

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.06.002

1960—2005 年湄公河流域径流量演变趋势

周 婷 ,于福亮 ,李传哲 ,柴增凯

(中国水利水电科学研究院水资源研究所 北京 100038)

摘要 :根据湄公河流域 6 个代表性水文站 1960—2005 年的实测资料 ,利用滑动平均法和 Mann-Kendall 非参数检验法对径流量变化趋势进行了分析 .结果表明 :湄公河流域径流量年际变化较平缓 ,趋势不显著 ;年代变化中 ,上游 3 个站点的变化趋势较小 ,而下游 3 个站点呈现先减小后显著上升的趋势 ;径流量年内分配极不均匀 ,下游地区来水比上游地区更加向汛期集中 ,月径流量有显著变化趋势的主要发生在非汛期月份 ,大部分站点汛期呈下降趋势 ,非汛期呈上升趋势 .

关键词 :径流量 ;演变趋势 ;滑动平均法 ;Mann-Kendall 检验 ;湄公河流域

中图分类号 :TV121⁺.4 **文献标志码 :**A **文章编号 :**1000-1980(2010)06-0608-06

水是自然资源的重要组成部分 ,是生物赖以生存的物质基础 ,也是社会经济发展的基本支撑条件 .河川径流作为水资源的重要组成部分 ,对流域水资源的开发利用、配置和保护具有重要意义 .近些年来 ,随着全球气候变化以及人类活动的影响 ,河川径流量的变化趋势在水科学研究中的重要地位更加突显 .

澜沧江-湄公河发源于中国青藏高原唐古拉山北麓 ,自北向南先后流经中国的青海、西藏和云南以及缅甸、老挝、泰国、柬埔寨和越南 ,在越南的胡志明市西部入海 ,是东南亚地区最大的国际河流 ,在中国境内称澜沧江 ,出境后称湄公河 .河流上下游较宽阔 ,中游狭窄 ,流域内地形起伏剧烈 ,地势复杂 .从河源到河口 ,干流全长 4 880 km ,总流域面积 81.1 万 km² ,总落差 5 167 m ,平均比降 0.104% ,多年平均径流量 4 750 亿 m³ ,入海多年平均流量 1.2 万 m³/s .湄公河流域位于亚洲热带季风区的中心 ,为雨水、地下水、冰雪融水混合补给类型的河流 ,受地形、纬度、海拔、西南和东南季风等多种因素影响 ,其河川径流特征在时空分布上也呈现出多样性和区域差异性^[1] .湄公河作为东南亚唯一穿越 5 个国家的重要国际河流 ,是沿岸各国生活用水和工农业用水的重要保障 .2009 年入秋以来 ,在中国西南地区遭受严重干旱的同时 ,湄公河次区域有关国家也出现严重旱情 .东南亚 5 国 6 500 万人口视为生命线的湄公河水位下降到近 20 年来的最低点 ,其中湄公河北部的水位降至历史最低水平 .由于干旱 ,澜沧江-湄公河流域的粮食生产、旅游、航运、渔业等都受到了严重影响 .因此 ,本文采用滑动平均法和 Mann-Kendall 非参数检验法量化分析湄公河流域径流量的变化特征及演变趋势 ,有助于对流域水资源的时空分布有更加全面的认识 ,同时也为流域未来水资源合理调配和使用提供科学依据 .

1 研究数据与资料

综合考虑地理位置的代表性以及资料的完整性和同步性 ,选取湄公河流域干流上 6 个代表性水文站(清盛、琅勃拉邦、万象、穆达汉、巴色、上丁)1960—2005 年逐日实测径流资料作为研究基础资料 .从统计意义上考虑 ,46 a 的时间序列能够获得比较可信的分析结果 .6 个水文站及流域相关信息见表 1 ,站点分布如图 1 所示 .

表 1 湄公河流域代表水文站

Table 1 Information of representative hydrological stations in Mekong River basin

水文站	集水面积/ 万 km ²	纬度 (北纬)(°)	经度 (东经)(°)	所在国家
清 盛	18.9	20.27	100.08	泰 国
琅勃拉邦	26.8	19.89	102.14	老 挝
万 象	29.9	17.93	102.62	老 挝
穆达汉	39.1	16.58	104.74	泰 国
巴 色	54.5	15.17	105.80	老 挝
上 丁	63.5	13.53	105.95	柬埔寨

2 研究方法

2.1 滑动平均法

滑动平均法采用确定时间序列的平滑值来显示变化趋势. 对样本量为 n 的序列 x 其滑动平均序列表示为

$$\hat{x}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_{i+j-1} \quad (j = 1, 2, \dots, n - k + 1) \quad (1)$$

其中 k 为滑动长度. 经过滑动平均后, 序列中短于滑动长度的周期大大削弱, 独立性和自由度降低, 显现出变化趋势^[2].

2.2 Mann-Kendall 非参数统计检验方法

Mann-Kendall 非参数统计检验方法(以下简称 Mann-Kendall 法)可以进行径流量趋势的检验. 非参数检验亦称无分布检验, 样本不必遵从某一特定规律, 同时也不受个别异常值的干扰, 能客观地表征样本序列的整体变化趋势, 在国内外的气候研究和河流径流量变化趋势研究中得到广泛的应用^[3-8].

对于具有 n 个样本量的时间序列 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 构造一秩序列:

$$b = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j) \quad (2)$$

其中
$$\text{sign}(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases}$$

本研究基于统计值:

$$Z = \begin{cases} (b - 1) / \sqrt{n(n - 1)(2n + 5) / 18} & b > 0 \\ 0 & b = 0 \\ (b + 1) / \sqrt{n(n - 1)(2n + 5) / 18} & b < 0 \end{cases} \quad (3)$$

对于随机序列 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 当 n 增加时 Z 很快收敛于标准正态分布. 当原假设为该序列无趋势时, 一般采用双边趋势检验, 在给定显著性水平 α 下, 于正态分布表中查出临界检验值 $Z_{\alpha/2}$, 当 $|Z| < Z_{\alpha/2}$ 时, 原假设被接受, 表示序列变化趋势不显著; 当 $|Z| > Z_{\alpha/2}$ 时, 拒绝原假设, 认为序列变化趋势显著. Z 为正时表示序列呈上升趋势, Z 为负时表示序列呈下降趋势. Z 的绝对值越大, 说明序列变化趋势越显著, 对显著性水平 $\alpha = 0.05$, $Z_{\alpha/2} = 1.96$.

3 结果与分析

3.1 年际变化

3.1.1 年际变化特征值

反映年径流量年际变化幅度和不同径流量出现概率的特征值主要是年径流量变差系数 C_v 、年径流量年际极值比和年径流量偏态系数 C_s ^[9-10]. 从表 2 可以看出, 湄公河流域 6 个水文站年径流量变差系数 C_v 值都在 0.15 左右, 年际变化幅度基本相同, 丰枯变化比较平缓. 6 个站点年际极值比基本在 2 左右, 表明最丰年径流量为最枯年径流量的 2 倍左右, 这也说明年际变化幅度较小. 但从偏态系数 C_s 值可以看出, 湄公河不同河段的大小径流量出现概率有较大差别, 6 个站点为正偏

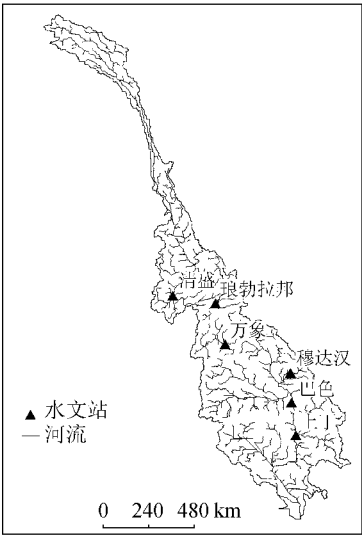


图 1 湄公河流域代表水文站分布

Fig. 1 Distribution of representative hydrological stations in Mekong River basin

表 2 湄公河流域代表水文站年径流量年际变化特征值

Table 2 Eigenvalues of inter-annual variation of runoffs at representative hydrological stations in Mekong River basin

水文站	C_v	C_s	最大径流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	最小径流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	年际 极值比
清 盛	0.15	0.85	4017	1933	2.08
琅勃拉邦	0.15	0.18	5488	2422	2.27
万 象	0.15	0.23	6111	2755	2.22
穆达汉	0.16	0.13	10495	5256	2.00
巴 色	0.15	0.01	12803	6835	1.87
上 丁	0.16	0.00	17866	8634	2.07

态分布或者正态分布,河段小于平均流量的低流量概率较高,其中以清盛站 C_s 值最大,高达0.85,从上游到下游依次减小,巴色站和上丁站基本接近正态分布,河段小于与大于平均流量的概率相当。

3.1.2 年际变化趋势

从6个代表性水文站1960—2005年径流的变化过程以及线性回归趋势线可以看出(图2),各水文站径流量变化有一定的相似性,但是仍然存在差异。清盛、琅勃拉邦、万象和巴色4个站点年径流量呈下降的趋势,穆达汉和上丁年径流量则显示出微小的上升趋势。表3为Mann-Kendall法检验年径流量年际变化趋势结果,6个站点年径流量变化均未达到显著水平,年际变化较平缓^[1]。

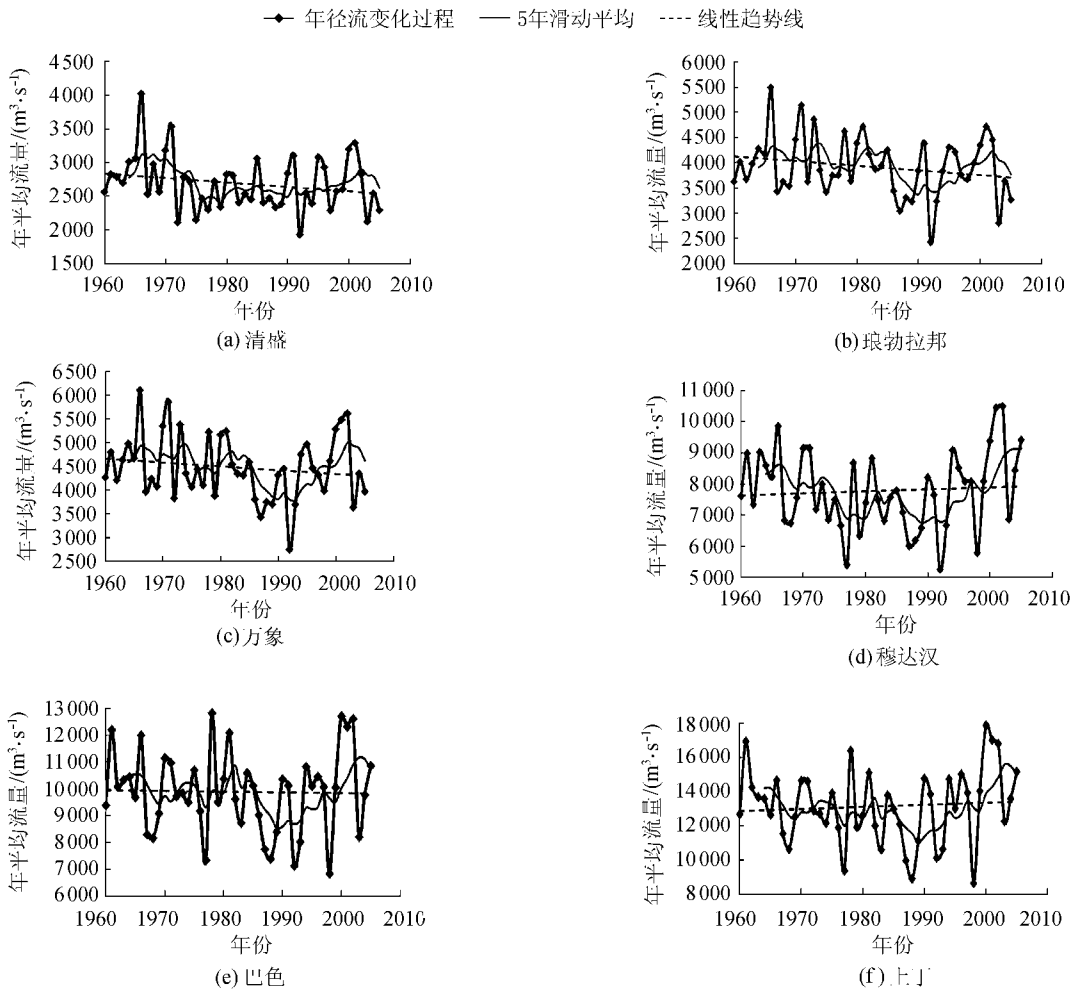


图2 湄公河流域代表水文站年径流变化过程及趋势

Fig. 2 Variation process and trend of annual runoffs at representative hydrological stations in Mekong River basin

3.1.3 年际变化阶段性

由以上的分析可知,6个站点年际变化并没有明显的趋势性,采用滑动平均法可以更加明显地分辨出径流量年际变化的阶段性特征。从图2所示5年滑动平均曲线可以看出,湄公河流域6个站点1960—2005年径流变化大致都经历了3个阶段,但由于降水、气温以及人类活动等的空间差异性,不同站点的丰枯水阶段不同。清盛和穆达汉在20世纪60年代至70年代中期为丰水阶段,70年代后期至90年代后期为枯水阶段,90年代末期至21世纪初为丰水阶段。琅勃拉邦、万象、巴色和上丁则是在20世纪60年代至80年代中期为丰水阶段,80年代后期至90年代后期为枯水阶

表3 湄公河流域代表水文站年径流变化趋势

Table 3 Trend of perennial runoffs at representative hydrological stations in Mekong River basin

水文站	多年平均流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	显著性 ($\alpha = 0.05$)	Z	变化趋势
清盛	2688	不显著	-1.12	减小趋势
琅勃拉邦	3913	不显著	-0.85	减小趋势
万象	4485	不显著	-0.93	减小趋势
穆达汉	7782	不显著	0.28	增加趋势
巴色	9880	不显著	-0.19	减小趋势
上丁	13133	不显著	0.49	增加趋势

段 90 年代末期至 21 世纪初为丰水阶段.

3.2 年代变化

统计 6 个水文站年平均流量年代变化趋势,如图 3 所示(图中,1960s 表示 20 世纪 60 年代,其中 2000s 代表 2000—2005 年).总体来看,上游 3 个站点的变化趋势较小,而下游 3 个站点呈现先减小后显著上升的趋势.其中 20 世纪 60 年代到 70 年代,6 个站点年平均流量变化都较小;70 年代到 80 年代,各站点年平均流量均下降,其中上丁站下降趋势比较明显;80 年代到 90 年代期间,除上丁站上升趋势较显著外,其他站点年平均流量变化都十分微小;从 90 年代到 21 世纪初,6 个站点年平均流量均呈上升趋势,其中上游的清盛、琅勃拉邦和万象 3 个站点上升较小,下游的穆达汉、巴色和上丁 3 个站点上升趋势十分明显.

3.3 年内变化

3.3.1 年内分配

湄公河流域为亚热带季风区的中心,径流主要来自降水,受季风气候影响,一年出现一次汛期,径流量主要集中于汛期.上下游年内分配特征类似,流量过程线总体呈单峰状.6 个站点多年月平均径流量占全年比例如表 4 所示,可以看出湄公河径流量年内分配极不均匀.上游 3 个站点的最大径流量出现在 8 月,占年径流量的 20% 左右,最小径流量出现在 3 月,占年径流量的 2.5% 左右,汛期 6 个月(6—11 月)径流量占全年的 80% 左右,非汛期 6 个月(12—5 月)径流量占全年的 20%.下游 3 个站点的最大径流量除穆达汉站以外都出现在 9 月,占年径流量的 23% 左右,最小径流量都出现在 4 月,占年径流量的 1.5% 左右,汛期 6 个月(6—11 月)径流量占全年的 87% 左右,非汛期 6 个月(12—5 月)径流量占全年的 13%.由于汇流时间的差异,下游站点流量的时间相对上游站点都要滞后,而且从统计数据中可以看出,上游站点最大月径流量与最小月径流量之比大约为 8,而下游站点高达 15,汛期与非汛期的比值也更大,因此下游相对上游站点年内分配更加不均匀.

表 4 1960—2005 年湄公河流域代表水文站多年月平均径流量年内分配比例

Table 4 Ratio of intra-annual distribution of monthly runoffs at representative hydrological stations in Mekong River basin during 1960-2005							%
月份	清盛	琅勃拉邦	万象	穆达汉	巴色	上丁	
1	3.57	3.55	3.34	2.61	2.37	2.29	
2	2.89	2.68	2.61	2.08	1.86	1.71	
3	2.60	2.24	2.26	1.80	1.59	1.38	
4	2.84	2.31	2.31	1.77	1.57	1.36	
5	4.22	3.45	3.39	2.76	2.52	2.25	
6	7.78	6.69	6.55	7.89	7.52	6.86	
7	14.95	14.10	13.43	15.19	14.43	13.88	
8	19.95	21.20	20.83	22.66	22.61	22.90	
9	16.98	18.90	20.35	21.83	22.81	23.61	
10	11.68	11.95	12.43	11.63	12.78	13.64	
11	7.69	7.93	7.78	6.10	6.43	6.58	
12	4.86	4.99	4.73	3.67	3.49	3.55	
汛期	79.02	80.78	81.37	85.30	86.59	87.47	
非汛期	20.98	19.22	18.63	14.70	13.41	12.53	

3.3.2 年内变化趋势

采用 Mann-Kendall 法对 6 个水文站 1960—2005 年各月径流量的变化趋势进行检验,结果如表 5 所示.其中清盛站 8 月,琅勃拉邦站 2 月、11 月和 12 月的径流量下降趋势显著,穆达汉站 3 月、4 月和 5 月,巴色站 3 月和 4 月,上丁站 4 月和 5 月的径流量上升趋势显著.各站点其他月份则无显著变化.除了清盛站显著下降发生在 8 月处于汛期以外,其他站点的显著变化均发生在非汛期月份;并且上游清盛、琅勃拉邦和万象 3 个站点径流量主要是下降趋势,而下游穆达汉、巴色和上丁 3 个站点径流量主要是上升趋势.除了穆达汉站点

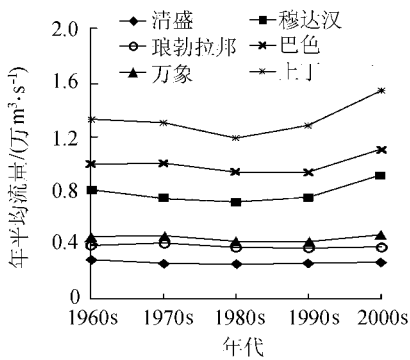


图 3 湄公河流域代表水文站年平均流量年代变化过程

Fig. 3 Inter-decadal variation of average annual runoffs at representative hydrological stations in Mekong River basin

非汛期径流量呈现显著上升的趋势外,其他站点汛期和非汛期径流量都没有显著变化.但总体来看,汛期主要是下降趋势,而非汛期大部分是上升趋势^[12].

表5 湄公河流域代表水文站径流量年内变化趋势 Mann-Kendall 法检验结果

Table 5 Results of Mann-Kendall tests on intra-annual variation trend of runoffs at representative hydrological stations in Mekong River basin

月份	清盛		琅勃拉邦		万象		穆达汉		巴色		上丁	
	Z	趋势	Z	趋势	Z	趋势	Z	趋势	Z	趋势	Z	趋势
1	-0.21	—	-1.86	—	-1.61	—	0.48	—	-0.85	—	0.95	—
2	-0.22	—	-2.4	↓	-1.44	—	1.26	—	0.46	—	1.47	—
3	1.86	—	-1.01	—	0.15	—	2.23	↑	2.05	↑	1.21	—
4	1.72	—	-1.00	—	1.88	—	4.04	↑	3.73	↑	2.52	↑
5	1.96	—	1.18	—	1.79	—	3.15	↑	1.70	—	2.00	↑
6	-0.28	—	-0.44	—	-0.48	—	-0.28	—	-0.70	—	-0.34	—
7	0.15	—	0.68	—	0.59	—	1.00	—	0.46	—	0.30	—
8	-2.63	↓	-1.44	—	-1.61	—	0.00	—	0.38	—	0.49	—
9	-0.87	—	-0.69	—	-0.47	—	0.32	—	0.45	—	0.93	—
10	-0.92	—	-1.59	—	-1.46	—	-0.61	—	-1.17	—	-0.64	—
11	-1.25	—	-2.05	↓	-2.03	↓	-0.78	—	-1.67	—	-1.14	—
12	-0.59	—	-2.51	↓	-2.43	↓	-0.32	—	-1.18	—	0.40	—
汛期	-1.63	—	-0.49	—	-0.81	—	0.02	—	-0.47	—	0.04	—
非汛期	1.41	—	-1.84	—	-0.83	—	2.54	↑	1.16	—	1.76	—

注:—表示无显著变化;↑表示显著上升趋势;↓表示显著下降趋势.

4 结 论

a. 从年际变化来看,6个水文站年径流量变差系数都在0.15左右,年际极值比基本在2左右,年际变化幅度较小.清盛、琅勃拉邦、万象和巴色4个站点年径流量在1960—2005年呈现弱下降趋势,穆达汉站和上丁站则显示出弱上升趋势,但都不显著;不同站点都经历了3个不同的丰枯水阶段.

b. 从年代变化来看,20世纪60年代到70年代径流量变化都比较小,70年代到80年代6个站点径流量均下降,80年代到90年代除上丁站上升趋势较显著外,其他站点径流量变化都十分微小;从90年代到21世纪初,6个站点径流量均呈上升趋势,并且从上游到下游上升趋势越来越明显.

c. 从年内变化来看,最大月径流量与最小月径流量之比为8~15,年内分布极不均匀;下游地区来水比上游地区更加向汛期集中;月径流量有显著变化趋势的主要发生在非汛期月份,上游主要是下降趋势,下游主要是上升趋势,大部分站点汛期呈下降趋势,非汛期呈上升趋势.

参考文献:

[1] 何大明, 汤奇成. 中国国际河流[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 165-174.

[2] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2版. 北京: 气象出版社, 2007: 41-42.

[3] 张建云, 章四龙, 王金星, 等. 近50年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 230-234. (ZHANG Jian-yun, ZHANG Si-long, WANG Jin-xing, et al. Study on runoff trends of the six larger basins in China over the past 50 years [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(2): 230-234. (in Chinese))

[4] 宋小燕, 穆兴民, 高鹏, 等. 松花江哈尔滨站近100年来径流量变化趋势[J]. 自然资源学报, 2009, 24(10): 1803-1809. (SONG Xiao-yan, MU Xing-min, GAO Peng, et al. Trends of runoff variation from 1900 to 2005 at Harbin station of Songhua River [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(10): 1803-1809. (in Chinese))

[5] 郝璐, 王静爱, 高路, 等. 老哈河流域近40年径流变化趋势分析[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2008, 44(6): 629-634. (HAO Lu, WANG Jing-ai, GAO Lu, et al. On the runoff in Laohahe River Basin in the last 40 years [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2008, 44(6): 629-634. (in Chinese))

[6] 李春晖, 郑小康, 杨志峰, 黄河天然径流量变化趋势及其影响分析[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2009, 45(1): 80-85. (LI Chun-hui, ZHENG Xiao-kang, YANG Zhi-feng. Trends of annual natural runoff in the Yellow River Basin [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2009, 45(1): 80-85. (in Chinese))

[7] 陈亚宁, 徐长春, 杨余辉, 等. 新疆水文水资源变化及对区域气候变化的响应[J]. 地理学报, 2009, 64(11): 1331-1341. (CHEN

Ya-ning ,XU Chang-chun ,YANG Yu-hui ,et al. Hydrology and water resources variation and its responses to regional climate change in Xinjiang[J]. Acta Geographica Sinica 2009 64(11) :1331-1341.(in Chinese))

[8] 田菲 ,韩淑敏 ,胡玉昆 .海河流域典型山区子流域近 34 年气候及径流变化趋势[J]. 中国农业气象 ,2009 ,30(1) :60-65 .
(TIAN Fei ,HAN Shu-min ,HU Yu-kun . Variance tendency of precipitation and runoff in mountain watershed of Hai River Basin in resent 34 years[J]. Chinese Journal of Agrometeorology 2009 30(1) :60-65.(in Chinese))

[9] 叶守泽 ,詹道江 .工程水文学[M].北京 :中国水利水电出版社 ,2000 :178-179 .

[10] 高伟 ,王西琴 ,曾勇 .太湖流域西苕溪 1972—2008 年径流量变化趋势与原因分析[J]. 中国农村水利水电 ,2010(6) :33-37 .
(GAO Wei ,WANG Xi-qin ,ZENG Yong . A trend analysis of observations of runoff in the Xitiaoxi River in the Taihu Lake between 1972 and 2008[J]. China Rural Water and Hydropower 2010(6) :33-37.(in Chinese))

[11] 陈亚宁 ,徐长春 ,郝兴明 ,等 .新疆塔里木河流域近 50a 气候变化及其对径流的影响[J]. 冰川冻土 ,2008 ,30(6) :921-929 .
(CHEN Ya-ning ,XU Chang-chun ,HAO Xing-ming ,et al. Fifty-year climate change and its effect on annual runoff in the Tarim River Basin ,China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology 2008 30(6) :921-929.(in Chinese))

[12] 邹振华 ,李琼芳 ,夏自强 ,等 .人类活动对长江径流量特性的影响[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2007 ,35(6) :622-626 .
(ZOU Zhen-hua ,LI Qiong-fang ,XIA Zi-qiang ,et al. Human-induced alterations in runoff of the Yangtze River[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences 2007 35(6) :622-626.(in Chinese))

Evolution trend of runoff in Mekong River basin during 1960-2005

ZHOU Ting , YU Fu-liang , LI Chuan-zhe , CHAI Zeng-kai

(Department of Water Resources , China Institute of Water Resources and
Hydropower Research , Beijing 100038 , China)

Abstract : Based on the measured data at 6 representative hydrological stations in Mekong River basin during 1960-2005 , the moving average method and the Mann-Kendall non-parametric test method were employed to analyze the trend of its runoffs . The results show that the inter-annual variation of the runoffs is gentle and the trend is not significant . The inter-decadal variation of the runoffs at the upstream 3 stations is small , but that at the downstream 3 stations rapidly increases after a slight decline . The intra-annual variation of the runoffs is great , and the inflow from the downstream is more concentrated than that from the upstream during flood season . Most significant variation of monthly runoffs occurs during non-flood season . The runoffs at most stations decrease during flood season and increase during non-flood season .

Key words : runoff ; variation trend ; moving average method ; Mann-Kendall test ; Mekong River basin

.....

《水利水电科技进展》征订启事

(邮发代号 28-244 , CN32-1439/TV ,ISSN1006-7647 , 双月刊 ,A4 开本)

《水利水电科技进展》由河海大学主办 ,是全国中文核心期刊 ,中国科技核心期刊 ,全国水利系统优秀期刊 ,华东地区优秀期刊 ,江苏省优秀期刊 .主要刊登水科学、水工程、水资源、水环境、水管理方面的科技论文 ,主要栏目有水问题论坛、研究探讨、工程技术、水管理、专题综述、国外动态等 ,适合与水利、水电、水科学、水工程、水资源、水环境有关的科研、工程、管理人员以及大专院校师生阅读 .

本刊由邮局发行 ,邮发代号 28-244 ,2011 年每期定价 10 元 ,全年 6 期共计 60 元 .可在全国各地邮局订阅 ,也可直接向编辑部订阅 .

编辑部地址 :南京市西康路 1 号 《水利水电科技进展》编辑部

邮政编码 210098

电话/传真 025-83786335

E-mail :jz@hhu.edu.cn

网址 :kbb.hhu.edu.cn/web/indexjz.asp?l_id=5