

九龙江径流 Flashiness 指数时空变化分析

黄金良^{1,2}, 张祯宇² 邵建敏³, 黄祖亚³, 罗寿泰³

(1. 福建省海陆界面生态环境重点实验室, 福建 厦门 361005;
2. 厦门大学环境与生态学院, 福建 厦门 361005; 3. 福建省水文水资源勘测局, 福建 福州 350000)

摘要:通过分析河流 Flashiness 指数的时空变异,进而评估水电开发、土地利用变化等人类活动对河流径流时空变异特征的影响。本研究选取地处东南沿海的中尺度流域——九龙江流域,基于 1967~2007 年近 40 年的水文资料,利用 Flashiness 指数、基流指数等重要水文指数,并借助 GIS、多元统计分析的方法来识别九龙江北溪与西溪两大干流流域近 40 年来径流时空变化特征及其影响因素。研究结果表明,九龙江流域近 40 年来径流特征发生显著的变化,流域面积是影响九龙江西溪和北溪径流时空变化的自然因素,大坝建设、水电开发改变了九龙江流域的水文条件,进而影响了径流量的年内分布规律及泥沙输出特征,土地利用变化是影响流域径流特征变化的潜在因子。研究结果可为流域水资源管理提供科学依据。

关键词:Flashiness 指数;径流变化;水电开发;土地利用变化;流域

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2014)03-0037-06

1 前言

河川径流是人类有限的、可利用的淡水资源的主要来源,是支撑社会、经济、生态环境和人类社会可持续发展的基础。自 20 世纪以来,由于全球气候变化和人类活动等多种因素,河川径流已经发生很大的变化,目前包括河川径流在内的水资源安全受到了极大的威胁^[1]。

径流量是反映流域水文特征的一个基本参数。掌握流域径流量时空变化特征是流域水文研究的重要内容,是进一步研究和掌握流域水文过程的前提^[2],其研究结果可为流域水资源管理和流域土地管理与决策提供重要依据。近 20 年来,世界上众多专家学者提出多种方法来对于河川径流变化特征进行分析,例如 Robertson 等(1999)、Werkhoven 等(2008)等利用流量曲线的斜率进行初步分析^[3-4],Merz(2003)利用最大洪峰流量与日均流量的时间变化分析河川径流的变化^[5]。但相关的定量研究无法排除气候变化等非人为因素的影响,为此,Baker 在 2004 年提出了 Flashiness 指数来定量分析径流的变化特征^[6],该指数的变化与气候变化引起径流量年际变化无明显相关性^[2,6],而对大坝建设、土地利用变化有较高的敏感性。目前 Flashiness 指数已被成功的用于大坝建设、土地利用变

化等对流域水文条件影响的评估^[2,6-9]。但在我国目前仍鲜见这方面的研究。

本研究选取亚热带中尺度流域——九龙江流域作为研究流域,作为漳州、龙岩、厦门三地市超过 500 万人的饮用水与工农业用水源,其区域的生态意义重大。九龙江流域,地处东南沿海,一方面,土地利用变化剧烈,大坝建设、水电开发力度大。另一方面径流变化受降水影响较大,气候变化使得径流变化特征更为复杂。本研究基于九龙江流域近 40 年的水文数据,分析 Flashiness 指数的变化趋势,旨在评估土地利用变化与大坝建设等人类活动对九龙江流域径流时空变化特征的影响,为流域水资源管理提供科学依据。

2 材料和方法

2.1 研究区域

九龙江位于东经 116°46′55″~118°02′17″,北纬 24°23′53″~25°53′38″,是福建省第二大河,流域面积 1.47×10⁴km²,地处福建省经济较为发达的东南沿海,流经农业集约化水平较高的漳州平原,由发源于龙岩梅花山一带的北溪及发源于南靖和平和县西部板寮岭的西溪两大支流构成。其中,北溪流域面积 9 803km²,西溪流域面积 3 946km²,北溪和西溪汇合于漳州,至浮宫又有

收稿日期:2013-01-16

基金项目:国家自然科学基金项目(40901100;40810069004);福建省水利厅项目(FJSW2013038)

作者简介:黄金良(1975-),男,福建惠安人,教授,博士,主要研究方向为流域过程和管理、土地利用/覆被变化的格局、过程和效应。

E-mail:jilhuang@xmu.edu.cn

南溪汇入,经厦门港入海(见图1)。

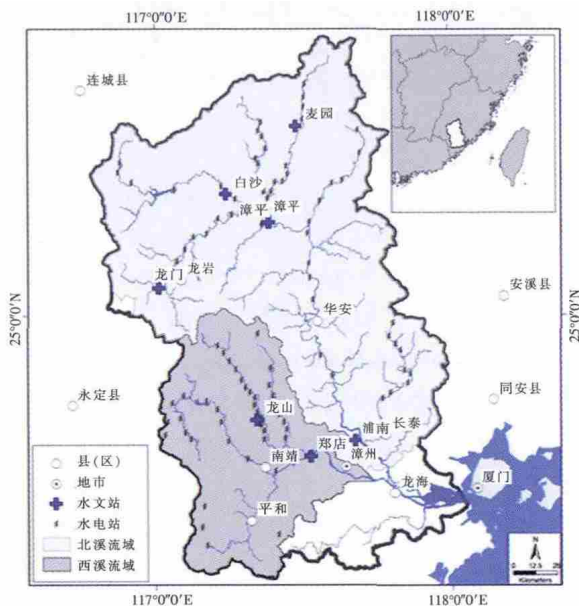


图1 研究区域概况

Fig.1 Location of the study area

九龙江北溪平均海拔在 613m 左右,其流域面积较大,平均坡度在 16.2 度左右,土地利用构成以林地为主。与北溪相比,西溪流域面积较小,年径流量较小,地势较为平缓(平均坡度在 13.8 度左右),海拔较低,农业用地、建设用地所占的比例较大(图2)。九龙江水力资源蕴藏量十分丰富,随着 1995 年北溪的万安溪水电站、1996 年西溪的鸿明电站的相继建成,九龙江流域的水电开发力度逐渐加大。目前九龙江干流和一级支流几乎已遍布小水电站和水库,在每隔数十公里的一级支流和一、两百公里长的干流内,少则有 5~6 个小水电站和水库,多则十余个小水电站和水库,对九龙江的水量有很大影响(图1)。

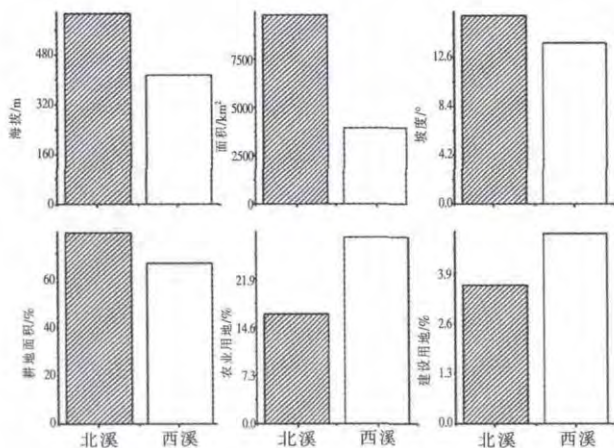


图2 九龙江北溪与西溪支流流域相关基础信息

Fig.2 The information about the Beixi and Xixi watersheds in the Jiulong River basin

2.2 GIS 分析

本研究基于 1986、1996、2002、2007、2010 年五期 ETM/TM 遥感影像数据,采用非监督分类与手工修正相结合的方式^[10]将遥感影像分为农业用地、林地、城镇建设用地三类。进一步应用 GIS 进一步提取 5 个年份北溪、西溪流域土地利用数据,籍此分析土地利用变化对流域径流变化的潜在影响。

2.3 数据来源和研究方法

(1)Flashiness 指数。水文资料取自九龙江流域的北溪(浦南、漳平)、西溪(郑店、龙山)水文站 40 年来的监测数据进行分析。利用由 Baker 等人^[6]提出的 Flashiness 指数进行分析定量分析九龙江流域径流量的时空变化,其计算公式如下:

$$FI = \frac{\sum_{i=1}^n |q_i - q_{i-1}|}{\sum_{i=1}^n q_i}$$

式中:FI 为 Flashiness 指数; q 为日均径流量; i 为天数, $n=365(366)$ 。FI 是一个无量纲的指数其值,介于 0~2 之间^[9]。FI=0 表示流域的径流恒定不变,FI 越高流域的日径流量波动就越大。

(2)基流分离及基流指数(BFI)的计算。本研究采用数字滤波法进行基流的分割,通过滤波器把输入系列通过一定的运算变换成输出系列。滤波法较传统的图解法更加客观,操作容易,执行速度快,且参数较少^[11]。本研究基于 Lyne-Hollick 算法进行基流的分离及基流指数的计算。

(3)Mann-Kendall 趋势检验。利用 Mann-Kendall 检验分析 FI 值、BFI 值的变化趋势。Mann-Kendall 趋势检验近些年来被广泛的应用于流域水文变化趋势特征的检验^[12]。Kendall τ 相关系数用非参数检验的方法来度量定序变量间的线性相关关系。Kendall τ 相关系数的计算是基于数据的秩,利用变量的计算一致对数目 U 和非一致对数目 V 。

Kendall τ 相关系数的检验统计量计算公式如下^[13]:

$$\tau = \frac{2(U-V)}{n(n-1)}$$

式中: τ 为 Mann-Kendall 相关系数; U 是一致对数目; V 为非一致对数目; n 为样本数。

当一致对数目较大、非一致对数目较小时,两变量呈较强的正相关;当一致对数目较小,非一致对数目较大时,两变量呈较强的负相关;如果一致对数目和非一致对数接近时,两变量呈较弱的相关关系。

3 结果与分析

3.1 九龙江径流 Flashiness 指数时空变化特征

1967~2007 年,九龙江北溪、西溪的 Flashiness 指数发生了明显的变化。经 Mann-Kendall 分析,其 τ 值分别为-0.424、-0.567,其绝对值都在 0.35 以上且其 p 均小于 0.001。近 40a 来九龙江流域 FI 值下降明显。北溪流域的 FI 值由 20 世纪 70 年代的 0.35 左右下降下到近年来的 0.25 左右。西溪流域的下降趋势更为明显,其 FI 值由 70 年代的 0.4 左右降到近些年来的 0.25 左右(图 3)。说明北溪与西溪年内径流变异性呈下降趋势。总体而言,西溪的径流波动性更大,表现在 FI 值比北溪更大(见表 1)。

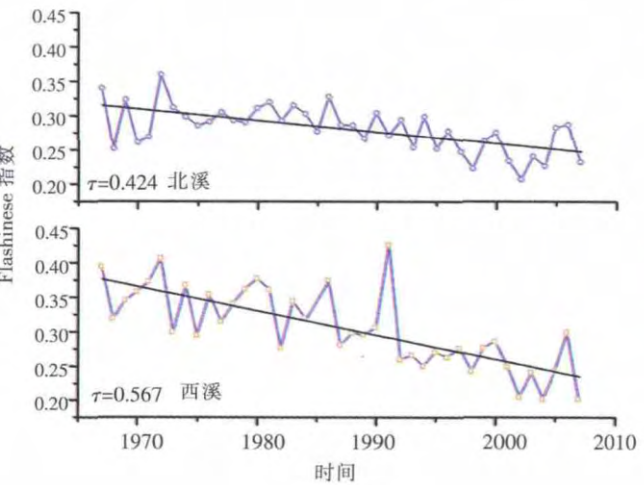


图3 1967~2007 年九龙江北溪、西溪 Flashiness 指数
Fig.3 Streamflow flashiness indexes of the Beixi and Xixi watersheds in the Jiulongjiang River basin during 1967~2007

表1 九龙江北溪、西溪1967~2007 FI 值统计特征
Table1 The statistics of Flashiness indexes of the Beixi and Xixi watersheds in the Jiulongjiang river basin during 1967~2007

	FI 最小值	FI 最大值	FI 均值	FI 标准差
北溪	0.21	0.36	0.28	0.033
西溪	0.20	0.43	0.31	0.057

近 40 年来,北溪、西溪 FI 值下降的同时,北溪、西溪的基流指数也发生明显变化 (图 4)。经 Mann-Kendall 分析,其 τ 值分别为 0.425、0.614,其绝对值都在 0.35 以上且其 p 均小于 0.001,说明北溪、西溪在近 40 年来基流指数呈显著的上升趋势。由图 4 可见,基流指数呈明显时空变异特征,即:西溪的基流指数变异性明显高于北溪,1995 年以后西溪与北溪基流指

数高于 1995 年之前的基流指数 (图 4)。说明影响北溪、西溪河流径流量的水文地理条件发生了明显的年际变化。

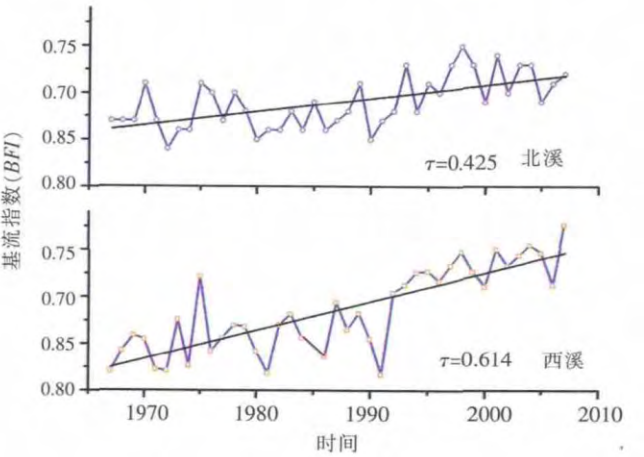


图4 1967~2007 年九龙江北溪、西溪基流指数
Fig.4 The baseflow indexes of the Beixi and Xixi watersheds in the Jiulongjiang River basin during 1967~2007

3.2 水电开发对 Flashiness 指数时空变异特征的影响

据调查,九龙江北溪流域从 1995 年开始较大规模的水电站建设,本研究分别计算 1967~1994 和 1995~2007 两个时段北溪与西溪流域 Flashiness 指数,观察水电开发对 Flashiness 指数时空变化特征的影响,结果见图 5。

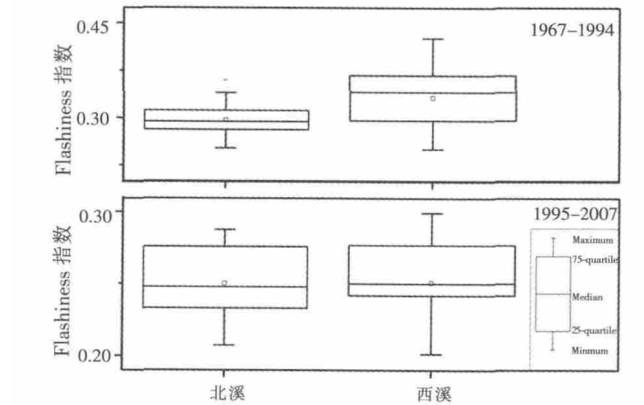


图5 不同时期北溪、西溪 Flashiness 指数对比
Fig.5 Comparison of the Flashiness Indexes between the Beixi and Xixi watersheds in the various periods

由图 5 可见,1967~1994 期间,北溪与西溪的 Flashiness 均值分别是 0.296 和 0.330,存在明显的差异。而 1995~2007 期间北溪、西溪 FI 均值分别为 0.250 和 0.251,这反映了由于水电开发使得西溪与北溪河流径流量的调节由以自然因素为主,转为以水电站的调节为主,使得北溪、西溪这两条水文条

件差异较大的流域的 FI 值在 1995 年之后变得基本相同。

水电站的建设同时也改变了九龙江径流量的季节分布。由图 6 可见,水电站的调节作用使得九龙江北溪(漳平站、浦南站)的丰水期延长且流量下降,平水期流量上升。但西溪(龙山站、郑店站)的丰水期推迟且流量上升,而北溪与西溪枯水期流量未发生明显变化。

径流量的变化进一步影响了北溪与西溪输沙量的季节变化。由于丰水期的推迟(西溪)或延长(北溪)使得九龙江北溪、西溪的输沙量的年内分布发生了改变,结果见图 7。由图 7 可见,北溪(漳平站、浦南站)、西溪

(龙山站、郑店站)的输沙量高峰推迟,由 6 月份推迟到 8 月份。北溪(漳平站、浦南站)的输沙量峰值发生明显增加,龙山站的输沙量虽然减少,但其峰值已经发生明显变化。由于大坝的截流作用使得西溪的输沙量减少。但北溪的输沙量反而增加,这可能与北溪大规模的水利建设有关。1995 年以后北溪还有大量的在建水利工程,如西陂、华口三级等十多个最大坝高超过 20m 的水电站均在建设中,大量的泥沙排入到流域中,再加上北溪流域的地形坡度较高(图 2),加剧了水土流失及泥沙输入至河流。而西溪水电梯级开发已经基本完成,在建的大中型水电站不多。

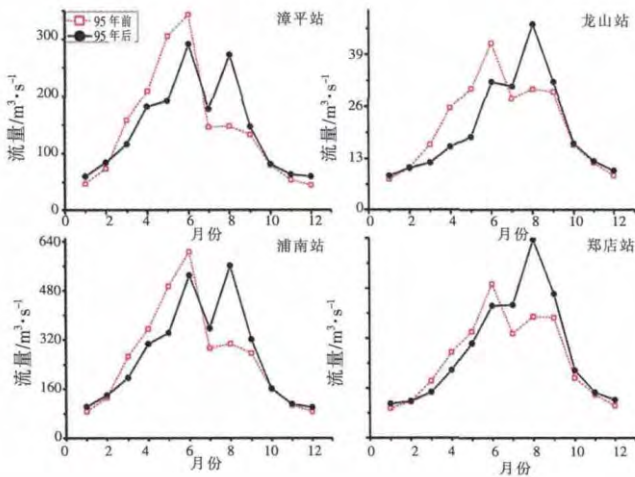


图 6 九龙江主要水文站点流量变化

Fig.6 Variability of the monthly streamflow at the important stations in the Jiulong River basin

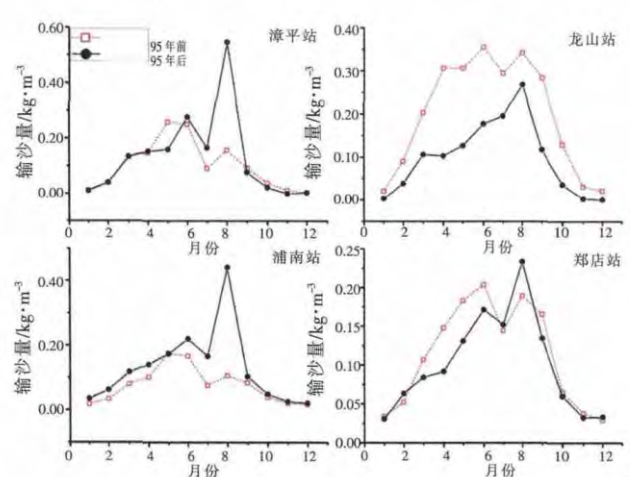


图 7 九龙江流域主要水文站点输沙量变化

Fig.7 Variability of monthly sediment discharge at the important stations in the Jiulong River basin

3.3 土地利用变化对 Flashiness 指数时空变异特征的影响

北溪的 FI 值比西溪小,年际差异也比西溪小(表 1 和图 3),这与北溪流域的自然地理、土地利用情况有关。北溪的面积大于高于西溪,西溪受人类活动影响更为剧烈,其农业用地比例、建设用地比例均比北溪高(图 2)。

九龙江北溪与西溪的 Flashiness 指数在近 40 年呈下降趋势(图 3)。进一步综合分析北溪与西溪 1986~2007 期间 FI 指数变化特征,我们可以看出,2002 年前后这两个时段九龙江河流 FI 存在明显变化,1986~2002 期间 FI 指数呈下降趋势,但 2002~2007 期 FI 指数呈上升趋势(图 8),这种现象可能跟流域土地利用变化有关。由图 8 可见,1986~2002 年九龙江流域的林地面积极呈上升趋势,从 1986 年的 65.64% 上升至 2002 年的 71.72%,而自 2002 年起九龙江流域的林地面积极减少,城市用地面积比例却由 2.60% 快速上升

到 4.48%,城市化进程在 2002 年后明显加剧。

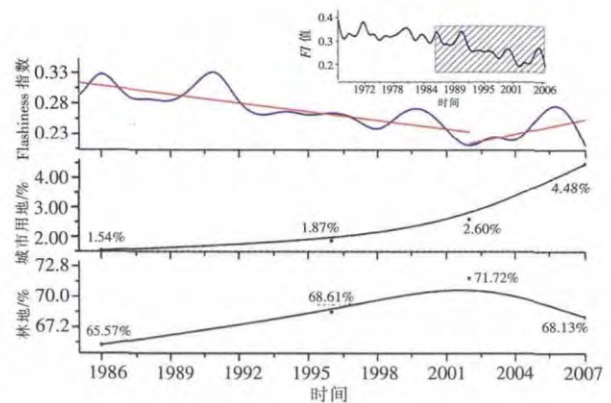


图 8 九龙江流域土地利用及 FI 值变化情况

Fig.8 Dynamics of land-use and Flashiness Index change in the Jiulong River basin during 1986~2007

备注:(1)图中九龙江流域 FI 值为北溪与西溪之和的均值;(2)1986~2007 城市用地与农业用地面积百分比的变化趋势线是基于 1986,1996,2002,2007 和 2010 年 5 个年份九龙江流域土地利用结构的数据绘制而成

4 讨论

近 40 年来,九龙江北溪、西溪的 FI 值呈显著下降趋势, BFI 值却随之上升。进一步分析发现九龙江北溪、西溪在两个时段(1967~1994 和 1995~2007)的 FI 值和 BFI 值均有明显差异(图 3 和图 4),反映了九龙江流域水电开发改变了流域的水文环境,使径流的波动性降低、基流上升。水电站的建设使径流调节由自然因素主导向水电站人为的流量日调节转变,使得径流年内波动减小。1995 年后北溪、西溪的 FI 值在统计学上的差异减少了,其均值水平较为接近。Holko 等人研究也发现,Zborov-Bystrica 流域在 1989 年水电站建设之后 FI 值出现了较为明显的下降^[2]。相关研究也表明,水电站建设是基流上升的一个重要原因^[14-16]。Deelstra 等人研究发现 FI 值的变化与 BFI 值的变化呈显著负相关关系^[7]。由于水电站的建设,进一步影响到北溪、西溪径流量的季节变化,北溪(浦南站、漳平站)的丰水期发生了延长,表现在径流量图上的单峰向双峰转变,而西溪(郑店站、龙山站)的丰水期发生了延迟现象(图 5)。但北溪与西溪枯水期径流量无明显年际变化,这与陈兴伟等在福建省河流的研究结论相近^[17]。另外,由于大规模的电站建设,使得大量的泥沙流入到北溪中,再加上北溪的平均坡度较高(图 2),使得北溪在近些年来的输沙量增加。王健等研究发现随着坡度的上升侵蚀产沙量急剧增加^[18]。许炯心研究发现岷江的水电梯级开发的大规模开展是引起 2002~2007 间,长江上游干支流输沙量增加的主要原因^[19]。

本研究基于 Flashiness 指数来评估 40 年来九龙江流域北溪、西溪径流时空变化特征。从总体上来看,近 40 年西溪河流 FI 值要比北溪大,这与西溪地理条件、土地利用情况差异有关。 FI 值的变化与降水强度、降水量等因素无关,与流域的地理条件、水文环境有重大的相关性^[6]。西溪流域面积比北溪小, FI 值也相应较大。Fongers 等、Baker 等人也有类似观测^[6,9],他们分别调查了 279 个流域和 515 个流域站点,发现随着流域面积的增大, FI 越小,这表明在相同条件下流域越小其径流的波动性就越大。Holko 等的研究进一步发现面积较小的流域 FI 值较大且其年际间的变化也较大^[2]。土地利用变化是引起九龙江径流特征变化的另一个重要因素。2002 年以后,九龙江流域 FI 值呈现上升趋势,跟这个时段流域城市用地面积比例显著增加,城市化进程加剧有关,另外,

这个时段林地面积比例减少也影响到 FI 值的变化。20 世纪 90 年代即有研究表明,土地利用变化会对流域的水文条件产生影响^[15,20]。Dow 等人也认为城市化会导致 FI 值发生波动,城市用地的增加使得土壤对降水的滞溜作用降低,进而使得径流量在短时间内的波动增加,表现为 FI 值的升高^[21]。相关研究表明,由于林地面积的增加提高了对水源的涵养,使得地下水量的供给增加,进而减少的径流的波动^[22]。Holko 和 Kostka 研究表明, FI 值的变化与林地的面积比例变化有相关关系^[23]。Holko 等研究则发现林地增加会导致径流波动性减少^[2]。

5 结论

(1)近 40 年来九龙江北溪与西溪的径流特征与水文环境发生明显的变化,表现在 BFI 值的上升和 FI 值的下降。

(2)20 世纪 90 年代中后期开始的水电开发,是九龙江径流时空变化特征改变的主要原因,使得九龙江径流在短时间内的波动减少,北溪的丰水期变长,西溪的丰水期推后,并进一步影响九龙江河流输沙量的季节变化。

(3)流域面积的大小是影响北溪、西溪径流特征变化的主要自然因素。土地利用变化则是九龙江流域径流特征变化的另一重要影响因子。

参考文献:

- [1] 黄强,赵雪花,刘俊萍,等. 河川径流时间序列分析预测理论与方法[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2008. (HUANG Qiang, ZHAO Xuehua, LIU Junping, et al. Time-series Analyzing and Forecasting Stream-flow: Principle and Method [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2008. (in Chinese))
- [2] Holko L, Parajka J, Kostka Z, et al. Flashiness of mountain streams in Slovakia and Austria [J]. Journal of Hydrology, 2011, 405(3-4): 392-401.
- [3] Robertson DM, Roerish ED. Influence of various water quality sampling strategies on load estimates for small streams [J]. Water Resources Research, 1999, 35(12): 3747-3759.
- [4] Werkhoven K, Wagener T, Reed P, et al. Characterization of watershed model behavior across a hydroclimatic gradient [J]. Water Resources Research, 2008, 44, W01429, doi: 10.1029/2007WR006271.
- [5] Merz R, Blöschl G. A process typology of regional floods [J]. Water Resources Research, 2003, 39(12): 1340-1349.
- [6] Baker DB, Richards RP, Loftus TT, et al. A new flashiness index: Characteristics and applications to midwestern rivers and streams[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2004, 40(2): 503-522.
- [7] Deelstra J, Iital A. The use of the flashiness index as a possible

- indicator for nutrient loss prediction in agricultural catchments [J]. *Boreal Environment Research*, 2008, 13(3): 209–221.
- [8] Huang JC, Lin CC, Chan SC, et al. Stream discharge characteristics through urbanized gradient in Danshui River, Taiwan: perspectives from observation and simulation [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*. doi: 10.1007/s10661-011-2374-2.
- [9] Fonger D, Manning K, Rathun J. Application of the Richards-Baker Flashiness Index to Gage Michingan River and Stream [C]. *DEG Michigan's Nonpoint Source Program*. 2007:102.
- [10] Huang JL, Pontius R G Jr, Li QS, et al. Use of intensity analysis to link patterns with processes of land change from 1986 to 2007 in a coastal watershed of southeast China [J]. *Applied Geography*, 2012, 34: 371–384.
- [11] Furey PR, Gupta VK. A physically based filter for separating baseflow from streamflow times series [J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(11): 2709–2722.
- [12] Zhang MF, Wei XH, Sun PS, et al. The effect of forest harvesting and climatic variability on runoff in a large watershed: the case study in the upper Minjiang River of Yangtze River basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 25:1–11.
- [13] Hazewinkel, Michiel. *Encyclopedia of Mathematics*[M]. Springer, 2001.
- [14] Stanford JS, Ward WJ, Liss CA, et al. A general protocol for restoration of regulated rivers [J]. *Regulated Rivers: Research and Management*, 1996, 12: 391–413.
- [15] Poff NL, Allan JD, Bain MB, et al. The natural flow regime [J]. *BioScience*, 1997, 47(11): 769–784.
- [16] Graf WL. Damage control: restoring the physical integrity of America's rivers[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2001, 91(1): 1–27.
- [17] 陈兴伟, 陈文惠, 王林, 等. 福建省河流枯水径流的自然地理环境影响研究 [J]. *自然资源学报*, 2009, 24 (5): 915–921. (CHEN Xingwei, CHEN Wenhui, WANG Lin, et al. Multiple regression analysis for the relation between low flow and basin characteristics for Fujian province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24 (5): 915–921. (in Chinese))
- [18] 王健, 尹武君, 云峰, 等. 渭北旱塬坡耕地水土和养分流失特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26 (1): 3–37. (WANG Jian, YIN Wujun, YUN Feng, et al. Characteristics of water and soil and nutrients loss on sloping lands in Weibei highland [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(1): 3–37. (in Chinese))
- [19] 许炯心. 长江上游干支流近期水沙变化及其与水库修建的关系[J]. *山地学报*, 2009, 27(4): 385–393. (XU Jiongxin. Recent variations in water and sediment in relation with reservoir construction in the upper Changjiang River basin [J]. *Journal of Mountain Science*, 2009, 27(4): 385–393. (in Chinese))
- [20] Walman MG, Riggs HC. *Surface Water Hydrology* [M]. America: Geological Society of America, 1990.
- [21] Dow CL. Assessing regional land-use/cover influences on New Jersey Pinelands streamflow through hydrograph analysis [J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21: 185–197.
- [22] Andreson MG, McDonnell JJ. *Encyclopedia of Hydrological Sciences* [M]. USA: JohnWiley, 2005.
- [23] Holko L, Kostka Z. Analysis of runoff regime by means of flashiness index [J]. *Acta Hydrology Slovaca*, 2008, 9(2):262–268.

Analysis of Spatiotemporal Variability of Runoff Flashiness Index for Jiulongjiang River

HUANG Jinliang^{1,2}, ZHANG Zhenyu², SHAO Jianmin³, HUANG Zuya³, LUO Shoutai³

(1. *Fujian Provincial Joint Key Laboratory of Coastal Ecology and Environmental Studies, Xiamen University, Xiamen 361005, China*;
2. *College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361005, China*; 3. *Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Fujian Province, Fuzhou 350000, China*)

Abstract: Spatiotemporal variability of the runoff flashiness index was explored and thereby used to evaluate the effect of human activities including dam construction and land use change on runoff variation. The Jiulongjiang River Basin, the medium-sized coastal watershed located in SE China, was chosen to analyze the characteristics of the runoff variation with Flashiness Index (FI) and Baseflow Index (BFI) for the north reach and west river of the Jiulongjiang River, based on the forty-year hydrologic data from 1967 to 2007. The geographical information system and multivariate analysis were coupled to characterize the spatiotemporal variation of the runoff and identify its influencing factor. The results show that the hydrological condition in the Jiulongjiang River Basin was altered significantly in the past 40 year, represented by a decreasing trend for FI and an increasing trend for BFI. Furthermore, the watershed area is the major natural factor leading to spatiotemporal variability of the runoff flashiness index for the north reach and west reach of the Jiulongjiang River. The Dam construction and hydropower development made the hydrological condition changed in the Jiulongjiang River Basin, which greatly influenced the seasonal variability of the runoff and sediment discharge. The land use change was identified as a potential factor influencing the runoff variation of the Jiulong River Basin.

Key words: Flashiness index; runoff variation; hydropower development; land use change; watershed