

北盘江流域降雨量和径流量年际变化研究

熊亚兰¹, 王昌全¹, 张科利², 宁茂岐³

(1. 四川农业大学 资源环境学院, 四川 雅安 625014; 2. 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 3. 贵州省水土保持监测站, 贵阳 550002)

摘要: 对北盘江流域的降雨和径流实测序列进行多尺度时频分析, 可为喀斯特地区流域的综合治理、水资源的合理利用、水电设施设计标准的制定及地区的可持续发展提供保证, 尤其对解决喀斯特地区的季节性干旱具有一定的指导意义。采用小波变换方法对北盘江流域年均降雨量和径流量的变化周期性进行分析, 研究结果表明: 北盘江流域 1956–2000 年降雨量和径流量均具有中等程度的变异, 且径流量的增加速率大于降雨量; 降雨和径流存在明显的年际和年代变化, 且降雨量和径流量的变化周期具有同步性; 降雨量的主周期依次为 23, 45, 5, 12 a, 而 23 a 尺度的周期具有全局性; 径流量的变化周期大致为 24, 6, 13, 40 a, 而 24 a 尺度的周期具有全局性。

关键词: 小波变换; 年降雨; 年径流; 周期

中图分类号: P426.614

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)05-0030-05

Periodic Changes of the Annual Precipitation and Annual Natural Runoff in Beipan River Watershed

XIONG Ya-lan¹, WANG Chang-quan¹, ZHANG Ke-li², NING MAO-qi³

(1. School of Natural Resources and Environmental Science, Sichuan Agriculture University, Ya'an, Sichuan 625014, China; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, School of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Observation Station for Soil and Water Conservation of Guizhou Province, Guiyang 210093, China)

Abstract: Research on the multiple time-frequency analysis of annual precipitation and annual runoff is help to integrated manage of Karst area, efficiently use of water resources, constitute criterion of designing water and electricity establishment. This paper analyzes tendency and periods of annual precipitation and annual natural runoff in Beipan River watershed based on Morlet wavelet transform. The results showed: annual precipitation has middling variance and no obvious increase tendency from 1956–2000, but annual runoff has middling variance and obvious increase tendency; periodic changes of annual precipitation and annual runoff are isochronous; periods of precipitation is 23, 45, 5, 12 years, and 23 years are overall; periods of runoff is 24, 6, 13, 40 years, and 24 years are overall.

Key words: wavelet transform; annual precipitation; annual natural runoff; periodic changes

河川径流是陆地水资源的主要组成部分。河流水文具有多时间尺度结构特征, 而不同时间尺度隐含着不同的水资源变化规律和丰枯变化趋势。分析河川径流时间变化规律和丰枯变化趋势, 对区域水资源利用以及防洪减灾都十分必要。由于小波分析在时域和频域上同时具有良好的局部特征和多分辨功能, 并且能由粗到细地描述各种复杂信号的任意细节, 小波分析方法已被广泛用来研究不同时间尺度水文时

间系列的周期性和演变趋势^[1-5]。

由于特殊的地质结构和地貌特征, 西南喀斯特地区存在功能性水资源短缺问题, 季节性干旱威胁着正常的农业生产。在西南喀斯特地区, 有效地开发利用河川径流是区域工农业生产和经济发展的重要保证。尽管已有一些学者就喀斯特地区河川径流特征做过研究, 但鲜有对喀斯特地区降雨径流突变点和周期性方面的系统研究。基于小波变换的降雨和径流多时

收稿日期: 2010-05-04

资助项目: 国家科技支撑计划(2008BAD98B05); 贵州省水土保持监测站科研项目

作者简介: 熊亚兰(1978–), 女, 四川都江堰人, 博士, 讲师, 主要研究方向为水土保持。E-mail: xiongyalan2002@yahoo.com.cn

通信作者: 王昌全(1962–), 男, 四川新都人, 博士, 教授, 主要从事土壤质量与植物营养研究。E-mail: wqquan@sicau.edu.cn

间尺度分析,也主要集中于黄河流域,基本上都是通过选取典型水文站点来研究水文序列的周期性和突变点,而对降雨径流变化周期是否同步的研究也较少^[6-14]。本文选择环境问题突出、水文观测资料较为完整的北盘江流域,应用连续小波变换方法对流域的降雨和径流实测序列进行多尺度时频分析,试图揭示该流域降雨和径流的周期性演变规律以及降雨和径流变化周期的同步性,为流域综合治理、水资源的优化配置和水电设施设计标准的制定等提供参考,对解决喀斯特地区的季节性干旱具有一定的指导意义。

1 数据和处理方法

1.1 数据来源

北盘江属珠江流域西江水系的一级支流,地处云贵高原向广西中山地丘陵地区过渡地带。流域总面积为 26 590 km²,其中山区面积占到 85%,丘陵占 10%,平原占 5%。为典型的喀斯特地区,石灰岩面积占土地总面积的 53.4%。该地区河谷深切,地形起伏大,土质疏松,土层浅薄,植被稀少,暴雨集中,北盘江流域已成为珠江水系土壤侵蚀面积最大、强度最高的区域,石漠化严重,水资源开发利用程度低^[15-18]。

贵州省可划分为 11 个水资源三级区,北盘江流域属其中之一。《贵州省水资源及其开发利用现状调查评价》(附表第一册)中记录了这 11 个水资源三级区的面积、1956—2000 年年降雨量和天然年径流量。本文选取北盘江流域 45 a (1956—2000 年) 年降雨量和天然年径流量资料进行分析。先对原始数据进行距平处理,在距平的基础上作降雨量和径流量的 5 a 和 9 a 滑动平均,同时根据小波变换的原理对降雨量和径流量的变换周期和趋势进行分析。由于对时间序列数据进行小波分析时,数据起点和终点域内相对应的变换会产生歪曲,因此采用对称延伸法延长距平后的数据长度,得到长度为原序列 3 倍的数据序列,但是只取小波变换后原始时段内的小波系数,以此消除边界效应影响。

1.2 研究方法

(1) 小波分析原理。小波函数是指具有震荡特性、能够迅速衰减到零的一类函数,即 $\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0$ 。目前有很多小波函数可以选用,本文选用 Morlet 小波。通过伸缩和平移构成一族函数系:

$$\phi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad b \in R, a \in R, a \neq 0 \quad (1)$$

式中: $\phi_{a,b}(t)$ ——子小波; a ——尺度因子,反映小波的周期长度; b ——时间因子,反映时间上的平移。

(2) 小波变换。若 $\phi_{a,b}$ 是式 (1) 给出的子小波,对

于时间序列 $f(t) \in L^2(R)$, 其联系小波变换定义为

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

式中: $\psi(t)$ —— $\phi(t)$ 的复共轭函数; $W_f(a, b)$ ——小波系数。

$W_f(a, b)$ 随参数 a 和 b 变化, 可以作出以 b 为横坐标, a 为纵坐标的关于 $W_f(a, b)$ 的二维等值线图。通过该图可以得到关于时间序列变化的小波特征。不同时间尺度下的小波系数可以反映系统在该时间尺度下的变化特征。通过对小波系数进行分析, 可以识别年降雨量和径流量时间序列的多时间尺度周期性和突变性。

1.3 小波方差

将时间域上关于 a 的所有小波系数的平方进行积分, 即为小波方差

$$Var(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (3)$$

小波方差随尺度 a 变化过程称小波方差图, 反映了波动能量随尺度的分布, 可以用来确定一个时间序列中存在的主要时间尺度(主周期)。

本研究选用 Morlet 小波作为母函数对距平处理后的降雨量和径流量进行小波变化, 其方程为

$$\psi(t) = e^{-t^2/2} e^{j\omega_0 t} \quad (4)$$

Morlet 小波为复数小波, 其小波变换的实部和模平方是两个重要的变量。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, 模平方大小表示特征时间尺度能量的强弱。为减小资料两端的影响, 采用数据反摺的方法, 外延资料两端的数据。

2 结果和分析

2.1 北盘江流域 45 a 降雨量和径流量变化趋势分析

北盘江流域 1956—2000 年降雨量和径流量的平均值分别为 1 255.0 mm 和 605.2 mm, 总体来看水资源比较丰富。变异系数可以反映变量的变异程度, 通常认为 $C_v < 0.1$ 为弱变异; $0.1 < C_v \leq 1$ 为中等程度的变异; $C_v > 1$ 为强变异性, 从表 1 可以发现在这 45 a 中降雨量和径流量均为中等程度的变异。趋势系数 r 可以反映降雨量和径流量长期变化的方向和程度, 若趋势系数 r 为正, 表示研究对象有线性增加的趋势, 反之, 有减少的趋势, r 绝对值的大小反映增加或减少的快慢程度。本研究中降雨量的趋势系数为 0.11, 径流量的趋势系数为 0.35, 即径流量在这 45 a 中增加的速率大于降雨量。径流增加速度大于降雨增加的速度主要是由于该流域水资源利用率低、植被减少、水土流失加剧、城镇化等造成下垫面条件变化, 不仅对降雨的拦截减少而且间接减小了流域的蒸

散发,从而引起流域径流的增加。

为了研究降雨量和径流量的演变趋势,对北盘江流域 45 a 夏季降雨量和径流量的序列做距平处理 (图 1),并在距平序列的基础上做 5, 9 a 平滑曲线,5 a 平滑曲线可以滤掉高频分量,9 a 平滑可以滤掉年际振荡,更方便观察其年代际变化规律。从图中可以看出降雨量和径流量的变化具有明显的阶段性,且两者变化趋势相似,另外 5 a 平滑曲线表现出来与 9 a 平滑曲线较为吻合。从 9 年滑动平均来看,在 1963 年以前降雨量偏少,1963– 1984 年降雨量较丰富,1985– 1993 年降雨量又开始减少,1993 年以后降雨

偏多。在 1964 年以前径流量偏少,1964– 1968 年径流量略高于平均水平,1969– 1978 年径流量较偏少,1979– 1984 年径流量偏多,1985– 1992 年径流量又开始减少,1993 年以后径流量又开始增加。1993 年以后径流增加的幅度明显大于降雨增加的幅度主要是由于这一时期植被减少和水土流失加剧所致。

表 1 1956– 2000 年北盘江流域年降雨量和径流量统计特征

项目	平均 值/mm	最大 值/mm	最小 值/mm	变异 系数 C_v	趋势 系数 r
降雨量	1255.0	1526.5	886.0	0.13	0.11
径流量	605.2	923.7	272.3	0.26	0.35

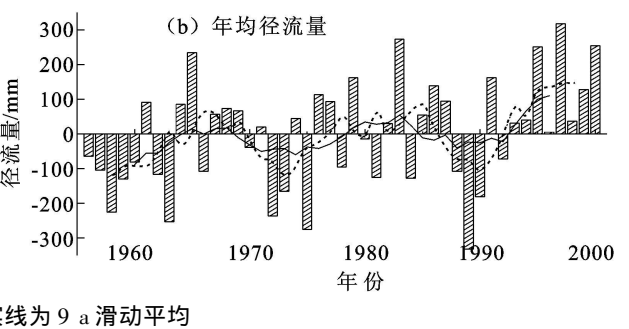
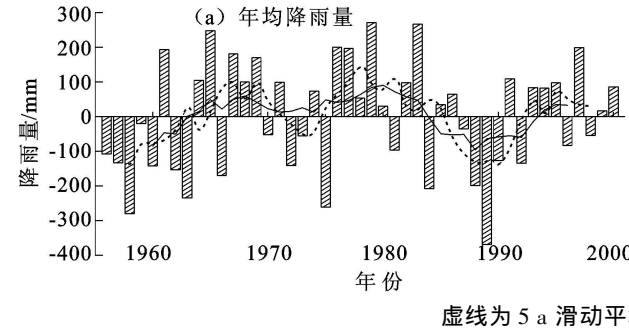
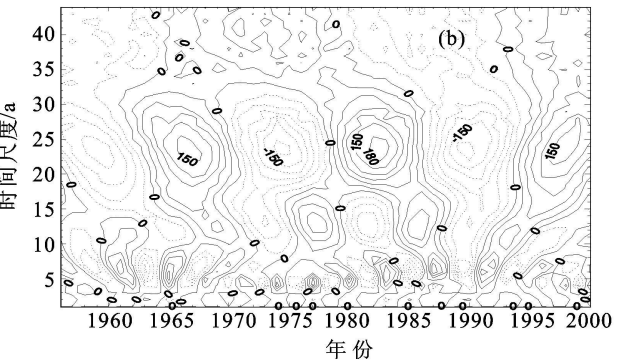
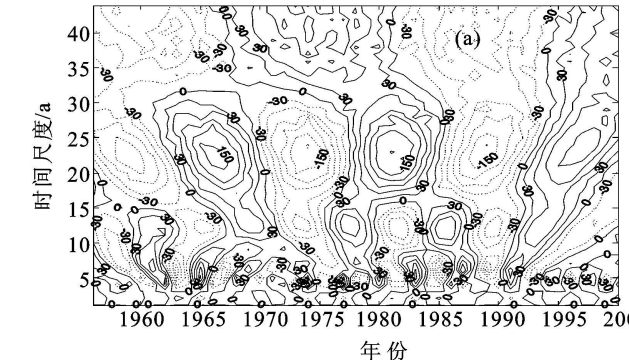


图 1 1956– 2000 年北盘江流域年均降雨量和径流量距平曲线

2.2 北盘江流域 45 a 降雨和径流量多时间尺度分析
采用 Morlet 小波对北盘江流域年降雨量和径流量进行连续小波变换,可以得到小波变换系数的实部、虚部、模平方和位相等信息,通过对小波系数实部和模平方的分析,可以揭示降雨和径流变化的多时间尺度结构。

系数实部的时频结构图,小波系数实部为正时表示降雨量偏多,图中用实线绘出;为负时表示降雨量偏少,图中用虚线绘出。从小波系数实部的时频结构图可以看出不同时间尺度下的丰枯位相结构,表明不同时间尺度所对应的降雨和径流丰枯变化是不同的,较大时间尺度的复杂丰枯结构下嵌套较小尺度的丰枯变化。

图 2(a) 和 (b) 为年降雨量和天然年径流量小波



(a) 年均降雨量 (b) 年均径流量

图 2 北盘江流域年均降雨量和径流量 Morlet 小波变换实部时频图

从图 2(a) 和 (b) 中可以看出降雨和径流存在明显的年际和年代变化。降雨量的变化周期大致为 45, 23, 12, 5 a, 径流量的变化周期大致为 40, 24, 13, 6 a。从较大尺度 45 a 分析,降雨出现丰枯变化的两次振荡,具体表现为:1964 年以前偏枯,1964– 1980 年偏丰,1981– 1992 年偏枯,1993 年再次进入丰水年,在 2000 年等值线仍未闭合,表示 2000 年以后一段时

间内仍为丰水年。从 23 a 尺度分析,降雨出现丰枯变化的 3 次振荡,具体表现为:1962 年以前偏枯,1963– 1970 年偏丰,1971– 1977 年偏枯,1978– 1985 年偏丰,1986– 1992 年偏枯,1993 年再次进入丰水年。23 a 尺度的周期变化在整个分析时段表现得非常稳定,具有全局性。12 a 尺度的周期变化主要在 80 年代和 90 年代表现活跃。5 a 尺度的周期变化主

要在 60–80 年代表现活跃。从图 2(b) 可以看出北盘江流域径流量和降雨量在时域和频域上的变化趋势相似, 说明北盘江流域降雨量和径流量的变化周期具有一定的同步性。虽然 1993 年以后径流增加的速度大于降雨增加的速度主要是由于植被减少、水土流失加剧和城镇化等原因引起, 但从研究的整个时间尺度看人类活动对该流域的影响较小。

小波系数的模值表示能量密度, 模值图把各种时

间尺度的周期变化在时间域中的分布情况展示处理, 小波系数的模值越大, 表明其所对应的时段和尺度的周期性越明显。小波系数的模平方相当于小波能量谱, 所以从小波系数模值图和模平方图可以分析出不同周期的振荡能量。从图 3 和图 4 中可以看出降雨量 23 a 尺度周期变换最为明显, 模值和模平方最大, 能量最强, 径流量 24 a 尺度周期变换最为明显, 模值和模平方最大, 能量最强。

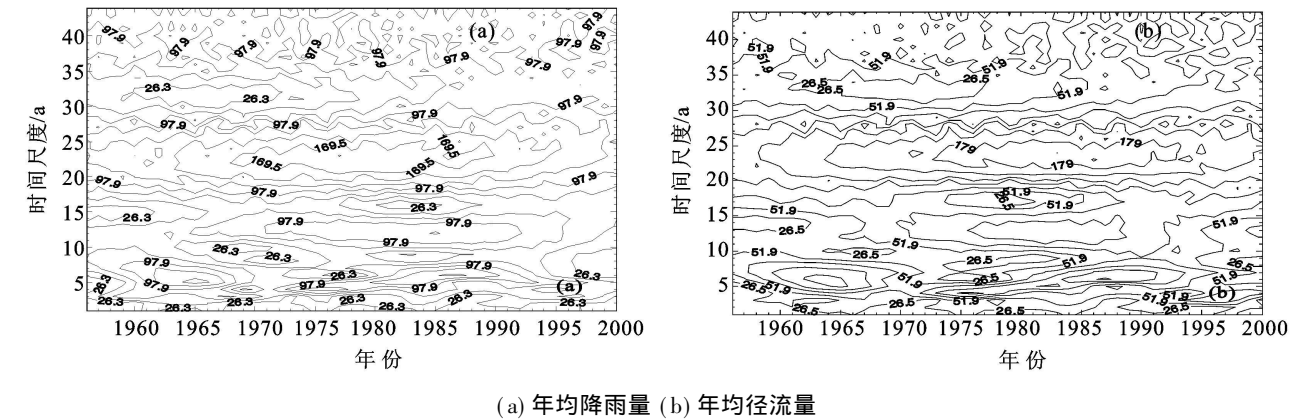


图 3 北盘江流域年均降雨量和径流量 Morlet 小波变换模值时频图

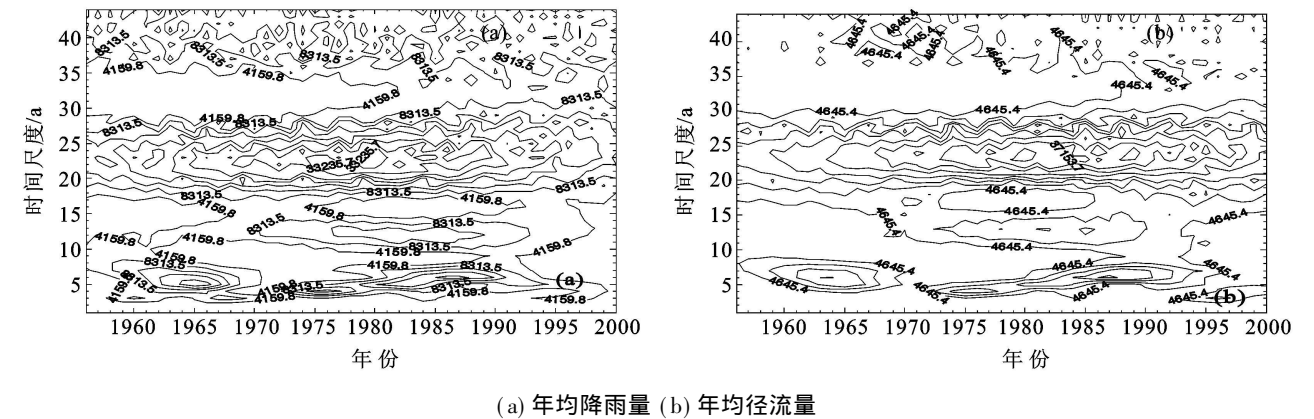


图 4 北盘江流域年均降雨量和径流量 Morlet 小波变换模平方时频图

2.3 小波方差检验

通过以上分析得出了北盘江流域降雨量和径流量的周期范围及强弱, 此外还需要用小波方差对主周期进行检验, 图 5(a) 和(b) 是降雨量和径流量的小波方差图, 从图中可知北盘江流域降雨量小波方差图存

在 4 个峰值, 第一主周期是 23 a, 说明 23 a 左右的周期振荡最强, 其次是 45, 5, 12 a 的主周期。径流量小波方差图也存在 4 个峰值, 第一主周期是 24 a, 说明 24 a 左右的周期振荡最强, 其次是 6, 13, 40 a 的主周期。

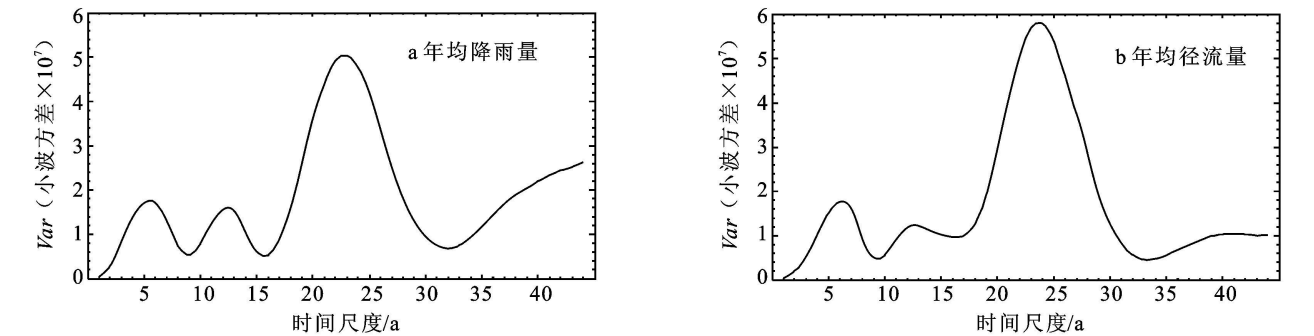


图 5 小波方差图

目前研究认为水文序列的周期变化与天体运动规律和太阳黑子活动强弱变化中的短波有关。22 a 左右的变化过程为海尔周期, 11 a 左右为太阳黑子周期, 5~6 a 左右为太阳双振动周期, 它们都由太阳活动引起, 因此可以认为北盘江流域降雨量和径流量的变化周期与太阳活动有关。

3 结论

通过对北盘江流域 1956–2000 年年均降雨量和年均径流量时间序列进行分析可以得出以下结论:

(1) 北盘江流域 1956–2000 年降雨量和径流量的变异系数分布为 0.13 和 0.26, 即降雨量和径流量均具有中等程度的变异。同时, 趋势系数 r 分别为 0.11 和 0.35, 即径流量的增加速率大于降雨量。

(2) 对 1956–2000 年北盘江流域降雨量和径流量进行小波分析, 研究表明降雨和径流存在明显的年际和年代变化, 且降雨量和径流量的变化周期具有同步性。

(3) 降雨量的主周期依次为 23, 45, 5, 12, 23 a 尺度的周期具有全局性; 径流量的变化周期大致为 24, 6, 13, 40, 24 a 尺度的周期具有全局性。

参考文献:

- [1] 王文圣, 丁晶, 向红莲, 等. 小波分析在水文学中的应用研究及展望[J]. 水科学进展, 2002, 13(4): 515–520.
- [2] 胡昌华, 张军波, 夏军, 等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计: 小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999: 1–68.
- [3] 董长虹. Matlab 小波分析工具箱原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 19–29.
- [4] Donald H B, Mohamed A, Elnur H. Detection of hydrologic trends and variability[J]. Journal of Hydro-

logy, 2002, 255: 107–122.

- [5] Andreo B, Jimenez P, Duran J J, et al. Climatic and hydrological variations during the last 117~166 years in the south of the Iberian Peninsula, from spectral and correlation analyses and continuous wavelet analyses[J]. Hydrological Processes, 2003, 17: 2913–2928.
- [6] 刘俊萍, 田峰巍, 黄强, 等. 基于小波分析的黄河河川径流变化规律研究[J]. 自然科学进展, 2003, 13(4): 383–387.
- [7] 王钧, 蒙古军. 黑河流域近 60 年来径流量变化及其影响因素[J]. 地理科学, 2008, 28(1): 83–88.
- [8] 蒋艳, 夏军. 塔里木河流域径流变化特征及其对气候变化的响应[J]. 资源科学, 2007, 29(3): 45–52.
- [9] 杨建平, 丁永建, 陈仁升. 长江黄河源区水文和气象序列周期变化分析[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 351–355.
- [10] 张少文, 丁晶, 廖杰, 等. 基于小波的黄河上游天然年径流变化特征分析[J]. 四川大学学报, 2004, 36(3): 32–37.
- [11] 张代青, 高军省. 基于小波分析的黄河上游径流变化周期研究[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(3): 75–78.
- [12] 衡彤, 王文圣, 丁晶. 降水量时间序列变化的小波特征[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(5): 466–470.
- [13] 杨志峰, 李春晖. 黄河流域天然径流量突变性与周期性特征[J]. 山地学报, 2004, 22(2): 140–146.
- [14] 卢晓宁, 邓伟, 张树清, 等. 霍林河中游径流量序列的多时间尺度特征及其效应分析[J]. 自然资源学报, 2006, 21(5): 819–826.
- [15] 秦中, 张捷, 王腊春. 北盘江流域水土流失及石漠化调控[J]. 中国岩溶, 2005, 24(1): 51–55.
- [16] 陈文贵. 南北盘江流域水土流失危害与防治对策[J]. 水土保持研究, 2000, 7(3): 101–103.
- [17] 龙健. 贵州喀斯特地区土壤障碍因素分析及其调控对策[J]. 土壤通报, 2005, 36(5): 795–798.
- [18] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 657–666.

(上接第 29 页)

- [7] 蓝永超, 丁永建, 沈永平, 等. 气候变化对黄河上游水资源系统影响的研究进展[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(3): 122–125.
- [8] 曹玲, 窦永祥, 张德玉. 气候变化对黑河流域生态环境的影响[J]. 干旱气象, 2003, 21(4): 45–49.
- [9] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245–259.
- [10] Kendall M G. Rank Correlation Measures[M]. London: Charles Griffin, 1975.
- [11] 于延胜, 陈兴伟. R/S 和 Mann-Kendall 法综合分析水文时间序列未来的趋势特征[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2008, 19(3): 41–44.
- [12] Demaree G R, Nicolis C. Onset of Sahelian drought

viewed as a fluctuation-induced transition[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1990, 116: 221–238.

- [13] 于淑秋, 林学椿, 徐祥德. 我国西北地区近 50 年降水和温度的变化[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(1): 9–18.
- [14] 陈少勇, 郭江勇, 郭忠祥, 等. 中国西北干旱半干旱区年平均气温的时空变化规律分析[J]. 干旱区地理, 2009, 32(3): 364–372.
- [15] 杨明金, 张勃, 王海青, 等. 黑河流域 1950–2004 年出山径流变化规律分析[J]. 资源科学, 2009, 31(3): 413–419.
- [16] 蔡树香. 黑河干流来水量演变趋势浅析[J]. 甘肃水利水电技术, 2009, 45(10): 4–6.