

DOI: CNKI: 32. 1309. P. 20120614. 2158. 009

1998 ~ 2010 年全球中低纬度降水时空特征分析

常远勇^{1,2}, 侯西勇¹, 毋 亭^{1,2}, 于良巨¹

(1. 中国科学院海岸带环境过程重点实验室, 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 基于 1998 ~ 2010 年热带降雨测量(Tropical Rainfall Measuring Mission ,TRMM) 卫星 3B43 资料在像元尺度进行 Mann-Kendall 非参数检验, 计算 Hurst 指数, 绘制降水“月历”与演化态势图谱。分析全球中低纬度降水时空特征, 结果表明: 全球中低纬度降水主要集中在夏季和冬初且各月降水的年际波动比较明显; 全球中低纬度降水呈现由低纬向中纬递减的趋势, 海洋降水明显多于陆地, 海陆梯度特征显著; 月尺度降水大部分地区为增加(或减少)但统计不显著的趋势, 同时绝大部分地区具有显著的长程自相似性; 12 月份降水变化态势的空间差异明显强于其它月份, 而 3 月份则最不明显; 季节尺度 98% 以上的地区降水具有显著的长程自相似性, 季节演化态势表现出极强的空间差异性。

关键词: 热带降雨测量; 降水; 全球中低纬度; Mann-Kendall; Hurst 指数; 时空特征

中图分类号: P332. 1; P333 文献标志码: A 文章编号: 1001-6791(2012)04-0475-10

降水和温度是两个最基本的气候要素指标。降水是影响水资源利用、农业生产管理、经济社会发展、生态系统管理等必要因素^[1]; 同时, 降水还是表征水循环的重要要素之一, 其年际和长期变化对社会经济生活有着重要影响, 研究区域及全球降水量的分布和变化规律, 对于分析气候变化背景下的水循环以及气候预测等具有非常重要的意义^[2]。国内外不少学者对区域及全球降水进行研究, 潘敖大等^[3]基于 1961 ~ 2006 年长江三角洲地区 84 个气象站观测数据利用统计学方法分析了长江三角洲气温和降水的时空变化特征; 姜彤等^[4]利用 1960 ~ 2005 年长江流域 147 个气象站逐日降水资料和气候模式模拟资料对长江流域降水极值的变化趋势进行了分析; 信忠保等^[5]利用黄土高原及其附近地区 99 个站点的日降水观测资料分析了 1956 ~ 2005 年黄土高原年降水量、侵蚀性降水量、暴雨量的变化趋势和空间特征; 詹道强^[6]对 1953 ~ 1997 年沂沭泗流域汛期降水变化特征进行了分析; 刘俊峰等^[7]利用热带降雨测量(Tropical Rainfall Measuring Mission , TRMM) 卫星 3B42 数据分析了天山、祁连山降水垂直分布特征; 徐利岗等^[8]基于 1951 ~ 2005 年月降水资料利用 Mann-Kendall 秩次相关法剖析了北方荒漠化地区降水在时间、空间上的变化趋势; 王志福等^[9]基于 1951 ~ 2004 年中国 738 个测站逐日降水资料, 分析了中国极端降水事件的频数和强度特征; 刘奇等^[10]基于 TRMM/TMI 长期观测资料对亚洲夏季降水的水平分布特征进行了分析; 施能等^[11]基于 1920 ~ 2000 年的全球陆地降水资料研究了全球陆地降水气候特征与变化; Kahya 等^[12]用 Mann-Kendall 方法对伊比利亚半岛 1921 ~ 1995 年的月降水量进行了趋势分析; Dai 等^[13]基于 TRMM 3B42 等空间数据对中低纬度地表降水的频率、强度以及降水的昼夜周期进行了研究; Puri 等^[14]利用 TRMM PR 后向回波信号对美国南佛罗里达州湿地水位进行了研究。在众多研究中, 数据与方法各不相同, 但大多是基于站点观测数据和数学统计方法, 而基于时间序列空间数据在像元尺度上应用统计方法对宏观区域及全球降水时空特征进行分析的研究则比较少见。

国内外已有不少学者对 TRMM 降水数据产品的精度进行过验证: Feidas^[15]结合 TRMM、GPCP、CMAP

收稿日期: 2011-10-31; 网络出版时间:

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20120614.2158.009.html>

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-224); 中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA05130703)

作者简介: 常远勇(1987-), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要从事海岸带环境遥感研究。

E-mail: yychang@yic.ac.cn

通信作者: 侯西勇, E-mail: xyhou@yic.ac.cn

以及站点观测数据对希腊降水进行研究,表明 TRMM 3B43 数据与站点观测数据的效率系数达到 0.78,相关系数则高达 0.9; Almazroui^[16] 基于 TRMM 3B42 数据对 1998~2009 年沙特阿拉伯降水时空分布特征进行分析,发现在湿季 TRMM 3B42 数据对降水有一定的低估作用,但在月尺度上 TRMM 3B42 数据和站点观测数据的相关系数达到 0.9; Islam 等^[17] 依据 1998~2002 年孟加拉国 31 个雨量站降水资料,对 TRMM 3B42 数据准确性进行验证,表明雨季前 TRMM 3B42 降水数据偏高,雨季偏低,但总体误差不大; Huffman^[18] 在日尺度与月尺度将澳大利亚 TRMM 3B42 RT 数据与气象观测及雷达观测数据进行一致性检测,表明 TRMM 数据与观测数据之间具有较高的线性相关特征; Dinku^[19] 等以东非为例,对 GPCP、CMAP、TRMM 3B42 和 TRMM 3B43 等卫星降水资料进行对比验证,发现 TRMM 数据精度较高,明显优于其它卫星降水数据。Nicholson 等^[20] 将西非 TRMM 数据与高密度站点数据进行对比分析,发现月、季尺度 TRMM TMPA 数据与站点数据具有极高的一致性,且月尺度均方根误差 $RMSE$ 小于 0.6mm/d; Lettenmaier 等^[21] 以南美洲 La Plata 流域为例,利用站点格网数据对 TRMM 3B42 数据进行验证,表明月尺度 TRMM 3B42 数据精度极高; Chiu 等^[22] 将美国新墨西哥州 TRMM 数据与站点数据进行对比,发现 TRMM 3B43 数据具有较高的精度; Henschke 等^[23] 以美国路易斯安那州为例对 TRMM 3B42 数据进行验证,发现 TRMM 3B42 数据对热带风暴具有很好的指示能力; 刘奇等^[10] 基于 TRMM 3A12 长期观测资料,借助 GPCP 资料,对亚洲范围内洋面、陆面及 6 个典型区域(青藏高原台地、中东部大陆、中国东海、印度半岛、孟加拉湾,以及西太平洋暖池)降水准确性进行评估,结果表明 TRMM 3A12 对陆面降水存在低估的影响,但对亚洲夏季降水的强弱降水中心及雨带位置的指示基本一致,总体误差不大; 刘俊峰等^[24] 利用中国 50°N 以南大陆地区的 650 个台站降水数据,在日、月、年尺度上分析 TRMM 3B42 在中国大陆 50°N 以南地区的适用性,发现随着时间尺度的增加,TRMM 数据的精度逐渐提高,且年尺度线性相关确定系数达 0.92 以上; 曾红伟等^[25] 结合站点观测数据,在澜沧江及周边流域对 TRMM 3B43 数据精度进行评价,表明整体上月尺度 TRMM 3B43 数据具有较高精度; 李景刚等^[26] 在洞庭湖流域对 TRMM 3B43 数据进行检验,发现月尺度 TRMM 3B43 数据与站点数据相关系数接近 0.9; 杨传国等^[27] 利用淮河流域 1998~2000 年 30 个雨量站的实测日降雨资料,检验 TRMM 3B42 降雨数据质量,表明两组数据在逐日和逐月时间尺度上均具有较高的相关性; 陈举^[28] 将南海地区 TRMM 3A25 数据与观测数据、CAMP 数据进行比较,发现 TRMM 3A25 数据可以更好地体现降水在空间和时间上的变化特征。总之,众多的研究表明 TRMM 数据质量总体比较可靠,在中纬度地区具有较强的可用性^[29],虽然在有些地区和季节具有一定的偏差,但大都与雨强有关,且随着时间尺度的增加,TRMM 数据的精度逐渐提高^[24],因而可有效支持大范围、长尺度的气候模拟预报以及长尺度降水时空动态特征的分析等。

本文基于全球中低纬度 TRMM 3B43 降水序列资料,在像元尺度上进行非参数 Mann-Kendall 趋势检验及计算 Hurst 指数,绘制降水“月历”与演化态势图谱,对 1998~2010 年月尺度和季节尺度全球中低纬度降水的时空分布特征进行深入分析,研究旨在为全球水循环等全球气候变化相关研究提供参考。

1 研究区及数据

研究区域为全球中低纬度区域(180°W~180°E, 50°S~50°N),是全球降水的集中区域,覆盖亚洲(部分)、非洲(全部)、大洋洲(全部)、北美洲(部分)、南美洲(大部)和太平洋(部分)、印度洋(部分)、大西洋(部分),受纬度地带、海陆格局、宏观地形等因素的影响,降水时空分布不均,总体上呈现赤道多雨带、15°~30°少雨带、中纬多雨带交替分布等特征。

所用数据为 TRMM 卫星 3B43 资料。TRMM 计划是由日本国家空间发展署(NASDA)和美国国家航空航天局(NASA)地球科学办公室共同主持的一项国际联合计划。卫星于 1997 年 11 月 28 日发射,搭载测雨雷达、微波成像仪、可见光和红外扫描仪、云和地球辐射能量系统、闪电成像传感器 5 个仪器。TRMM 3B43 月降水量数据是由 TRMM 3B42 数据、NOAA 气候预测中心气候异常监测系统(CAMS)的全球格点雨量测量器资料、全球降水气候中心(GPCP)的全球降水资料共同合成的 50°S~50°N 之间逐月平均的全球格点化数据集。本研究中用到的 1998~2010 年 TRMM 3B43 月降水量数据由 NASA 网站(<http://trmm.gsfc.nasa.gov/>)提供下

载,数据格式为HDF,其中的降水信息为南北纬 50° 之间 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 网格的月平均降雨速率信息,通过提取该数据并作投影变换等处理作为本文研究的数据源。

2 研究方法

2.1 数据转换与处理

TRMM 3B43 资料为南北纬 50° 之间的降水强度信息,需转化为月降水量数据,方法如下:

$$P_m = 24xd \quad (1)$$

式中 P_m 为月降水量, mm; x 为降水强度, mm/h; d 代表该月的天数。

2.2 Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall 检验简称为 M-K 法,是一种非参数统计检验方法,可适用于不具有正态分布特征变量的趋势分析,因此得到了非常广泛的应用^[30-31],假定 X_1, X_2, \dots, X_n 为时间序列变量, n 为时间序列长度, M-K 法定义统计量 S 为

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n \text{sgn}(x_k - x_j) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(x_k - x_j) = \begin{cases} 1 & x_k - x_j > 0 \\ 0 & x_k - x_j = 0 \\ -1 & x_k - x_j < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 x_j, x_k 分别为 j, k 年的相应测量值,且 $k > j$ 。

$$Z = \begin{cases} (S - 1) / \sqrt{D(s)} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S + 1) / \sqrt{D(s)} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 Z 为一个正态分布的统计量; $D(s)$ 为方差,在给定的 α 置信水平,如果 $|Z| \geq Z_{1-(\alpha/2)}$,则拒绝原假设,即在 α 置信水平上时间序列存在明显的上升或下降趋势。趋势的大小 β 为

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_k - x_j}{k - j}\right) \quad j < k \quad (5)$$

若 $\beta > 0$,表示呈上升趋势;若 $\beta < 0$,表示呈下降趋势^[32-33]。

2.3 Hurst 指数

降水量的变化是具有自相似性和长程依赖性的时间序列, Hurst 指数 H 是定量描述时间序列自相似性与长程依赖性的有效方法。 H 取值为 $0 \sim 1$,当 $H = 0.5$ 时,则时间序列为相互独立、方差有限的随机序列;当 $0.5 < H < 1$ 时,表明时间序列变化具有持续性,未来的变化将与过去的变化趋势相一致;当 $0 < H < 0.5$ 时,表明时间序列具有反持续性,即过去的变化不具有可持续性^[34]。可采用 R/S 法计算 H ,原理如下^[35]:

设有一时间序列: $\{\xi(t)\}, t = 1, 2, \dots, N$; 取一个系列的 $\tau = 1, 2, \dots, N$,对于某个 τ ,定义均值序列:

$$\langle \xi \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) \quad (6)$$

对于在 τ 内所有时刻, t 时刻累积离差为

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t (\xi(u) - \langle \xi \rangle_\tau) \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (7)$$

定义极差序列 R 为

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad (8)$$

定义标准差序列 S 为

$$S(\tau) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\xi(t) - \langle \xi \rangle_{\tau})^2} \quad (9)$$

则有

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} = (c\tau)^H \quad (10)$$

式中 H 即为 Hurst 指数; c 为常数; τ 为时间序列的长度。可根据实测资料, 在 τ 与 R/S 的双对数图上利用最小二乘法求得 Hurst 指数。

2.4 β - Z - H 三参数综合的指示作用

如上所述, β 可以评价时间序列降水信息的历史发展趋势, Z 可以反映其显著性, H 能够反映时间序列历史发展趋势在未来时期的持续性, β 、 Z 与 H 都是在像元尺度对降水时间序列进行的数值分析, 进一步将三者综合, 则不同的数值对应关系具有不同的气候学指示意义, 为便于解释, 将 H 减去 0.5 从而使其值域变为 $-0.5 \sim 0.5$, 则在 $\alpha = 0.05$ 置信水平上, β - Z -($H-0.5$) 三参数综合分析对降水演化特征的指示作用如表 1 所示。

表 1 β - Z -($H-0.5$) 综合分析的指示作用

Table 1 Indicative functions of the combinations of β , Z and H minus 0.5

类别	β	$ Z $	$H-0.5$	降水演化特征
11	<0	≥ 1.96	>0	过去减少, 趋势显著, 未来将持续减少。
12	<0	≥ 1.96	<0	过去减少, 趋势显著, 未来趋势可能逆转。
13	<0	<1.96	>0	过去减少, 但趋势不显著, 未来将持续减少。
14	<0	<1.96	<0	过去减少, 但趋势不显著, 未来趋势可能逆转。
21	>0	≥ 1.96	>0	过去增加, 趋势显著, 未来将持续增加。
22	>0	≥ 1.96	<0	过去增加, 趋势显著, 未来趋势可能逆转。
23	>0	<1.96	>0	过去增加, 但趋势不显著, 未来将持续增加。
24	>0	<1.96	<0	过去增加, 但趋势不显著, 未来趋势可能逆转。
30	=0	—	=0	时间序列比较平稳或较为离散。

注: 1. 计算类别 30 时, β 与 ($H-0.5$) 之间为或运算; 2. 类别 12、类别 22 不符合逻辑, 计算结果也证明不存在或仅有零星的像元, 故具体研究过程中将其并入 30。

3 结果分析

3.1 降水时间变化特征

根据全球中低纬度 1998 ~ 2010 年的月降水量数据绘制降水“月历”, 如图 1 所示, 横向指示年内变化特征, 纵向指示年际变化特征。

由图 1(a) 可见, 总体上, 13 年各月降水量的年际波动都比较明显, 一年中 1、5、7、8、12 月份降水量较高, 13 年中这些月份的降水量都在 4.6×10^7 mm 以上, 特别是 12 月份降水最多, 13 年 12 月份降水平均为 4.71×10^7 mm; 2、4、9 月份降水偏低, 特别是 2 月份因其日数少而降水量为最少, 13 年 2 月份降水平均 4.18×10^7 mm; 全球中低纬度夏季和冬初是降水的集中时段, 秋季和春初降水偏少。1998 ~ 1999 年、2008 ~ 2010 年为降水偏多的年份, 特别是 2010 年降水最多, 该年降水量超出 13 年均值 5.39×10^6 mm, 而 2003 ~ 2006 年则是降水明显偏少的年份。图 1(b) 反映了各月降水量日均值的差异特征, 所揭示的降水时间变化特征与图 1(a) 总体一致, 但由于是日均值, 受各月日数差异的影响而有所变化: 最高的为 6 月份, 13 年 6 月份日均降水量达 1.53×10^6 mm; 3、4、9、10 月份日均降水总体较少, 其中 10 月份最少, 为 1.42×10^6 mm。

3.2 降水空间格局特征

在像元尺度计算多年平均年降水量, 如图 2 所示。可见, 降水总体上表现为由低纬向中纬递减的趋势, 即赤道附近降水最多, 随着纬度升高而总体减少; 纬线方向, 降水量随着海洋和陆地间隔分布而交替变化, 海洋上降水明显多于陆地, 降水量具有明显的海陆梯度特征。赤道西太平洋地区、西非季风降水区域、南美

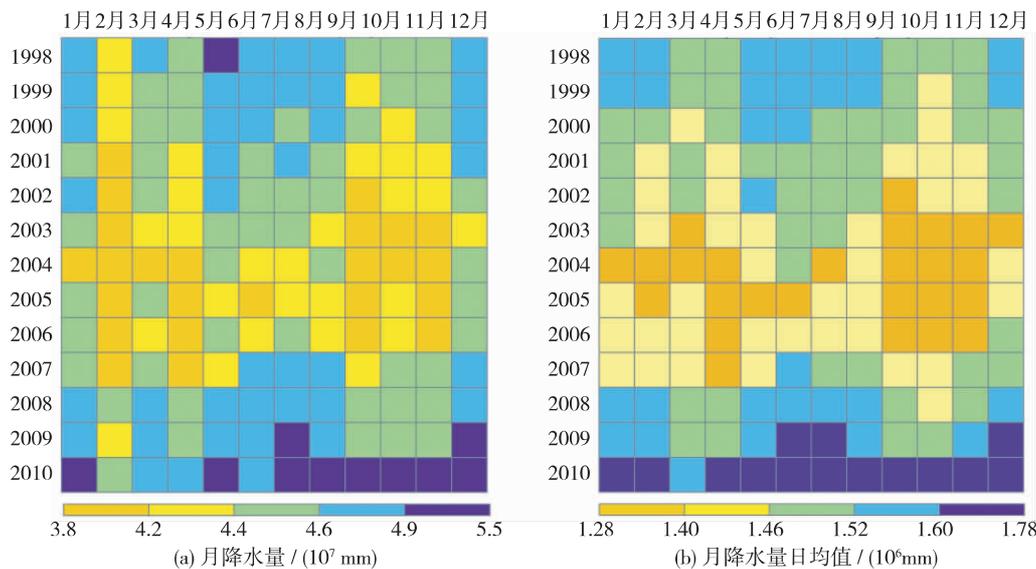


图 1 1998 ~ 2010 年全球中低纬度降水“月历”图

Fig. 1 Monthly calendar of precipitation in global mid-low latitudes area from 1998 to 2010

北部区域以及中国东南部到日本一带为全球降水量最大的地区, 降水量最大的区域主要在季风区; 而非洲北部、中东及中亚大部分地区、澳大利亚西部、太平洋东北部和东南部、大西洋和印度洋东南部则是降水总体偏少的区域。这种格局特征与用 1910 ~ 1990 年间 GHCN 资料分析的结果^[36]是一致的。

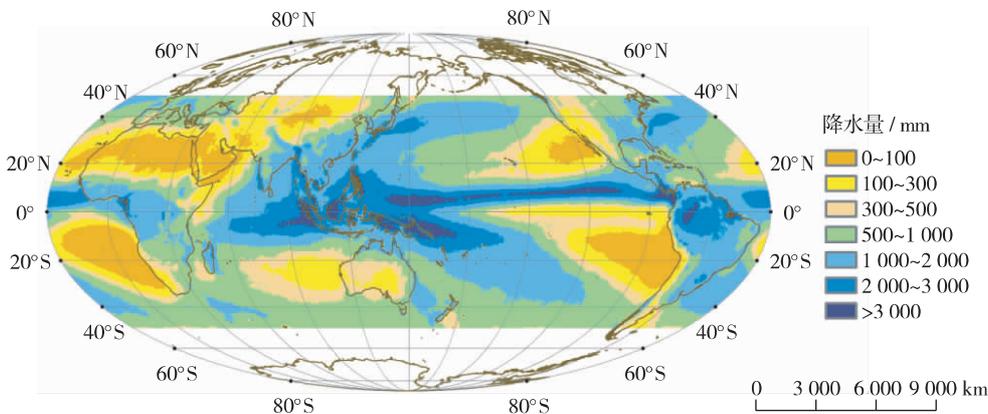


图 2 全球中低纬度降水空间格局特征

Fig. 2 Spatial patterns of precipitation in global mid-low latitudes area

分别统计海洋和陆地的年降水量, 得到表 2。可见, 海洋年降水量明显多于陆地, 二者 13 年均值分别为 4.15 亿 mm 和 1.26 亿 mm, 比值为 3.28, 即 13 年中低纬度区域海洋降水约是陆地降水的 3.28 倍, 但是中低纬度海洋与陆地面积之比约为 3.80, 所以, 如以单位面积降水计, 则海洋低于陆地。

表 2 1998 ~ 2010 年海洋与陆地降水量

Table 2 Precipitation over ocean and land in global mid-low latitudes area from 1998 to 2010

年份	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	均值
海洋/亿 mm	4.34	4.25	4.15	4.06	4.06	3.88	3.78	3.88	3.89	4.15	4.33	4.42	4.76	4.15
陆地/亿 mm	1.25	1.29	1.32	1.26	1.26	1.26	1.30	1.21	1.26	1.22	1.27	1.24	1.30	1.26
海洋/陆地	3.47	3.28	3.16	3.21	3.23	3.07	2.91	3.22	3.09	3.40	3.42	3.57	3.66	3.28

3.3 月尺度降水变化特征

在像元尺度依据 $\beta-Z-(H-0.5)$ 三参数综合分析的指示作用,统计各个月份不同变化趋势像元的数量分布特征,如图3所示。各种变化趋势中,13和23的比例最高,12个月分别稳定在40.7%和49.5%左右,表明月尺度大部分像元的变化趋势(增或减)统计上并不显著,但却具有显著的长程自相似特征,且呈增加趋势的像元居多;各月中约3.6%的像元变化趋势比较平稳或较为离散;11和21的比例均较少,12个月中均为2.9%左右,表明在 $\alpha=0.05$ 置信水平上,全球中低纬度降水显著增加或显著减少的区域极少。进一步统计各月11与13、21与23像元之和的比值,结果表明大多数月份比值都稳定在0.81左右,其中最高的3月为0.91,最低的12月为0.66,表明12月份降水变化态势的空间差异明显强于其它月份,而3月份则最不明显。

在像元尺度对12个月中11、13、21、23、30这5种变化趋势的月尺度时间频率进行统计,得到图4。5种变化趋势中,11、21、30频率为0的像元大量分布,比例均在68%以上,特别是11和30的0频率像元比例分别高达80.45%和84.67%,所以未将频率为0的值绘制在图中。由图4可见,11与21的频数分布曲线基本吻合,低频像元(频率为0~2)的比例分别达98.92%和97.82%,表明12个月中降水显著增加或减少且具有可持续性的空间区域非常有限;13与23的频数分布曲线走势基本一致,在不考虑频率为0的情况下均接近于正态分布,峰值比较靠近频数均值,这表明大量的像元1年之中有接近一半的月份降水呈“增加—统计不显著—可持续”或“减少—统计不显著—可持续”的变化态势;30的频数分布曲线较为平缓,表明像元尺度降水变化趋势平稳或较为离散的空间区域的月际差异并不显著。

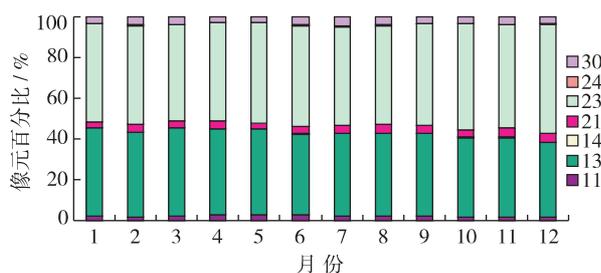


图3 各个月份不同变化趋势像元的数量分布特征

Fig. 3 Quantitative characteristics of pixels with different changing trend in each month

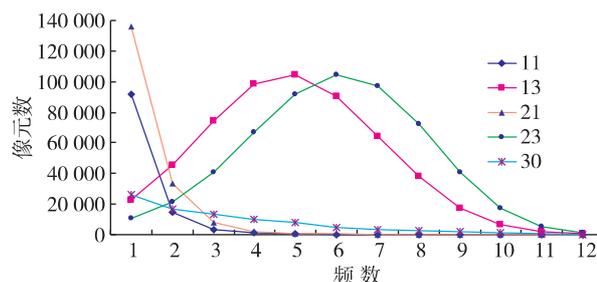


图4 不同变化趋势的频率分布

Fig. 4 Frequency distribution of different changing trend

3.4 降水季节演化态势

利用 ArcGIS 9.3 的空间分析技术,对春、夏、秋、冬四个季节对应月份的降水量进行汇总,得到季节尺度降水数据,进而在像元尺度计算和统计各个季节 $\beta-Z-(H-0.5)$ 组合特征中不同变化趋势像元的数量分布特征,得到图5。可见,四个季节中,13和23两种类型所占比例最高,二者总和稳定在92.1%左右,这表明季节尺度全球中低纬度大部分地区降水变化都具有正向的长程自相似性,但是增加或减少趋势统计并不显著;11和21两种类型像元比例较少,四个季节分别稳定在2.56%和4.40%左右,表明全球中低纬度降水显著增加或显著减少的区域较少。

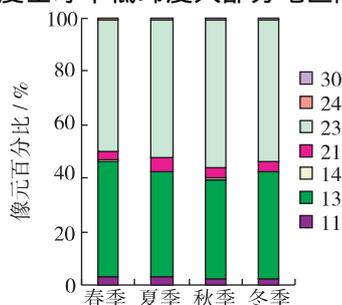


图5 各个季节不同变化趋势像元的数量分布特征

Fig. 5 Quantitative characteristics of pixels with different changing trend in each season

对四个季节的降水变化特征进行汇总,规定某一季节,如果像元的 $\beta-Z-(H-0.5)$ 组合属于21或23,则标记该像元该季节属性值为1;属于11或13则标记为2;属于其它值则标记为3;进而,用四位数的千位、百位、十位和个位分别标记春、夏、秋、冬四个季节,最终得到图6所示的全球中低纬度降水季节演化态势图谱。可见,全球中低纬度区域降水季节演化态势表现出极强的空间差异性与复杂性:降水总体增加且将持续增加的区

域大量分布, 在太平洋中部 0° ~ 7°N 之间形成一个明显的条带状的降水四季增加且将持续增加区域; 降水总体减少且将持续减少的区域则主要集中在北美洲南部、南美洲西南部、非洲中东部、欧亚大陆东南部、赤道以南东太平洋地区以及澳大利亚的大部分地区; 同时, 降水变化不稳定的区域亦大量分布, 包括半年交替变化不稳定和季节交替变化不稳定, 二者空间分布均比较分散。

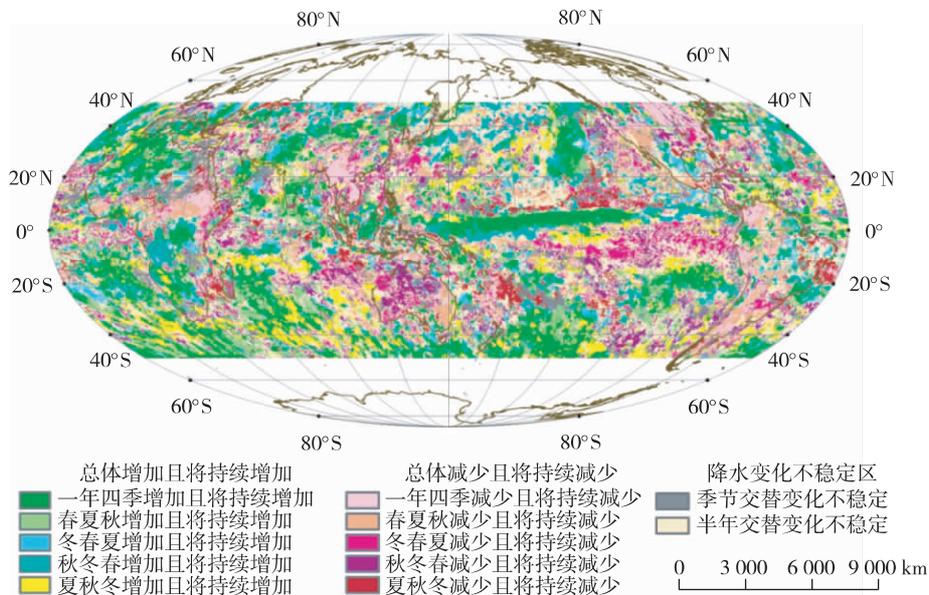


图 6 全球中低纬度降水季节演化态势图谱

Fig. 6 Map of the seasonal precipitation evolvement trend in global mid-low latitudes area

进一步统计不同演化态势区域的面积比例(表 3)。可见, 降水季节演化态势表现出极强的空间差异性, 总体增加且将持续增加的区域和总体减少且将持续减少的区域可分别细分出 5 个亚类, 10 个亚类中一年四季增加且将持续增加的区域面积比例最高, 为 13.83%, 其它类型面积比例均为 3.75% ~ 7.93%; 约有 32.80% 的地区降水变化不稳定, 其中季节交替变化不稳定和半年交替变化不稳定区域分别占 11.08% 和 21.72%。

表 3 季节尺度不同演化态势区域的面积比例

Table 3 Proportion of area with different changing trends on seasonal scale

季节演化态势	面积比例 / %	季节演化态势	面积比例 / %
一年四季增加且将持续增加	13.83	一年四季减少且将持续减少	6.38
春夏秋增加且将持续增加	7.57	春夏秋减少且将持续减少	5.26
冬春夏增加且将持续增加	5.54	冬春夏减少且将持续减少	4.49
秋冬春增加且将持续增加	7.55	秋冬春减少且将持续减少	4.90
夏秋冬增加且将持续增加	7.93	夏秋冬减少且将持续减少	3.75
季节交替变化不稳定	11.08	半年交替变化不稳定	21.72

注: 统计面积比例时所用坐标系为 WGS_1984_Cylindrical_Equal_Area。

4 结 论

(1) 全球中低纬度降水时间差异显著, 月降水总量以 12 月份居多, 而 2 月份最低, 但月降水日均值则是以 6 月份居多以及 10 月份为最少; 13 年各月降水量的年际波动都比较明显; 降水主要集中在夏季和冬初, 秋季及春初偏少; 2010 年是 13 年全球降水最多的年份, 而 2003 ~ 2006 年则偏少。

(2) 全球中低纬度降水总体表现为由低纬向中纬递减的趋势, 降水量大小随海洋和陆地的间隔分布而交替变化, 且海洋降水明显多于陆地, 降水量具有显著的海陆梯度特征; 季风区是全球中低纬度降水最大的

区域,而非洲北部、中东及中亚大部分地区、澳大利亚西部、太平洋东北部和东南部、大西洋和印度洋东南部则是降水总体偏少的区域。

(3) 月尺度 13 年降水序列绝大多数像元降水量的变化趋势统计不显著,但却具有显著的长程自相似性; 12 月份降水变化态势的空间差异明显强于其它月份,而 3 月份则最不明显; 12 个月中降水显著增加或显著减少且具有可持续性的区域空间分布比较有限,时间频次也较低,而降水增加或减少、统计不显著但具有可持续性的区域则广泛分布且时间频次较高。

(4) 季尺度降水演化特征具有较强的空间差异性和复杂性: 总体增加且将持续增加的区域和总体减少且将持续减少的区域可分别细分出 5 个亚类,10 个亚类中一年四季增加且将持续增加的区域面积比例最高,为 13.83%,其它类型面积比例均为 3.8%~7.9%; 降水量半年交替变化和季节交替变化区域分别占 21.72%和 11.08%,但其空间分布均比较离散。

定量分析和深刻揭示降水的时空动态及其动力机制,探求其年际和长期变化趋势以及未来发展态势对于增进响应和适应全球气候变化的能力,以及保证和促进经济社会生产和生活持续而有序发展有着重要的意义,同时,研究宏观乃至全球尺度降水量的分布规律与变化特征,对于分析气候变化背景下的水循环以及气候预测等都具有非常重要的意义。本文在像元尺度进行计算和分析,初步揭示了全球中低纬度近 13 年降水的时空动态特征,但基于更长时期降水序列的研究,以及对降水时空动态驱动机制及环境效应的研究等都是值得进一步开展的工作。

参考文献:

- [1] ASHIQ M W, AKHTAR M, ZHAO C, et al. GIS-based high-resolution spatial interpolation of precipitation in mountain-plain areas of Upper Pakistan for regional climate change impact studies [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 99(3/4): 239-253.
- [2] 王晓霞,徐宗学,阮本清. 天津市降水量变化趋势的时空分布特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(9): 92-96. (WANG Xiao-xia, XU Zong-xue, RUAN Ben-qing. Spatiotemporal trend of precipitation in Tianjin city [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(9): 92-96. (in Chinese))
- [3] 潘敖大,王珂清,曾燕,等. 长江三角洲近 46a 气温和降水的变化趋势[J]. *大气科学学报*, 2011, 34(2): 180-188. (PAN Ao-da, WANG Ke-qing, ZENG Yan, et al. Trends of temperature and precipitation variation in the Yangtze River Delta from 1961 to 2006 [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2011, 34(2): 180-188. (in Chinese))
- [4] 姜彤,苏布达, GEMMER M. 长江流域降水极值变化趋势[J]. *水科学进展*, 2008, 19(5): 650-655. (JIANG Tong, SU Bu-da, GEMMER M. Trends in precipitation extremes over the Yangtze River basin [J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(5): 650-655. (in Chinese))
- [5] 信忠保,许炯心,马元旭. 近 50 年黄土高原侵蚀性降水的时空变化特征[J]. *地理科学*, 2009, 29(1): 98-104. (XIN Zhong-bao, XU Jiong-xin, MA Yuan-xu. Spatio-temporal variation of erosive precipitation in Loess Plateau during Past 50 Years [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(1): 98-104. (in Chinese))
- [6] 詹道强. 沂沭泗流域汛期降水特征与临沂站洪峰流量的对比分析[J]. *水科学进展*, 2000, 11(1): 88-91. (ZHAN Dao-qiang. Comparison of rainfall characteristics of the flood period in Yi-Shu-Si river basin and peak discharge of Linyi station [J]. *Advances in Water Science*, 2000, 11(1): 88-91. (in Chinese))
- [7] 刘俊峰,陈仁升,卿文武. 基于 TRMM 降水数据的山区降水垂直分布特征[J]. *水科学进展*, 2011, 22(4): 447-454. (LIU Jun-feng, CHEN Ren-sheng, QIN Wen-wu. Study on the vertical distribution of precipitation in mountainous regions using TRMM data [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(4): 447-454. (in Chinese))
- [8] 徐利岗,周宏飞,李彦,等. 中国北方荒漠区降水稳定性与趋势分析[J]. *水科学进展*, 2008, 19(6): 792-799. (XU Li-gang, ZHOU Hong-fei, LI Yan, et al. Analysis of the precipitation stability and variety trend in the desert region of northern China [J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(6): 792-799. (in Chinese))
- [9] 王志福,钱永甫. 中国极端降水事件的频数和强度特征[J]. *水科学进展*, 2009, 20(1): 1-9. (WANG Zhi-fu, QIAN Yong-fu. Frequency and intensity of extreme precipitation events in China [J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(1): 1-9. (in Chinese))
- [10] 刘奇,傅云飞. 基于 TRMM/TMI 的亚洲夏季降水研究[J]. *地球科学*, 2007, 37(1): 111-122. (LIU Qi, FU Yun-fei. Research of summer precipitation in Asia based on TRMM/TMI [J]. *Earth Science*, 2007, 37(1): 111-122. (in Chinese))

- [11] 施能,陈绿文,封国林,等. 1920-2000年全球陆地降水气候特征与变化[J]. 高原气象,2004,23(4): 435-443. (SHI Neng, CHEN Lü-wen, FENG Guo-lin, et al. Climate characters and changes in global land precipitation field from 1920 to 2000 [J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(4): 435-443. (in Chinese))
- [12] KAHYA E, SERDAR K. Trend analysis of stream flow in Turkey [J]. Journal of Hydrology, 2004, 28(9): 128-144.
- [13] DAI A G, LIN X, KUOLIN H. The frequency, intensity, and diurnal cycle of precipitation in surface and satellite observations over low-and mid-latitudes [J]. Climate Dynamics, 2007, 29: 727-744.
- [14] PURI S, STEHEN H, AHMAD S. Relating TRMM precipitation radar backscatter to water stage in wetlands [J]. Journal of Hydrology, 2011, 401(3/4): 240-249.
- [15] FEIDAS H. Validation of satellite rainfall products over Greece [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2010, 99(1/2): 193-216.
- [16] ALMAZROUI M. Calibration of TRMM rainfall climatology over Saudi Arabia during 1998-2009 [J]. Atmospheric Research, 2011, 99(3/4): 400-414.
- [17] ISLAM M N, UYEDA H. Comparison of TRMM 3B42 products with surface rainfall over bangladesh [C]// Proceedings in the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS05), Seoul: IEEE, 2005: 412-415.
- [18] GEORGE J H, ROBERT F A, DAVID T B. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales [J]. Journal of Hydrometeorology, 2006, 8(1): 38-55.
- [19] DINKU T, CECCATO P, GROVER K E, et al. Validation of satellite rainfall products over east Africa's complex topography [J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(7): 1503-1526.
- [20] NICHOLSON S, SOME B, MCCOLLUM J, et al. Validation of TRMM and other rainfall estimates with a high-density gauge dataset for West Africa: Part II: Validation of TRMM rainfall products [J]. Journal Appl Meteorol, 2003, 42(10): 1355-1368.
- [21] LETTENMAIER D P, SU F, YANG H. Evaluation of TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in LaPlata Basin [J]. Journal of hydrology, 2007(9): 622-640.
- [22] CHIU L S, LIU Z, VONGSAARD J, et al. Comparison of TRMM and water district rain rates over New Mexico [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2006, 23(1): 1-13.
- [23] HENSCHKE A E, HABIB E. Validation of NASA-TRMM MPA precipitation estimates during tropical storms using gauge and radar-based estimates [J]. Eos Trans AGU, 2008, 88(23): Jt Assem Suppl, Abstract H24A-04.
- [24] 刘俊峰,陈仁升,韩春坛,等. 多卫星遥感降水数据精度评价[J]. 水科学进展, 2010, 21(3): 343-348. (LIU Jun-feng, CHEN Ren-sheng, HAN Chun-tan, et al. Evaluating TRMM multi-satellite precipitation analysis using gauge precipitation and MODIS snow-cover products [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(3): 343-348. (in Chinese))
- [25] 曾红伟,李丽娟. 澜沧江及周边流域 TRMM 3B43 数据精度检验[J]. 地理学报, 2011, 66(7): 994-1004. (ZENG Hong-wei, LI Li-juan. Accuracy validation of TRMM 3B43 Data in Lancang River Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(7): 994-1004. (in Chinese))
- [26] 李景刚,李纪人,黄诗峰,等. 基于 TRMM 数据和区域综合 Z 指数的洞庭湖流域近 10 年旱涝特征分析[J]. 资源科学, 2010, 32(6): 1103-1110. (LI Jing-gang, LI Ji-ren, HUANG Shi-feng, et al. Characteristics of the recent 10 year flood/drought over the Dongting Lake basin based on TRMM precipitation data and regional integrated Z-index [J]. Resources Science, 2010, 32(6): 1103-1110. (in Chinese))
- [27] 杨传国,余钟波,林朝晖,等. 基于 TRMM 卫星雷达降雨的流域陆面水文过程[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 461-466. (YANG Chuan-guo, YU Zhong-bo, LIN Zhao-hui, et al. Study on watershed hydrologic processes using TRMM satellite precipitation radar products [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 461-466. (in Chinese))
- [28] 陈举,施平,王东晓,等. TRMM 卫星降雨雷达观测的南海降雨空间结构和季节变化[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 29-35. (CHEN Ju, SHI Ping, WANG Dong-xiao, et al. Spatial distribution and seasonal variability of the rainfall observed from TRMM precipitation radar (PR) in the South China Sea Area (SCSA) [J]. Advance in Earth Sciences, 2005, 20(1): 29-35. (in Chinese))
- [29] 白爱娟,刘长海,刘晓东. TRMM 多卫星降水分析资料揭示的青藏高原及其周边地区夏季降水日变化[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 704-714. (BAI Ai-juan, LIU Chang-hai, LIU Xiao-dong. Diurnal variation of summer rainfall over the Tibetan Plateau and its neighboring regions revealed by TRMM multi-satellite precipitation analysis [J]. Chinese J Geophys, 2008, 51(3): 704-714. (in Chinese))
- [30] 李丽娟,郑红星. 华北典型河流年径流演变规律及其驱动力分析[J]. 地理学报, 2000, 55(3): 309-317. (LI Li-juan,

- ZHENG Hong-xing. Characteristics and driving forces of annual runoff changes for rivers in North China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(3): 309-317. (in Chinese)
- [31] 张菲, 刘景时, 巩同梁. 喜马拉雅山北坡卡鲁曲径流与气候变化[J]. *地理学报*, 2006, 61(11): 1141-1148. (ZHANG Fei, LIU Jing-shi, GONG Tong-liang. Hydrological regime of Karuxung watershed in north Himalayas [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(11): 1141-1148. (in Chinese))
- [32] XU Z X, AKEUCHI T K, ISHIDAIRA H. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 279: 144-150.
- [33] XU Z X, TAKEUCHI K, ISHIDAIRA H. Long-term trends of annual temperature and precipitation time series in Japan [J]. *Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering*, 2002, 202: 11-26.
- [34] 江田汉, 邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题: 以在气候变化研究中的应用为例[J]. *地理科学*, 2004, 24(2): 177-182. (JIANG Tian-han, DENG Lian-tang. Some problems in estimating a Hurst exponent: A case study of applications to climatic change [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(2): 177-182. (in Chinese))
- [35] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 414-417. (XU Jian-hua. *Mathematical methods in contemporary geography* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 414-417. (in Chinese))
- [36] 符淙斌, 曾昭美. 季风区: 全球降水变率最大的地区[J]. *科学通报*, 1997, 42(21): 2306-2309. (FU Zong-bin, ZENG Zhao-mei. Monsoon regions: The regions with the most significant precipitation variation in the world [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(21): 2306-2309. (in Chinese))

On spatial-temporal dynamics of precipitation in global mid-low latitudes from 1998 to 2010*

CHANG Yuan-yong^{1,2}, HOU Xi-yong¹, WU Ting^{1,2}, YU Liang-ju¹

(1. *Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, Chinese Academy of Sciences, YICCAS, Yantai 264003, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: Based on the TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 3B43 precipitation data, the Mann-Kendall test was performed and the Hurst index was calculated at the pixel scale to analyze the spatial-temporal dynamics of precipitation in global mid-low latitudes from 1998 to 2010. Furthermore, the “Monthly Calendar” and the seasonal evolvement map were drawn. It shows that, summers and early winters are the rainy period in a year. Significant fluctuations of monthly precipitation in the past 13 years can be observed. Over all, the precipitation shows a decreasing trend from the low latitude to the high latitude. Precipitation in the ocean is more than that on the land and therefore very significant sea-land gradient characteristics can be found. On monthly scale, the changing trends of precipitation in most areas are ‘increasing but not significant’ or ‘decreasing but not significant’, however, there’re very strong self-similarity and long-range dependence for the 12 monthly time sequences of precipitation data. December shows the most prominent spatial differences of precipitation variation while March is the least significant one. On seasonal scale, more than 98% areas have very strong self-similarity and long-range dependence for the 4 seasonal time sequences of precipitation data; the spatial differences of precipitation variation are very significant in the seasonal evolvement map. The results and conclusions in this study are aimed at providing a useful reference on the research of global water cycle, global climate change and so on.

Key words: tropical rainfall measuring mission; precipitation; global low-mid latitudes; Mann-Kendall; Hurst index; spatial-temporal dynamics

* The study is financially supported by the Key Programs of the Chinese Academy of Sciences (No. KZCX2-YW-224).