

# 怒江干流水沙年内分配特征及其变化趋势

刘新有<sup>1,2</sup>, 何大明<sup>3</sup>, 袁树堂<sup>2</sup>, 谢飞帆<sup>2</sup>

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

2. 云南省水文水资源局, 云南 昆明 650106; 3. 云南大学 亚洲国际河流中心, 云南 昆明 650091)

**摘要:** 怒江研究基础严重滞后于流域资源保护与开发利用的需求。利用怒江干流贡山、道街坝和木城3个水文站历年月径流和悬移质输沙观测数据, 运用集中度与集中期、Mann-Kendall 检验和R/S分析等方法, 研究怒江干流1964-2011年水沙年内分配时空特征及其变化趋势。结果表明: 怒江干流径流呈缓慢上升趋势, 但输沙上升趋势明显; 怒江干流悬移质输沙年内分配集中度明显高于径流, 径流和悬移质输沙年内分配集中度时间上呈波动下降趋势, 空间上呈从上游到下游递减的趋势; 径流和悬移质输沙年内分配多年平均集中期均在7月中旬, 较降水集中期稍有提前; 怒江干流径流年内分配集中度未发生突变, 悬移质输沙年内分配集中度在1977年开始发生突变, 在1995年后下降趋势明显; 怒江干流径流和悬移质输沙年内分配集中度未来仍将延续波动下降的趋势, 且悬移质输沙年内分配集中度的下降趋势比径流更强。

**关键词:** 径流; 悬移质输沙; 年内分配; 变化趋势; 怒江

中图分类号: TV143.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)04-0132-04

## Feature of water and sediment allocation in annual in Nujiang river mainstream and its change trend

LIU Xinyou<sup>1,2</sup>, HE Daming<sup>3</sup>, YUAN Shutang<sup>2</sup>, XIE Feifan<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing

210098, China; 2. Yunnan Bureau of Hydrology and Water Resources Management, Kunming 650106, China;

3. Asian International Rivers Center, Yunnan University, Kunming 650091, China;)

**Abstract:** The research foundation of Nujiang River seriously lags behind the demand of protection and exploitation of river basin resources. The paper used the long record of monthly runoff and suspended sediment transport at the three hydrological gauge stations in Nujiang river mainstream, and applied the concentrated rate and period, Mann-Kendall test and R/S (Rescaled Range Analysis) methods to study the temporal and spatial characteristics, the change trend of runoff and sediment transport in the period of 1964 to 2011. The results showed that: the runoff in Nujiang River mainstream increased slowly, but sediment transport rise significantly; the concentrated rate of annual sediment transport allocation is much larger than that of runoff; the concentrated rate of annual runoff and sediment transport allocation appears decline trend. and in space it presents a decreasing trend from upstream to downstream; the average concentrated period of annual runoff and sediment transport allocation is in the middle July, and is slightly ahead of those of precipitation; the concentrated rate of annual runoff allocation do not produce mutation, and the concentrated rate of annual sediment transport allocation produce mutation began in 1977, and the the concentrated rate appeared the evident downward trend after 1995; In the Nujiang river mainstream, the concentrated rate of annual runoff and sediment transport allocation will still continue the fluctuation downward trend, and the downward trend of concentrated rate of annual sediment transport will be more obvious than that of runoff.

**Key words:** runoff; suspended sediment transport; annual allocation; change trend; Nujiang River

收稿日期: 2015-03-23; 修回日期: 2015-03-30

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划重大项目(2010BAE00739); 云南省水利厅水利科技项目(20144003)

作者简介: 刘新有(1981-), 男, 湖南邵阳人, 在站博士后, 高级工程师, 主要从事水文水资源与生态安全研究。

## 1 研究背景

怒江-萨尔温江是全球最典型的南北向发育的国际大河,发源于青藏高原的唐古拉山南麓的吉热拍格,由云南德宏州出境流入缅甸后改称萨尔温江,最后注入印度洋的安达曼海。上游中国境内称为怒江,流域面积 13.67 万  $\text{km}^2$ ,其中干流河长 2 013 km,流域面积 12.48 万  $\text{km}^2$ 。怒江流域气候受地形及大气环流影响,气候的区域差异十分明显,“立体气候”特点突出,变化复杂,从上游到下游依次分布有亚寒带至北热带的各种气候带,南北气温相差悬殊,由北向南呈递增趋势。流域西藏部分属高寒地区,河流补给主要来源于冰雪融水,云南部分属高山峡谷区,河流补给以降水为主,汛期洪水主要由暴雨形成,多出现在 7-8 月,洪水具有山区性河流陡涨陡落的特点。该流域是全球地表最陡峭的区域之一,独特的地理环境和气候条件孕育着具有世界性意义的生物资源,丰富的水资源和罕见的河流比降蕴藏着量大且极具开发价值的水电能源。但由于受到多种因素制约,怒江仍是全球研究基础最为薄弱的国际大河,与流域资源保护与开发利用需求不相适应。近年来,随着区域国际合作的不断深入及流域资源保护与开发的需求,与该区域的相关研究日益增多<sup>[1-2]</sup>。研究表明:怒江流域气温和降水量由北向南总体呈递增趋势,且气候要素值随海拔升高而降低,其中年平均气温增幅达  $0.36^\circ\text{C}/10\text{a}$ <sup>[3]</sup>;怒江径流量变化与西南季风环流系统活动的变化相关<sup>[4]</sup>,而地表生态水文过程受控于岭谷地形的“通道-阻隔”作用<sup>[5]</sup>;怒江干流和支流南汀河悬移质输沙率均呈上升趋势,且未来仍将延续上升趋势<sup>[6]</sup>;流域生态变化主要受自然因素的控制<sup>[7]</sup>,但人类活动干扰下流域景观异质性和稳定性逐步降低<sup>[8]</sup>。虽然近年来的研究涉及到流域气候、径流及生态等方面,但对流域水沙年内分配的研究仍为空白。

河流水沙变化不仅影响着水资源的开发利用,还对水库调度、河道演变、水生生态系统等带来一系列的影响<sup>[9-10]</sup>。目前,河流水沙年内分配不均匀性的定量分析多采用各时段水沙量占全年水沙总量的百分比,变异系数、集中度等。其中,集中度将河流水沙年内分配看作矢量,能够相对较好地反映其年内非均匀分配特性,逐渐得到了广泛应用<sup>[11-13]</sup>,本文采用集中度与集中期、Mann-Kendall 检验和 R/S 分析等方法,研究怒江干流水沙年内分配特征、突变

及其趋势变化。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料来源

怒江干流仅云南段的贡山、道街坝和木城 3 个水文站同时具有径流与悬移质输沙观测数据。资料来源包括:贡山站 1987-2011 年月径流量和 2005-2011 年月悬移质输沙率,道街坝站 1964-2011 年月径流量和月悬移质输沙率,木城站 2005-2011 年月径流和月悬移质输沙率。资料来源水文站位置见图 1。

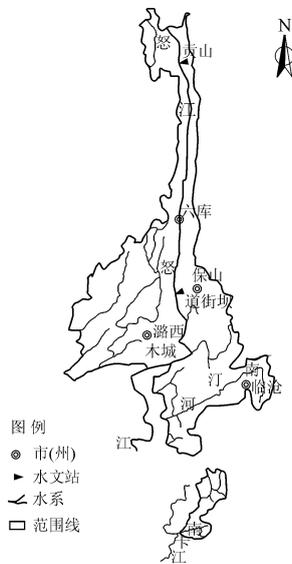


图 1 怒江流域云南段水文站点分布图

### 2.2 集中度与集中期

集中度指要素按月以向量方式累加,其各分量之和与年总量的比值,反映其在年内的集中程度,集中度越大表示年内分配越不均匀。集中期是指要素向量合成后的方位,反映其全年集中的重心所出现的月份,用各月分量之和的比值正切角度表示。

### 2.3 Mann-Kendall 检验法

输沙时序趋势及突变分析采用 Mann-Kendall 检验法。Mann-Kendall 检验法是一种关于观测值序列的非参数统计检验方法,可分析绘出  $UF_k$  或  $UB_k$  曲线图,判断时间序列是否存在突变并标出突变开始的时间。若  $UF_k$  或  $UB_k$  的值  $> 0$ ,表明序列呈上升趋势,反之,序列呈下降趋势。当  $UB_k$  或  $UF_k$  超过临界值时,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  $UF_k$  和  $UB_k$  两条曲线出现交点,并且交点在临界线之间,则交点对应的时刻便是突变的开始时间。

## 2.4 R/S 分析法(重新标度极差分析法)

输沙趋势变化分析采用 R/S 分析法(Rescaled Range Analysis)。R/S 分析法通过 Hurst 指数  $H(0 < H < 1)$  对时间序列趋势变化进行判断。当  $H = 0.5$  时,表明序列是完全独立的,即序列是一个随机过程;当  $H < 0.5$  时,表明未来的变化状况与过去相反,即反持续性, $H$  越接近于 0,反持续性越强;当  $H > 0.5$  时,表明未来的变化状况与过去一致,即有持续性, $H$  越接近 1,持续性越强。

## 3 结果分析

### 3.1 水沙年内分配集中度时空分布特征

贡山、木城径流与输沙序列较短不具代表性,故选取数据序列达 48 年的干流道街坝站和数据进行径流与悬移质输沙时序特征分析。由图 2 可知,怒江干流道街坝站径流与输沙均呈上升趋势,输沙率上升趋势尤为明显;径流主要与降水和上游融雪补给量有关,径流年际变幅较小表明怒江流域气候趋于稳定;输沙除与降水等气候因素有关以外,还主要受人类活动的影响,径流变幅大且上升趋势明显表明怒江流域人类活动呈加剧的趋势。

由表 1 可知,怒江干流各站径流年内分配多年平均集中度在 0.5 左右,悬移质输沙年内分配多年平均集中度在 0.8 左右,悬移质输沙年内分配集中度明显高于径流,其原因是非汛期河流主要由上游

冰雪融水和基流补给,径流含沙量很低,从而导致输沙高度集中于汛期。从各站 2005 - 2011 年径流和悬移质输沙年内分配集中度对比来看,上游贡山站均高于其下游的道街坝站和木城站,呈现出从上游到下游递减的趋势,其原因主要是怒江流域云南段主要受西南季风控制,西南季风进退使得下游雨季较上游开始时间早,结束时间晚,降水相对更为均匀所致。三站径流和悬移质输沙年内分配多年平均集中中期差异很小,均分布在 7 月中旬,而流域降水集中期为 7 月下旬至 8 月下旬<sup>[3]</sup>,径流和悬移质输沙年内分配集中中期较降水稍有提前的主要原因是受到上游春末夏初桃花汛的影响。利用序列较长的道街坝站作为代表站进行趋势分析表明(图 3),怒江干流径流和悬移质输沙年内分配集中度变化趋势基本一致,均呈波动下降趋势,即年内分配趋于更加均匀,但悬移质输沙年内分配集中度下降趋势更为明显。

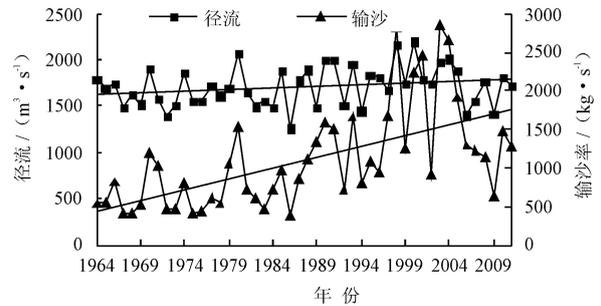


图 2 怒江干流径流和悬移质输沙年际变化

表 1 怒江干流径流和悬移质输沙年内分配集中度与集中中期统计

站名	统计年限	径流			悬移质输沙		
		集中度	集中中期方向/(°)	集中中期时间	集中度	集中中期方向/(°)	集中中期时间
贡山	1987 - 2011	0.532	196.9	07-19			
	2005 - 2011	0.528	196.2	07-18	0.830	190.6	07-12
道街坝	1964 - 2011	0.500	194.6	07-16	0.810	192.8	07-14
	2005 - 2011	0.480	195.0	07-17	0.772	192.0	07-14
木城	2005 - 2011	0.466	197.3	07-19	0.775	198.3	07-20

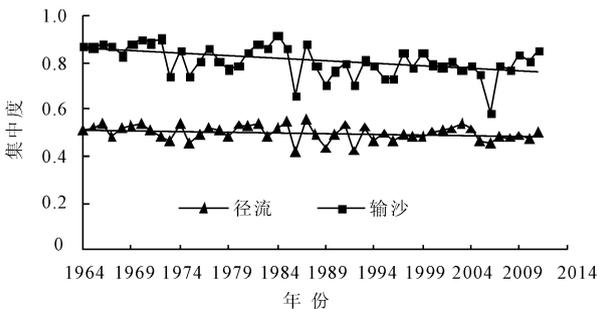


图 3 怒江干流径流和悬移质输沙年内分配集中度变化

### 3.2 水沙年内分配集中度突变分析

径流与悬移质输沙突变分析需要连续长序列数据,故选取悬移质输沙数据序列达 48 年的道街坝站进行怒江干流径流和悬移质输沙突变分析。由道街坝站径流年内分配集中度 Mann - Kendall 检验结果可知(图 4),  $UB$  曲线和  $UF$  曲线均未超过信度  $\alpha = 0.01$  临界值线,表明怒江干流径流年内分配集中度未发生突变。由道街坝站悬移质输沙年内分配集中度 Mann - Kendall 检验结果可知(图 5),怒江干流

悬移质输沙年内分配集中度在 1977 年开始发生突变,  $UF$  曲线在 1995 年超过信度  $\alpha = 0.01$  临界值线, 表明怒江干流悬移质输沙年内分配集中度在 1995 年后下降趋势明显。在降水年内分配未发生突变的情况下<sup>[3]</sup>, 土地利用/覆被变化<sup>[6-7]</sup>可能是导致怒江干流悬移质输沙年内分配集中度发生突变的主要原因。

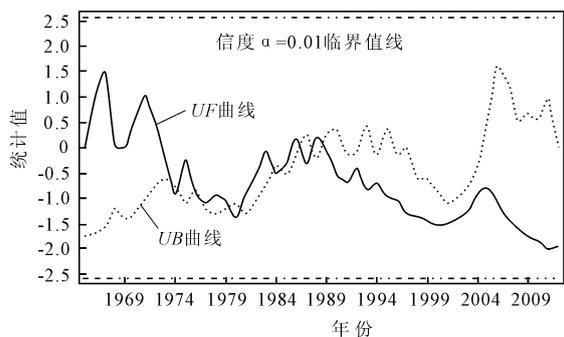


图 4 怒江干流径流年内分配集中度 Mann - Kendall 检验  $UF - UB$  曲线

### 3.3 水沙年内分配集中度趋势变化

由  $R/S$  分析可知(图 6), 道街坝站径流和悬移质输沙年内分配集中度的  $H$  值(拟合趋势线斜率)分别为 0.64、0.83, 均大于 0.5, 表明怒江干流水沙

年内分配集中度未来一定时期内的变化趋势与过去一致, 即仍将延续波动下降的趋势。由于悬移质输沙年内分配集中度的  $H$  值更接近于 1, 表明悬移质输沙年内分配集中度下降的趋势性比径流更强。径流年内分配集中度主要受降水的影响, 而悬移质输沙年内分配集中度的主要影响因素包括降水和土地利用/覆被两方面, 悬移质输沙年内分配集中度下降的趋势性更强表明土地利用/覆被变化趋势的延续性较强。径流和悬移质输沙年内分配集中度降低将对流域生态健康、水资源与水电能源利用产生积极影响。

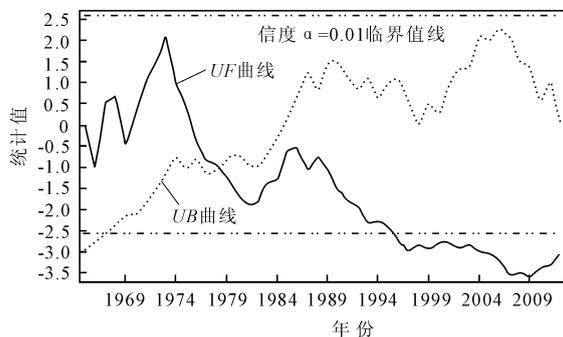
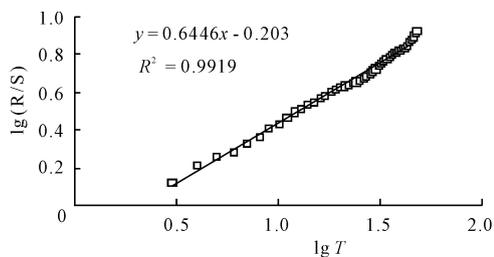
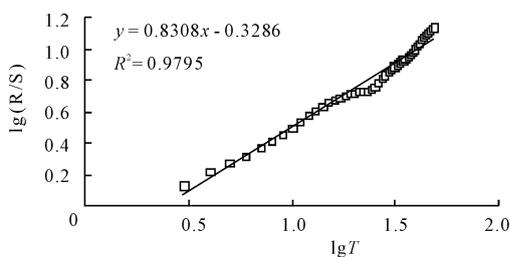


图 5 怒江干流悬移质输沙年内分配集中度 Mann - Kendall 检验  $UF - UB$  曲线



(a) 径流



(b) 悬移质输沙率

图 6 怒江干流径流和悬移质输沙率年内分配度  $H$  值拟合曲线

## 4 结 语

(1) 怒江道街坝站干流径流呈缓慢上升趋势, 但输沙上升趋势明显, 表明怒江流域气候趋于稳定, 人类活动呈加剧趋势。怒江干流悬移质输沙年内分配集中度明显高于径流, 其原因是非汛期河流主要由上游冰雪融水和基流补给, 径流含沙量很低, 从而导致输沙高度集中于汛期。径流和悬移质输沙年内分配集中度均呈现出从上游到下游递减的趋势, 其原因主要是怒江流域云南段西南季风进退使得下游雨季较上游开始早结束晚, 降水相对更为均匀所致。上下游径流和悬移质输沙年内分配多年平均集中中期均分布在 7 月中旬, 较降水集中中期稍有提前。怒江

干流径流和悬移质输沙年内分配集中度变化趋势基本一致, 均呈波动下降趋势。

(2) 怒江干流径流年内分配集中度未发生明显突变, 与流域逐月降水时序未发生突变的规律相一致; 悬移质输沙年内分配集中度在 1977 年开始发生突变, 在 1995 年后下降趋势明显, 这种变化主要与流域土地利用/覆被有关。

(3) 怒江干流径流和悬移质输沙年内分配集中度未来变化趋势与过去一致, 即仍将延续波动下降的趋势, 且悬移质输沙年内分配集中度的下降趋势比径流更强。径流和悬移质输沙年内分配集中度降低将对流域生态健康、水资源与水能资源利用产生积极影响。  
(下转第 142 页)

的三维数值模拟,并将计算结果与 PIV 测量结果进行对比。结果表明,计算结果与 PIV 测试结果一致。在进流量相同时,随着进流浓度的增加,在上锥管边缘清水上升通道内速度增加,水流挟沙力增强,随水流溢出的泥沙量增多,并且随着进流浓度的增加梭锥管各个断面泥沙体积浓度及紊动强度值也随之增加,上锥管得到的清水面积也随之减小,不利于梭锥管内水沙分离。

### 参考文献:

- [1] 谭义海,李琳,邱秀云. 梭锥管浑浊流体分离装置水沙分离实验研究[J]. 新疆农业大学学报,2010,33(6):521-526.
- [2] 谭义海. 梭锥管浑浊流体分离装置内水力特性试验研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2011.
- [3] 李琳,杨海华,王苗,等. 梭锥管浑浊流体分离装置流场PIV测试及分析[J]. 水利学报,2013,44(9):1064-1070.
- [4] 杨海华,李琳,靳晟,等. 梭锥管内泥沙沉降特性及运动轨迹研究[J]. 水力发电学报,2013,32(2):184-189.
- [5] 杨海华. 梭锥管水力分离水沙机理试验研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2013.

- [6] 王苗,李琳,杨海华,等. 梭锥管浑浊流体分离装置水沙两相流场数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2013,28(3):5:291-298.
- [7] 王苗,李琳,杨海华等. 梭锥管与普通装置内水沙两相流场特性数值模拟[J]. 中国农村水利水电,2014(1):111-117.
- [8] 张政,谢灼利. 流体-固体两相流的数值模拟[J]. 化工学报,2001,52(1):1-12.
- [9] 屈强,马鲁铭,王红武. 辐流式二沉池固液两相流数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版),2006,34(9):1212-1216.
- [10] 倪晋仁,曲轶众. 固液两相流中固体颗粒的垂直分选模型[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2003,18(3):349-354.
- [11] 李广年,张军,陆林章,等. PIV,LDV在螺旋桨尾流测试中的对比应用[J]. 航空动力学报,2010,25(9):2083-2090.
- [12] 李云开,杨培岭,任树梅,等. 圆柱型灌水器迷宫式流道内部流体流动分析与数值模拟[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2005,20(6):736-743.
- [13] 钱宁,万兆慧. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社,2003.

(上接第135页)

### 参考文献:

- [1] He Daming, Zhao Wenjuan, Feng Yan. Research progress of international rivers in China [J]. Journal of Geographical Sciences,2004,14(1):21-28.
- [2] 何大明,吴绍洪,彭华,等. 纵向岭谷区生态系统变化及西南跨境生态安全研究[J]. 地球科学进展,2005,20(3):338-344.
- [3] 樊辉,何大明. 怒江流域气候特征及其变化趋势[J]. 地理学报,2012,67(5):621-630.
- [4] 尤卫红,郭志荣,何大明. 纵向岭谷作用下的怒江跨境径流量变化及其与夏季风的关系[J]. 科学通报,2007,52(Z2):128-134.
- [5] 周长海,吴绍洪,戴尔阜,等. 纵向岭谷区水汽通道作用及植被生产力响应[J]. 科学通报,2006,51(Z2):81-89.
- [6] 刘新有,何大明. 怒江流域悬移质输沙时空分布特征及变化趋势[J]. 地理学报,2013,68(3):365-371.
- [7] Feng Yan, He Daming, Li Yungang. Ecological changes and the drivers in the Nu River basin (upper Salween)

- [J]. Water International, 2010, 35(6):786-799.
- [8] 邹秀萍,齐清文,徐增让,等. 怒江流域土地利用/覆被变化及其景观生态效应分析[J]. 水土保持学报,2005,19(5):147-151.
- [9] 陆永军,左利钦,季荣耀,等. 水沙调节后三峡工程变动回水区泥沙冲淤变化[J]. 水科学进展,2009,20(3):318-324.
- [10] 李胜男,王根绪,邓伟,等. 水沙变化对黄河三角洲湿地景观格局演变的影响[J]. 水科学进展,2009,20(3):325-331.
- [11] 涂新军,陈晓宏,张强,等. 东江径流年内分配特征及影响因素贡献分解[J]. 水科学进展,2012,23(4):493-501.
- [12] 刘贤赵,李嘉竹,宿庆,等. 基于集中度与集中期的径流年内分配研究[J]. 地理科学,2007,27(6):791-795.
- [13] 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.