

复杂环境下华南东江中上游流域筑坝导致的水文变异^{*}

杨 涛¹, 陈永勤², 陈 喜¹, 杨红卫³, 陈晓宏⁴, 江 涛⁴

(1: 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

(2: 香港中文大学地理与资源管理学系与空间与地球信息科学研究所, 香港沙田)

(3: 南京市水利规划设计院有限责任公司, 南京 210006)

(4: 中山大学水资源与环境管理系, 广州 510275)

摘要: 采用可视化分析软件包 XmdvTool 来评价复杂环境下东江中上游流域(1952–2002)水文变异以克服常规 RVA 方法的限制, 在分离了气候变化对水文变异影响后, 结合 RVA 方法系统地研究了华南东江中上游流域由于筑坝等人类活动引起的河流水文变异时空演化规律。结果表明: (1)1952–2002 间由筑坝导致的最显著的东江中上游流域水文变异是最小 3d 流量, 低流量持续时间、1 月平均流量和 7 月平均流量等 3 个 IHA 因子; (2)在河源和岭下两站水文变异 9 个 IHA 因子相关图中, 1 月和 2 月平均流量, 1 月平均流量和最小 90d 流量相关图中各存在一个较为明显的线性回归趋势, 表明上述因子存在较明显的相关关系; (3)东江中上游综合水文变异强度由大至小分别为: 河源、龙川和岭下。运用高维水文数据可视化分析技术结合 RVA 方法可有效用于天然河流水文变异时空变化研究。研究结果对于东江河流生态环境管理、生态恢复和水资源一体化管理具有重要意义, 可为流域水文变异的理论与方法研究提供借鉴。

关键词: 水文变异评价; RVA; IHA; 复杂环境; 筑坝影响; 气候变化; 东江流域

Evaluating hydrologic alternation along the East River basin, southern China, under the changing environment

YANG Tao¹, CHEN Yongqin², CHEN Xi¹, YANG Hongwei³, CHEN Xiaohong⁴ & JIANG Tao⁴

(1: State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulics Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

(2: Department of Geography and Resource Management and Institute of Space and Earth Information Science, the Chinese University of Hong Kong, Shatin, Hongkong, P.R.China)

(3: Nanjing Institute of Water-resources Planning and Designing Co., Ltd, Nanjing 210006, P.R.China)

(4: Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, P.R.China)

Abstract: We use the visualization package XmdvTool to enhance the evaluation of the spatio-temporal patterns of the dam-induced hydrologic alternation dominated the middle and upper reaches of East River, south China during non-flood seasons (1952–2002). Results indicate that: 1) Along the East River, dams had greatly altered the natural flow regime, range condition and the spatial variability; 2) The 6 most remarkable indicators of hydrologic alternation induced by dam-construction were the rise rate, 3-day maximum, Low pulse duration, January and July of the East River during 1952–2002; 3) The spatio-temporal hydrologic alternations were different among 3 stations. Under the influences of 2 large multi-purpose dams, the rank of the overall degree of hydrologic change were Lingxia, Heyuan and Longchuan station along the middle and upper reaches of East River. Visualization techniques for the high-dimensional hydrological datasets, together with RVA approach, might be useful to detect the spatio-temporal hydrologic changes. The unique way of integrating spatial, temporal and multi-element hydrological components provided visually-enhanced insights that were not possible with traditional analysis tools for water resources management.

* 教育部重大科技项目(308012)、香港特别行政区研究基金项目(CUHK4627/05H)和国家自然科学基金项目(50679025)联合资助。2008-04-07 收稿; 2008-06-02 收修改稿。杨涛, 男, 1974 年生, 博士, 副教授; E-mail: Enigama2000@hhu.edu.cn.

Keywords: Evaluation; Range of Variability Approach (RVA); Indicators of Hydrologic Alteration (IHA); visual; climate change; dam construction; the upper and middle East River

过去数千年间为满足防洪、航运、供水、发电和娱乐等诸多需求，人类活动不同程度地改变了河流天然来水的水文情势^[1]。这些改变在造福人类的同时，不可避免也带来很多负面影响。环境、生态与水文学家建立了很多指标来研究人类活动对径流特征改变的不同影响，早期的研究局限于平均流量、偏度、洪峰、频率、径流季节分配、枯水和洪水历时曲线。以后的研究则逐渐扩展到研究运用水文指针的不同组合和多变量方法等来定义水文变异(Hughes 等^[2]; Richter 等^[3-5]; Clausen 等^[6]; Extence 等^[7], Poff 等^[8])以支持流域生态系统管理和恢复。Richter 等^[3]提出一种评价大坝和水库等水利工程对天然径流水文变异影响的指标体系，即水文变异指标(Indicators of Hydrological Alteration: IHA)，该方法立足于实测水文数据或者模拟数据。Richter 等^[4]提出将水文变异幅度作为河流生态管理目标，其中包括表征径流量、出现时间、频率、持续时间和变化速率等 5 类 33 个水文指标用于河流水文变异研究。研究表明，径流变化的幅度是影响河流生态系统的主要驱动力，同时也是水生物环境可持续发展的主要因素。Richter 等^[5]采用 RVA(Range of Variability Approach)方法对美国 Utah 州 Colorado 河下游两条主要河流筑坝导致的水文变异进行了评价，得到了研究区流域尺度的水文变异分布图。Galat 和 Lipkin^[9]采用 IHA 方法分析研究了 Missouri 河筑坝导致的水文变异。Shiau 等^[10]采用 RVA 来分析台湾 Chou-Shui 溪调水工程带来的水文变异及影响，其研究结果表明：天然河流恢复能够提高天然河流的生态环境条件。Yang 等^[11]采用 IHA 和 RVA 方法分析对比了黄河三花区间(三门峡-花园口)流域由于修建众多大型水库引起的各干支流水文时空变异，并讨论了其对黄河下游环境生态的可能影响。

以上研究结果表明，RVA 及 IHA 是河流生态环境管理与生态恢复研究的一种有效方法，但是目前该方法在分析水文时空高维多元可视化方面还有所欠缺，另外水文变异影响因素复杂多样，在具体评价某因素对水文变异影响时，势必要对其进行分离或分割。本文采用一种基于 RVA 的可视化方法来评价复杂环境下东江中上游流域水文变异以克服常规 RVA+IHA 方法的限制。本文的研究目标是：(1) 分离气候变化对东江中上游流域水文变异造成的影响；(2) 采用研究区三个水文站筑坝前后近 50 年分离降雨变化影响后的日径流平水期资料，结合可视化 RVA 方法评价筑坝前后 33 个 IHA 因子水文变异时空特征；(3) 定量评价东江中上游流域枫树坝及新丰江水库对天然径流改变的影响，为东江流域水资源管理与生态环境恢复提供科学依据。



图 1 东江中上游流域水系示意图
Fig.1 Location map of the Dongjiang basin

2 研究区域概况

东江(图 1)和西江、北江等干支流水系合称为珠江，是全国第三大河流，发源于江西省，主要流经广东省，总河长 562km，流域面积 27040km²。为实现防洪、供水、水利发电、航运、灌溉和控制盐水入侵等目标，过去 40 年来东江流域水资源得到了高强度开发，使东江流域天然径流强烈地受到人类活动的影响。1958-1984 年间东江中上游流域修建了众多的水库和大坝，其中最主要的大型水库是枫树坝和新丰江水库(图 1 和表 1)。枫树坝水库位于东江上游，总库容 $19.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，是目前广东省第三大水库。新丰江水库是东江流域最早和最重要的多功能水利枢纽，总库容 $139.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，是目前广东省第一大水库。东江下游人类活动非常复杂，影响因素非常众多，导致评价筑坝对该区的水文变异影响极其困难，因此选择人类活动较为单一(主要以筑坝为主)东江中上游为研究对象，

来评价筑坝对径流水文变异的影响。

近年来, 国内众多学者运用不同研究方法探讨东江流域水文水资源时空变化基本规律^[12-16], 计算并讨论了东江流域未来相应期内不同保证率径流量可能发生的变化, 分析土地利用和气候变化对东江径流的影响。但是, 目前对于东江流域由于上游筑坝等人类活动导致的水文变异等的研究尚未见报道。因此, 本文将主要研究东江中上游流域由于筑坝等人类活动引起的流域水文变异并进行可视化的分析, 以期得到新的研究结果。

表 1 东江中上游流域主要水库及筑坝时间*

Tab.1 Major reservoirs in East River basin and construction period of each reservoir

水库	筑坝时间			
枫树坝水库	1952-1969 年	18 年	1970-1974 年	1975-2002 年 28 年
新丰江水库	1952-1957 年	6 年	1958-1962 年	1963-2006 年 44 年

* 条状框表示筑坝前时期, 白色表示筑坝时期, 黑色表示筑坝后时期。

3 研究方法

3.1 基于 RVA 水文变异评价

RVA(Range of Variability Approach)方法采用 5 类(包括径流总量、出现时间、频率、持续时间和变率)33 个水文指标(表 2)来评价河流水文变异^[3-5,10-11]。

表 2 RVA 指标及对应特征

Tab.2 Hydrologic parameters used in the RVA

类别	描述特征	指标
第一类: 月平均径流总量	径流总量和出现日期	月平均径流
第二类: 年径流极值径流总量与持续时间	径流总量和持续时间	年最小(1, 3, 7, 30, 90d)径流量 年最大(1, 3, 7, 30, 90d)径流量
第三类: 年径流极值出现日期	出现日期	年最小1d径流出现日期、年最大1d径流出现日期
第四类: 径流极值的频率和持续时间	径流总量、频率和持续时间	年高流量数量、年低流量数量、年高流量持续时间、年低流量持续时间
第五类: 径流变化程度和频率	频率和变化程度	上涨数量、下降数量

RVA 方法由于其重要的环境与生态学意义而普遍用于河流与湖泊生态环境研究, 每个因子的平均值、标准差和幅度均采用筑坝前后的日平均径流计算得到。对 RVA 方法而言, 河流管理目标不是每年都保持同样的径流变幅, 而是保证其变化幅度保持筑坝前后同样的出现频率。一般采用第 25 分位数和第 75 分位数作为其上下限, 水文变异程度可采用如下公式计算:

$$\text{水文变异度} = (\text{实测频率} - \text{预期频率}) / \text{预期频率} \quad (1)$$

当筑坝后的实测频率和预期频率一样完全落入 RVA 管理目标范围时, 水文变异等于零; 当实测频率比和预期频率更多地落入 RVA 管理目标范围时, 水文变异为正, 反之为负^[3-5]。为了消除筑坝时间的分割与评价样本长度不对等对水文变异评价带来的问题^[11], 在计算水文变异度前, 把实测频率和预期频率分别除以各自的径流资料的样本长度 n , 以减小其影响。另外, 因为筑坝时间不一致, 所以图 1 中龙川、河源及岭下 3 个水文站的径流资料分割将分别考虑, 龙川站上游由于只有枫树坝水库, 因此其资料用枫树

坝水库筑坝时间(1970–1974)来划分为前后两段以进行水文变异 RVA 评价, 其中筑坝期内的水文资料将被舍弃不用。河源和岭下两站由于同时受枫树坝水库和新丰江水库影响, 为了保持资料的横向可比性, 这里选择 1958–1974 年来划分两站径流资料, 该时期包括了以上两座水库的筑坝时间。

3.2 气候变化及土地利用变化下垫面等因素对水文变异影响的分离

长期以来, 定量评价气候变化、土地利用及人类活动等各因素变化对流域水文变异的影响一直是个复杂的课题。王渺林等^[14]在 SCS 模型基础上, 建立了适用于东江流域的月水量平衡模型, 并利用 8 个代表子流域在不同的气候变化和土地利用变化情景下进行了模拟和分析, 结果表明: 东江流域径流对降雨的敏感性远大于对气温及土地利用的敏感性, 可以认为, 其降雨量的变化将直接影响流域径流量, 进而影响流域水文变化。因此该部分内容主要讨论如何分离降雨变化对水文变异的影响, 进而最终评价筑坝对东江中上游流域水文变异的影响。

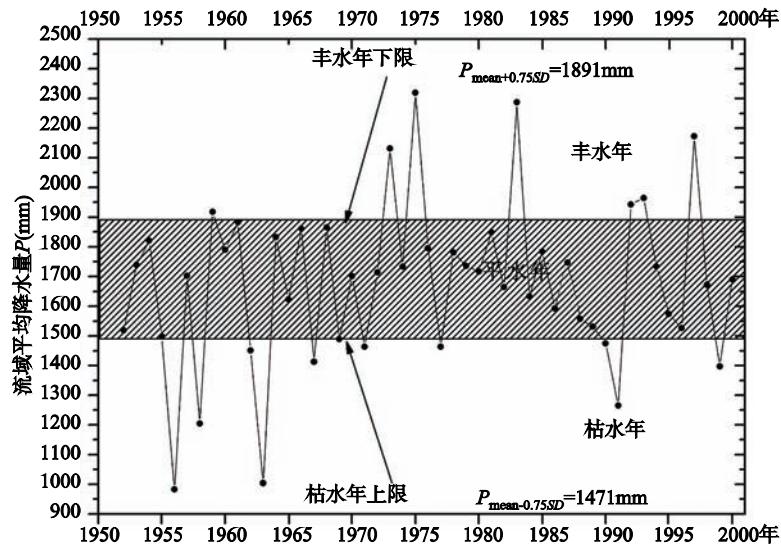


图 2 东江中上游流域平水期分析结果
Fig.2 Water year separation of the streamflow time-series

首先, 利用东江中上游全流域的同期(1956–2006)各雨量站年降雨资料计算出全流域面平均年降雨量, 然后根据丰平枯水定义(丰水: 分位数 $\geq 75\%$, 枯水: 分位数 $\leq 25\%$, 平水: $25\% < \text{分位数} < 75\%$), 将 3 站对应的日流量资料划分为丰平枯 3 个时期, 分析结果见图 2。这里统一采用图 2 确定的平水期内水文资料来进行分析和评价, 以分离降雨变化对径流带来的影响并用于进行评价筑坝导致的水文时空变异。

3.3 基于 RVA 计算结果的可视化挖掘

通常, 环境时空资料的可视化可以提供比表格与数字更多、更有效的信息。Hann^[17]指出, 因为水文数据的海量性, 数据可视化是数据分析中的一个重要环节。Keim 和 Kreigel^[18]研究结果表明: 可视化的数据挖掘技术在大数据集挖掘中具有良好表现。Krauss-Kessler 等^[19]和 Poikolainen 等^[20]指出, 连续元素地图仍然是时空特征分布可视化显示的有效手段。高维数据可视化分析软件 XmdvTool 用来显示和深入揭示各水文要素变异的时空演化规律。每个变量(或维)无论是离散的还是连续的既是自变量, 也是因变量。在离散点矩阵图里面, 作为一个辅助显示窗口, 二维散点分布变量即可绘制出来。

4 分析结果

4.1 筑坝导致的天然河流水文变异

(1)月平均径流总量: 该类指标包括从 1–12 月的月均流量共 12 个指数(表 3 和图 3)。表中, 升率和跌率大小对河道水生物种群具有一定影响, 对于区域自然生态系统而言, 二者数值大小保持一个合理范围

比较有利^[3]. 通常默认高流量阈值为高于均值 75%, 相反默认低流量阈值为低于均值 25%. 高流量径流维系着河漫滩和主河道的水力联系, 为河漫滩的生物种群提供足够的径流和营养供给, 而径流低流量持续

表 3 东江中上游流域 3 个水文站水文变异 RVA 计算成果^{[3-4]*}

Tab.3 Summary of 33 indicators of hydrologic alternation for 3 stream gauges in the East River

IHA 因子	龙川站	河源站	岭下站	水文变异指标
1. 1 月均流量	0.72	0.92	0.77	0.80
2. 2 月均流量	0.91	0.69	0.77	0.79
3. 3 月均流量	0.81	0.84	0.66	0.77
4. 4 月均流量	0.72	-	-	-
5. 5 月均流量	0.81	-	-	-
6. 6 月均流量	0.44	0.77	0.71	0.64
7. 7 月均流量	0.63	0.87	0.89	0.80
8. 8 月均流量	0.34	0.07	0.14	0.18
9. 9 月均流量	0.68	0.84	0.02	0.51
10. 10 月均流量	0.16	0.38	0.66	0.40
11. 11 月均流量	0.44	0.53	0.77	0.58
12. 12 月均流量	0.03	0.61	0.77	0.47
13. 年最大 1d 流量	0.63	0.46	-	0.55
14. 年最大 3d 流量	0.34	0.77	-	0.56
15. 年最大 7d 流量	0.63	0.77	-	0.70
16. 年最大 30d 流量	0.72	0.69	-	0.71
17. 年最大 90d 流量	0.63	0.92	-	0.78
18. 年最小 1d 流量	0.53	0.92	-	0.73
19. 年最小 3d 流量	0.91	0.92	0.89	0.91
20. 年最小 7d 流量	0.16	0.92	0.71	0.60
21. 年最小 30d 流量	0.16	0.77	0.89	0.61
22. 年最小 90d 流量	0.22	0.53	0.20	0.32
23. 断流天数	0	0	0	0
24. 基流指数	0.53	-	0.94	0.74
25. 最小流量出现日期	0.91	0.92	0.37	0.73
26. 最大流量出现日期	0.53	0.61	0.66	0.60
27. 低流量数	0.58	0.77	0.77	0.71
28. 低流量持续时间	0.93	-	0.83	0.88
29. 高流量	0.53	0.81	0.66	0.67
30. 高流量持续时间	0.64	0.48	0.77	0.63
31. 升率	1.53	1.33	0.61	1.16
32. 跌率	-	-	0.94	-
33. 反转数	-	-	-	-
最终平均水文变异	0.57	0.71	0.64	0.64

* “-”代表评价样本中出现频率为零, 因此它们没有参与进行最终水文变异计算. 反转数: 该特征代表径流向增加或减小的相反趋势变化的次数. 升率: 连续日径流的所有增加均值, 反之代表跌率. 低流量持续时间: 高于该阈值即高流量, 低于该阈值为低流量.

时间则影响河流的水质、下游水资源供给和水生物种群的繁衍。所以径流高低流量持续时间是个很重要的水文学、水力学、环境学及生态学指标^[3]。由表3和图3可知，东江中上游流域3个水文站最明显的水文变异大多出现在1月、2月、3月(非汛期)及6月、7月和9月(汛期)。可见，上游水库的削峰拦洪措施对汛期径流的消减作用影响很大，而水库在非汛期的农业灌溉和生活用水对增加月均径流因也有一定影响。

(2)年径流极值径流总量与持续时间：东江中上游流域年最小3d流量变异最大，而年最小90d流量变异最低，其他次之(表3和图3)。

(3)年径流极值出现日期：年径流极值出现日期用以衡量外界环境影响导致的天然径流季节性波动，表3表明：岭下站年最小径流量出现日期从每年12月推迟到次年1月，年最大径流量出现日期也相应从每年6月上旬推迟到6月中旬。考虑到区间来水和新丰江水库的调节作用，河源和龙川水文站年最大径流量出现日期比岭下晚。

(4)径流极值的频率和持续时间：径流年极值的频率和持续时间描述了天然水体年内变化的流量特征，东江流域的流量特征主要表现为高低流量的出现日益频繁(表3)，表明其受筑坝影响颇大。而径流年极值持续时间在筑坝后却明显变短，究其原因，是由于水库为了达到足够的发电水头而蓄水导致的^[3]。水利枢纽工程在增大径流年极值出现频率的同时，也缩短了径流年极值持续时间，从该角度看，其对天然河流影响的水文效应具有一定相互抵消作用。

(5)年际径流变化程度和频率：由于上游大型水库为满足发电、灌溉和下游城市供水的径流调节作用，东江流域3站年际径流变化程度和频率均呈现增加趋势(表3)。

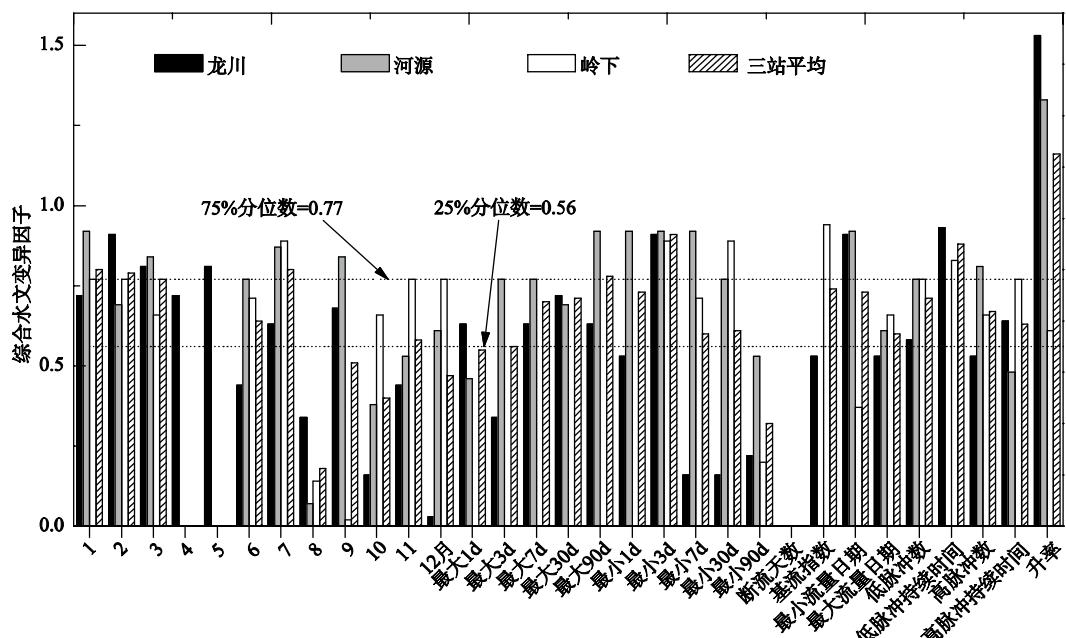


图3 东江中上游流域水文变异评价综合示意
Fig.3 Degrees of indicators of hydrologic alternation for 3 stream gauges

4.2 水文变异的时空变化相关分析

选择3站过去50年来6个综合变异强度最大的IHA因子，采用高维数据可视化分析技术分析其时空变异规律。水文变异IHA的6个因子变异(图5a、5b和5c分别代表龙川、河源和岭下三站)点绘在二维散点分布图中进行自相关分析，其中灰色背景代表其变化幅度。龙川散点存在左倾趋势，表明径流量级和变幅均较小(图4a)。河源径流量级和变幅均较大，其中，1月和2月平均流量，1月平均流量和最小90d流量相关图中各存在一个较为明显的线性回归趋势，表明上述因子存在较明显的相关关系，而其他因子不存在明显的相关关系(图4b)。岭下的上述6个因子径流量级和变幅均最大，另外，1月和2月平均流量，1

月平均流量和最小 90d 流量相关图中也存在明显的线性回归趋势(图 4c). 河源与岭下站散点在除月平均流量和高流量持续时间外的 20 个 IHA 因子上聚集趋势相对一致, 这主要因为两站同属于一个水文一致区导致.

4.3 基于几何图案的水文变异空间分析

图 5 中 3 个几何图案分别代表东江干流 3 个水文站(1952–2002)的 33 个 IHA 因子的筑坝导致的水文变异. 图 5 几何图案可看成由 33 个代表不同含义的向量组成, 每个向量均代表不同的水文变异强弱. 其中, 图 5a 最瘦弱的几何图案表明枫树坝水库对龙川水文站的水文情势影响在 3 站中最小, 龙川水文站的水文变异程度也为 3 站最小. 图 5b 几何图案较为肥胖, 表明河源水文站受新丰江水库影响最大. 图 5c 几何图案代表岭下水文站在 3 站中水文变异程度介于最小和最大之间. 分析原因: 枫树坝水库总体径流调节能力较小, 因此下游龙川水文变异最小; 而离新丰江水库最近的河源水文站由于新丰江的库容非常大, 调节能力很强, 因此河源水文变异在 3 站中最大. 岭下由于距离新丰江水库较远, 并且受区间来水的影响, 所以其水文变异介于最小和最大之间.

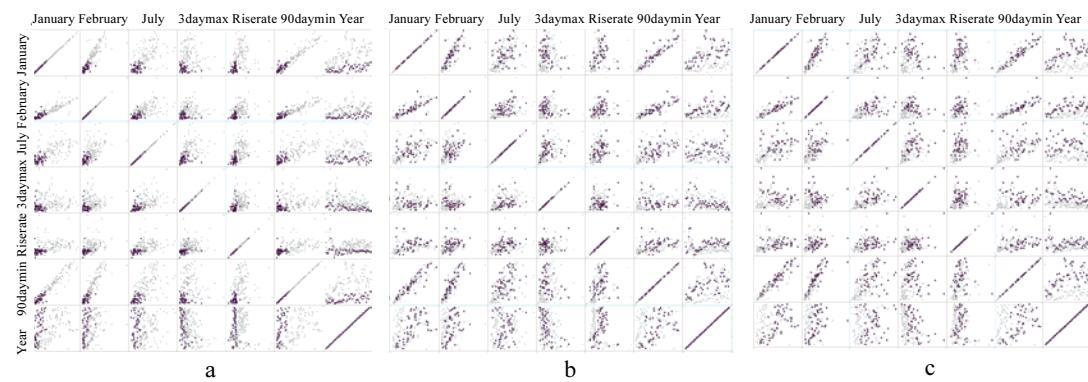


图 4 东江中上游三个水文站(1952–2002)6 个综合水文变异最大的 IHA 相关图
(龙川(a); 河源(b); 岭下(c), 其中本站数据以黑点, 上下限以灰色矩形区别)

Fig.4 Scatterplot matrix display for 6 highest indicators of hydrologic alteration at 3 streamstations of the middle and upper East River (1952–2002), in Longchuan(a); Heyuan(b) and Lingxia(c)

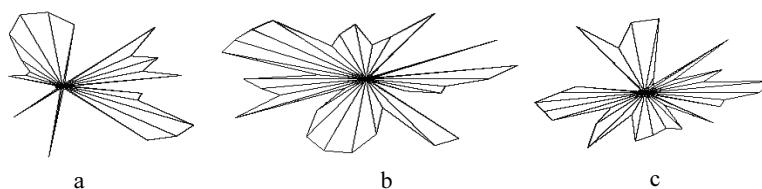


图 5 东江 3 个水文站(1952–2002)水文变异的几何图案(龙川站(a); 河源站(b); 岭下站(c))
Fig.5 Glyph display of 33 hydrologic alteration degree for 4 stream stations of the East River (1952–2002)

5 结论

本文运用全新的可视化 RVA 方法系统研究了东江中上游流域过去 50 年(1952–2002)来由于筑坝等人类活动导致的水文变异特征, 得出以下 3 点新的认识:

(1)1952–2002 间由筑坝导致的最显著的东江中上游流域水文变异是最小 3d 流量(0.91), 低流量持续时间(0.88)、1 月平均流量(0.80)和 7 月平均流量(0.80)等 3 个 IHA 因子;

(2)在中游河源和岭下两站水文变异 9 个 IHA 因子相关图中, 1 月和 2 月平均流量, 1 月平均流量和最小 90d 流量相关图中各自存在较为明显的线性回归趋势, 表明上述因子存在较明显的关系, 而其他因子不存在明显的关系.

(3)东江中上游综合水文变异强度由大至小分别为: 河源(0.71)、岭下(0.64)和龙川(0.57), 分析原因在于: 枫树坝水库总体径流调节能力较小, 因此下游龙川水文变异最小; 而离新丰江水库最近的河源水文站由于新丰江的库容非常大, 调节能力很强, 因此河源水文变异在3站中最大. 岭下由于距离新丰江水库较远, 并且受区间来水的影响, 所以其水文变异介于最小和最大之间.

筑坝在防洪和农业灌溉同时, 不可避免也改变了天然河流的水文情势, 从而给环境、生态及赖以生存的水生物种带来了不同程度的影响. 本文采用可视化分析技术结合RVA方法可有效用于天然河流的水文时空变异分析, 交互式数据操作功能更可从不同角度进行可视化分析, 该一体化多维RVA时空分析方法可以克服以往传统分析方法存在的弊端, 从而可以对人类活动对天然河流环境、生态影响规律获得更深刻的认识. 分析成果可为生态环境恢复与流域综合管理部门提供有益的决策参考.

6 参考文献

- [1] Bravard JP, Petts GE. Human impacts on fluvial systems. In: Petts GE, Amorros C eds. *Fluvial Hydro-systems*. London: Chapman & hall, 1996: 242-262.
- [2] Hughes JMR, James B. A hydrological regionalization of streams in Victoria, Australia, with implication for stream ecology. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, 1989, **40**: 303-326.
- [3] Richter BD, Baumgartner JV, Powell J et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 1996, **10**: 1163-1174.
- [4] Richter BD, Baumgartner JV, Wigington R et al. How much water does a river need? *Freshwater Biology*, 1997, **37**: 231-249.
- [5] Richter BD, Baumgartner JV, Braun DP et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regulated Rivers: Research and Management*, 1998, **14**: 329-340.
- [6] Clausen B, Biggs BJF. Flow indices for ecological studies in temperate streams: groupings based on covariance. *Journal of Hydrology*, 2000, **237**: 184-197.
- [7] Extence CA, Balbi DM, Chadd RP. River flow indexing using British benthic macroinvertebrates: a framework for setting hydroecological objectives. *Regulated Rivers: Research and Management*, 1999, **15**: 543-574.
- [8] Poff LN, Allan JD, Bain MD et al. The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration. *Bio Science*, 1997, **47**: 769-784.
- [9] Galat DL, Lipkin R. Restoring ecological integrity of great rivers: historical hydrographs aid in determining reference conditions for the Missouri River. *Hydrobiologia*, 2000, **422/423**: 29-48.
- [10] Shiau JT, Wu FC. Assessment of hydrologic alterations caused by Chi-Chi diversion weir in Chou-Shui Creek, Taiwan: opportunities for restoring natural flow conditions. *Regulated Rivers: Research and Management*, 2004, **20**: 401-412.
- [11] Yang T, Zhang Q, Chen YD, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration caused by dam construction in the middle and lower Yellow River, China. *Hydrological Processes*, 2008, **22**: 3829-3843(DOI: 10.1002/hyp.6993).
- [12] 唐海行, 陈永勤, 陈 喜. 应用随机方法研究全球气候变暖对东江流域水资源的影响. 水科学进展, 2000, **11**(2): 159-164.
- [13] 陈永勤, 黄国如. 基于L-moments方法的东江流域区域枯水频率计算. 基础科学与工程学报, 2005, **13**(4): 409-416.
- [14] 王渺林, 夏 军. 土地利用与气候波动对东江流域水循环的影响. 人民珠江, 2004, **2**: 4-15.
- [15] 石教智, 陈晓宏. 东江流域的降水和径流变化趋势与影响因子分析. 水电能源科学, 2005, **23**(5): 8-10.
- [16] 贾良文. 大量采沙对东江下游及东江三角洲地区河床地形和潮汛动力的影响. 地理科学, 2006, **61**(9): 985-994.
- [17] Haan CT. *Statistical methods in hydrology*. Ames, Iowa, Iowa State University Press, 2002.
- [18] Keim DA, Kriegel HP. Visualization techniques for mining large databases: a comparison. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 1996, **8**(6).
- [19] Krauss-Kressler T, Dietl C, Trischler J et al. Temporal and spatial trends of metal contents of Bavarian mosses *Hypnum Cupressiforme*. *Sci Total Environ*, 1999, **232**: 13-25.
- [20] Poikolainen J, Kubin E, Piispanen J et al. Atmospheric heavy metal deposition in Finland during 1985-2000 using mosses as bioindicators. *Sci Total Environ*, 2004, **318**: 171-85.