

佟晓辉, 刘向培, 贾庆宇, 等. 2017. 1960~2011年中国日降水集中程度的时空变化特征 [J]. 气候与环境研究, 22 (3): 301-314. Tong Xiaohui, Liu Xiangpei, Jia Qingyu, et al. 2017. Spatial and temporal variability of daily precipitation concentration in China during 1960-2011 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (3): 301-314, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15248.

1960~2011年中国日降水集中程度的时空变化特征

佟晓辉¹ 刘向培¹ 贾庆宇² 赫英明³ 杨成荫⁴

¹ 解放军31440部队, 沈阳110027

² 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳110016

³ 解放军理工大学气象海洋学院, 南京211101

⁴ 空军哈尔滨飞行学院, 哈尔滨150001

摘要 利用1960~2011年的日降水资料, 计算降水集中指数(Concentration Index, CI), 分析中国区域降水集中程度的空间分布及时间变化特征, 得到以下主要结论: CI指数可有效描述我国日降水集中程度; 我国CI指数介于0.575与0.750之间, 平均为0.652, 总体呈现出东部大、西部小, 夏季大、冬季小的特征; 44.17%站点的CI指数表现出增加趋势, 55.83%的站点表现出减少趋势, 其中10.36%站点的变化趋势通过95%信度水平的显著性检验, CI指数显著增大的站点主要分布在西北、华中和西南地区, 显著减小的站点主要分布在东北、华北、东南沿海及青藏高原东部等地区; 3~5年是各子区域CI指数变化的主要周期, 与对应区域降水量的变化周期较一致; 1970年左右和2000年左右是显著周期性变化出现较集中的时间段。

关键词 中国 降水集中指数(CI) Mann-Kendall检测 小波分析

文章编号 1006-9585 (2017) 03-0301-14

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15248

Spatial and Temporal Variability of Daily Precipitation Concentration in China during 1960-2011

TONG Xiaohui¹, LIU Xiangpei¹, JIA Qingyu², HE Yingming³, and YANG Chengyin⁴

¹ Unit No. 31440 of People's Liberation Army of China, Shenyang 110027

² Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110016

³ College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

⁴ Harbin Flying College of Airforce, Harbin 150001

Abstract Based on daily precipitation data during 1960 and 2011, the precipitation concentration index (CI) is calculated for the purpose to study the spatial and temporal variability of daily precipitation concentration in China. The results are as follows. CI can well reflect the degree of precipitation concentration over China. The value of CI is between 0.575 and 0.750, and its mean value is 0.652. The CI values are large in eastern China and in the summer, and small in western China and in the winter. 44.17% of the stations show an upward trend of CI change and 55.83% show a trend of CI decrease, but the trends of CI change at only 10.36% of these stations are significant at the 95% confidence level. Those stations with significant CI increases are mainly distributed over northwestern China, central China, and southwestern China, while those stations with significant CI decreases are mainly distributed over northeastern China,

收稿日期 2015-11-05 收到; **网络预出版日期** 2016-12-28

作者简介 佟晓辉, 男, 1974年出生, 工程师, 主要研究中短期天气预报和短期气候预测。E-mail: sytongxiaohui@sina.com

通讯作者 刘向培, E-mail: xp_Liu@foxmail.com

资助项目 国家自然科学基金资助项目 41275012、41405135

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41275012, 41405135)

northern China, southeastern coastal areas of China and the eastern Tibetan Plateau. The dominant period of CI change is 3 to 5 years, which is the same as that of precipitation. Significant periodic changes in CI are concentrated within the period from 1970 to 2000.

Keywords China, Precipitation concentration index (CI), Mann-Kendall test, Wavelet analysis

1 引言

近百年来,全球气候和环境发生了以增暖为主要特征的显著变化,全球平均地表温度上升了 $0.56\sim 0.92\text{ }^{\circ}\text{C}$ (IPCC, 2007)。气温的升高导致大气可承载最大水汽量增加 (Chou and Lan, 2012; 段亚雯等, 2014),水循环速率加快 (袁喆等, 2014),降水的时空分布改变,干旱、洪涝等极端气候事件发生频率明显增加 (Le Treut et al., 2007; IPCC, 2012)。中国是易受气候变化影响的国家,近 50 年来,我国平均降水呈现出不明显的增加趋势 (姜江等, 2015),东部地区的降水在 20 世纪 70 年代末期由“北涝南旱”型转换为“南涝北旱”型,西北西部的降水从 20 世纪 80 年代中期开始明显增多 (丁一汇等, 2007); 400 mm 和 800 mm 等雨量线表现出年际偏移特征,诱发了一系列资源、环境、农业和社会经济效益 (袁喆等, 2014)。

全球气候变化及其对人类社会的影响受到社会各界的普遍关注。针对中国、美国等地的研究表明,在降水日数减少的同时,降水强度显著增加是降水变化的一个重要特征 (Karl et al., 1996; Gong and Ho, 2002; Zhai et al., 2005)。1990 年以来,降水空间分布、时间集中程度的改变导致中国多个流域洪涝灾害频发 (Zhang et al, 2009; Li et al, 2011; 刘永林等, 2015)。为定量衡量降水时间集中程度, Oliver (1980) 和 Michiels et al. (1992) 基于月降水资料定义了降水集中指数 (Precipitation Concentration Index, PCI), 并应用于西班牙 (de Luis et al., 2011)、意大利 (Coscarelli and Caloiero, 2012)、中国 (段亚雯等, 2014; Jiang et al., 2016) 等地区,该指数计算简便,物理意义直观,能够较好的表征降水在年内的集中程度及其季节性,但不能明确表征降水集中度的月变化特征 (段亚雯等, 2014)。Zhang and Qian (2003) 基于向量的思想,针对月降水资料定义了降水集中度 (Precipitation Concentration Degree, PCD) 和降水集中期 (Precipitation Concentration Period, PCP), 以描述年内降水的集中程度及其时间,该指数广泛应用于我国长江流域 (张录军和钱

永甫, 2004)、华北 (张天宇等, 2007)、新疆 (Li et al., 2011) 等地区的降水特征分析。连续多日的高强度降水是引发洪涝灾害的重要诱因之一,为分析日降水的集中程度, Martin-Vide (2004) 定义了降水集中指数 (Concentration Index, CI), 该指数可以在日尺度描述不同强度降水对总降水的贡献。目前,该指数在中国区域的应用仅局限于珠江流域 (Zhang et al., 2009)、澜沧江流域 (Shi et al., 2013)、新疆地区 (Li et al., 2011)、淮河上游 (Shi et al., 2014) 等局部区域,尚无对整个中国的系统分析。我国面积广阔,干旱、洪涝灾害频发,基于该指数研究我国日降水的集中程度,分析其在 1961~2011 年间的时间变化及空间分布特征有助于进一步了解我国降水特征,促进旱涝灾害的预防及应对。

2 数据与方法

2.1 数据

本文基于国家气象信息中心发布的中国地面气候资料日值数据集 (V3.0) 的日降水资料计算各站点的降水集中指数 (CI)。由于各站点观测数据的起始时间及完整程度不同,为确保数据的完整性,本文选用 1960~2011 年间完整率高于 95% 的 768 个站点降水数据,并用缺测日的多年平均降水量插补缺测数据。为分析不同区域的降水集中指数,本文将中国划分为东北、华北、西北、华东、华中、西南、青藏和华南等 8 个子区域 (Jiang et al., 2016; 刘向培等, 2011), 选取站点及各子区域的分布如图 1 所示。

2.2 方法

为研究不同强度日降水,尤其是高强度日降水对年降水的贡献,进而在日尺度分析降水集中程度, Martin-Vide (2004) 提出了 CI 指数,这里对 CI 指数的基本原理及计算过程做简要介绍。

日降水量对年总降水量的累计贡献率可以用指数函数描述,累计降水日数百分比 (X) 与累计日降水量百分比 (Y) 之间的指数型关系为

$$Y = aXe^{bX}, \quad (1)$$

其中, a 和 b 为常数,可以基于观测数据,采用最小二乘法计算。方程 (1) 的曲线被称为洛仑兹曲

线。在本文中,当日降水强度小于 0.1 mm/d 时,将当日记为无降水;当日降水量大于 0.1 mm/d 时,以 1 mm 为增量,计算日降水量小于每个降水量值的累计降水日数以及对应的累计降水量,进而计算累计降水日数(累计降水量)占全年总降水日数(总降水量)的百分比。这里以饶阳站和义乌站为例,基于观测数据计算这两个站点的累计降水日数百分比与累计降水量百分比,图 2 中横坐标为累计降

水日数百分比,纵坐标为累计降水量百分比,图中散点反映二者的对应关系,图中的曲线即为基于散点数据拟合得到的洛仑兹曲线。

饶阳站位于河北省中部偏南,1960~2011 年年平均降水量 519.45 mm ,平均降水日数为 66.63 d ,义乌站位于浙江省中部,1960~2011 年年平均降水量 1352.23 mm ,平均降水日数 149.54 d 。由图 2 可以发现,在累计降水日数百分比相同的情况下,饶阳站的

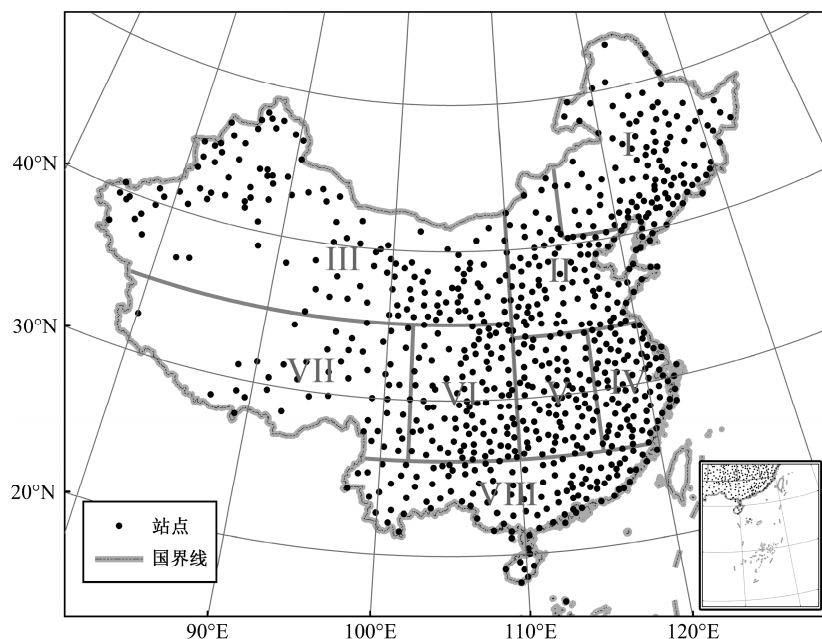


图 1 站点分布及区域划分 (I: 东北, II: 华北, III: 西北, IV: 华东, V: 华中, VI: 西南, VII: 青藏, VIII: 华南)

Fig. 1 Distribution of rain gauge stations and subzones (I: Northeast China, II: North China, III Northwest China, IV: East China, V: Central China, VI: Southwest China, VII: Xizang, VIII: South China)

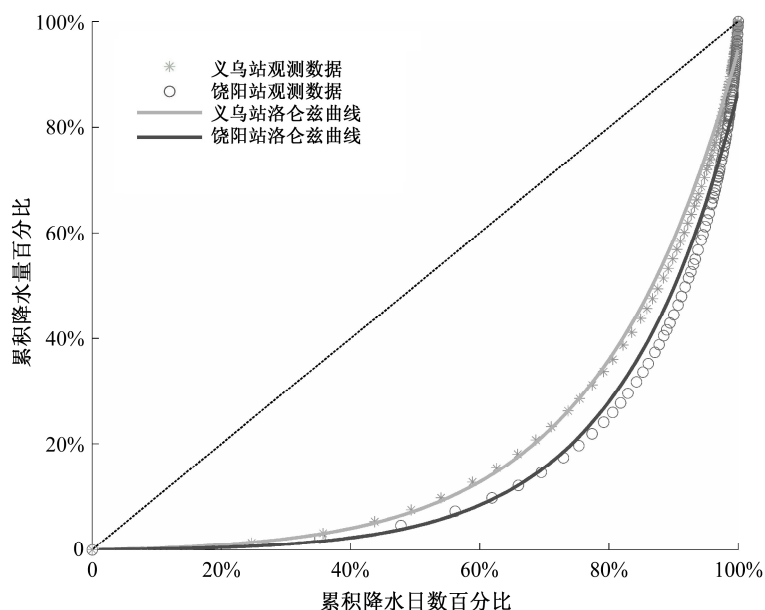


图 2 观测数据及洛仑兹曲线

Fig. 2 Precipitation observations and Lorenz curves

累计降水量百分比小于义乌站,例如,当累计降水日数百分比为 80%时,饶阳站和义乌站的累计降水量百分比分别为 27.95%和 35.98%,也就是说饶阳站 80%的弱降水日数的降水量占总降水量的 27.95%,其余降水强度相对较大的 20%降水日数的降水量占总降水量的 72.05%,而义乌站 80%的弱降水日数的降水量占总降水量的 35.98%,其余降水强度相对较大的 20%降水日数的降水量占总降水量的 64.02%。对比两站数据可以发现,饶阳站强降水对总降水量的贡献率大于义乌站,因此其降水集中程度大于义乌站。进一步观察图 2 可以发现,降水集中程度与洛仑兹曲线和虚线(45°)线之间部分的面积 S 具有正相关关系,当日降水集中程度较弱时,该部分面积较小,反之则面积较大。根据 S 与日降水集中程度间的对应关系, Martin-Vide (2004) 将 CI 指数 (I) 定义为

$$I = \frac{S}{5000}, \quad (2)$$

为计算 CI 指数,首先要计算 S 。图 2 中 S 可以表示为虚线(45°线)与横向坐标轴之间部分面积(数值为 5000)和洛仑兹曲线与横向坐标轴之间部分面积 A 的差值,即:

$$S = 5000 - A. \quad (3)$$

洛仑兹曲线与横向坐标轴之间部分的面积可以表示为

$$A = \left[\frac{a}{b} e^{bx} \left(x - \frac{1}{b} \right) \right]_0^{100}, \quad (4)$$

这样,得到 A , 就可以根据公式 (2)、(3) 得到 CI 指数。上述饶阳站的 CI 指数为 0.71, 义乌站的为 0.62, 对比两站降水集中程度及 CI 指数可以发现, CI 指数能够反映日降水分布的集中程度, CI 越大, 降水集中程度越高, 反之亦然。为进一步检验 CI 指数描述我国降水集中程度的能力, 下图 3 给出了各站点 CI 指数与 R25 的散点分布图。R25 是 25%最强降水日数的降水量占总降水量百分比, 是描述降水集中程度的一个简单指标, 它的计算方法是, 对日降水量从大到小排序, 选取日降水量最大的 25%降水日数, 计算这些天降水量之和占有所有降水日数总降水量的百分比, 如果 R25 较大, 那么可以初步说明降水集中程度较高, 反之亦然。由图 3 可以发现, CI 指数与 R25 之间具有较好的相关性, 相关系数高达 0.98 (通过 95%信度水平的显著性检验)。当 CI>0.70 时, R25 超过 80%, 也就是说 25%强降水日数的降水量之在总降水量中所占的比例超过 80%; 当 CI 介于 0.6 与 0.7 之间时, R25 的值为 70%~80%; 当 CI 小于 0.6 时, R25 小于 70%。

3 中国区域 CI 指数的空间分布及时间变化特征

3.1 CI 指数的空间分布特征

中国年降水自东南沿海向西北内陆递减, 年降

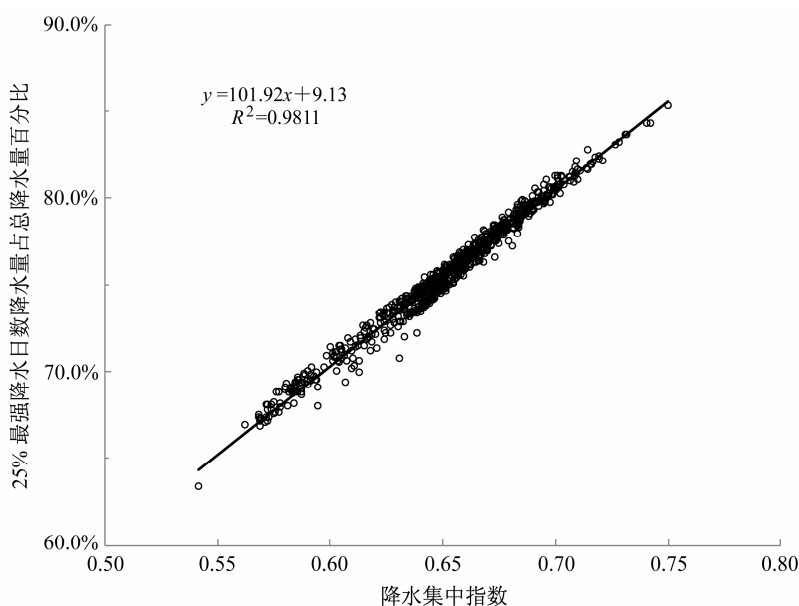


图 3 CI 指数与 25%最强降水日数的降水量占总降水量百分比散点图

Fig. 3 Scatterplot of CI (Concentration Index) and the percentage contribution of precipitation by 25% of the rainiest days

水量等值线大致呈东北—西南走向(姚惠明等, 2013; 段亚雯等, 2014), 1960~2011 年 CI 指数的空间分布与年降水的空间分布情况有一定差异。如图 4a 所示, 我国 CI 指数主要介于 0.575 与 0.750 之间, 平均为 0.652, 总体呈现出东部大、西部小的特征, 其中东北地区中西部、华北地区中南部、中南地区大部、华南地区中部以及西北地区西部降水集中指数相对较大, CI 指数超过 0.675, 而西北

地区中东部及青藏地区大部 CI 指数总体较小, 低于 0.600, 前人针对我国不同地区的研究结果也得到类似的结论, Li et al. (2011) 和 Shi et al. (2013) 得到的位于我国西北的新疆地区和位于西南的澜沧江流域的平均 CI 指数均为 0.635, 相对较小, 而 Shi et al. (2014) 和 Zhang et al. (2009) 得到的位于我国东部的淮河流域上游和珠江流域的平均 CI 指数分别为 0.687 和 0.769, 相对较大。在我国的长

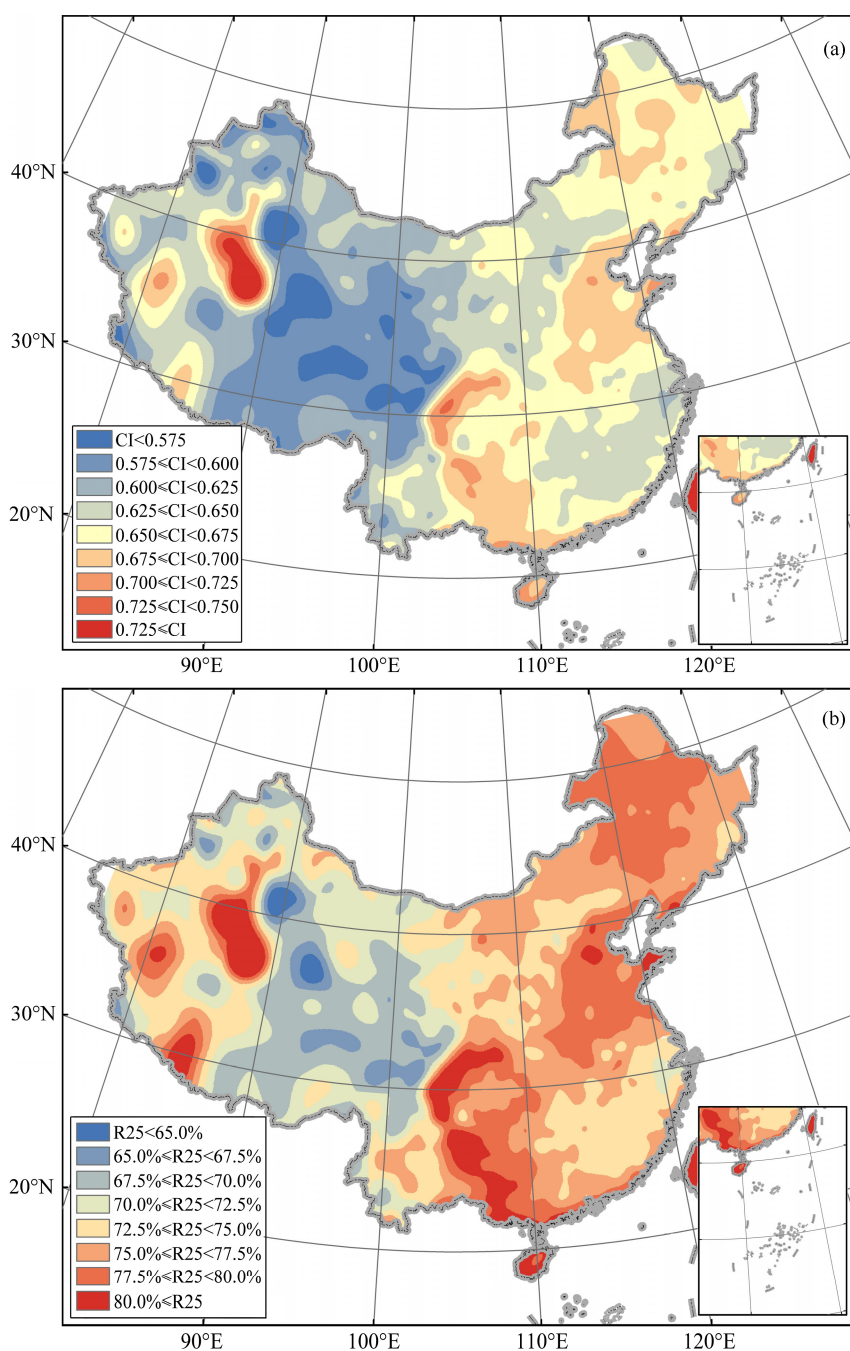


图 4 (a) CI 指数和 (b) R25 的空间分布情况

Fig. 4 Spatial distributions of (a) CI and (b) the percentage contribution of precipitation by 25% of the rainiest days (R25)

江下游及东南地区，年降水量相对东北、华北、西北等地区的降水量较大，但其 CI 指数相对较小，这是因为这些区域在降水量较大的同时，降水日数也相对较多，降水量在年内的分配相对均匀，强降水对全年总降水量的贡献率相对较小，而在华北等区域，虽然年降水量相对较小，但其降水日数相对长江下游等区域也更少，有限的降水更集中于少数

强降水日导致 CI 指数相对较大；同样的，在西北地区西部，年平均降水量少，降水年际变化大，降水在年内分配不均匀（徐利岗等，2009），年内降水主要集中于较少降水日内，导致 CI 指数较大，Zhang et al.（2003）和段亚雯等（2014）分别基于不同指数的研究发现该区域在月尺度的降水集中程度同样较高。

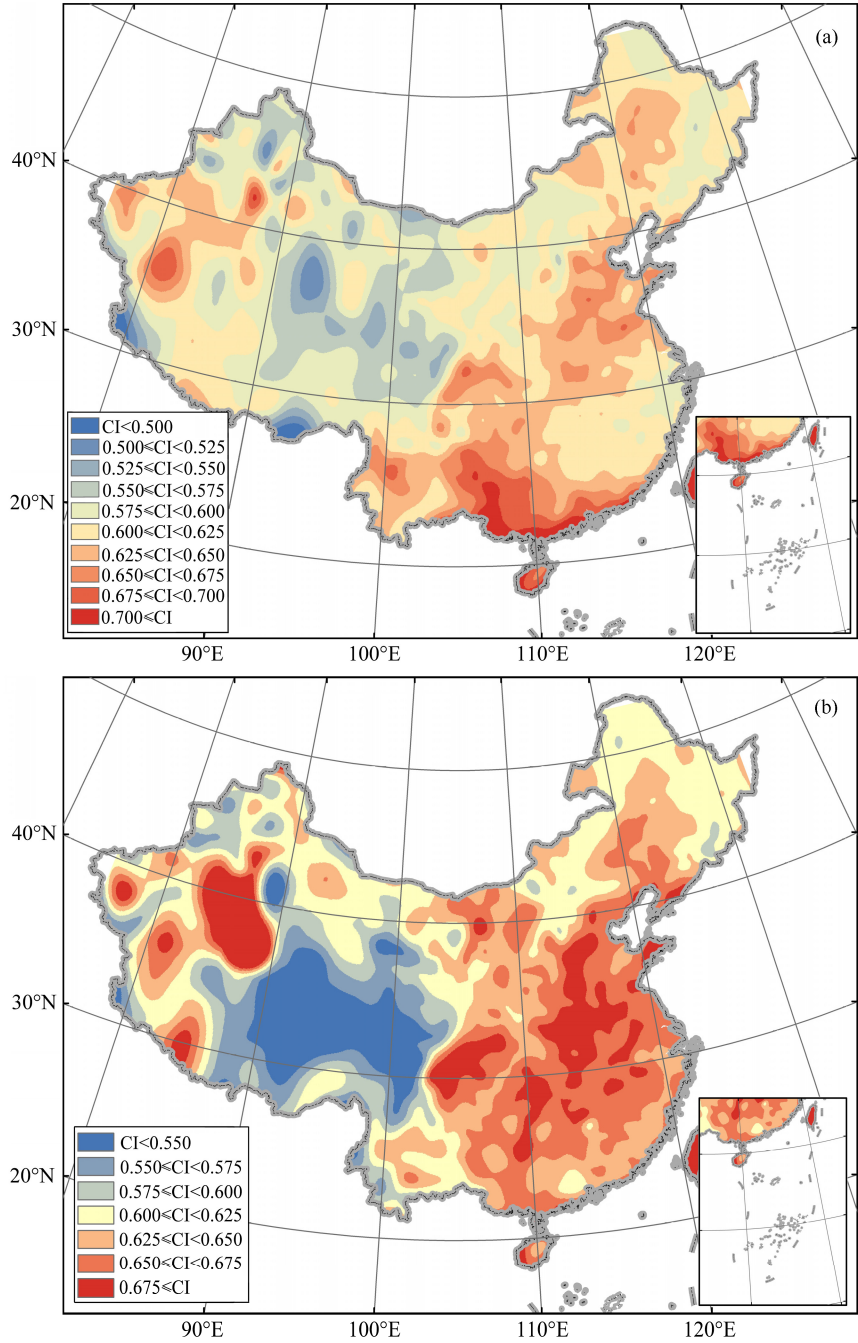


图5 不同季节 CI 指数的空间分布: (a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季
Fig. 5 Spatial distribution of CI in (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter

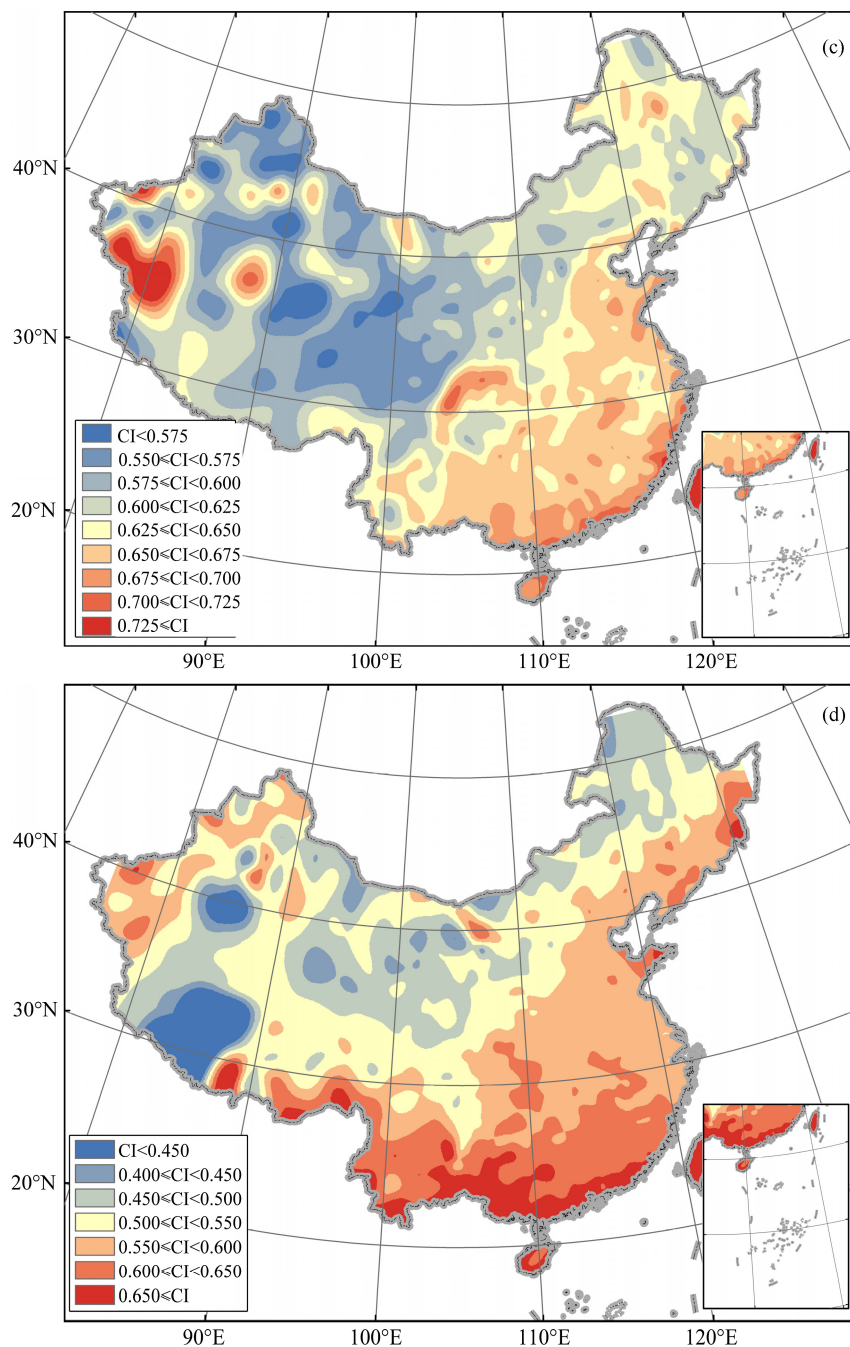


图5 (续)

Fig. 5 (Continued)

图4b给出了R25的空间分布情况,由图可见,R25的范围主要分布在65%~80%,平均为75.62%,也就是说25%最强降水日数的降水量超过全年降水量的75%。R25的空间分布较与CI相似,其中我国东北至华南地区中部一线、西北地区西部以及青藏高原西部相对较大,西北地区中部、青藏高原中东部相对较小,在长江下游

及东南地区,虽然年降水量较大,但R25仍相对较小。

图5为不同季节CI指数的空间分布情况。可以发现,各季节CI指数的空间分布总体上与其年分布较一致,但是也分别呈现出各自的特点。夏季CI指数相对较大,平均为0.640,这是由于夏季强降水事件频发导致的,夏季强降水事件的发生情况

对年降水集中程度有着重要影响,该季节 CI 指数大值区主要集中在我国 105°E 以东地区,且分布相对较均匀,高值中心主要分布在华北南部、四川盆地、长江中游以及西北的南疆地区,低值区域主要集中在青藏高原中东部;冬季的 CI 指数相对较小,平均为 0.573,且总体上表现为由东南向西北先减少再增加的空间分布形势。

3.2 CI 指数的时间变化特征

近 50 年来,我国降水表现为不明显的增加趋势(姜江等, 2015),本文采用 Mann-Kendall 检测方法计算 1961~2011 年 CI 指数变化趋势的显著性,在降水量变化的背景下分析降水集中程度的变化情况。由图 6 可见,研究时间段内,我国 44.17% 站点的 CI 指数表现出增加趋势,55.83% 站点的 CI 指数表现出减少趋势,但发生显著变化的站点相对较少,其中仅有 7.21% 站点的增加趋势通过 95% 以上信度水平的显著性检验,3.15% 站点的降低趋势通过 95% 以上信度水平的显著性检验,82.96% 站点的变化趋势未通过 90% 信度的显著性检验。图 7 给出了 CI 指数表现出显著变化趋势站点的空间分布情况,由图可见,CI 指数减小的站点主要集中在东北、华北、东南沿海及青藏高原东部等地区,增大的站点主要集中在西北、华中和西南地区。图 8 给出了各站点年降水量变化趋势的空间分布情况,由图可见,年降水量减少的站点主要集中在东北、华北、西南等地区,降水量增多的站点主要集中在华东、西北和青藏高原等地区。将两图的分析结果进行对比,可以对我国不同区域降水的变化特征有进一步的认识,在东北和华北等区域,年降水量减小的同时,降水集中程度也有所减小,表明这些区域

高强度降水减小的幅度相对较大,曾颖婷和陆尔(2015)的研究表明,华北等地区在降水量减少的同时,极端降水事件也呈现出减少的趋势,与本文结论一致;在东南沿海、青藏高原等地区,降水增加的同时降水集中程度有所减小,表明这些区域可能低强度降水的增加幅度相对高强度降水更大,降水变化导致降水分布更均匀,徐新创等(2014)发现,1961~2010 年间东南沿海地区小雨增加显著,而中雨以上降水相对较稳定,与上述结论一致;在西北地区降水量增大的同时,降水集中程度也有所增加,表明这些区域高强度降水的增加大于低强度降水,李奇虎和马庆勋等(2014)的研究也证明这点,1960~2010 年西北干旱区单次强降水的强度增加,强降水发生频次增多;在西南地区,降水集中程度增加而降水量有所减少,表明该地区高强度降水的减少相对较少,而低强度降水的减少相对较多,张倩倩等(2016)的研究发现,位于我国西南地区的重庆市小雨、中雨强度降水逐年减弱而大雨强度降水有弱的增强是导致总降水量减少的主要原因。

相对于全球持续性的变暖,降水量的变化格局及其区域差异具有更大的不确定性(王英等, 2006; 段亚雯等, 2014),我国国土面积广阔,前文的分析表明,研究时间段内不同区域 CI 指数的变化表现出不同的特征,本文采用连续小波变换的方法,对图 1 中所示的 8 个子区域 CI 指数的变化分别进行分析。所得结果如图 9 所示,其中左侧各图为小波功率谱,右侧各图为全局小波谱,虚线右上部分通过 95% 信度检验。由图 9 可见,3~5 年是各子区域 CI 指数通过 95% 水平显著性检验的一个主要周期,其中东北区域的 CI 指数表现出了 4 年的显著周期性变化,华

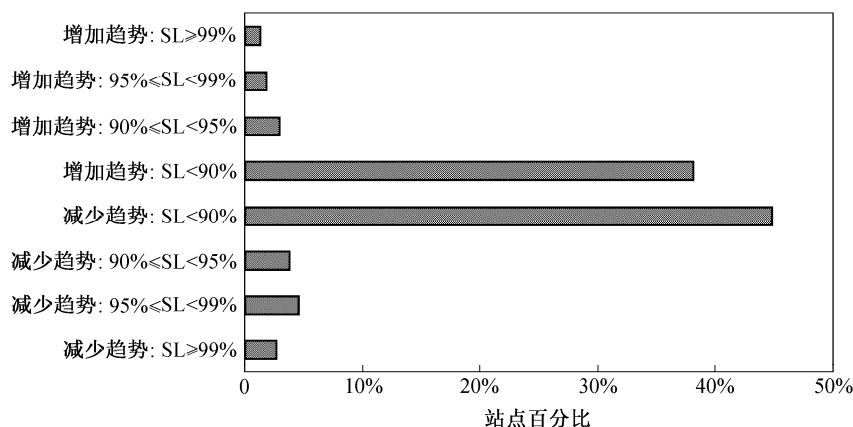


图 6 CI 指数变化趋势显著性百分比 (SL 表示显著性水平)

Fig. 6 CI trends at different significance levels (SL indicates confidence level)

北和华东区域表现出 3 年和 5 年左右的显著周期性变化, 华南、西北和西南区域表现出了 2.5 年左右的显著周期性变化, 而华中和青藏区域分别表现出 5 年和 3.5 年左右的显著周期性变化。前人针对我国不同地区降水量变化周期的研究发现, 我国东北地区的降水

存在着 2~3 年和 5~6 年左右的周期性变化 (姜晓艳等, 2009); 华北地区的降水存在 4~6 年左右的周期性变化 (许月卿等, 2004); 西北地区的降水存在准 3 年的周期性变化 (陈豫英等, 2011), 不同子区域降水量与 CI 指数的变化周期较一致。

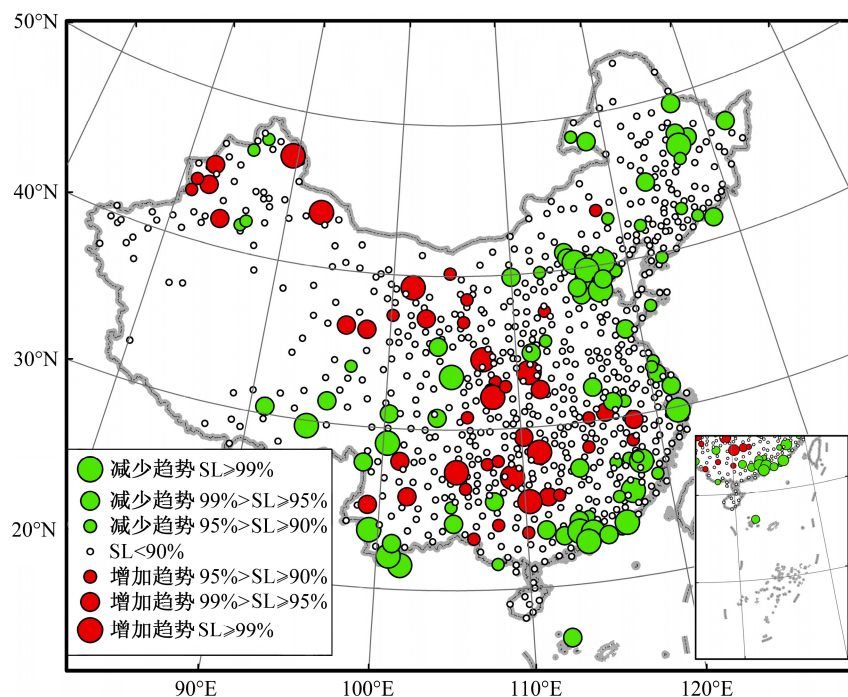


图 7 CI 指数变化趋势显著性空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution of CI trends at different significance levels

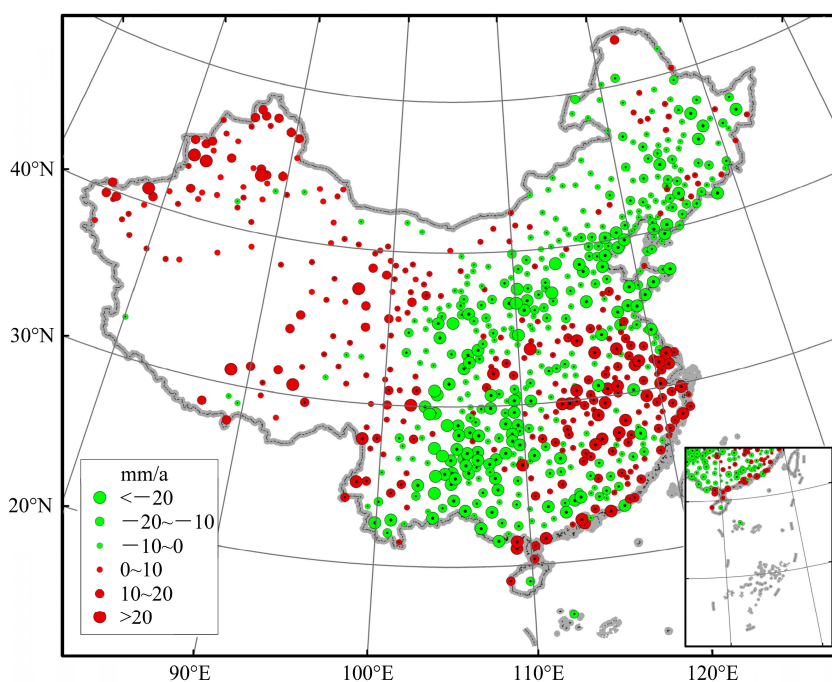


图 8 年降水量变化趋势空间分布 (加 “.” 的表示未通过 95% 信度水平的显著性检验)

Fig. 8 Spatial distribution of annual precipitation (marks with “.” indicate the trend is not significant at the 95% confidence level)

在时间分布方面, 1970 年左右和 2000 年左右是显著周期性变化表现较集中的时间段, 东北区域主要出现在 1965~2000 年; 华北和青藏区域主要集中在 1970~2005 年; 华东区域主要出现在 1965~

1975 年和 1985~2005 年; 华南区域在整个研究时间段都表现出显著的周期性变化; 华中区域主要出现在 1965~2005 年; 西北区域主要出现在 1965~1995 年和 2000 年以后; 西南区域主要出现在 2000

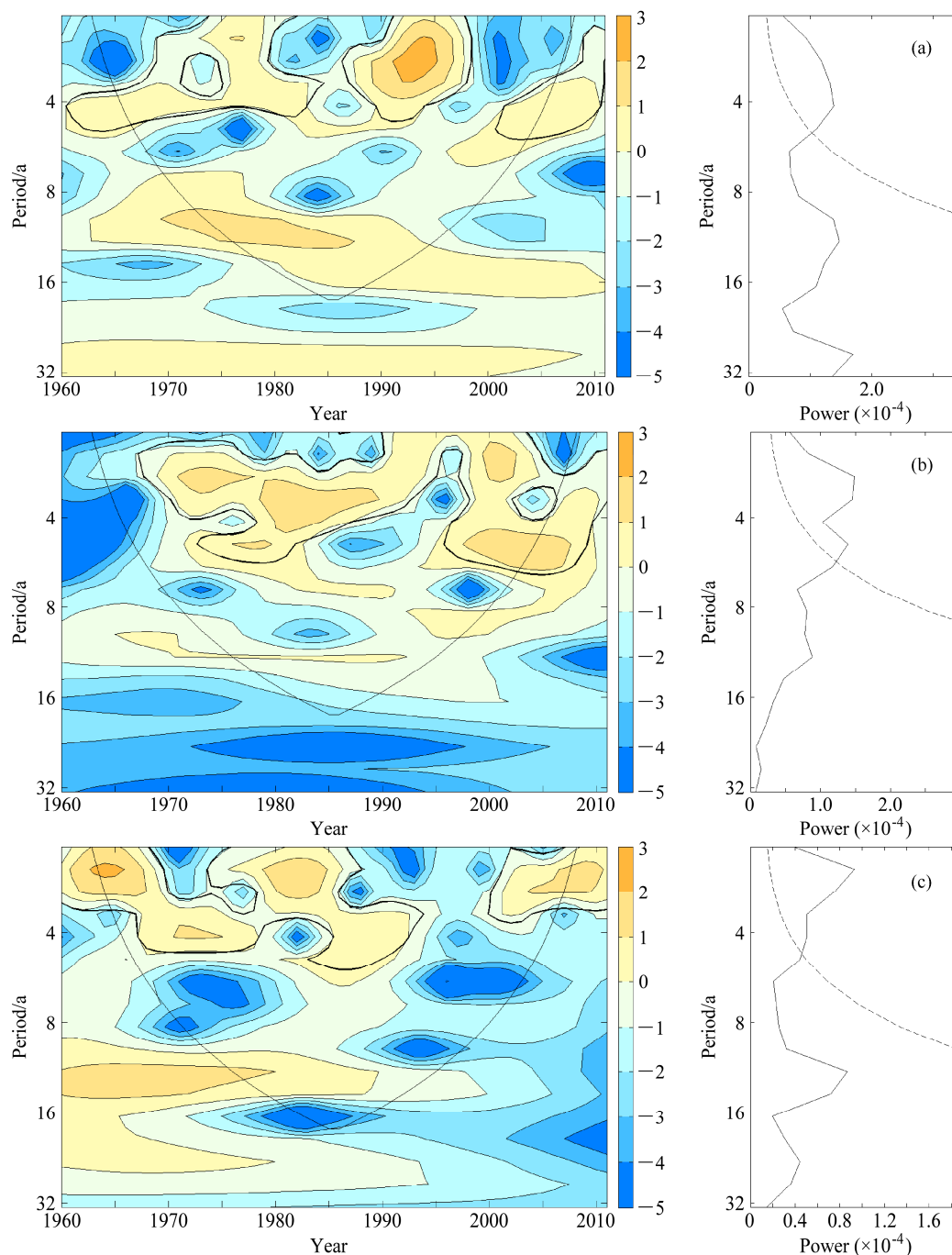


图9 各子区域CI指数的小波功率谱(左侧)及全局小波谱(右侧,虚线右上部分通过95%水平信度检验): (a)东北; (b)华北; (c)西北; (d)华东; (e)华中; (f)西南; (g)青藏; (h)华南

Fig. 9 Wavelet power spectra (left column) and global wavelet spectrum (right column, the dashed line shows the 95% confidence level) of CI time series at different subzones spectrum: (a) Northeast China; (b) North China; (c) Northwest China; (d) East China; (e) Central China; (f) Southwest China; (g) Xizang; (h) South China

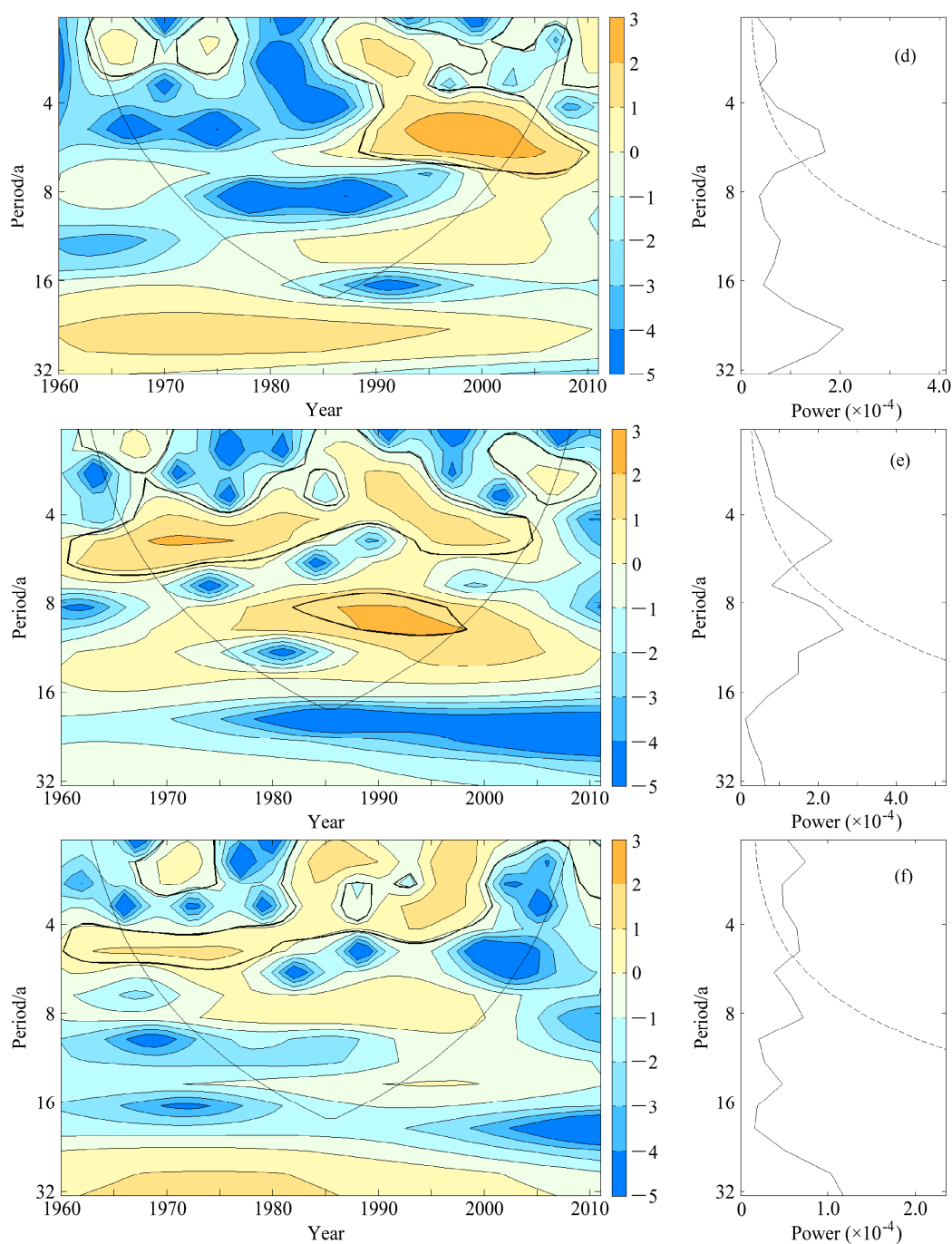


图9 (续)

Fig. 9 (Continued)

年以前。

4 结果与讨论

年内日降水集中程度是描述降水特征的一个重要参数, 围绕该指数的研究具有重要的理论及现

实意义 (Zhang et al., 2009), 它不仅可以反映不同强度降水在年内的分配情况, 还可以促进旱涝灾害的预防及应对。本文基于 Martin-Vide (2004) 提出的降水集中指数 (CI), 研究了 1960~2011 年间中国区域 CI 指数的空间分布及时间变化情况, 得到以下主要结论:

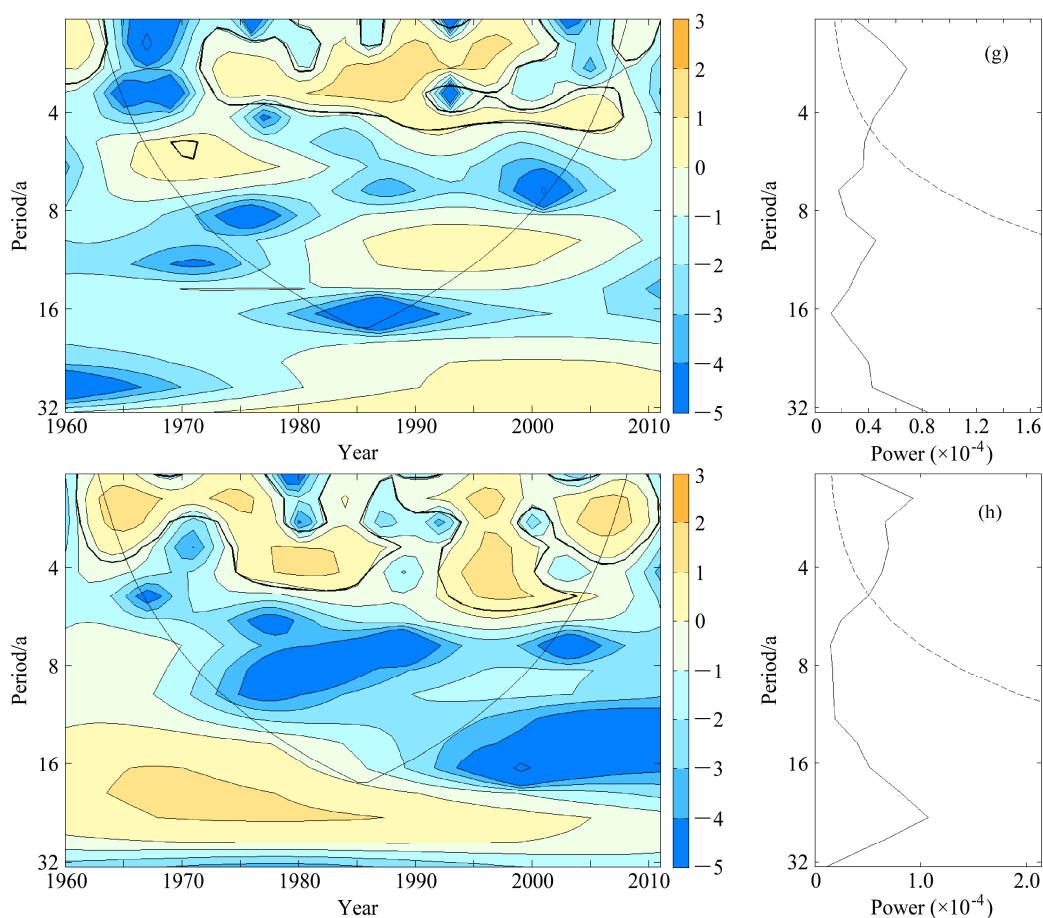


图9 (续)

Fig. 9 (Continued)

(1) CI 指数可有效描述我国日降水集中程度, 其与 25%最强降水日数的降水量占总降水量百分比 (R25) 的相关系数为 0.98 (通过 95%水平显著性检验)。我国 CI 指数主要介于 0.575 与 0.750 之间, 平均为 0.652。CI 指数时空分布不均匀, 总体呈现出东部大、西部小的特征。夏季 CI 指数较大, 平均为 0.640, 冬季的 CI 指数相对较小, 平均为 0.573。

(2) 44.17%站点的 CI 指数表现出增加趋势, 55.83%的站点表现出减少趋势, 其中 11.01%站点的增加趋势通过 90%以上水平的显著性检验, 6.03%站点的降低趋势通过 90%以上水平的显著性检验。CI 指数显著增大的站点主要集中在西北、华中和西南地区, 显著减小的站点主要集中在东北、华北、东南沿海及青藏高原东部等地区。

(3) 3~5 年是各子区域 CI 指数变化的主要周期, 与对应区域降水量的变化周期较一致, 其中东北区域的周期为 4 年, 华北和华东区域表现出 3 年

和 5 年的变化周期, 华南、西北和西南区域表现出了 2.5 年左右的变化周期, 而华中和青藏区域分别表现出 5 年和 3.5 年左右的变化周期。

(4) 1970 年左右和 2000 年左右是显著周期性变化出现较集中的时间段, 东北区域主要集中在 1965~2000 年; 华北和青藏区域主要集中在 1970~2005 年; 华东区域主要集中在 1965~1975 年和 1985~2005 年; 华中区域主要出现在 1965~2005 年; 西北区域主要出现在 1965~1995 年和 2000 年以后; 西南区域主要出现在 2000 年以前; 华南区域在整个研究时间段都表现出显著的周期性变化。

参考文献 (References)

- 陈豫英, 陈楠, 钱正安, 等. 2011. 中蒙干旱半干旱区降水的时空变化特征 (II): 综合气候分区及各分区降水周期变化的进一步分析 [J]. 高原气象, 30 (1): 13-21. Chen Yuying, Chen Nan, Qian Zheng'an, et al. 2011. Temporal and spatial change features of precipitation over CMASA

- (II): Synthetical climate subregions of the CMASA and further analyses of periodic change of precipitation in its various ones [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 30 (1): 13–21.
- Chou C, Lan C W. 2012. Changes in the annual range of precipitation under global warming [J]. *J. Climate.*, 25 (1): 222–235, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00097.1.
- Coscarelli R, Caloiero T. 2012. Analysis of daily and monthly rainfall concentration in southern Italy (Calabria region) [J]. *J. Hydrol.*, 416–417: 145–156, doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.11.047.
- de Luis M, González-Hidalgo J C, Brunetti M, et al. 2011. Precipitation concentration changes in Spain 1946–2005 [J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11: 1259–1265, doi: 10.5194/nhess-11-1259-2011.
- 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, doi: 10.3969/j.issn.1002-0799.2007.01.001.
- 段亚雯, 朱克云, 马柱国, 等. 2014. 中国区域 1961~2010 年降水集中指数 (PCI) 的变化及月分配特征 [J]. *大气科学*, 38 (6): 1124–1136. Duan Yawen, Zhu Keyun, Ma Zhuguo, et al. 2014. Characteristics of precipitation concentration index (PCI) variations and monthly distribution of annual precipitation in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 38 (6): 1124–1136, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13267.
- Gong D Y, Ho C H. 2002. Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (10): 78–1–78–4, doi: 10.1029/2001GL014523/full.
- IPCC. 2007. Summary for policymakers [M]//*Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon S, Qin D, Manning M, et al, Eds. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC. 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- 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.
- Jiang P, Wang D G, Cao Y Q. 2016. Spatiotemporal characteristics of precipitation concentration and their possible links to urban extent in China [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 123 (3): 757–768, doi: 10.1007/s00704-015-1393-2.
- 姜晓艳, 刘树华, 马明敏, 等. 2009. 东北地区近百年降水时间序列变化规律的小波分析 [J]. *地理研究*, 28 (2): 354–362. Jiang Xiaoyan, Liu Shuhua, Ma Mingmin, et al. 2009. A wavelet analysis of the precipitation time series in Northeast China during the last 100 years [J]. *Geographical Research* (in Chinese), 28 (2): 354–362, doi: 10.3321/j.issn:1000-0585.2009.02.009.
- Karl T R, Knight R W, Easterling D R, et al. 1996. Indices of climate change for the United States [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 (2): 279–292, doi: 10.1175/1520-0477(1996)077<0279:IOCCFT>2.0.CO;2.
- Le Treut H, Somerville R, Cubasch U, et al. 2007. Historical overview of climate change [M]// *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon S, Qin D, Manning M, et al, Eds. Cambridge: Cambridge University Press.
- 李奇虎, 马庆勋. 2014. 1960~2010 年西北干旱区极端降水特征研究[J]. *地理科学*, 34: 1134–1138. Li Qihu, Ma Qingxun. 2014. Extreme precipitation features of arid regions in northwest of China [J]. *Scientia Geographica Sinica* (in Chinese), 34: 1134–1138, doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2014.09.1134.
- Li X M, Jiang F Q, Li L H, et al. 2011. Spatial and temporal variability of precipitation concentration index, concentration degree and concentration period in Xinjiang, China [J]. *International Journal of Climatology*, 31 (11): 1679–1693, doi: 10.1002/joc.2181/abstract.
- 刘向培, 王汉杰, 刘金波. 2011. 区域气候模式分辨率对夏季降水模拟的影响 [J]. *水科学进展*, 22 (5): 615–623. Liu Xiangpei, Wang Hanjie, Liu Jinbo. 2011. Influence of spatial resolution in a regional climate model on summer precipitation simulation [J]. *Advances in Water Science* (in Chinese), 22 (5): 615–623, doi: 10.13099.P.20110911.1135.020.
- 刘永林, 延军平, 岑敏仪. 2015. 中国降水非均匀性综合评价 [J]. *地理学报*, 70 (3): 392–406. Liu Yonglin, Yan Junping, Cen Minyi. 2015. Comprehensive evaluation of precipitation heterogeneity in China [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 70 (3): 392–406, doi: 10.11821/dlxb201503004.
- Martin-Vide J. 2004. Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in peninsular Spain [J]. *International Journal of Climatology*, 24: 959–971, doi: 10.1002/joc.1030.
- Michiels P, Gabriels D, Hartmann R. 1992. Using the seasonal and temporal precipitation concentration index for characterizing monthly rainfall distribution in Spain [J]. *Catena*, 19 (1): 43–58, doi: 10.1016/0341-8162(92)90016-5.
- Oliver J E. 1980. Monthly precipitation distribution: A comparative index [J]. *The Professional Geographer*, 32 (3): 300–309, doi: 10.1111/j.0033-0124.1980.00300.x.
- Shi P, Qiao X Y, Chen X, et al. 2014. Spatial distribution and temporal trends in daily and monthly precipitation concentration indices in the upper reaches of the Huai River, China [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 28: 201–212, doi: 10.1007/s00477-013-0740-z.
- Shi W L, Yu X Z, Liao W G, et al. 2013. Spatial and temporal variability of daily precipitation concentration in the Lancang River basin, China [J]. *J. Hydrol.*, 495: 197–207, doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.05.002.
- 王英, 曹明奎, 陶波, 等. 2006. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征 [J]. *地理研究*, 25 (6): 1031–1040. Wang Ying, Cao Mingui, Tao Bo, et al. 2006. The characteristics of spatio-temporal patterns in precipitation in China under the background of global climate change [J]. *Geographical Research* (in Chinese), 25 (6): 1031–1040, doi: 10.3321/j.issn:1000-0585.2006.06.010.
- 徐利岗, 周宏飞, 梁川, 等. 2009. 中国北方荒漠区降水多时间尺度变异性研究 [J]. *水利学报*, 40 (8): 1002–1011. Xu Ligang, Zhou Hongfei, Liang Chuan, et al. 2009. Multi-time scale variability of precipitation in

- the desert region of North China [J]. *Journal of Hydraulic Engineering* (in Chinese), 40 (8): 1002–1011, doi: 10.3321/j.issn:0559-9350.2009.08.016.
- 徐新创, 张学珍, 戴尔阜, 等. 2014. 1961–2010 年中国降水强度变化趋势及其对降水量影响分析 [J]. *地理学报*, 33 (7): 1335–1347. Xu Xinchuang, Zhang Xuezheng, Dai Erfu, et al. 2014. Research of trend variability of precipitation intensity and their contribution to precipitation in China from 1961 to 2010 [J]. *Geographical Research* (in Chinese), 33 (7): 1335–1347, doi: 10.11821/dlyj201407013.
- 许月卿, 李双成, 蔡运龙. 2004. 基于小波分析的河北平原降水变化规律研究 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 34 (12): 1176–1183. Xu Yuqing, Li Shuangcheng, Cai Yunlong. 2005. Wavelet analysis of rainfall variation in the Hebei Plain [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 48 (12): 2241–2250, doi: 10.1360/04yd0215.
- 姚惠明, 吴永祥, 关铁生. 2013. 中国降水演变趋势诊断及其新事实 [J]. *水科学进展*, 24 (1): 1–10. Yao Huiming, Wu Yongxiang, Guan Tiesheng. 2013. Diagnose of precipitation evolution trend in China and new facts [J]. *Advances in Water Science* (in Chinese), 24 (1): 1–10.
- 袁喆, 严登华, 杨志勇, 等. 2014. 1961–2010 年中国 400 mm 和 800 mm 等雨量线时空变化 [J]. *水科学进展*, 25 (4): 494–502. Yuan Zhe, Yan Denghua, Yang Zhiyong, et al. 2014. Research on temporal and spatial change of 400 mm and 800 mm rainfall contours of China in 1961–2000 [J]. *Advances in Water Science* (in Chinese), 25 (4): 494–502.
- 曾颖婷, 陆尔. 2015. 1961–2010 年我国夏季总降水和极端降水的变化 [J]. *气候变化研究进展*, 11 (2): 79–85. Zeng Yingting, Lu Er. 2015. Changes of summer rainfall and extreme precipitation during 1961–2010 in China [J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis* (in Chinese), 11 (2): 78–85, doi: 10.3969/j.issn.1673-1719.2015.02.001.
- 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: 1096–1108, doi: 10.1175/JCLI-3318.1.
- Zhang L J, Qian Y F. 2003. Annual distribution features of precipitation in China and their interannual variations [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 17 (2): 146–163.
- Zhang Q Xu C Y, Gemmer M, et al. 2009. Changing properties of precipitation concentration in the Pearl River basin, China [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23: 377–385, doi: 10.1007/s00477-008-0225-7.
- 张录军, 钱永甫. 2004. 长江流域汛期降水集中程度和洪涝关系研究 [J]. *地球物理学报*, 47 (4): 622–630. Zhang Lujun, Qian Yongfu. 2004. A study on the feature of precipitation concentration and its relation to flood-producing in the Yangtze River valley of China [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 47(4): 622–630, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2004.04.012.
- 张倩倩, 李艳, 王志福, 等. 2016. 1961–2012 年重庆市的降水特征分析 [J]. *南京信息工程大学学报 (自然科学版)*, 8 (3): 215–225. Zhang Qianqian, Li Yan, Wang Zhifu, et al. 2016. Precipitation characteristics in Chongqing during 1961–2012 [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition)* (in Chinese), 8 (3): 215–225, doi: 10.13878/j.cnki.jnuist.2016.03.002.
- 张天宇, 程炳岩, 王记芳, 等. 2007. 华北雨季降水集中度和集中期的时空变化特征 [J]. *高原气象*, 26 (4): 843–852. Zhang Tianyu, Cheng Bingyan, Wang Jifang, et al. 2007. Temporal and spatial change characteristics of precipitation concentration degree (PCD) and precipitation-concentration period (PCP) over North China in rainy reason [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 26(4): 843–852.