

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdcqk.2020.0052

俞雷,贾本有,吴时强,等.雅砻江流域典型年天然径流量时空分布特征[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(3):73-80,141. YU L, JIA B Y, WU S Q, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of typical annual natural runoff in the Yalong River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(3): 73-80, 141. (in Chinese)

## 雅砻江流域典型年天然径流量时空分布特征

俞雷<sup>1,2</sup>, 贾本有<sup>1</sup>, 吴时强<sup>1</sup>, 吴修锋<sup>1</sup>, 徐鹏<sup>1</sup>, 周永<sup>3</sup>, 张一<sup>3</sup>

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029; 2. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098; 3. 雅砻江流域水电开发有限公司, 成都 610066)

**摘要:**研究雅砻江天然径流特征对流域内已建梯级水电站群工程运行、管理及水能开发规划具有重要参考意义。本文选取雅砻江流域特枯、偏丰、特丰三个典型年份,利用水量平衡方法还原河川天然径流量,综合运用基尼系数和径流贡献率两项指标,分析其天然径流量时空分布特征。结果表明:特枯年份,各个站点基尼系数均介于0.30~0.39,天然径流年内分配相对均匀;偏丰和特丰年份,各个站点基尼系数均介于0.40~0.59,天然径流年内分配不均匀;特丰、偏丰和特枯年份,流域基尼系数均值分别为0.49、0.43和0.35,各站点天然径流年内分配不均匀程度与径流量正相关。枯季,特枯、偏丰水年流域上、中、下游径流贡献率比例接近1:1:1,而特丰水年流域径流贡献率为上游>下游>中游;汛期和全年,特枯、特丰水年流域径流贡献率为上游>下游>中游,而偏丰水年流域径流贡献率比例接近1:1:1;总体呈现左岸径流量大于右岸径流量的分布格局。雅砻江流域天然径流时间分布特征主要受降雨因素影响,而空间分布特征由降雨、地形和集水面积等多种因素共同决定。

**关键词:**雅砻江流域;天然径流;时空分布;基尼系数方法;径流贡献率

中图分类号:TV121 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



### Spatiotemporal distribution characteristics of typical annual natural runoff in the Yalong River basin

YU Lei<sup>1,2</sup>, JIA Benyou<sup>1</sup>, WU Shiqiang<sup>1</sup>, WU Xiufeng<sup>1</sup>, XU Peng<sup>1</sup>, ZHOU Yong<sup>3</sup>, ZHANG Yi<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Yalong River Hydropower Development Company, Chengdu 610066, China)

**Abstract:** The study on the natural runoff characteristics of Yalong River basin has important significance for the operation and management of cascade hydropower stations and the planning of hydropower development and utilization in the future. This paper selected three typical years of extremely high, above-average and extremely low annual runoff. The water balance method was used to restore the natural runoff of the river. The Gini coefficient and the runoff contribution rate were used to analyze the temporal and spatial distribution characteristics of natural runoff. The results showed that Gini coefficients of each station were between 0.30 and 0.39, respectively, and the distribution of natural runoff was relatively uniform in extremely dry years. Gini coefficient of each station was between 0.40 and 0.59, and the distribution of natural runoff was relatively uneven in above-average and extremely high annual runoff years. Gini coefficient of special abundance, partial abundance and special dry years were 0.49, 0.43 and 0.35, respectively, and the distribution inhomogeneity of natural runoff was positively correlated with total run-

收稿日期:2019-07-03 修回日期:2019-10-29 网络出版时间:2019-11-20

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20191120.0944.006.html>

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0404605);国家自然科学基金(51709178)

作者简介:俞雷(1994—),男,江西上饶人,博士研究生,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: yulei0405@foxmail.com

通信作者:吴时强(1964—),男,浙江诸暨人,教授级高级工程师,博士生导师,主要从事计算水力学、环境水力学研究。E-mail: sqwu@nhri.cn

off. In the dry season, the proportion of contribution rate of runoff in the upper, middle and lower reaches of the basin was close to 1 : 1 : 1 in extremely low and above-average annual runoff years, while the runoff contribution rate was followed by upstream, downstream and midstream in the year of extremely high annual runoff. The spatial distribution characteristics of runoff in the flood season and the whole year were the same. The runoff contribution rate of the basin was followed upstream, downstream and midstream in the years of extremely high and extremely low annual runoff, while the proportion of the runoff contribution rate of the basin was close to 1 : 1 : 1 in the year of above-average annual runoff. Overall, the spatial distribution pattern of left bank runoff was larger than the right bank runoff. The distribution of natural runoff time in the Yalong River basin was mainly affected by rainfall factors, while the spatial distribution characteristics were determined by various factors such as rainfall, topography and catchment area.

**Key words:** Yalong River basin; natural runoff; annual distribution; Gini coefficient; contribution rate of runoff

径流的时空变化特征是研究流域水资源特性、时空演变规律的基础,故学者们对我国不同流域展开了相关研究。涂新军等<sup>[1]</sup>通过集中度和不均匀系数,分析东江流域径流年内分配特征的时空变化规律,研究表明径流的年内集中程度和不均匀性与集水面积成正比。潘扎荣等<sup>[2]</sup>采用 Mann-Kendall<sup>[3]</sup>、Distribution-free CUSUM<sup>[4]</sup>等检验方法对淮河流域径流年际变化的趋势性和突变性进行分析,结果表明淮河流域径流年际变化趋势存在一定空间差异。雅砻江流域水能资源蕴藏量丰富,是我国十三大水电基地之一,流域总装机规模约 3 000 万 kW,当前流域内已建电站装机容量 1 470 万 kW<sup>[5]</sup>,后续水能开发空间较大。流域天然径流时空分布特性决定着已建电站运行调度方式,同时是指导规划电站规模大小、选址的关键因素<sup>[6-8]</sup>。目前,雅砻江流域径流时空分布特征已有一些研究成果<sup>[9-10]</sup>,如王渤权等<sup>[10]</sup>采用不均匀系数、完全调节系数等多个指标对锦屏上下游的径流年内分配情况进行了分析,结果显示上下游的年内分配趋向不均匀,且上游比下游略显不均匀,但研究多关注单个或几点站点(如锦屏站),较少关注整个流域径流时空分布情况。

基尼系数<sup>[11]</sup>作为经济领域判断分配平等程度的重要指标,通常用于衡量一个国家或地区居民收入差距。基尼系数实质上是分配均匀度的量化体现,能直观反映某些特征量的分配均匀度,且介于 0~1 之间,相互可比性强。因此,许多学者把基尼系数概念引入水资源问题的研究,用以描述一些水文特征量年内或年际间分配均匀度,如降雨量和径流量等<sup>[12-14]</sup>。胡彩霞等<sup>[12]</sup>提出了基于基尼系数的水文年内分配均匀度变异分析方法并应用于东江流域;叶琰等<sup>[14]</sup>利用基尼系数研究金沙江下游径流时空分布均匀度的变化特征。本文以雅砻江流域为研究对象,按照上游到下游主要控制站点(含水文站和已建水电站工程节点)划分径流集水区,利用水量平衡方法还原

典型年份河川天然径流量,综合运用基尼系数法和径流贡献率指标,从年内分配和空间分布维度来分析雅砻江流域天然径流量时空分布特征,为流域梯级水电开发和水电站群运行管理提供科学依据。

## 1 研究区域水系特征

### 1.1 雅砻江流域概况

雅砻江是金沙江第一大支流,全长 1 571 km,天然落差 3 830 m,年径流量 609 亿 m<sup>3</sup>,发源于青海省玉树州境内的巴颜喀拉山南麓,自西北向东南流。雅砻江流域属川西高原气候区,主要受高空西风环流和西南季风影响,干湿季分明,11 月至次年 4 月为旱季,5—10 月为雨季,雨季气候湿润,降雨集中,由北向南递增。雅砻江流域设有 15 个气象站,90 个雨量站。根据气象长期统计资料,流域多年平均降水量为 500~2 470 mm;流域内气温由北向南递增,多年平均气温为 -4.9~19.7 ℃,多年平均相对湿度差别不大,下游略高于上游。由于雅砻江流域地跨七个多纬度,且地形地势变化复杂,海拔高程相差很大,致使流域内气候差异也很大。

### 1.2 流域水系及集水区

雅砻江流域水系主要由干流和四条一级支流(鲜水河、理塘河、九龙河和安宁河)组成,依据径流可控、可测的准则,选择流域内 6 个水文站和 4 座已建水电站作为控制站点,将全流域从上游到下游划分为 10 个集水区,见图 1。其中集水区编号与控制站点对应关系为:F1 甘孜、F2 道孚、F3 雅江、F4 列瓦、F 锦屏一级、F6 乌拉溪、F7 官地、F8 湾滩、F9 二滩和 F10 桐子林。

## 2 研究方法

### 2.1 天然径流量还原计算

根据频率曲线,选定 2006 年(90%特枯年份)、



图1 雅砻江流域拓扑结构

Fig.1 Topology of the Yalong River basin

2008年(30%偏丰年份)和2012年(10%特丰年份)3个典型年份;利用各水文站典型年的月径流量、水电站典型年的月均入库、出库、蓄量变化等基础数据,采用水量平衡方法还原计算出流域内各个集水区的天然径流量。

### 2.2 基尼系数与洛伦茨曲线

基尼系数(Gini coefficient)最早由经济学家阿尔伯特·赫希曼于1943年提出,他根据洛伦茨曲线(Lorenz curve)提出的判断分配平等程度的指标。基尼系数介于0~1,基尼系数越大,表示不平等程度越高<sup>[11]</sup>。近年来,研究人员把基尼系数的概念引入水文学学科中,用以描述水文特征量年内或年际间分配均匀度,如降雨量和径流量等<sup>[15]</sup>。

表1 基尼系数与分配均匀度的关系

Tab.1 Relationship between Gini coefficient and distribution uniformity

基尼系数	<0.20	0.20~0.29	0.30~0.39	0.40~0.59	>0.59
分配均匀度	高度均匀	比较均匀	相对均匀	不均匀	非常不均匀

### 2.3 径流贡献率

径流贡献率是衡量集水区径流量对流域出口断面径流量贡献大小的指标,同时也是体现流域径流空间分布特征的指标,其值越大,代表该集水区对出口断面径流量贡献越大。具体计算公式为

$$c_i = \frac{r_i}{r_{\text{总}}} \times 100\% \quad i=1,2,\dots,n \quad (2)$$

式中: $c_i$ 为第*i*个集水区径流贡献率; $r_i$ 为第*i*个集水区径流量; $r_{\text{总}}$ 为流域出口断面径流量; $n$ 为集水

根据基尼系数计算方法和洛伦茨曲线的特点,构建水文站和水电站水库节点天然径流量年内分布均匀度模型<sup>[16]</sup>,具体步骤如下。

步骤1 把水文站天然径流和水电站水库天然入库流量月平均值进行升序排列,并进行百分比累积。

步骤2 以月为时间单位,对各站点进行时间百分比累积。

步骤3 以时间累积百分比为横轴*x*,径流累积百分比为纵轴*y*,拟合出径流时间分布洛伦茨曲线,并求出其基尼系数,见图2、式(1)。基尼系数越大表示径流要素年内分配越不均匀,即年内各月径流要素悬殊越大。参照联合国开发计划署等组织相关规定<sup>[17]</sup>,基尼系数大小与径流要素年内分配均匀度的对应关系见表1。

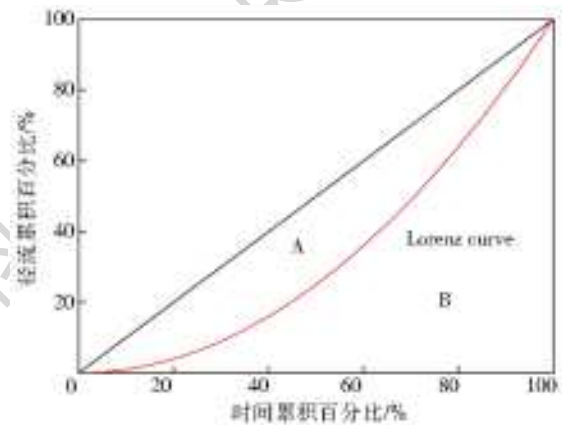


图2 径流年内分配洛伦茨曲线

Fig.2 Lorenz curve of annual runoff distribution

$$G = S_A / (S_A + S_B) \quad (1)$$

式中: $G$ 为基尼系数; $S_A$ 为图2中A区域的面积; $S_B$ 为图2中B区域的面积。

区数量。

对于某个流域,各集水区径流贡献率均值为 $1/n$ ,为了定性描述各集水区径流贡献率的大小,采用分级评价方式,拟定评价等级为*N*:当 $0 < c_i \leq 2/n$ 时,等分为*N*-1份;当 $2/n < c_i \leq 1$ ,划分为一级,且表示最高级别。左边每级区间长度可用式(3)表示,径流贡献率分级见图3。

$$\Delta = \frac{2}{n(N-1)} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $N$ 为分级数,且满足 $n \geq N \geq 2$ 。

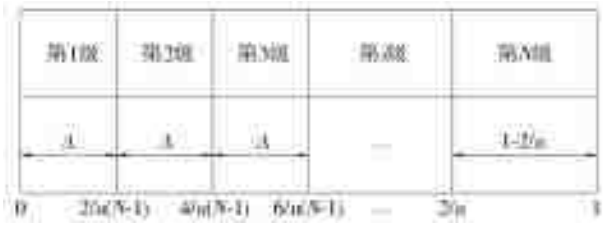


图 3 径流贡献率分级示意图

Fig. 3 Hierarchical sketch of runoff contribution rate

本文中,根据雅砻江流域特点,取  $N=6$ ,  $n=10$ ,该流域径流贡献率分级及含义见表 2。

### 3 结果与分析

#### 3.1 径流量年内分配均匀度特征

雅砻江流域典型年各站点径流年内分配均匀度和年平均径流量见表 3 和 4。由表分析可得如下结果。

表 2 雅砻江流域各集水区径流贡献率分级及含义

Tab. 2 Classification and significance of runoff contribution rate in Yalong River basin

径流贡献率	< 4%	4%~8%	8%~12%	12%~16%	16%~20%	> 20%
贡献程度	微小	小	较小	中等	大	最大

表 3 雅砻江流域各站点径流基尼系数

Tab. 3 Gini coefficient of annual average runoff at each station in the Yalong River basin

年份	站点									
	甘孜	道孚	雅江	列瓦	锦屏一级	乌拉溪	湾滩	官地	二滩	桐子林
2006(特枯)	0.34	0.31	0.38	0.34	0.35	0.39	0.35	0.35	0.35	0.36
2008(偏丰)	0.44	0.38	0.44	0.45	0.43	0.49	0.36	0.42	0.44	0.43
2012(特丰)	0.45	0.46	0.48	0.43	0.48	0.72	0.49	0.47	0.48	0.47

表 4 各站点年平均径流量变化

Tab. 4 Annual average runoff variation at each station

单位:  $m^3/s$ 

年份	站点									
	甘孜	道孚	雅江	列瓦	锦屏一级	乌拉溪	湾滩	官地	二滩	桐子林
2006(特枯)	195.1	99.4	524.0	173.0	946.2	51.1	204.5	1 113.5	1 194.2	1 413.0
2008(偏丰)	327.9	120.3	678.0	275.4	1 312.2	54.3	265.7	1 579.7	1 640.3	1 981.5
2012(特丰)	386.3	207.8	938.8	233.5	1 522.3	25.3	261.1	1 653.5	1 786.1	2 150.1

(3)特丰、偏丰和特枯水年流域基尼系数均值分别为 0.49、0.43 和 0.35,各站点基尼系数变化与流域径流丰枯变化一致,即特丰水年(2012 年) $>$ 偏丰水年(2008 年) $>$ 特枯水年(2006 年)。表明径流量越大的年份,各站点径流年内分配越不均匀,各月径流量相差悬殊越大。

#### 3.2 径流空间分布特征

雅砻江流域 11 月至次年 4 月为旱季,5—10 月为雨季,故将一年划分为枯季和汛季,分别为 11 月至次年 4 月和 5—10 月。本文对全年、枯季和汛季的径流空间分布特征进行了分析,探究不同时间尺度

(1)特枯水年,雅砻江流域各站点基尼系数均介于 0.3~0.4,说明其径流年内分配相对均匀;偏丰水年,流域各站点基尼系数均介于 0.36~0.49,且流域基尼系数均值为 0.43,说明其径流年内分配不均匀;特丰水年,流域各站点基尼系数均大于 0.4,且乌拉溪站点基尼系数高达 0.72,其流域基尼系数均值为 0.49,说明其径流年内分配不均匀。

(2)3 个典型年中,流域内雅砻江干流上的各站点基尼系数基本一致,即径流年内分配均匀度基本一致,这与本文将各水库控制站点流量还原成天然径流量有关,即未考虑水库调蓄对流域径流量分布的影响。水库调蓄通常会改变流域径流年内分布情况,降低其不均匀程度,从而使流域内不同控制站点间的基尼系数差异性减小。

下流域径流空间分布的差异性。

##### 3.2.1 全年径流空间分布特征

雅砻江流域各集水区的径流贡献率见图 4,图中红色( $>20\%$ )表示该集水区径流贡献率最大,绿色( $<4\%$ )表示该集水区贡献率微小,其具体含义见表 2,下文中其他分布图色阶含义同上。特枯水年(2006),F3、F5 集水区径流贡献率均介于  $16\% \sim 20\%$ ,贡献程度大,而 F6、F10 集水区贡献率均小于  $4\%$ ,贡献程度微小;雅砻江上游径流贡献率最大( $37.08\%$ ),中游最小( $29.88\%$ ),表明流域内径流量主要来自上游段;此外,左、右岸贡献率分别为

55.71% 和 44.29%, 左岸贡献略大于右岸 (图 4(a))。偏丰水年(2008), F1、F5 集水区径流贡献率均介于 16%~20%, 贡献程度大, 而 F6、F9 和 F10 集水区贡献率均小于 4%, 贡献程度微小; 雅砻江上、中、下游径流贡献率十分接近, 介于 32.00%~34.22%, 表明流域径流空间分布较均匀; 此外, 左、右岸贡献率分别为 56.09% 和 43.91%, 左岸贡献大于右岸(图 4(b))。特丰水年(2012), F1、F3 和 F5

集水区径流贡献率均介于 16%~20%, 贡献程度大, 而 F6 集水区贡献率均小于 4%, 贡献程度微小; 雅砻江上游径流贡献率是中游的 1.5 倍, 分别为 43.66% 和 27.14%, 表明流域内径流主要来自上游段; 此外, 左、右岸贡献率分别为 55.04% 和 44.96%, 左岸贡献大于右岸(图 4(c))。全年、枯季和汛期雅砻江流域上、中、下游和左、右岸径流贡献率见表 5 和图 5。

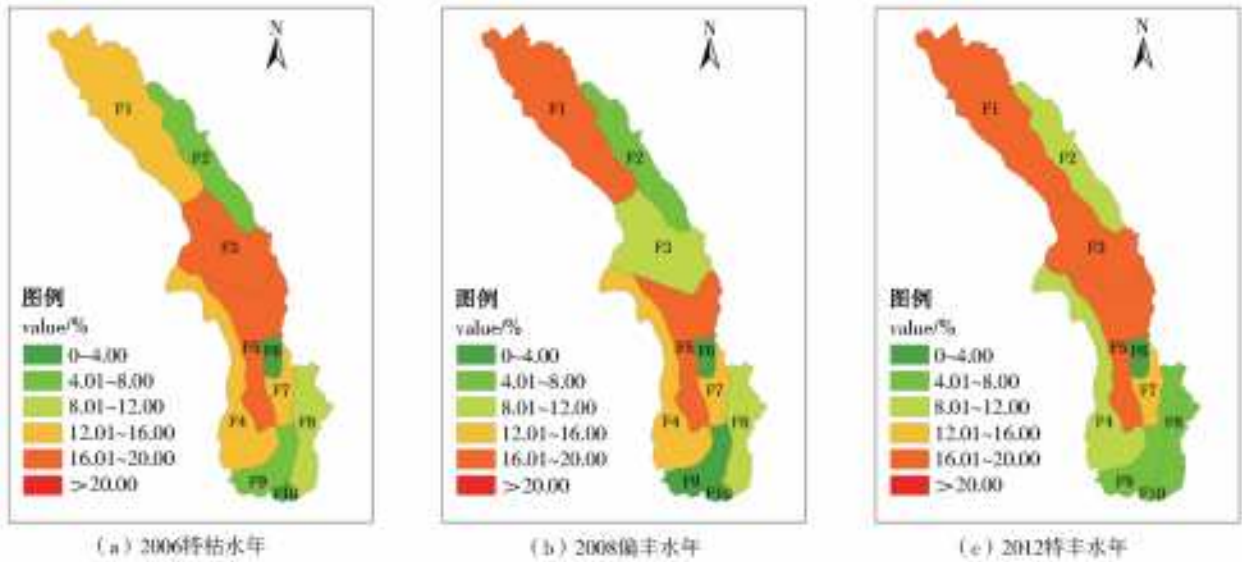


图 4 雅砻江流域全年径流贡献率分布

Fig. 4 Distribution of annual runoff contribution rate in the Yalong River basin

表 5 雅砻江流域径流贡献率时空分布

Tab. 5 Temporal and spatial distribution of runoff contribution rate in the Yalong River basin

单位: %

区域	涉及集水区编号	全年			枯季			汛期		
		2006	2008	2012	2006	2008	2012	2006	2008	2012
上游	F1、F2、F3	37.08	34.22	43.66	33.33	31.17	38.22	37.83	34.79	44.76
中游	F4、F5	29.88	32.00	27.14	33.74	32.87	26.00	28.31	31.70	27.37
下游	F6、F7、F8、F9、F10	33.04	33.78	29.20	32.93	35.96	35.78	33.86	33.50	27.87
左岸	/	55.71	56.09	55.04	58.27	60.95	57.24	57.66	56.03	57.34
右岸	/	44.29	43.91	44.96	41.73	39.05	42.76	42.34	43.97	42.66

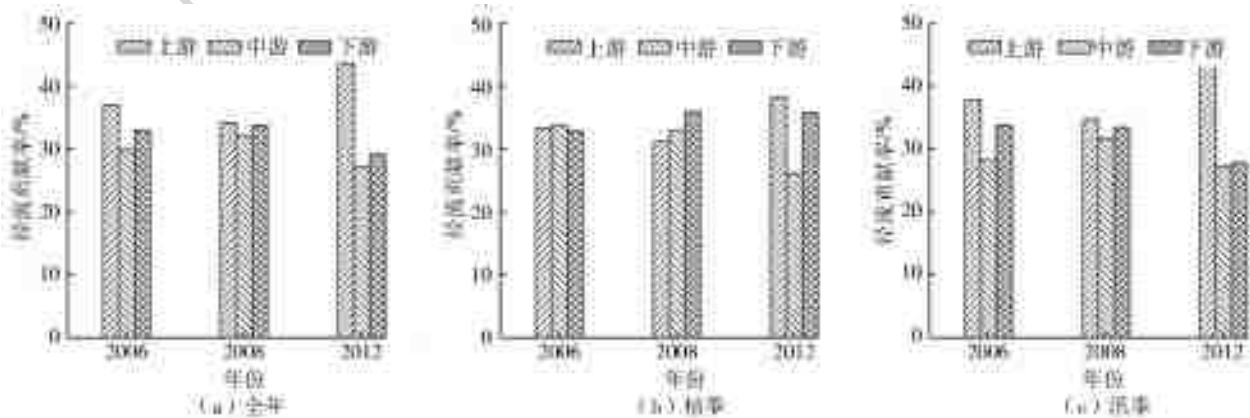


图 5 雅砻江流域径流贡献率

Fig. 5 Runoff contribution rate in the Yalong River basin

### 3.2.2 枯季径流空间分布特征

雅砻江流域枯季各集水区的出口断面径流量贡献率见图 6。特枯水年(2006), F5 集水区径流贡献率均大于 20%, 贡献程度最大, 而 F6、F10 集水区贡献率均小于 4%, 贡献程度微小; 雅砻江上、中、下游径流贡献率十分接近, 介乎为 32.93%~34.74%; 此外, 左、右岸贡献率分别为 58.27%和 41.73%, 表明左岸贡献大于右岸(图 6(a))。偏丰水年(2008), F5、F8 集水区径流贡献率均介于 16%~20%, 贡献程度大, 而 F6、F9 和 F10 集水区贡献率均小于 4%, 贡献程度微小; 雅砻江上游径流贡献率最大

(35.96%), 上游最小(31.17%), 其贡献率较接近; 此外, 左岸贡献率是右岸的 1.56 倍, 分别为 60.95%和 39.05%, 表明左岸贡献大于右岸(图 6(b))。特丰水年(2012), F1 集水区径流贡献率均介于 16%~20%, 贡献程度大, 而 F6 集水区贡献率均小于 4%, 贡献程度微小; 雅砻江上游径流贡献率最大(38.22%), 而中游最小(26.00%), 表明流域内径流量主要来自上游段; 此外, 左、右岸贡献率分别为 57.24%和 42.76%, 表明左岸贡献大于右岸(图 6(c))。2006 年(90%特枯年份)、2008 年(30%偏丰年份)和 2012 年(10%特丰年份)。

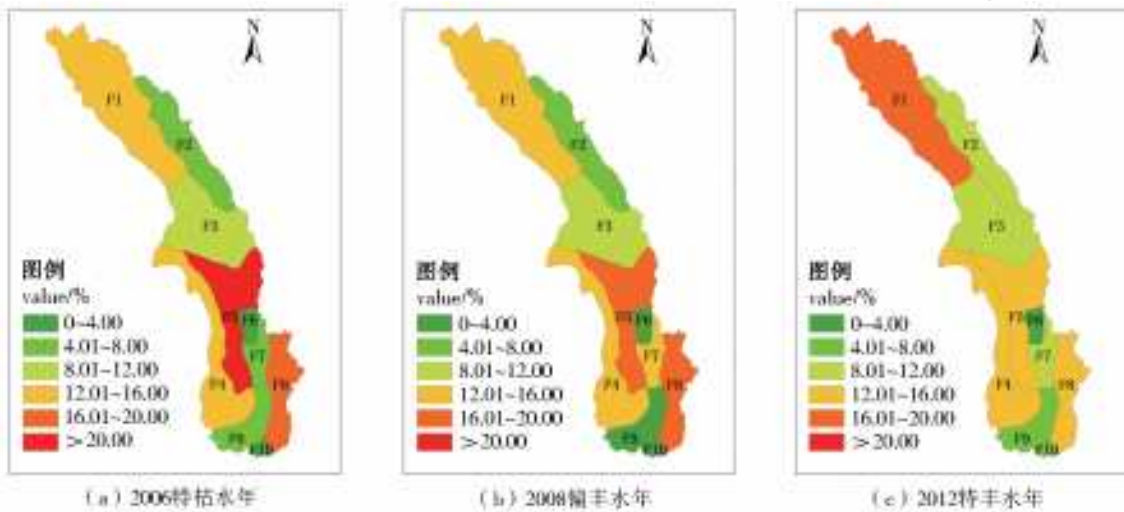


图 6 雅砻江流域枯季径流贡献率分布

Fig. 6 Distribution of runoff contribution rate in the dry season of the Yalong River basin

### 3.2.3 汛季径流空间分布特征

雅砻江流域各集水区的出口断面径流量贡献率见图 7。特枯水年(2006), F3、F5 集水区径流贡献率均介于 16%~20%, 贡献程度大, 而 F6、F10 集水区贡献率均小于 4%, 贡献程度微小; 雅砻江上游径流

贡献率最大(37.83%), 中游最小(28.31%), 表明流域内径流量主要来自上游段; 此外, 左、右岸贡献率分别为 57.66%和 42.34%, 表明左岸贡献大于右岸(图 7(a))。偏丰水年(2008), F1、F5 集水区径流贡献率均介于 16%~20%, 贡献程度大, 而 F6、F9 和 F10 集

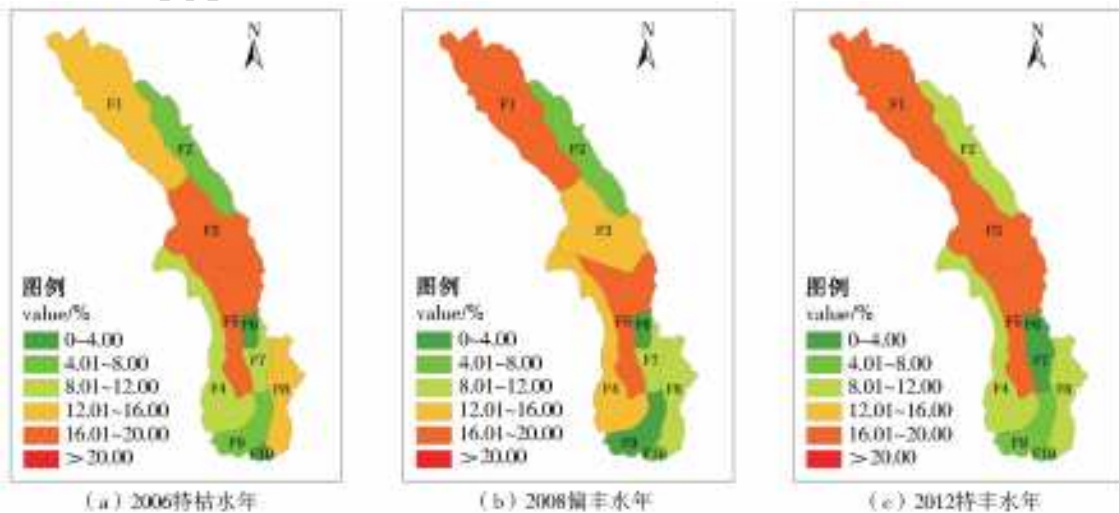


图 7 雅砻江流域汛季径流贡献率分布

Fig. 7 Distribution of runoff contribution rate in the flood season of the Yalong River basin

水区贡献率均小于4%,贡献程度微小;雅砻江上、中、下游径流贡献率十分接近,介于为31.70%~34.79%;此外,左、右岸贡献率分别为56.03%和43.97%,表明左岸贡献大于右岸(图7(b))。特丰水年(2012),F1、F3和F5集水区径流贡献率均介于16%~20%,贡献程度大,而F6、F7集水区贡献率均小于4%,贡献程度微小;雅砻江上游径流贡献率是中游的1.6倍,分别为44.76%和27.37%,表明流域内径流主要来自上游段;此外,左、右岸贡献率分别为57.34%和42.66%,表明左岸贡献大于右岸(图7(c))。

#### 4 讨论

气候变化、人类活动等因素改变流域下垫面的产汇流条件,对径流有着不同程度影响<sup>[18-20]</sup>。雅砻江流域径流主要来源于降水<sup>[9]</sup>,故流域径流年内分配均匀度与各月降雨量差异有关。雅砻江流域属川西高原气候区,主要受高空西风环流和西南季风影响,干湿季分明,降雨集中在5—10月,这是导致流域径流分配不均匀的主要原因。从表6可以看出,偏丰水年(2008)和特丰水年(2012),上、中、下游断面的控制站点5—10月降雨量占全年降雨90%以上(尤其2012年桐子林站占99.91%),降雨几乎全部来源5—10月,这造成了偏丰、特丰水年年内径流分配比较不均匀;特枯水年(2006)较偏丰、特丰水年年内降雨分布均匀,但桐子林站5—10月降雨量占全年降雨量比例达98.44%。

表6 流域站点5月—10月降雨量占全年降雨量比例

Tab.6 Proportion of rainfall from May to October in the whole year  
单位: %

站点	年份		
	2006	2008	2012
雅江站(上游)	89.19	95.64	93.65
沪宁站(中游)	90.82	95.14	98.40
桐子林站(下游)	98.44	96.01	99.91

一方面,雅砻江流域地势北、西、东三面高,向南倾斜,地形高差大,其中上游天然落差为1 176 m,中游天然落差为1 369 m,下游天然落差为647 m。流域内降雨和高程呈负相关关系<sup>[21]</sup>,使上游降雨量小于中游和下游,降雨量呈现由北向南,自西向东递增的趋势,这也解释了雅砻江干流左岸径流量大于右岸径流量。另一方面,上、中、下游的集水面积差异较大,分别占流域集水面积的52.16%,27.52%和20.32%(表7),在相同降雨强度下、上游降雨总量

接近中、下游的两倍,这也显著影响了流域上、中、下游的径流量分布情况。

表7 流域不同集水区集水面积占比

Tab.7 Area ratio of different sections in the basin

区域	单位: %				
	上游	中游	下游	左岸	右岸
占比	52.16	27.52	20.32	53.86	46.14

此外,本文仅考虑天然径流量,未考虑人类在雅砻江流域的各种活动,如水库拦蓄作用、农田灌溉、供水等,需在下一步研究进行深入探讨。总的来说,流域天然径流时间分布受降雨因素影响,空间分布特征由降雨、地形和集水面积等多种因素共同决定。

#### 5 结论

本文以雅砻江流域为研究对象,依据主要水文站和电站节点划分径流片区,利用水量平衡方法还原典型年份河川天然径流量,综合运用基尼系数法和径流贡献率指标,从年内分配和空间分布两个维度分析天然径流量的时空分布特征,主要结论如下。

(1)特枯水年,各站点基尼系数介于0.3~0.4,径流年内分配相对均匀;偏丰、特丰水年,径流年内分配不均匀;特丰、偏丰和特枯年份的基尼系数均值分别为0.49、0.43和0.35,流域内各站点径流年内分配均匀度与其丰枯变化一致,即特丰水年>偏丰水年>特枯水年,年径流量越大年份,其径流年内分配越不均匀,各月径流量相差大。

(2)枯季,特枯、偏丰水年流域上、中、下游径流贡献率比例接近1:1:1,而特丰水年流域径流贡献率为上游>下游>中游;汛期和全年流域径流空间分布特征一致,即特枯、特丰水年流域径流贡献率为上游>下游>中游,而偏丰水年流域径流贡献率比例接近1:1:1;总体呈现左岸径流量大于右岸径流量的分布格局。

(3)雅砻江流域天然径流时间分布主要受降雨因素影响,而空间分布特征由降雨、地形和集水面积等多种因素共同决定。

#### 参考文献(References):

[1] 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. (TU X J, CHEN X H, ZHANG Q, et al. Streamflow annual distribution and its influencing factors in Dongjiang River, south China[J]. Advances in Water

- Science, 2012, 23(4): 493-501. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j. cnki. 32. 1309. 2012. 04. 016.
- [2] 潘扎荣, 郭东阳, 唐世南. 淮河流域径流时空变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5): 8-14. (PAN Z R, GUO D Y, TANG S N. Spatial-temporal variability of streamflow in Huaihe River[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2017, 28(5): 8-14. (in Chinese)) DOI: 10. 11705/j. issn. 1672-643X. 2017. 05. 02.
- [3] PARTAL T, KAHYA E. Trend analysis in Turkish precipitation data[J]. Hydrol. Process, 2006, 20(9): 2011-2026. DOI: 10. 1002/hyp. 5993.
- [4] POTTER N J, CHIEW F H S, FROST A J. An assessment of the severity of recent reductions in rainfall and runoff in the Murray-Darling basin[J]. Journal of Hydrology, 2010, 381(1-2): 52-64. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2009. 11. 025.
- [5] 吴世勇, 申满斌. 雅砻江流域水电开发中的关键技术问题及研究进展[J]. 水利学报, 2007(S1): 15-19. (WU S Y, SHEN M B. The key technical issue and its research advance in Yalong River hydropower development[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(S1): 15-19. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2007. s1. 079.
- [6] LU D, WANG B E, WANG Y D, et al. Optimal operation of cascade hydropower stations using hydrogen as storage medium[J]. Applied Energy, 2015, 137(1): 56-63. DOI: 10. 1016/j. apenergy. 2014. 09. 092.
- [7] XU W, ZHANG C, PENG Y, et al. A two stage Bayesian stochastic optimization model for cascaded hydropower systems considering varying uncertainty of flow forecasts[J]. Water Resources Research, 2014, 50(12): 9267-9286. DOI: 10. 1002/2013WR015181.
- [8] 王浩, 王旭, 雷晓辉, 等. 梯级水库群联合调度关键技术发展历程与展望[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 25-37 (WANG H, WANG X, LEI X H, et al. The development and prospect of key techniques in the cascade reservoir operation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1): 25-37. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20180795.
- [9] 李荣波, 魏鹏, 纪昌明, 等. 雅砻江流域近 60a 径流趋势特征分析[J]. 人民长江, 2017, 48(5): 38-42. (LI R B, WEI P, JI C M, et al. Analysis of runoff tendency characteristics of Yalong River for past 6 decades[J]. Yangtze River, 2017, 48(5): 38-42. (in Chinese)) DOI: 10. 16232/j. cnki. 1001-4179. 2017. 05. 009.
- [10] 王渤权, 王丽萍, 李传刚, 等. 雅砻江流域径流年内分配特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(11): 81-84. (WANG B Q, WANG L P, LI C G, et al. Research on the runoff's distribution characteristics of the year in the Yalong River[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(11): 81-84. (in Chinese))
- [11] BARRETT C R, SALLES M. On a generalization of the Gini coefficient[J]. Mathematical Social Sciences, 1995, 30(3): 235-244. DOI: 10. 1016/0165-4896(95) 00787-3.
- [12] 胡彩霞, 谢平, 许斌, 等. 基于基尼系数的水文年内分配均匀度变异分析方法——以东江流域龙川站径流序列为例[J]. 水力发电学报, 2012, 31(6): 7-13. (HU C X, XIE P, XU B, et al. Variation analysis method for hydrologic annual distribution homogeneity based on Gini coefficient. A case study of runoff series at Longchun station in Dongjiang River basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(6): 7-13. (in Chinese))
- [13] 王青, 刘招, 陶望雄. 基于洛伦兹曲线的泾河张家山站径流及降雨分布不均匀性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 119-122, 127. (WANG Q, LIU Z, TAO W X. Analysis of heterogeneity of runoff and precipitation distribution at Zhangjiashan station of Jinghe based on Lorenz curve[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016, 27(1): 119-122. (in Chinese)) DOI: 10. 11705/j. issn. 1672-643X. 2016. 01. 21.
- [14] 叶琰, 马光文, 龙训建, 等. 金沙江下游及三峡梯级径流均匀度及突变性分析[J]. 水力发电学报, 2014, 33(2): 41-44. (YE Y, MA G W, LONG X J, et al. Study on runoff uniformity and mutation for the lower Jinsha reaches and the Three Gorges cascade[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(2): 41-44. (in Chinese))
- [15] 顾西辉, 张强, 陈晓宏. 中国降水及流域径流均匀度时空特征及影响因子研究[J]. 自然资源学报, 2015, 30(10): 1714-1724. (GU X H, ZHANG Q, CHEN X H. Spatiotemporal patterns of uniformity of precipitation and runoff over China and related influencing factors [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(10): 1714-1724. (in Chinese)) DOI: 10. 11849/zrzyxb. 2015. 10. 010.
- [16] 黄英, 刘新有. 水电开发对河流水沙年内分配的影响分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(3): 385-391. (HUANG Y, LIU X Y. Impact of hydropower development on annual runoff and sediment transport distribution[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(3): 385-391. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2010. 03. 016.

(下转第 141 页)



- ming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2006, 31(3): 54-57. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1007-855X.2006.03.015.
- [12] WANG P, SHI X X. A study on water self-purification [J]. Environmental Science & Technology, 1997(2): 13-16. (in Chinese) DOI: CNKI; SUN; FJKS. 0. 1997-02-005.
- [13] ZHANG L, WANG X C, WANG Z Y. Study on self-purification law of organic pollution in the main river section of Yanhe River [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 2000, 32(3): 260-262. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1006-7930.2000.03.016.
- [14] TIAN S, WANG Z, SHANG H. Study on the self-purification of Juma River [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 11(1): 1328-1333. DOI: 10.1016/j.proenv.2011.12.199.
- [15] WANG Y J, YAO Y S. The effect and measure of adherent microorganisms on water self-purification [J]. Biology Teaching, 2002, 27(6): 32-32. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1004-7549.2002.06.025.
- [16] JIANG D, LI K M, LIU J, et al. Study on the application of oxidation pond in bioremediation of black-odor river [J]. Ecological Environment, 2005, 14(6): 822-826. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1674-5906.2005.06.004.
- [17] HE B M, WEI M X. Environmental characteristics of fangcheng bay and analysis of water self-purification characteristics [J]. Marine Environmental Science, 2006, 25(A01): 64-67. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1007-6336.2006.z1.016.
- [18] FENG J Z, QIAO S Y. Calculation of water self-purification coefficient [J]. Shanxi Chemical Industry, 1993(2): 51-53. (in Chinese)
- [19] BEDFORD K W, SYKES R M, LIBICKI C. Dynamic advective water quality model for rivers [J]. Journal of Environmental Engineering, 1983, 109(3): 535-554.
- [20] LIU P. Determination and application of biodegradation coefficient of water environment [J]. Technology development, 2002(4): 16-17. (in Chinese)
- [21] LIU M W, CHEN F. Analysis on water quality characteristics and pollution law of highway surface runoff [J]. Highway Traffic Technology (Applied Technology edition), 2017(4): 161-163. (in Chinese) DOI: CNKI; SUN; GLJJ. 0. 2017-04-052.
- [22] LIANG J K, XIN X K, LU L, et al. Analysis of water quality variation and potential pollution sources in main channel of Middle Route Project of South to North Water Diversion [J]. Yangtze River, 2017, 48(15): 6-9. (in Chinese) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2017.15.002.

(上接第 80 页)

- [17] 肖伟华, 秦大庸, 李玮, 等. 基于基尼系数的湖泊流域集水区水污染物总量分配 [J]. 环境科学学报, 2009, 29(8): 1765-1771. (XIAO W H, QIN D Y, LI W, et al. Model for distribution of water pollutants in lake basin based on environmental Gini coefficient [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(8): 1765-1771. (in Chinese) DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2009.08.028.
- [18] 夏军, 刘春蓁, 刘志雨, 等. 气候变化对中国东部季风区水循环及水资源影响与适应对策 [J]. 自然杂志, 2016, 38(3): 167-176. (XIA J, LIU C Z, LIU Z Y, et al. Impact of climate change and adaptive strategy on terrestrial water cycle and water resources in east monsoon area of China [J]. Chinese Journal of Nature, 2016, 38(3): 167-176. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.0253-9608.2016.03.002.
- [19] 王随继, 李玲, 颜明. 气候和人类活动对黄河中游区间产流量变化的贡献率 [J]. 地理研究, 2013, 32(3): 395-402. (WANG S J, LI L, YAN M. The contributions of climate change and human activities to the runoff yield changes in the middle Yellow River basin [J]. Geographical Research, 2013, 32(3): 395-402. (in Chinese) DOI: 10.11821/yj2013030001.
- [20] 王庆平, 季志恒, 王喜诚. 变化环境下海河流域水文循环及时空演化规律分析 [J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(3): 92-96. (WANG Q P, JI Z H, WANG X C. Hydrological cycle and analysis of spatial and temporal evolution of changing environment in Haihe River basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(3): 92-96. (in Chinese) DOI: 1672-1683(2010)03-0092-05.
- [21] 袁定波, 艾萍, 洪敏, 等. 基于地理空间要素的雅砻江流域面雨量估算 [J]. 水科学进展, 2018, 29(6): 779-787. (YUAN D B, AI P, HONG M, et al. Estimation of areal rainfall in Yalong River basin based on geospatial factors [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(6): 779-787. (in Chinese) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2018.06.003.