

原韦华, 宇如聪, 傅云飞. 2014. 中国东部夏季持续性降水日变化在淮河南北的差异分析. 地球物理学报, 57(3): 752-759, doi: 10.6038/cjg20140306.

Yuan W H, Yu R C, Fu Y F. 2014. Study of different diurnal variations of summer long-duration rainfall between the southern and northern parts of the Huai River. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(3): 752-759, doi: 10.6038/cjg20140306.

## 中国东部夏季持续性降水日变化 在淮河南北的差异分析

原韦华<sup>1</sup>, 宇如聪<sup>2</sup>, 傅云飞<sup>3</sup>

1 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

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

3 中国科学技术大学地球和空间科学学院大气探测与气候环境实验室, 合肥 230026

**摘要** 本文利用 1961—2006 年我国 285 站观测的逐时降水数据, 分析了中国东部不同地区夏季平均降水日变化随降水持续时间变化特征。虽然整个东部地区都表现为短时降水峰值较一致地出现在下午 17 时左右, 持续较长时间降水在清晨前后发生峰值降水, 但持续性降水日变化的平均峰值时间以淮河为界存在显著南北差异。北部地区的持续性降水峰值主要出现在 02—06 时前后; 南部地区的持续性降水峰值时间出现在 06—10 时。无论是降水强度或频次的日变化峰值的南北差异均较明显, 但降水强度差异更为突出, 且主要表现在持续性强降水中。进一步分析发现: 一方面北部地区持续性强降水开始时间较南部地区更早; 另一方面, 北部地区降水从开始到峰值经历的时间更短。最后, 对持续性强降水峰值时间南北差异的可能原因进行了初步讨论。

**关键词** 降水日变化, 持续性降水, 南北差异

doi: 10.6038/cjg20140306

中图分类号 P461

收稿日期 2013-05-21, 2014-01-18 收修定稿

### Study of different diurnal variations of summer long-duration rainfall between the southern and northern parts of the Huai River

YUAN Wei-Hua<sup>1</sup>, YU Ru-Cong<sup>2</sup>, FU Yun-Fei<sup>3</sup>

1 LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 LASW, Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

3 School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

**Abstract** Using the hourly rain gauge data of 285 stations from 1961—2006, the diurnal variations of rainfall with different duration time over the eastern China was studied. The short-duration rainfall over the whole eastern China presented peaks around 17 Beijing Time (BJT), but the peak time of long-duration rainfall exhibited significant regional differences. Long-duration rainfall over the northern (southern) parts of the Huai River showed the peaks during 02—06 (06—10) BJT. The regional differences existed in both rainfall frequency and intensity, but they were more obvious in the rainfall intensity especially for the long-duration heavy rainfall. Further analysis showed that the differences in rainfall peaks were contributed by the begin time

**基金项目** 国家自然科学基金(41205053 和 41221064)、国家重点基础研究发展计划(2010CB951900)、财政部/科技部公益性行业专项(GYHY201306068 和 GYHY201306016)和水利部公益性行业专项经费项目(201301062)共同资助。

**作者简介** 原韦华, 女, 1985 年生, 副研究员, 主要从事东亚气候的观测分析和数值模拟。E-mail: ywh@lasg.iap.ac.cn

of rainfall events and the time between the start and peak of rainfall jointly. Besides, the possible reasons, accounting for the different diurnal peaks of long-duration rainfall over the southern and northern parts of the Huai River, have also been discussed.

**Keywords** Rainfall diurnal variation, Long-duration rainfall, Regional differences

## 1 引言

作为地球气候系统最基本的变化模态之一,日循环是反映天气和气候系统演变特征的重要指标.降水日变化是大气热力、动力过程对水汽循环影响的综合反映(Sorooshian et al., 2002),同时对天气和气候有重要反馈(Dai, 1999).降水本身重要的经济和社会影响以及降水日变化的重要科学内涵,决定了降水日变化研究的相对重要性.由于东亚季风降水过程的复杂性,人们对其降水特征和演变规律的认识还存在局限.中国东部地区是受东亚季风降水影响的关键区域,围绕该区域降水分布和演变规律的研究始终是热门话题.中国东部降水日变化特征一直受到气象学家的广泛关注(Ramage, 1952; 罗建英等, 2003; 赵宗慈等, 2005).

近年来,由于卫星以及台站观测资料的出现和丰富,极大地增加了对我国东部地区降水日变化特征及其形成机制的认识.利用1991—2004年中国台站雨量计自动观测的降水资料,Yu等(2007a)首次对中国大陆区域的夏季降水日变化特征进行了系统分析,指出中国夏季降水的日变化具有明显的区域特征:西南地区降水主要出现在夜间;华南的降水峰值出现在下午;而我国中东部地区降水峰值时间的区域一致性较差,区域平均的结果呈现出清晨、午后双峰并存的特征.Yu等(2007b)进一步分析发现降水的持续性是分离我国中东部地区两类日变化位相的关键因子:长持续性降水的峰值大多位于夜间和清晨,而短持续性降水的极大值则多出现在下午或傍晚.午后短时降水峰值多由太阳辐射加热日变化引起的热力不稳定解释,而持续性降水清晨峰值的可能多与大尺度环流相联系(Chen, 1983).Chen等(2010)分析了长江流域东西向的持续性降水日变化位相的滞后现象,并指出其与对流层低层环流的日循环相对应.有研究认为,我国东部降水日变化特征与东亚夏季风关系密切(Chen et al., 2009; Yin et al., 2009; Yuan et al., 2010),峰值出现在清晨的持续性降水与东亚夏季风呈现一致的北进南退的季节内演变特征(Yuan et al., 2010).同时也有

研究表明,我国东部的清晨降水峰值多受地形强迫影响(Chen et al., 2009; Yin et al., 2011).He和Zhang(2010)指出,在大尺度山谷风的影响下,自燕山山脉至安徽、江苏地区的降水日变化位相存在自西北向东南的传播特征,传播速度约为13 m/s.然而,已有研究表明,卫星数据可能显著低估我国东部地区的清晨降水峰值(Zhou et al., 2008; Yuan et al., 2012).因此,有必要利用台站数据对我国东部的降水日变化的南北向特征进行进一步分析.此外,此前研究多关注降水量的日变化特征,但对于持续性降水频次以及降水强度日变化特征的研究较少,而降水频次、强度以及降水的持续时间也是反映降水特性的重要指标(Dai, 1999; Trenberth et al., 2003; Sun et al., 2006; Dai et al., 2007).本文从持续性降水事件的降水量、频次和强度等方面,细致比较我国东部区域内的持续性降水日变化特征的异同,增进对我国东部降水日变化现象以及形成机制的理解.

正文第二部分首先介绍文中使用的数据和分析方法;第三部分给出以淮河为界,我国东部持续性降水日变化的南北差异;第四部分对差异产生的可能原因进行讨论;第五部分进行总结.

## 2 数据

本文所用资料为1961—2006年夏季(6—8月)我国285个台站观测的逐时降水、云量和云状数据.数据由国家气象信息中心收集,并进行了严格的质量控制.图1中标示出285个台站的位置分布.

小时降水量大于0.1 mm的时次判定为有降水发生(中国气象局, 2003),降水频次定义为有降水发生的时次占总观测时次的百分比;降水强度则定义为总降水量除以总降水时次(Zhou et al., 2008).降水日变化的振幅定义为 $A = R_{\max}/R_m$ ,其中 $A$ 为振幅, $R_{\max}$ 表示日最大降水值, $R_m$ 为日平均降水.标准化降水序列定义为 $D(h) = R(h)/R_m - 1$ ,其中 $D(h)$ 表示标准化后降水序列, $R(h)$ 表示原始降水序列.为了更加客观地考察降水的持续性,只有当某一降水时次之后连续2 h没有降水时,才判定

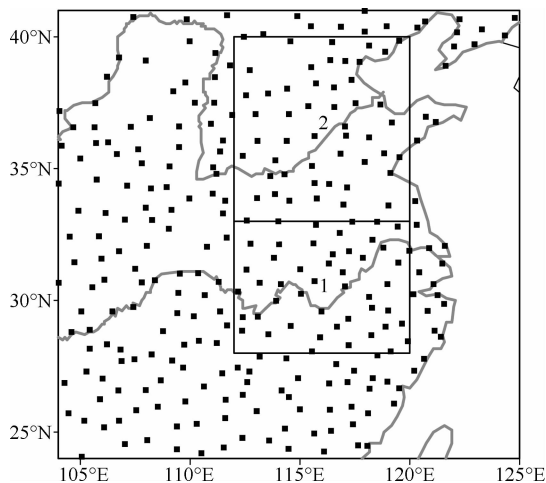


图 1 我国 285 个气象台站的位置分布(黑色实心矩形)

图中南北 2 个矩形标示南方和北方地区. 图中  
灰线标示出长江和黄河干流位置.

Fig. 1 The locations of 285 rain gauge stations over  
mainland China (black solid rectangles)

Two key regions are marked by rectangles: they are the South  
and North region. The locations of the Yellow and Yangtze  
River are marked by gray lines.

一次降水过程的结束. 将一次降水事件开始至结束时间的小时数定义为降水的持续时间. 根据降水的持续时间对降水事件进行分类, 以 1 h 为间隔, 对持续 1~24 h 的降水事件分别进行统计. 本文用到的时间均是北京时间. 将降水开始最频繁的時刻定义为降水的平均开始时间.

Yu 等(2012)、Yu 和 Li (2012)指出, 多年平均的不同小时强度降水的累积降水量通常随着降水强度的增加呈 e 指数递减, 即小时降水强度( $I$ )和该强度降水的累积降水量( $R(I)$ )满足  $R(I) = Ae^{-BI}$ , 其中  $A$  和  $B$  可通过线性拟合确定. 根据 Yu 等(2012)、Yu 和 Li (2012)的结果, 对应 e 折倍累计降水量的降水强度(简称 e 折倍降水强度)约相当于常规定义中第 95 百分位的降水强度. 本文将整个降水事件的峰值降水强度大于 e 折倍降水强度的降水事件定义为强降水事件, 反之则为弱降水事件.

为说明持续性降水发生时的环流状况, 先将 JRA25 再分析(Onogi et al., 2007)环流场插值到各个台站, 再将各个台站上持续性降水发生时刻的环流场进行合成分析.

### 3 结果讨论

图 2 给出夏季 112°E—120°E 平均的标准化后降水量日变化随纬度的分布特征. 由图可见, 在 28°N

以南地区, 降水主要表现为下午峰值, 降水日变化振幅超过 0.7, 而在 28°N—40°N 之间, 降水主要表现为双峰并存的特征, 振幅仅为 0.2 左右. 此外, 我国东部南北各区域的下午降水峰值时间较为一致, 均出现在 17 时左右; 28°N—40°N 之间降水虽然均为双峰, 但在 33°N 以南, 降水峰值主要出现在 06—10 时, 而在 33°N 以北, 降水峰值突然转为 02—06 时; 分界线出现在淮河附近(33°N, 见图 1 中标示). 依据东部地区降水日变化峰值时间的不同特征, 以淮河为界将我国东部地区划分为两个特征区域, 分别为南方(112°E—120°E, 28°N—33°N)和北方(112°E—120°E, 33°N—40°N)地区, 区域范围如图 1 中方框所示.

降水的日变化特征与其持续时间之间存在紧密关系. Yu 等(2007b)指出, 我国中东部地区平均来看, 持续时间超过 6 h 的降水事件的最大降水量通常出现在清晨, 而持续时间在 1~3 h 之间的短持续性降水易于在下午和傍晚达到降水量峰值. 那么, 在东部的两个地区中, 不同持续时间降水的日变化特征是否存在差异呢? 后文以降水事件持续的小时数为标准, 对所有降水事件进行分类, 分析不同持续时间的降水事件的日变化特征.

图 3 给出标准化后我国东部两个区域不同持续时间降水的日变化特征. 由图可见, 持续时间较短的降水事件在两地区的峰值时间较为一致, 均出现在 17 时前后; 而持续时间超过 6 h 的降水事件的峰值时间, 在南方主要出现在清晨至上午, 而在北方则主要出现在午夜至凌晨. 根据降水日变化峰值时间的不同, 将两个区域降水持续时间小于等于 6 h 的降水定义为短时降水, 而降水持续时间大于 6 h 的降水定义为持续性降水. 从图 3 中还可以看出, 随着降水持续时间的增长, 持续性降水峰值时间还存在向上午延迟的特征, 这一现象在南方相对较弱. 北方的持续性降水的峰值较为零散, 部分持续时间的降水事件的日变化振幅相对较弱; 而南方地区则不同, 各持续时间的降水日变化振幅均较强. 上述差异主要是由各个区域不同的持续性降水占总降水比例造成的. 在北方, 持续时间大于 10 h 的降水事件占总降水的 38%, 而在南方此类降水约占总降水的 47%. 相应地, 南方地区所有降水事件的平均持续时间较北方偏长(图略).

由图 3 可知, 图 2 中不同区域总降水日变化特征差异, 主要由持续性降水贡献. 图 4 给出持续时间大于 6 h 的降水事件的降水量、降水频次和降水

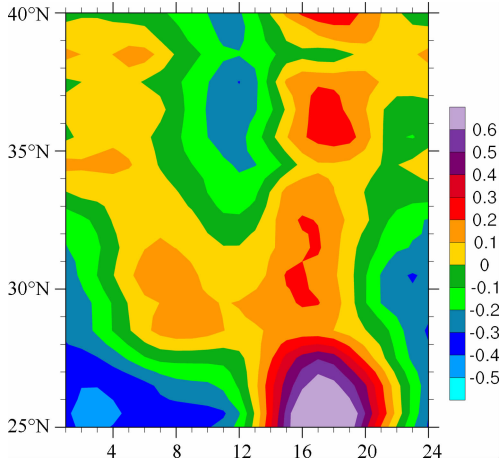


图 2 112°E—120°E 平均的标准化后夏季平均降水量的时间-纬度分布图(横坐标为北京时间)  
 Fig. 2 Time-latitude distributions of the normalized (by the daily mean) diurnal variation of summer rainfall amount averaged between 112°E—120°E in rain gauge data (The X-axis denotes the Beijing Time)

强度的日变化特征. 对于持续性降水量(图 4a), 北方的降水峰值主要出现在 04 时前后; 33°N 以南(南方地区), 降水量的峰值时间突变到 04 时之后, 并且随着纬度的南移, 降水峰值逐渐滞后, 到 28°N 降水峰值延迟到 08 时前后; 33°N 附近的分界线十分明显. 对比持续性降水频次(图 4b)和降水强度(图 4c)日变化的经向特征可知, 33°N 左右的峰值突变在降水频次和降水强度中均十分显著, 但南方地区的降水量峰值的变化特征主要来自于降水强度的贡

献. 对于降水频次(图 4b), 北方地区降水频次峰值均出现在 05 时, 南方地区的降水频次峰值主要出现在 07 时前后. 而南方地区的降水强度(图 4c)位相的变化特征明显, 33°N 处降水强度峰值出现在 08 时, 到 28°N 峰值时间则出现在上午 10 时; 北方地区的降水强度的峰值时间相对稳定, 出现在 02 时前后. 在 25°N 左右, 即使是持续时间在 6 h 以上的降水, 降水量、频次和强度的峰值仍然主要出现在下午 17 时.

进一步将持续性降水分为持续性强降水和持续性弱降水可以发现, 不同强度的持续性降水对东部地区降水日变化位相的南北差异的贡献不同. 以降水强度为例(图 5), 对于弱持续性降水来说(图 5a), 其降水强度的日变化振幅较小, 降水峰值时间在两个地区均出现在中午前后. 而在两个地区主要的区别是: 对于南方地区, 持续性弱降水在 07—15 时均维持在较高水平; 而在北方地区, 降水则在 00 时开始增大, 在凌晨至下午均较强. 在两个区域, 总的持续性降水强度的位相差异均主要由持续性强降水贡献(图 5b), 持续性强降水与总降水的日变化的相关系数在两个地区均超过 0.96.

通常一个降水事件开始后, 需经历数小时才会到达峰值. 那么, 持续性强降水峰值时间的南北差异是由降水的开始时间造成的, 还是南北两地的降水事件从开始到峰值经历的时间不同造成的呢? 图 6a 给出各站的持续性强降水的平均开始时间在各个小时的分布状况. 由图可见, 北方地区超过 60%

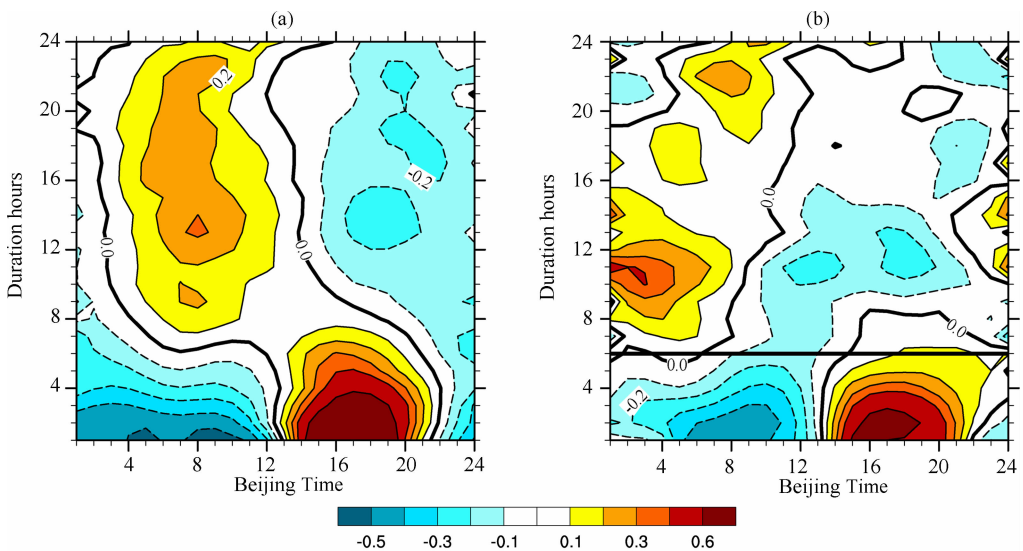


图 3 标准化后夏季平均的(a)南方和(b)北方地区不同持续时间降水事件的降水量的日变化  
 横坐标为北京时, 纵坐标为降水持续时间(单位: h)

Fig. 3 Diurnal variation of normalized summer rainfall amount with different duration time (by the daily mean) averaged in (a) the South and (b) North Region  
 The X-axis denotes the Beijing Time. The Y-axis denotes the duration time (unit: h)

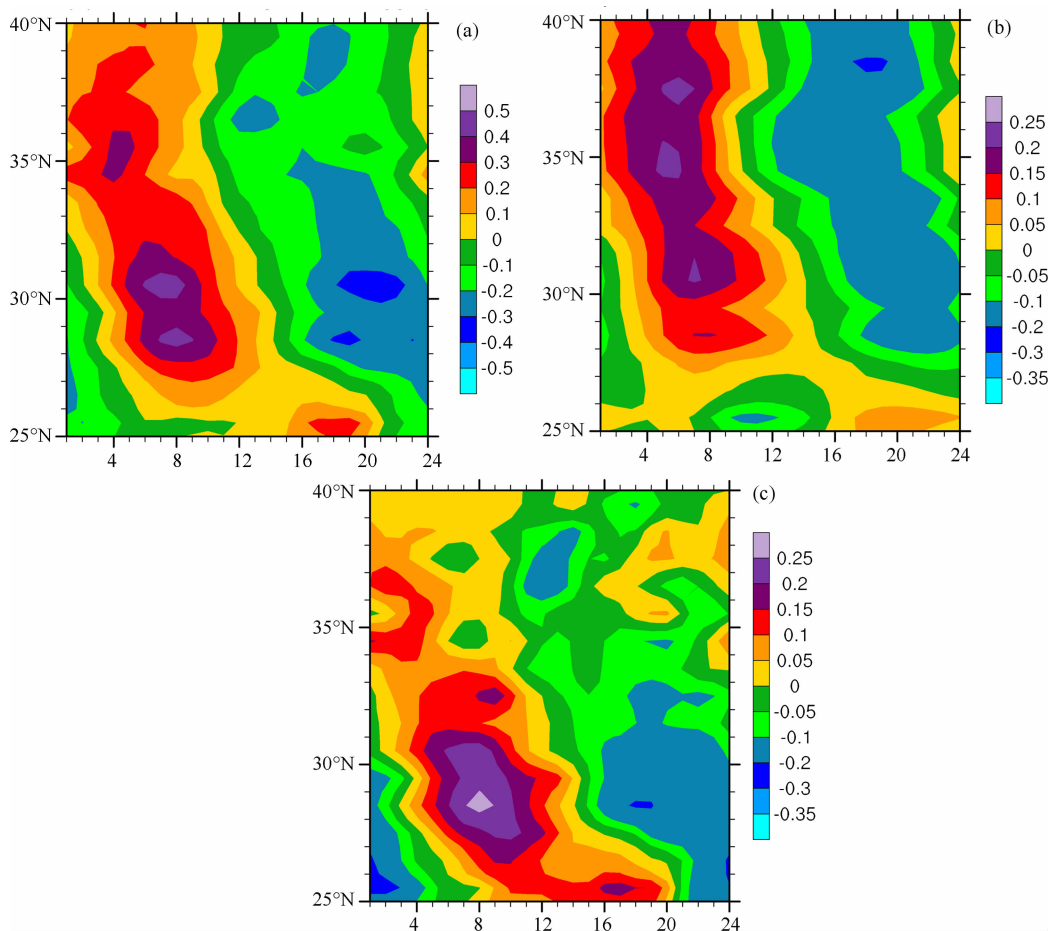


图 4 112°E—120°E 平均的标准化后夏季平均的持续性降水的(a)降水量、(b)频次和(c)强度的时间-纬度分布图. 横坐标为北京时间  
Fig. 4 Time-latitude distributions of the normalized (by the daily mean) diurnal variation of long-duration summer rainfall (a) amount, (b) frequency, and (c) intensity averaged between 112°E—120°E. The X-axis is Beijing time

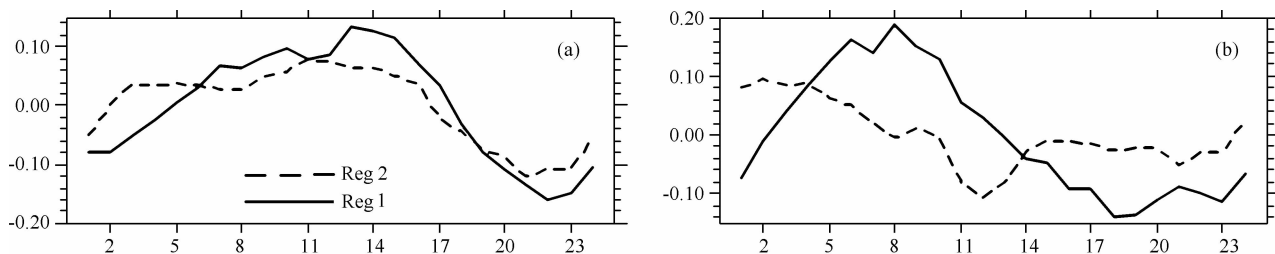


图 5 标准化后南方(实线)和北方(虚线)地区平均的(a)持续性弱降水强度和(b)持续性强降水强度的日变化曲线  
(横轴为北京时间,纵轴为降水强度)

Fig. 5 The normalized diurnal variations of (a) weak and (b) heavy long-duration rainfall intensity averaged in the South (solid lines) and North Region (dashed lines)

台站的降水开始时间出现在 23—02 时,其中 01 时最多;南方地区,超过 64% 台站的降水开始时间出现在 01—04 时,其中 03 时最多. 对于从降水开始到峰值时经历时间的空间分布图可以看出,在长江中下游以及东南沿海地区存在高值中心,而在黄河下游的北部地区存在低值中心,分界线出现在 33°N 附近. 整个南方地区平均的降水发生到峰值的时间为 6.1 h,而北方地区平均为 5.0 h. 所以,持续性强

降水峰值时间的南北差异是由降水开始时间和降水从开始到峰值的时间共同贡献的.

#### 4 机理讨论

将持续性强降水发生时刻的环流场进行合成后发现(图 7),持续性降水峰值的南北差异与对流层低层环流有较好的对应关系. 在 02 时,我国东部对

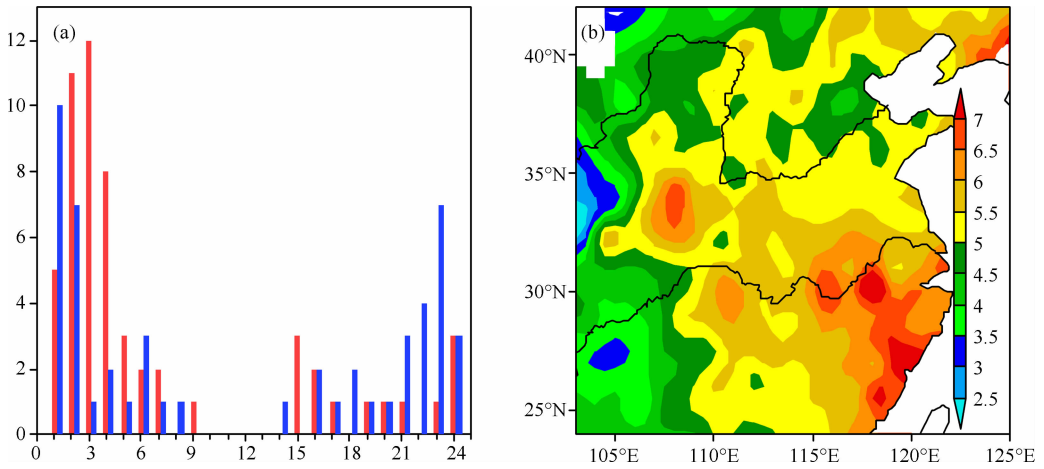


图 6 (a)南方(红色)和北方(蓝色)地区各站的持续性强降雨的平均开始时间出现在各个时段的台站数(单位:台站数), 横坐标为北京时;(b)持续性强降雨事件发生至达到峰值的平均时间(单位:h)  
 Fig. 6 (a) The station numbers of each hour when the long-duration heavy rainfall begins. The X-axis is for the Beijing Time. The red (blue) bars are for the South (North) Region. (b) The mean hours between the start and peak time of long-duration heavy rainfall events (units: h)

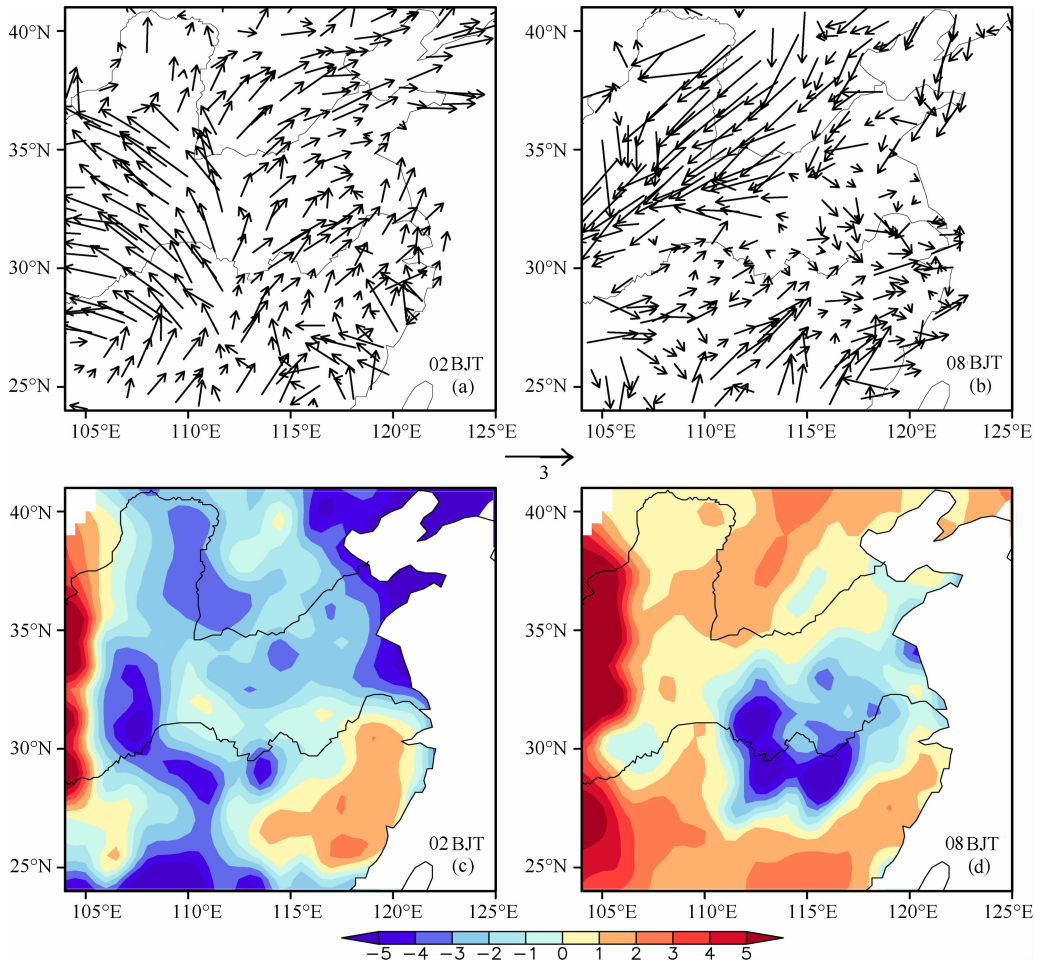


图 7 JRA25 再分析资料合成的持续性降水发生时的 02 北京时和 08 北京时的 850 hPa 风场异常(a,b)(单位:m/s)以及垂直速度异常(c,d)( $10^{-5}$  Pa/s,减去日平均)

Fig. 7 The 850 hPa wind anomaly (minus daily mean) and vertical velocity anomaly at 02 BJT and 08 BJT composited on hours when the long-duration rainfall events occur based on the JRA25 reanalysis

流层低层(850 hPa)盛行南风异常(相对于日平均值),异常辐合区主要位于长江以北(图 7a). 与此对应,北方地区对流层低层为异常上升运动,南方地区以异常下沉运动为主(图 7c). 在 08 时,长江以北的异常风场转变为北风,与长江以南的南风异常一起,在淮河以南地区形成异常辐合(图 7b),南方地区被异常上升运动控制(图 7d),有利于该区域的持续性降水在清晨前后达到最大.

此外,中国东部地区独特的降水日变化地域分布,可能与该区域特殊的云分布与变化特征有关. 中国东部地区是全球中低纬度层状云出现最多的区域(Klein and Hartmann,1993),亦是全球陆地上雨层云分布最大的地区(Yu et al.,2001). 李昉英等(2003)分析了中国南方地区层状云的日变化特征,发现东西部云量的日变化不同. Li 等(2008)在分析不同持续性降水日变化季节差异时,提出导致我国南方地区降水日变化区域差异的一个可能原因,是西南、东南地区云辐射强迫的显著差异. 本文的分析表明,我国东部的降水日变化峰值差异,主要由持

续性降水贡献,而持续性降水与大尺度环流和层状云降水关系紧密(Chen,1983; Chen et al.,2010; Yu et al.,2010; Yuan et al.,2010). 分析东部两区域平均的雨层云(最主要的降水性层状云)的日变化可知(图 8):在南方地区,雨层云的主峰值出现在 08 时前后;而在北方,雨层云峰值时间则提前至 03—04 时;各区雨层云的主峰值均与该区域的持续性降水的峰值时间对应. 由上述分析可见,清晨发生的持续性降水多与大尺度环流以及雨层云等大尺度系统相联系. 与局地强对流系统相比,此类降水系统中冰相粒子的含量相对较少(Sanderson et al.,2006; 原韦华,2011),而微波探测仪对冰粒子后向散射信号较为敏感,对液态粒子的敏感度相对较低,这可能是 Zhou 等(2008)文中提及的微波探测的卫星资料低估清晨降水的原因之一. 雨层云在东部各区的下午至傍晚峰值可能与对流活动相联系,由对流云衰减后形成(Houze,1997). 南北两区域雨层云的形成机制及其与局地地形以及大尺度温湿条件间的联系,值得进一步研究.

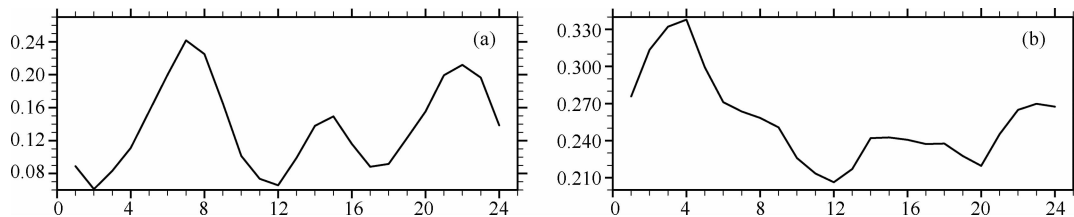


图 8 台站观测的(a)南方和(b)北方地区平均的雨层云云量的日变化(单位:%),横轴为北京时间

Fig. 8 The diurnal cycles of summer nimbostratus averaged in (a) the Yangtze and Huai River valley and (b) North China

## 5 结论和讨论

本文利用 1961—2006 年全国 285 个台站观测逐时降水数据,分析了我国大陆东部地区夏季持续性降水量、频次和强度日变化特征的南北差异.

(1)我国东部的南北两区域夏季降水表现为午后和清晨双峰并存的特征. 两区域午后降水峰值时间较为一致,均出现在 17 时左右. 南北地区的清晨峰值时间差异明显,大约以淮河为界,南方降水主要出现在 06—10 时,而北方降水峰值主要出现在 02—06 时.

(2)我国大陆东部地区夏季平均总降水日变化的南北差异主要由持续性降水贡献. 持续性降水量的峰值时间在淮河(33°N)南北存在显著差异,且无论是降水强度或频次的日变化峰值的南北差异均较明显.

(3)进一步将持续性降水按强度分类,以降水强度为例分析发现,持续性强降水强度的日变化位相在淮南北差异显著,而两个地区的持续性弱降水强度均在中午前后达到最大.

(4)持续性强降水峰值时间的南北差异是由降水开始时间和降水从开始到峰值的时间的南北差异共同贡献的.

致谢 感谢国家气象信息中心为本文提供数据.

## References

- Chen G T J. 1983. Observational aspects of the Mei-Yu phenomenon in sub-tropical China. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 61: 306-312.
- Chen G X, Sha W M, Iwasaki T. 2009. Diurnal variation of precipitation over southeastern China: Spatial distribution and its seasonality. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D13):103.

- Chen H M, Yu R C, Li J, et al. 2010. Why nocturnal long-duration rainfall presents an eastward-delayed diurnal phase of rainfall down the Yangtze River Valley. *Journal of Climate*, 23(4): 905-917.
- China Meteorological Administration. 2003. Specifications for Surface Meteorological Observation. Beijing: China Meteorological Press.
- Dai A. 1999. Recent changes in the diurnal cycle of precipitation over the United States. *Geophysical Research Letters*, 26(3): 341-344.
- Dai A G, Lin X, Hsu K L. 2007. The frequency, intensity, and diurnal cycle of precipitation in surface and satellite observations over low- and mid-latitudes. *Climate Dynamics*, 29(7-8): 727-744.
- He H Z, Zhang F Q. 2010. Diurnal variations of warm-season precipitation over northern China. *Monthly Weather Review*, 138(4): 1017-1025.
- Houze R A. 1997. Stratiform precipitation in regions of convection: A meteorological paradox. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78(10): 2179-2196.
- Klein S A, Hartmann D L. 1993. The seasonal cycle of low stratiform clouds. *Journal of Climate*, 6(8): 1587-1606.
- Li J, Yu R C, Zhou T J. 2008. Seasonal variation of the diurnal cycle of rainfall in southern contiguous China. *Journal of Climate*, 21(22): 6036-6043.
- Li Y Y, Yu R C, Xu Y P, et al. 2003. The formation and diurnal changes of stratiform clouds in southern China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 61(6): 733-743.
- Luo J Y, Wang Z M, Zhou J. 2003. Geographic causes of the daily variation of rainstorm in the Mei-Yu frontal jet. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 26(3): 371-377.
- Onogi K, Tsutsui J, Koide H, et al. 2007. The JRA-25 reanalysis. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 85(3): 369-432.
- Ramage C S. 1952. Diurnal variation of summer rainfall over east China, Korea and Japan. *Journal of Meteorology*, 9(2): 83-86.
- Sanderson V L, Kidd C, McGregor G R. 2006. A comparison of TRMM microwave techniques for detecting the diurnal rainfall cycle. *Journal of Hydrometeorology*, 7: 687-704.
- Sorooshian S, Gao X, Hsu K, et al. 2002. Diurnal variability of tropical rainfall retrieved from combined GOES and TRMM satellite information. *Journal of Climate*, 15(9): 983-1001.
- Sun Y, Solomon S, Dai A, et al. 2006. How often does it rain? *Journal of Climate*, 19(6): 916-934.
- Trenberth K E, Dai A, Rasmussen R M, et al. 2003. The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(9): 1205-1217.
- Yin S Q, Li W J, Chen D L, et al. 2011. Diurnal variations of summer precipitation in the Beijing area and the possible effect of topography and urbanization. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28(4): 725-734.
- Yin S Q, Chen D L, Xie Y. 2009. Diurnal variations of precipitation during the warm season over China. *International Journal of Climatology*, 29(8): 1154-1170.
- Yu R C, Li J. 2012. Hourly rainfall changes in response to surface air temperature over eastern contiguous China. *Journal of Climate*, 25(19): 6851-6861.
- Yu R C, Yu Y Q, Zhang M H. 2001. Comparing cloud radiative properties between the eastern China and the Indian monsoon region. *Advances in Atmospheric Sciences*, 18(6): 1090-1102.
- Yu R C, Xu Y P, Zhou T J, et al. 2007b. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China. *Geophysical Research Letters*, 34(13): L13703.
- Yu R C, Yuan W H, Li J, et al. 2010. Diurnal phase of late-night against late-afternoon of stratiform and convective precipitation in summer southern contiguous China. *Climate Dynamics*, 35(4): 567-576.
- Yu R C, Zhou T J, Xiong A Y, et al. 2007a. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China. *Geophysical Research Letters*, 34(1): L01704.
- Yuan W H. 2012. The diurnal feature of summer precipitation over subtropical China [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences.
- Yuan W H, Li J, Chen H M, et al. 2012. Intercomparison of summer rainfall diurnal features between station rain gauge data and TRMM 3B42 product over central eastern China. *International Journal of Climatology*, 32(11): 1690-1696.
- Yuan W H, Yu R C, Chen H M, et al. 2010. Subseasonal characteristics of diurnal variation in summer monsoon rainfall over central eastern China. *Journal of Climate*, 23(24): 6684-6695.
- Zhao Z C, Ruby L, Qian Y. 2005. Characteristics of summer rainfall in China for the recent years. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 1(1): 29-31.
- Zhou T J, Yu R C, Chen H M, et al. 2008. Summer precipitation frequency, intensity, and diurnal cycle over China: A comparison of satellite data with rain gauge observations. *Journal of Climate*, 21(16): 3997-4010.

## 附中文参考文献

- 李昉英, 宇如聪, 徐幼平等. 2003. 中国南方地区层状云的形成和日变化特征分析. *气象学报*, 61(6): 733-743.
- 罗建英, 王宗敏, 周军. 2003. 梅雨锋急流暴雨日变化的地理原因研究. *南京气象学院学报*, 26(3): 371-377.
- 原韦华. 2012. 中国副热带地区夏季降水日变化特征分析研究 [博士论文]. 北京: 中国科学院研究生院.
- 赵宗慈, Ruby L, 钱云. 2005. 近年中国夏季降水变化特征分析. *气候变化研究进展*, 1(1): 29-31.
- 中国气象局. 2003. 地面气象观测规范. 北京: 气象出版社.