

熊敏詮. 2017. 近 60 年中国日降水量分区及气候特征 [J]. 大气科学, 41 (5): 933–948. Xiong Minquan. 2017. Climate regionalization and characteristics of daily precipitation in China in recent 60 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (5): 933–948, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1703.16169.

近 60 年中国日降水量分区及气候特征

熊敏詮

国家气象中心, 北京 100081

摘 要 根据中国国家级地面气象站均一化降水数据集, 使用 1956~2015 年 512 个台站的日降水量资料, 通过旋转经验正交函数 (REOF) 得到七个分区。比较了各分区平均日降水量的年内变化和多年倾向率差异: 我国偏南分区的小雨日数减少, 大雨、暴雨日数、日降水量的区域年均值增加; 偏北分区的小雨、大雨、暴雨日数、降水量年均值为递减; 长江中下游区 (东北区) 日降水量、小雨日数、暴雨日数的年均值的近 60 年倾向率分别是 0.0071 mm a^{-1} ($-0.0010 \text{ mm a}^{-1}$)、 -0.0729 d a^{-1} (-0.0615 d a^{-1})、 0.0132 d a^{-1} (-0.0007 d a^{-1})。100°E 以西地区: 小雨、中雨日数在增加, 无雨日数显著减少, 日降水量的年均值呈递增特点。通过自相关函数和小波功率谱估计, 揭示了七个分区的日降水量年均值普遍存在 2~4 a 周期震荡。使用 NCEP/NCAR 月均再分析资料, 以区域日降水量年均值为指数得到 500 hPa、700 hPa、850 hPa 回归风系数场、旱涝年整场水汽通量和水汽通量散度差异场相结合分析, 结果表明: “东高西低, 南高北低” 环流型和区域降水有密切关系, 水汽差异场是上述环流特点的反映。

关键词 日降水量 分区 旋转经验正交函数 (REOF) 分析 气候特征

文章编号 1006-9895(2017)05-0933-16

中图分类号 P462.1

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1703.16169

Climate Regionalization and Characteristics of Daily Precipitation in China in Recent 60 Years

XIONG Minquan

National Meteorological Center, Beijing 100081

Abstract Rotated empirical orthogonal function (REOF) analysis was applied in this study to daily precipitation from 1956 to 2015 collected at 512 China national weather stations. These daily precipitation data were extracted from the homogeneous precipitation dataset of China weather station. Seven climate divisions were identified based on the 512 stations data. The long-term annual average precipitation for each station and the average for all stations within each division were compared. The overall climate regimes of the individual stations within all the divisions are generally consistent. In South China, the linear precipitation trend and number trends of heavy rain and rainstorm during 1956–2015 were positive, while the trend of light sprinkle frequency reduced in the past 60 years. In North China, precipitation trend and number trends of light rain, heavy rain and rainstorm were negative. In the middle–lower reaches of the Yangtze River division (Northeast division), the linear precipitation trend and number trends of light rain, heavy rain and rainstorm during 1956–2015 were 0.0071 mm a^{-1} ($-0.0010 \text{ mm a}^{-1}$), -0.0729 d a^{-1} (-0.0615 d a^{-1}), and 0.0132 d a^{-1} (-0.0007 d a^{-1}), respectively. To the west of 100°E, precipitation trend and number trend of light-medium rain increased with no significant decrease in rainy days in the past 60 years. Characteristics of annual rainfall change on different time scales were analyzed using the PAUL (Morlet) wavelet analysis, the autocorrelation function, and power

收稿日期 2016-05-03; 网络预出版日期 2017-03-30

作者简介 熊敏詮, 男, 1970 年出生, 主要从事天气学研究。E-mail: minquanxiong@sina.com

资助项目 发展格点预报融合和订正关键技术项目 YBGJXM201703

Funded by Key Technology of Multi-model Fusion and Calibration (Grant YBGJXM201703)

spectrum analysis method. The most significant variation of precipitation in China shows a periodic oscillation of 2–4 a. Based on National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) reanalysis data, wind fields at 500 hPa, 700 hPa, and 850 hPa were regressed on annual average daily precipitation in each division. Differences in moisture flux and moisture flux divergence between dry and wet years were analyzed and compared. Results indicate that the circulation patterns characterized by “east high and west low, south high and north low” between mainland China and the western Pacific in the surface were closely related to precipitation in each division. Moisture distribution was generally consistent with various circulation patterns.

Keywords Daily precipitation, Regionalization, REOF analysis, Climate characteristics

1 引言

降水时空分布特征的研究有助于对大气运动规律的深入理解。非线性变化是降水发生、发展的主要特点,我国位于东亚季风区,降水量有区域性分布特点,由此,降水分型、区划是研究降水特点及其大气演变的有效方法。

黄荣辉等(1999)把全国 336 个测站夏季降水,根据地理环境和气候特征划分成 7 个区域;秦爱民和钱维宏(2006)利用中国 486 个测站 1960~2000 年逐日降水资料,得到中国降水的三级气候分区;金大超等(2010)利用中国华东地区 91 个站点 1961~2007 年夏季逐日降水资料,将华东地区夏季降水场分为 5 个区域;黄琰等(2011)选取 548 个站点的日平均、最大、最小气温及日降水量数据,全国按气温和降水量的概率分布特征划分为 10 个区域;熊敏谔(2015)利用 1980~2009 年中国 608 个测站的日平均风速资料划出 10 个区域。我国降水变化特点及形成机制一直是学术界关注的热点,例如长江流域(李淑萍等, 2015; 叶敏和封国林, 2015; 李明刚等, 2016)、华南地区(李宏毅等, 2013; 赵俊虎等, 2016; 魏蕾等, 2017)和我国东部地区(陈栋等, 2016; 郭恒和张庆云, 2016; 韩函等, 2017)的较长时间的降水异常及数值模拟分析方面都有细致的研究。以上仅列举了近几年降水研究领域若干项成果,还有较多从相异视角的探索,对不同区域、某些季节的降水多年时空演变和归因的认识都有积极意义。

Guttman and Quayle (1996)回顾了美国气候分区的发展历史,将美国本土 48 个州划出 344 个分区, NCDC (National Climatic Data Center) 提供气候分区数据集服务;该数据集广泛使用于天气分析和应用气象学各领域中,例如 Diaz and Quayle (1978) 对 1976~1977 寒冬的分析; Guttman (1983) 分析了天气和能源需求相关关系; Soulé (1992) 持续性

天气的区域差异研究; Karl and Knight (1998) 分析了美国降水量、降水强度和持续时间的长期趋势; Kunkel et al. (1999) 计算了美国和加拿大极端降水长期变化; 还有 Leathers et al. (2000)、McCabe et al. (2004)、Goodrich and Ellis (2006)、Easterling et al. (2007)、Kurtzman and Scanlon (2007)、Grantz et al. (2007)、Grundstein (2008) 以及 Seager et al. (2009) 相关研究; 气候分区数据集还是干旱指数 PDSI (Palmer Drought Severity Index) 计算主要依据。随着资料的多样化和方法的改进,资料均一性分析在不断完善,有较多研究,例如 McRoberts and Nielsen-Gammon (2011) 依据 FNEP (full network estimated precipitation) 构建分区月均降水量数据集。Bieniek et al. (2012, 2014, 2016) 使用聚类法对阿拉斯加进行气候分区,细致分析了每个分区域的降水量倾向率,并开展降水和温度动力降尺度研究。

随着资料的丰富和完善,有必要对全国降水进行客观分区:首先,自 1949 年以来,由于建站时间不一,各台站的降水量资料长度差异较大,而且部分观测并不连续,多有断点;观测通常还伴有误差,另外,站点的迁移、观测仪器更替、观测技术和方法的变化等都会引起误差的变化;若以均一化资料为分析基础,将增加分区结果的可靠性。其次,以往的工作主要是从不同的研究角度对中国降水进行分区,通常依据区域的年、季或月均降水开展分划,针对全国范围的分区研究并不多见;将以连续的日降水量作分区,能较完整地反映降水历史信息。同时,站点的区域代表性是分区的难点,通过 REOF 方法,逐步剔除区域内出现异常值的站点,在一定程度上减少了代表性误差。最后,基于较长时间的分析有利于获得稳定的分区。

经验正交函数分解是以站点日降水量的协方差矩阵的特征值对应的特征向量为典型场的正交函数展开,因此,降水量协方差阵和分区密切相关。当讨论降水量夏季降水分区时,通常是截取夏季时

段的降水量构成多年时序进行分析; 本文大部分工作是探讨年降水量变化特点, 那么, 以连续日降水量计算得到更为合理的分区。将根据中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集的近六十年日降水量资料, 使用REOF方法得到七个分区, 比较区域及站点的日降水量和各量级雨日数年均值变化趋势, 通过自相关函数和小波功率谱估计检测区域降水量年均值周期, 对区域回归风系数场、旱涝年水汽通量和水汽通量散度差值场进行了综合分析, 较合理地揭示了七个分区降水异常可能原因。

2 资料

由于气象台站迁站、环境变化、观测时间变化等原因, 导致我国气象数据存在不连续的现状。国家气象信息中心在研制基础气象资料产品过程中, 采取融合拼接、质量控制、资料插补、资料均一化等方法, 以保证数据完整性和可靠性 (详见 http://www.gov.cn/gzdt/2013-12/25/content_2554132.htm [2016-05-01]), 形成了中国国家级地面气象站均一化降水数据集, 对我国2419个台站20:00 (北京时, 下同) 的24小时降水资料进行了均一性分析。在有些年份还有缺测现象, 站点选择时, 主要考虑: 首先是资料的完整性, 其次是站点空间分布的均匀化, 最后是通过多次客观分区比较, 剔除易产生碎片分区的站点。出现缺测时, 从2419站中择邻近有观测台站, 通过滑动窗口的克里格方法 (熊敏詮, 2013a) 插补, 并进行时空一致性检验, 最后获得512个观测台站完整的降水量日值。

使用了NCEP/NCAR的1956~2015年月平均再分析资料, 气象要素包括: 比湿、东西向风速、南北向风速、地面气压。水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$; 垂直方向上: 风速是17层, 比湿8层。

3 客观分区结果

REOF 是常有的客观分区方法, 首先对各台站逐日降水量作标准化处理, 然后进行 EOF 分析, 通过 North 方法 (North et al., 1982), 确定 EOF 分析后的 6 个特征场作 REOF, 最终得到 6 个空间模态 (图 1), 6 个模态的累计方差贡献依次是: 20.68%、19.51%、16.73%、15.07%、14.82%、13.19%。以荷载绝对值 0.6 为阈值, 可将全国划分出 7 个降水区: 西北区: 主体在黄河中上游地区、青藏高原中北部、河西走廊、南疆; 西南区: 主要在青藏高原

东南部、四川中南部、云贵高原; 东北区: 内蒙北部、东北三省; 华北区: 位于京津冀、黄淮地区; 长江中下游地区; 华南区: 浙赣湘南部、广西东部、福建和广东; 北疆。以上 7 个分区相应的台站数依次是 101、99、85、75、67、74、11 个 (图 2)。

4 结果分析

4.1 日降水量分区均值年内变化

区域内降水量的算术平均值可总体上代表区域降水量 (熊敏詮, 2013b), 使用 5 日等权中心平滑法计算日降水时序的滑动均值, 端点处应用等权端点平滑法以避免端部效应 (图 3): 东部地区日降水量最大值出现的日期自南向北逐渐往后推迟: 华南 (6 月 15 日, 10.32 mm)、长江中下游 (6 月 26 日, 9.56 mm)、华北 (7 月 17 日, 6.21 mm)、东北 (7 月 28 日, 6.23 mm); 南方地区 (长江中下游、华南) 夏季呈现双峰型, 华南的次高值出现在 8 月 11 日 (7.98 mm), 长江中下游是 8 月 21 日 (5.13 mm); 受副高南北位移对降水分布产生的影响, 华北、东北日降水量最大值就出现在南方地区两个降水极值之间的“间歇期” (6 月 26 日至 8 月 11 日); 从降水量数值来看, 南方大于北方、东部高于西部。

4.2 日降水量分区年均值时空分布

将日降水量一年总和除以日数 (366 d 或 365 d), 得单站日降水量年均值, 台站日降水量年平均值的倾向率分布中 (图 4a), 我国西部 (100°E 以西)、华南大部、长江中下游地区近 60 年的降水总趋势为递增, 而且西部大部分站点的年降水量倾向率通过了 95% 信度检验, 其他区域则在减弱。例如, 长江中下游东南部、华南的西南部降水年增幅大: 安徽黄山 58437 (0.021 mm a^{-1})、江西弋阳 58624 (0.018 mm a^{-1})、广西合浦 59640 (0.019 mm a^{-1})、广东广州 59287 (0.018 mm a^{-1}); 四川中部、山东东部递减率: 四川峨眉山 56385 (-0.019 mm a^{-1})、四川宜宾 56492 (-0.015 mm a^{-1})、四川绵阳 56196 (-0.012 mm a^{-1})。年降水量强递增 (减弱) 区都通过了 95% 信度检验。

由于日降水量在时序上不规则分布, 有必要分析降水强度的多年变化。通常划分为小雨 ($0.1 \text{ mm} \leq r_{24} \leq 9.9 \text{ mm}$)、中雨 ($10.0 \text{ mm} \leq r_{24} \leq 24.9 \text{ mm}$)、大雨 ($25.0 \text{ mm} \leq r_{24} \leq 49.9 \text{ mm}$)、暴雨 ($50.0 \text{ mm} \leq r_{24} \leq 99.9 \text{ mm}$), r_{24} 是 24 h 降水量, 当 $r_{24} \leq 0.1 \text{ mm}$ 视为无雨日。将台站在一年中各量级雨日数之和称为相应量级的年雨日数, 以下分别对近 60 年无雨、

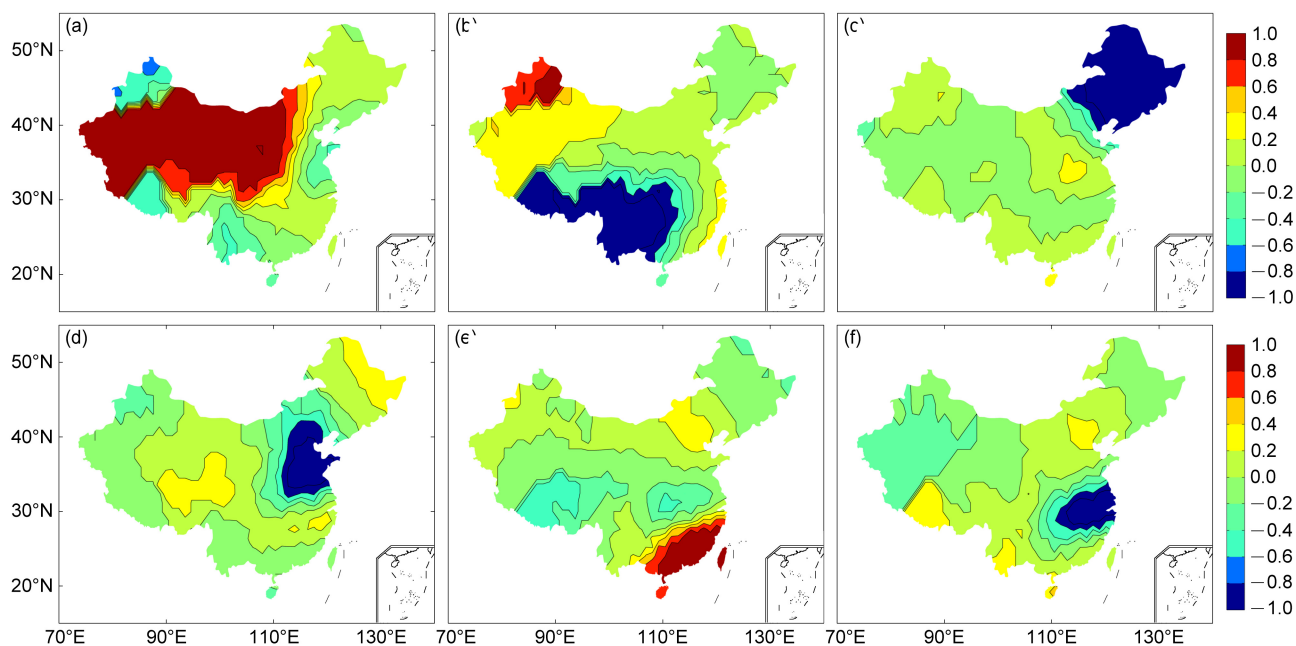


图1 1956~2015年中国日降水量 REOF 分解所得的6个模态。(a-f) 分别为第1~6模态

Fig. 1 The spatial patterns of (a) the first mode, (b) the second mode, (c) the third mode, (d) the fourth mode, (e) the fifth mode, (f) the sixth mode by REOF (Rotated Empirical Orthogonal Function) analysis of daily precipitation in China from 1956 to 2015

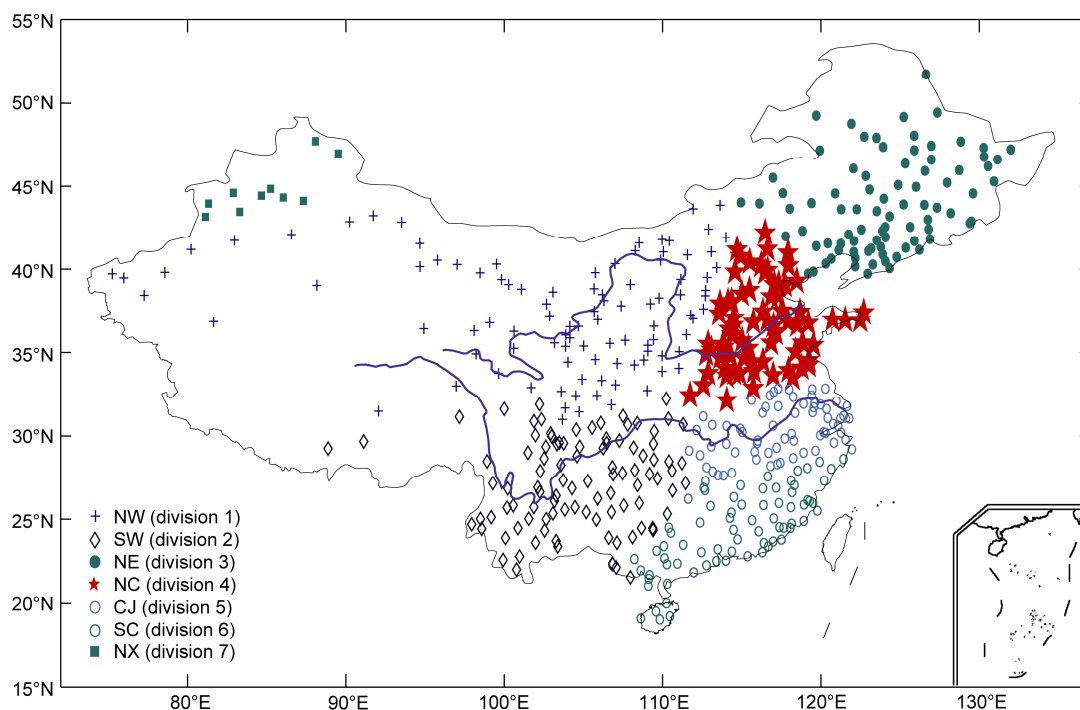


图2 中国日降水量 REOF 分解所得七个分区[西北区(第1分区)、西南区(第2分区)、东北区(第3分区)、华北区(第4分区)、长江中下游区(第5分区)、华南区(第6分区)、北疆(第7分区)]

Fig. 2 Seven climate divisions over China identified by REOF analysis of daily precipitation. These climate divisions are Northwest (NW, the first division), Southwest (SW, the second division), Northeast (NE, the third division), North China (NC, the fourth division), Middle and lower reaches of Changjiang River (CJ, the fifth division), South China (SC, the sixth division), Northern Xinjiang (NX, the seventh division)

小雨、中雨、大雨、暴雨日数倾向率进行讨论。

100°E 以东地区年无雨日数在增加 (图 4b), 100°E 以西地区年无雨日数以减少为主。四川和贵州的部分地区递增幅度较大, 例如: 最大值为 0.762 d a^{-1} (四川峨眉山 56385)、第二大值 0.587 d a^{-1} (贵州册亨 57909); 青藏高原东部和新疆西部部分地区减少趋势是 -0.225 d a^{-1} (西藏那曲 55299)。在递增 (减) 大值区基本上都通过了 95% 信度检验。

年小雨日数年变率空间分布 (图 4c) 和无雨日数相似, 最大递减率也出现在四川峨眉山 (-0.552 d a^{-1})、次高值是贵州册亨 (-0.537 d a^{-1}); 最大递增率在青海玛多 56033 (0.178 d a^{-1}), 都通过了 95% 信度检验; 可以说, 近 60 年我国西部地区 (100°E 以西) 年无雨日数减少, 年小雨日数增加; 东部地区恰好相反。

年中雨日数 (图 4d) 呈增加趋势的有: 青藏高原东部、新疆西部、长江中下游地区、东北东部和内蒙北部。其中增幅较大站点有: 安徽黄山 58437 (0.141 d a^{-1})、浙江萧山 58459 (0.125 d a^{-1})、青海达日 56046 (0.117 d a^{-1}) 等。年中雨日数有明显减少趋势的台站是广西桂林 57957 (-0.150 d a^{-1})、四川峨眉山 56385 (-0.146 d a^{-1}) 等。以上站点雨日数的线性倾向率都通过了 95% 信度检验。

由于大雨、暴雨在我国西部出现的日次极少, 以下只分析东部地区的情况。年大雨日数 (图 4e) 在长江中下游和华南大部为增加趋势: 0.092 d a^{-1} (广东广州 59287)、 0.073 d a^{-1} (江西余江 58616); 递减最大值是 -0.063 d a^{-1} (江苏灌云 58047); 东部其他地区正负值交替出现。对于年暴雨日数而言 (图 4f), 东部地区大多都在减少, 东北、华北递减的强度和范围都比较大, 递减率较大的站点有: 山东莒县 54936 (-0.035 d a^{-1})、四川简阳 56295

(-0.034 d a^{-1}) 等; 只有在南方的局部地区年暴雨日数略有增加, 例如江西南城 58715 (0.074 d a^{-1})。以上站点雨日数的线性倾向率都通过了 95% 信度检验。

通过单站日降水量和各量级降水日数年变化分析, 了解到多年的降水量在各个分区内部变化特点及其在全国的空间分布状况, 有助于对区域内降水差别的认识。各分区的年平均降水量 (雨日) 也是区域内所有台站的年降水量 (雨日) 的算术平均, 表 1 是各分区近 60 a 的年平均降水量 (雨日) 线性倾向率。长江中下游区、华南区、北疆的日降水量年平均呈递增趋势, 而且都有较大的数值, 其中长江中下游区的年降水量递增幅度最大; 其他四个分区则是较弱的递减。各量级雨日数变化趋势上, 西北区: 小雨、大雨、暴雨日数减少, 中雨日数增加; 西南区: 小雨、中雨日数显著减少, 大雨、暴雨日数增加; 东北区: 小雨、大雨、暴雨日都递减, 其中小雨日数减少幅度较大, 而中雨日有所增加; 华北区: 和东北区有相似的变化特点, 而且小雨日数显著减少; 长江中下游: 小雨日减少, 中雨、大雨、暴雨日均有较大的增加, 其中暴雨日增加幅度在 7 个分区中是最大的; 华南区: 小雨、中雨日递减, 大雨、暴雨日数都有比较大的增幅; 北疆: 小雨、中雨、大雨日都是递增的趋势。

由于降水空间分布的非连续性, 同一区域内站点间差异较大, 对比图 4a-d, 在西北区 (西南区) 台站年降水量、无雨日、小雨日多年变化有不同的趋势, 大致以 100°E 为界两个相反的趋势, 西北区 (西南区) 100°E 以西的站点数是 26 (10), 区域总站数是 101 (99), 占比较小, 因而, 整个区域的降水年变化就以 100°E 以东的台站为主导。综上所述, 纬度较低的区域 (长江中下游区、华南区、西

表 1 各分区日降水量年均值和各级降水雨日数年均值在 1956~2015 年的线性倾向率

Table 1 Linear trends of annual average daily precipitation and the number of rainy days for all precipitation categories within each division from 1956 to 2015

	线性倾向率					
	平均降水量	无雨日数	小雨日数	中雨日数	大雨日数	暴雨日数
西北区	-0.0006	0.0253	-0.0269	0.0048	-0.0034	-0.0009
西南区	-0.0013	0.1520**	-0.1304**	-0.0288**	0.0024	0.0025
东北区	-0.0010	0.0564	-0.0615**	0.0081	-0.0031	-0.0007
华北区	-0.0030	0.1008**	-0.0922**	0.0016	-0.0042	-0.0053*
长江中下游	0.0071**	-0.0012	-0.0729*	0.0355*	0.0189	0.0132**
华南区	0.0049	0.0828	-0.1151**	-0.0055	0.0212	0.0106*
北疆	0.0028**	-0.0666	0.0167	0.0403**	0.0083**	—

注: “—”表示无数值; 平均降水量倾向率单位: mm a^{-1} , 雨日数倾向率单位: d a^{-1} ; “*”表示通过 90% 的信度检验, “**”为 95% 的信度检验。

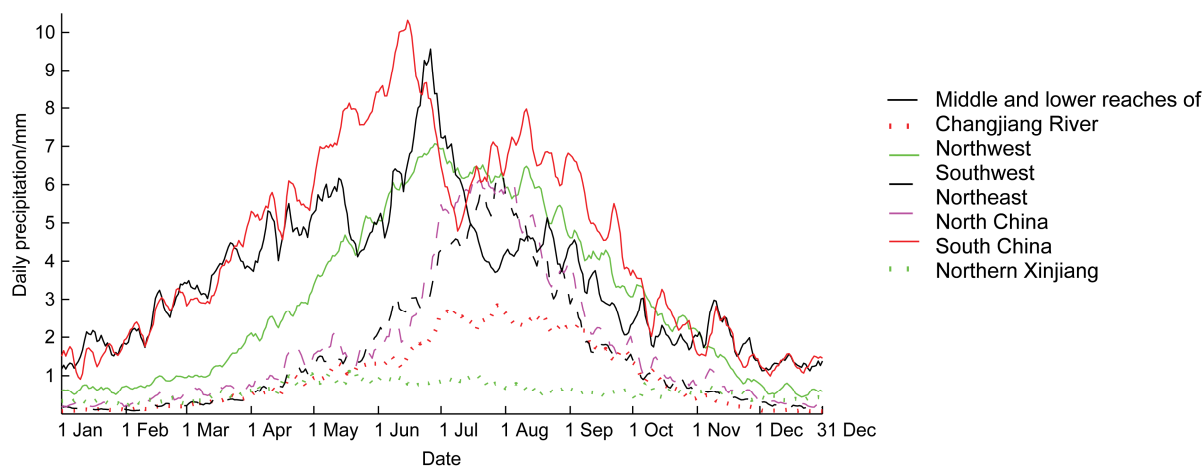


图3 各分区日降水量多年平均值的年内变化

Fig. 3 Annual cycle of long-term average of daily precipitation in each division

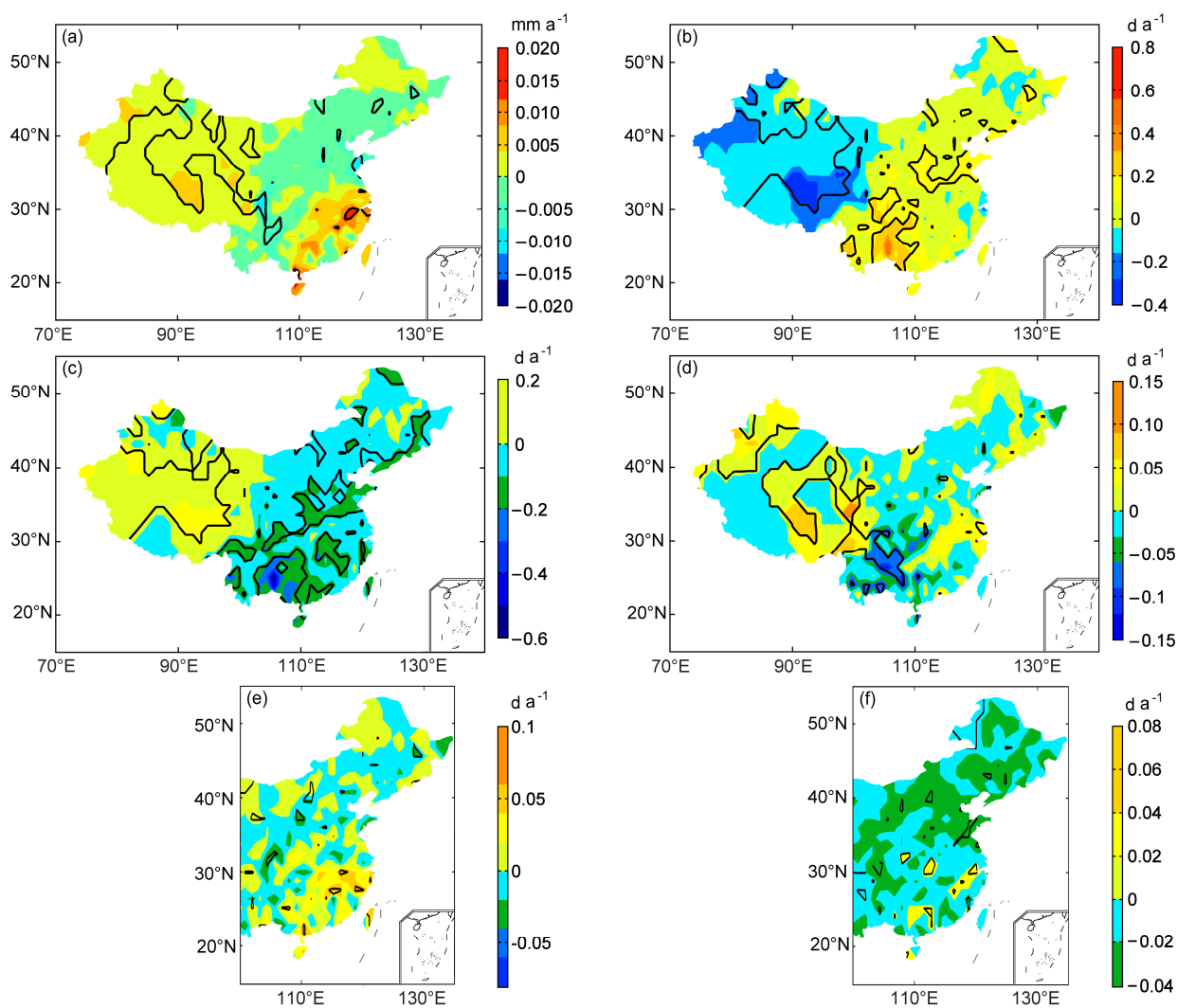


图4 中国 512 个台站 (a) 日降水量年均值、(b) 年无雨日数、(c) 年小雨日数、(d) 年中雨日数、(e) 年大雨日数、(f) 年暴雨日数在 1956~2015 年的线性倾向率分布。(a-f) 粗黑线的区域表示通过 95% 信度水平检验

Fig. 4 Spatial distributions of the linear trends of (a) annual mean precipitation, (b) annual number of no rain days, (c) annual number of light rain days, (d) annual number of moderate rain days, (e) annual number of heavy rain days, (f) annual number of rainstorm days based on daily precipitation at 512 stations from 1956 to 2015. The areas enclosed by thick black lines in (a-f) for values at/above the 95% confidence level

南区) 小雨日数递减, 大雨、暴雨日数有增加的趋势; 偏北地区 (华北区、东北区、西北区) 小雨、大雨、暴雨日数都在减少, 无雨、中雨日增加; 100°E 以西地区的小雨、中雨递增, 无雨日数是减少的趋势。

以 60 年的资料算出的降水量气候倾向率固然可以反映降水变化的总体趋势, 由于不同时间尺度上降水量变率有相异的特点, 可截取更短的时间段, 算出各个时间段上的倾向率来描述降水的非线性变化。每隔 10 a, 得到我国东部分区的年降水量倾向率, 就可以更细致的观察降水变化, 也能理解哪个时间段的变化对 60 年尺度的总趋势贡献率。

图 5a 表明长江中下游、华南、东北分区在 6 个时段上同时的递增 (减); 1966~1975 年、1976~1985 年、1986~1995 年、2006~2015 年都是递增; 1956~1965 年、1996~2005 年区域年降水量为减弱。在 1966~1975 年、2006~2015 年, 长江中下游倾向率分别是 0.1086 mm a^{-1} 、 0.1036 mm a^{-1} , 华南则是 0.1212 mm a^{-1} 、 0.0233 mm a^{-1} ; 近十年, 在长江中下游区域年降水量倾向率接近是华南的五倍, 而长江中下游年降水量又普遍小于华南, 表明长江中下游降水量增幅显著。华北区只有在近十年降水递减 ($-0.0150 \text{ mm a}^{-1}$), 其他五个时段都是正的倾向率, 说明近 10 年的降水减少对 60 年递减率

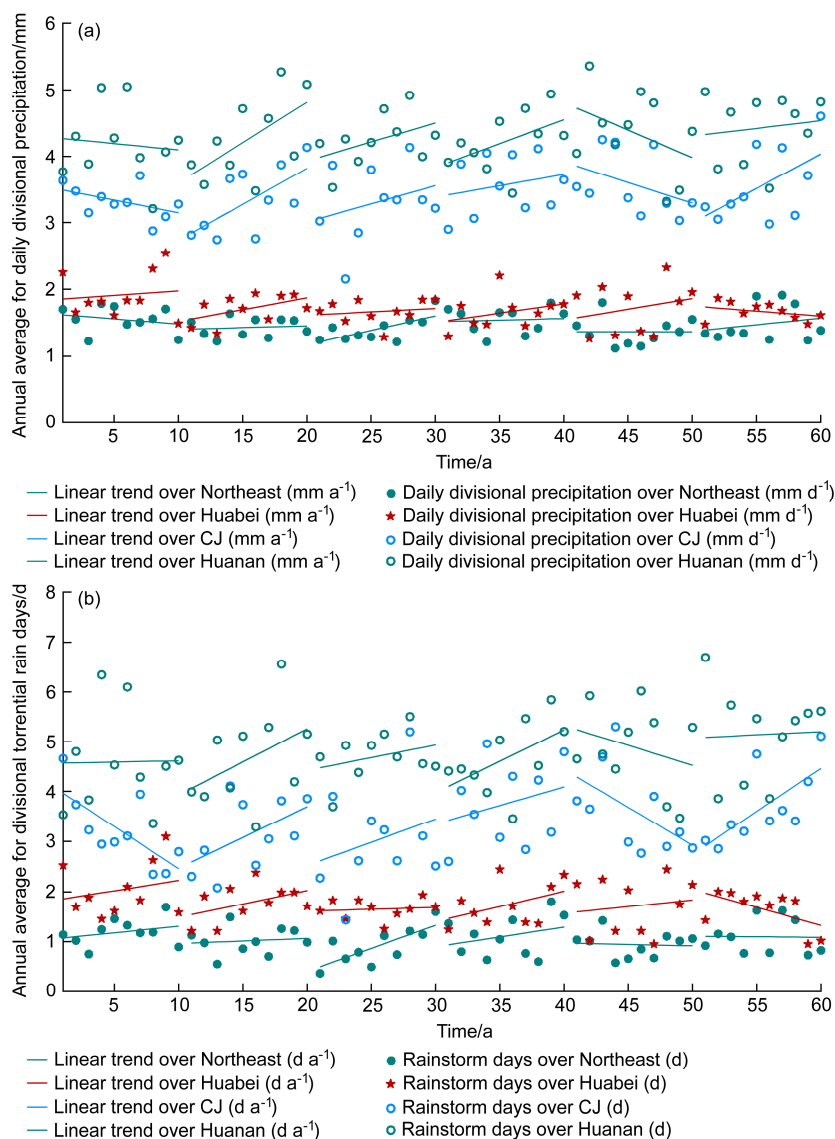


图 5 1956~2015 年中国东部分区 (a) 日降水量年均值、(b) 暴雨日数年均值时序及其十年时段的线性倾向率

Fig. 5 Annual averages and linear trends of (a) daily divisional precipitation and (b) rainstorm days at 10-year intervals for the four climate divisions in East China between 1956 and 2015

($-0.0030 \text{ mm a}^{-1}$) 有较大的贡献。南北区域间降水量有较高的离散度(图 5a), 不仅表明了我国降水量自南向北逐渐减少的趋势, 也反映了分区的合理性。区域年均暴雨日数(图 5b) 和降水量有相似性, 长江中下游区的暴雨日数倾向率在六个时段总体都比较大, 时间上依次为: -0.168 d a^{-1} 、 0.123 d a^{-1} 、 0.092 d a^{-1} 、 0.074 d a^{-1} 、 -0.152 d a^{-1} 、 0.173 d a^{-1} , 头二十年和近二十年, 先降后增幅度都比较大; 华南区近二十年的倾向率数值上都比较小; 华北区近十年暴雨日数明显减少(-0.072 d a^{-1}); 东北区暴雨日数近二十年相对平稳。

4.3 日降水量分区年均值周期分析

根据各分区站点日降水量, 得到 60 a 的区域年均值序列, 功率谱能提取隐含在气候序列中显著性周期, 将使用两种周期检测方法(自相关函数功率谱、小波功率谱), 得到可靠的结论。根据谱密度与自相关函数互为傅里叶变换的性质, 通过自相关函数作功率谱估计, 并进行信度检验(通过 95%信度水平检验); 得到的周期(图 6a–g): 西北区(2.857 a)、西南区(2.87 a、24 a)、东北区(2.449 a、3.529 a、30 a)、华北区(2.609 a、6.667 a)、北疆区(2.857 a、5.74 a)。

使用 PAUL 小波对降水序列进行分析, 图 6i–p 是各区域降水量的 PAUL 小波功率谱, 小波方法提供了更细致的信息: 图中粗黑线条所围的区域表示通过 95%信度检验, 都有较高的谱值, 从黑粗线所在的尺度上看, 大部份区域有 2~4 a 的周期性震荡, 只是在不同时段有强弱差异。由于不同类型的小波计算值会有些不同, 使用了气象常用的 Morlet 小波分析, 得到相应的功率谱(图略), 两种小波功率谱总体一致, 局部略有差异, 一般来讲, Morlet 功率谱得到的通过 95%信度检验区域时间序列上更连续。同样, 使用 Morlet 作了 2~4 a 功率谱平均方差(图 6q–x), 对比图 6i–p, 通过 95%信度的年份有较高的吻合度, 剔除其中相异的年份, 这种双重比较法得到较可信的 2~4 a 周期震荡出现的年份: 西北区(1956~1968 年、1996~2004 年)、西南区(1964~1973 年、1990~1994 年、2000~2013 年)、东北区(1956~1960 年、1964~1969 年、1995~2000 年、2008~2015 年)、华北区(1963~1967 年、1987~1991 年、1996~2004 年)、长江中下游区(1970~1983 年、1999~2003 年、2009~2015 年)、华南区(1960~1963

年、1969~1977 年、1994~1998 年、2005~2007 年)、北疆区(1985~1989 年、1996~1999 年、2006~2010 年)、全国(1958~1965 年、1970~1974 年、1986~1991 年、2006~2014 年)。

功率谱图也表明了区域年降水量还有更长时间的周期, 两种周期检测方法均有表现, 有较好的一致性。例如, 西南地区 24 a 的震荡(图 6b), 小波功率谱(图 6j) 显示自上个世纪 80 年代至今有 16~32 a 的高谱值区。另外, 东北地区 30 a 周期(图 6c), 对比小波功率谱(图 6k), 也有 24~32 a 的强谱值区, 即 1956~2015 年都维持一个高值带。

5 分区降水异常和大气环流的联系

通常对 500 hPa、700 hPa、850 hPa (以下简称高、中、低层) 环流分析, 得出降水产生的可能原因。使用 NCEP 的 u 、 v 风月均值得到年平均场, 将以分区日降水量年均值为指数回归得到回归系数场; 通过对图 7a–x 分析, 得到有价值的信息; 中国大部分区域的降水偏多往往伴有“东高西低、南高北低”的环流型。西北、东北、华北区在高、中、低等压面回归系数场上均是一致的“东高西低”流场, 而且高低环流中心在不同高度的位移量较小, 分区恰好位于高低压的过渡带中, 表明深厚、准正压的环流结构影响区域年降水量多寡。“东高西低”型中, 高低压主体都在 30°N 以北地区; 西北、东北、华北分区相对应低压中心依次在新疆北部、外蒙中部、外蒙西部; 高压中心相应于在东北东部、东海北部、日本海南部。“南高北低”型中, 高压主体位于南海东北部, 低压在长江下游地区南北摆动, 比较而言, 低压尺度上偏小。

西南分区降水偏多年对应的是鞍形场(图 7b、j、r), 气旋性环流在青藏高原西南侧、长江中下游地区, 两高压分别在青藏高原东北侧、南海北部, 而西南区恰好位于洋面上高压西北部的西南气流中; 显然, 这种“鞍”型环境场的强弱变化和降水多少密切相关。图 7g、o、w 显示北疆区域的降水多寡和西风带波动有相关。全国年平均降水量为指数回归风系数场(图 7h、p、x) 则是上述特点的综合反映。

回归风的系数场特点可从天气分析中得到合理解释, 夏季是我国主汛期, 东南向的副热带高压和西北部的西风带波动共同作用下引发降水, “东高西低、南高北低”流型也较易形成区域大范围降水。

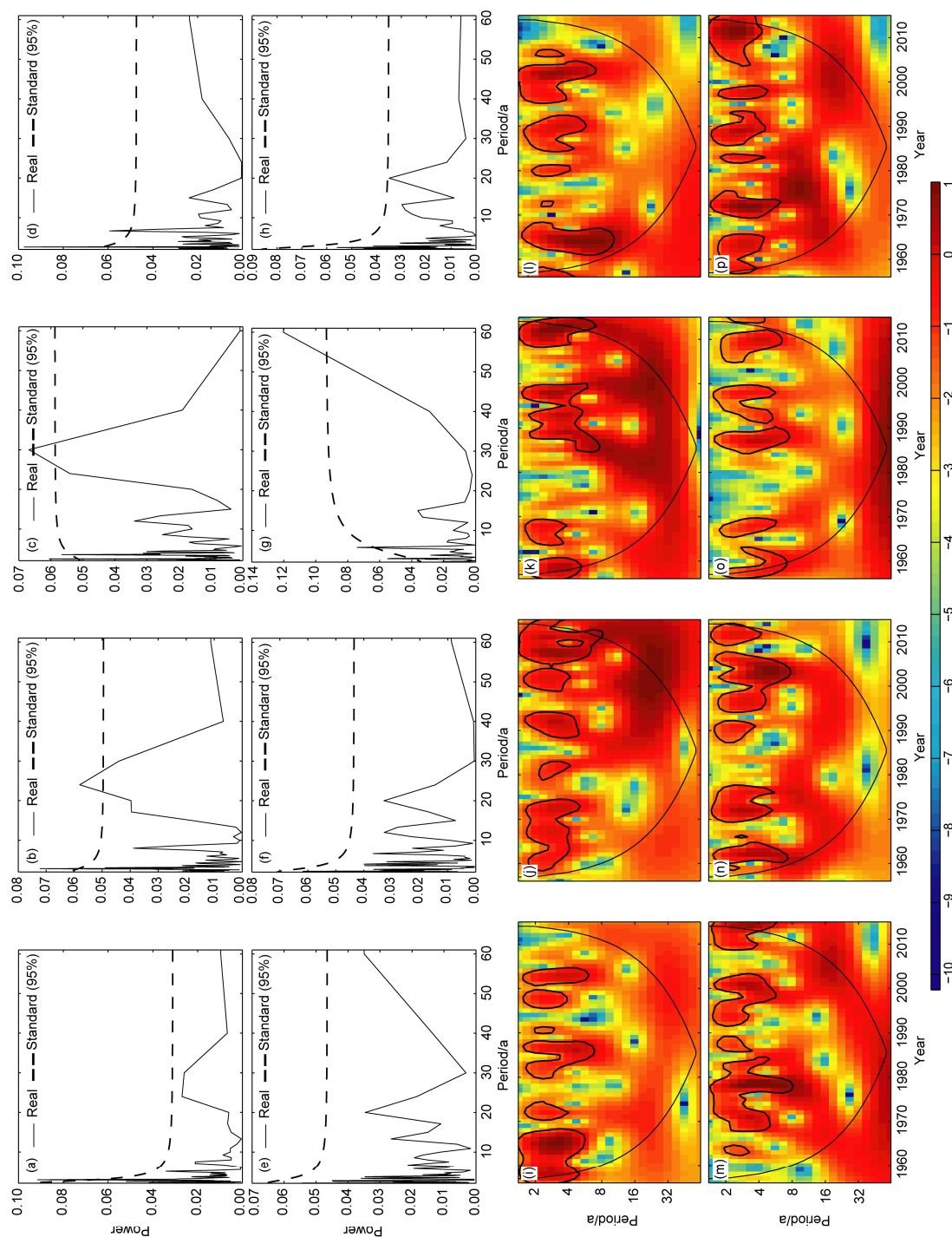


图 6 (a-g) 第一至第七分区日降水量年均值的自相关函数功率谱估计, (h) 全国日降水量年均值功率谱估计。1956~2015 年 (i-o) 第一至第七分区日降水量年均值的 PAUL 小波功率谱, (p) 全国日降水量年均值功率谱; (a-h) 中细虚线表示 95% 信度线。1956~2015 年 (i-o) 第一至第七分区日降水量年均值的 PAUL 小波功率谱, (p) 全国日降水量年均值功率谱; (i-p) 中粗黑线的区域表示高于 95% 信度水平。 (q-w) 第一至第七分区 2~4 a 尺度平均 Morlet 小波功率谱, (x) 全国日降水量年均值功率谱; (i-x) 中细虚线是 95% 信度线。

Fig. 6 Power spectra by autocorrelation function for annual average daily precipitation over (a-g) the seven divisions and (h) over the entire China. The wavelet power spectra using the PAUL wavelet analysis for annual average daily precipitation over (i-o) the seven divisions and (p) over entire China. The areas enclosed by thick black lines in (i-p) are for values at/above the 95% confidence level. Scale-averaged wavelet power over 2~4 a band for annual average daily precipitation over (q-w) the seven divisions and (x) over the entire China. The thin dashed line in (a-h) and (q-x) denotes the 95% confidence level.

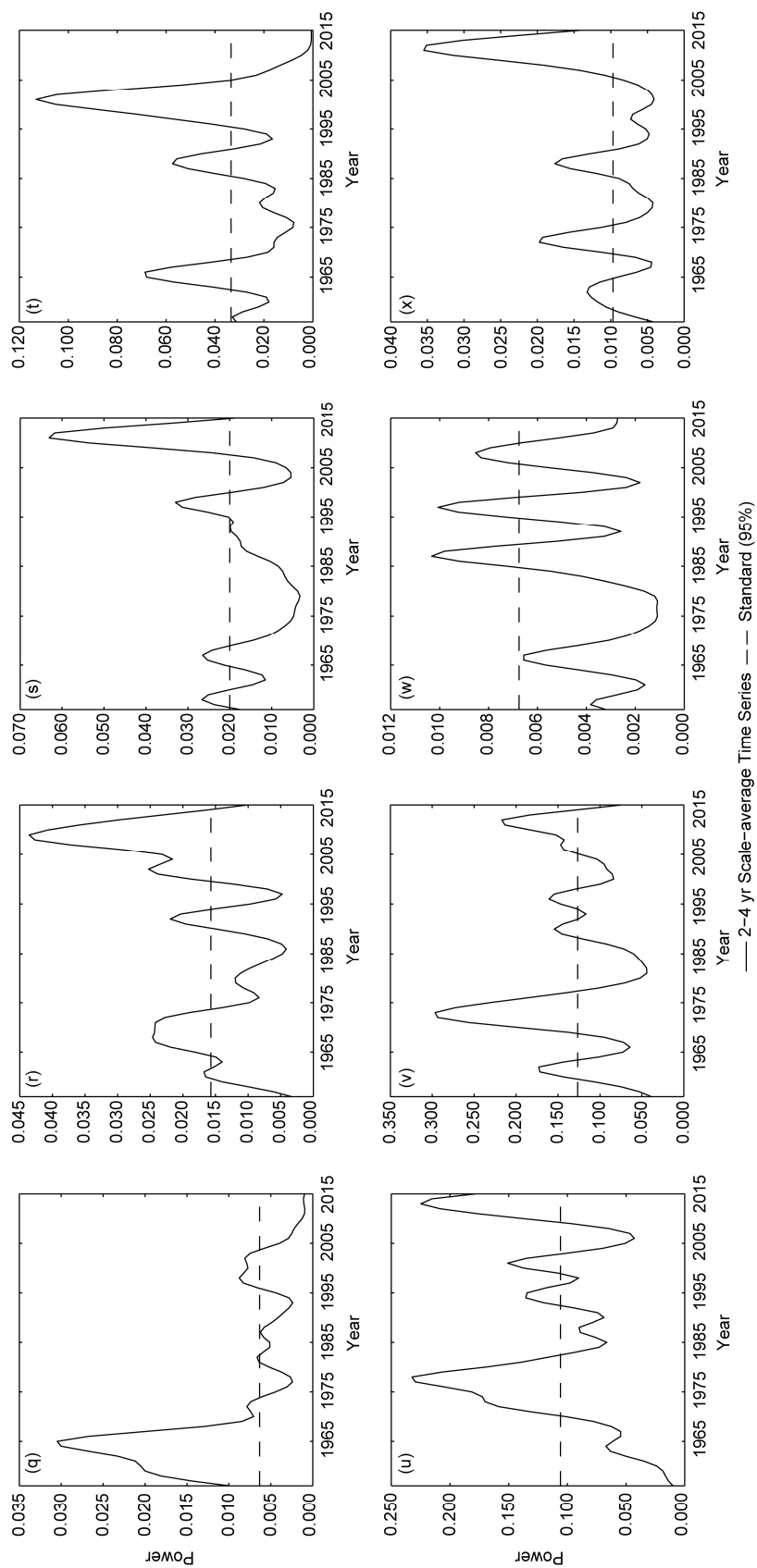


图 6 (续)

Fig. 6 (Continued)

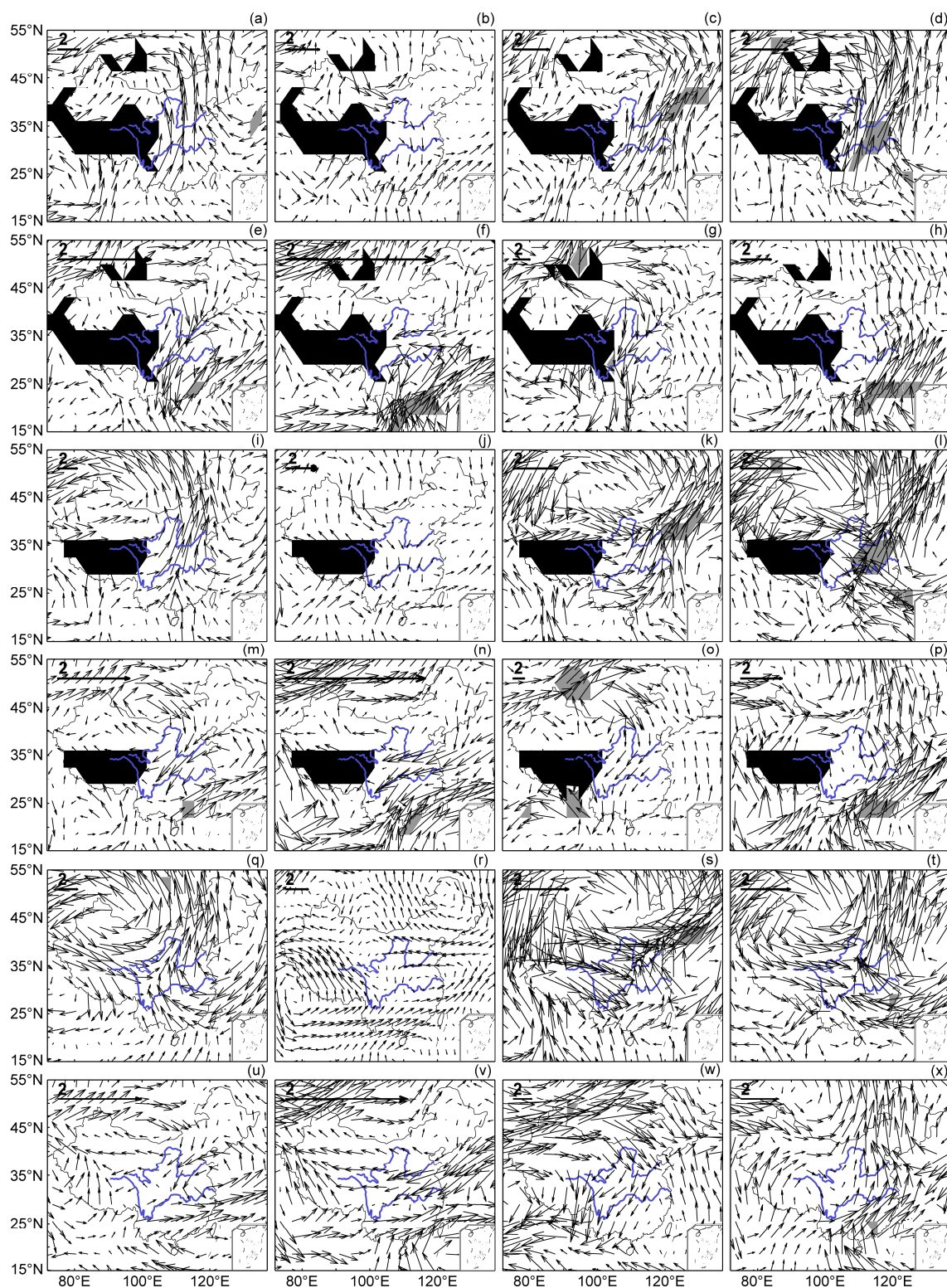


图 7 基于区域日降水量年均值回归的 (a-h) 850 hPa 风场、(i-p) 700 hPa 风场、(q-x) 500 hPa 风场的系数, 灰色阴影部分通过 95% 信度检验, 黑色阴影部分表示地面气压低于相应等压面的压强。其中 (a-g)、(i-o)、(q-w) 分别是第一至第七分区, (h)、(p)、(x) 对应全国

Fig. 7 Wind fields at (a-h) 850 hPa, (i-p) 700 hPa, and (q-x) 500 hPa regressed on annual averages of daily divisional precipitation. Gray shadings indicate the values are at/above the 95% confidence level. Black shadings indicate the surface pressure which is below the value of corresponding isobaric surface. (a-g), (i-o), (q-w) indicate the seven divisions respectively. (h), (p), and (x) indicate the entire China

根据区域年降水量标准差,定义涝(旱)年:以 60 a 的均值加(减)一个标准差为界,当区域年降水量大于(小于)此值即为涝(旱)年。通过公式:

$$\mathbf{Q} = (1/g) \int_{300}^{p_s} \mathbf{V} \cdot q dp = Q_\phi + Q_\lambda, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{Q} = (1/(a \cos \phi))(\partial Q_\lambda / \partial \lambda + \partial Q_\phi \cos \phi / \partial \phi), \quad (2)$$

其中, $\mathbf{Q}$ 是整层水汽通量矢量, Q_ϕ 是纬向水汽通量, Q_λ 是经向水汽通量, $\nabla \cdot \mathbf{Q}$ 是整层水汽通量散度, g 为重力加速度, $\mathbf{V}$ 是风矢量, p 为压强, λ 表示经度, ϕ 表示纬度, a 为地球半径。分别计算出旱年和涝年的水汽通量和散度,最后,将涝年均值减去旱年均值,得到水汽差异场。

将回归风系数场(图 7a-x)和水汽差异场(图 8a-g)比较分析,表明与流场匹配的整层水汽通量散度差值场上有共性和多样性。

“东高西低”型中,水汽旱涝年差异场有如下特点:高压主体位于中纬度的西太平洋上空,在高压中心附近都有西北—东南走向的水汽通量辐散带,图 8a-g 中水汽通量散度中心值大部分超过 $100 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; 中国大陆正好处于这辐散带西侧的水汽辐合带中,与之相伴的是高压西北侧西南气流的水汽通量输送;东北(华北)分区(图 8c、d),通过西南气流源源不断地向陆地输送水汽,区域上整场水汽通量散度旱涝年差值场都有较强的辐合值;西北分区位于低压南侧和东侧,是纬向水汽通量(图 8a),为西风带输送的水汽,所以总体降水量小。

“南高北低”环流型中,低纬洋面上高压北侧的整层水汽通量散度旱涝年差值场自西向东呈现“+ - + -”排列,大致位于: $95^\circ\text{E} \sim 110^\circ\text{E}$ 、 $110^\circ\text{E} \sim 115^\circ\text{E}$ 、 $115^\circ\text{E} \sim 125^\circ\text{E}$ 、 $125^\circ\text{E} \sim 130^\circ\text{E}$, 长江中下游(华南)区中心强度(图 8e、f)分别达到了: 346.8 (198.6)、-200.1 (-242.1)、114.3 (78.7)、-145.6 (-148.9) (以上数值的单位是 $10^{-6} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); 在 $95^\circ\text{E} \sim 110^\circ\text{E}$ 范围,长江中下游地区的旱涝年的水汽通量散度差异场偏大、偏强, $115^\circ\text{E} \sim 125^\circ\text{E}$ 、 $125^\circ\text{E} \sim 130^\circ\text{E}$ 散度差值场中心位置偏南;可见,长江中下游和华南分区的旱涝年水汽输送差异不仅是本地差别,还有来自其西侧强辐散带的水汽“源”作用及东侧洋面上的水汽辐散辐合有密切关联。从整层水汽通量矢量差异场来看,长江流域上都有一个明显的“气旋性”水汽通

量流场(图 8e、f),其西侧经向的水汽通量差异值为 $6.94 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (长江中下游区)、 $5.06 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (华南区),气旋性环流南侧、高压北部旱涝年的纬向水汽通量差值达到 $3.88 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (长江中下游区)、 $4.67 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (华南区);因此,旱涝年水汽差异特点和“南高北低”的动力场基本吻合,而且水汽通量旱涝年差别也大,显示了降水量多寡的原因。

受鞍形场影响,西南地区旱涝年水汽通量散度差值场有显著特点(图 8b),我国中部地区 $110^\circ\text{E} \sim 115^\circ\text{E}$ 有范围较大的辐散区,在川渝地区达到 $205.9 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$;从流场来看(图 7b、j、r),青藏高原东侧的中低层大气为反气旋性环流,是水汽辐散的动力条件,同时,东北向的水汽通量差值矢量在川渝地区也有反气旋性“弯曲”。西南地区中东部是水汽辐散场,西部则为水汽辐合,而中东部的强辐散和降水的关系是值得研究的问题,也表明来自西太平洋的水汽输送关系到西南地区年降水多寡。西风带的水汽输送影响北疆地区旱涝(图 8g)。全国旱涝年的水汽通量差异场(图 8h)和图 8e (图 8f) 十分相似,由于长江中下游区、华南区年降水量都远大于其他区域,那么,全国旱涝年与长江中下游(华南)相应出现的时间趋于一致,导致有相近水汽差异场,说明了对我国降水分区研究的重要性和必要性。

6 结论

(1) 根据国家气象信息中心均一化降水数据集,使用 1956~2015 年 512 个台站的日降水量资料进行 REOF 分析,得到七个分区,大约在 110°E 以西有三个分区:西北区(黄河中上游地区、青藏高原中北部、河西走廊、南疆)、西南区(青藏高原东南部、四川中南部、云贵高原)、北疆区; 110°E 以东是四个分区:东北区(内蒙北部、东北三省)、华北区(京津冀、黄淮地区)、长江中下游区、华南区(浙赣湘南部、广西东部、福建和广东)。分析不同分区的日降水量年内变化,展示了位于不同经纬度的分区降水量强度差异及年峰值出现时间。

(2) 各量级雨日数的区域年均值在 1956~2015 年倾向率作了比较:五个分区(西北区、西南区、东北区、华北区、华南区)的无雨日数增加;六个分区的小雨日数明显减少, -0.0269 d a^{-1} (西北区)、 -0.1304 d a^{-1} (西南区)、 -0.0615 d a^{-1} (东北区)、

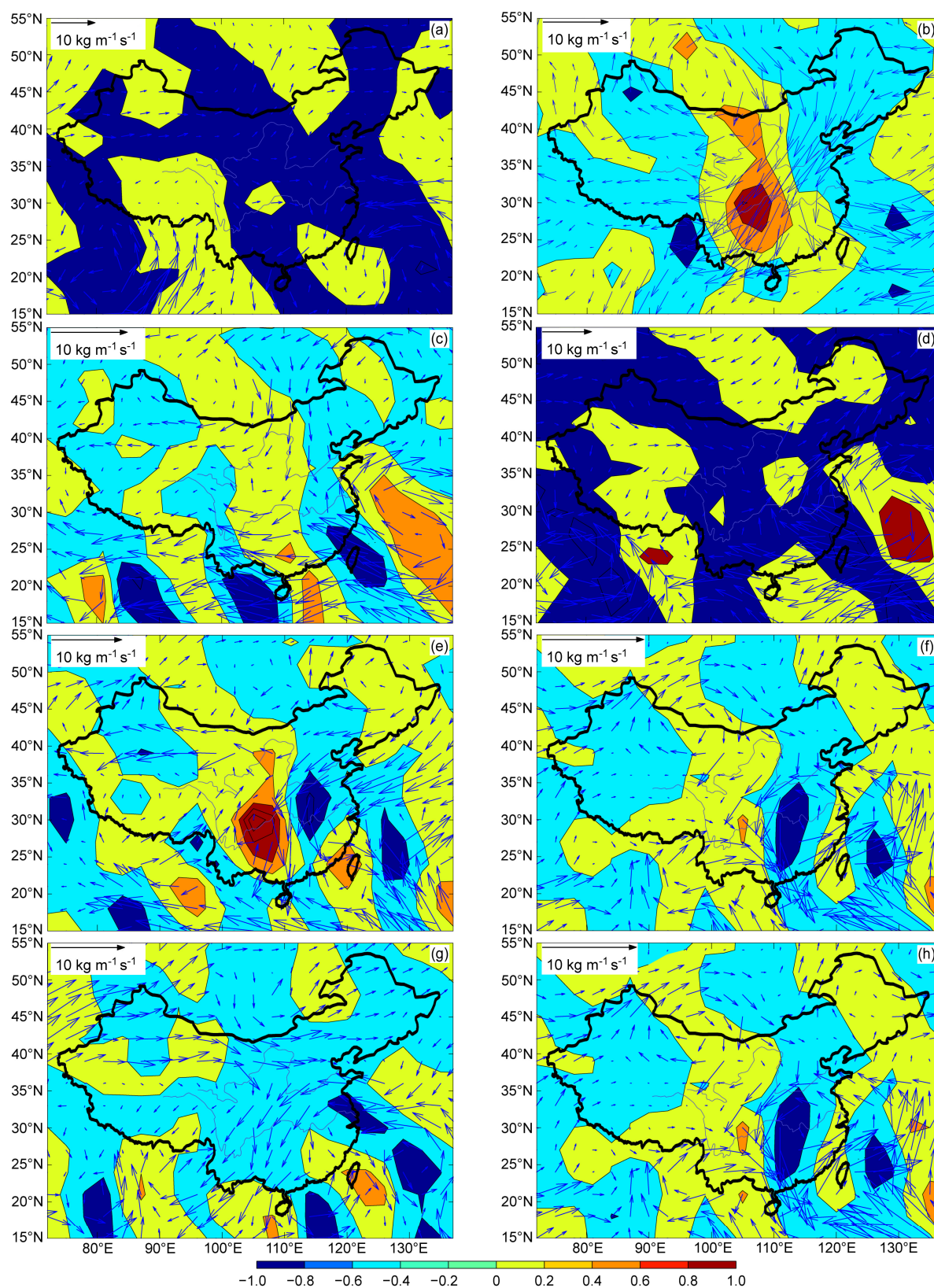


图 8 1956~2015 年中国 (a-g) 七个分区和 (h) 全国整层水汽通量 (矢量, 单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) 和水汽通量散度 (阴影区, 单位: $10^{-4} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 旱、涝年差值场

Fig. 8 Moisture flux differences (vectors, units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) and moisture flux divergence differences (shaded, units: $10^{-4} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) in the entire layer between dry and wet years from 1956 to 2015 in (a-g) the seven divisions and (h) over entire China

-0.0922 d a^{-1} (华北区)、 -0.0729 d a^{-1} (长江中下游区)、 -0.1151 d a^{-1} (华南区); 中雨日数在长江中下游区 (0.0355 d a^{-1})、北疆区 (0.0403 d a^{-1}) 明显增加, 西南区有一定幅度减少 (-0.0288 d a^{-1}); 大雨、暴雨日数则在长江中下游区、华南区有较大增幅。针对分区日降水量年均值而言, 长江中下游区、华南区、北疆区有所增加, 其他四个分区略有减少。

(3) 进行了单站或较小时间尺度上的倾向率比较。100°E 以西地区无雨日数减少、小雨日数增加; 100°E 以东地区大部无雨日数增加、小雨日数减少, 尤其在云贵高原中东部增(减)幅度都比较大。东部的四个分区, 以十年为时段, 计算日降水量和暴雨日数区域年均值的倾向率, 长江中下游区降水量和暴雨日数在近二十年(1996~2005 年、2006~2015 年)先降后增, 都有较大倾向率, 特别是近十年增幅都远大于华南区; 华北区只是在近十年呈递减趋势, 东北区总体平稳。

(4) 通过自相关函数、PAUL 和 Morlet 小波功率谱综合分析日降水量的分区年均值, 结果表明, 普遍存在 2~4 a 的周期性震荡(通过 95%信度水平检验), 经比较得到了各分区 2~4 a 降水量震荡信号较强的年份; 对于其他较长时间尺度的周期震荡(未达到相应信度水平)在自相关函数和小波功率谱中都有高谱值信号。

(5) 以区域日降水量年均值为指数对 500 hPa、700 hPa、850 hPa 风回归的系数场显示:“东高西低、南高北低”型环流有利于区域降水, 高压位于洋面, 低压在陆地上; 我国北方地区(西北区、东北区、华北区)降水偏多年属于“东高西低”型, 高压中心附近都有西北~东南走向的较强整层水汽通量辐散带(涝年减旱年值), 与高压西北侧相应的偏南水汽通量源源不断地向大陆输送水汽; 南方地区(长江中下游区、华南区)为“南高北低型”, 影响此区域年降水量多寡的高压主体位于南海东北侧低纬洋面上, 高压北部整层水汽通量散度(涝年减旱年值)自西向东呈现“+ - + -”排列, 均偏大、偏强, 长江流域上则有明显的整场水汽通量矢量“气旋性”环流; 西南区降水和典型的“鞍”型气压场密切相关, 整层水汽通量和水汽通量散度场也有相应特点。如上所述, 回归风系数场、旱涝年水汽通量和水汽通量散度差异场, 三个场相互间协调一致, 较合理解释了区域降水强弱年的大气动力

和水汽输送特点。

我国东临太平洋、西接欧亚大陆, 呈季风气候特征。主汛期出现在夏季风盛行期, 110°E 以东地区往往是夏季风主要活跃区, 而西北区、西南区东界线也恰好位于 110°E 附近, 反映了季风降水区域性强弱。夏季风强度自南向北逐渐减弱, 携带的暖湿水汽也相应减少, 其引发的降水通常是纬向带状分布; 华南区、长江中下游区、华北区总体也呈带状, 一定程度上说明了季风进退和交替而形成的各地雨季差异。季风系统异常复杂, 海陆分布是重要影响因素之一; 夏季风期间, 东亚洋面是高压、大陆盛行低压环流, “东高西低、南高北低”和上述特点相符。我国降水分布归因于大气环境场的演变, 降水量分区的物理意义和合理性分析, 还需要对相关天气系统路径及其降水落区统计特点进行深入研究。

参考文献 (References)

- Bieniek P A, Bhatt U S, Thoman R L, et al. 2012. Climate divisions for Alaska based on objective methods [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 51 (7): 1276–1289, doi:10.1175/JAMC-D-11-0168.1.
- Bieniek P A, Walsh J E, Thoman R L, et al. 2014. Using climate divisions to analyze variations and trends in Alaska temperature and precipitation [J]. *J. Climate*, 27 (8): 2800–2818, doi:10.1175/JCLI-D-13-00342.1.
- Bieniek P A, Bhatt U S, Walsh J E, et al. 2016. Dynamical downscaling of ERA-Interim temperature and precipitation for Alaska [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 55 (3): 635–654, doi:10.1175/JAMC-D-15-0153.1.
- 陈栋, 陈际龙, 黄荣辉, 等. 2016. 中国东部夏季暴雨的年代际跃变及其大尺度环流背景 [J]. *大气科学*, 40 (3): 581–590.
- Chen Dong, Chen Jilong, Huang Ronghui, et al. 2016. Interdecadal changes of summertime heavy rainfall in eastern China and their large-scale circulation backgrounds [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40 (3): 581–590, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1504.15144.
- Diaz H F, Quayle R G. 1978. The 1976–77 winter in the contiguous United States in comparison with past records [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 106 (10): 1393–1421, doi:10.1175/1520-0493(1978)106<1393:TWITCU>2.0.CO;2.
- Easterling D R, Wallis T W R, Lawrimore J H, et al. 2007. Effects of temperature and precipitation trends on U.S. drought [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (20): L20709, doi:10.1029/2007GL031541.
- Goodrich G B, Ellis A W. 2006. Climatological drought in Arizona: An analysis of indicators for guiding the governor's drought task force [J]. *The Professional Geographer*, 58 (4): 460–469, doi:10.1111/j.1467-9272.2006.00582.x.
- Grantz K, Rajagopalan B, Clark M, et al. 2007. Seasonal shifts in the North American monsoon [J]. *J. Climate*, 20 (9): 1923–1935, doi:10.1175/JCLI4091.1.
- Grundstein A. 2008. Assessing climate change in the contiguous United States using a modified Thornthwaite climate classification scheme [J]. *The Professional Geographer*, 60 (3): 398–412, doi:10.1080/

- 00330120802046695.
- 郭恒, 张庆云. 2016. 北方雨季中国东部降水异常模态的环流特征及成因分析 [J]. 大气科学, 40 (5): 946–964. Guo Heng, Zhang Qingyun. 2016. The dominant modes of precipitation anomalies over eastern China during the northern China rainy season and the possible causes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (5): 946–964, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1510.15218.
- Guttman N B. 1983. Variability of population-weighted seasonal heating degree days [J]. J. Climate Appl. Meteor., 22 (3): 495–501, doi:10.1175/1520-0450(1983)022<0495:VOPWSH>2.0.CO;2.
- Guttman N B, Quayle R G. 1996. A historical perspective of U.S. climate divisions [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (2): 293–303, doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0293:AHPOUC>2.0.CO;2.
- 韩函, 吴昊旻, 黄安宁. 2017. 华北地区夏季降水日变化的时空分布特征 [J]. 大气科学, 41 (2): 263–274. Han Han, Wu Haomin, Huang Anning. 2017. Temporal and spatial distributions of the diurnal cycle of summer precipitation over North China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (2): 263–274, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1610.15312.
- 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. 高原气象, 18 (4): 465–476. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. 1999. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (4): 465–476, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.1999.04.001.
- 黄琰, 封国林, 董文杰. 2011. 近50年中国气温、降水极值分区的时空变化特征 [J]. 气象学报, 69 (1): 125–136. Huang Yan, Feng Guolin, Dong Wenjie. 2011. Temporal changes in the patterns of extreme air temperature and precipitation in the various regions of China in recent 50 years [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 69 (1): 125–136, doi:10.11676/qxb2011.011.
- 金大超, 管兆勇, 蔡佳熙, 等. 2010. 近50年华东地区夏季异常降水空间分型及与其相联系的遥相关 [J]. 大气科学, 34 (5): 947–961. Jin Dachao, Guan Zhaoyong, Cai Jiaxi, et al. 2010. Anomalous summer rainfall patterns in East China and the related teleconnections over recent 50 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (5): 947–961, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.05.10.
- 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, doi:10.1175/1520-0477(1998)079%3C0231%3ASTO PAF%3E2.0.CO%3B2.
- Kunkel K E, Andsager K, Easterling D R. 1999. Long-term trends in extreme precipitation events over the conterminous United States and Canada [J]. J. Climate, 12 (8): 2515–2527, doi:10.1175/1520-0442(1999)012<2515:LTTIEP>2.0.CO;2.
- Kurtzman D, Scanlon B R. 2007. El Niño–Southern Oscillation and Pacific Decadal Oscillation impacts on precipitation in the southern and central United States: Evaluation of spatial distribution and predictions [J]. Water Resour. Res., 43 (10): W10427, doi:10.1029/2007WR005863.
- Leathers D J, Grundstein A J, Ellis A W. 2000. Growing season moisture deficits across the northeastern United States [J]. Climate Res., 14 (1): 43–55, doi:10.3354/cr014043.
- 李宏毅, 林朝晖, 宋燕, 等. 2013. 我国华南3月份降水异常的可能影响因素分析 [J]. 大气科学, 37 (3): 719–730. Li Hongyi, Lin Zhaohui, Song Yan, et al. 2013. Analysis of the possible factors that influence March precipitation anomalies over South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (3): 719–730, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11252.
- 李明刚, 管兆勇, 梅士龙. 2016. 夏季长江中下游地区降水持续性年(代)际变异及其与环流和Rossby波活动的联系 [J]. 大气科学, 40 (6): 1199–1214. Li Minggang, Guan Zhaoyong, Mei Shilong. 2016. Interannual and Interdecadal variations of summer rainfall duration over the middle and lower reaches of the Yangtze River in association with anomalous circulation and Rossby wave activities [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (6): 1199–1214, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1511.15257.
- 李淑萍, 侯威, 封泰晨. 2015. 近52年长江中下游地区夏季年代际尺度干湿变化及其环流演变分析 [J]. 大气科学, 39 (5): 885–900. Li Shuping, Hou Wei, Feng Taichen. 2015. Decadal variation of summer dryness/wetness over the middle and lower reaches of the Yangtze River and the evolution of atmospheric circulation in the last 52 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (5): 885–900, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1412.14186.
- McCabe G J, Palecki M A, Betancourt J L. 2004. Pacific and Atlantic Ocean influences on multidecadal drought frequency in the United States [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A., 101 (12): 4136–4141, doi:10.1073/pnas.0306738101.
- McRoberts D B, Nielsen-Gammon J W. 2011. A new homogenized climate division precipitation dataset for analysis of climate variability and climate change [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 50 (6): 1187–1199, doi:10.1175/2010JAMC2626.1.
- North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. Mon. Wea. Rev., 110 (7): 699–706, doi:10.1175/1520-0493(1982)110<0699:SEITEO>2.0.CO;2.
- 秦爱民, 钱维宏. 2006. 近41年中国不同季节降水气候分区及趋势 [J]. 高原气象, 25 (3): 495–502. Qin Aimin, Qian Weihong. 2006. The seasonal climate division and precipitation trends of China in recent 41 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (3): 495–502, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2006.03.017.
- Seager R, Tzanova A, Nakamura J. 2009. Drought in the southeastern United States: Causes, variability over the last millennium, and the potential for future hydroclimate change [J]. J. Climate, 22 (19): 5021–5045, doi:10.1175/2009JCLI2683.1.
- Soulé P T. 1992. Spatial patterns of frequency and duration for persistent near-normal climatic events in the contiguous United States [J]. Climate Res., 2: 81–89, doi:10.3354/cr002081.
- 魏蕾, 房佳蓓, 杨修群. 2017. 华南夏季12~30 d持续性强降水的低频特征分析 [J]. 气象学报, 75 (1): 80–97. Wei Lei, Fang Jiabei, Yang Xiuqun. 2017. Low frequency oscillation characteristics of 12–30 d persistent heavy rainfall over South China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 75 (1): 80–97, doi:10.11676/qxb2017.008.
- 熊敏詮. 2013a. 滑动窗口的普通克立格方法在降水量插值中的应用 [J]. 气象, 39 (4): 486–493. Xiong Minquan. 2013a. Application of the

- moving window ordinary Kriging method in precipitation interpolation [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 39 (4): 486–493, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.04.011.
- 熊敏詮. 2013b. 区域Delaunay三角剖分法在全国平均降水量中的应用 [J]. *气候与环境研究*, 18 (6): 710–720. Xiong Minquan. 2013b. Research on the application of constrained Delaunay triangulation in precipitation averaged over China [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 18 (6): 710–720, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12006.
- 熊敏詮. 2015. 近30年中国地面风速分区及气候特征 [J]. *高原气象*, 34 (1): 39–49. Xiong Minquan. 2015. Climate regionalization and characteristics of surface winds over China in recent 30 years [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 34(1): 39–49, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00159.
- 叶敏, 封国林. 2015. 长江中下游地区夏季降水的水汽路径的客观量化研究 [J]. *大气科学*, 39 (4): 777–788. Ye Min, Feng Guolin. 2015. Objective quantification of moisture transport that influences summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 39 (4): 777–788, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1409.14208.
- 赵俊虎, 杨柳, 曾宇星, 等. 2016. 夏季长江中下游和华南两类雨型的环流特征及预测信号 [J]. *大气科学*, 40 (6): 1182–1198. Zhao Junhu, Yang Liu, Zeng Yuxing, et al. 2016. Analysis of atmospheric circulation and prediction signals for summer rainfall patterns in southern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 40 (6): 1182–1198, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1601.15249.