9 (1): 121–128.
- 史正涛. 1996. 中国季风边缘带自然灾害的区域特征 [J]. *干旱区资源与环境*, 10 (4): 1–7. Shi Zhengtao. 1996. Regional characters of natural disaster in marginal monsoon belt of China [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese)*, 10 (4): 1–7.
- 苏桂武, 张林源. 1998. 中国北方季风边缘区自然灾害环境和成灾过程的特征 [J]. *中国沙漠*, 18 (1): 1–9. Su Guiwu, Zhang Linyuan. 1998. Some features about the disaster-engendering conditions and the disaster-forming process in the monsoon marginal zone in North China [J]. *Journal of Desert Research (in Chinese)*, 18 (1): 1–9.
- Sui Y, Jiang D B, Tian Z P. 2013. Latest update of the climatology and changes in the seasonal distribution of precipitation over China [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 113 (3–4): 599–610.
- 汤绪, 钱维宏, 梁萍. 2006. 东亚夏季季风边缘带的气候特征 [J]. *高原气象*, 25 (3): 375–381. Tang Xu, Qian Weihong, Liang Ping. 2006. Climatic features of boundary belt for East Asian summer monsoon [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 25 (3): 375–381.
- Wang B, Ding Q H. 2006. Changes in global monsoon precipitation over the past 56 years [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (6): L06711, doi:10.1029/2005GL025347.
- Wang B, Ding Q H. 2008. Global monsoon: Dominant mode of annual variation in the tropics [J]. *Dyn. Atmos. Oceans*, 44 (3–4): 165–183.
- Wang B, Liu J, Kim H J, et al. 2012. Recent change of the global monsoon precipitation (1979–2008) [J]. *Climate Dyn.*, 39 (5): 1123–1135.
- Wang H J. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970s [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18 (3): 376–386.
- 吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比 [J]. *地球物理学报*, 56 (4): 1102–1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 56 (4): 1102–1111.
- 肖乾广, 陈维英, 盛永伟, 等. 1996. 用 NOAA 气象卫星的 AVHRR 遥感资料估算中国的净第一性生产力 [J]. *植物学报*, 38 (1): 35–39. Xiao Qianguang, Chen Weiyang, Sheng Yongwei, et al. 1996. Estimating the net primary productivity in China using meteorological satellite data [J]. *Acta Botanica Sinica (in Chinese)*, 38 (1): 35–39.
- Xie P P, Chen M Y, Yang S, et al. 2007. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia [J]. *J. Hydrometeor.*, 8 (3): 608–626.
- 杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 2005. 亚洲季风与中国干湿、农牧气候界线之关系 [J]. *地理科学*, 25 (4): 441–447. Yang Jianping, Ding Yongjian, Chen Rensheng, et al. 2005. Relationship of Asian monsoon with dry and wet climate boundary and agro-pasturing climate boundary [J]. *Scientia Geographica Sinica (in Chinese)*, 25 (4): 441–447.
- Yu R C, Wang B, Zhou T J. 2004. Tropospheric cooling and summer monsoon weakening trend over East Asia [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31 (22): L22212, doi:10.1029/2004GL021270.
- 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.
- 张方敏, 申双和. 2008. 中国干湿状况和干湿气候界限变化研究 [J]. *南京气象学院学报*, 31 (4): 574–579. Zhang Fangmin, Shen Shuanghe. 2008. A study on dry/wet conditions and changes of dry/wet climate boundary in China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 31 (4): 574–579.
- 张淑杰, 张玉书, 陈鹏狮, 等. 2011. 东北地区湿润指数及其干湿界线的变化特征 [J]. *干旱地区农业研究*, 29 (3): 226–232. Zhang Shujie, Zhang Yushu, Chen Pengshi, et al. 2011. Change characteristics of humid index and dry/wet climate boundary in Northeast China [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas (in Chinese)*, 29 (3): 226–232.
- 赵汉光, 张先恭. 1996. 东亚季风和我国夏季雨带的关系 [J]. *气象*, 22 (4): 8–12. Zhao Hanguang, Zhang Xiangong. 1996. The relationship between the summer rain belt in China and the East Asia monsoon [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 22 (4): 8–12.
- 智海, 丹利, 俞永强, 等. 2009. 东亚地区陆地植被净初级生产力与夏季气候的模拟 [J]. *气象学报*, 67 (6): 1032–1044. Zhi Hai, Dan Li, Yu Yongqiang, et al. 2009. Simulation of summer development about vegetation net primary production and climate [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 67 (6): 1032–1044.
- 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 2007. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算 [J]. *植物生态学报*, 31 (3): 413–424. Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Zhang Jinshui. 2007. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing [J]. *Acta Phytocologica Sinica (in Chinese)*, 31 (3): 413–424.