

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2019.04.006

# 金沙江流域云南片水文极小值演变及生态基流保障分析

王东升, 袁树堂, 杨 祺

(云南省水文水资源局, 云南 昆明 650106)

**摘要:**基于金沙江流域云南片内主要支流1968—2017年水文径流极小值及年月平均流量数据,采用一元线性回归、Mann-Kendall等分析其极小值演变特征,采用Tennant法及地区经验综合分析其河道生态基流,并对其生态基流保障程度进行了评价。结果表明:东北区、西北区为年极小值对应每100 km<sup>2</sup>产流高值区,滇中区为低值区,地区差异显著,东北区年径流极小值呈现显著波动减少趋势,滇中区、中北区及西北区变化趋势不一;主要支流平均仅有47%的年份生态基流得到全部保障,53%年份水文极小值低于生态基流,其中东北区及西北区保障程度较高,滇中区保障程度低;预计东北区受天然来水影响、西北区部分河流受水利水电工程调度影响,生态基流保障压力将逐步加大,滇中区除昆明、曲靖部分河流生态基流保障程度将逐步得到改善外,其他大部分河流将持续处于高压状态。

**关键词:**水文极小值;年际变化;突变分析;河道生态基流;金沙江流域云南片

**中图分类号:**TV11;X143 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2019)04-0035-07

**Analysis of hydrological minimum evolution and ecological base flow guarantee in Yunnan area of Jinshajiang River Basin, China** // WANG Dongsheng, YUAN Shutang, YANG Qi (*Yunnan Provincial Bureau of Hydrology and Water Resources, Kunming 650106, China*)

**Abstract:** Based on the minimum hydrological runoff value and annual mean flow data of the main tributaries in the region of Yunnan area in the Jinsha River Basin from 1968 to 2017, the evolution characteristics of minimum values were analyzed by linear regression and Mann-Kendall method, and the river ecological base flow were comprehensively analyzed by Tennant method and regional experience, and the protection degree of ecological base flow was evaluated. The results show that, the northeast and northwest areas of the study area are the high value area of the annual minimum value corresponding to the high yield area per 100 km<sup>2</sup>, and the Dianzhong area is the low value area. The regional differences are significant. The annual minimum runoff value in the northeast region shows a significant fluctuation decreasing trend. The variation trend of Dianzhong area, North Central District and Northwest area is different. On average, only 47 percent years of ecological base flow are guaranteed and 53 percent years hydrological minimum value is lower than ecological base flow in the main tributaries, in which Northeast China and Northwest China have a higher level of security, while central Yunnan has a lower level of security. It is predicted that the northeast region will be affected by natural water inflow and some rivers in the northwest region will be affected by water conservancy and hydropower project dispatch. The pressure of ecological base flow security will gradually increase. In Dianzhong area, except for some of the rivers in Kunming and Qujing, the degree of ecological base flow protection will be gradually improved, most of the other rivers will continue to be in a high pressure state.

**Key words:** hydrological minimum; interannual variability; mutation analysis; river ecological base flow; Yunnan area of Jinsha River Basin

气候变化下极端水文事件是近年来发展起来的与诸多学科密切相关的新兴交叉研究方向。洪涝灾

害、干旱等极端水文事件的发生正成为人类面临的重大挑战,但目前相关研究成果相对较少<sup>[1]</sup>。水文

基金项目:国家自然科学基金(91547205)

作者简介:王东升(1981—),男,高级工程师,硕士,主要从事水文预报和山洪灾害预警研究。E-mail:116955105@qq.com

极值很少出现,但一旦出现将产生巨大影响<sup>[2]</sup>。现有的针对水文极值的研究成果主要集中于引起洪涝灾害的水文极大值<sup>[14]</sup>,与干旱、水生态环境相关性较强的水文极小值研究较为少见。金沙江流域是我国西部生态脆弱区<sup>[5]</sup>,同时也是长江流域重要生态屏障,承担了长江上游水源涵养、防风固沙和生物多样性保护等重要功能<sup>[6]</sup>。现有研究成果表明,作为金沙江流域重要组成部分的云南片区气温有显著升高趋势,潜在蒸发和蒸发皿蒸发呈增加趋势,降水及主要干支流径流量无明显变化<sup>[7-11]</sup>;降水以短历时降水为主,且短历时降水强度、次数呈增加趋势<sup>[12]</sup>。气候的变化对金沙江流域内自然生态系统、水资源量和自然灾害均产生影响,加剧了流域生态系统的脆弱性<sup>[13]</sup>。金沙江下游水生态处于亚健康状态<sup>[14]</sup>,2009—2014年又遭遇1961年以来最严重的持续性干旱<sup>[15]</sup>,形势更为严峻。在此背景下,本研究基于金沙江流域云南片区域内水文代表站1968—2017年年径流极小值及年月平均流量数据,采用Mann-Kendall非参数统计检验法(以下简称M-K法)、一元线性回归法分析区域水文极小值演变规律,采用Tennant法及地区经验分析河流生态基流,评估极端情况下生态基流保障程度,旨在为掌握区域干旱、水生态环境面临的形势,采取合理的水资源调度配置方案和水生态环境保护措施提供参考。

## 1 研究区域概况

金沙江流域云南片位于云南省北部,省内总集水面积109 524.6 km<sup>2</sup>,占云南省国土面积的28.52%,东西横跨昆明等7个州(市)、47个县(市、区),多年平均径流量424.1亿m<sup>3</sup>,占云南省水资源量的19.2%。流域内水系发达,集水面积在1000 km<sup>2</sup>以上的河流有32条,100~1000 km<sup>2</sup>的265条,封闭湖泊3个<sup>[16]</sup>。研究区属低纬度高原季风气候,分布有北热带、南亚热带、中亚热带、北亚热带、南温带、中温带与高原气候区,垂直变化十分明显,各地年平均气温在5.5~21.9℃,年平均降水量在300~1300 mm,5—10月降水量占年降水量的90%左右<sup>[1]</sup>。径流主要来自降水,西北部少数河流有融雪补给,丰水期(6—11月)径流量占全年的81.9%,枯水期(12—5月)径流量占全年的18.9%<sup>[17]</sup>。研究区地貌分属云南省滇西横断山地、滇中红色高原与滇东喀斯特高原三大地理单元,区域构造运动强烈,地壳活动剧烈。研究区内春旱较为广泛,水资源分布极不平衡,其中昆明市所在滇池流域人均水资源量不足300 m<sup>3</sup>,为极度缺水,因此开展区域水文

极小值研究对当地抗旱救灾、水生态环境保护具有重要意义。根据区域自然地理和水文特性,结合《云南省水文手册》,本研究将金沙江流域云南片划分为东北区、中北区、滇中区、西北区4个区域,其中中北区包括东西2部分,区域划分及水系见图1。



图1 金沙江流域云南片水文代表站及区域划分

## 2 研究资料与方法

### 2.1 研究资料

选取研究区内建站时间较早、资料系列较长、观测持续、面上分布较为均衡、覆盖流域内主要水文分区和主要支流的关河豆沙关站、白水江牛街站、牛栏江七星桥站、螳螂川蔡家村站、龙川江上段楚雄站、龙川江下段小黄瓜园站、落漏河黄坪站、万马河中和街站、渔泡江地索站、五郎河总管田站、腊普河塔城站、交界河上桥头站等共12个水文站作为区域代表站进行分析,各站位置所属分区见图1,资料包括各水文代表站1968—2017年共50年年最小瞬时流量(年径流极小值)、月平均流量系列。以上资料均来自云南省水文水资源局整编成果。中北区东片区缺乏满足系列长度要求的区域代表站,查阅《云南省水文手册》,发现中北区内东片区与西片区河道基流特征相似,因此使用中北区西片区分析成果来代表中北区水文极小值特性。

### 2.2 水文极小值演变分析方法

依据收集到的金沙江流域云南片水文代表站水文数据,分析年径流极小值及其对应的每100 km<sup>2</sup>产流量变化范围,应用离散系数分析系列变异程度,以分析研究区内年径流极小值的地区分布规律。为在同一尺度上比较各代表站年径流极小值变化趋势,归一化处理系列数据,采用一元线性回归法和M-K法分析年径流极小值变化趋势,并使用M-K法检验趋势变化显著性水平及突变点,结合其他文献

研究成果及产汇流条件,分析影响年径流极小值演变的主要因素。

### 2.3 生态基流计算方法

生态基流指能满足河道生态环境功能的基础流量<sup>[18-19]</sup>,是维系和保护河流的最基本生态功能不受破坏所必须在河道内保留的最小流量<sup>[20-21]</sup>。Tennant 法取年平均天然流量的 10% 作为河流生态基流<sup>[22]</sup>,但这在季节性河流中应用有局限性<sup>[20,23]</sup>。云南省河流天然径流季节性明显,生态基流的确定应考虑水资源的合理开发利用,结合不同地区及不同生态环境,汛期生态基流按照 Tennant 法取值基本合理<sup>[24-26]</sup>,枯季应针对枯季径流特点考虑生态基流计算方法<sup>[27-28]</sup>。伍立群等<sup>[28]</sup>提出云南省丰水区、中水区以及来水量年际年内变化较小河流可按 Tennant 法确定生态基流,少水区以及来水量年际年内变化较大的河流枯季生态基流取枯季平均流量的 20%。本研究依据此结论确定生态基流,研究区域内东北区、西北区属中水区,滇中区属少水区,中北区属少水区向中水区过渡区,生态基流参照少水区确定<sup>[27]</sup>。

## 3 水文极小值特征及演变

### 3.1 特征分析

对金沙江流域云南片主要支流 12 个水文代表站 1968—2017 年共 50 年年径流极小值系列多年平均值、最大值、最小值对应每 100 km<sup>2</sup> 集水面积产流量进行离散系数分析,结果见表 1。金沙江流域云南片年径流极小值系列对应每 100 km<sup>2</sup> 集水面积产流量最大值在 0.024 ~ 1.233 m<sup>3</sup>/s,最大值流域平均为 0.408 m<sup>3</sup>/s,最小值在 0.000 ~ 0.456 m<sup>3</sup>/s,最小值流域平均为 0.092 m<sup>3</sup>/s,平均值流域平均为 0.225 m<sup>3</sup>/s,离

散系数在 0.220 ~ 1.342。从空间分布来看,东北区、西北区为年径流极小值对应每 100 km<sup>2</sup> 集水面积产流量高值区,其次为中北区,云南传统缺水地区金沙江流域中部的滇中区为年径流极小值对应每 100 km<sup>2</sup> 集水面积产流量低值区,12 个代表站中最大站点是最小站点的 220 倍,地区差异巨大,楚雄州、大理州部分河道部分时段出现断流现象。离散系数分析结果表明,东北区及西北区河道 1968—2017 年年径流极小值系列相对较为稳定,离散系数在 0.40 以下,滇中区的楚雄州龙川江及昆明市螳螂川离散系数大于 1.2,1968—2017 年径流极小值年际变化差异大。

### 3.2 年际变化分析

为在同一尺度上进行比较,对各水文代表站 1968—2017 年径流极小值系列进行了归一化处理,绘制归一化后过程线,采用一元线性回归法分析推求线性趋势,并采用 M-K 法检验趋势的显著性,结果见表 2,分析成果示例见图 2。由表 2、图 2 可知,东北区河流年径流极小值呈现波动减少趋势,区域内关河豆沙关站和白水牛街站的年径流极小值减少趋势显著性水平通过 95% 置信度检验;滇中区及中北区河流年径流极小值系列趋势较为分散,区域内牛栏江七星桥站年径流极小值增大趋势显著性水平通过 95% 置信度检验,龙川江下段小黄瓜园站、螳螂川蔡家村站年径流极小值减少趋势显著性水平通过 95% 置信度检验,落漏河黄坪站、万马河中和街站年径流极小值呈现不显著上升趋势,龙川江上段楚雄站、渔泡江地索站、五郎河总管田站年径流极小值呈现不显著下降趋势;西北区腊普河塔城站呈不显著上升趋势,交界河上桥头站因近年受上游水电站工程调度影响,呈现不显著下降趋势。

表 1 金沙江流域云南片水文代表站水文极小值特征

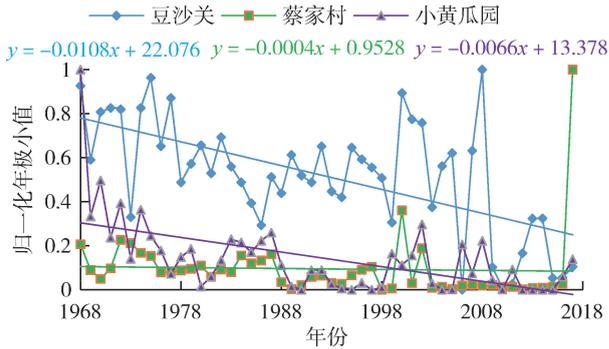
代表站	所在分区	集水面积/km <sup>2</sup>	产流量实测值/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )			每 100 km <sup>2</sup> 产流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )			离散系数
			多年平均	最大	最小	多年平均	最大	最小	
豆沙关	东北区	9410	32.300	56.00	7.200	0.344	0.595	0.077	0.400
牛街	东北区	2838	21.500	35.00	11.000	0.757	1.233	0.388	0.231
七星桥	滇中区	2549	0.625	1.53	0.050	0.025	0.060	0.002	0.590
蔡家村	滇中区	5163	2.200	20.00	0.340	0.043	0.387	0.007	1.342
小黄瓜园	滇中区	5560	0.191	1.350	0.000	0.003	0.024	0.000	1.218
楚雄	滇中区	1788	0.141	0.600	0.000	0.008	0.034	0.000	1.208
地索	滇中区	1954	0.191	0.780	0.044	0.010	0.040	0.002	0.738
中和街	中北区	528	0.969	2.840	0.220	0.183	0.538	0.042	0.450
总管田	中北区	2083	1.830	3.100	0.480	0.088	0.149	0.023	0.306
黄坪	滇中区	829	0.049	0.223	0.000	0.006	0.027	0.000	0.874
塔城	西北区	724	5.360	8.220	3.300	0.740	1.135	0.456	0.220
上桥头	西北区	2432	12.100	16.500	2.510	0.498	0.678	0.103	0.285
流域平均						0.225	0.408	0.092	0.655

表2 金沙江流域云南片水文代表站年径流极小值年际变化趋势分析及突变检测结果

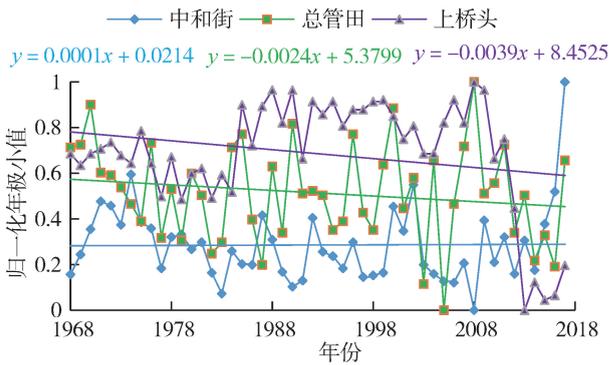
代表站	一元线性回归方程斜率	M-K 值	突变信号出现年份
豆沙关	-0.0108	-4.02	1984
牛街	-0.0050	-2.65	2002
七星桥	0.0036	1.97	1998
蔡家村	-0.0004	-4.24	1989
小黄瓜园	-0.0066	-4.71	1978
楚雄	-0.0005	-0.29	无突变
地索	-0.0012	-1.46	1978、1996、2011
中和街	0.0001	-1.10	1978
总管田	-0.0024	-1.31	1972
黄坪	0.0016	0.06	1999
塔城	0.0010	0.93	1972
上桥头	-0.0039	0.14	1985、2015

表3 金沙江流域云南片水文代表站年径流极小值突变前后均值变化

代表站	时段	年径流极小值平均值/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )
豆沙关	1968—1983年	41.080
	1984—2017年	28.230
七星桥	1968—1997年	0.490
	1998—2017年	0.827
小黄瓜园	1968—1977年	0.467
	1977—2017年	0.122
中和街	1968—1977年	1.160
	1977—2017年	0.921
总管田	1968—1971年	2.408
	1971—2017年	1.776
塔城	1968—1971年	4.080
	1971—2017年	5.468
牛街	1968—2001年	22.520
	2002—2017年	19.260
蔡家村	1968—1988年	2.672
	1989—2017年	1.862
地索	1968—1977年	0.263
	1977—1995年	0.120
	1996—2010年 2011—2017年	0.270 0.099
黄坪	1968—1998年	0.039
	1998—2017年	0.066
上桥头	1968—1984年	11.290
	1984—2014年	13.380
	2015—2017年	3.930



(a) 豆沙关站、蔡家村站、小黄瓜园站



(b) 中和街站、总管田站、上桥头站

图2 金沙江流域云南片水文代表站1968—2017年径流极小值系列归一化年际变化过程

### 3.3 突变分析

使用 M-K 法对金沙江流域云南片主要支流 12 个水文代表站 1968—2017 年径流极小值系列进行突变检验,结果见表 3。由表 3 可知,1968—2017 年除龙川江上段楚雄站未出现突变信号外,其他各站均有突变信号出现,其中渔泡江地索站出现 3 次、交界河上桥头站出现 2 次,关河豆沙关站、白水江牛街站、牛栏江七星桥站、螳螂川蔡家村站、龙川江下段小黄瓜园站突变后形成新的趋势,显著性水平通过 95% 置信度检验,突变时间主要集中在 20 世纪七八十年代,且各代表站突变前后均值均发生了较大幅度变化。

### 3.4 演变成因分析

年径流极小值系列发生突变及趋势形成的影响因素有很多,主要影响因素包括:①产汇流条件发生变化,如砍伐树木、植树造林、种植结构调整、水利水电工程建设等。12 个代表站中有 8 个站点在 20 世纪 70 年代、80 年代出现突变,与当时大规模砍伐树木,森林覆盖率快速降低,流域蓄水能力降低有关。1989 年,我国实施长江上游水土流失重点防治工程,情况得到一定控制。上桥头站在 2015 年形成突变,与前期上游水电工程蓄水发电改变枯季河道汇流条件有关;蔡家村站虽在 2017 年未检出突变信号,然该站 2017 年度极小值大幅度超出历史系列最大值,与云南省实施牛栏江—滇池补水工程有关,该工程多年向该站上游滇池流域平均调水 5.72 亿 m<sup>3</sup>[29],多于滇池多年平均水资源量 5.56 亿 m<sup>3</sup>,其中枯季(11 月至次年 4 月)调水量为 2.43 亿 m<sup>3</sup>,大幅度增加了蔡家村站汛期、枯季来水量。②气温变化改变流域蒸发及融雪条件。全球气候变暖的大趋势下,除靠近四川省攀枝花区域气温呈下降趋势外[13,30],金沙江流域云南片其他大部分地区气温呈显著上升趋势,平均以每 10 年 0.29℃ 上升,其中中段平均上

升幅度达每 10 年 0.46℃,上段平均上升幅度在每 10 年 0.18℃<sup>[13]</sup>,而四季中冬季升温幅度最大,潜在蒸发和蒸发皿蒸发呈增加趋势<sup>[7-8,13]</sup>,该趋势对滇中区、中北区及东北区所属的大部分区域的影响表现为增大了枯季蒸发量,降低枯季来水量,是形成区域内大部分站点年径流极小值出现减少趋势的主要原因之一,同时气温上升有利于西北区冰雪覆盖区域融雪期提前,增大枯季径流量,如塔城站年径流极小值系列出现上升趋势。③降水量趋势变化改变水资源条件。金沙江云南片除东北区昭通市昭阳区年降水量呈显著减少趋势并在 1986 年发生突变,西北区迪庆州德钦县呈减少趋势并于 1966 年发生突变外,其他均呈增加趋势<sup>[9-11]</sup>,其中靠近四川省攀枝花区域增加趋势最为明显<sup>[30]</sup>。该趋势进一步解释了研究区内东北区河流代表站年径流极小值呈显著下降趋势、中北区靠近四川省攀枝花区域的河道年径流极小值整体呈现增大趋势的原因。

#### 4 河道生态基流保障分析

根据 12 个水文代表站 1968—2017 年月平均径流量系列数据分别计算各河道汛期、枯季生态基流,并以此对各水文代表站 1968—2017 年年径流量极小值是否满足河道生态基流需求进行评价,结果见表 4。滇中区昆明市牛栏江七星桥站、大理州落漏河黄坪站 50 年内年径流极小值均低于生态基流,楚雄州龙川江上段楚雄站、下段小黄瓜园站、楚雄州渔泡江地索站、昆明市螳螂川蔡家村站有 40~49 年年径流极小值低于生态基流,中北区丽江市五郎河总管田站有 21 年年径流极小值低于生态基流,东北区昭通市关河豆沙关站、中北区楚雄州万马河中和街站、西北区迪庆州交界河上桥头站有 3~7 年年径流极小值低于生态基流,东北区昭通市白水江牛街站、

表 4 金沙江流域云南片水文代表站生态基流保障分析

代表站	所在区域	汛期生态基流/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	枯季生态基流/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	年径流极小值 满足生态基流 年份占比/%
豆沙关	中水区	12.80	12.80	86
牛街	中水区	7.96	7.96	100
七星桥	少水区	2.39	1.64	0
蔡家村	少水区	3.09	3.18	20
小黄瓜园	少水区	2.18	1.02	2
楚雄	少水区	0.87	0.50	6
地索	少水区	0.63	0.35	12
中和街	少水区	0.68	0.62	86
总管田	少水区	2.68	1.70	58
黄坪	少水区	0.48	0.44	0
塔城	中水区	1.59	1.59	100
上桥头	中水区	3.72	3.72	94

西北区迪庆州腊普河塔城站年径流极小值均大于生态基流。1968—2017 年,研究区主要河流平均仅有 47% 的年份生态基流能得到全部保障,53% 的年份年径流极小值低于生态基流,其中东北区、西北区、中北区局部生态基流保障程度较高,滇中区大部分河道大部分年份年径流极小值小于生态基流,水生态环境压力大。

#### 5 结论

a. 研究区东北区、西北区为年极小值对应每 100 km<sup>2</sup>集水面积产流量高值区,滇中区为低值区,中北区为过渡区,地区差异显著。

b. 研究区东北区年径流极小值呈现显著波动减少趋势,滇中区、中北区及西北区河流变化趋势不一,除滇中区龙川江上段年径流极小值系列未出现突变信号外,其他各河道均有突变信号出现,部分河流突变后极小值特征值发生明显变化,形成突变及趋势变化的主要原因有降水、产汇流条件、气候背景发生变化。

c. 1968—2017 年,研究区主要支流平均仅有 47% 的年份生态基流能得到全部保障,其中区域东北区及西北区生态基流保障程度较高,滇中区大部分河道大部分年份年径流极小值无法满足生态基流需水,水生态环境压力较大、抗旱救灾压力大。

d. 预计研究区东北区受天然来水影响、西北区部分河流受水利水电工程调度影响,生态基流保障及干旱压力将逐步增大,滇中区昆明、曲靖河流生态基流保障程度将逐步得到改善,滇中区其他区域大部分河流生态基流保障及干旱为持续高压状态。建议云南省加快滇中引水工程向滇中区补水,加强水利水电工程生态流量调度管理,以提高生态基流保障度。

#### 参考文献:

[1] 张利平,杜鸿,夏军,等. 气候变化下极端水文事件的研究进展[J]. 地理科学进展,2011,30(11):1370-1379. (ZHANG Liping, DU Hong, XIA Jun, et al. Progress in the study of extreme hydrologic events under climate change [J]. Progress in Geography, 2011, 30(11):1370-1379. (in Chinese))

[2] 张强,孙鹏,江涛. 鄱阳湖流域水文极值演变特征、成因与影响[J]. 湖泊科学,2011,23(3):445-453. (ZHANG Qiang, SUN Peng, JIANG Tao. Changing properties, causes and impacts of extreme streamflow in Lake Poyang Basin, China[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(3):445-453. (in Chinese))

[3] 褚茜茜,陈进,陈广才. 长江源区 1978-2009 年径流极

- 值序列变化趋势分析[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(2): 16-19. (CHU Xixi, CHEN Jin, CHEN Guangcai. Variation trend of extreme runoff series in the source region of Yangtze River from 1978 to 2009[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(2): 16-19. (in Chinese))
- [4] 叶长青, 陈晓宏, 张家鸣, 等. 变化环境下北江流域水文极值演变特征、成因及影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(12): 2102-2112. (YE Changqing, CHEN Xiaohong, ZHANG Jiaming, et al. Changing properties, causes and impacts of extreme stream flow under the changing environment in Beijiang River, China [J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(12): 2102-2112. (in Chinese))
- [5] 夏既胜, 杨树华, 张林艳, 等. 金沙江流域(云南部分)生态潜力及其变化[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(5): 798-802. (XIA Jisheng, YANG Shuhua, ZHANG Linyan, et al. On ecological potential power and its change in Jinsha River watershed(Yunnan part) [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(5): 798-802. (in Chinese))
- [6] 郑金秀, 高少波, 池仕运, 等. 金沙江下游水生生态状况评价及保护战略[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(9): 174-179. (ZHENG Jinxiu, GAO Shaobo, CHI Shiyun, et al. Hydro-ecological assessment and protection strategies of Jinsha River downstream [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(9): 174-179. (in Chinese))
- [7] 郝振纯, 杨荣榕, 陈新美, 等. 1960-2011年长江流域潜在蒸发量的时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2013, 35(2): 408-419. (HAO Zhenchun, YANG Rongrong, CHEN Xinmei, et al. Tempo-spatial patterns of the potential evaporation in the Yangtze River catchment for the period 1960-2011 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(2): 408-419. (in Chinese))
- [8] 荣艳淑, 张行南, 姜海燕, 等. 长江上游区域蒸发皿蒸发量变化及其对水分循环的影响[J]. 地球物理学报, 2012, 55(9): 2889-2897. (RONG Yanshu, ZHANG Xingnan, JIANG Haiyan, et al. Pan evaporation change and its impact on water cycle over the upper reach of the Yangtze River [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(9): 2889-2897. (in Chinese))
- [9] 曾小凡, 叶磊, 翟建青, 等. 1961-2010年金沙江流域降水时空演变特征[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(3): 402-407. (ZENG Xiaofan, YE Lei, ZHAI Jianqing, et al. Temporal and spatial variations of precipitation in Jinshajiang River Basin during 1961-2010 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(3): 402-407. (in Chinese))
- [10] 陈媛, 王顺久, 王国庆, 等. 金沙江流域径流变化特性分析[J]. 高原山地气象研究, 2010, 30(2): 26-30. (CHEN Yuan, WANG Shunjiu, WANG Guoqing, et al. Runoff variation characteristics analysis on Jinsha River [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2010, 30(2): 26-30. (in Chinese))
- [11] 卢璐, 王琼, 王国庆, 等. 金沙江流域近60年气候变化趋势及径流响应关系[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2016, 37(5): 16-21. (LU Lu, WANG Qiong, WANG Guoqing, et al. Trend of climate change over the recent 60 years and its hydrological responses for Jinsha River Basin [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power, 2016, 37(5): 16-21. (in Chinese))
- [12] 冶运涛, 梁犁丽, 龚家国, 等. 长江上游流域降水结构时空演变特性[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 164-171. (YE Yuntao, LIANG Lili, GONG Jianguo, et al. Spatial-temporal variability characteristics of precipitation structure across the upper Yangtze River Basin, China [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(2): 164-171. (in Chinese))
- [13] 赵庆由, 明庆忠. 1971—2009年金沙江流域气候变化特征及对生态环境的影响[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(6): 18-23. (ZHAO Qiongyou, MING Qingzhong. Climate change characteristics and its effect on ecological environment from 1971 to 2009 in the Jinsha River valley of Yunnan Province [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2010, 26(6): 18-23. (in Chinese))
- [14] 郑金秀, 高少波, 池仕运, 等. 金沙江下游水生生态状况评价及保护战略[J]. 环境科学与技术, 2014(9): 174-179. (ZHENG Jinxiu, GAO Shaobo, CHI Shiyun, et al. Hydro-ecological assessment and protection strategies of Jinsha River downstream [J]. Environmental Science & Technology, 2014(9): 174-179. (in Chinese))
- [15] 荣艳淑, 巩琳, 卢寿德. 云南2009—2014年持续性气象水文干旱特征及成因分析[J]. 水资源保护, 2018, 34(3): 22-29. (RONG Yanshu, GONG Lin, LU Shoude. Analysis on characteristics and causes of persistent meteorological and hydrological drought in Yunnan from 2009 to 2014 [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(3): 22-29. (in Chinese))
- [16] 《云南河湖》编委会. 云南河湖[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2010
- [17] 赵文焕, 高袁. 金沙江流域径流年代际变化特性分析[J]. 人民长江, 2011, 42(6): 98-100. (ZHAO Wenhuan, GAO Yuan. Analysis on annual and decadal runoff variation characteristics of Jinsha River Basin [J]. Yangtze River, 2011, 42(6): 98-100. (in Chinese))
- [18] 倪深海, 崔广柏. 河道生态环境需水量的计算[J]. 人民黄河, 2002, 24(9): 37-38. (NI Shenhai, CUI Guangbo. The calculation of ecosystem water need in dawen river channel [J]. Yellow River, 2002, 24(9): 37-38. (in Chinese))

Chinese))

- [19] 李怀恩, 岳思羽, 赵宇. 河道生态基流价值研究进展[J]. 水利经济, 2015, 33(4): 6-9. (LI Huaen, YUE Siyu, ZHAO Yu. Research progress in value of ecological basic flow[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2015, 33(4): 6-9. (in Chinese))
- [20] 张泽聪, 韩会玲, 陈丽. 基于改进的 Tennant 法的大凌河生态基流计算[J]. 水电能源科学, 2013(9): 29-31. (ZHANG Zecong, HAN Huiling, CHEN Li. Calculation of ecological base flow in Dalinghe River based on improved tennant method[J]. Water Resources and Power, 2013(9): 29-31. (in Chinese))
- [21] 徐伟, 董增川, 罗晓丽, 等. 基于改进 7Q10 法的滦河生态流量分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 454-457. (XU Wei, DONG Zengchuan, LUO Xiaoli, et al. Analysis of ecological flow in Luanhe River based on improved 7Q10 method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(5): 454-457. (in Chinese))
- [22] 张代青, 高军省. 河道内生态环境需水量计算方法的研究现状及其改进探讨[J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17(4): 68-73. (ZHANG Daiqing, GAO Junsheng. Discuss on the research situation of estimating methods of eco-environmental water requirements in river course and its modification[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2006, 17(4): 68-73. (in Chinese))
- [23] 杨裕恒, 曹升乐, 刘阳, 等. 基于改进 Tennant 法的小清河生态基流计算[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(5): 97-101. (YANG Yuheng, CAO Shengle, LIU Yang, et al. Calculation of ecological base flow in Xiaoqing River based on improved tennant method[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(5): 97-101. (in Chinese))
- [24] 马平森, 雷艳娇, 卯昌书, 等. 基于用水总量与效率控制的云南省水资源配置[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(1): 49-53. (MA Pingsen, LEI Yanjiao, MAO Changshu, et al. Water resources rational allocation based on total water consumption and water efficiency control in Yunnan Province [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(1): 49-53. (in Chinese))
- [25] 关家康. 供给侧结构性改革中的云南省水资源管理[J]. 水利经济, 2018, 36(1): 77-80. (GUAN Jiakang. Water resource management in Yunnan Province under supply-side structural reform[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(1): 77-80. (in Chinese))
- [26] 谢永红, 张云英. 云南省区域水资源与社会经济协调发展研究[J]. 水资源保护, 2015, 31(3): 112-114. (XIE Yonghong, ZHANG Yunying. Research on regional water resource and social economy coordinated development in Yunnan Province [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(3): 112-114. (in Chinese))
- [27] 杨影丹, 陈文华. 云南省中小河流水能开发河流生态流量探讨[J]. 小水电, 2011(6): 31-34. (YANG Yindan, CHENG Wenhua. Discussion on ecological flow of rivers in water energy development of medium and small rivers in Yunnan Province [J]. Small Hydro Power, 2011(6): 31-34. (in Chinese))
- [28] 伍立群, 王超. 云南省河流生态需水量的片区特点[J]. 水文, 2009(增刊1): 116-119. (WU Liqun, WANG Chao. Characteristics of the area of river ecological water demand in Yunnan Province [J]. Journal of China Hydrology, 2009(Sup1): 116-119. (in Chinese))
- [29] 王伟营, 王志明, 卢飞. 牛栏江—滇池补水工程对鱼类的影响及补偿措施[J]. 云南水力发电, 2014, 30(4): 149-152. (WANG Weiying, WANG Zhiming, LU Fei, Impact of Niulanjiang-Dianchi Water Supply Project on fish and compensation measures [J]. Yunnan Water Power, 2014, 30(4): 149-152. (in Chinese))
- [30] 陈媛, 王文圣, 王国庆, 等. 金沙江流域气温降水变化特性分析[J]. 高原山地气象研究, 2010, 30(4): 51-56. (CHEN Yuan, WANG Wensheng, WANG Guoqing, et al. Characteristics analysis on temperature and precipitation variation in Jinsha River [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2010, 30(4): 51-56. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-12-31 编辑: 彭桃英)

(上接第 34 页)

- [17] 宋逸云, 黄峰. 衢江江水流沙变化趋势分析[J]. 水资源保护, 2017, 33(4): 40-46. (SONG Yiyun, HUANG Feng. Trend analysis of runoff and sediment load variation in Qujiang River [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(4): 40-46. (in Chinese))
- [18] 张祥, 辛红侠, 侯光, 等. 潼关水文站近十年水沙情势分析[J]. 东北水利水电, 2017, 35(8): 52-53. (ZHANG Xiang, XIN Hongxia, HOU Guang, et al. Analysis of water and sediment situation in Tongguan Hydrological Station in the last ten years [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2017, 35(8): 52-53. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-10-26 编辑: 王芳)