

# 我国东中部地区小时降雨集聚时空特征

徐志搏<sup>1</sup> 王钧<sup>1</sup> 曾辉<sup>1,2,†</sup>

1. 北京大学深圳研究生院, 深圳市循环经济重点实验室, 深圳 518055; 2. 北京大学城市与环境学院生态学系, 北京 100871; † 通信作者, E-mail: zengh@pku.edu.cn

**摘要** 基于1980—2012年1457个站点小时降雨数据, 研究我国中东部地区5—9月降雨集聚指数(PCI)的时空分布特征, 探索PCI与不同降雨强度和不同持续时间小时降雨变量之间的关系, 揭示影响PCI变化的降雨特征变量。研究表明: 我国中东部地区PCI在0.56~0.78之间, 并具有明显的区域差异。东南沿海PCI高于西北内陆, 在东北、华北及四川盆地形成3个高值中心, 并在海拔差异较大的地区发生突变。线性趋势分析表明, 我国中东部地区近33年PCI呈上升趋势。PCI与极端降雨之间呈显著正相关, 且随着降雨量的减少, 相关性显著增强。

**关键词** 小时降雨; 降雨集聚指数(PCI); 时空特征; 极端降雨

**中图分类号** P426; P468

## Spatial-Temporal Patterns of Hourly Precipitation Concentration over Eastern and Central China

XU Zhibo<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>1</sup>, ZENG Hui<sup>1,2,†</sup>

1. Shenzhen Key Laboratory of Circular Economy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055;  
2. Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871;  
† Corresponding author, E-mail: zengh@pku.edu.cn

**Abstract** Hourly precipitation data of 1457 stations during 1980–2012 were used to investigate the spatial-temporal patterns of PCI (precipitation concentration index) from May to September over eastern and central China. The relationships between PCI and other precipitation variables based on different precipitation intensities or different precipitation durations were also analyzed to reveal the variables highly correlated with PCI. The result indicated that the values of PCI over eastern and central China ranged from 0.56 to 0.78 with evident regional variations. The values of PCI in southeastern China were higher than the values in northwestern China. There were three concentrations of high PCI value centers, i.e., Northeast China, North China, and Sichuan Basin. The variations of PCI were found in areas with great altitude difference. The linear trend analysis showed an increasing trend of PCI values over eastern and central China over the past 33 years. In addition, significantly positive correlation relationship between PCI and extreme precipitation was detected, and the correlation coefficient of the two variables increased with the decrease of the total precipitation amount.

**Key words** hourly precipitation; PCI (precipitation concentration index); spatial-temporal patterns; extreme precipitation

降雨既是水循环的重要过程, 又能够调节区域气候, 是全球气候变化的重要表征因子。20世纪, 全球陆地年降雨量的长期变化趋势不显著, 但存在多年震荡特征, 我国降雨的年代际震荡特征尤为明

显, 并表现出较强的区域差异<sup>[1]</sup>。20世纪80年代以来, 我国东部地区呈现“南涝北旱”的空间特征, 即长江中下游地区降雨明显增多, 而黄河流域至华北地区降雨显著减少<sup>[2-3]</sup>。此外, 西北、东北地区

降雨也有所增加<sup>[4]</sup>, 多雨带逐渐向南方移动<sup>[5-6]</sup>。赵华荣<sup>[7]</sup>分析了我国 1960—2010 年降雨变化转折的趋势特征, 得出我国降雨在此期间出现 3 次增/减的转折变化, 并且这种转折变化存在 11 年左右的周期特征。

近年来, 越来越多的学者将研究重点转向极端天气事件。IPCC 第五次报告指出, 近几十年东亚地区干旱事件呈增长趋势(*medium confidence*)<sup>[8]</sup>。由于气候变暖, 东亚地区“水文-气候强度”指数(*hydroclimatic intensity*)从 20 世纪后期以来呈增加趋势, 意味着干旱期长度的延长和(或)极端降雨事件的增加<sup>[9]</sup>。尤其在我国北方地区, 干旱事件的持续时间和影响范围不断扩大<sup>[10]</sup>。以往的研究多集中于分析降雨量的时空分布和变化特征, 以揭示和解释区域干旱化的事实<sup>[11-12]</sup>, 也有学者用地表湿润指数<sup>[13]</sup>、帕尔默干旱指数<sup>[14]</sup>等来反映不同区域地表干湿状况, 并指出降雨是在季节尺度及年际尺度上控制土壤湿度的首要因素<sup>[15]</sup>。但是, 我国干旱的空间特征及时间变化仍存在很大的不确定性<sup>[16-17]</sup>。除降雨量外, 降雨强度、降雨频率以及极端降雨是能够反映降雨特征的变量, 其研究对于深入认识降雨过程及其对地表水循环和地表生态过程的影响十分必要。相关研究表明, 我国南方地区 5—9 月降雨强度和极端降雨日数呈增加趋势, 北方地区降雨量的减少主要是降雨日数的减少导致<sup>[18]</sup>。对降雨频率与土壤湿度之间关系的研究发现, 0~50 cm 土壤湿度与日降雨量大于 10 mm 的降雨日数之间存在显著相关关系<sup>[19]</sup>。

降雨集聚指一段时间内的降雨仅发生在少数时段, 是降雨强度和降雨频率的综合反映。降雨集聚可能会影响地表干湿状态, 加强土壤侵蚀, 严重时可能带来洪涝或干旱灾害, 是地表水资源管理利用中不容忽视的问题。许多学者通过定义降雨指数, 对降雨集聚进行探讨。Zhang 等<sup>[20]</sup>提出降雨集聚程度(*precipitation concentration degree, PCD*)和降雨集中期(*precipitation concentration period, PCP*)的指数, 用以分析降雨的年内集中程度, 并被其他学者应用于东北、西北、华北及长江流域<sup>[21-24]</sup>。降雨集聚指数(*precipitation concentration index, PCI*)也是反映降雨集聚程度的指数, 根据研究时间尺度的差异, 主要有两种集聚指数: Oliver<sup>[25]</sup>及 Michiels 等<sup>[26]</sup>使用的 PCI 是利用月降雨量数据进行分析, 能够较好地表征降雨的季节性特征<sup>[27-30]</sup>; Martin-Vide<sup>[31]</sup>利用

降雨量与降雨强度之间近似的负指数关系, 替代累积降雨量与累积降雨频率的洛仑兹曲线, 并应用基尼系数的计算方式定义 PCI, 能够指示地中海地区降雨强度及土壤侵蚀度, 是一种基于更高时间分辨率降雨数据计算的集聚指数。这一指数已应用于伊朗、阿尔及利亚以及我国新疆和珠江流域盆地的降雨集聚结构分析<sup>[24,32-34]</sup>。

由于观测数据时间分辨率的限制, 以往关于降雨集中特征的研究多是基于月降雨数据或日降雨数据, 利用小时数据开展的降雨特征研究还不充分。历史数据表明, 绝大多数降雨事件仅发生在一天中某个或某几个时段, 暴雨洪涝灾害往往由短时间内的极端强降雨引起<sup>[35]</sup>。气候变暖背景下, 小时尺度的短时间强降雨增加速率可能大于日极端降雨的增加速率<sup>[36]</sup>, 以往研究发现洪涝灾害数据与逐小时强降雨时空分布之间有很好的对应关系<sup>[37]</sup>。大气环流、空气湿度以及温度场的变化对降雨有重要影响<sup>[38]</sup>。地形起伏<sup>[39-40]</sup>及地表下垫面差异<sup>[41]</sup>也可能造成降雨集聚的区域差异。因此, 研究我国中东部地区的 PCI 时空分布特征需综合考虑东亚季风和复杂地形的影响。

本文利用 Martin-Vide<sup>[31]</sup>提出的 PCI 计算方法, 对我国中东部地区 1980—2012 年小时降雨观测数据进行分析, 判断中东部小时降雨集聚的时空分布特征及变化趋势, 探讨近几十年我国降雨集聚的演变特征及区域差异, 考察降雨, 特别是极端降雨与 PCI 之间可能存在的关系, 研究结果对于认识东亚季风与复杂地形影响下的极端降雨变化具有重要意义。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区与数据来源

本研究采用国家气象信息中心提供的我国 2420 个地面国家级站点 1951—2012 年逐小时降雨累积量数据集。国家气象信息中心整合翻斗或虹吸式自记雨量计观测数据和自动雨量传感器观测数据, 形成该数据集, 并对数据集中每小时的累积降雨量进行气候界限值检查、内部一致性检查及时间一致性检查等质量控制检查。该数据集中, 我国北方冬季地表观测数据由于冬季封站而缺测, 西部地区的站点建站时间较短, 数据缺测率较高。根据兼顾保留较多观测站点以及较长连续观测时间有效观测值的原则, 选定 1980—2012 年我国东中部地区(95°E 以

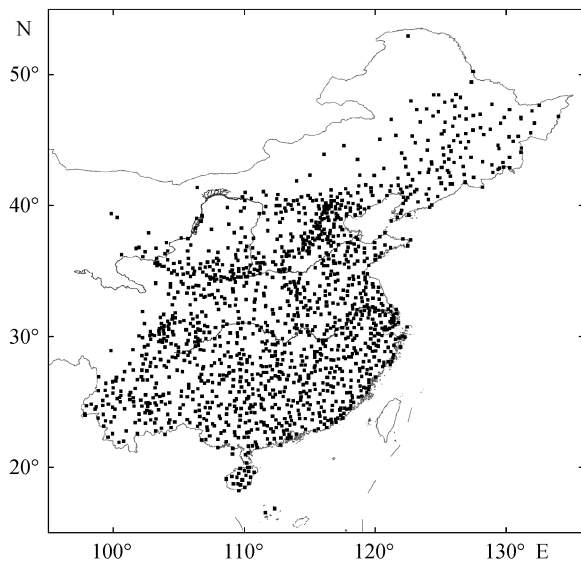


图1 气象观测站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological observation stations

东) 5—9月地表气象观测站的小时降雨数据进行研究。数据预处理过程中, 排除缺测、错误及可疑的小时降雨数据, 仅保留正确的有效数据。如果某个气象观测站点任意一年5—9月缺测、错误和可疑数据的比例超过5%, 则剔除该站点, 最终得到可用小时降雨观测站点1457个(图1)。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 降雨集聚指数(PCI)

一定时段和区域内的降雨量(降雨强度)与对应的累积降雨时长之间存在负指数相关关系<sup>[42]</sup>。基于该原理, 本文采用 Martin-Vide<sup>[31]</sup>提出的 PCI 计算方法, 并应用于小时降雨的集聚分析。PCI 能够反映降雨的集聚情况, 数值越大, 说明降雨越在少数降雨时段内集聚。

以内蒙古呼和浩特地面观测站(站号: 53463) 1980—2012年5—9月的 PCI 计算过程为例。首先, 考虑所有监测降雨量大于等于 0.1 mm 的小时降雨数据, 制作累积降雨小时数百分比(X)和累积降雨量百分比(Y)的散点图(图2)。将所有等级的小时降雨量按照升序排列, 统计对应等级的降雨小时数和降雨量, 逐等级累积降雨量和降雨小时数, 并计算累积百分比, 具体方法参见文献[31]。由于小时降雨量比日降雨量的量级小, 采用 1 mm 的区间划分降雨等级不合适, 因此本文在计算过程中采用 0.1 mm 的区间进行划分, 同时采用真实值, 而不是区间中值作为各等级降雨的小时降雨量。

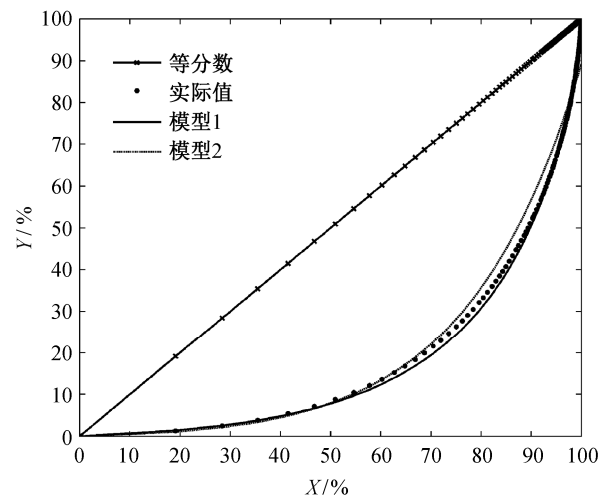


图2 呼和浩特站5—9月降雨集聚曲线

Fig. 2 Concentration curve of precipitation from May to September at Hohhot Station

Riehl<sup>[43]</sup>和 Olascoaga<sup>[44]</sup>提出累积降雨小时数百分比  $X = \sum N_i$  (%)和累积降雨量百分比  $Y = \sum P_i$  (%)之间的指数关系模型(模型1), 公式如下:

$$Y = a X e^{bX}, \quad (1)$$

其中  $a, b$  为常数。通过最小二乘法估计, 得到呼和浩特站  $a=0.0278, b=0.0347$ 。

由于模型1的曲线不一定通过坐标点(100, 100), 因此 Ananthkrishnan 等<sup>[45]</sup>对式(1)进行改进, 提出式(2)的模型(模型2):

$$Y = X e^{[-m(100-X)^c]}, \quad (2)$$

其中  $m, c$  为常数。通过最小二乘法估计, 得到呼和浩特站  $m=0.1078, c=0.7284$ 。

Jolliffe 等<sup>[46]</sup>证明式(1)和(2)的概率分布都是有界的, 高于或低于特定阈值的概率分布密度为0。利用式(1)和(2)均能形成一条指数曲线(图2)。对曲线积分, 得到其与 X 轴之间面积  $S'$ :

$$S' = \int_0^{100} a X e^{bX} dX, \quad (3)$$

或

$$S' = \int_0^{100} X e^{[-m(100-X)^c]} dX. \quad (4)$$

在此基础上, 计算两种曲线预测值与实际观测值之间的均方根误差 RMSE:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{\text{obs},i} - Y_{\text{model},i})^2}{n}}. \quad (5)$$

结果显示,对于研究区所有站点,模型 2 的 RMSE 更小,优于模型 1。因此,应用式(4)得到的  $S'$  值计算 PCI 指数。

定义 PCI 为等分线与曲线之间的面积  $S$  与等分线右下方面积的比值:

$$PCI = S/5000, \tag{6}$$

其中,

$$S = 5000 - S'. \tag{7}$$

最终,计算得出呼和浩特站 1980—2012 年 5—9 月的  $PCI=0.6557$ 。

### 1.2.2 相关分析

本研究选取反映降雨特征的 12 个变量(表 1)与 PCI 进行 Pearson 相关分析,其中降雨持续时间采用 Yu 等<sup>[47]</sup>的定义,即一次降雨事件从开始到结束的持续小时数,中间至多出现 1 次不超过 1 h 的间断。

为了阐明 PCI 与表 1 中变量年际变化之间的关系,在进行相关性分析之前,对表 1 中变量计算标准化得分(Z-score):

$$X_z(i) = \frac{X(i) - \sum_{1980}^{2012} \frac{X(i)}{33}}{\sqrt{\frac{1}{33} \sum_{1980}^{2012} \left[ X(i) - \sum_{1980}^{2012} \frac{X(i)}{33} \right]^2}}, \tag{8}$$

其中,  $X_z(i)$  为标准化得分,  $X(i)$  代表降雨特征变量在  $i$

年的观测值,  $i = 1980, 1981, \dots, 2012$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 我国东中部地区降雨集聚度(PCI)的空间格局

我国东中部地区 1980—2012 年 5—9 月降雨集聚指数整体上呈现东南沿海向西北内陆递减的空间格局(图 3)。所有站点模型 2 的拟合结果与实际观测值之间的 RMSE 均小于 2%,说明模型对经验值拟合结果较好。PCI 的最低值为 0.56,最高值为 0.78,整个区域内小时降雨集聚存在高达 22% 的明显差异。区域内仅 219 个站点的  $PCI \leq 0.67$ ,主要位于黄土高原、内蒙古及东北东部,是小时降雨发生相对分散的地区,而华北及南方地区站点的 PCI 普遍较高(图 3(a))。为了更清晰地识别 PCI 的空间分布差异,利用普通克里金插值得到 PCI 等值线(图 3(b)),显示区域内存在 3 个 PCI 高值中心,分别位于东北、华北及四川盆地,其中华北和四川盆地的 PCI 达到 0.75 以上,且在这两个地区西部边缘等值线更密集,说明 PCI 在这两个地区边缘发生突变。

基于模型 2 的指数曲线,统计各站点小时降雨量最大的 25% 降雨小时对应的累积降雨总量(图 4)。可以看出,PCI 与该统计量之间存在显著的正相关关系(图 4(a)),因此前 25% 降雨小时累积降雨量空间分布与 PCI 基本上呈现一致的区域性分布(图 4(b))。其中,  $PCI=0.67$  对应由小时降雨量最大

表 1 降雨特征变量  
Table 1 Variables of precipitation

| 分类方式 | 变量    | 变量定义                         |
|------|-------|------------------------------|
| 降雨强度 | PA0   | 总累积降雨量(mm)                   |
|      | PA5   | 小时降雨强度超过 5 mm 的累积降雨量(mm)     |
|      | PA10  | 小时降雨强度超过 10 mm 的累积降雨量(mm)    |
|      | PF0   | 总累积降雨时长(h)                   |
|      | PF5   | 小时降雨强度超过 5 mm 的累积降雨时长(h)     |
|      | PF10  | 小时降雨强度超过 10 mm 的累积降雨时长(h)    |
| 降雨历时 | PA3h  | 持续降雨时间不超过 3 h 降雨事件累积降雨量(mm)  |
|      | PA12h | 持续降雨时间不少于 12 h 降雨事件累积降雨量(mm) |
|      | PF3h  | 持续降雨时间不超过 3 h 降雨事件累积降雨时长(h)  |
|      | PF12h | 持续降雨时间不少于 12 h 降雨事件累积降雨时长(h) |
|      | PE3h  | 持续降雨时间不超过 3 h 的累积降雨事件数       |
|      | PE12h | 持续降雨时间不少于 12 h 的累积降雨事件数      |

的前 25%降雨小时所贡献累积降雨量的比例为 75%。结果表明,前 25%最大降雨小时累积降雨量占总降雨量比例最低为 66%,最高达到 84%,极端降雨累积量在所有观测站点之间同样存在约 18%的差异。上述结果反映 PCI 与极端降雨之间的密切关系,说明 PCI 高值区极端降雨的累积量高于 PCI 低值区,PCI 能够较好地呈现极端降雨特征。

## 2.2 我国东中部地区降雨集聚度(PCI)的变化趋势

我国东中部地区 1980—2012 年 PCI 呈现波动中显著上升趋势( $0.00016 \text{ a}^{-1}$ ,  $p = 0.05$ ),小时尺度上降雨呈现集聚特征(图 5(a))。站点尺度的分析表明,多数站点的年 PCI 虽有所增加,但趋势并不显著(图 5(b))。整个东中部地区逐年 PCI 显著变化( $p \leq 0.05$ )的站点仅 90 个,其中 65 个站点(约 72%)为显著增加趋势,最大增加幅度达  $0.0018 \text{ a}^{-1}$ ,25 个站点(约 28%)为显著减小趋势,最大减小幅度为  $0.0017 \text{ a}^{-1}$ 。年 PCI 显著减小的 25 个站点中,仅两个站点的 PCI 小于 0.7。

## 2.3 降雨集聚度(PCI)与其他气候因子年际变化之间的关系

我国中东部地区剔除多年变化趋势后的 PCI 年际波动与其他降雨特征变量之间的 Pearson 相关系数见表 2。从不同小时降雨强度降雨来看,研究区域 5—9 月 PCI 与极端降雨的累积降雨量( $R_{[\text{PCI}, \text{PA}10]} = 0.51$ ,  $p = 0.003$ )及累积降雨时长( $R_{[\text{PCI}, \text{PF}10]} = 0.47$ ,  $p = 0.006$ )之间均存在显著正相关关系,但与 5—9 月累积降雨总量(正相关)及累积降雨时长(负相关)之间相关关系并不显著。从不同持续时间降雨来看,PCI 与短时间降雨( $\leq 3 \text{ h}$ )的累积降雨量、累积降

雨事件数和累积降雨时长的正相关关系不显著,与长时间降雨( $\geq 12 \text{ h}$ )的累积降雨量之间负相关关系不显著,但与累积降雨事件数( $R_{[\text{PCI}, \text{PE}12\text{h}]} = -0.50$ ,  $p = 0.003$ )及累积降雨时长( $R_{[\text{PCI}, \text{PE}12\text{h}]} = -0.54$ ,  $p = 0.001$ )显著负相关。上述结果反映出极端降雨事件对 PCI 的影响是显著的。

PCI 与总体降雨显著相关的站点较少,但分布具有明显的区域性特征。240 个(16%)站点 PCI 与 PA0 显著正相关(图 6(a)),且主要集中在东北、华北及四川盆地,203 个(14%)站点 PCI 与 PF0 显著负相关(图 6(d)),且主要集中在黄土高原。极端降雨对 PCI 的影响十分显著,研究区域 1457 个观测站点中,1241 个站点的  $R_{[\text{PCI}, \text{PA}10]}$ 显著为正(图 6(c)),994 个站点的( $R_{[\text{PCI}, \text{PF}10]}$ )显著为正(图 6(f)),但在东南沿海地区,鲜有 PCI 与 PF5 显著正相关的站点(图 6(e))。另一方面,396 个(27%)站点的  $R_{[\text{PCI}, \text{PA}3\text{h}]}$ 显著为正(图 6(g)),242 个(17%)站点的  $R_{[\text{PCI}, \text{PA}12\text{h}]}$ 显著为负,且主要分布于黄土高原和东南沿海站点,中部地区较少,呈间隔带状分布(图 6(j)),453 个(31%)站点的  $R_{[\text{PCI}, \text{PE}12\text{h}]}$ 以及 576 个(40%)站点的  $R_{[\text{PCI}, \text{PF}12\text{h}]}$ 显著为负(图 6(k)和(l))。

图 7 显示 PCI 与小时降雨量超过 5 mm 和 10 mm 的累积降雨量和累积降雨时长的相关系数随 5—9 月的年降雨量( $P$ )增加而减小的变化趋势。在降雨量较小的站点,PCI 与极端降雨变量显著正相关,随着降雨量不断增加,二者相关关系逐渐减弱,甚至在某些高降雨量站点二者表现出负相关特征。这说明在降雨量偏少的地区,极端降雨的变化对当地小时降雨集聚的影响更明显。对于东南沿海地区,不仅降雨量较大,而且由台风或强对流引起的高强度降雨事件也较多,设定的 5 mm 极端降雨阈值对于这些地区偏低。因此,小时降雨超过 5 mm 的累积降雨时长的变化对内陆地区的 PCI 影响显著,但对东南沿海地区 PCI 的影响不显著(图 6(e))。

## 3 结论与讨论

我国东中部地区小时降雨的 PCI 处于 0.56~0.78 (平均 0.71)范围内,并且 85%的站点 PCI 超过 0.67。与基于日降雨数据计算的世界其他地区的 PCI 相比,高于西班牙的 0.55~0.70 (平均 0.61)<sup>[31]</sup>、伊朗的 0.58~0.73 (平均 0.64)<sup>[32]</sup>及阿尔及利亚的 0.57~0.70 (平均 0.63)<sup>[34]</sup>,这可能与我国东南地区较高频率的对流雨以及台风天气带来的强降雨有关。

表 2 我国中东部地区 PCI 与降雨特征变量的相关关系  
Table 2 Relationship between PCI and variables of precipitation over Eastern and Central China

| 不同降雨强度 |        | 不同降雨历时 |         |
|--------|--------|--------|---------|
| 变量     | R      | 变量     | R       |
| PA0    | 0.17   | PA3h   | 0.34    |
| PA5    | 0.42*  | PE3h   | 0.17    |
| PA10   | 0.51** | PF3h   | 0.18    |
| PF0    | -0.20  | PA12h  | -0.21   |
| PF5    | 0.30   | PE12h  | -0.50** |
| PF10   | 0.47** | PF12h  | -0.54** |

注: \*表示  $p \leq 0.05$ , \*\*表示  $p \leq 0.01$ 。

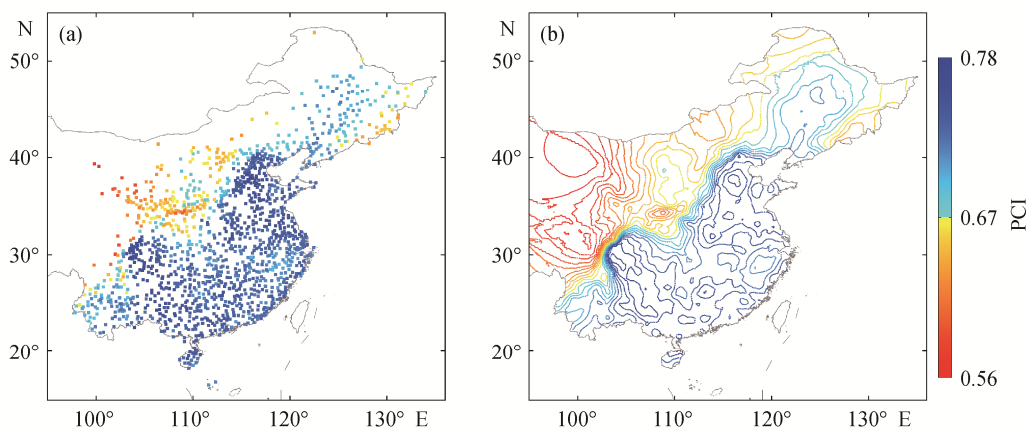


图 3 我国东中部地区站点小时降雨 PCI (a)及 PCI 等值线(b)  
 Fig. 3 PCI in each station (a) and the contour of PCI (b) over eastern and central China

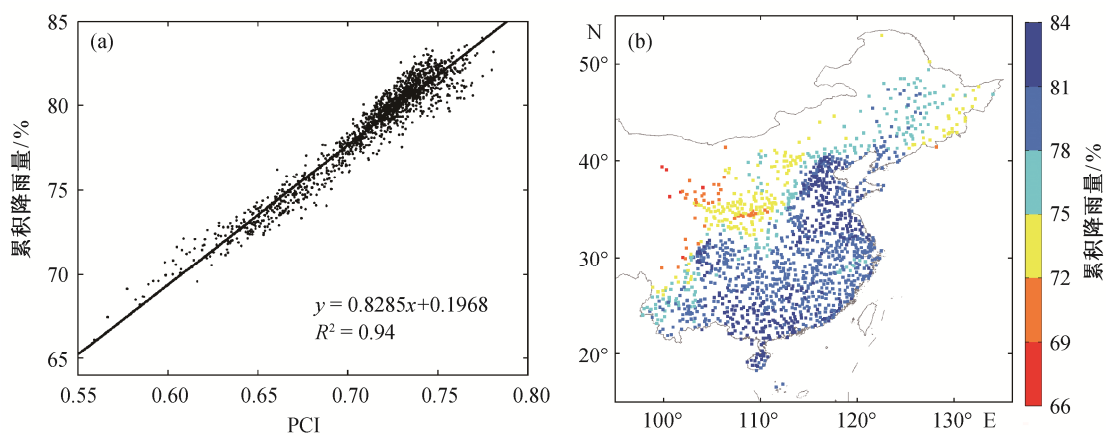


图 4 我国东中部地区站点前 25%降雨小时累积降雨量百分比与 PCI 的关系(a)和前 25%降雨小时累积降雨量百分比的空间分布(b)  
 Fig. 4 Relationship between the percentage of precipitation contributed by 25% of the rainiest hours and PCI (a) and spatial distribution of the percentage of precipitation contributed by 25% of the rainiest hours (b) over eastern and central China

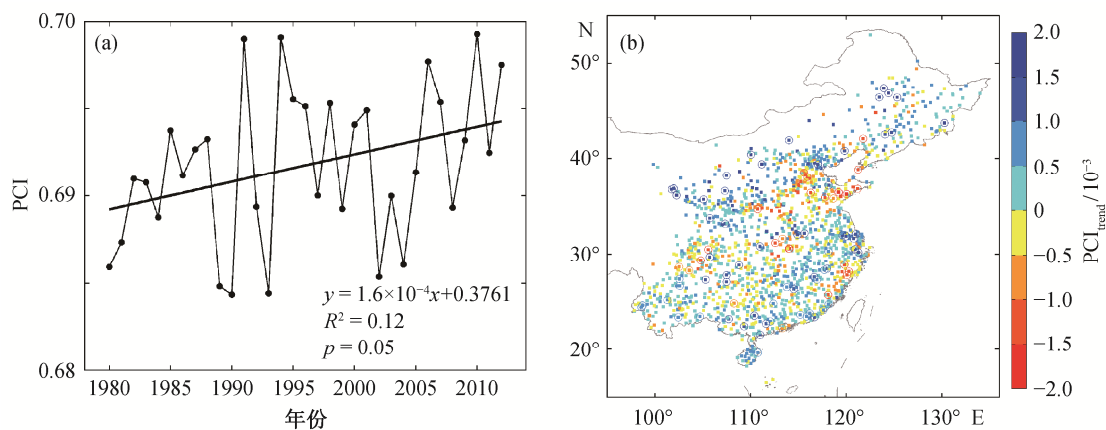
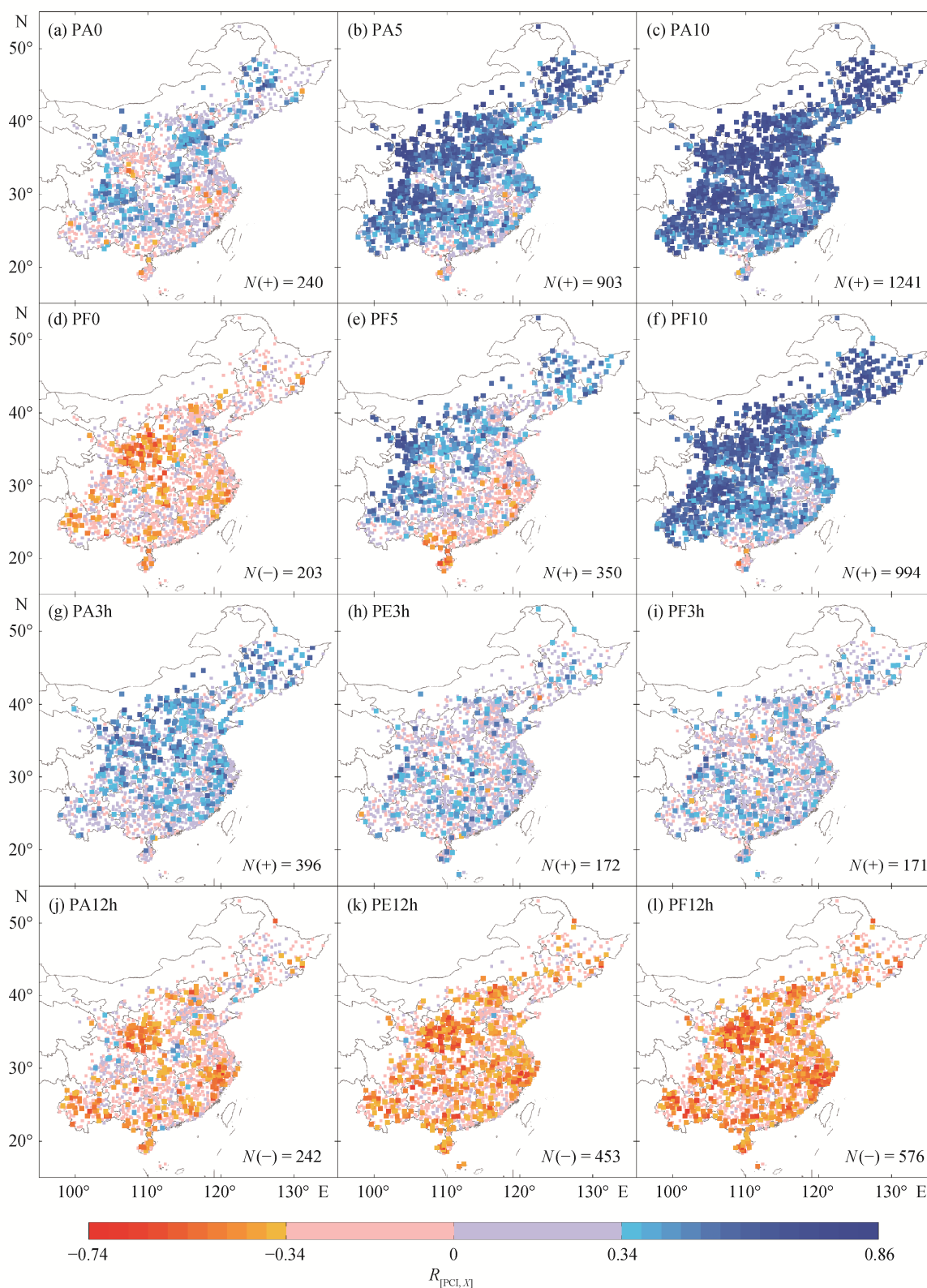


图 5 我国东中部地区 PCI 变化趋势(a)及空间分布(b) (圆圈站点  $p \leq 0.05$ )  
 Fig. 5 Trend of annual PCI (a) and its spatial distribution (b) over eastern and central China (note that  $p \leq 0.05$  in circle-marked stations)



$R_{[PCI, X]} \geq 0.34$  代表置信度超过 95% ( $X$  代表不同的降雨特征变量);  $N(+)/N(-)$  代表 PCI 与其他变量的年际变化显著正/负相关 ( $p \leq 0.05$ ) 的站点数量

图 6 我国东中部地区(1980—2012 年)站点的  $R_{[PCI, X]}$   
 Fig. 6  $R_{[PCI, X]}$  of stations over eastern and central China (1980—2012)

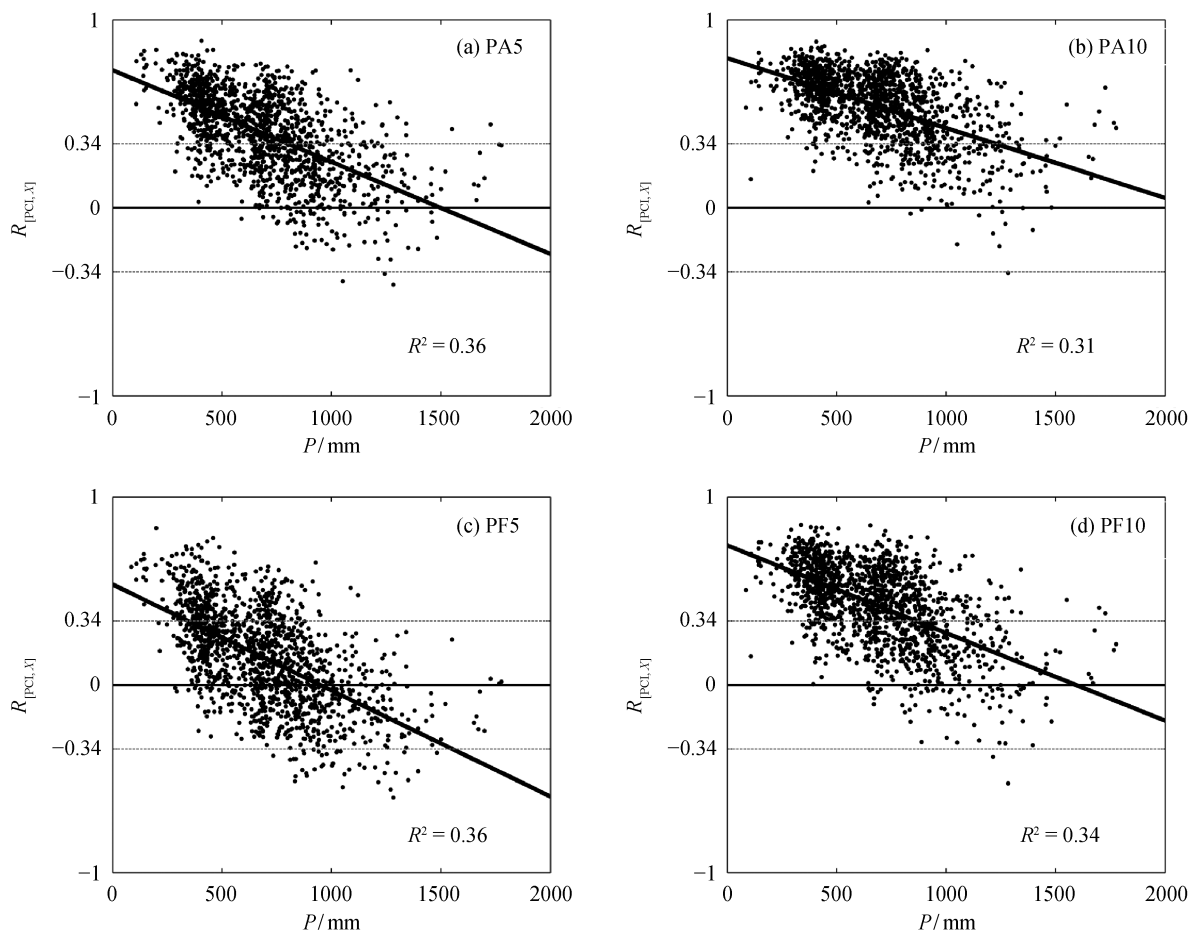


图 7 不同年均降雨量下  $R_{[PCI, X]}$  的变化  
 Fig. 7 Changes of the four  $R_{[PCI, X]}$  along with annual precipitation

与其他研究计算的中国局部地区日降雨的 PCI 相比,基本上吻合:利用小时降雨数据测算的珠江流域站点 PCI 范围为 0.71~0.77,略低于利用日降雨数据测算的珠江流域 PCI (0.74~0.81)<sup>[33]</sup>;同时,新疆地区日降雨的 PCI 介于 0.58~0.70 之间<sup>[24]</sup>。上述 PCI 东南高、西北低的特征与本文的结果基本上一致。PCI 的空间分布格局反映我国东部地区降雨分布的极度不规律与集聚,可能与高强度的暴雨或对流雨较多有关;在西北地区,尽管太阳辐射充足,但空气中水含量远不及东部地区,从而与东部地区相比集聚指数偏低。整个中东部地区,东北、华北和四川盆地是 PCI 的 3 个高值中心。同时,PCI 在华北及四川盆地边缘出现突变,可能是燕山-太行山以及青藏高原的隆起地形所致,充分体现了地形起伏对 PCI 的重要影响。此外,东中部地区 PCI 在 1980—2012 年间显著增加,体现了极端降雨事件日益频繁的特征。

PCI 与极端降雨之间呈显著正相关关系,因此 PCI 能在一定程度上反映一段时期内某地极端降雨事件发生的严重程度。随着总降雨量的减少,PCI 与定义的极端降雨之间的相关关系明显增强,揭示出干旱地区降雨集聚对高强度降雨更突出的响应。PCI 与总降雨(PA0 和 PF0)之间显著相关的站点分布存在区域性差异:PCI 与 PA0 显著正相关的站点主要集中在东北、华北以及四川盆地等 PCI 高值区,而 PCI 与 PF0 显著负相关的站点主要集中在 PCI 较低的黄土高原。相应地,许多站点的 PCI 与短时间降雨( $\leq 3$  h)累积量(PA3h)之间显著正相关。Yu 等<sup>[47]</sup>指出 1~3 h 的降雨偏向于午后出现,由于太阳辐射加热对低层大气稳定性的影响,形成持续短时间、降雨强度大的对流性降雨。因此,可能主要是对流性降雨的变化导致 PCI 与短时间降雨累积量之间存在正相关关系。PCI 与长时间降雨( $\geq 12$  h)累积时长(PF12h)之间显著负相关,可能与长时间降



雨增加了降雨累积时长,并且多数情况下小时降雨强度比对流性降雨偏小有关。与上述变量相比,短时间降雨累积时长和长时间降雨量的变化对 PCI 的影响明显偏弱,体现出短时间降雨和长时间降雨对 PCI 影响的差异。

PCI 弥补了以往研究中单独考虑降雨量、降雨频率的不足,并对极端降雨有很好的指示作用。在全球升温背景下,极端降雨事件发生愈加频繁,集中发生的高强度降雨增加了降雨的不确定性。基于小时降雨的 PCI 对深入揭示降雨结构、提高相关模型预测的准确度具有一定的参考价值。本文仅围绕观测事实进行讨论,未来需对其发生机制进行深入的研究。

### 参考文献

- [1] 赵宗慈, 罗勇, 江滢, 等. 全球和中国降水、旱涝变化的检测评估. 科技导报, 2008, 26(6): 28–33
- [2] 丁一汇, 任国玉, 赵宗慈, 等. 中国气候变化的检测与预估. 沙漠与绿洲气象, 2007, 1(1): 1–10
- [3] Li Jian, Yu Rucong, Yuan Weihua, et al. Changes in duration-related characteristics of late-summer precipitation over eastern China in the past 40 years. *Journal of Climate*, 2011, 24(21): 5683–5690
- [4] 陈隆勋, 周秀骥, 李维亮, 等. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制. 气象学报, 2004, 62(5): 634–646
- [5] Gong D Y, Ho C H. Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(10): 78-1–78-4
- [6] Wu Renguang, Wen Zhiping Yang Song, et al. An interdecadal change in southern China summer rainfall around 1992/93. *Journal of Climate*, 2010, 23(9): 2389–2403
- [7] 赵华荣. 中国 1960—2010 年降雨增减、转折时空演变特征. 热带地理, 2013, 33(4): 414–419
- [8] IPCC. *Climate change 2013: the physical science basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- [9] Giorgi F, Im E S, Coppola E, et al. Higher hydroclimatic intensity with global warming. *Journal of Climate*, 2011, 24(20): 5309–5324
- [10] Zou Xukai, Zhai Panmao, Zhang Qiang. Variation in droughts over China: 1951–2003. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(4): L04707
- [11] 左洪超, 吕世华, 胡隐樵. 中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析. 高原气象, 2004, 23(2): 238–244
- [12] Frieler K, Meinshausen M, von Deimling T S, et al. Changes in global-mean precipitation in response to warming, greenhouse gas forcing and black carbon. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: L04702
- [13] 王允, 刘普幸, 曹立国, 等. 基于湿润指数的 1960—2011 年中国西南地区地表干湿变化特征. 自然资源学报, 2014, 29(5): 830–838
- [14] Dai Aiguo, Trenberth K E, Qian Taotao. A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(6): 1117–1130
- [15] Nie Suping, Luo Yong, Zhu Jiang. Trends and scales of observed soil moisture variations in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2008, 25(1): 43–58
- [16] Robock A, Vinnikov K Y, Srinivasan G, et al. The global soil moisture data bank. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(6): 1281–1299
- [17] Li Haibin, Robock A, Liu Suxia, et al. Evaluation of reanalysis soil moisture simulations using updated Chinese soil moisture observations. *Journal of Hydro-meteorology*, 2005, 6(2): 180–193
- [18] Song Yanling, Achberger C, Linderholm H W. Rain-season trends in precipitation and their effect in different climate regions of China during 1961–2008. *Environmental Research Letters*, 2011, 6(3): 034025
- [19] Piao Shilong, Yin Lei, Wang Xuhui, et al. Summer soil moisture regulated by precipitation frequency in China. *Environmental Research Letters*, 2009, 4(4): 044012
- [20] Zhang Lujun, Qian Yongfu. Annual distribution features of the yearly precipitation in China and their interannual variations. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 17(2): 146–163
- [21] 张录军, 钱永甫. 长江流域汛期降水集中程度和洪涝关系研究. 地球物理学报, 2004, 47(4): 622–630
- [22] 张天宇, 程炳岩, 王记芳, 等. 华北雨季降水集中度和集中期的时空变化特征. 高原气象, 2007, 26(4): 843–852
- [23] 张运福, 胡春丽, 赵春雨, 等. 东北地区降水年内分配的不均匀性. 自然灾害学报, 2009, 18(2): 89–94
- [24] Li Xuemei, Jiang Fengqing, Li Lanhai, et al. Spatial

- and temporal variability of precipitation concentration index, concentration degree and concentration period in Xinjiang, China. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(11): 1679–1693
- [25] Oliver J E. Monthly precipitation distribution: a comparative index. *Professional Geographer*, 1980, 32(3): 300–309
- [26] Michiels P, Gabriels D, Hartmann R. Using the seasonal and temporal precipitation concentration index for characterizing monthly rainfall distribution in Spain. *Catena*, 1992, 19(1): 43–58
- [27] Luis M, González-Hidalgo J C, Brunetti M. Precipitation concentration changes in Spain 1946–2005. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2011, 11(5): 1259–1265
- [28] Coscarelli R, Caloiero T. Analysis of daily and monthly rainfall concentration in Southern Italy (Calabria region). *Journal of Hydrology*, 2012, 416/417: 145–156
- [29] Faticchi S, Ivanov V Y, Caporali E. Investigating interannual variability of precipitation at the global scale: is there a connection with seasonality?. *Journal of Climatology*, 2012, 25(25): 5512–5523
- [30] 段亚雯, 朱克云, 马柱国, 等. 中国区域 1961—2010 年降水集中指数(PCI)的变化及月分配特征. *大气科学*, 2014, 38(6): 1124–1136
- [31] Martin-Vide J. Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in peninsular Spain. *International Journal of Climatology*, 2004, 24(8): 959–971
- [32] Alijani B, O'Brien J, Yarnal B. Spatial analysis of precipitation intensity and concentration in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 2008, 94(1/2): 107–124
- [33] Zhang Qiang, Xu Chongyu, Gemmer M, et al. Changing properties of precipitation concentration in the Pearl River basin, China. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 2009, 23(3): 377–385
- [34] Benhamrouche A, Bouchereff D, Hamadache R, et al. Spatial distribution of the daily precipitation concentration index in Algeria. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2015, 15(3): 617–625
- [35] 金炜昕, 李维京, 孙丞虎, 等. 夏季中国中东部不同历时降水时空分布特征. *气候与环境研究*, 2015, 20(4): 465–476
- [36] Yin Shuiqing, Gao Ge, Li Weijing, et al. Long-term precipitation change by hourly data in Haihe River basin during 1961–2004. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(10): 1576–1585
- [37] Hitchens N M, Brooks H E, Schumacher R S. Spatial and temporal characteristics of heavy hourly rainfall in the United States. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(12): 4564–4575
- [38] Osborn T J, Hulme M, Jones P D, et al. Observed trends in the daily intensity of United Kingdom precipitation. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(4): 347–364
- [39] Xu Weixin. Precipitation and convective characteristics of summer deep convection over East Asia observed by TRMM. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(5): 1577–1592
- [40] Qian Tingting, Zhao Ping, Zhang Fuqing, et al. Rainy-season precipitation over the Sichuan Basin and adjacent regions in Southwestern China. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(1): 383–394
- [41] Zhao Yuchun. Diurnal variation of rainfall associated with tropical depression in South China and its relationship to land-sea contrast and topography. *Atmosphere*, 2014, 5(1): 16–44
- [42] Brooks C E P, Carruthers N. *Handbook of statistical methods in meteorology*. London: Meteorological Office, 1953
- [43] Riehl H. Some aspects of Hawaiian rainfall. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1949, 3(5): 176–177
- [44] Olascoaga M J. Some aspects of Argentine rainfall. *Tellus*, 1950, 2(4): 312–318
- [45] Ananthakrishnan R, Soman M K. Statistical distribution of daily rainfall and its association with the coefficient of variation of rainfall series. *International Journal of Climatology*, 1989, 9(5): 485–500
- [46] Jolliffe I T, Hope P B. Representation of daily rainfall distributions using normalized rainfall curves. *International Journal of Climatology*, 1996, 16(10): 1157–1163
- [47] Yu Rucong, Xu Youping, Zhou Tianjun J, et al. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(13): L13703