

南水北调西线工程引水区气候变化趋势

黄晓荣^{a,b}, 柴雪蕊^b, 杨鹏鹏^b, 赵静薇^b

(四川大学 a. 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室; b. 水利水电学院, 成都 610065)

摘要:以南水北调西线工程引水区及邻近地区共13个气象站近60年的降雨、温度、日照时数、平均风速、平均湿度、平均水汽压资料为基础,分别运用Mann-Kendall法、Hurst系数法和小波方法对气象系列进行趋势、持续性和周期性分析。结果表明:各气象站温度年序列均呈显著上升趋势,而四季中的冬季上升尤为明显;降雨年序列92%的站点呈不明显上升趋势,但在春季上升显著;日照年序列64%的站点呈下降趋势。在空间分布上,气候因子趋势显著的站点多集中在河源段。各气象因子的Hurst系数均大于0.5,说明系列正持续性效应明显,未来变化趋势与过去基本一致。此外,各气象因子序列具有较明显的6~18年震荡周期。

关键词:气候变化;趋势;Mann-Kendall;Hurst系数;时空特性

中图分类号: P461 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2014)03-0005-05

Climate Change Trend Analysis in Western Route of South-to-North Water Diversion Project

HUANG Xiaorong^{a,b}, CHAI Xuerui^b, YANG Pengpeng^b, ZHAO Jingwei^b

(a. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
b. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Based on the precipitation, temperature, sunshine duration, mean wind speed, average relative humidity, and average vapor pressure data at 13 meteorological stations in the Western Route of South-to-North Water Diversion Project and adjacent regions over the past 60 years, the Mann-Kendall test, Hurst coefficient method, and wavelet method were used to perform the trend, continuity, and periodicity analysis on these meteorological factors. The results indicated that (1) the temperature at each station increases significantly, especially in the winter; (2) annual precipitation at 92% of total stations has an insignificant increasing trend, but precipitation has a significant increasing trend in the spring; and (3) annual sunshine duration at 64% of total stations shows a decreasing trend. Stations that have apparent variation trends of meteorological factors often belong to headwater catchment. Hurst coefficients of meteorological factors are all greater than 0.5, which indicated a positive long-term continuity and that the variation trend in future is similar to that in the past. Moreover, each meteorological factor sequence had an obvious cycle of 6 to 18 years.

Key words: climate change; trend; Mann-Kendall; Hurst coefficient; spatial and temporal characteristics

南水北调西线工程是从长江上游干流金沙江、长江支流雅砻江和大渡河上游筑坝引水至黄河上游,年规划引水170亿 m^3 ,来补充黄河水资源不足,从而解决中国西北和华北地区水资源短缺的问题^[1]。该工程引水区位于青藏高原东南部,平均海拔3000m以上。青藏高原具有独特的水热状况地域组合^[2],是世界第一水源涵养地和“世界第一水塔”^[3]。冯松等^[4]研究表明青藏高原气候变化较我国各地气候变化早,是中国以至世界气候变化的敏感区和启动区,所以青藏高原的气候变化,对全国的气候变化具有指示性的意义。气

候变化及所导致的环境效应是当今世界普遍关注的热点问题,越来越多的学者开始关注研究区域的气候变化对南水北调西线工程调水的影响^[5-7]。一般认为,流域的河川径流量受降雨直接影响,同时还与气温、日照、风速、湿度、水汽压等其他一系列因子密切相关。因此,研究不同气候因子的变化特征,将有助于全面清晰地掌握区域气候变化的情况,也是进一步研究该区域径流对气候变化的响应的重要基础。

1 研究区域概况和数据

南水北调西线引水区位于青藏高原东南部,在北纬

收稿日期: 2013-12-16 修回日期: 2014-01-14 网络出版时间: 2014-05-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.002.html>

基金项目: 四川省科技支撑计划项目(2013SZ0102); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放基金(IWHR-SKI-201207)

作者简介: 黄晓荣(1972-),男,重庆人,副教授,博士,主要从事水文水资源方面研究。E-mail: hxiaorong@scu.edu.cn

31°30′ - 35°30′, 东经 90°30′ - 103°30′ 之间, 包括通天河(金沙江)直门达以上地区, 雅砻江甘孜、道孚以上地区, 以及大渡河的足木足、绰斯甲以上地区, 面积 22 万 km²。其气候特点: 太阳辐射强, 日照时间长; 冬长严寒, 夏短凉爽, 大部分地区平均温度在零下的时间长达 5~8 个月; 冬干夏湿, 降水量由西北向东南递增, 年平均降水量在 300~700 mm 之间。

引水区均是水源区, 植被较好, 人类活动影响小。

本文收集了引水区及邻近地区 13 个气象站的降雨、温度、日照、湿度、水汽压、风速资料(表 1), 其中沱沱河、玉树、石渠、色达、甘孜、道孚、班玛站点在引水区范围, 其余站点属于邻近区域; 降雨、温度、日照资料较齐全, 而湿度、水汽压、风速只有在玉树、达日、甘孜、马尔康、小金有观测资料。

表 1 气象站特征

Table 1 Basic information of meteorological stations

站点	站号	位置		高程 /m	资料年限					
		经度	纬度		降雨	温度	日照	风速	湿度	水汽压
沱沱河	56004	92°26′	34°13′	4 533	1957-2011	1957-2011	1957-2011	-	-	-
玉树	56029	97°01′	33°01′	3 681	1953-2011	1954-2011	1954-2011	1954-2011	1954-2011	1954-2011
玛多	56033	98°13′	34°55′	4 272	1953-2011	1953-2011	-	-	-	-
达日	56046	99°39′	33°45′	3 968	1956-2011	1956-2011	1956-2011	1956-2011	1956-2011	1956-2011
班玛	56151	100°45′	32°56′	3 750	1966-2011	1966-2011	1966-2011	-	-	-
石渠	56038	98°06′	32°59′	4 200	1961-2011	1961-2011	1961-2011	-	-	-
甘孜	56146	100°00′	31°37′	3 394	1951-2011	1952-2011	1953-2011	1952-2011	1952-2011	1952-2011
道孚	56176	101°07′	30°59′	2 957	1958-2011	1958-2011	1958-2011	-	-	-
德格	56144	98°34′	31°44′	3 201	1957-2011	1957-2011	1957-2011	-	-	-
巴塘	56247	99°06′	30°06′	2 589	1969-2011	1969-2011	1969-2011	-	-	-
色达	56152	100°20′	32°17′	3 894	1961-2011	1961-2011	1962-2011	-	-	-
马尔康	56172	102°14′	31°54′	2 664	1954-2011	1954-2011	1954-2011	1954-2011	1954-2011	1954-2011
小金	56178	102°21′	31°06′	2 369	1952-2011	1952-2011	-	1952-2011	1952-2011	1952-2011

2 研究方法

趋势分析是研究气候变化和水文气象时间序列变化规律的重要手段^[8], 水文气象序列趋势研究主要是判断一个水文序列是否存在显著趋势特征和该序列趋势是上升还是下降^[9]。水文气象系列非线性, 不仅存在趋势成分^[10], 而且其时间序列的数值常常出现成组现象, 当其成组的持续时间较长时, 称这种时间序列具有长期相关性^[11](也叫长持续性, 或长记忆性), 如干旱愈久, 愈可能出现持续干旱; 大洪水年过后仍然会有较大洪水。因此, 趋势分析不仅要过去一段时间变量的变化倾向进行判断, 还需要对趋势的持续特性进行分析。本文中序列的趋势研究采用非参数检验 Mann-Kendall 法分析, 序列的持续性研究采用 Hurst 系数法分析, 水文周期性研究则采用小波方法分析, 方法详见参考文献^[11]。

2.1 趋势检验法

Mann-Kendall 检验法是目前水文气象数据趋势分析应用最广的方法之一。其原理是: 假定 X_1, X_2, \dots, X_n 为时间序列变量, n 为时间序列的长度, 则该序列的统计量 S 如下:

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

其中 x_k, x_j 分别为 k, j 年的测量值, 且 $k > j$ 。

$$\text{sgn}(x_k - x_j) = \begin{cases} 1 & x_k - x_j > 0 \\ 0 & x_k - x_j = 0 \\ -1 & x_k - x_j < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\text{var}(S)} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\text{var}(S)} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: Z 为一个正态分布的统计量; $\text{var}(S)$ 为方差。在给定 α 的置信水平上, 如果 $Z > Z_{1-\alpha/2}$, 则拒绝原假设, 即在 α 置信水平上, 时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。其变化趋势的大小用 β 表示, 计算如下:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_k - x_j}{k - j}\right) \quad \forall j < k \quad (4)$$

若 $\beta > 0$, 表示呈上升趋势; 若 $\beta < 0$, 表示呈下降趋势。

本文用 M-K 法分别计算各站不同气象因子春、夏、秋、冬、年平均全系列的 Z 值, 得到了各气象因子在年内、年际变化趋势和空间分布状况。

2.2 持续性分析法

R/S 分析是赫斯特(Hurst)提出的一种时间序列统计方法, 可以反映序列的持续性或随机性。 R/S 检验法, 又称为重标极差分析^[12-14]。其原理如下: 考虑一个时间序列 $\{X(t)\}$, $t = 1, 2, \dots$, 对于任意正整数 $\tau \geq 1$, 定义均值序列:

$$\bar{X}_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} X(t) \quad \tau = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

用 $\xi(t)$ 表示累积离差, 则:

$$\xi(t, \tau) = \sum_{u=1}^t (X(u) - \bar{X}_\tau) \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (6)$$

极差 R 定义为:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} \xi(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} \xi(t, \tau) \quad \tau = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

标准差 S 定义为:

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (X(t) - \bar{X}_\tau)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \tau = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

Mandelbrot 等通过对尼罗河最低水位等自然事件的分析, 证实了 Hurst 的研究, 并提出了更为广泛的指数律, 即:

$$H = \frac{\ln(R/S)}{\ln(n/2)} \quad (9)$$

根据实测资料,通过式(5)至式(9)计算 Hurst 系数 H 。

Hurst 系数 H 的取值范围为 0~1 之间,当 $H = 0.5$ 时,表明一个序列是随机的,序列相关系数为零,过去不会影响未来; $H > 0.5$ 时为正持续性,表示序列过去变化趋势对未来产生同方向的影响(正持续效应),即若序列在前一个期间是向上(下)的趋势,则下一个期间将继续向上(下);若 $0 \leq H < 0.5$,表示序列过去变化趋势对未来产生反方向的影响(反持续效应),即若序列在前一个期间是向上(下)的趋势,则下一个期间将向下(上)。

本文使用降雨、温度、日照、风速、湿度、水汽压的年序列计算了 Hurst 系数,对其时间序列的持续性做了分析判断。

3 结果分析

3.1 趋势分析

对各气象站资料年系列值采用 Mann Kendall 法进行趋势检验分析,结果见表 2、表 3。

表 2 各气象因子趋势分析统计

Table 2 Trend analysis results for several meteorological factors

站点	降雨		温度		日照时数		风速		平均湿度		平均水汽压	
	Z	β	Z	β	Z	β	Z	β	Z	β	Z	β
沱沱河	1.70*	0.99	4.52**	0.03	3.56**	4.9						
玉树	0.26	0.21	4.93**	0.03	1.14	1.08	-1.63	-0.002	-2.23**	-0.07	0.1	0
玛多	2.20**	1.07	4.62**	0.03								
达日	1.19	0.74	5.18**	0.03	2.83**	3.05	-1.34	-0.004	-2.89**	-0.07	2.13**	0.003
班玛	0.30	0.31	4.42**	0.03	-1.34	-1.60						
石渠	-0.22	-0.23	4.39**	0.03	-3.29**	-6.69						
甘孜	0.59	0.28	3.41**	0.02	-2.52**	-3.26	1.08	0.003	-1.10	-0.03	1.76*	0.004
道孚	0.91	0.78	3.08**	0.01	1.46	1.71						
德格	0.13	0.15	4.14**	0.02	-4.49**	-10.07						
巴塘	0.96	1.76	2.20**	0.01	-1.42	-2.01						
色达	0.86	0.61	5.65**	0.03	-3.46**	-3.64						
马尔康	0.95	0.69	2.33**	0.01	-3.15**	-3.12	-3.54**	-0.006	-0.30	-0.01	0.51	0.001
小金	0.13	0.07	3.91**	0.01			-0.86	-0.003	-3.02**	-0.06	-0.18	-0.001

注:“*”和“**”分别表示在 10%、5% 显著水平。

表 3 气象因子趋势及显著性百分比统计

Table 3 Percentages of stations for the trend and significance of all meteorological factors

(%)

季节	降雨		温度		日照时数		平均风速		平均相对湿度		平均水汽压	
	上升	下降	上升	下降	上升	下降	上升	下降	上升	下降	上升	下降
春	10(69)	0(0)	92(75)	8(0)	45(40)	55(67)	40(0)	6(33)	2(0)	80(25)	10(40)	0(0)
夏	7(0)	30(25)	100(92)	0(0)	27(0)	73(63)	40(0)	6(33)	2(0)	80(50)	6(0)	40(0)
秋	4(0)	5(0)	100(77)	0(0)	27(33)	64(43)	40(50)	6(33)	0(0)	10(60)	6(0)	40(0)
冬	7(0)	2(0)	10(100)	0(0)	45(60)	55(17)	20(0)	8(50)	0(0)	10(40)	8(0)	20(0)
年	92(17)	8(0)	10(100)	0(0)	3(50)	64(71)	20(0)	8(25)	0(0)	10(60)	8(50)	20(0)

注:括号中数据为在 10% 的显著水平下趋势显著站点占该趋势站点的百分比。

从表 3 分析结果得知,在过去近 60 年来,各站年平均温度均呈明显上升趋势,达 5% 的显著水平;从年内季节分析,冬季上升最显著,各站均达到 10% 的显著水平。降雨系列除石渠站外,各站年序列均呈上升趋势,但上升趋势不明显;从年内季节分析,春季各站均呈上升趋势,达 10% 显著水平的站点占总数的 69%。年平均日照时数 64% 站点呈下降趋势,尤其在夏季表现突出,下降站点达 73%。在风速、平均湿度和平均水汽压因子方面,由于只有 5 个站点的资料,代表性不强。但总体上风速和平均湿度呈下降趋势,平均水汽压呈上升趋势。以玉树站为例,各气象因子年序列趋势见图 1。

各站点降雨、温度和日照时数的年系列变化趋势的空间分布见图 2。

3.2 持续性及周期性分析

由表 4 可知,13 个气象站的降雨、温度、日照时数、风速、

湿度、水汽压年序列的 Hurst 系数均在 0.5~1 之间,表明各时间序列均具有正持续效应。以玉树站为例,其温度 Hurst 系数最大,达 0.93,降雨 Hurst 系数最小,仅 0.5。由于过去几十年(1954 年-2011 年)玉树站温度呈上升趋势,上升斜率达 0.03,因此未来时间内(2011 年后)玉树站温度也将持续上升。同理,日照时数和平均水汽压未来也将保持以前的上升趋势,风速和温度将保持以前的下降趋势。由于降雨年序列 Hurst 系数等于 0.5,表明序列属于纯随机系列不相关,现在不会影响未来,故未来趋势是上升还下降很难判断。此外,运用小波方法对各气象因子序列进行震荡周期的识别,6~18 年周期最为明显。这说明各气象因子序列变异特性和过去与未来有相同或相反的变化特征,即表现一定的持续性,同时又具有一定的周期性。

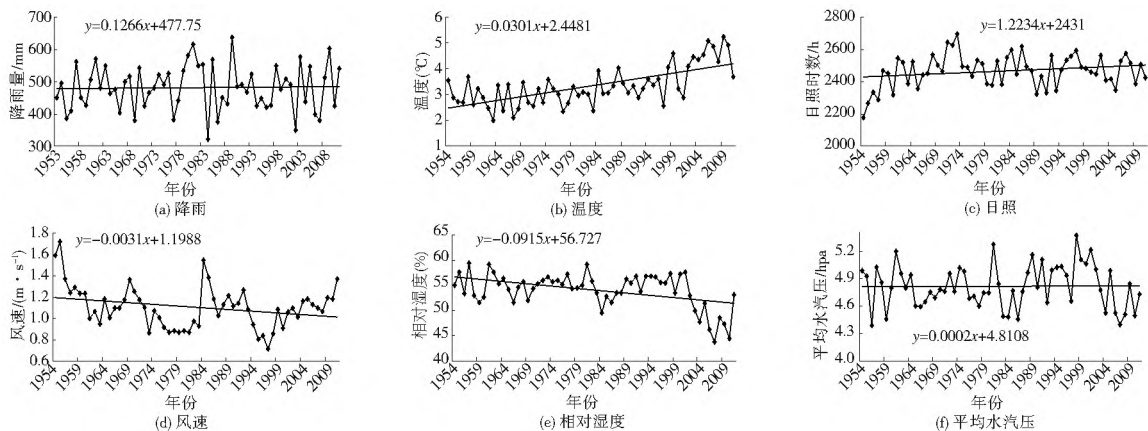


图 1 玉树站各气象因子趋势

Fig. 1 Trends of all meteorological factors at Yushu station

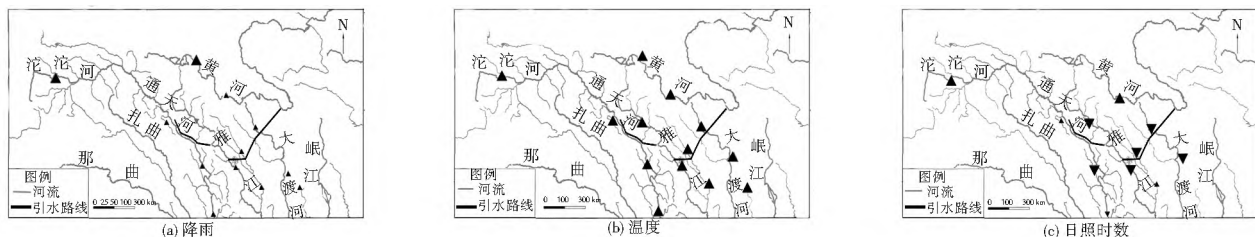


图 2 气象因子趋势分布(三角形朝上表示上升趋势,朝下表示下降趋势;大三角表示达到 10% 的显著水平)

Fig. 2 Trends of three meteorological factors at 13 stations(Up pointing triangles mean increasing trends, down pointing triangles mean decreasing trends, and big triangles mean trends at the 10% significance level)

表 4 站点气象因子 Hurst 系数及周期分析

Table 4 Results of Hurst coefficients and periodicity of various meteorological factors

站点	降雨		温度		日照时数		平均风速		平均相对湿度		平均水汽压	
	Hurst	周期	Hurst	周期	Hurst	周期	Hurst	周期	Hurst	周期	Hurst	周期
沱沱河	0.7	6, 18	0.67	6, 21	0.9	6, 21						
玉树	0.5	6, 15	0.93	9	0.62	6, 18	0.69	21	0.78	12	0.77	6, 18
玛多	0.63	6, 21	0.9	6, 18	-	-						
达日	0.57	9, 18	0.87	15	0.88	6, 18	0.96	21	0.71	9, 15	0.82	12, 30
班玛	0.65	6, 9	0.89	6, 12	0.95	9, 12						
石渠	0.56	12, 21	0.86	9	0.99	9						
甘孜	0.74	9, 24	0.78	9	1	6, 12	0.92	9, 30	0.81	6	0.92	12
道孚	0.64	6, 18	0.77	6, 24	0.86	12						
德格	0.64	18	0.76	6, 21	1	6						
巴塘	0.77	9, 24	0.65	9	0.52	6, 9						
色达	0.54	6, 12	0.96	9, 21	0.81	6, 12						
马尔康	0.53	9, 18	0.72	15	0.95	15	0.98	30	0.9	6	0.85	9, 18
小金	0.7	6, 30	0.84	9, 15	-	-	1	9	0.7	12	0.77	6, 18

4 结论

(1) 采用 Mann-kendall 趋势检验法得出: 在南水北调西线工程引水区, 各站的温度序列均呈显著的上升趋势, 其中冬季的上升趋势最显著; 降雨系列除石渠站外, 92% 站点年序列呈不明显上升趋势, 但在春季上升明显; 年平均日照时数 64% 站点呈下降趋势, 尤其在夏季表现突出, 下降站点达 73%。

(2) 各气象因子年序列的 Hurst 系数数值均大于或等于 0.5, 变量间存在一定的相关性, 序列间的正持续效应明显, 各站点气象因子的未来趋势变化会与现阶段变化保持一致。

但小波分析结果表明, 各因子序列又具有较明显的 6~18 年震荡周期。

参考文献(References):

[1] 李国英. 对南水北调西线工程的认识与评价[J]. 人民黄河, 2001, (10). (LI Guo-ying, Understanding and Evaluation of the Western Route of South to North Water Diversion Project [J]. Yellow River, 2001, (10). (in Chinese))

[2] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 青藏高原高原近 30 年气候变化趋势[J]. 地理学报, 2005, 60(1): 3-10. (WU Shaohong, YIN Yunhe, ZHENG Du, et al. Climate Changes in the Tibetan Plateau

- during the Last Three Decades [J]. Journal of Geographical Sciences 2005, 60(1): 3-10. (in Chinese)
- [3] 莫中国, 张百平, 程维明, 等. 青藏高原的主要环境效应[J]. 地理科学进展, 2004, 23(2): 88-96. (MO Sheng guo, ZHANG Bai ping, CHENG Wei ming, et al. Major Environmental Effects of the Tibetan Plateau [J]. Progress in Geography, 2004, 23(2): 88-96. (in Chinese))
- [4] 冯松, 汤懋苍, 王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据[J]. 科学通报, 1998, 43(6): 633-636. (FENG Song, TANG Mao cang, WANG Dong mei. The Tibetan Plateau is New Evidence of Climate Change in the Promoter Region [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(6): 633-636. (in Chinese))
- [5] 高治定, 王玉峰, 张志红, 等. 南水北调西线工程调水地区水文气象特征[J]. 人民黄河, 2001, 23(10): 41-45. (GAO Zhi ding, WANG Yu feng, ZHANG Zhi hong, et al. Hydrological and Meteorological Characteristics of the Western Route Water Diversion Area [J]. Yellow Rivre, 2001, 23(10): 41-45. (in Chinese))
- [6] 俞烜, 张明珠, 严登华, 等. 南水北调西线工程水源区降水时空特征[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(z1): 41-45. (YU Heng, ZHANG Ming zhu, YAN Deng hua, et al. On the Spatial and Temporal Distribution of Precipitation in the Western Route of South to North Water Transfer Project [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin 2008, 17(z1): 41-45. (in Chinese))
- [7] 李振朝, 韦志刚, 吕世华, 等. 南水北调西线一期工程引水区和黄河上游区域气候特征分析[J]. 冰川冻土, 2006, 28(2): 149-156. (LI Zhen chao, WEI Zhi gang, LYU Shi hua, et al. Analyses of the Climatic Characteristics in the Water Diversion Areas of the Western Route Project of South to North Water Diversion and the Upstream Areas of Yellow River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(2): 149-156. (in Chinese))
- [8] 张润润. 香港地区降水趋势及其演变过程分析[J]. 河海大学学报, 2010, 38(5): 505-510. (ZHANG Run run. Trend and Evolution of Precipitation in Hong Kong [J]. Journal of Hohai University, 2010, 38(5): 505-510. (in Chinese))
- [9] 于延胜, 陈兴伟. 基于 Mann Kendall 法的水文序列趋势成份比重研究[J]. 自然资源学报, 2011, 26(9): 1585-1591. (YU Yan sheng, CHEN Xing wei. Study on the Percentage of Trend Component in a Hydrological Time Series Based on Mann Kendall Method [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(9): 1585-1591. (in Chinese))
- [10] 王文圣, 丁晶, 金菊良. 随机水文学[M]. 中国水利水电出版社, 2008. (WANG Wen sheng, DING Jing, JIN Ju liang. Stochastic Hydrology [M]. China Water Power Press, 2008. (in Chinese))
- [11] 钟登华, 石明华. 水文时间序列长期相关性的识别[J]. 天津大学学报, 1998, 31(4): 31-34. (ZHONG Deng hua, SHI Ming hua. Identifying Long term Dependence of Hydrological Time Series [J]. Journal of Tianjin University, 1998, 31(4): 31-34. (in Chinese))
- [12] 侯保俭. 长江上游流域统计降尺度方法研究[D]. 重庆交通大学, 2012. (HOU Bao jian. Statistical Downscaling Methods in Upper Reaches of Yangtze River Basin of China [D]. Chongqing Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [13] 谢平, 雷红富, 陈广才, 等. 基于 Hurst 系数的流域降雨时空变异分析方法[J]. 水文, 2008, 28(4): 26-32. (XIE Ping, LEI Hong fu, CHEN Guang cai, et al. Analysis of Spatial and Temporal Variation of Rainfall Based on Hurst Coefficient [J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(4): 26-32. (in Chinese))
- [14] 谢平, 陈广才, 雷红富. 基于 Hurst 系数的水文变异分析方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(1): 32-39. (XIE Ping, CHEN Guang cai, LEI Hong fu. Hydrological Alteration Analysis Method Based on Hurst Coefficient [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 17(1): 32-39. (in Chinese))

(上接第 5 页)

- [16] 左其亭, 吴泽宁, 赵伟. 水资源系统中的不确定性及风险分析方法[J]. 干旱区地理, 2003, 26(2): 116-121. (ZUO Qi ting, WU Ze ning, ZHAO Wei. Uncertainties and Risk Analysis Method of Water Resources System [J]. Geography of Arid Land, 2003, 26(2): 116-121. (in Chinese))
- [17] 李勋贵, 黄强, Leon Feng, 等. 界壳的泛系观控模型及其在水资源中的应用[J]. 兰州大学学报, 2005, 41(5): 16-17. (LI Xun gui, HUANG Qiang, LEON Feng, et al. Pansystems Observation Control Model of Periphery and its Application to Water Resources [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2005, 41(5): 16-17. (in Chinese))
- [18] 姜秋香. 三江平原水土资源承载力评价及其可持续利用动态仿真研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2011. (JIANG Qiu xiang. Study on Carrying Capacity Evaluation and Dynamic Simulation of Sustainable Utilization of Water and Land Resources in Sanjiang Plain [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2011. (in Chinese))