

龙川江流域主要气象要素及径流变化趋势

赵翠娥, 丁文荣

(云南师范大学 旅游与地理科学学院, 昆明 650500)

摘要: 采用 Mann Kendall 非参数检验法对金沙江一级支流龙川江流域 1970 年-2009 年逐月气温、降水及 1961 年-2008 年径流资料进行趋势检验, 并运用 R/S 方法分析流域的年平均气温、降水、径流时间序列的持续性, 估算各项指标的 Hurst 指数, 以定量估计未来气候及径流的变化趋势。结果表明: (1) 过去几十年来, 流域内降水呈上升趋势但不显著, 未来降水将持续增加且元谋站降水的增长趋势持续性较强; (2) 几十年来, 流域气温呈显著上升趋势, 未来气温将会持续过去的上升趋势; (3) 几十年来, 流域径流呈减少趋势, 但不显著, 未来继续呈下降趋势, 但持续性不强。

关键词: 非参数检验; R/S 方法; 径流; 龙川江流域

中图分类号: P343 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0038-04

Variation Trend Analysis of Major Climatic Variables and Runoff in the Longchuan River Basin

ZHAO Cuie, DING Wenrong

(School of Tourism and Geographic Sciences, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: In this study, the long term trends of monthly temperature and precipitation from 1970 to 2009 and annual runoff data from 1961 to 2008 in the Longchuan River Basin were analyzed using the non parametric Mann Kendall method. In addition, the R/S method was used to investigate the continuity of the time series data of annual temperature, precipitation, and runoff in the basin and to estimate the Hurst exponent for each index, which can be used to estimate the variation trends of temperature, precipitation, and runoff quantitatively. The results showed that (1) precipitation has an insignificant increasing trend in the basin and it will continue to increase, especially at Yuanmou station; (2) temperature has a significant increasing trend in the basin and it will continue to increase; and (3) runoff has an insignificant decreasing trend in the basin and it will continue to decrease but without strong continuity.

Key words: non parametric Mann Kendall method; R/S method; runoff; Longchuan River Basin

水资源作为人类社会发展与生态环境维持和改善不可取代的资源, 受到气候变化和人类活动的严重干扰和影响。气候的异常与变化以及大规模的人类活动, 均可对水循环的更替期长短、水量、水质、水资源的时空分布和水旱灾害的频率与强度产生重大影响, 引起了世界各国的普遍关注^[1]。

龙川江流域处于滇中老旱区, 尤其是下游元谋河谷一带, 降水量少而蒸发强烈, 资源性缺水突出。随着社会经济的发展、人口的增长, 龙川江流域的水土资源被大规模进行开发利用, 由此, 很多学者对该流域水文水资源相关领域进行过研究。马平森^[2]对流域径流量变化趋势及水资源合理配置进行了研究, 朱云梅等^[3]、丁文荣^[4]、何进花^[5]等分别对径流的气候变化敏感性、水循环要素变化趋势、径流变化的周期性等问题进行了研究。

本文采用 Mann Kendall 非参数检验方法对流域内 6 个气象站点有记录的逐月平均气温、降水系列进行趋势检验, 并在此基础上采用 R/S 分析方法计算各个系列的 Hurst 指数, 以此分析该流域未来的气温、降水变化情况。

1 研究区概况

龙川江是长江上游金沙江一级支流, 位于云南省楚雄州境内(24°45' - 26°15' N, 100°56' - 102°02' E), 全长 244.9 km。以小黄瓜园作为出水口, 流域面积 5 475.3 km²。龙川江流域(图 1)地处横断山脉与云贵高原的过渡地带, 流域内大部份属中山山原地貌; 中上游山高坡陡, 河床切割深, 地形起伏大; 下游地势较缓, 为盆地地形。沿河流域地形闭塞, 海拔较低, 东、西、南三面均是高山环绕, 空气十分干燥, 为云贵

收稿日期: 2013-12-03 修回日期: 2014-01-20 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.2014.03.008.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101099)

作者简介: 赵翠娥(1988-), 女, 云南曲靖人, 硕士研究生, 主要从事资源环境与区域发展研究。E-mail: zhaocui.e@163.com

通讯作者: 丁文荣(1979-), 男, 云南临沧人, 副教授, 博士, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: dingwenrong@163.com

高原雨量最少的地区之一,尤其是位于中下游的元谋干热河谷,气候燥热,水热矛盾十分尖锐。

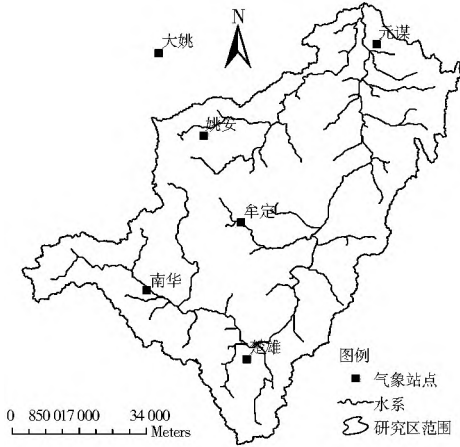


图1 龙川江流域及其周边气象、水文站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological and hydrological stations in the Longchuan River Basin

2 研究方法和数据来源

2.1 研究方法

趋势检验采用 Mann Kendall 非参数统计法,该方法优点是不需要遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,被广泛的用于检验水文气象资料的趋势成分,包括水质、流量、气温和降雨序列等^[6-9]。Mann Kendall 法通过 U 值与假设的置信水平标准值进行比较,得出有无显著趋势特征。 U 值包括计算顺序时间序列的统计量值 UF_k 和逆序时间序列的统计量值 UB_k , $UB_k = -UF_k$ 。分析 UF_k 、 UB_k 曲线图,若 UF_k 或 UB_k 的值大于 0,表明序列呈上升趋势,小于 0 则表明呈下降趋势;当 UF_k 、 UB_k 曲线超过临界直线时,表明上升或下降趋势显著,超过临界线的范围确定为出现突变的时间区域;如果临界直线与两条曲线出现交点,且交点在临界线之间,那么交点对应的时刻便是突变开始的时间。本文给定显著性水平 $\alpha = 0.05$,即临界值 $\alpha_{0.05} = \pm 1.96$ 。

演变趋势采用了 R/S 分析方法。该方法假设一个时间序列 $\xi(t)$, $t = 1, 2, 3, \dots$, 对于任意整数 $\tau > 1$, 先指定时均序列 $\langle \xi \rangle_\tau$, $t = 1, 2, 3, \dots, \tau$, 然后计算累计离差 $X(t, \tau)$ 、级差 $R(\tau)$ 和标准差 $S(\tau)$ 。在比值 $R(\tau)/S(\tau) = R/S$ 中, R 随 τ 的增长呈发散状态。赫斯特曾证明了 $R(\tau)/S(\tau)$ 随 τ 的增长呈 $1/2$ 的指数率关系,即:

$$R/S \propto \left(\frac{\tau}{2}\right)^H \quad (1)$$

式中: H 为赫斯特指数,可以揭示时间序列的未来演变趋势。当 $H = 0.5$ 时,表明时间过程前期与未来相互间没有依赖性,所分析要素的未来演变具有随机性;当 $H > 0.5$ 时,时间过程具有良好的持续性,未来的趋势与过去一致, H 越接近 1 持续性越强;当 $H < 0.5$ 时,时间过程具有反持续性,意味着未来的总体趋势将与过去相反, H 越接近 0 反持续性越强^[10-11]。

2.2 数据来源

研究选用 6 个均匀分布在龙川江流域及周边气象站点

的逐月气温和降水数据。观测资料由云南省气象中心气象资料室提供,各气象站点所选用的数据皆是从 1970 年—2009 年,均经过较为严格的质量控制,包括极值检验、时间一致性检验。径流数据来自小黄瓜园水文站,所选用的数据是 1961 年至 2008 年的。文中四季的气候序列按春季(3 月—5 月)、夏季(6 月—8 月)、秋季(9 月—11 月)、冬季(12 月至次年 2 月)划分。

3 研究结果

3.1 降水序列的变化趋势

龙川江流域 6 个气象站点的季节和年平均降水变化的 M-K 趋势检验结果(表 1)表明:1961 年以来龙川江流域降水量整体呈上升趋势,但不显著($U = 1.25 < \alpha_{0.05} = 1.96$),且存在时空差异。在春季,除楚雄站($U = 1.51 < \alpha_{0.05} = 1.96$)上升趋势稍弱外,其他站降水量均呈显著上升趋势;在夏季,除姚安站($U = 0$)没有通过置信水平的检测外,楚雄、南华、牟定站降水呈上升趋势,大姚和元谋站降水呈下降趋势,但上升或下降趋势皆不显著;在秋季,楚雄、牟定、南华、姚安站呈下降趋势,大姚、元谋站呈上升趋势,但均不显著;在冬季,6 个站点的降水都呈上升趋势但不显著。从空时间上看,各站点年平均降水量都呈上升趋势,但元谋站降水上升趋势更显著($U = 3.11 > \alpha_{0.05} = 1.96$)。

表 1 龙川江流域季节及年平均降水量 M-K 趋势检验值

Table 1 M-K trend values of seasonal and annual average precipitation in the Longchuan River Basin

站点	春季	夏季	秋季	冬季	年平均
楚雄	1.51	1.06	-0.41	0.92	0.97
牟定	2.64	0.31	-0.90	0.77	0.55
南华	2.64	0.24	-0.50	0.61	0.65
姚安	3.06	0	-0.83	1.30	0.73
大姚	3.18	-0.50	0.73	1.11	1.17
元谋	3.02	-0.16	0.02	0.78	3.11

季节和年平均降水变化的 Hurst 值计算结果(表 2)表明:各站点的年平均降水量 Hurst 值均大于 0.5,即流域未来的年降水量与过去的增长趋势比较相似,且元谋、姚安的年降水量增长趋势的持续性更强。春季、夏季各站点的降水量 Hurst 值均大于 0.5,春季元谋站的最大,夏季姚安、楚雄站最大,说明未来春季、夏季流域内降水整体上都会持续增长,且春季的元谋和夏季的姚安、楚雄等地的降水增加趋势与过去的相似度更高。秋季,除姚安站($H = 0.44 < 0.5$)外,其余

表 2 龙川江流域季节及年平均降水量 Hurst 值

Table 2 Hurst values of seasonal and annual average precipitation in the Longchuan River Basin

站点	春季	夏季	秋季	冬季	年平均
楚雄	0.54	0.70	0.67	0.09	0.62
牟定	0.73	0.56	0.66	0.03	0.66
南华	0.68	0.61	0.57	0.24	0.52
姚安	0.69	0.70	0.44	0.16	0.70
大姚	0.75	0.67	0.63	0.25	0.60
元谋	0.77	0.58	0.57	-0.03	0.71

5 站的降水量 Hurst 值均大于 0.5, 参考表 1 可知, 未来秋季姚安站的降水量将呈上升趋势, 楚雄站、牟定站、南华站的降水量将会呈下降趋势, 而姚安站、大姚站、元谋站的降水量呈上升趋势。冬季, 各站点的降水量 Hurst 值均小于 0.5, 且元谋站的 Hurst 值出现负值, 说明未来冬季龙川江流域的降水量变化与过去相反, 即呈下降趋势, 尤其牟定站的降水量变化与过去相比的反持续性最强。

3.2 气温序列的变化趋势

通过 Mann Kendall 法对龙川江流域及其临近 6 个气象站平均气温的逐季节和年平均值进行长期变化趋势的检验, 除冬季南华站之外, 其他各站点都通过了检验, 最终结果见图 2。

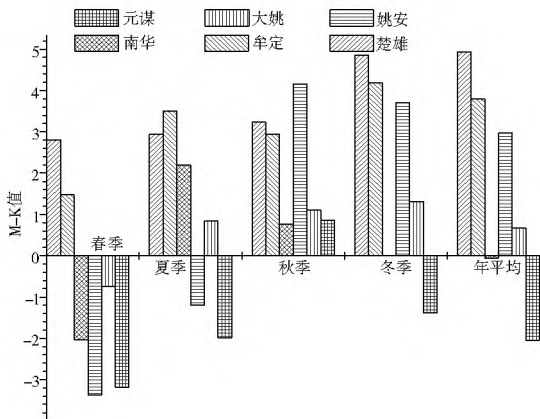


图 2 龙川江流域季节和年平均气温变化的 M-K 值

Fig. 2 M-K trend values of seasonal and annual average temperature in the Longchuan River Basin

从图 2 可以看出: (1) 龙川江流域年平均气温呈上升趋势, 且上升趋势显著 ($U = 2.14 > \alpha_{0.05} = 1.96$); (2) 各个季节中, 气温上升最显著的分别是冬季的楚雄站、秋季的姚安站、夏季的牟定站和春季的楚雄站; (3) 从空间看, 楚雄站和牟定站四季和年平均气温都呈上升趋势, 其余各站不同季节变化趋势不同: 南华站的夏、秋季气温呈上升趋势, 春季呈下降趋势, 且下降趋势明显, 而年平均气温呈下降趋势, 但不显著; 姚安站春、夏季气温呈下降趋势, 秋、冬季和年平均气温都呈上升趋势, 且上升趋势显著; 大姚站春季下降趋势不显著, 其它三季和年平均气温都呈上升趋势; 元谋站秋季气温的上升趋势不显著, 春季、夏季、年平均气温的下降趋势显著; (4) 四季中, 只有秋季各站点的气温都呈上升趋势, 而整个流域的气温下降趋势较明显的是春季, 姚安站的下降趋势最大。年平均气温中只有元谋站呈显著下降趋势 ($U = -2.05 < \alpha_{0.05} = -1.96$), 其他各站点都呈上升趋势, 且楚雄、牟定、姚安三站的趋势显著。

另外, 由图 3 可知以下结果。(1) 除大姚站外, 其它 5 个站点年平均气温的 Hurst 值都大于 0.5, 其中楚雄站的值最大 ($H = 0.94$)。由于过去楚雄站、牟定站、姚安站、大姚站的气温呈上升趋势而南华站、元谋站的气温呈下降趋势, 所以楚雄站、牟定站、姚安站未来的气温将会继续保持过去的上升趋势, 尤其是楚雄站; 大姚站则具有反持续性, 未来的气温将呈下降趋势; 南华站、元谋站将继续保持过去的下降趋势。

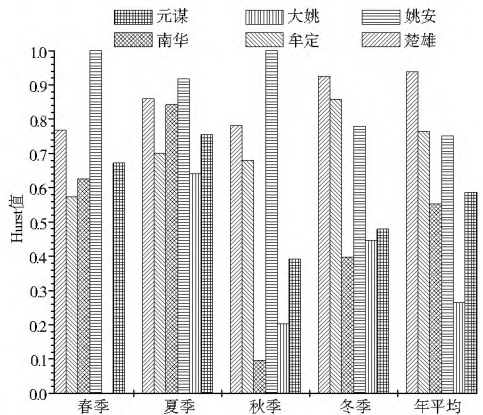


图 3 龙川江流域 6 个气象站点的四季和年平均气温变化的 Hurst 值

Fig. 3 Hurst values of seasonal and annual average temperature at 6 meteorological stations in the Longchuan River Basin

(2) 四季中, 夏季的 H 值全部大于 0.5, 即夏季各站点未来的气温将继续延续过去的变化趋势; 春季, 楚雄站、牟定站未来气温将延续上升趋势, 其他各站点依旧延续下降趋势; 秋季, 楚雄站、牟定站、姚安站未来气温继续呈上升趋势且姚安站将保持更强的持续性, 南华站、大姚站、元谋站将与过去变化相反, 呈下降趋势; 冬季楚雄站、牟定站、姚安站的未来气温将继续过去的上升趋势, 大姚站、元谋站则与过去相反, 即前者呈下降趋势而后者呈上升趋势。(3) 从空间上看, 楚雄站、牟定站、姚安站将会延续过去的变化趋势, 而南华站、大姚站、元谋站将会在未来的季节出现反持续现象。

3.3 径流的变化趋势

对龙川江流域的径流序列进行了趋势检验, 其通过了 95% 的置信度检验, 结果表明 (表 3、图 4): 龙川江河年平均径流量的 M-K 值 < 0 (-0.13), 即流域径流量逐年减少但减少趋势不显著; 四季中只有春季的 M-K 值 > 0 (0.90), 即春季径流量呈上升趋势, 而夏、秋、冬季呈下降趋势, 但无论上升还是下降, 均不显著。

从图 3 可以看出, 20 世纪 60-80 年代流域的径流量都在逐渐减少, 90 年代有所上升, 但是进入 21 世纪后径流量又呈现下降趋势; 70 年代比 60 年代减少 17%, 80 年代比 70 年代减少 27%, 90 年代比 80 年代增加 64%, 21 世纪比 20 世纪 90 年代减少 8.7%。

龙川江流域年平均径流量的 Hurst 值大于 0.5 (表 3), 说明未来春季径流量保持上升趋势, 夏季、秋季、冬季继续保持下降趋势; 不过持续性最好的是春、冬两季。

表 3 龙川江流域径流量的 M-K 趋势检验值和 Hurst 值

Table 3 M-K trend/Hurst values for runoff data time series in the Longchuan river basin

季节	年平均	春季	夏季	秋季	冬季
M-K 值	-0.13	0.90	-0.08	-0.10	-1.00
Hurst 值	0.56	0.72	0.54	0.53	0.70

4 讨论与分析

龙川江流域年平均降水量总体呈上升趋势, 这与云南省

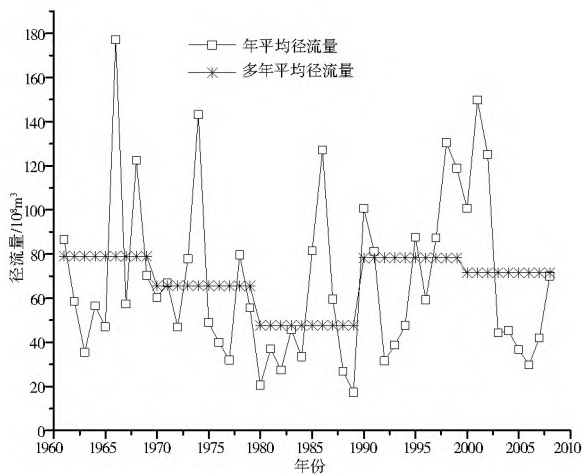


图4 龙川江流域年平均径流量及多年平均径流量随时间变化曲线

Fig. 4 Change of runoff of the Longchuan river basin

的年降水量总体呈减少趋势相反,而春、冬季降水增加、秋季降水减少的情况与云南全省基本一致。在气温方面,流域年平均气温整体呈显著上升趋势,与全省甚至全球平均气温变化趋势相似。不过,地处金沙江干热河谷地区的元谋却表现出相反的现象,即除秋季外其他季节的气温都呈现出下降趋势,而除夏季减少外其他季节降水量呈增加趋势。

出现这种原因主要跟全球气候变暖和龙川江流域所处的独特自然地理环境有一定的关系。流域的上游地区处于滇中中原山地,在全球气候变暖的背景下,降水量的增加导致其气候趋向暖湿;流域下游处于金沙江的干热河谷地区,在过去,受到干热气候的影响水分过度损耗,森林植被覆盖率低,出现大面积土地荒芜或河谷坡面的表土大面积丧失等现象,但是地方政府为保护长江上游生态环境加大力度进行水土流失和植被恢复治理,使得该区域降水有所增加,气温降低且未来将继续延续这个变化趋势。

龙川江流域年径流量减少但减少趋势不显著,这与马平森^[2]等人的研究结论相反。初步判断是由于研究数据选取的时间段以及选取的水文站点数据不一样造成的。流域年降水量与径流量呈反比关系,主要与流域的降水量,流域内的工、农业生产活动及水利工程的建设和有关。根据程建纲^[12]等人的研究,20世纪70年代云南各地偏冷,1986年后开始转暖,但其间穿插着极端高温干旱天气,使得云南地区的降水也相应减少。姜世中^[13]等人的研究表明径流量与降水量的相关关系出现突变主要是与历史时期的森林砍伐和兴修水利工程有关;植被破坏造成土壤旱化,地下水位降低,降水产流量减小;大兴水利工程加大了对径流的调控作用,使得流域内的径流减小。随着楚雄州社会经济的发展,工农业需水量、日常生活用水量在不断的增加,流域内的大小水库的修建及储水都大大的减少了流域内河流的径流。

5 结论

(1) 龙川江流域整体降水有上升趋势但上升趋势不显著。春、冬季节流域内降水量呈上升趋势,尤其是春季除楚雄站外其他各站点的上升趋势都显著;夏、秋季节流域内降

水呈下降趋势,下降趋势不显著。流域内各站点年平均降水量都呈上升趋势,但仅有元谋站降水上升趋势显著。根据R/S法分析得出流域未来的年降水量将持续增长,其中元谋年降水量的增长趋势持续性很强。

(2) 龙川江流域年平均气温整体呈上升趋势,且上升趋势显著。春季各站点的气温下降趋势较明显,秋季各站点的气温都成上升趋势。流域各站点中楚雄站上升趋势显著,元谋站除秋季外其它三季和年平均气温都呈下降趋势,秋季气温的上升趋势不显著,春季、夏季、年平均气温的下降趋势显著。有R/S法计算可知未来流域的气温将会持续过去的气温变化。

(3) 流域径流量减少但减少趋势不显著。春季径流量呈上升趋势,夏季、秋季、冬季呈下降趋势。流域在20世纪70年代的径流量比60年代减少17%,80年代比70年代减少27%,90年代比80年代增加64%,21世纪比20世纪90年代减少8.7%。未来流域的径流量将继续呈下降趋势,但持续性不强。

(4) 全球气候变暖和处于干热河谷的独特位置是龙川江流域气温和降水变化的因子,极端气候变化和社会经济的发展影响流域径流量的变化。从可持续发展的观点出发,龙川江流域应该坚持并加大植树造林生态恢复工程,并科学、合理规划水资源利用,提高水资源的利用效率,减少水污染、水浪费现象。

参考文献(References):

- [1] IPCC. IPCC Fourth Assessment Report (AR4). Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 马平森, 顾世祥, 卯昌书, 等. 龙川江流域径流量变化趋势及水资源合理配置研究[J]. 中国农村水利水电, 2011, (5): 6-10. (MA Ping-sen, GU Shi-xiang, MAO Chang-shu, et al. Research on the Trend of the Runoff and Rational Allocation of Water Resources in the Longchuanjiang River Basin[J]. China Rural Water and Hydropower, 2011, (5): 6-10. (in Chinese))
- [3] 朱云海, 吕喜奎, 周跃, 等. 纵向岭谷区地表径流对气候变化的敏感性分析—以长江上游龙川江流域为例[J]. 科学通报, 2006, (S2): 73-80. (ZHU Yun-mei, LV Xi-qi, ZHOU Yue, et al. The Sensitivity Analysis of LRGR Runoff for Climate Change in Longchuanjiang Basin the Upper Reaches of the Yangtze River[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, (S2): 73-80. (in Chinese))
- [4] 丁文荣, 吕喜奎, 明庆忠. 变化环境下的龙川江流域水循环要素响应与趋势[J]. 节水灌溉, 2011, (2): 1-4. DING Wen-rong, LV Xi-qi, MING Qing-zhong. Response of Water Cycle Factors to Changing Environment in Longchuanjiang River Basin[J]. Water saving irrigation, 2011, (2): 1-4. (in Chinese))
- [5] 何进花, 丁文荣. 基于Morlet小波的龙川江流域年径流变化的周期性分析及趋势预测[J]. 思茅师范高等专科学校学报, 2011, 27(6): 36-41. (HE Jin-hua, DING Wen-rong. Period Analysis and Trend Forecasting Annual Runoff in Longchuanjiang River Basin Based on Morlet Wavelet Function[J]. Journal of Simao Teachers' College, 2011, 27(6): 36-41. (in Chinese))

(下转第54页)

- Qssessment and Qpportionment of Pollution Sources of Gomti River (India) using Multivariate Statistical Techniques A Case Study[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2005, 538(1-2): 355-374.
- [2] 燕敏飞, 彭勇, 王国利. 基于熵权权重的可变模糊理论在大连市地下水水质评价中的应用[J]. *南水北调与水利科技*, 2012, 10(3): 58-61. (YAN Minfei, PENG Yong, WANG Guoli. Application of Variable Fuzzy Sets Model Based on Entropy Weight in Groundwater Quality Assessment of Dalian[J]. *South to North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2012, 10(3): 58-61. (in Chinese))
- [3] 朱叶华, 曾涛, 杨军, 等. 综合水质指数法对长沙湘江段的水质评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2010, 8(5): 122-124. (ZHU Yehua, ZENG Tao, YANG Jun, et al. Water Quality Assessment in Shashi of the Yangtze River by Comprehensive Water Quality Index[J]. *South to North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2010, 8(5): 122-124. (in Chinese))
- [4] U. S. EPA. The Risk Assessment Guidelines of 1986[R]. EPA/600/1887/045. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, U. S. EPA, 1986.
- [5] Said Muhammada, M. Tahir Shah, Sardar Khan. Arsenic Health Risk Assessment in Drinking Water and Source Apportionment using Multivariate Statistical Techniques in Kohistan Region, Northern Pakistan[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2010, 48(10): 2855-2864.
- [6] 祝慧娜, 袁兴中, 曾光明, 等. 基于动态聚类分析的水环境健康风险综合评价[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2010, 37(9): 73-78. (ZHU Huina, YUNA Xingzhong, ZENG Guangming, et al. Integrated Assessment of the Environmental Health Risks of Water Sources Based on Dynamic Cluster Analysis[J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2010, 37(9): 73-78. (in Chinese))
- [7] 李如忠. 基于不确定信息的城市水源水环境健康风险评价[J]. *水利学报*, 2007, 38(8): 895-900. (LI Ruzhong. Assessment for Environmental Health of Urban Water Supply Source Based on Uncertain Information[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(8): 895-900. (in Chinese))
- [8] 《中国河湖大典》编纂委员会. 中国河湖大典·淮河卷[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 129-130. (Editorial Committee of Encyclopedia of Rivers and Lakes in China. *Encyclopedia of Rivers and Lakes in China* Section of Huaihe River Basin[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010: 129-130. (in Chinese))
- [9] 水利部水利电力规划设计总院. 全国城市饮用水水源地安全状况评价技术细则[R]. 北京: 水利部水利电力规划设计总院, 2005. (Water Resources and Hydropower Planning and Design General Institute, MWR. The Technical Details of National City Drinking Water Sources Safety Evaluation[R]. Beijing: Water Resources and Hydropower Planning and Design General Institute, MWR, 2005. (in Chinese))
- [10] GB 3838-2002, 中华人民共和国地表水环境质量标准[S]. (GB 3838-2002, Surface Water Quality Standards of the People's Republic of China[S]. (in Chinese))
- [11] U. S. EPA. Superfund public health evaluation manual[S]. EPA/540/186060, 1986.
- [12] U. S. EPA. Supplement risk assessment Part I. Guidance for public health risk assessment[S]. EPA, 601/528922001, 1989.
- [13] Kannan Krishnan, Joel Paterson, David T Williams. Health Risk Assessment of Drinking Water Contaminants in Canada the Applicability of Mixture Risk Assessment Methods[J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1997, 26(2): 179-187.
- [14] 曾光明, 卓利, 钟政林, 等. 水环境健康风险评估模型及其应用[J]. *水电能源科学*, 1997, 15(4): 28-33. (ZENG Guangming, ZHUO Li, ZHONG Zhenglin, et al. Assessment Models for Water Environmental Health Risk Analysis[J]. *Water Resources and Power*, 1997, 15(4): 28-33. (in Chinese))

(上接第41页)

- [6] 于延胜, 陈兴伟. RS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. (YU Yansheng, CHEN Xingwei. Analysis of Future Trend Characteristics of Hydrological Time Series Based on RS and Mann-Kendall methods[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2008, 19(3): 41-44. (in Chinese))
- [7] 王洁, 徐宗学. 白洋淀流域气温与降水量长期变化趋势及其持续性分析[J]. *资源科学*, 2009, 31(9): 1498-1505. (WANG Jie, XU Zongxue. Long term Trend and the Sustainability of Air Temperature and Precipitation in the Baiyangdian Basin[J]. *Resources Science*, 2009, 31(9): 1498-1505. (in Chinese))
- [8] 徐宗学, 李占玲, 史晓崑. 石羊河流域主要气象要素及径流变化趋势分析[J]. *资源科学*, 2007, 29(5): 12-128. (XU Zongxue, LI Zhanling, SHI Xiaokun. Long-term Trends of Climatic Variables and Runoff in the Shiyang River Basin[J]. *Resources Science*, 2007, 29(5): 12-128. (in Chinese))
- [9] 樊毅, 周芸, 邹玥, 等. 西南干热河谷降水蒸发变化趋势分析[J]. *人民长江*, 2010, 41(3): 17-20. (FAN Yi, ZHOU Yun, ZOU Yue et al. Analysis on Change Trend of Precipitation and Evaporation in Dry-hot Valley in Southwest China[J]. *Yangtze River*, 2010, 41(3): 17-20. (in Chinese))
- [10] Mandelbrot B B, Wallis J R. Some Long-run Properties of Geographical Records[J]. *Water Resource Research*, 1969, 5(2): 321-340.
- [11] Mandelbrot B B, Wallis J R. Robustness of the Rescaled Range R/S in the Measurement of Noncyclic Long-run Statistical Dependence[J]. *Water Resource Research*, 1969b, 5(4): 967-988.
- [12] 程建刚, 解明恩. 近50年云南区域气候变化特征分析[J]. *地理科学进展*, 2008, 27(5): 19-26. (CHENG Jiangan, XIE Ming'en. The Analysis of Regional Climate Change Features over Yunnan in Recent 50 Years[J]. *Progress in Geography*, 2008, 27(5): 19-26. (in Chinese))
- [13] 姜世中, 梁川. 降水和植被变化对龙川江径流量的影响[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2006, 38(5): 58-64. (JIANG Shizhong, LIANG Chuan. The Influence of Precipitation and Vegetation Change on the Runoff of Longchuanjiang River[J]. *Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*, 2006, 38(5): 58-64. (in Chinese))