

# 西北内陆县域气候变化及其对河川径流的影响

操信春<sup>1,2</sup>, 吴普特<sup>1,2,3</sup>, 郝仕龙<sup>2,4</sup>, 赵西宁<sup>1,2,3</sup>

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 陕西 杨陵 712100; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 4. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨陵 712100)

**摘 要:** 根据民乐县及祁连县气象站点 1958–2008 年气温、降水资料, 结合民乐县历年水文数据, 利用 Mann–Kendall 秩相关分析法等方法分析了民乐、祁连县 1958–2008 年气温、降水和民乐地表径流量的变化, 在建立定量化关系的基础上研究了气候变化对民乐县地表径流的影响并对未来径流量做出预测。研究表明, 气温的变化可分为基准期 (1958–1986 年) 和增温期 (1987–2008 年), 后者增温速率达  $0.62\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ , 且全年各季度整体增加; 降水量总体上呈上升趋势, 增幅为  $19.5\text{ mm}/10\text{ a}$ , 突变年 (1978 年) 后降水量的波动性增大; 历年降水量有减少趋势, 受气候变化影响, 径流量的年际变化增大, 气温与降水对径流变化的贡献相反。未来径流量还有减小的趋势, 对此, 提出了调整产业和种植结构、节水灌溉、综合利用水资源等措施以应对。

**关键词:** 县域; 气候变化; 河川径流; 预测

中图分类号: P467; P332.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)05-0026-04

## Impacts of Climate Change on the River Runoff in Intra county of Northwest Interior Region

CAO Xin-chun<sup>1,2</sup>, WU Pu-te<sup>1,2,3</sup>, HAO Shi-long<sup>2,4</sup>, ZHAO Xi-ning<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation at Yangling, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Using the Mann-Kendall rank correlation analysis method to analyze the changes of temperature, rainfall and the runoff in Minle county, first, we established the quantitative relationships of the climate changing and the changes in surface runoff, and based on which we predict the runoff of the river in future. The results showed that: the climate changing time can be divided into two stages, the base period (1958–1986) and the warming period (1987–2008). The warming speeds of the latter periods is  $0.62\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ , and increased all over the year-round. The general trend of upward, the rate of increase is  $19.5\text{ mm}/10\text{ a}$ , the volatility of the precipitation is increasing since the mutation year (1978), there is a decrease trends in precipitation over the years, the annual changes in precipitation is increased, just owing to the climate changing. On the contrary, the contribution of the rainfall to the runoff was different. The trends of the runoff in future will be reduced. Moreover, we proposed several measures as the response to this matter, including make adjustment to the industries and cropping pattern, use water saving irrigation, make full use of the water resources and so on.

**Key words:** intra county; climate change; river runoff; prediction

以增温为特征的全球气候变化已成为不争的事实<sup>[1-2]</sup>。近百年来全球平均气温增温为  $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 近五十年我国年平均气温增加  $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 增温速率为

$0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ <sup>[3]</sup>。增暖最明显的地区包括东北、华北、西北和青藏高原北部<sup>[4]</sup>。气候变化引发的水资源问题影响着人类社会, 威胁生态系统和社会经济发展的

收稿日期: 2010-06-19

资助项目: 国家自然科学基金项目 (40701092); 国家 863 计划项目 (2006AA100217); 国家科技支撑计划 (2007BAD88B10)

作者简介: 操信春 (1986–), 男, 江西鄱阳人, 硕博连读研究生, 研究方向: 农业水土资源管理。E-mail: caoxinchun@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 吴普特 (1963–), 男, 陕西武功人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 节水农业、水土保持。E-mail: gjzwpt@vip.sina.com

安全,区域性气候变化及其对当地水文水资源的影响日益成为人们关注与研究的热点<sup>[57]</sup>。

黑河流域地处我国西北内陆干旱区,黑河为我国第二大内陆河,是河西走廊绿洲的支柱,也是防御北部沙漠入侵的屏障。水资源是制约区域农业、经济、社会和生态可持续发展的主要因素,由于气候变化以及人口增长和社会经济的发展,黑河流域各地区及各部门的用水量急剧增加,水资源供需矛盾日益突出<sup>[8]</sup>。黑河流域气候变化特征及其对水文水资源的影响是当地经济社会发展战略决策的依据。研究县域气候变化的水文效应具有重要的意义,为当地经济社会发展提供科学依据。

## 1 区域概况及数据来源

### 1.1 区域概况

甘肃省民乐县地处河西走廊中段,祁连山北麓,张掖市东南部,黑河流域上游,位于东经  $100^{\circ}22'59''$  -  $101^{\circ}13'9''$ ,北纬  $37^{\circ}56'19''$  -  $38^{\circ}48'17''$ 。年平均气温  $1.8\sim 5.2^{\circ}\text{C}$ ,多年平均降水量  $340\text{ mm}$  左右,蒸发量  $1\,638\text{ mm}$ ,属大陆性荒漠草原气候。县境内发源于青海省祁连县祁连山北坡的苏油口河、大堵麻河、海潮坝河、洪水河和童子坝河的平均年径流量之和约  $3.601\text{ 亿 m}^3$ ,约占全县地表水资源总量的  $87\%$ 。

### 1.2 数据来源

民乐县和祁连县 1958–2008 年逐年降雨总量、年平均气温以及 1982 年 1 月至 2008 年 12 月年的逐月平均气温资料。1958–2008 年苏油口河、大堵麻河、海潮坝河、洪水河及童子坝河历年径流总量。

## 2 分析方法

气温数据取民乐、祁连两站的平均值,径流值为以上五条河流年径流量的总和。

### 2.1 Mann–Kendall 秩相关分析法

年平均气温、年降水量及年径流量的变化趋势和突变点分析采用 Mann–Kendall 秩相关分析法<sup>[9-10]</sup>进行统计分析。该方法是一种非参数统计检验方法,这一方法的核心是通过统计学方法检验时间序列要素均值变化的确切时间来确定跃变变化的确切时间。

Mann–Kendall 法的分析原理为<sup>[11]</sup>:给定信度值  $\alpha$ ,  $X_i(t=1, 2, \dots)$  为一时间序列,先确定其序列的对偶数( $X_i < X_j$ ,  $i, j=1, 2, \dots$ )的个数  $p$ ,再确定  $Var(\lambda)$  和  $U$ ,公式如下:

$$\lambda = \frac{4p}{n(n-1)-1}; Var(\lambda) = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)}; U = \frac{\lambda}{\sqrt{Var(\lambda)}} \quad (1)$$

所有的  $U$  值组成一条曲线  $U_1$  (实线),如果

$U_1 > 0$ ,表明有上升趋势,  $U_1 < 0$  则表明有下降的趋势。本文中  $\alpha=0.05$ ,当  $|U| > U_{0.05/2} = 1.96$  时,表示变化趋势显著。把此法用于时间序列数据的反序列中,可得另一曲线  $U_2$  (虚线),如果曲线  $U_1$  和  $U_2$  的交叉点位于信度线之间,则认为是突变的开始<sup>[12]</sup>。

### 2.2 多元线性拟合

气候要素对河川径流有重要的影响,降水可以直接补给径流,径流量对降水的增减变化较敏感;温度的变化会影响蒸发、冰川融化等因素,从而影响径流量。气候变化径流量的影响及预测用多元线性拟合的方法。基准期历年年均气温及降水量与径流量拟合成一个多元线性回归方程:

$$Q = a_0 + a_1P + a_2T \quad (2)$$

式中:  $Q$ ——径流量;  $P$ ——降水量;  $T$ ——年均气温;  $a_0, a_1, a_2$  为回归系数。

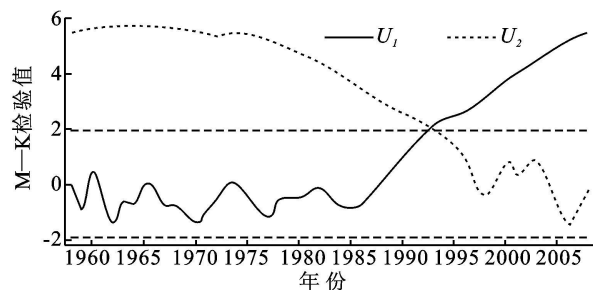
由此方程可得出历年径流的计算值,通过计算值与实测值的比较,可以看出气候变化对河川径流的影响方式及程度。1959–2008 年的每隔 5 a 的气温、降水和径流取平均值得到 10 组数据,再以气温、降水为自变量进行多元线性回归。利用回归关系式,在每 5 a 的平均气温、降水符合当前线性变化趋势的条件下预测未来 5, 10, 15, 20, 25 a 中每 5 a 内的径流量平均值。

## 3 结果与分析

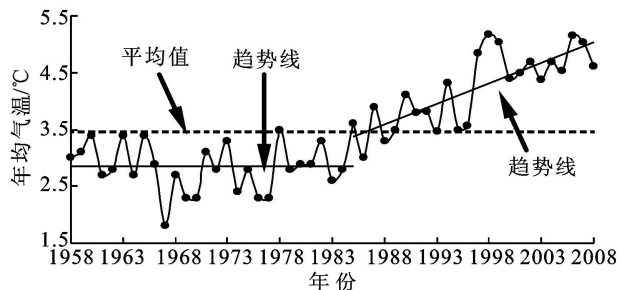
### 3.1 气候变化

3.1.1 气温变化 年均气温的分析结果如图 1。由 Mann–Kendall 法分析结果(图 1a)可以看出:气温的跃变开始于 1986 年左右(跃变点根据积累曲线的转折点再做  $t$  检验来确定),与整个西北地区的情况相类似<sup>[13]</sup>;年均气温变化过程按时间可分为随机微弱增减但总体保持平稳的基准期(1958–1986 年)和年均气温增加较明显的增温期(1987–2008 年);增温期内的 1993–2008 年达到 0.05 信度的显著性水平。

该区域的多年气温平均值为  $2.24^{\circ}\text{C}$ ,基准期的年均气温值几乎全部(仅 1978 年值略大于平均值,为  $2.33^{\circ}\text{C}$ )小于历年的平均值,而增温期基本与基准期相反(图 1b)。基准期年均气温的平均值为  $1.75^{\circ}\text{C}$ ,增长期为  $2.89^{\circ}\text{C}$ ,后者较前者高出  $65.1\%$ 。线性拟合得出,基准期的温度增长率为  $0.01^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,可认为基本没有变化;增温期为  $0.62^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,增温显著;1958–2008 年的温度增长率为  $0.37^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,大于全国 1951–2004 年的升温速度( $0.25^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ),也略大于整个西北干旱半干旱区 1961–2006 年间的  $0.34^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ <sup>[14]</sup>。2002 年的年平均气温为 51 a 来的最大值,达  $3.72^{\circ}\text{C}$ ,1998 年次之,为  $3.68^{\circ}\text{C}$ 。



(a) Mann-Kendall 分析图



(b) 趋势图

图 1 年平均气温分析

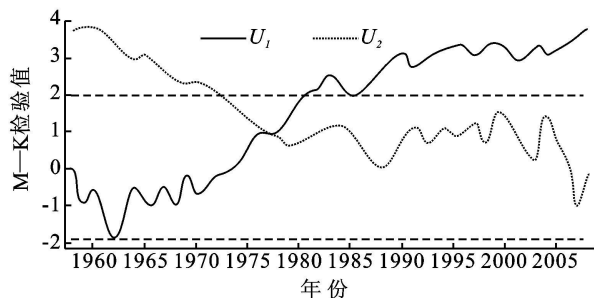
将 3–5 月划分为春季, 6–8 月为夏季, 9–11 月为秋季, 12 月至次年 2 月为冬季(下同), 由计算得出增温期(1987–2008 年)的季平均气温增加速率分别为 0.98, 0.93, 0.56, 0.48℃/10 a。说明各季平均气温均呈整体上升趋势; 春季和夏季的增温速率相当且都大于年平均气温增加速率, 冬季的增温速率最小; 年平均气温的升高以春季和夏季的贡献最大。

民乐站与祁连站 51 a 来年均变化趋势有良好的一致性, 民乐站的基准期、增温期和全序列的气温倾向率分别为 -0.07, 0.68, 0.47℃/10 a, 祁连站的为 -0.03, 0.53, 0.26℃/10 a。

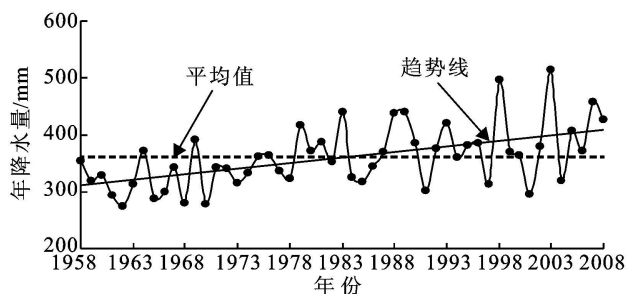
3.1.2 降水变化情况 民乐站和祁连站 1958–2008 年的年降水量平均值序列数据的 Mann-Kendall 法突

变分析结果如图 2a。分析表明: 在 95% 信度水平下, 年降水量经历了先减小后增加的过程, 前期的减小趋势并不明显, 且整体上呈增加趋势; 降水量增加的趋势开始于 1974 年左右并且在 1978 年发生突变, 突变年份前后的平均年降水值分别为 326.1 mm 和 382.3 mm。

区域的平均年降水量为 360.2 mm, 线性拟合出的增长速度为 19.5 mm/10 a; 突变年(1978 年)后的波动性与之相比, 有增大的迹象(图 2b); 从年代上看, 60–90 年代的平均值分别为 318.0, 340.9, 378.6, 379.3 mm, 21 世纪前 9 年的平均值为 392.5 mm, 后者较前者均有上升趋势; 年均降水量的最小值、最大值分别出现在 1962 年及 2003 年, 为 273.4, 513.7 mm。



(a) Mann-Kendall 分析图



(b) 趋势图

图 2 降水量分析

### 3.2 气候变化对河川径流的影响

径流量经历了下降–增长–下降的过程, 但前期的增长和下降的趋势都不明显(图 3); 增长期(1978–1992 年)内的 1990 年附近有一个突变点, 随即又进入了不间断的下降期; 2001 年以后减小的趋势显著。

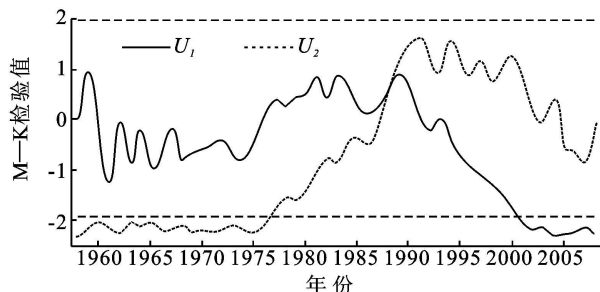


图 3 历年径流量 Mann-Kendall 法分析图

五条河流年径流总和的平均值为 3.601 亿  $\text{m}^3$ , 年际间的波动较大, 但整体上呈下降的趋势, 这与黑河干流莺落峡站 1950–2004 年径流量的变化趋势相反<sup>[15]</sup>; 最大值和最小值分别出现在 1989 年和 2001 年, 为 5.861, 2.181 亿  $\text{m}^3$ ; 1994–2008 年减小的趋势较明显, 期间只有 2003 年和 2007 年的径流量略大于历年平均值。年净流量的减小和来水量的不确定性给当地农业生产、生态维护及水资源的综合管理带来挑战。分析数据发现, 1963–1982 年 20 a 间的气温、降水与径流量的线性相关性较强, 利用多元线性回归法(处理中, 为了统一数量级, 降水量的单位以 dm 计)可以得出如下方程:

$$Q = 2.1931 + 0.7969P - 0.6445T \quad (3)$$

$$R^2 = 0.8105$$

将历年降水、年均气温数据代入公式(4)中可得出历年径流量的计算值;计算值与实测值年际间的增、减趋势基本一致(图4);1980年代中期以后,计算值的年际波动性明显小于实测值。

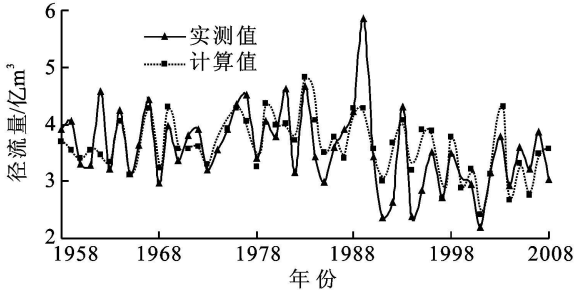


图4 径流量实测值与计算值比较

降水、气温的增加对径流变化的贡献正好相反(公式3),它们综合对径流的影响视各自变化的程度而定。1983年的径流量、降水量都为1958年以来的最大值,气温为1958年以来的最小值之一;1989年的气温为历年的平均水平,而1988年、1989年的降水量分别为439.0、440.4 mm,且黑河流域的流量受前一年10月以来的降水量影响<sup>[16]</sup>,导致1989年突然出现了一个流量高出历年平均值62.8%大值;2001年是径流量最小的年份,也是径流量显著减少的起点,该年的降水量为近30a来的最小值,年均气温达3.3℃,1958年以来仅小于1998年、1999年。所以,径流量的极值对降水的变化较敏感,气温对径流量的影响更加复杂,且气温的稳步升高和降水的波动性增大导致径流的跳跃性减少。

分别求出1959–2008年间每5a的平均气温、降水及径流量值,得出三者关系的回归方程为

$$Q = 3.4531 + 0.3948P - 0.5838T \quad (4)$$

$$R^2 = 0.8579$$

在每5a的平均气温、降水变化符合当前线性趋势的前提下,利用公式(4)可以预测出2009–2013年、2014–2018年、2019–2023年、2024–2028年、2029–2033年间平均年径流量分别为3.160、3.088、3.016、2.945、2.873亿m<sup>3</sup>,分别为历年平均值的87.8%、85.6%、83.8%、81.8%、79.8%,仅为1979–1983年平均值的78.0%、76.2%、74.4%、72.7%、70.9%。由于河川径流量的年际波动较大且将来河川径流量有逐渐减少趋势的可能,可以采取以下应对措施:调整产业结构,加大工业发展力度,减少高耗水农业的比例;调整农作物种植结构,适当减少粮食作物、增加低耗水经济作物的种植面积;推行节水灌溉技术,高效利用灌溉水;宣传节水理念,使当地民众增

强节水意识;分质供水,提高水的重复利用率。总之,应提高水资源的综合管理水平,使有限的水资源最大限度地发挥作用。

## 4 结论

(1) 1958–2008年黑河流域上游民乐–祁连境内气候的变化表现为年均气温升高和年降水量增多。年平均气温序列数据可分为两个阶段,分别是基准期1958–1986年和增温期1987–2008年;气温在1987年发生跃变且1993年后增长显著;与基准期相比,增长期内的平均气温上升了65.1%,增幅达1.14℃;全年各季度气温呈整体上升趋势,春季和夏季的贡献最大。年降水量的跃变发生在80年代中期,51a间的增加速率为19.5 mm/10a;80年代中期以后,年际波动性增大。

(2) 气候变化与河川径流变化的关系密切,1958–2008年间民乐县河川径流量整体上呈减少趋势,气候变化期年际来水的波动性增大;降水对河川径流的敏感性大于气温;降水、气温的增加对径流变化的贡献正好相反;区域气温的稳步升高和降水的波动性增大导致径流的跳跃性减少。

(3) 在未来每5a的平均气温、降水按当前线性趋势变化的前提下,预计从2009–2013开始后的每个五年内民乐县河川径流量将会减少为1958–2008年平均值的87.8%、85.6%、83.8%、81.8%和79.8%。而且,每一年的具体来水量难以估计。对此,调整产业结构和农作物的种植结构、节水灌溉、增强节水意识、分质供水等,可作为应对当地地表水资源变化的有效措施。

## 参考文献:

- [1] IPCC. Summary for Policymakers of the Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report [M]. Cambridge, U K: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 秦大河, 陈振林, 罗勇, 等. 气候变化科学的最新认知 [J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(2): 63–73.
- [3] 丁一汇, 任国玉, 石广玉. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势 [J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(增刊): 1–5.
- [4] 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 中国气温变化研究最新进展 [J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 701–716.
- [5] 高建芳, 骆光晓. 气候变化对新疆哈密地区河川径流的影响分析 [J]. 冰川冻土, 2009, 31(4): 748–757.
- [6] 姚允龙, 吕宪国, 王蕾. 气候变化对挠力河径流量的影响 [J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2009(3): 153–159.

(下转第34页)

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.