

贵州麦岗水库小流域降水变化特征的小波分析

李春梅,李双成,王红亚

(北京大学城市与环境学院,地表过程分析与模拟教育部重点实验室,北京 100871)

摘 要:利用1960-2007年月平均降水和年平均降水数据,采用墨西哥帽小波连续函数,对贵州省紫云县麦岗水库流域近48年来降水时间序列的季节变化和年际变化进行多尺度分析,揭示了麦岗水库流域降水变化多时间尺度的结构特征,并提取各季节和年降水序列的周期变化及突变点。结果表明,不同季节和年降水存在不同时间尺度的变化周期。春季降水的变化周期为8年和2年,夏季降水的变化周期为8年和1年,秋季降水的变化周期为16年和1年,冬季降水的变化周期为3年和12年,年降水的变化周期为1年和8年。夏季降水和年降水均有1年和8年的变化周期。通过小波系数过程曲线可知,夏季降水与年降水的变化趋势一致,年降水变化在较大程度上受到夏季降水变化的影响。

关 键 词:降水变化;小波分析;多尺度分析;麦岗水库流域

1 引言

20世纪80年代以来,国内外学者对全球气候变化做了较多研究^[1-5]。降水量作为重要的气候变量,其特征及变化规律也受到了广泛的关注^[6-8],相关的研究主要集中在不同时空尺度降水序列的分布特征方面。以贵州高原为中心的中国西南喀斯特地区,土层瘠薄,生态环境极其脆弱,气候变化特别是降水变化对该区的土地利用/覆被、生态系统生产力、土壤侵蚀等的变化具有较大的影响,因此,对该区域降水变化规律进行研究具有重要意义。

小波分析(Wavelet Analysis)是在傅里叶变换基础上发展起来的一个数学分支,其基础理论知识涉及到数值分析、泛函分析、统计分析,涉及到电气工程、电子工程、计算机工程和通信工程等多方面,同时,小波分析还具有理论深刻和工程应用十分广泛的双重意义^[9]。在时域和频域,小波分析都具有良好的局部性质,能对信号或图像进行多尺度的细化分析,把研究对象分解成交织在一起的多尺度成分,从而可以聚焦到其任意微小细节^[10-11]。由于小波分析在数学意义上还具有严格的突变点及周期诊断能力,近年来被广泛应用于气候的多尺度分析研究中^[12-20]。一些学者运用小波分析对喀斯特地区降水特征进行了研究^[21-22],但运用此方法分析典型

季风气候区降水季节变化及其时间尺度特征的研究还相对较少。

本文运用小波分析方法,以逐月降水数据为基础,对位于贵州省西南部,面积约7.5 km²的麦岗水库流域近48年(1960-2007年)来的降水时间序列变化特征进行分析,揭示了降水序列的周期特征和突变点,从而为该流域内土壤侵蚀防治、生态恢复和石漠化研究与治理等提供科学数据。

2 资料和方法

2.1 资料来源及计算

本文采用资料为位于麦岗水库流域东部,距麦岗水库流域约15 km的贵州省长顺县气象站观测的1960-2007年的逐月降水数据。为了反映降水变化的总趋势,分别对春季(3-5月)、夏季(6-8月)、秋季(9-11月)、冬季(12-翌年2月)和年降水数据进行直线拟合,将拟合直线斜率的10倍作为气候倾向率,指示麦岗水库流域每10年降水的变化值^[23]。此外,计算各季节降水及年平均降水的距平,以消除季节变化的影响,并对各时间序列的降水距平值进行连续小波分析。为能与小波分析结果比较,对各降水的时间序列进行10年平均距平及其百分比计算。年代距平计算公式为:

收稿日期:2011-04; 修订日期:2011-06.

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2003CB415201);科技部基础性工作专项课题(2007FY140800-1)。

作者简介:李春梅(1985-),女,四川会东人,博士生,主要研究方向为土壤侵蚀和土地科学。E-mail: lichunmei023@126.com

通讯作者:王红亚, E-mail: why@urban.pku.edu.cn

$$p=\bar{x}-\bar{y} \tag{1}$$

式中： p 为年代降水距平； \bar{x} 为年代降水平均值； \bar{y} 为降水序列平均值。

2.2 小波分析

小波函数的定义为^[9]：设 $\psi(t)$ 为一平方可积函数，即 $\psi(t) \in L^2(R)$ ，其傅里叶变换 $\psi(\omega)$ 满足条件：

$$C_\psi = \int \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \tag{2}$$

式中： $L^2(R)$ 为能量有限空间，积分限为在非 0 实数上的积分。则称 $\psi(t)$ 为一个基本小波或小波母函数，称公式(2)为小波函数的可容许条件。将小波母函数 $\psi(t)$ 进行伸缩和平移为：

$$\psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \quad a, \tau \in R; a > 0 \tag{3}$$

式中： a 为伸缩因子； τ 为平移因子； $\psi_{a,\tau}(t)$ 被称为依赖于参数 a, τ 的小波基函数。而由于尺度因子 a 和平移因子 τ 是连续变化的值，因此， $\psi_{a,\tau}(t)$ 也被称为连续小波函数基。

将任意 $L^2(R)$ 空间中的函数 $f(t)$ 在小波基下展开，这种展开称为函数 $f(t)$ 的连续小波变换 (Continuous Wavelet Transform, CWT)，设 $WT_f(a, \tau)$ 为小波变换系数，其表达式即为：

$$WT_f(a, \tau) = \langle f(t), \psi_{a,\tau}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R f(t) \psi^*\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \tag{4}$$

小波分析中用到的函数具有多样性，根据研究对象特征及各小波的优势，本文采用在时间域和频率域都有很好局部化的墨西哥帽 (Mexican Hat，简称 Mexh) 小波函数，对麦岗水库流域降水时间序列进行连续小波变换，其小波函数表达式为：

$$\psi(x) = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \pi^{-1/4} \right) (1-x^2) e^{-x^2/2} \tag{5}$$

式中： x 为降水时间序列； $\psi(x)$ 为基于降水时间序列的小波函数。

3 结果分析

通过对麦岗水库流域 1960-2007 年各季节和年降水量进行直线拟合，得到结果如图 1 所示。图 2、图 3 和图 4 分别为对各季节和年降水距平序列进行连续小波变换而得到的小波系数、小波方差和小波系数过程曲线图。

3.1 春季降水变化特征

由图 1a 可知，1960-2007 年，麦岗水库流域春

季降水总体略呈增多趋势，倾向率为 1.15 mm/10a，说明春季降水变化较为缓和。1960-2007 年春季降水的年代际距平如表 1 所示。由表 1 可知，20 世纪 60、80 和 90 年代的降水距平为负，说明春季降水相对偏少。其中，60 年代的降水距平达到了 -30.37 mm，距平百分比为 -9.31%，证明该时期春季降水远低于平均值。20 世纪 70 年代及 21 世纪初的降水距平为正，且均大于 10 mm，70 年代的降水距平甚至达到 37.64 mm，距平百分比为 11.54%，说明这两个时期的春季降水偏多。

图 2a 为麦岗水库流域春季降水小波系数图，显示了近 48 年来麦岗水库流域春季降水在不同时间尺度上的突变点及周期震荡。图中小波系数的大小表示信号的强弱，小波系数为 0 指示突变点；等值线为负，代表降水偏少；等值线为正，代表降水偏多。由图 2a 可见，近 48 年来的春季降水的周期震荡主要表现为 6-8 年尺度上的周期。在 6-8 年的时间尺度上，近 48 年来麦岗水库流域春季降水经历了少→多→少→多的变化过程。对应 4 年以下的小尺度降水变化，存在较多的多雨期和少雨期的循环交替变化过程。图 3a 为 1960-2007 年的春季降水小波方差图。由图中可以看出，小波方差在 8 年和 2 年的时间尺度上存在极值，说明春季降水存在两个变化周期，第 1 周期为 8 年，第 2 周期为 2 年。因此，结合小波系数和小波方差的分析结果，可以看出，1960-2007 年麦岗水库流域春季降水存在 8 年和 2 年的变化周期。

结合图 2a 和图 3a 可以看出，春季降水量变化的主周期为 8 年。因此，提取该主周期尺度的小波系数作图，得到春季降水量变化主周期尺度的小波系数变化过程线如图 4a 所示。由图 4a 可以看出，自 1960 年以来，麦岗水库流域春季降水量偏多的阶段为 1970-1985 年和 2001-2007 年；春季降水偏少的阶段为 1960-1969 年和 1986-2000 年。春季降水的这种变化特征与根据年代距平分析得到的结果基本一致。

表 1 1960-2007 年贵州麦岗水库小流域春季降水年代距平
Tab.1 Decadal anomalies of spring precipitation in Maigang Reservoir Catchment, Guizhou Province during 1960-2007

年代	60	70	80	90	21 世纪初 [*]
距平/mm	-30.37	37.64	-9.99	-5.39	10.13
距平百分比/%	-9.31	11.54	-3.06	-1.65	3.11

^{*}21 世纪初指 2000-2007 年，后同。

3.2 夏季降水变化特征

由图 1b 可以看出,1960 年以来,夏季降水总体略呈增加的趋势,倾向率为 4.61 mm/10a,表明夏季降水变化较为缓和。从表 2 可以看出,20 世纪 70 年代和 80 年代降水距平为负,说明夏季降水相对偏少。其中,80 年代的距平为-96.4 mm,距平百分比为-13.52%,证明该时段夏季降水远小于平均值。20 世纪 60 年代、90 年代和 21 世纪初夏季降水距平为正,说明夏季降水相对偏多。

从图 2b 可以看出,麦岗水库流域夏季降水存在 6-8 年的变化主周期,经历了多→少→多的变化

过程。1960-1974 年和 1991-2007 年,夏季降水相对偏多;1975-1990 年,降水相对偏少。对应 4 年以下时间尺度的降水变化,存在较多的多雨期和少雨期的循环交替。由夏季降水小波方差图 3b 可以看出,夏季降水存在 8 年和 1 年的变化周期。结合小波系数和小波方差可知,夏季降水的变化周期为 8

表 2 1960-2007 年贵州麦岗水库小流域夏季降水年代距平

Tab.2 Decadal anomalies of summer precipitation in Maigang Reservoir Catchment, Guizhou Province during 1960-2007

年代	60	70	80	90	21 世纪初
距平/mm	48.9	-15.53	-96.4	57.02	7.51
距平百分比/%	6.86	-2.18	-13.52	8	1.05

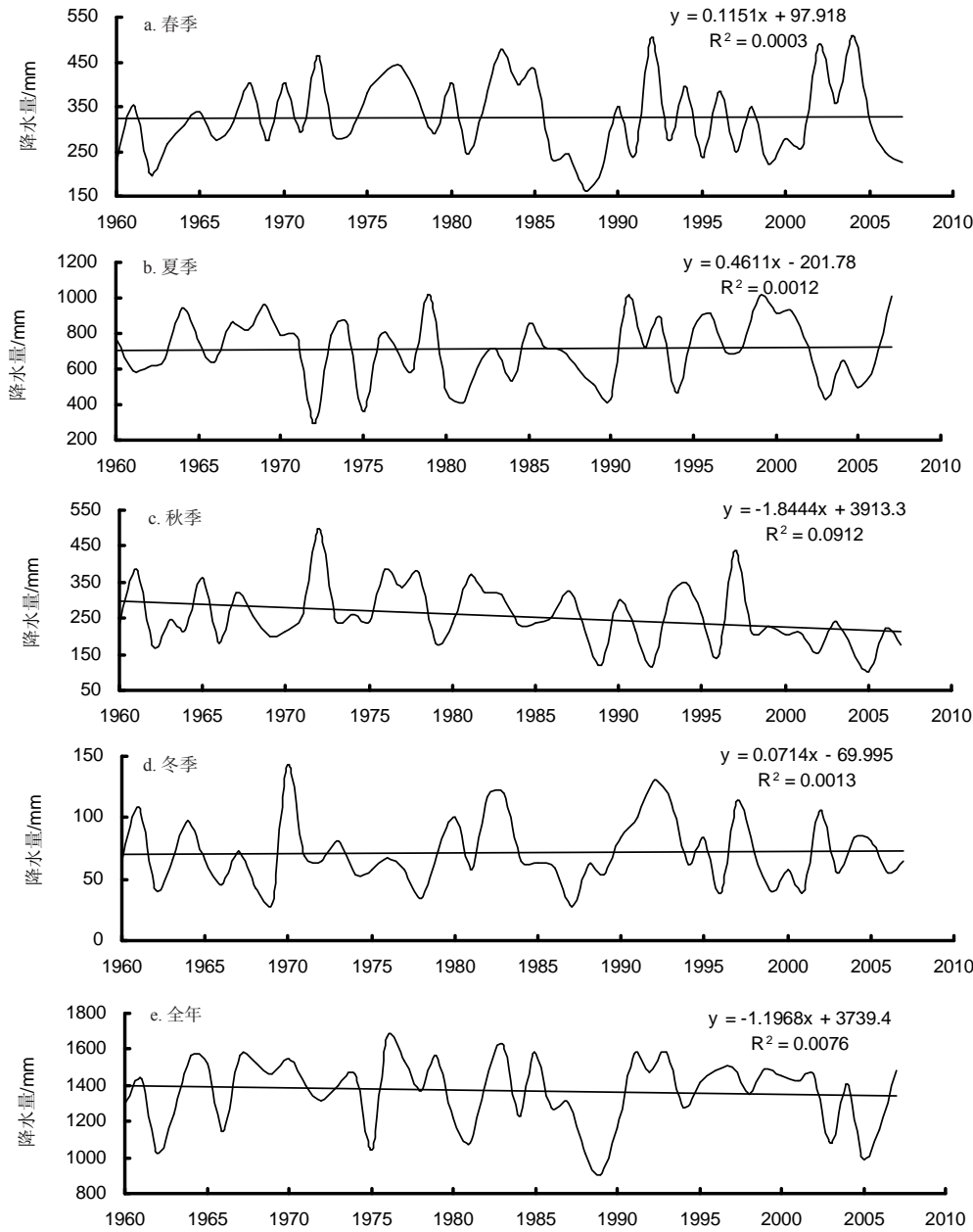


图 1 贵州麦岗水库小流域降水年际变化

Fig.1 The interannual variations of precipitation in Maigang Reservoir Catchment, Guizhou Province

年和1年。因此,提取时间尺度为8年的小波系数作图,结果如图4e所示。从图4可以看出,降水偏多和偏少的阶段与由小波系数图得到的结果一致。

3.3 秋季降水特征

由图1c可以看出,1960年以来,麦岗水库流域秋季降水总体呈下降趋势,倾向率为18.44 mm/10a,说明秋季降水变化较大。

从表3可知,20世纪60年代、70年代、80年代和90年代的秋季降水距平均为正,说明秋季降水偏多。其中,60年代和90年代的降水距平百分比分别为0.92%和0.79%,表明这两个时期的秋季降水接近1960-2007年秋季降水的平均值。70年代降水距平百分比为17.81%,说明降水明显高于平均值。21世纪初的降水距平为负,且距平百分比达

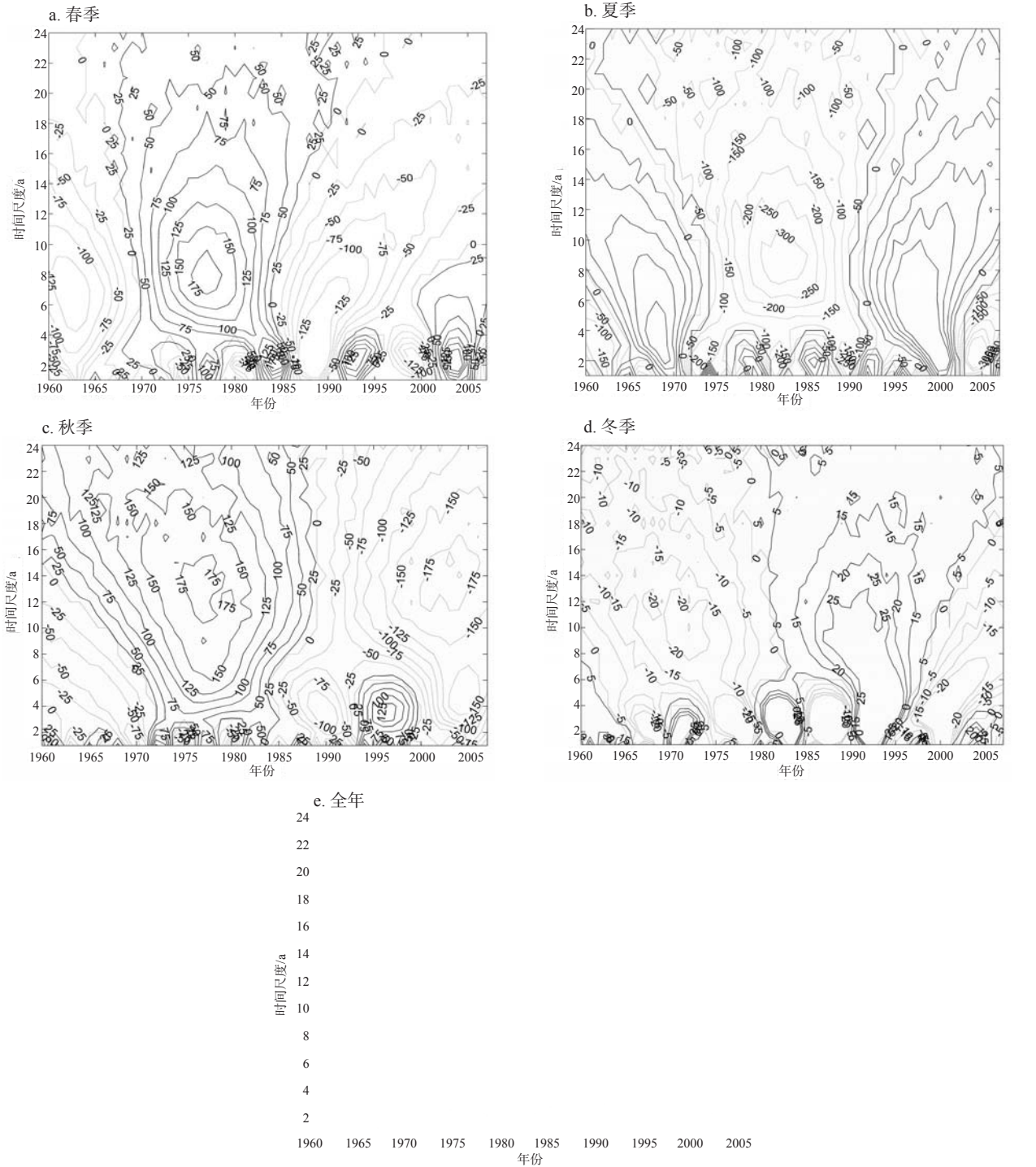


图2 贵州麦岗水库小流域降水小波系数

Fig.2 Wavelet coefficients of precipitation in Maigang Reservoir Catchment, Guizhou Province

到-27.94%,表明该时期秋季降水量远低于平均值。

由小波系数图 2c 可以看出,秋季降水存在 12-16 年、4-6 年两个变化周期。在 12-16 年的时间尺度上,降水经历了多→少的变化过程,突变点为 1991 年。在 4-6 年的时间尺度上,降水经历了少→多→少→多的变化过程,降水偏少的时期为:

表 3 1960–2007 年贵州麦岗水库小流域秋季降水年代距平
Tab.3 Decadal anomalies of autumn precipitation in Maigang Reservoir Catchment, Guizhou Province during 1960–2007

年代	60	70	80	90	21 世纪初
距平/mm	2.35	45.38	7.23	2	-71.21
距平百分比/%	0.92	17.81	2.84	0.79	-27.94

1960-1971 年、1986-1993 年和 2001-2007 年;降水偏多的时期为:1972-1985 年、1994-2000 年。在 4 年以下的时间尺度上,存在较多的少雨期和多雨期的循环交替变化。由小波方差图 3c 可知,降水存在 16 年和 1 年的变化周期。因此,结合图 2c 和图 3c 可以看出,麦岗水库流域秋季降水的变化周期为 16 年和 1 年。提取 16 年主周期下的小波系数并作图(图 4b),与图 2c 显示的结果一致,1960-1990 年秋季降水偏多,1991-2007 年降水偏少。

3.4 冬季降水变化特征

从图 1d 可知,麦岗水库流域冬季降水总体呈

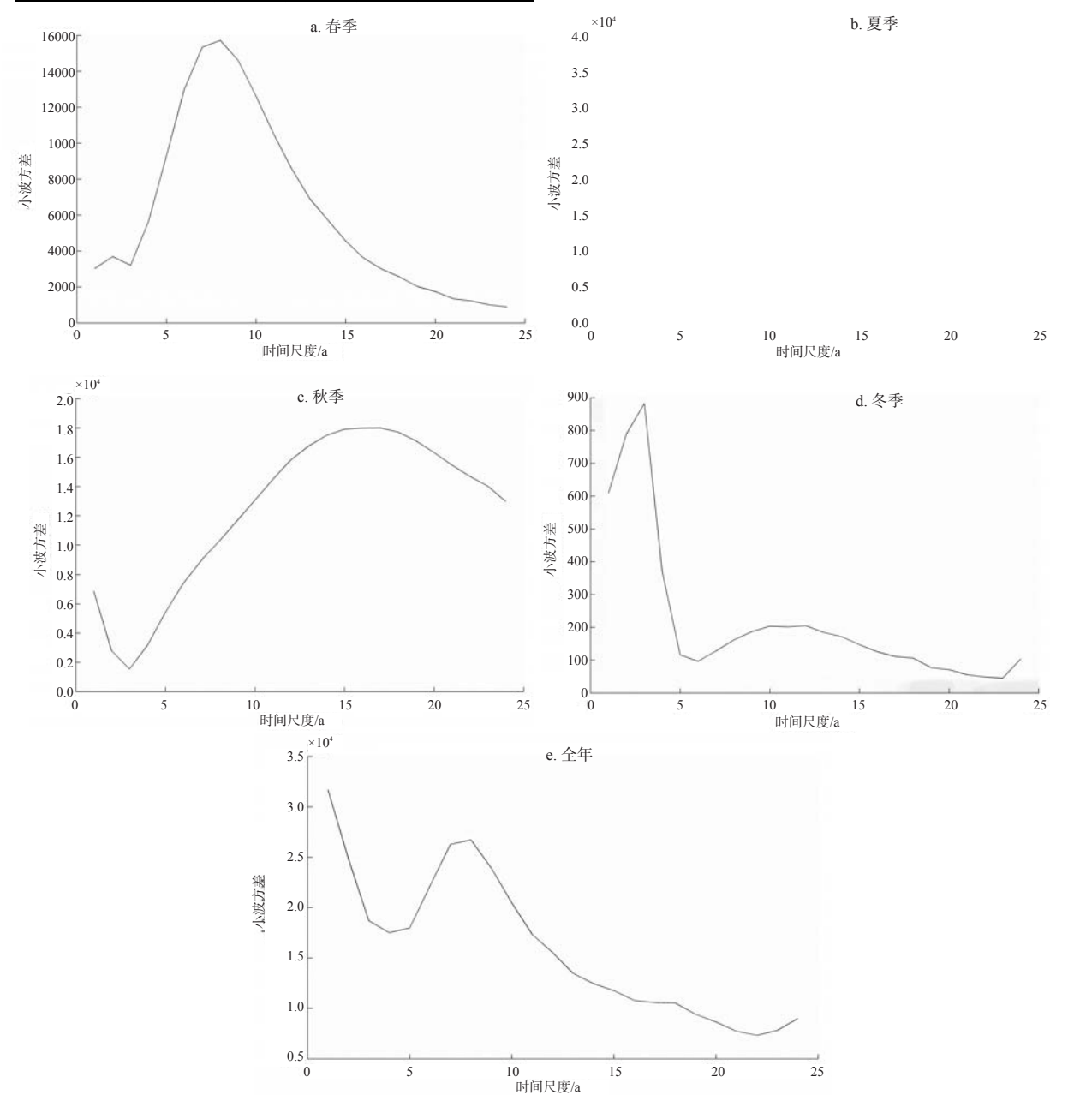


图 3 贵州麦岗水库小流域降水小波方差

Fig.3 Wavelet variances of precipitation in Maigang Reservoir Catchment, Guizhou Province

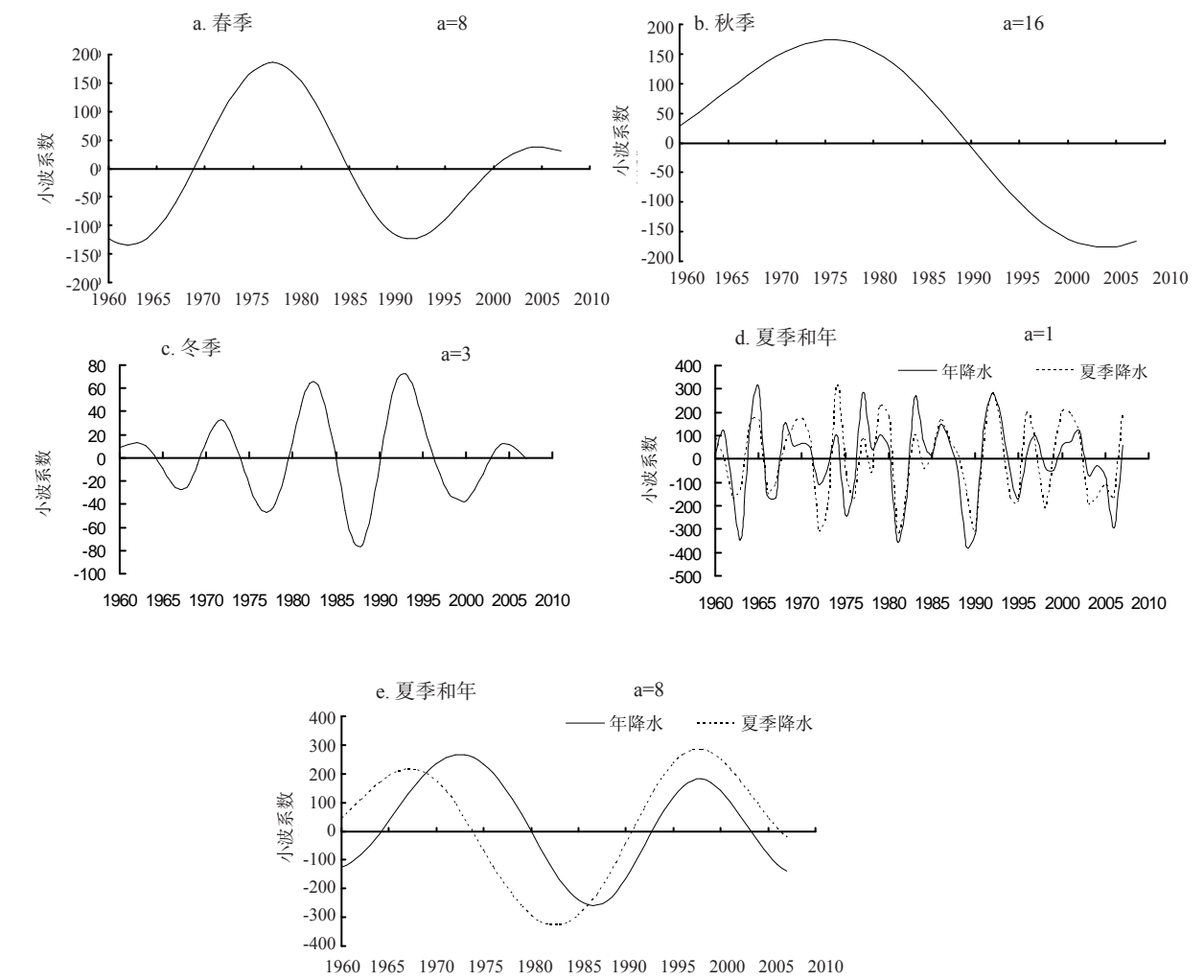


图4 贵州麦岗水库小流域春季(a)、秋季(b)、冬季(c)、夏季和年降水(d, e)小波系数过程线

Fig.4 Wavelet coefficients course lines of spring (a), autumn (b), winter (c), summer and annual (d, e) precipitation

缓慢增多趋势,倾向率为0.71 mm/10a,说明冬季降水总体变化不大。由年代距平表4可以看出,20世纪60年代、70年代和21世纪初的降水距平为负,说明冬季降水偏少。其中,60年代的降水距平百分比为-11.25%,表明这一阶段的冬季降水明显低于平

均值。20世纪80年代和90年代的降水偏多,其中,90年代的距平百分比达到了16.46%,说明降水远高于平均值。

表4 1960–2007年贵州麦岗水库小流域冬季降水年代距平
Tab.4 Decadal anomalies of winter precipitation in Maigang Reservoir Catchment, Guizhou Province during 1960–2007

年代	60	70	80	90	21世纪初
距平/mm	-8.07	-1.7	0.99	11.8	-3.78
距平百分比/%	-11.25	-2.37	1.38	16.46	-5.28

表5 1960–2007年贵州麦岗水库小流域年降水距平
Tab.5 Decadal anomalies of annual precipitation in Maigang Reservoir Catchment, Guizhou Province during 1960–2007

年代	60	70	80	90	21世纪初
距平/mm	12.8	65.8	-98.2	65.4	-57.4
距平百分比/%	0.94	4.82	-7.19	4.79	-4.2

由图2d可以看出,1960-2007年麦岗水库流域冬季降水存在8-12年、2-4年的变化周期。在8-12年的时间尺度上,冬季降水经历了少→多→少的变化过程。这与根据年代距平分析得到的结果一致。从图中可以看出,在8-12年的时间尺度上,降水偏多的阶段为:1981-2002年;降水偏少的阶段为:1960-1980年、2003-2007年。在2-4年的时间尺度上,存在着较多的少雨期和多雨期的循环交替。小波方差图3d显示,冬季降水的变化主周期为3年和12年。因此,结合小波系图和小波方差图,认为冬季降水存在3年和12年的变化周期。提取时间尺度为3年的小波系数并作图(图4c),结合图2d和图4c可知,在3年的时间尺度上,降水偏多的阶段

为1960-1964、1969-1974、1980-1985年、1991-1996和2003-2007年;降水偏少的阶段为1965-1968年、1975-1979年、1986-1990年和1997-2002年。

3.5 年降水变化特征

从图1e可以看出,麦岗水库流域年降水量总体呈减少趋势,倾向率为11.97 mm/10a,说明年降水年际变化相对较大。由表5可知,20世纪60年代、70年代和90年代的年降水距平为正,说明这些时段年降水偏多;20世纪80年代和21世纪初,降水距平为负,表明年降水偏少。

由图2e知,1960-2007年年降水存在6-8年的变化周期。在6-8年时间尺度上,降水偏多的阶段为1965-1980年和1994-2003年;降水偏少的阶段为1960-1964年、1981-1993年和2004-2007年。在4年以下时间尺度上,同样存在较多的少雨期和多雨期的循环交替。由小波方差图3e可知,年降水存在1年和8年的变化周期。因此,结合小波系数和小波方差图,可以看出,年降水存在8年的较大尺度和1年的较小尺度周期变化。这与夏季降水的变化周期一致,说明夏季降水的周期变化对年降水的周期变化有较大影响。因此,对1年和8年时间尺度下的夏季降水和年降水小波系数作图如图4d、4e所示。由图可知,在1年和8年的时间尺度上,夏季降水的小波系数过程曲线和年降水的小波系数过程曲线的变化趋势较为一致,证明年降水的变化确实在较大程度上受到夏季降水变化的影响。因此,当夏季降水较多与年降水较多年份重合时,可能出现涝灾;反之,则可能出现旱灾。

4 结论与讨论

(1) 通过对1960-2007年麦岗水库流域降水进行小波分析可以看出,近48年各季节、年降水存在不同时间尺度的周期震荡。春季降水的变化周期为8年和2年;夏季的变化周期为8年和1年;秋季为16年和1年;冬季为3年和12年;年降水的变化周期为1年和8年。各季节和年降水在4年以下的时间尺度上均存在较为复杂的少雨期和多雨期的循环交替。(2) 夏季降水和年降水虽然第1主周期和第2主周期对应不够好,但均有时间尺度为8年和1年的降水变化周期。夏季降水的变化在较大程度上影响着年降水的变化。(3) 对地理过程的多尺度分析是地理学研究中的难题和热点之一,至今

还没形成统一的科学研究模式。本文利用具有较好时域和频率域特性的小波分析方法,描述降水变化的多尺度特征,将隐含在降水序列中随时间变化的周期震荡显现出来,并确定降水序列中的突变点位置,避免了运用传统谱分析方法只能对序列整体特征进行提取的缺点。不仅提取了降水序列不同季节的变化特征,还对短期内气候的变化进行了预测。这对丰富地理学多尺度研究案例有重要作用。同时,研究成果对于生态脆弱的西南喀斯特地区石漠化防治、生态建设和农村生计选择均具有一定的参考价值。

致谢:在数据搜集过程中贵州大学王祖拥,中国科学院贵阳地球化学与研究所王燕丽博士提供了帮助,谨致谢忱!

参考文献

- [1] IGBP. IGBP in Action: Work Plan 1994-1998. IGBP Report No. 28, 1994.
- [2] 赵志平, 刘纪远, 邵全琴. 近30年来中国气候湿润程度变化的空间差异及其对生态系统脆弱性的影响. 自然资源学报, 2010, 25(12): 2091-2100.
- [3] 刘桂芳, 卢鹤立. 1961-2005年来青藏高原主要气候因子的基本特征. 地理研究, 2010, 29(12): 2281-2288.
- [4] Dessai S, Hulme M. Assessing the robustness of adaptation decisions to climate change uncertainties: A case study on water resources management in the East of England. Global Environment Change, 2007, 17(1): 59-72.
- [5] Wang L, Wu J, The-Quei Lee, et al. Climate change inferred from integrated multi-site pollen data in northern Taiwan. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40(6): 1164-1170.
- [6] 杨辉. 中国华南地区6月降水变化特征及大气环流条件分析. 第四纪研究, 2011, 31(1): 81-87.
- [7] 张强, 李剑锋, 陈晓宏, 等. 基于Copula函数的新疆极端降水概率时空变化特征. 地理学报, 2011, 66(1): 3-12.
- [8] 郝成元, 赵同谦. 中国气候变化敏感区降水量区域对比: 以黑龙江、新疆和西藏三省区为例. 地理科学进展, 2011, 30(1): 73-79.
- [9] 葛哲学, 沙威. 小波分析理论与MATLAB2007实现. 北京: 电子工业出版社, 2007: 3-33.
- [10] Nener B D, Ridsdill-Smith T A, Zeisse C. Wavelet analysis of low altitude infrared transmission in the coastal environment. Infrared Physics & Technology, 1999, 40(5): 399-409.
- [11] Clemen T. The use of scale information for integrating simulation models into environmental information systems. Ecological Modeling, 1998, 108(1-3): 107-113.

- [12] 路云阁, 李双成, 蔡运龙. 近40年气候变化及其空间分异的多尺度研究: 以内蒙古自治区为例. 地理科学, 2004, 24(4): 432-438.
- [13] 姜晓艳, 刘树华, 马明敏, 等. 东北地区近百年降水时间序列变化规律的小波分析. 地理研究, 2009, 28(2): 354-362.
- [14] 邵晓梅, 许月卿, 严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析. 北京大学学报: 自然科学版, 2006, 1(1): 1-7.
- [15] 李春强, 杜毅光, 李保国. 1965-2005年河北省降水量变化的小波分析. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1340-1344.
- [16] Prokoph A, Patterson R T. Application of wavelet and regression analysis in assessing temporal and geographic climate variability: Eastern Ontario, Canada as a case study. *Atmosphere-Ocean*, 2004, 42(3): 201-212.
- [17] Bradshaw G A, McIntosh B A. Detecting climate-induced patterns using wavelet analysis. *Environmental Pollution*, 1994, 83(1-2): 135-142.
- [18] Rossi A, Massei N, Laignel B, et al. The response of the Mississippi River to climate fluctuations and reservoir construction as indicated by wavelet analysis of stream flow and suspended-sediment load, 1950-1975. *Journal of Hydrology*, 2009, 377(3-4): 237-244.
- [19] Labat D. Cross wavelet analyses of annual continental freshwater discharge and selected climate indices. *Journal of Hydrology*, 2010, 385(1-4): 269-278.
- [20] 许月卿, 李双成, 蔡运龙. 基于小波分析的河北平原降水变化规律研究. 中国科学: D辑, 2004, 34(12): 1176-1183.
- [21] 王钧, 蒙古军. 西南喀斯特地区近45年来气候变化特征及趋势. 北京大学学报: 自然科学版, 2007, 43(2): 223-229.
- [22] 刘晓冉, 李国平, 范广州, 等. 我国西南地区1960-2000年降水资源变化的时空特征. 自然资源学报, 2007, 22(5): 783-792.
- [23] 林振耀, 赵昕奕. 青藏高原气温降水变化的空间特征. 中国科学: D辑, 1996, 26(4): 354-358.

Wavelet Analysis of Rainfall Variations in Maigang Reservoir Catchment, Guizhou Province

LI Chunmei, LI Shuangcheng, WANG Hongya

(Key Laboratory for Earth Surface Process, Ministry of Education, Department of Resources, Environments and Geography, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Maigang Reservoir catchment is located in Ziyun County of Guizhou Province, Southwest China. It has sub-tropical monsoon humid climate and is a carbonate-rock-dominated catchment of 7.5 km². The environment here is very fragile, accompanied with serious problems, such as soil erosion, and rockification. Precipitation influences the environment to a great extent. So it is important to analyze the precipitation changes. Wavelet analysis is evolved from Fourier analysis, and it is usually used in multiple-scale analysis of the earth surface process, such as precipitation, runoff and temperature time series. It is an alternative and effective approach to analyze climate change at multi-time scales and forecast short-time climate variations. Based on the principle of wavelet analysis, the Mexican hat wavelet was chosen as the mother wavelet for continuous wavelet analysis in this paper: the multi-time scales characteristics of seasonal and annual precipitation in the past 48 years (1960-2007) of Maigang reservoir catchment were analyzed based on the monthly and annual precipitation from 1960 to 2007 by using Mexican Hat wavelet analysis. The periodic oscillation of precipitation variations and the points of abrupt changes of different time scales in the precipitation series of different seasons and years were discovered. The conclusions can be shown as follows. (1) The periodic oscillations of the spring precipitation were 8 years and 2 years. (2) There were periodic oscillations of 8 years and 1 year for both summer and annual precipitation. (3) The periodic oscillations of the autumn precipitation were 16 years and 1 year. (4) There were periodic oscillations of 3 years and 8 years for the winter precipitation. (5) Both the summer and annual precipitation had the periodic oscillations of 1 year and 8 years, and had the same trends of precipitation changes. The summer precipitation obviously influenced the annual precipitation.

Key words: precipitation variation; wavelet analysis; multi-time scales; Maigang reservoir catchment

本文引用格式:

李春梅, 李双成, 王红亚. 贵州麦岗水库小流域降水变化特征的小波分析. 地理科学进展, 2012, 31(1): 32-39.