

# 猫跳河流域气象水文因素的变化趋势分析

鲁春霞<sup>1</sup>, 马聪<sup>1,2</sup>, 李亦秋<sup>1,3</sup>, 程晓凌<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 绵阳师范学院 资源与环境工程学院, 四川 绵阳 100083)

**摘 要:** 以我国第一条全流域梯级水电开发的河流猫跳河为对象, 系统分析了猫跳河流域主要气象水文变量的基本情势, 分析了各因素的变化趋势。利用紧邻猫跳河流域的贵阳、安顺和黔西地区的 3 个气象站近 60 a 的逐日气象观测数据, 采用线性回归和 Mann—Kendall 法检测其变化趋势, 利用 FAO56 方法计算了流域参考作物的蒸散发状况。结果表明: (1) 流域多年平均降水量在 1 000~1 300 mm 之间, 没有显著的变化趋势; (2) 在过去 60 a, 流域平均气温累计上升约 0.4~1.0 °C, 呈现一定程度的暖化趋势; (3) 流域的平均年日照时数在 1 200~1 300 h 之间, 且呈现明显的下降趋势, 大致以 8~10 h/a 的速率递减; (4) 流域日参考作物蒸发在 2.5~2.7 mm/d 之间。多年平均参考作物蒸发在 900~1 000 mm 之间。年参考作物蒸发下降趋势显著, 与日照时数的减小相一致。猫跳河流域总体上呈现一定程度的暖化现象, 但气候变化对水资源的影响程度有限。

**关键词:** 降水; 气温; 日照时数; 猫跳河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)06-0262-06

中图分类号: P331.3

## Trend Detection of Hydrometeorological Variables in Maotiaohe Basin

LU Chun-xia<sup>1</sup>, MA Cong<sup>1,2</sup>, LI Yi-qiu<sup>1,3</sup>, CHENG Xiao-ling<sup>1</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Graduate School of Chinese Academic of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Department of Resource and Environment, Mianyang Normal University, Mianyang, Sichuan 621000, China)

**Abstract:** The Maotiaohe River is the first river in China which has been completely developed for hydropower in a cascade manner. In this study, we systematically analyzed the regimes of hydrometeorological variables and detected their possible trends. Meteorological and hydrological observations on a daily basis were obtained at three weather stations in the vicinity of the Maotiaohe Basin for the period of the 1950—2010. Linear regression and the Mann—Kendall non-parametric trend detection technique were applied. In addition, daily reference crop evapotranspiration was calculated based on the FAO56 equation. The results showed that the mean annual precipitation ranged 1 000~1 300 mm/a in the watershed, while no statistically significant temporal trend was detected. The temperature of the watershed increased about 0.4~1.0 °C over the past 60 years, exhibiting a warming trend. The mean annual sunshine hour ranged 1 200~1 300 h/a, showing a decreasing trend at a rate of 8~10 h/a. Daily crop evapotranspiration was found to be 2.5~2.7 mm/d and mean annual reference crop evapotranspiration ranged 900~1 000 mm/a over the study period, displaying a decreasing trend over time. The decrease of evapotranspiration was closely correlated with the trend in sunshine hour. Overall, the Maotiaohe River watershed showed a slightly warming trend, which did however have not resulted in a significant impact yet on water resources of this watershed.

**Keywords:** precipitation; temperature; sunshine hour; relative humidity; Maotiaohe watershed

近年来, 水利水电工程建设对河流梯级开发所带来的生态效应及突发性公共环境事件, 愈发引人关

注。例如三峡水库库区污染<sup>[1]</sup>、太湖蓝藻水华灾害<sup>[2]</sup>、怒江、澜沧江—湄公河水梯级开发<sup>[3-4]</sup>等都引

收稿日期: 2012-03-16

修回日期: 2012-05-07

资助项目: 环保部公益性行业科研专项“水利工程生态效应与生态调度准则研究”(200909057)

作者简介: 鲁春霞(1965—), 女(汉族), 陕西省宝鸡市人, 副研究员, 主要研究方向为资源利用及其生态效应。E-mail: lucx@ms. igsnr. ac. cn.

起国内外和公众的热议。河流水电梯级开发造成河流节点化和台阶化<sup>[5-6]</sup>,直接或间接地改变了河流生态系统的物质场、能量场、化学场和生物场<sup>[7]</sup>,例如河流流速变慢、自净能力降低、水质污染加剧<sup>[6,8]</sup>、泥沙分配改变<sup>[7]</sup>等;而为支持工农业生产和生活用水而兴建的各种取水工程严重削减地表水量<sup>[9]</sup>,对河流及流域生态系统带来诸多负面效应。如何定量地刻画河流水电梯级开发所带来的生态水文效应,如何在水利工程规划和设计中规避对河流生态系统造成的严重的、不可逆的破坏,对保护河流生态系统,实现河流可持续利用和流域可持续发展都具有重要的理论和实践意义<sup>[10-11]</sup>。

猫跳河流域位于贵州省安顺市西秀区、长顺县、平坝县、清镇市、贵阳市和修文县的大部分或部分区域。流域面积 3 195 km<sup>2</sup>,平均海拔 1 290 m,多年平均径流量 1.76 × 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup><sup>[11]</sup>。流域干流猫跳河为我国第一条全流域梯级水电开发的河流。河流水电的梯级开发曾为促进地方的经济和社会发展发挥了积极的作用。但随着经济社会的进一步发展和人口的持续增长,加之异常脆弱的喀斯特生态环境本底条件,使得流域生态环境和水资源所承载的压力进一步加大,河流水电梯级开发的负面效应逐渐显现。

河流和流域生态系统的变化是人类活动和自然因素共同作用的结果。已有学者开展了猫跳河流域土地覆被及其变化<sup>[12-15]</sup>,土壤侵蚀<sup>[16-17]</sup>,水质和水环境评价<sup>[7,18]</sup>,流域开发和可持续发展<sup>[19]</sup>等方面的研究,但针对猫跳河流域的气象水文要素及其变化趋势对流域生态水文影响的研究还鲜见报道。温室气体排放致气温上升,有可能导致流域实际蒸散发量的增大,河流径流量的减小。而降雨的变化亦有可能改变径流量的大小<sup>[20-21]</sup>。猫跳河流域在气候变化背景下主要气象水文要素有无变化,可能的变化在多大程度上影响流域的水资源量等问题作为分析猫跳河流域水利工程开发的河流生态效应的第一步,摸清流域关键气象水文要素的基本情势,检测其变化趋势,分析气候变化和人类活动(水电开发,城市化等)对流域水文生态造成的影响,对构建河流梯级开发的生态约束性阈值准则具有基础性的作用。本研究以猫跳河流域作为研究对象,系统分析流域降雨、气温、日照、相对湿度、风速和参考作物蒸发的基本情况及其变化趋势,为进一步模拟和预测流域水量水质,分析人类活动的生态和水文效应提供依据。

## 1 研究区概况

猫跳河流域地处长江与珠江分水岭地带北侧,地

面水系多为短小的溪流,受大气降水的控制影响明显。流域主干流猫跳河属长江水系,乌江中上游南岸的最大支流,全长 181 km,多年平均流量 55.9 m<sup>3</sup>/s,天然总落差 548.6 m,平均水力比降 3.04‰<sup>[9]</sup>。流域大致可分为两个部分,即红枫湖以上的高原区和以下的峡谷区。

流域多年平均温度 14~15 °C,年降雨量 1 200~1 300 mm<sup>[9]</sup>,空间分布南部多于北部,属于亚热带湿润季风气候。年际之间雨量变化比较稳定,而年内变化较大。全年将近 70%以上的雨量集中在汛期(6—8月),尤其是 6—7 两月暴雨频繁,持续时间多在 1~2 d 内。由于河岸山区岩石裸露,土层薄、坡度陡、汇流快,加上降雨强度大而集中,因而洪水峰型一般呈瘦尖尾长。

亚热带常绿阔叶林为猫跳河流域的地带性植被。由于长期人类活动的影响和破坏,流域内的原生植被早已破坏殆尽。现在流域内的森林绝大部分为次生林地,但树种单一,有林地几乎均为由马尾松和油杉松组成的松林。本研究对 2000 年美国陆地资源卫星 Landsat TM 遥感影像进行解译分析,结果表明,林地面积占流域面积的 59.9%,草地占 19.4%,耕地占 16.8%,建筑用地占 0.7%,水体占 3.1%。

## 2 数据和方法

### 2.1 数据及方法

本研究采用中国气象科学数据共享服务网提供的中国地面气候资料日值数据集贵阳站、安顺站、黔西站的气象观测数据进行分析。3 个气象站以顺时针方向紧邻猫跳河流域,分布在流域的东部,西南部和西北部,可在一定程度上反映流域内的气象要素基本情况和变化趋势,以填补由于流域内数据严重匮乏造成的研究空白。本研究所使用的气象要素包括逐日降雨、平均气温、最高气温、最低气温、日照时数、相对湿度和风速。贵阳站和安顺站气象要素时间序列为 1951—2010 年,黔西站时间序列为 1957—2010 年。

### 2.2 趋势分析方法

本研究采用线性回归和 Mann—Kendall<sup>[22-23]</sup>非参数检验方法对降水、气温等气象要素时间序列进行趋势检测和分析。Mann—Kendall 非参数检验方法的特点是不需要时间序列的分布特征。在给定  $n$  个样本量的时间序列  $x_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$  条件下,定义统计量  $S$ :

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

式中:  $x_j, x_k$ —— $j, k$  年的样本值, 且  $j > k$ :

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

正态分布统计量  $Z$  定义为:

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

$$\text{VAR}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

Mann—Kendall 方法采用双边趋势检验。在给定的显著性水平  $\alpha$  下, 当  $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ , 拒绝原假设  $H_0$ , 即样本系列有显著的变化趋势。如果  $Z$  为正值, 表示系列增长趋势显著;  $Z$  为负值时, 表示系列下降趋势显著。如果  $|Z| < Z_{1-\alpha/2}$ , 接受原假设, 即表示样本系列在置信水平  $\alpha$  下没有显著的变化趋势。当取显著水平  $\alpha = 0.05$ , 对应的  $Z_{0.975}$  为 1.96; 显著水平  $\alpha = 0.1$ , 对应的  $Z_{0.95}$  = 1.65。当样本趋势性显著时, 通常采用倾斜度  $\beta$  表示系列的长期单调变化趋势, 计算公式为:

$$\beta = \text{Median}\left[\frac{x_i - x_j}{i - j}\right] \quad (j < i) \quad (5)$$

当  $\beta > 0$  时, 表明系列有上升趋势;  $\beta = 0$  时, 表明系列无趋势;  $\beta < 0$  时, 表明系列有下降趋势。

### 2.3 参考作物蒸发

参考作物蒸发指在土壤水分充足的条件下, 特定或者假设植被覆盖表面在一定的时间尺度(如小时、日)的蒸散发量<sup>[24]</sup>。参考作物蒸发量可以视为实际蒸散发量的上限, 对理解特定研究区的水热分布状况具有重要的指标意义。尤其对于湿润地区, 由于土壤水分充沛, 在辐射能量充足的情况下, 实际蒸散发量往往会接近参考作物蒸发量或潜在蒸散发量。

参考作物蒸发是气象因子, 即日照时数、相对湿度、气温、风速等的函数, 综合反映了辐射能量和外动力气象条件对蒸散发能力的影响。在众多计算参考作物蒸发或潜在蒸发的公式(如 Penman—Monteith 公式<sup>[25]</sup>, Priestley—Taylor 公式<sup>[26]</sup>)中, 联合国粮农组织推荐的 FAO56 公式<sup>[27]</sup>自 1998 年正式发表以来, 在世界范围内广泛使用于计算参考作物蒸发和实际蒸发。本研究中采用 FAO56 公式计算猫跳河流域参考作物蒸发。该公式假设均匀密植, 植被高度 0.12 m, 零平面位移 0.08 m, 日平均表层阻力为 70

s/m 的处在活跃生长期的均匀草地。FAO56 参考作物蒸发的公式为:

$$ET_r = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad (6)$$

式中:  $ET_r$ ——参考作物蒸发(mm/d);  $\Delta$ ——日平均气温的饱和水汽压—温度曲线斜率(kPa/°C);  $R_n$ ——日平均净辐射( MJ/(m<sup>2</sup>·d) );  $G$ ——日平均土壤热通量( MJ/(m<sup>2</sup>·d) ), 近似为 0;  $\gamma$ ——干湿球系数(kPa/°C);  $T$ ——日平均气温(°C);  $u_2$ ——2 m 高处风速(m/s);  $e_s$ ——在日最高气温和最低气温下的平均饱和水汽压(kPa);  $C_n, C_d$ ——对应植被类型和计算时间尺度的参数, 对于假设的草地类型和日时间尺度, 分别取 900 和 0.34。

Long 和 Singh 指出<sup>[28]</sup>, 公式(6)中,  $ET_r$  对  $R_n$  和空气饱和差  $e_s - e_a$  较其他变量敏感。值得指出的是, 对同一区域, 在地理纬度和日期相同或相近的条件下, 对  $R_n$  大小起决定性作用的因素是日照时数<sup>[29]</sup>, 亦即大气日平均透过率(日照时数, 晴天天文辐射抵达地面的附加比例常数, 阴天天文辐射抵达地面的比例常数 3 者的函数)。

## 3 结果和讨论

### 3.1 降水 and 气温变化

研究结果表明(图 1), 贵阳站、安顺站和黔西站的多年平均降水量分别为 1 125.6, 1 326.9 和 971.4 mm。线性回归趋势表明, 3 站降水量大致以 23.6, 14.3 和 14.7 mm/10 a 的速率在下降。Mann—Kendall 非参数方法对降水时间序列趋势分析表明, 贵阳站、安顺站、黔西站的统计量  $Z$  值分别为 -1.54, -1.03 和 -0.76, 且均小于显著水平  $\alpha = 0.05$  和  $\alpha = 0.1$  下的  $Z$  值, 即没有显著的趋势性。

对气温时间序列的分析(图 2)和 Mann—Kendall 非参数方法对气温时间序列趋势分析表明, 贵阳站年平均气温时间序列  $Z = -1.48$ , 即不存在显著的趋势性。安顺站和黔西站年平均气温时间序列的  $Z$  值分别为 2.09 和 4.33,  $\beta$  值分别为 0.007 1 和 0.017 9, 即在置信水平  $\alpha = 0.05$  下, 二站年平均气温上升趋势性显著, 即每 10 a 约分别上升 0.07 和 0.17 °C, 在过去 60 a 内约累计上升 0.4 和 1 °C, 黔西站气温升高明显。贵阳、安顺、黔西 3 观测站年最高气温均没有明显的趋势性, 但年最低气温时间序列上升趋势明显,  $Z$  值分别为 2.83, 3.35 和 4.42;  $\beta$  值分别为 0.030 4, 0.037 5 和 0.055 0, 亦证明该流域气候呈现一定的暖化趋势。

综上所述,猫跳河流域年降水量,年最高气温没有显著的变化趋势。但年平均气温和年最低气温呈现较为显著的上升趋势,在过去 60 a 内气温升高约 0.4~1 °C。

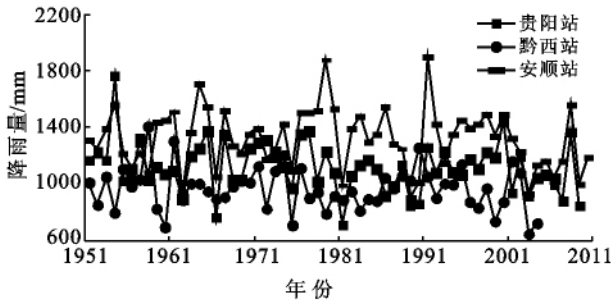


图 1 猫跳河流域贵阳站、安顺站和黔西站年降水量时间序列

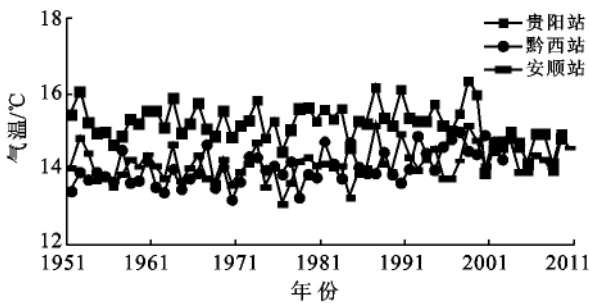


图 2 猫跳河流域贵阳站、安顺站和黔西站年均气温时间序列

### 3.2 日照时数和相对湿度分析

对流域日照时数和相对湿度时间序列的分析可以对流域辐射能量以及水文循环的主要变量—蒸散发的基本状况及变化趋势有初步的把握。

研究结果(图 3)表明,贵阳站、安顺站、黔西站多年平均日照时数分别为 1 214, 1 273 和 1 213 h/a。线性回归趋势分析表明,贵阳站和黔西站的年日照时数分别以 10 和 8.2 h/a 的速率递减,而安顺站的年日照时数的增幅不明显,仅以 1.3 h/a 的速率递减。Mann—Kendall 趋势检验表明,贵阳站和黔西站的年日照时数时间序列  $Z$  值分别为  $-7.04$  和  $-5.09$ ,  $\beta$  值分别为  $-10.1875$  和  $-8.1065$ ,即存在显著的下降趋势。安顺站日照时数的  $Z = -1.16$ ,不存在明显的趋势。Mann—Kendall 趋势检验与线性回归趋势分析一致。贵阳站和黔西站日照时数的减小可能和全球变暗(Global dimming)背景下,城市化的快速发展有关系。

随着城市化的进程,大气中的悬浮物,尘埃的增加可导致大气对太阳辐射的折射和反射增加、能见度降低、云量增多,更多的太阳辐射能量直接反射回大气层。

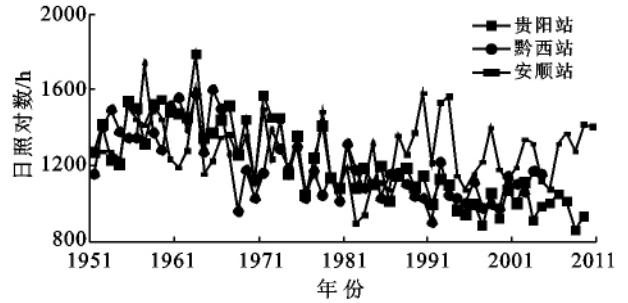


图 3 猫跳河流域贵阳站、安顺站和黔西站日照时数时间序列

对相对湿度的时间序列分析表明(图 4),贵阳站、安顺站、黔西站的多年平均相对湿度分别为 77.3%, 80.2% 和 81.2%。线性回归和 Mann—Kendall 趋势检验表明,贵阳站和黔西站的年平均相对湿度没有显著的变化趋势。安顺站的  $Z = -2.76$ ,  $\beta = -0.0408$ ,即存在显著的下降趋势。

相关研究表明,日照时数和相对湿度是流域潜在蒸散发的主要控制变量。猫跳河流域日照时数的持续下降(贵阳站和黔西站)有可能减小地表直接辐射能量,从而减小地表的蒸发潜力,即潜在蒸散发。而相对湿度的持续减小(安顺站)则是空气干燥力增大的体现,地表潜在蒸散发则有可能增大。风速的年度变化没有明显的趋势性(贵阳站和安顺站,图略),即不会对潜在蒸散发和实际蒸散发的变化发挥主要作用。

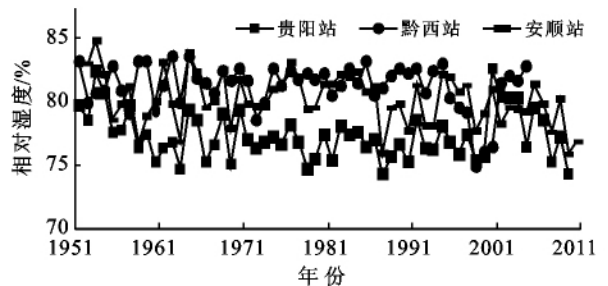


图 4 猫跳河流域贵阳站、安顺站和黔西站相对湿度时间序列

### 3.3 参考作物蒸发

由贵阳、安顺和黔西 3 站近 60 a 的日参考作物蒸发时间序列的计算结果可以看出,贵阳站、安顺站和黔西站的日平均参考作物蒸发分别为 2.7, 2.6 和 2.5 mm/d。日参考作物蒸发时间序列随月份呈周期性变化规律。

日参考作物蒸发量高值出现在每年夏季(5—7月),而冬季(11月至次年1月)参考作物蒸发量较小,这与相应季节的辐射和水热状况相一致。雨季(6—7月)土壤水分充足,且地气系统净辐射通量在一年中达到最大,参考作物蒸发量在夏季达到最大。

而冬季土壤水分较小,净辐射能量亦较小,参考作物蒸发量在年度当中达到最小。

图 5 显示了年参考作物蒸发量的时间序列及变化趋势。结果表明,贵阳站、安顺站和黔西站的多年平均年参考作物蒸发分别为 982.9、938.4 和 895.4 mm。贵阳站略高于安顺站约 45 mm。其主要原因可能为:虽然安顺站的年日照时数 1 273.1 h/a,略大于贵阳站 1 213.9 h/a,但是,贵阳站的多年平均相对湿度为 77.3%,低于安顺站的 80.2%,且贵阳站的多年平均气温为 15.2 °C,高于安顺站的 14.1 °C。

贵阳站较低的平均相对湿度和较高的气温导致了较大的空气干燥力,从而导致 FAO56 公式的外动力项增大,且其贡献抵消掉辐射项略小的效应,最终显示了略高的参考作物蒸发量。

黔西站的年参考作物蒸发量最小,主要由 2 个因素所导致:其一,由于所处地理纬度为 3 站中最高,因此使其具有较少的年日照时数;其二,具有最大的多年平均相对湿度(81.2%),反映了外动力导致的蒸发能力相对较小,最终导致黔西站相对较小的年参考作物蒸发量。

Mann—Kendall 趋势检验表明,阳站的年参考作物蒸发时间序列  $Z = -3.66$ ,  $\beta = -1.636 4$ , 呈现显著的下降趋势;安顺站的  $Z = 0.68$ , 即没有明显的变化趋势;黔西站的  $Z = -3.88$ ,  $\beta = -2.044 1$ , 即存在显著的下降趋势。贵阳和黔西 2 站年参考作物蒸发减小的趋势和日照时数减小的趋势一致。而安顺站线性回归所呈现的微弱上升趋势和该站相对湿度的减小,亦即空气干化有关系。

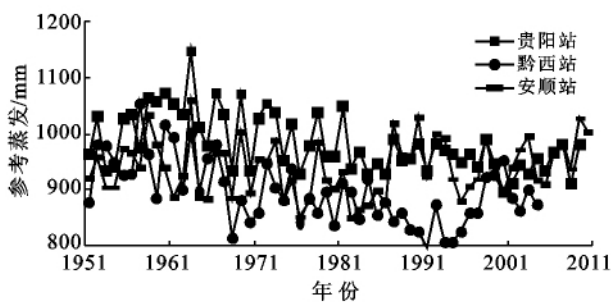


图 5 猫跳河流域贵阳站、安顺站和黔西站参考作物蒸发时间序列

## 4 结论

(1) 猫跳河流域年降水量没有显著的变化趋势;流域的年最高气温没有显著的变化趋势。但年平均气温和年最低气温有显著的上升趋势,安顺站和黔西站的年平均气温分别以 0.07 和 0.17 °C/10 a 的速率

上升。在过去 60 a 间,流域平均气温累计上升约 0.4 ~ 1 °C,流域呈现一定程度的暖化趋势;流域的平均年日照时数在 1 200 ~ 1 300 h。贵阳站和黔西站的年日照时数呈现明显的下降趋势,大致以 8 ~ 10 h/a 的速率递减。日照时数的减小可能和城市化进程所导致的悬浮物、尘埃增加,能见度降低,云量增多有关系;流域多年平均相对湿度在 77% ~ 81%。安顺站的平均相对湿度呈显著的下降趋势。

(2) 流域日参考作物蒸发在 2.5 ~ 2.7 mm/d。多年平均参考作物蒸发在 900 ~ 1 000 mm。贵阳站和黔西站年参考作物蒸发以 2 mm/a 的速率下降,且下降趋势显著。安顺站的年参考作物蒸发呈微弱上升趋势。流域参考作物的下降趋势与日照时数的减小相一致。日参考作物蒸发时间序列与季节呈周期性变化规律。

综上所述,猫跳河流域总体上呈现一定程度的暖化现象,但是气候变化对流域水量和水质的影响有限。流域水文过程和水生态、水环境系统的改变主要来自人类活动的影响,如水电梯级开发,人口增加,城市化进程等因素。

致谢:中国气象科学数据共享服务网提供了本研究所需的气象观测数据,美国德克萨斯大学奥斯汀分校地球科学学院的龙笛博士对参考蒸发的分析提供帮助,在此一并致谢!

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 黄真理. 三峡水库水环境保护研究及其进展[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2006, 38(5): 7-15.
- [2] 孔繁翔, 马荣华, 高俊峰, 等. 太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践[J]. 湖泊科学, 2009, 21(3): 314-328.
- [3] 钟华平, 刘恒, 耿雷华. 怒江水电梯级开发的生态环境累积效应[J]. 水电能源科学, 2008, 26(1): 52-55.
- [4] 陈丽晖, 何大明. 澜沧江—湄公河水电梯级开发的生态影响[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 577-586.
- [5] 刘树坤. 刘树坤访日报告: 河流整治与生态修复(五)[J]. 海河水利, 2002(5): 64-66.
- [6] 龙笛, 潘巍. 河流保护与生态修复[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(2): 21-25.
- [7] 傅开道, 何大明, 陈武, 等. 电站建设对澜沧江—湄公河泥沙年内分配的影响[J]. 地理学报, 2007, 62(1): 14-21.
- [8] 黎慧卉, 刘丛强, 汪福顺, 等. 猫跳河流域梯级水库磷的夏季变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(4): 368-372.
- [9] 朱文孝. 猫跳河流域开发与环境质量变异[J]. 长江流

- 域资源与环境,1994,3(4):371-377.
- [10] 鲁春霞,刘铭,曹学章,等. 中国水利工程的生态效应与生态调度研究[J]. 资源科学,2011,33(8):1418-1421.
- [11] 李亦秋,鲁春霞,邓欧,等. 猫跳河流域梯级开发的生态效应区域响应[J]. 资源科学,2011,33(8):1454-1461.
- [12] 许月卿,彭建. 贵州猫跳河流域土地利用变化及其对土壤侵蚀的影响[J]. 资源科学,2008,30(8):1218-1225.
- [13] 彭建,蔡运龙,王秀春. 基于景观生态学的喀斯特生态脆弱区土地利用/覆被变化评价:以贵州猫跳河流域为例[J]. 中国岩溶,2007,26(2):137-143.
- [14] 彭建,蔡运龙,何钢,等. 喀斯特生态脆弱区猫跳河流域土地利用/覆被变化研究[J]. 山地学报,2007,25(5):566-576.
- [15] 彭建,蔡运龙,Verburg P H. 喀斯特山区土地利用/覆被变化情景模拟[J]. 农业工程学报,2007,23(7):64-70.
- [16] 许月卿,蔡运龙. 贵州省猫跳河流域土壤侵蚀量计算及其背景空间分析[J]. 农业工程学报,2006,22(5):50-54.
- [17] 王秀春,黄秋昊,蔡运龙,等. 贵州省猫跳河流域耕地空间分布格局模拟[J]. 地理科学,2007,27(2):188-192.
- [18] 李干蓉,陈椽,刘丛强,等. 猫跳河流域平水期浮游植物与水质评价[J]. 海南师范大学学报,2009,22(2):209-213.
- [19] 杨汉奎. 猫跳河流域持续发展的协调度[J]. 山地研究,1997,15(2):77-80.
- [20] 邓慧平,吴正方,唐来华. 气候变化对水文和水资源影响研究综述[J]. 地理学报,1996,51(S):161-170.
- [21] 李林,汪青春,张国胜,等. 黄河上游气候变化对地表水的影响[J]. 地理学报,2004,59(5):716-722.
- [22] Mann H B. Non-parametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 33(12):245-259.
- [23] Kendall M G. Rank Correlation Measures[M]. London:Charles Griffin, 1975:202.
- [24] Walter I A, Allen R G, Elliott R, et al. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation[R]. USA:Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers (Final Report), 2005.
- [25] Monteith J L. Evaporation and environment [C] // Symposia of the Society for Experimental Biology. Cambridge: Cambridge University Press, 1965: 205-224.
- [26] Priestley C H B, Taylor R J. Assessment of surface heat-flux and evaporation using large-scale parameters [J]. *Monthly Weather Review*, 1972, 100(2):81-92.
- [27] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements[M]. Italy Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, 1998:300.
- [28] Long D, Singh V P. Integration of the GG model with SEBAL to produce time series of evapotranspiration of high spatial resolution at watershed scales[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(1/4):D21128. 1-D21128. 22.
- [29] Long D, Gao Y C, Singh V P. Estimation of daily average net radiation from MODIS data and DEM over the Baiyangdian watershed in North China for clear sky days Integration of the GG model with SEBAL to produce time series of evapotranspiration of high spatial resolution at watershed scales[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 388(3/4):217-233.