

蒋竹将, 马振峰, 刘佳, 等. 2014. 一种改进的华西秋雨指数及其气候特征 [J]. 大气科学, 38 (1): 32–44, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13120.
Jiang Zhujiang, Ma Zhenfeng, Liu Jia, et al. 2014. Improved index and climatological characteristics of the autumn rain in western China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (1): 32–44.

一种改进的华西秋雨指数及其气候特征

蒋竹将^{1,2} 马振峰² 刘佳² 李奇临^{1,3}

1 成都信息工程学院, 成都 610225

2 四川省气候中心, 成都 610072

3 重庆市气象局, 重庆 401147

摘 要 利用 1960~2011 年中国 601 站 9~10 月逐日降水量、日照时数资料, 针对他人提出的华西秋雨指数, 并结合华西秋雨的天气气候特征, 改进建立了一种新的华西秋雨指数, 并与他人提出的指数做了对比分析。结果表明: 改进的华西秋雨指数能够相对更好的反映华西秋雨易发地区的地理分布及其强度变化, 更准确地表征华西秋雨的年际、年代际变化特征; 利用新指数发现华西秋雨的全区一致性特征明显, 并呈现准 6 年周期的年际变化, 其年代际变化特征明显, 1960 年代到 1970 年代初, 1980 年代到 1990 年代初偏强, 1970 年代中后期和 1990 年代后期偏弱, 进入 21 世纪, 呈现出由弱转强的趋势。

关键词 秋雨指数 华西 对比分析 气候特征

文章编号 1006-9895(2014)01-0032-13

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13120

Improved Index and Climatological Characteristics of the Autumn Rain in Western China

JIANG Zhujiang^{1,2}, Ma Zhenfeng², Liu Jia², and Li Qilin^{1,3}

1 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 Sichuan Climate Center, Chengdu 610072

3 Chongqing Meteorological Bureau, Chongqing 401147

Abstract After analyzing the daily precipitation and sunshine duration data from September to October of 1960–2011 from 601 stations in China, a new autumn rain index was proposed by comparing it with the autumn rain indices presented by others, and combining the weather and climatological characteristics of autumn rain in western China. We also examined the proposed index by using high-resolution empirical orthogonal function (EOF) analysis. The results suggest that the modified autumn rain index better describes the geographical distribution and variations in autumn rain intensity, as well the interannual and interdecadal characteristics of autumn rain in western China. The application of the new index also suggests that autumn rain is consistent throughout western China. According to the power spectrum, the autumn rain index exhibits a quasi 6-year oscillation on the interannual timescale and pronounced interdecadal variations. In western China, the autumn rainfall was above normal during the 1960s to early 1970s and 1980s to early 1990s, whereas there was less rainfall in the mid to late 1970s, the late 1990s, and in the early 21st century. However, the autumn rainfall in western China has been increasing since the mid 2000s.

Keywords Autumn rain index, Western China, Orthogonal analysis, Climatological characteristics

收稿日期 2013-01-25, 2013-06-26 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41275097

作者简介 蒋竹将, 男, 1987 年出生, 硕士研究生, 主要从事短期气候预测研究。E-mail: jiangzhujiang@yahoo.com.cn

通讯作者 马振峰, E-mail: mzf616@yahoo.com.cn

1 引言

华西秋雨是一种秋季发生在我国华西地区的特殊天气气候现象, 以多绵绵阴雨为主要特征, 主要分布在渭水流域、汉水流域、四川盆地、滇东到黔等大部地区, 尤其以四川盆地、贵州北部及西部最为常见。华西秋雨出现时段以 9~10 月为主, 最早可从 8 月下旬开始, 最晚可在 11 月下旬结束。我国华西地区位于青藏高原的东侧, 秋季频繁南下的冷空气因受秦岭和云贵高原以及青藏高原东侧地形阻滞, 与原停滞在该区域的暖湿空气相互作用, 使低层锋面活跃加剧, 产生仅次于夏季降水的一个次极大值降水即华西秋雨。

大气环流是影响大范围区域性降水的主要原因, 20 世纪 50 年代叶笃正等 (1958)、高由禧和郭其蕴 (1958) 等老一辈科学家就开始了对华西秋雨的讨论和探索, 提出随着北半球秋季大气环流从秋季到冬季调整所导致的区域性降水现象, 在我国的四川盆地、贵州东部等地区的秋季多降水表现为华西秋雨现象。随后徐桂玉和林春育 (1994)、白虎志和董文杰 (2004) 等研究表明, 华西秋雨区在空间分布上主要表现为南北相反型、经向型和全区一致型的分布特征。进入 21 世纪之后, 研究表明 (鲍媛媛等, 2003; 方建刚等, 2005; 贾小龙等, 2008; 蔡芎宁等, 2012; 李莹等, 2012; 柳艳菊等, 2012) 华西秋雨现象有所增强的趋势。9~10 月是华西地区农作物收获的季节, 华西秋雨的发生造成降水量的增加、日照时数的减少以及气温的降低, 给当年和来年农作物的收成和插播造成严重的气象灾害。近年来的研究表明 (孙昭萱等, 2013) 华西秋雨的增强趋势更多的体现在秋雨量强度的增加上, 由于异常增多的秋季降水而形成的秋汛, 对于华西地区的国民经济持续发展也有重要影响。因此, 对华西秋雨的研究不仅是个科学问题, 而且在应用上也具有重大的实际意义。

实际上, 我国对于华西秋雨的研究还十分有限, 很少有人提出一个统一、定量、客观的华西秋雨指标对华西秋雨进行系统的研究。白虎志和董文杰 (2004) 认为华西秋雨主要表现为阴雨绵绵, 综合考虑了降水量和降水日数两方面的特征, 定义了秋雨指数 (ARI, Autumn Rain Index) 来反映华西秋雨的特点。本文在白虎志等人提出的 ARI 指数基础上, 提出了一种改进的华西秋雨指数 (MARI,

Modified Autumn Rain Index), 与他人的指数进行了对比研究, 探讨了改进建立的华西秋雨指数在反映华西秋雨地理分布、强度变化以及表征华西秋雨天气气候特征方面的优越性, 并利用改进的华西秋雨指数分析了华西秋雨的气候特征。

2 资料

本文采用国家气象信息中心提供的 1951~2011 年中国 715 台站资料, 经过站点和年份筛选, 提取了 1960~2011 年全国 601 个站的逐日降水量和逐日日照时数。个别站点日降水量或日照时数缺失, 我们用气候日平均值进行了插补。

3 改进的华西秋雨指数

3.1 三种华西秋雨指数介绍

3.1.1 秋雨指数 ARI

白虎志和董文杰 (2004) 定义秋季降水量占全年降水量的百分率与秋季 ≥ 0.1 mm 的降水日数的乘积代表 ARI。

3.1.2 逐日秋雨指数 DARI

王春学等人^①提出了逐日秋雨指数 (DARI, Daily Autumn Rain Index)。首先计算当天及前四天的降水量贡献之和 (RR_α):

$$RR_\alpha = \sum_{\beta=1}^5 \frac{R_{\alpha-\beta+1}}{\beta^2}, \quad (1)$$

其中, β 表示计算量当天向前推算的间隔天数 (当 $\beta=1$ 时, 记为计算量当天, 当 $\beta=2$ 时, 记为计算量前一天, 以此类推), α 表示计算量当天距起始计算日期的日数, $R_{\alpha-\beta+1}$ 表示某日降水量。

然后计算当天及前四天中日照时数小于 6 小时的天数 (N_α)。

$$N_\alpha = \sum_{\beta=1}^5 n, \quad \begin{cases} n=1, h_{\alpha-\beta+1} < 6 \\ n=0, h_{\alpha-\beta+1} \geq 6 \end{cases}, \quad (2)$$

其中, β 表示计算量当天向前推算的间隔天数 (当 $\beta=1$ 时, 记为计算量当天, 当 $\beta=2$ 时, 记为计算量前一天, 以此类推), α 表示计算量当天, $h_{\alpha-\beta+1}$ 表示第 α 日向前推算 β 天时第 $\alpha-\beta+1$ 日的日照时数。

用 RR_α 与气候平均 5 天降水量之比乘以 5 天内日照时数小于 6 小时的天数

①王春学, 马振峰, 王劲廷. 40 年华西秋雨特征及其与西太平洋暖池海表温度的耦合振荡[J]. 待发表

$$\text{DARI}_\alpha = \frac{RR_\alpha}{\bar{R}} \times N_\alpha, \quad (3)$$

$$\frac{\bar{R}}{365} \times 5$$

其中, DARI_α 表示距起始计算日期 α 个日数的逐日华西秋雨指数, $\bar{R}$ 表示气候平均年降水量。

3.1.3 秋雨指数 ARnw

柳艳菊等人^①提出了一个新华西秋雨指数 ARnw, 在监测区域及时段内, 若某一天有 50% 及以上的台站出现有效降水 (日降水量 ≥ 0.1 mm), 算为一个雨日, 否则为一个非雨日, 计算方法如下:

$$\text{ARnw} = \frac{9 \sim 11 \text{ 月降水量}}{\text{全年降水量}} + \frac{9 \sim 11 \text{ 月雨日}}{\text{全年雨日}}$$

在本文中为了与其他华西秋雨指数作比较, 将 ARnw 中的降水量和雨日提取时间范围设定为 9~10 月。

3.2 改进的华西秋雨指数

3.2.1 MARI 的计算方法

华西秋雨的灾害性主要体现在日照不足、多阴雨日, 这种天气气候特征对农业的影响极大, ARI 所定义的秋雨日数仅考虑了大于 0.1 mm 降水的天数, 而本文则在考虑了华西秋雨细雨绵绵特征的同时, 又考虑了阴雨寡照。在综合考虑了华西秋雨三方面影响因子, 雨量、雨日及日照时数的条件下, 将改进的华西秋雨指数定义为:

$$\text{MARI} = \frac{R_{\text{aut}}}{R_{\text{year}}} \times L, \quad (5)$$

其中 R_{aut} 是华西地区秋季 9~10 月秋雨期内降水量, R_{year} 为华西地区年降水量, L 为华西秋雨日数。秋雨指数单位为 d。公式中秋季雨量占年降水量的比值, 可以消除地理分布带来的降水量差异又可以突出华西秋雨降水量较大的特征。若某一天气象台站出现有效降水 (日降水量 ≥ 0.1 mm) 且日照时数小于 0.1 个小时, 则算为一个雨日, 否则为一个非雨日。对华西秋雨日数的统计标准规定如下: (1) 若出现连续 5 个及以上的雨日则算作一个雨期的开始, 第一个雨日出现的时间为雨期开始时间; (2) 若雨期内任意雨日之后出现连续 5 个及以上的非雨日, 同时将这一雨日之后的第一个非雨日定为雨期结束时间; (3) 雨期开始时间至雨期结束时间前一日之间的时段为雨期持续时间。

依据以上标准, 逐年计算了 1960~2011 年 52

年 8 月 11 日至 11 月 30 日华西秋雨的雨期个数和雨期持续时间, 提取出了华西秋雨主要发生时段 9~10 月秋雨期内的降水量和雨日。

3.2.2 MARI 空间分布

有研究指出, Cressman 客观分析方法 (Cressman, 1959) 可能使一些空值格点由于附近台站有较大值而产生虚假信号, 这是目前插值方法存在的普遍问题 (胡娅敏等, 2008)。而冯锦明等 (2004) 指出 Cressman 客观分析方法对中国台站资料进行插值用于研究问题是可行的。本文用 Cressman 客观分析方法对全国 601 个台站 1960~2011 年 52 年的华西秋雨指数 MARI 进行插值, 选取 Cressman 自动调节半径, 得到华西秋雨指数 MARI 的中心分布 (图 1)。可以看出, 华西秋雨的大值区主要分布在四川盆地、黔北、湖南和湖北的西部、汉水流域、渭水流域等地, 符合华西秋雨易发生区域。

将全国 601 个站点 1960~2011 年 52 年的 MARI 气候态值进行顺序排序, 下文所指的气候态值均为 1960~2011 年 52 年该要素的平均值。提取前 10% 的台站作为华西秋雨区典型站点, 得到图 2 所示的 60 个华西秋雨站点分布。海南琼中站的 MARI 气候态均值在前 10% 中, 但由于其不属于华西范围, 故不将其作为华西秋雨站点。下文中所引用的华西秋雨区为图 2 中各个气象站点的分布区域。

3.2.3 MARI 等级划分标准

我们提取华西秋雨区内各气象站点 1960~2011 年逐年的 MARI 值, 进行区域内各气象台站平均得到华西秋雨区的逐年 MARI 值, 进而求出华西秋雨指数逐年变化的距平值。如图 3 所示, 以改进的华西秋雨指数的 ± 1 倍标准差为判断华西秋雨强弱的标准, 对华西秋雨指数 MARI 的阈值进行如下划分:

表 1 华西秋雨等级划分的阈值标准

Table 1 The standard threshold value for different autumn rain levels

强度等级	改进的华西秋雨指数 (MARI)
严重	≥ 3.2 d
较强	3.2~2.4 d
一般	2.4~1.5 d
较弱	≤ 1.5 d

3.2.4 华西秋雨强度的分布特征

根据改进的华西秋雨指数强度阈值标准, 计算

① 柳艳菊, 司东, 孙丞虎. 华西秋雨监测指标研究及实时业务建设 [J]. 待发表

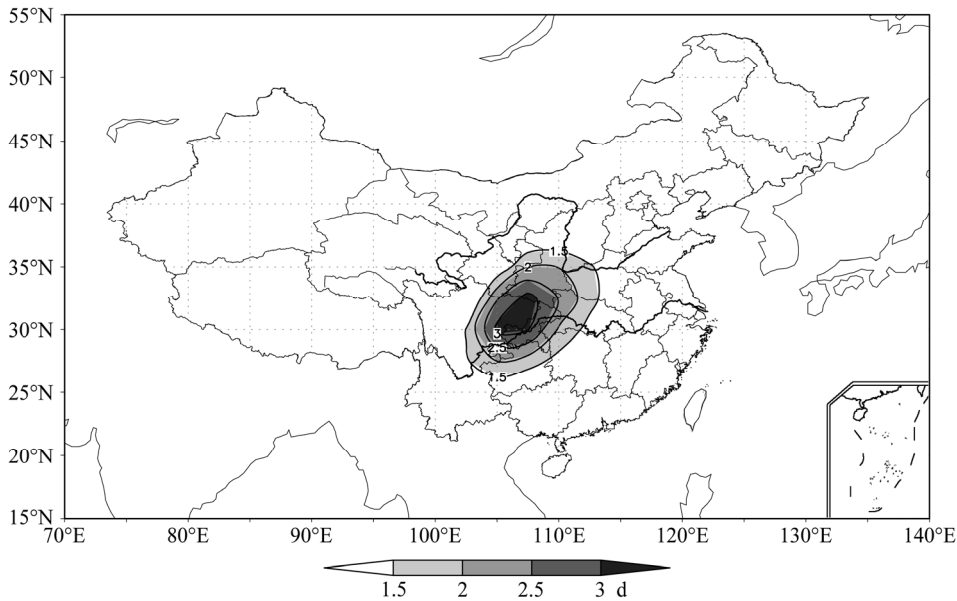


图 1 改进的华西秋雨指数中心分布。单位：d
Fig. 1 The center distribution of the modified autumn rain index. Unit: d

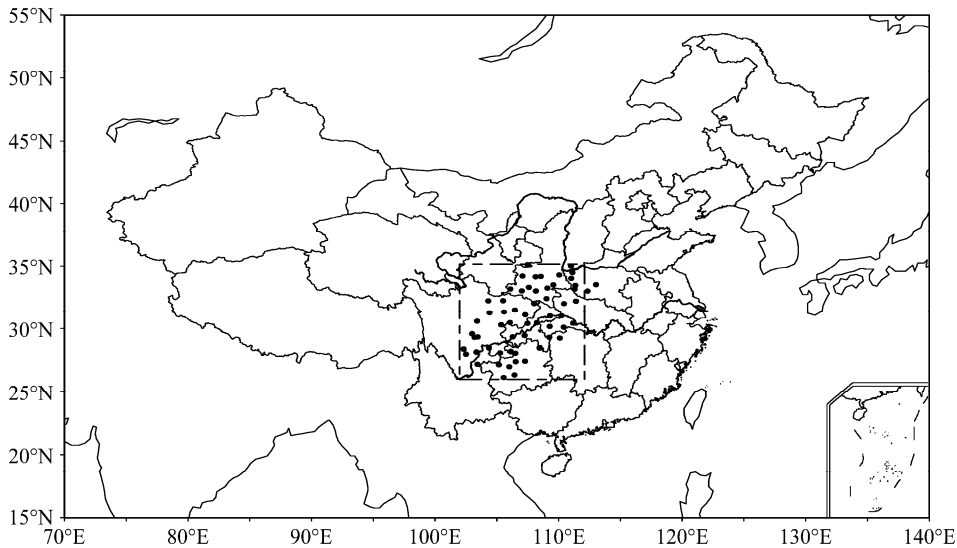


图 2 华西地区 60 个气象台站的分布（黑点为站点位置）
Fig. 2 The distribution of 60 meteorological stations in western China (black dots show the locations of meteorological stations)

了 1960~2011 年共 52 年华西秋雨区 60 个气象台站的秋雨强度等级状况（表 2），可见，较弱华西秋雨强度出现频次最多，其次为一般华西秋雨强度和严重华西秋雨强度，频次出现最少的为较强等级的华西秋雨。

表 2 华西秋雨各强度等级出现次数及频率
Table 2 Occurring time and frequency of different strength grads of autumn rain in western China

	严重	较强	一般	较弱
出现次数	787	451	747	1135
频率	25.2%	14.5%	23.9%	36.3%

可见，从 1960 年到 2011 年华西秋雨区域出现一般及以上强度的华西秋雨为 1985 个站（次），占总站（次）的 63.6%，极大频率和次大频率分别是较弱等级和严重等级强度，两者频率总和占总站（次）的 61.5%，说明华西秋雨区常出现严重秋雨和秋季无秋雨的极端现象，两极分化严重，这决定了秋季华西秋雨区以明显的秋雨强弱年交替为主的气候特征占据了主导地位。

采用 MARI 华西秋雨指数及其确定的华西秋雨强度指标，计算了 1960~2011 年华西地区各级强度秋雨出现的次数。图 4 中分别为华西秋雨严重、

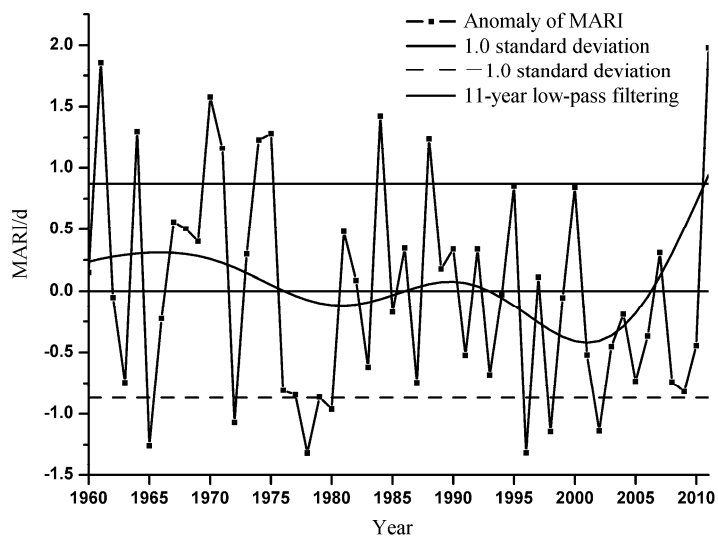


图3 改进的华西秋雨指数 MARI 逐年距平变化, 单位: d。点实线为 MARI 距平, 细实线为 11 a 低通滤波, 加粗实线为 1.0 倍标准差, 虚线为 -1.0 倍标准差

Fig. 3 The evolution of anomaly of the modified autumn rain index during 1960 to 2011. Unit: d. The point solid line represents MARI, the thin line represents the 11-year low-pass filtering, the thick line represents the 1.0 standard deviation, the dashed line represents the -1.0 standard deviation

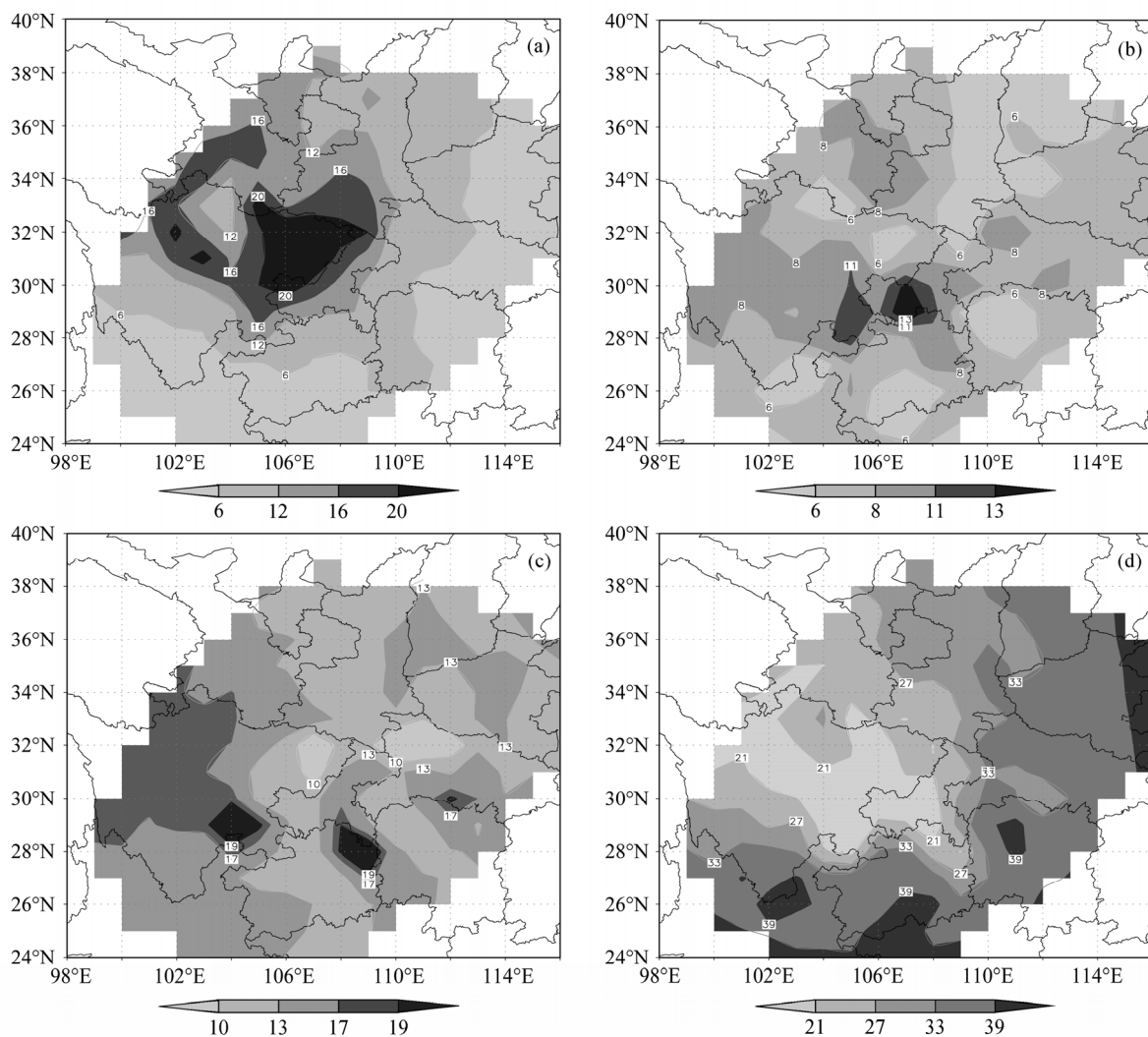


图4 华西地区各强度等级秋雨发生次数空间分布: (a) 严重; (b) 较强; (c) 一般; (d) 较弱

Fig. 4 The spatial distribution of occurring frequency for different grads of autumn rain in western China: (a) Severe; (b) strong; (c) common; (d) weak

较强、一般和较弱的次数分布。图 4a 可以看出，四川盆地、汉水流域、重庆一带出现严重强度等级的华西秋雨在 20 次以上，最大中心在四川盆地，说明上述地区容易发生严重华西秋雨现象。图 4b 贵州北部、重庆南部、四川南部出现 10 次以上的较强等级华西秋雨，表明这些地方出现较强等级强度华西秋雨事件较华西秋雨区内其余地区较多。图 4c 除了四川东北部、湖南西部地区出现了低于 10 次的一般等级强度华西秋雨，整个华西秋雨区内都高于 10 次，说明秋雨区内极易发生华西秋雨事件。图 4d 显示出华西秋雨区内出现较弱秋雨的次数在 25 次以上，与秋雨区内出现严重与较强的次数之和相当，说明华西秋雨区内易发生非弱即强的极端性秋雨天气现象。

4 对比分析

4.1 秋雨日数比较

依据华西秋雨指数 DARI、ARnw、MARI 和 ARI 对秋雨日数的定义，分别提取了华西秋雨区 1960 年到 2011 年逐年区域平均的秋雨日数（图 5）。可以看出，各指数秋雨日数的年际变化趋势较为一致。四个指数共同指示出的秋雨日数高值年分别是 1961、1964、1968、1971、1974、1982、1988、1994 和 2000 年，低值年是 1977、1978、1993、和 2002 年。整体来说，四个指数所指示的秋雨日数有明显的年际、年代际变化特征，周期震荡较为明显。年代际特征表现为 20 世纪 60 年代到 70 年代初，80

年代到 90 年代初偏高，70 年代中后期偏低，20 世纪末偏低，21 世纪 00 年代中期以来呈现有所增强的趋势。

1976 年以前，ARI 秋雨日数高于气候态值，ARnw 除了 1965 年以外都高于气候态值，特别是在 1964 年 ARI 与 ARnw 秋雨日数比其他指数的秋雨日数距平值都高，DARI 则处于偏低年份较多，MARI 具有相对平稳的强弱振荡特征。1978 年左右，四个指数的秋雨日数都达到 52 年中的最大负距平，其中 MARI 秋雨日数在 1977 年、1978 年都达到了 52 年中的最低水平。20 世纪 80 年代中期，ARI 与 ARnw 的秋雨日数又出现短暂的提升，之后常年处于低于其气候态值状态。与此同时，在经过 1977 年左右的低谷后，DARI 出现秋雨日数偏高的年份增多，MARI 则在其气候态值上下维持准周期振荡。实况资料显示，2007 年被认为是自 1951 年以来全国历史同期秋雨平均日数的最大值（国家气候中心，2007），这在 DARI 与 MARI 的秋雨日数中得到了表现，而该年 ARI 与 ARnw 则低于气候态值，2011 年只有 ARI 低于其气候态值，其余指数均出现高于气候态值的现象。总的来说，MARI 与 DARI 的秋雨日数在气候突变前后具有相对稳定的强弱振荡，ARI 和 ARnw 的秋雨日数在气候突变前普遍偏多而在气候突变后普遍偏少。

我们把全国 601 个气象台站 52 年的三种秋雨指数气候态秋雨日数插值到全国（图 6）。由于 ARnw 秋雨雨日的算法不能计算各个台站的秋雨雨

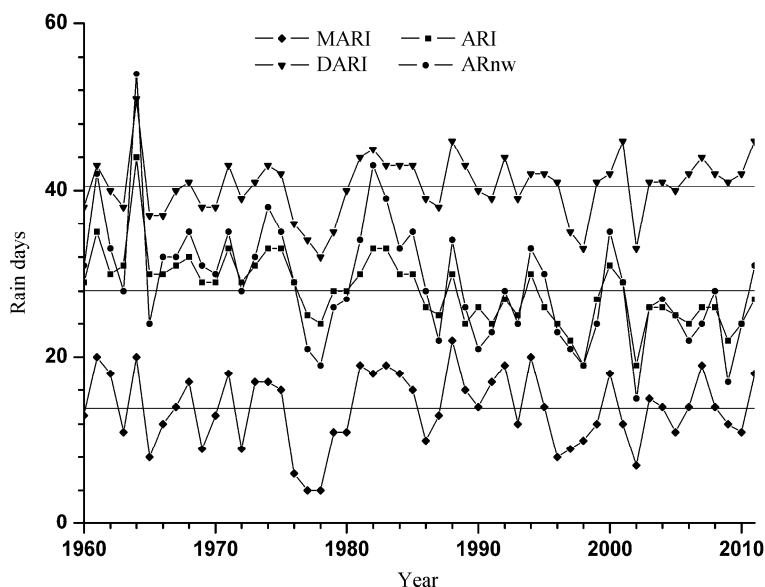


图 5 秋雨日数逐年变化比较

Fig. 5 Comparison of the evolution of interannual autumn rain day number

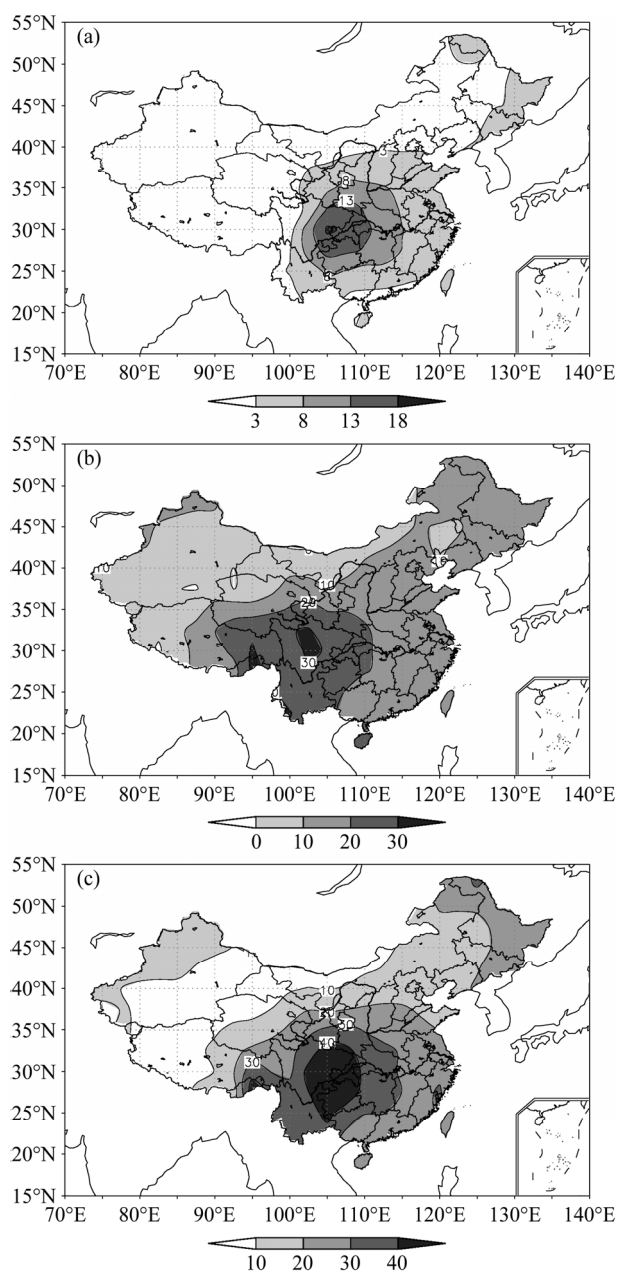


图6 秋雨日数的分布比较

Fig. 6 Comparison of the distribution of the autumn rain day number: (a) MARI; (b) ARI; (c) DARI

日, 因此不将 ARnw 进入雨日分布的比较中。总体来看, 秋雨大值中心都落在四川盆地, 都能较好的反映华西秋雨中心雨日多的特点。图 6a 是 MARI 秋雨日数分布, 唯一的大值中心分布在四川盆地、贵州北部、汉水流域一带, 在华西秋雨区以外等值线递减较快。图 6b 是 ARI 的秋雨日数分布, 三个大值中心分别分布在盆地西部、西藏灵芝地区以及海南岛南部。在图 6c 中, DARI 的秋雨日数大值中心分布在西藏灵芝、四川盆地和贵州北部, 等值线

递减较为平缓。ARI 所反映的秋雨日数只考虑了秋雨量对雨日的影响, 因此在高原山地以及海南岛等有降水但日照强的非典型秋雨区易出现虚假秋雨雨日现象; DARI 则由于其对日照时数的限制为 6 小时, 低估了日照对秋雨雨日的影响, 从而不能客观的反映华西秋雨雨日的分布; MARI 相比其他指数更多的考虑了秋雨雨期、非秋雨雨期以及日照时数对秋雨日数的影响, 所得到的秋雨日数能较好的反映华西秋雨区的易发地带, 说明 MARI 在表示秋雨日数的分布上有一定的优越性。

4.2 秋雨指数的空间分布比较

图 7 所示为四种华西秋雨指数气候态值在全国的分布。图 7a 所示为改进的华西秋雨指数, MARI 秋雨指数从西藏申扎的 0.009 d 到四川盆地巴中的 3.675 d, 海南、长江流域、黄河流域都有不同程度的秋雨现象, 大值中心区域分布在四川盆地、渭水流域、汉水流域以及黔北一带。图 7b 是原华西秋雨指数的分布, 白虎志和董文杰 (2004) 对其已有细致的描述, 本文不再赘述。图 7c, 逐日华西秋雨指数的大值区主要分布在甘肃、陕西南部, 湖北、河南西部, 西藏林芝地区、高原东侧, 四川、重庆、云南以及贵州大部, 另外最大值分布在林芝南部、云南、海南以及四川东北部、汉水流域、渭水流域一带。ARnw 的大值区域分布在西藏东部、四川、云南西部、甘肃南部、陕西等地, 极大值分布在海南岛。

通过对比发现, ARI 所指示的华西秋雨大值范围落在川西高原、西藏林芝地区、云南西南部、海南岛, 并非在渭水流域、汉水流域、四川盆地、黔北等常年发生地区, ARI 没有考虑日照时数对于华西秋雨的影响, 因此会在高原地区及海南岛出现了虚假的华西秋雨信号。DARI 的最大值中心区域位于华西秋雨常年易发区, 但在西藏林芝、海南等地区也出现了华西秋雨信号, 虽然考虑了日照时数对华西秋雨的影响, 但并没有将日照时数限制为小于 0.1 小时, 所以虚假的华西秋雨信号也在高原地区以及海南岛出现。由于监测区域内 ARnw 秋雨指数的秋季雨日占全年雨日的比值对全国各个台站来说为常数, ARnw 指数相当于只考虑了秋雨量占全年雨量百分比的影响, 也没有考虑到日照时数的影响, 华西秋雨信号依然出现在高原地区以及海南岛。我们认为可以将华西秋雨指数作为华西秋雨信号的传播介质, 通过这一介质从而认识华西秋雨的各种特征, 其中最基本也是最重要的一点是能准确

表征华西秋雨的地理概貌。从这一点上来说，本文所定义的华西秋雨指数MARI的地理分布相对来说能较为准确的表征华西秋雨地理概貌。

4.3 年际、年代际变化比较

图 8 为 1960~2011 年 DARI、ARnw、MARI 和 ARI 在华西秋雨区内区域平均的华西秋雨逐年

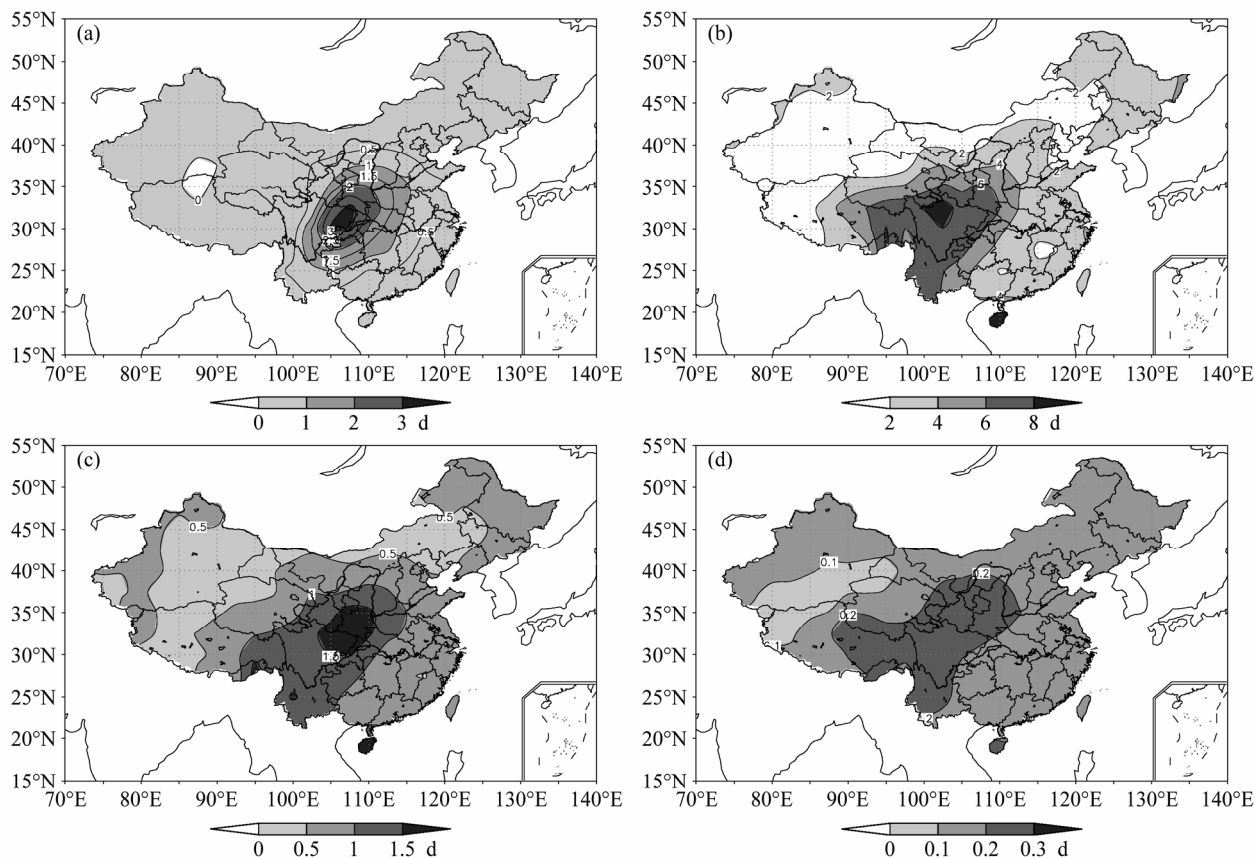


图 7 华西秋雨指数分布 (单位: d): (a) MARI; (b) ARI; (c) DARI; (d) ARnw

Fig. 7 The distribution of autumn rain index in western China (unit: d): (a) MARI; (b) ARI; (c) DARI; (d) ARnw

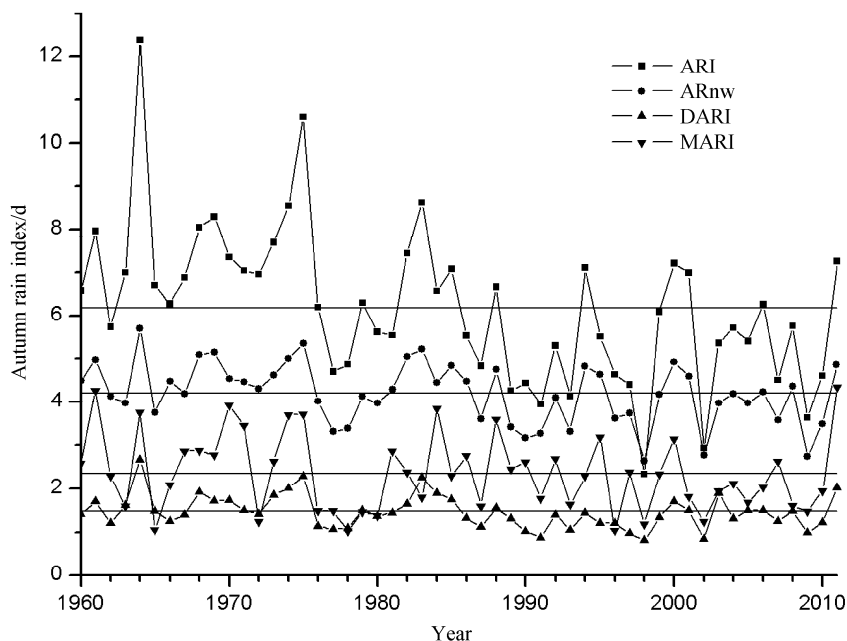


图 8 华西秋雨指数逐年演变比较

Fig. 8 Comparison of the evolution of interannual autumn rain index

变化。由于 ARnw 的算法问题, ARnw 秋雨指数比其他指数低一个数量级, 为了达到明显的对比效果, 在本节分析中将 ARnw 秋雨指数提高一个数量级进行对比。

从图 8 中可以看出, ARI、DARI、ARnw 和 MARI 共同指示出的华西秋雨偏强年有 5 年, 分别为 1961、1964、1975、2000 和 2011 年; 偏弱年有 8 年, 分别为 1977、1978、1987、1991、1993、1998、2002 和 2009 年。在 1976 年以前各个指数的变化较为一致, 1983 年出现 ARI、DARI、ARnw 指示为偏强年, 而 MARI 指示为偏弱年, 经查中国灾害大典中的四川卷、陕西卷、贵州卷、重庆卷的记录可知, 这一年秋雨现象较强; 2003 年出现 ARI、MARI、ARnw 偏弱, 而 DARI 偏强, 实际上, 2003 年 8 月下旬~9 月上旬渭河、黄河中下游出现秋汛洪水(张庆云等, 2004), 而该年华西秋雨区内的华西秋雨现象并不明显; 2007 年, ARI、DARI、ARnw 三个指数偏弱, MARI 偏强, 国家气候中心的监测(国家气候中心, 2007)指出与常年同期相比 2007 年的秋雨较为偏强。在三次指示秋雨强弱年的比较中, MARI 有 2 次较为准确指示出秋雨的强弱, 说明用 MARI 来指示秋雨强弱年有一定优势。从四个指数的年际变化趋势可以看出, 在 1977 年以前 ARI、DARI、ARnw 三个指数都普遍偏高, 而 MARI 的变化比其气候态值稍高, 有较明显的强弱年交替更迭; 1977~2011 年 35 年间, ARI、DARI、ARnw 和 MARI 出现低于其各自气候态平均值的年数分别为 25、20、22、19, 相对来说, ARI、DARI、ARnw 三个指数在 1977 年以后出现普遍偏低趋势, 而 MARI 所指示的偏强和偏弱年分布较为均匀。综上, 说明 MARI 在能够指示出华西秋雨强弱年信号的同时, 并随着资料样本的延长也具有较好的性能稳定性。

Torrence and Compo (1998) 和 Torrence and Webster (1999) 指出小波系数模值能代表不同时段某一时间尺度的强弱分布, 反映其所对应时段的时间尺度的周期性是否明显, 同时指出由于 Morlet 小波为复数小波, 其小波系数的实部表示不同特征时间尺度信号在不同时间上的分布和位相两方面的信息。Morlet 小波具备多时间尺度、多分辨和良好局部的性质, 适合于平稳时间序列的分析, 因此笔者考虑对四个华西秋雨指数进行 Morlet 小波变换分析, 以期对各指数的年际、年代际变化有更为

细致、客观的比较。利用 Morlet 小波作为基函数对华西秋雨区 1960~2011 年(共 52 年)的逐年 4 种华西秋雨指数进行小波变换, 分别得到了各个华西秋雨指数的小波系数模的时频分布(图 9)和小波分析变换系数实部的时频分布(图 10)。

从图 9a 中可以看出, MARI 秋雨指数 16~20 a 左右尺度的周期变化在 1967 年到 2000 年一直较为明显, 但是有部分年份落入了上部影响区, 可能是虚假的周期信号。其余时间尺度具有较强的阶段性特征, 3~4 a 的周期振荡主要发生在 1966~1985 年左右, 1995 年和 2005 年左右 2 年左右的周期振荡较为明显。图 9b 显示出 ARI 在 1965 年和 2000 年左右分别有较强的 2~4 a 和 4~6 a 年左右的周期振荡; 图 9c 中 DARI 在 1961~1967 年左右有较强的 2~6 a 周期振荡, 1967~1975 年有较明显的 6 a 左右的周期振荡, 2003 年左右有较明显的 2 左右周期振荡。图 9d 中 ARnw 表现在 1965 年左右的 2 a 左右周期振荡, 1980~1985 年左右的 10~12 a 周期振荡以及 1995~2005 年左右的 4~8 a 周期振荡。

图 10 中, 阴影部分为小波系数实部 >0.5 , 说明华西秋雨指数偏高, 华西秋雨处于偏强期; 相对的, 小波系数实部 <0 的部分, 说明华西秋雨指数偏低, 华西秋雨处于偏弱期。MARI 的 Morlet 小波分析表明(图 10a), 在 2000 年以前有较为明显的 8~16 a 周期, 在 2000 年以后 2~4 a 周期具有较强的局部化特征, 它的准 6 a 左右周期在近 52 年来一直较为明显且表现较为稳定, 呈现出华西秋雨经历大致 9 次的华西秋雨强弱期交替; 图 10b 显示出 ARI 在 1960~2005 年有 8~12 a 周期, 近 52 年有 4~8 a 周期, 但其周期在 1980 年代不明显; 图 10c 中 DARI 在近 52 年中都有 4~8 a 周期和 8~12 a 周期, 在 1980 年以前较为明显, 之后不明显; 图 10d 是 ARnw 的小波分析, 可以看出, 从 1970 年以来有 8~16 年的周期, 以及在 1985 年以后有 6~8 a 左右的周期。综上所述, 从 Morlet 小波分析的对比表明, MARI 相比于其它指数具有较为稳定的 4~8 a 周期, 相对来说能够较准确的表征华西秋雨的年际、年代际变化特征。

5 华西秋雨的时空分布

魏凤英(1999)指出分解的经验正交函数究竟是有物理意义的信号还是毫无意义的噪音, 应该进行显著性检验, 特别是当变量场空间点数 m 大于样

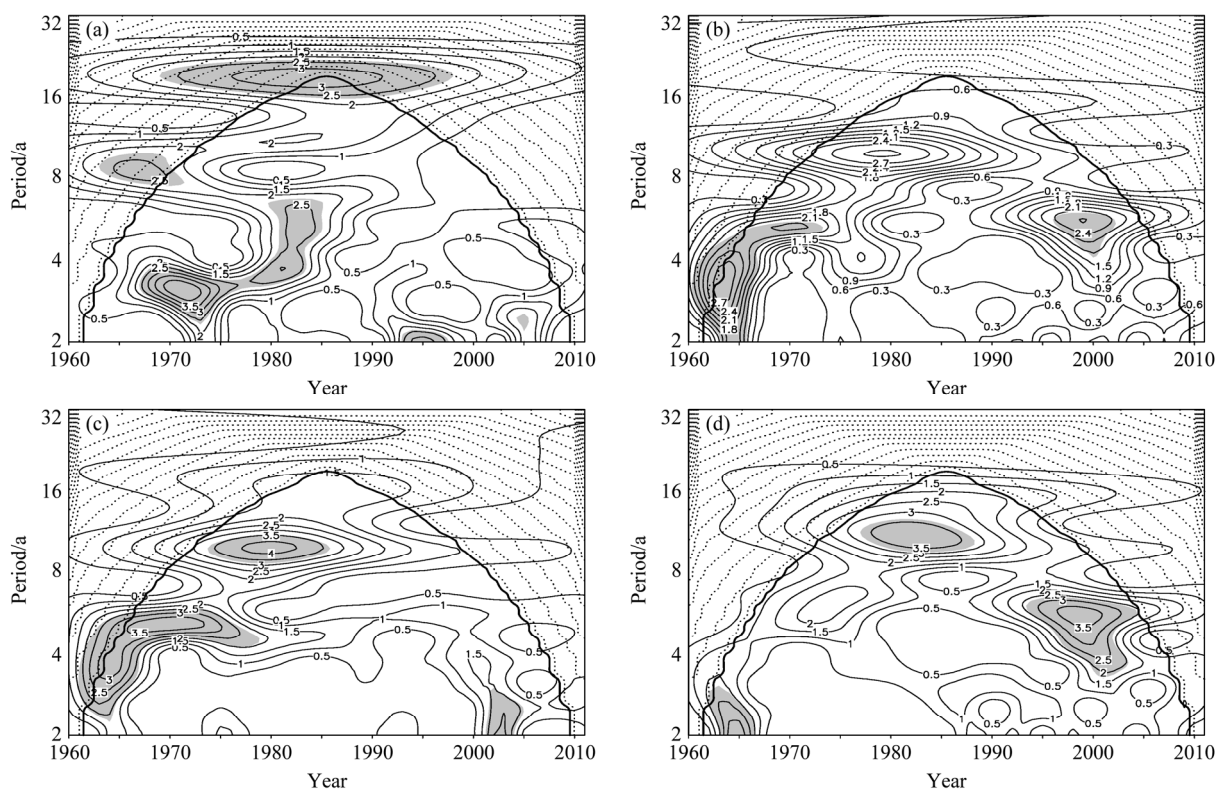


图9 华西秋雨指数 Morlet 小波系数模的时频分布 (图中阴影区为通过 90%信度检验的区域): (a) MARI; (b) ARI; (c) DARI; (d) ARnw

Fig. 9 The time-frequency distribution of local wavelet power spectrum for autumn rain index using the Morlet wavelet analysis (the shadings show regions with confidence level greater than 90%): (a) MARI; (b) ARI; (c) DARI; (d) ARnw

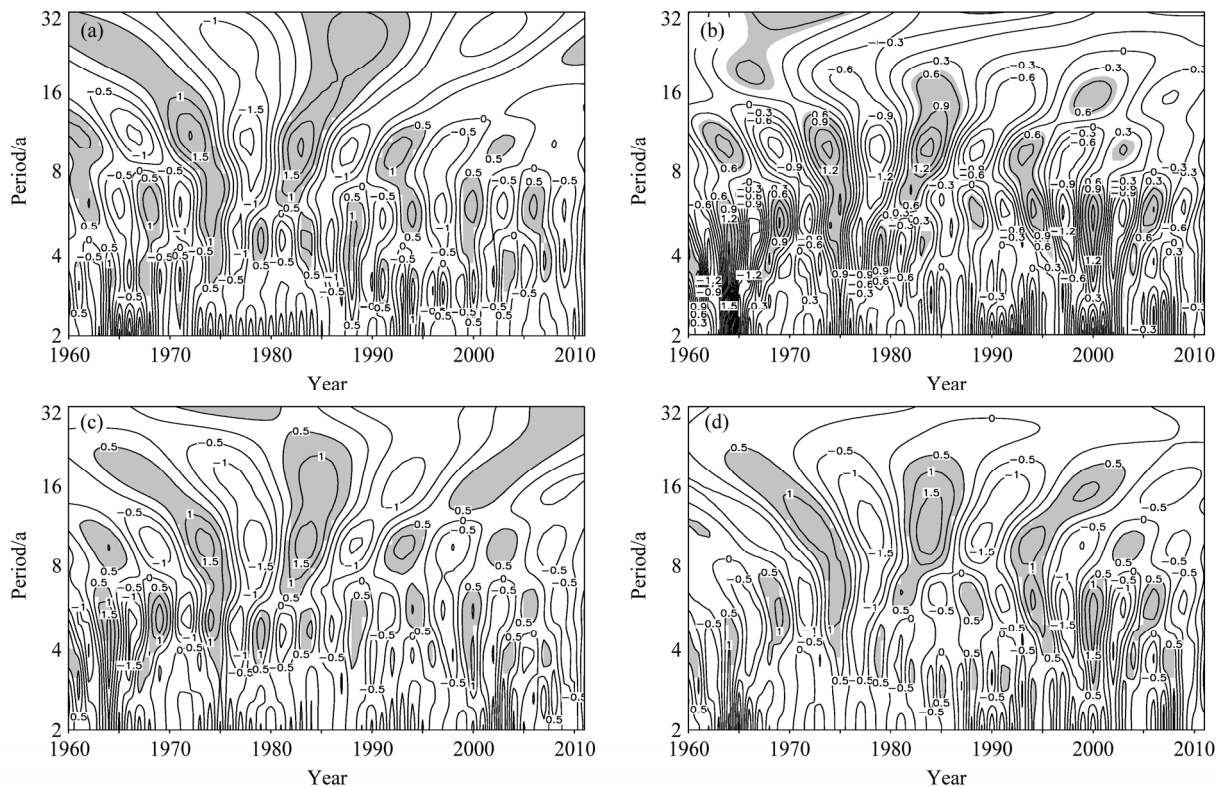


图10 华西秋雨指数 Morlet 小波系数实部的时频分布 (图中阴影为小波系数实部大于 0.5 的部分): (a) MARI; (b) ARI; (c) DARI; (d) ARnw

Fig. 10 The time-frequency distribution of local wavelet power spectrum for the autumn rain index based on the real part of Morlet wavelet coefficient (the shadings show regions with the real part greater than 0.5): (a) MARI; (b) ARI; (c) DARI; (d) ARnw

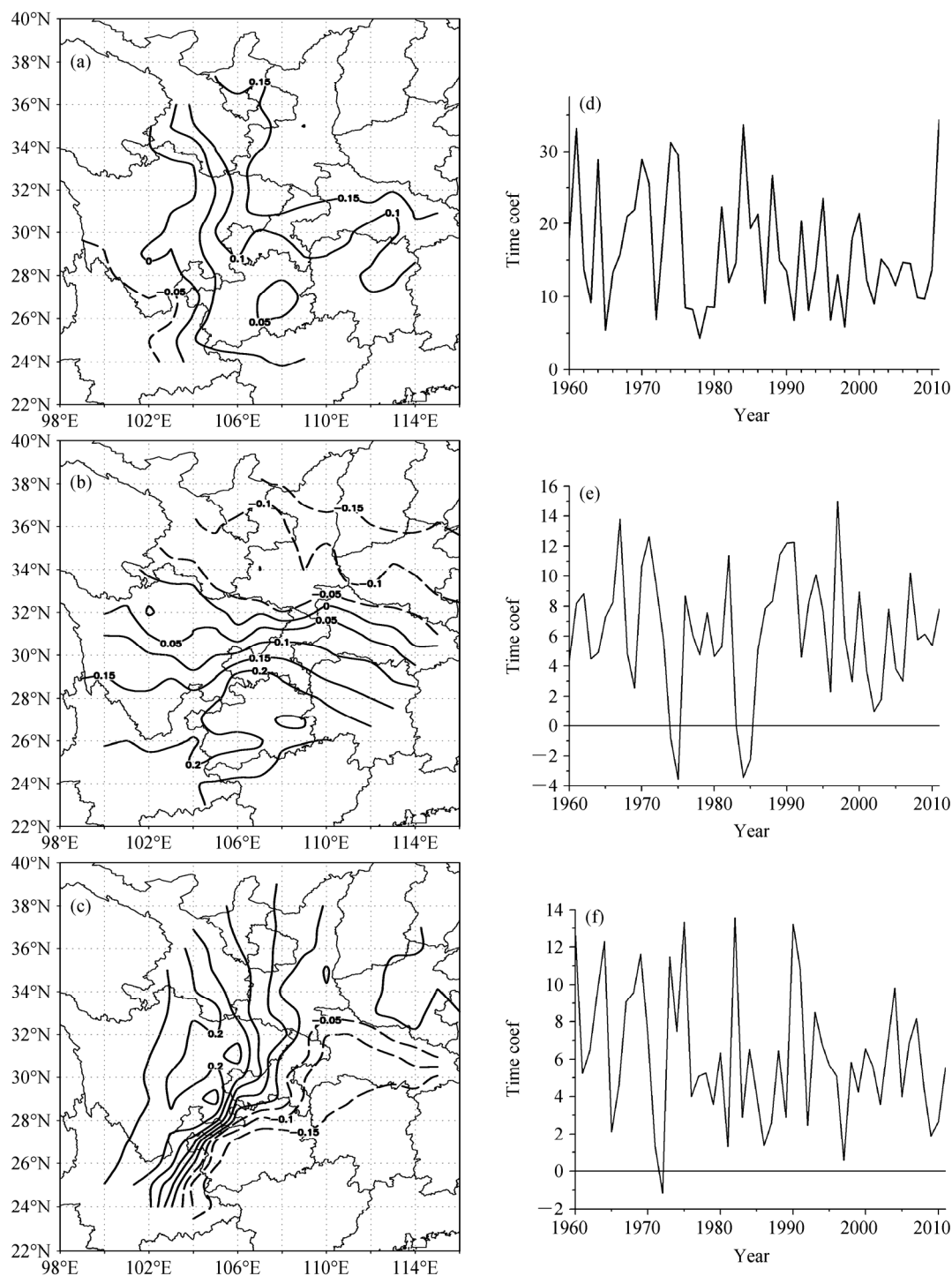


图 11 MARI 标准化距平场的 EOF 分析特征向量分布及时间系数逐年演变 (图 d、e、f 中粗实线为对应模式的时间系数, 细实线为零值线): (a) 第一模态特征向量; (b) 第二模态特征向量; (c) 第三模态特征向量; (d) 第一模态时间系数; (e) 第二模态时间系数; (f) 第三模态时间系数

Fig. 11 The eigenvectors distribution and the evolution of interannual time coefficient of EOF analysis on standardized MARI anomaly (the heavy line represents the time coefficient and the fine line represents the zero value in Fig.11 d, e, and f): (a) Eigenvector of the first mode; (b) the eigenvector of the second mode; (c) the eigenvector of the third mode; (d) the time coefficient of the first mode; (e) the time coefficient of the second mode; (f) the time coefficient of the third mode

本量时, 显著性检验尤其重要。我们选择 North et al. (1982) 等提出的计算特征值误差范围来进行显著性检验。经过计算, MARI 特征向量场的前三个模

态均通过显著性检验, 其方差贡献参见表 3。可见, 前三个特征向量的累计方差贡献率已经超过 57%, 可以作为华西秋雨的主要类型, 分别是全区一致

型、纬向分布型、经向分布型。

表 3 前三个模态的方差贡献

Table 3 Variance contribution of the first three modes

	模态一 Mode 1	模态二 Mode 2	模态三 Mode 3
方差贡献 (Variance contribution)	33.6%	14.5%	9.8%
累计方差贡献 (Cumulative variance contribution)	33.6%	48.1%	57.9%

第一特征向量场 (图 11a) 的分布特征为华西秋雨区的全区一致型, 其时间系数 (图 11d) 与实际 MARI 华西秋雨指数所指示的高低年基本相符, 说明第一模态的全区一致型是华西秋雨的一种主要降水型态。第二特征向量 (图 11b) 呈纬向型分布, 以秦岭、汉水流域为分界, 南北反相, 淮河、汉水流域一带为负位相, 四川盆地、贵州、滇东北等地为正位相。结合时间系数 (图 11e) 发现在 1975 年左右和 1984 年左右出现反相, 秦岭以北、汉水流域华西秋雨偏强, 而四川盆地、贵州、滇东北等地华西秋雨偏弱, 说明在第二模态下, 较强的华西秋雨主要发生在秦岭以南的华西秋雨区内。第三个模态华西秋雨呈现经向分布, 贵州、重庆东部、湖南与湖北的东部偏低, 汉水流域、渭水流域、四川盆地和滇东地区为偏高, 其时间系数 (图 11f) 中仅 1972 年左右出现了反位相。综上, 华西秋雨的主要模态反映了华西秋雨大值区以四川盆地为中心, 大部分时段华西秋雨中心区域都处于正位相。可见, 本文定义的华西秋雨区在其天气气候特征上具有空间一致性, 把华西秋雨区作为一个整体来研究是可行的。

6 结论与讨论

本文提出了一种改进的华西秋雨指数, 并将其与他人提出的秋雨指数进行了对比分析, 得出如下结论:

(1) 考虑加入日照时数和秋雨雨期对华西秋雨雨日的影响, 以华西秋雨占年降水百分率与华西秋雨雨日的乘积作为华西秋雨的指数形式, 建立了改进的华西秋雨指数, 客观地划分出了相比其他指数能较好符合华西秋雨地理分布的华西秋雨区以及华西秋雨的典型站点, 提出了华西秋雨指数的四级阈值标准。

(2) 华西秋雨区易出现严重秋雨和秋季无秋雨的两种极端现象, 两极分化严重, 秋季华西秋雨区

域以明显秋雨强弱年交替的气候特征占了主导地位。

(3) 华西秋雨呈现准 6 年周期的年际变化, 华西秋雨年代际变化特征明显, 20 世纪 60 年代到 70 年代初, 80 年代到 90 年代初偏强, 70 年代中后期和 90 年代后期偏弱, 21 世纪初偏弱, 21 世纪 00 年代中期以来又呈现出增强的趋势。与 ARI、DARI、ARNw 相比, MARI 能更好的反映气候突变后华西秋雨的异常特征, 能较为准确、客观的划分华西秋雨区。随着资料样本的延长也能对华西秋雨强弱年信号的分辨具有较好的性能稳定性, 能较准确地表征华西秋雨的年际、年代际变化。

(4) 华西秋雨主要有三类分布型, 分别为全区一致型、纬向分布型、经向分布型。经分析得出, 华西秋雨的降水空间分布有全区一致性的明显特征。

需要指出的是, 华西秋雨作为华西地区特殊的天气气候现象, 其形成、维持的因素是多方面的, 本文仅讨论了华西秋雨指数本身的气候特征。是什么因素导致华西秋雨异常, 导致华西秋雨异常的内、外强迫因子有哪些、如何建立这些强迫因子与华西秋雨的形成、维持之间的物理联系机制, 我们将逐步开展相关研究。此外, 本文观测资料格点化是基于相对比较简单 Cressman 插值方法进行的, 现在中国区域现在发展了一些基于更复杂格点化方法得到的日尺度气温和降水数据集, 在未来工作中可以使用 (如 Xu et al., 2009; 吴佳和高学杰, 2013)。

参考文献 (References)

- 白虎志, 董文杰. 2004. 华西秋雨的气候特征及成因分析 [J]. 高原气象, 23 (6): 884–889. Bai Huzhi, Dong Wenjie. 2004. Climate features and formation causes of autumn rain over Southwest China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (6): 884–889.
- 鲍媛媛, 阿布力米提, 李峰, 等. 2003. 2001 年华西秋雨时空分布特点及其成因分析 [J]. 应用气象学报, 14 (2): 215–222. Bao Yuanyuan, Abulimiti, Li Feng, et al. 2003. Space-time distribution and physical mechanisms of autumn rains in West China in 2001 [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 14 (2): 215–222.
- 蔡蓁宁, 康志明, 牛若芸, 等. 2012. 2011 年 9 月华西秋雨特征及成因分析 [J]. 气象, 38 (7): 828–833. Cai Xiangning, Kang Zhiming, Niu Ruoyun, et al. 2012. Analysis of features and physical mechanisms of 2011 autumn rainfall in West China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 38 (7): 828–833.

- Cressman G P. 1959. An operational objective analysis system [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 87 (10): 367–374.
- 方建刚, 白爱娟, 陶建玲, 等. 2005. 2003 年陕西秋季连阴雨降水特点及环流条件分析 [J]. *应用气象学报*, 16 (4): 509–517. Fang Jian'gang, Bai Aijuan, Tao Jianling, et al. 2005. Analysis of continuous rainfall in Shanxi in 2003 autumn with circulation features [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 16 (4): 509–517.
- 冯锦明, 赵天保, 张英娟. 2004. 基于台站降水资料对不同空间内插方法的比较 [J]. *气候与环境研究*, 9 (2): 261–277. Feng Jinming, Zhao Tianbao, Zhang Yingjuan. 2004. Intercomparison of spatial interpolation based on observed precipitation data [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 9 (2): 261–277.
- 高由禧, 郭其蕴. 1958. 我国的秋雨现象 [J]. *气象学报*, 29 (4): 264–273. Kao Yushie, Kuo Chiyun. 1958. On the autumn raining area in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 29 (4): 264–273.
- 国家气候中心. 2007. 2007 年秋季气候特征及极端天气气候事件 [R]. 气候影响评价. National Climate Centre. 2007. Extreme weather/climate event and climatological characters of autumn in 2007 [R]. *Climatic Impact Assessment (in Chinese)*.
- 胡娅敏, 丁一汇, 廖菲. 2008. 江淮地区梅雨的新定义及其气候特征[J]. *大气科学*, 32 (1): 101–112. Hu Yamin, Ding Yihui, Liao Fei. 2008. A study of updated definition and climatological characters of Meiyu season in the Yangtze–Huaihe region [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (2): 101–112.
- 贾小龙, 张培群, 陈丽娟, 等. 2008. 2007 年我国秋季降水异常的成因分析 [J]. *气象*, 34 (4): 86–94. Jia Xiaolong, Zhang Peiqun, Chen Lijuan, et al. 2008. Causality analysis of autumn rainfall anomalies in China in 2007 [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 34 (4): 86–94.
- 李莹, 李维京, 艾婉秀, 等. 2012. 2011 年华西秋雨特征及其成因分析 [J]. *气象科技进展*, 2 (3): 27–33. Li Ying, Li Weijing, Ai Wanxiu, et al. 2012. Analysis of autumn rainfall characteristics and its causes in West China in 2011 [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 2 (3): 27–33.
- 柳艳菊, 孙冷, 孙丞虎, 等. 2012. 2011 年秋季华西秋雨异常及其成因分析 [J]. *气象*, 38 (4): 456–463. Liu Yanju, Sun Leng, Sun Chenghu, et al. 2012. Analysis of anomalies of autumn rain in West China in 2011 and its possible mechanism [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 38 (4): 456–463.
- North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal function [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110: 699–706.
- 孙昭萱, 杨小波, 马振峰. 2013. 近 50 年西南地区秋雨监测指标的建立及成因分析 [J]. *气象科技*, 41 (5): 883–888. Sun Zhaoxuan, Yang Xiaobo, Ma Zhenfeng. 2013. Monitoring index and causes of autumn rains over Southwest China in Recent 50 years [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 41 (5): 883–888.
- Torrence C, Compo P G. 1998. A practical guide to wavelet analysis[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79 (1): 61–78.
- Torrence C, Webster P J. 1999. Interdecadal changes in the ENSO–monsoon system [J]. *J. Climate*, 12: 2679–2690.
- 魏凤英. 1999. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 110pp. Wei Fengying. 1999. Modern Climatic Statistical Diagnosis and Prediction (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 110pp.
- 吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比 [J]. *地球物理学报*, 56 (4): 1102–1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 56 (4): 1102–1111.
- 徐桂玉, 林春育. 1994. 华西秋雨特征及成因探讨 [J]. *气象科学*, 14 (2): 149–154. Xu Guiyu, Lin Chunyu. 1994. Survey on the causes and features of autumn rain in western China [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 14 (2): 149–154.
- Xu Ying, Gao Xuejie, Shen Yan, et al. 2009. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26 (4): 763–772.
- 叶笃正, 陶诗言, 李麦村. 1958. 在六月和十月大气环流的突变现象 [J]. *气象学报*, 29 (4): 249–263. Ye Duzheng, Tao Shiyun, Li Maicun. 1958. The abrupt change of atmospheric circulation in June and October [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 29 (4): 249–263.
- 张庆云, 王会军, 林朝晖, 等. 2004. 中国天气气候异常成因研究——2003 年 [M]. 北京: 气象出版社, 91pp. Zhang Qingyun, Wang Huijun, Lin Zhaozhui, et al. 2004. Research on the Causes of China Abnormal Weather and Climate in 2003 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 91pp.