

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2022.0054

李阳,林锦.小水电站减脱水段最小生态流量计算:以盘溪梯级水电站为例[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(3):536-543. LI Y, LIN J. Calculation of minimum ecological flow in dewatering section of small hydropower stations: Taking Panxi cascade hydropower stations as an example[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(3): 536-543. (in Chinese)

# 小水电站减脱水段最小生态流量计算

——以盘溪梯级水电站为例

李阳<sup>1,2</sup>, 林锦<sup>1</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. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

**摘要:**以盘溪梯级水电站的大洋水库为例,采用改进的 Tennant 法、年内展布法、Q<sub>90</sub>法、改进的频率法以及 NGPRP (northern great plains resource program)法计算大洋水库应下泄的最小生态流量。选取 95%保证率为保护目标,通过进一步的合理性分析,分析 5 种方法在 95%保证率下的满足程度,从而提出年内展布法和改进的频率法是最适合该地区的最小生态流量计算方法。在满足 95%保证率的情况下,选取年内展布法和改进的频率法的内包线得到大洋水库应下泄的最小生态流量过程,并以此思路推求出盘溪梯级一级电站至四级电站区间最小生态流量过程。

**关键词:**最小生态流量;盘溪梯级水电站;减脱水段;年内展布法;改进的频率法

中图分类号:TV74;P33 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



小水电属于清洁、绿色可再生能源,不存在资源枯竭问题,也不会对环境造成污染,是推进节能减排、改善大气环境的有效举措之一。我国小水电站量大面广,小水电站的运行调节了河流水量,改变了河流水文过程,当大坝蓄水或者通过引水坝引流出部分水量进行发电时,下游一段区域内的流量就会减少,甚至出现断流的情况,势必会给生态环境造成不利影响,流量减少的这部分河段即为河流的减脱水段<sup>[1-3]</sup>。生态流量下泄不足是造成减脱水段生态恶化的主要原因。

目前,国内外对生态流量的研究主要集中在大江大河,对中小河流特别是小水电站减脱水河段生态流量的研究较少,对可选用的生态流量计算方法也缺乏科学分析,相当一部分小水电站还没有确定

最小生态流量<sup>[4-6]</sup>。据统计,目前国内外生态流量计算方法已有 200 多种,这些方法大致可分为水文学法、水力学法、栖息地定额法以及整体法 4 类<sup>[7-11]</sup>。由于小水电站多建于山区,位置偏僻且通信不便,资料短缺情况常见,研究者在概算生态流量时多以资料获取程度和投入成本作为计算方法的选用标准。其中,水文学法作为计算生态流量的经典方法,是指基于实测或还原的历史流量系列资料,选取天然流量百分比或者某一保证率下的流量作为生态流量,以 Tennant 法、年内展布法、频率法等为代表,其原理简单、易操作,尤其在资料缺乏地区具有优势<sup>[12-18]</sup>。随着生态流量研究的不断深入,新的生态流量计算方法及工具也在不断增加,如何在众多方法中选取最为适合的、更加准确的方法,成为生态流

收稿日期:2021-06-19 修回日期:2021-09-03 网络出版时间:2021-09-09

网络出版地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210909.1057.002.html>

基金项目:中央分成水资源费项目“小水电减脱水段生态流量保障对策制定项目”(Ss519040)

作者简介:李阳(1997—),女,山东德州人,主要从事生态水文学研究。E-mail:1073402378@qq.com

通信作者:林锦(1981—),男,浙江平阳人,正高级工程师,主要从事地下水开发利用与保护、水资源管理等研究。E-mail:jlin@nhri.cn

量研究中待解决的问题之一。

以盘溪梯级水电站的大洋水库为例,根据研究区域资料情况,采用改进的 Tennant 法、年内展布法、Q 90法、改进的频率法以及 NGPRP(northern great plains resource program)法等水文学方法计算最小生态流量,经合理性分析,提出最适合该地区的最小生态流量计算方法,并计算了盘溪一级电站至四级电站区间最小生态流量过程。该思路计算得到的结果既反映了该地区季节性河流的水文情势变化特性,又能在枯水季节维持所选定保证率下的河道水生态环境的最小流量。研究成果对我国小水电最小生态流量研究具有参考价值。

## 1 研究区概况

盘溪梯级水电站位于浙江省缙云县胡源乡,始建于1970年,属于典型的龙头水库梯级开发模式,龙头水库为大洋水库。该水电站共开发了七级水电站,分别是:盘溪一级、盘溪二级、盘溪三级、盘溪四级、天生桥、盘溪五级和盘溪六级水电站,盘溪梯级电站分布见图1。其中,盘溪一级电站至四级电站位于盘溪上游,通过引水系统连续发电,即上一级尾水直接通过引水系统引至下一级电站发电,其间不回归天然河道,并最终于盘溪四级电站处汇入原河道,故一级电站至四级电站区间天然河道内流量减少形成了减脱水河段。本文主要针对一级电站至四级电站的最小生态流量进行研究计算。



图1 盘溪梯级电站分布

Fig. 1 Distribution diagram of Panxi cascade hydropower station

## 2 研究资料与思路方法

### 2.1 研究资料

利用大洋水库的水文资料开展最小生态流量计算研究,在盘溪流域内无实测流量资料,但流域附近设有多个雨量站、水文站,其中:砵头水文站流域集水面积 18.4 km<sup>2</sup>,多年平均降水量 1 715 mm;大洋水库集水面积 20.1 km<sup>2</sup>,多年平均降水量 1 671.6 mm。两站流域集水面积较为相似,多年平均降水量接近,位置靠近,域内地形均以山地为主。根据《2020 年浙江省水资源公报》中全省年径流深等值线图所示,参证流域与设计流域径流特征分布趋势一致。砵头站建于 1966 年,具有较长设计径流资料系列。以砵头站为参证站,将砵头站逐日降雨径流模型有关参数移用于本地区,利用设计流域 1961—2011 年历年各月逐日降水量和逐日蒸发量,经分析计算,求得大洋水库库区 1961—2011 年历年逐日径流过程。大洋水库至盘溪二级电站、二级电站至三级电站、三级电站至四级电站区间年径流推求采用水文比拟法进行,以大洋水库为参照点,得到历年各月平均流量。

### 2.2 计算思路及方法

首先,按照三生用水统筹原则,建议最小生态流量保证率为 95%,仅次于基本生活用水,高于一般工业用水。以大洋水库作为研究站点,基于该研究站点可获取的长系列还原径流数据等资料,采用改进的 Tennant 法、年内展布法、Q 90法、改进的频率法、NGPRP 法,分别对大洋水库应下泄最小生态流量进行计算。

其次,采用大洋水库近 30 年还原径流数据,评价上述各种方法计算结果的合理性,即评价计算结果在该断面天然径流过程中满足设定保证率的程度。若满足程度明显超出或者低于设定的保证率要求,则认为该计算方法不适用于大洋水库。

最后,通过多种方法的对比筛选出适合大洋水库最小生态流量的计算方法。在满足设定保证率基础上,将多种适宜方法计算的最小生态流量的内包线作为该河段的最小生态流量过程。

## 3 生态流量计算

### 3.1 计算过程

#### 3.1.1 改进的 Tennant 法

Tennant 法<sup>[19-21]</sup>,也叫蒙大拿法,以河道多年平均径流量作为基础,根据不同的需水情况和来水情

况,选取一定的频率计算河道生态流量,通常以年平均流量的 10% 作为河道最小生态流量。该方法是一种最简单、最方便的生态流量计算方法,但其计算结果仅为单一数值,忽略了河流的水文情势变化,故常作为一种参考或者检验方法。

本文采用改进的 Tennant 法计算最小生态流量,即在 Tennant 方法的基础上,将所有年份进行丰(保证率<25%)、平(25%≤保证率≤75%)和枯水年(保证率>75%)分组,并对不同来水年各月份

分别计算最小生态流量。

当秋、冬季来水量较小时,应保证河流最小生态流量,即不同来水年下各月多年平均流量的 10% 分别作为最小生态流量下限。在春夏降雨量较多且正值鱼类产卵育幼的季节,应采用不同来水年下各月平均流量的 30% 作为河流的最小生态流量。基于此,利用改进的 Tennant 法最终确定丰、平、枯不同来水年各月最小生态流量过程,计算结果见表 1,过程见图 2。

表 1 改进的 Tennant 法计算的不同来水年各月最小生态流量

Tab. 1 The monthly minimum ecological flow for different water years calculated by the improved Tennant method

来水年	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
丰水年	0.008	0.014	0.087	0.112	0.150	0.178	0.168	0.168	0.055	0.019	0.011	0.007
平水年	0.009	0.015	0.082	0.095	0.099	0.172	0.097	0.133	0.035	0.011	0.008	0.007
枯水年	0.006	0.013	0.061	0.079	0.073	0.108	0.067	0.095	0.019	0.007	0.005	0.004

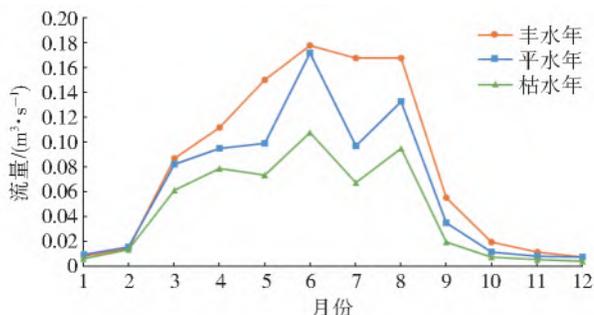


图 2 改进的 Tennant 法计算的不同来水年各月最小生态流量过程线

Fig. 2 The process line of the minimum ecological flow in different water years and months calculated by the improved Tennant method

### 3.1.2 年内展布法

年内展布法<sup>[22-23]</sup>基于历史流量资料,以年最小径流总量与多年平均径流总量二者之间的比值,得到各月生态流量与各月多年平均径流量之间的关系,以此确定最小生态流量。该方法克服了 Tennant 法取多年平均流量的特定比例的主观性,能够定量地反映生态流量随河流水文情势的变化情况。

统计分析长系列水文径流资料,利用皮尔逊 III 型曲线,得到不同保证率下的年径流量,同时为避免

极枯与极丰年份数据对计算结果的影响,除去 5% 以下和 95% 以上的数据,以确保资料可靠合理。多年平均径流量、最小年径流量以及各月最小生态流量计算公式为

$$\bar{Q} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \bar{Q}_i \quad (1)$$

$$\bar{Q}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Q_{ij} \quad (2)$$

$$\bar{Q}_{\min(i)} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} Q_{\min(i)} \quad (3)$$

$$Q_{\min(i)} = \min(Q_{ij}) \quad (4)$$

$$\eta = \frac{\bar{Q}_{\min}}{\bar{Q}} \quad (5)$$

$$Q_i = \eta \bar{Q}_i \quad (6)$$

式中: $\bar{Q}$  为各月历年平均径流量的平均值,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $\bar{Q}_i$  为第  $i$  月河道多年平均径流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $Q_{ij}$  为  $j$  年  $i$  月河道径流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $\bar{Q}_{\min}$  为各月最小径流量的平均值,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $Q_{\min(i)}$  为第  $i$  月最小月径流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $\eta$  为同期均值比;  $Q_i$  第  $i$  月河道最小生态流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $n$  为统计年数。

根据公式(1)~(4)对大洋水库应下泄的最小生态流量进行计算,计算结果见表 2。

表 2 年内展布法计算得到的大洋水库各月应下泄的最小生态流量

Tab. 2 The minimum ecological flow that should be discharged from the Dayang reservoir in each month calculated by the spread method during the year

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	7月	9月	10月	11月	12月
生态流量	0.039	0.071	0.126	0.146	0.168	0.251	0.166	0.212	0.175	0.061	0.041	0.030

### 3.1.3 Q<sub>90</sub>法

Q<sub>90</sub>法<sup>[24]</sup>对各年的月平均流量的最小月份流

量值排频,将其 90% 保证率下的流量值作为最小生态流量。根据大洋水库 1961—2011 年历史流量数

据,获得历年月平均流量最小值并进行排频,算得90%保证率对应的流量即0.019 m<sup>3</sup>/s,作为大洋水库应下泄的最小生态流量。

### 3.1.4 改进的频率法

频率法<sup>[25]</sup>是对多年时段流量系列进行频率分析和配线,建立流量与频率之间的函数关系,以选定的某一枯水期频率的流量作为该时段的最小生态流量。

改进的频率法利用多项式拟合各时段的流量频率曲线,建立流量与频率之间的函数关系,并把水深、流速等水力要素作为修正和参考标准因素之一。在满足这些生态水力要素要求的基础上,以枯水期

频率计算各月最小生态流量过程。计算过程如下。

对某时段(按旬、季、丰水期、枯水期等时段划分单位,为方便与其他方法对比,以月为单位进行时段划分)的多年流量系列从大到小排序计算经验频率 $P$ ,对流量与经验频率进行拟合,建立流量 $q$ 与 $P$ 之间的函数关系。经验频率计算的表达式为

$$P(q_m) = \frac{m}{N+1} \quad (5)$$

式中: $m$ 为流量按从大到小排序后的序号(计算时为避免特大流量对计算结果造成影响,可将其剔除); $q_m$ 为对应 $m$ 排序的流量; $N$ 为样本序列容量。

各月份的流量频率拟合效果见图3。

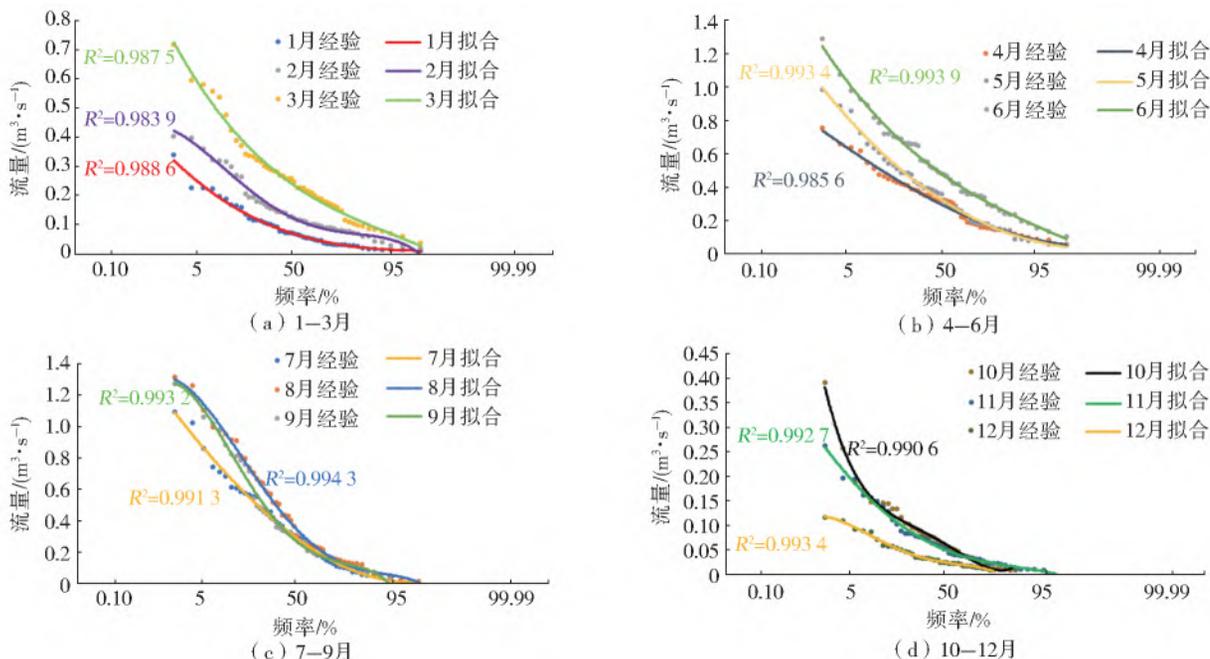


图3 大洋水库不同月份流量频率拟合效果

Fig. 3 Comparison diagram of empirical frequency and fitting frequency of discharge of Dayang reservoir in different months

以75%的频率作为枯水期频率进行计算,根据流量频率函数初步推求最小生态流量。以水深、流速作为约束条件,为保持河道的基本生态功能,取本地典型鱼类体长的2~3倍记作生态水深;以当地优势或典型鱼类的适宜流速作为生态

流速(当地无洄游性鱼类,流速要求较小),确定生态水深为0.3 m,生态流速为0.02 m/s。在生态水力要素的控制下,对频率曲线法计算的生态流量重新修正,得到修正后各月最小生态流量,见表3。

表3 改进的频率法计算得到的大洋水库应下泄的最小生态流量

Tab. 3 Minimum ecological flow that should be discharged from the Dayang reservoir calculated by the improved frequency method

单位:m<sup>3</sup>/s

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
修正后的最小生态流量	0.050	0.079	0.146	0.193	0.193	0.324	0.152	0.187	0.153	0.053	0.050	0.050

### 3.1.5 NGPRP法

NGPRP<sup>[26]</sup>法是指基于不同水文年的差别,将水文系列分为丰、平、枯水年组,取平水年组中各月流量90%保证率下的流量值作为最小生态流量。

针对大洋水库1960—2011年的基本水文资料,基于上文中改进的Tennant法筛选得到的平水年基本数据,对该数据排频分析,得到90%保证率下的流量0.067 m<sup>3</sup>/s作为大洋水库应下泄的各月最小生态流量。

### 3.2 对比分析

利用上述 5 种方法计算大洋水库应下泄的最小生态流量见表 4。

为验证计算方法的合理性,将 5 种方法的计算结

果与选定保证率为 95% 的最小生态流量比较分析,以确定适合该研究区域的最小生态流量计算方法。利用 1961—2011 年 95% 保证率下的流量数据,不同方法计算结果与 95% 保证率下的流量对比见图 4。

表 4 不同方法计算的各月最小生态流量  
Tab. 4 Minimum ecological flow calculated by different methods

方法		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
改进的 Tennant 法	丰水年	0.008	0.014	0.029	0.037	0.050	0.059	0.056	0.056	0.055	0.019	0.011	0.007
	平水年	0.009	0.015	0.027	0.032	0.033	0.057	0.032	0.044	0.035	0.011	0.008	0.007
	枯水年	0.006	0.013	0.020	0.026	0.024	0.036	0.022	0.032	0.019	0.007	0.005	0.004
年内展布法		0.039	0.071	0.126	0.146	0.168	0.251	0.166	0.212	0.175	0.061	0.041	0.030
Q90法		0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019
改进的频率法		0.050	0.079	0.146	0.193	0.193	0.324	0.152	0.187	0.153	0.053	0.050	0.050
NGPRP 法		0.067	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067

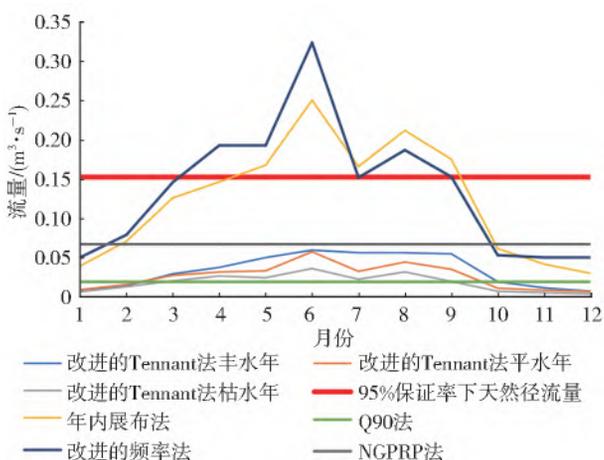


图 4 不同方法计算结果与 95% 保证率对比

Fig. 4 Comparison between calculation results by different methods and 95% guarantee rate

通过对比分析知:改进的 Tennant 法、Q 90 法

以及 NGPRP 法的计算结果满足程度明显低于 95% 保证率,结果偏差较大;年内展布法和改进的频率法得到的各月最小生态流量在 95% 保证率的流量线处上下波动,满足程度明显高于改进的 Tennant 法、Q 90 法以及 NGPRP 法。因此,年内展布法和改进的频率法更适合于此区域最小生态流量计算,这两种方法由河道的实际径流情况推求得到河道不同月份的最小生态流量要求能够更好地适应生态环境的季节变化特性。

综上,考虑到在枯水年、枯水季节也应保证河道的最小生态流量,在满足 95% 保证率的基础上,采取年内展布法和改进的频率法计算最小生态流量,并选取 2 种方法计算结果的内包线作为大洋水库各月应下泄的最小生态流量。各月最小生态流量值见表 5,其变化过程见图 5。

表 5 大洋水库各月下泄的最小生态流量

Tab. 5 ecological discharge of Dayang reservoir in each month

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
核定后的生态流量	0.152	0.152	0.152	0.152	0.168	0.251	0.152	0.187	0.153	0.152	0.152	0.152

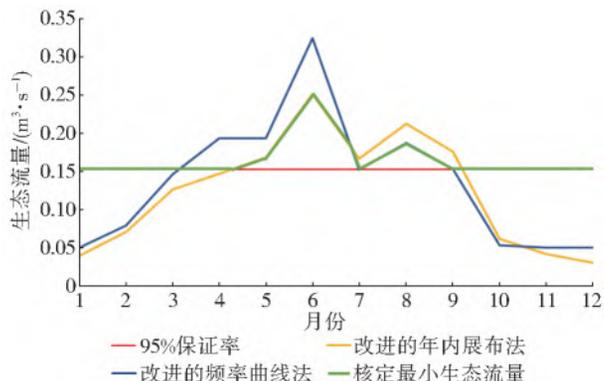


图 5 大洋水库各月下泄的最小生态流量

Fig. 5 Minimum ecological flow of Dayang reservoir in each month

按此思路继续计算二级和三级电站应下泄的最小生态流量,最终得到盘溪一级电站至四级电站区间所需的各月最小生态流量,计算结果详见表 6。

2018 年盘溪梯级水电站进行生态改造,取消各级电站对上级电站至本级电站区间来水的截流发电,让区间来水回归减脱水河道,增加河道生态流量。《缙云县盘溪梯级电站生态示范区(增效扩容改造增值)工程设计报告》资料显示,一级电站至二级电站区间多年平均流量 0.17 m³/s,二级电站至三级电站区间多年平均流量 0.25 m³/s,三级电站至四级电站区间多年平均流量 0.40 m³/s,加上盘溪

一级电站泄放的最小生态流量,均能使各级电站区间保证河道生态需水要求,即大洋水库按上述计算结果下泄最小生态流量后,补充一级电站至二级电站区间流量 0.17 m<sup>3</sup>/s,可满足一级电站至二级电站区间最小生态流量要求;同时考虑二级电站至三级电

站区间多年平均流量 0.25 m<sup>3</sup>/s 后,可满足二级电站至三级电站区间最小生态流量要求;加之三级电站至四级电站区间的多年平均流量 0.40 m<sup>3</sup>/s,能够满足三级电站至四级电站区间处的最小生态流量要求。

表 6 盘溪梯级电站一级电站至四级电站各月最小生态流量

Tab. 6 Minimum ecological flow of Panxi cascade hydropower stations 1~IV

单位: m<sup>3</sup>/s

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
一级至二级	0.152	0.152	0.152	0.152	0.168	0.251	0.152	0.187	0.153	0.152	0.152	0.152
二级至三级	0.182	0.182	0.182	0.216	0.248	0.355	0.239	0.306	0.270	0.182	0.182	0.182
三级至四级	0.102	0.102	0.111	0.134	0.153	0.219	0.148	0.189	0.167	0.102	0.102	0.102

#### 4 结 论

采用改进的 Tennant 法、年内展布法、Q 90法、改进的频率法和 NGPRP 法等 5 种方法计算了盘溪一级电站至四级电站最小生态流量,得到如下结论。

以盘溪梯级水电站的大洋水库为例,采用改进的 Tennant 法、年内展布法、Q 90法、改进的频率法以及 NGPRP 法计算最小生态流量。通过进一步的合理性分析,提出年内展布法和改进的频率法是最适合该地区的最小生态流量计算方法。

在满足 95%保证率的情况下,采取年内展布法和改进的频率法计算最小生态流量,并选取 2 种方法的内包线作为大洋水库各月应下泄的最小生态流量。

经计算得到大洋水库下泄的最小生态流量下限为 0.152 m<sup>3</sup>/s,即枯水年的枯水月份也应保证下泄该流量。加上一级电站至四级电站各级区间来水后,一级电站至四级电站区间河道最小生态流量均能得到满足。

#### 参考文献(References):

[1] 赵建达,吴昊. 中国小水电大事记(1904—2019年)(之五)[J]. 小水电, 2021(4): 1-13. (ZHAO J D, WU H. China small hydropower memorabilia (1904-2019) (V) [J]. Small Hydro Power, 2021(4): 1-13. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-7642.2021.04.001.

[2] 何正华. 小水电清理整改措施研究[J]. 中国水能及电气化, 2021(4): 27-29. (HE Z H. Study on small hydropower clean-up and rectification measures[J]. China Water Power & Electrification, 2021(4): 27-29. (in Chinese)) DOI: 10.16617/j.cnki.11-5543/TK.2021.04.06.

[3] 吴昌贤,薄岩,黄微尘,等. 黄河干流生态流量赤字及其成因[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(4): 8-16. (WU C X, BO Y, HUANG W C, et al. Ecological flow requirement deficit of the Yellow River and its key drivers[J]. South-to-North Water Transfer and Water

Science & Technology, 2020, 18(4): 8-16. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkqk.2020.0069.

[4] 柴朝晖,姚仕明. 河流生态研究热点与进展[J]. 人民长江, 2021, 52(4): 68-74. (CHAI C H, YAO S M. The hot spot and progress of river ecology research[J]. Yangtze River, 2021, 52(4): 68-74. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.04.011.

[5] 刘兆孝. 《长江保护法》对推进流域水资源保护重点工作的启示[J]. 长江技术经济, 2021, 5(2): 17-20. (LIU Z X. The enlightenment of the Yangtze River protection law to the key work of promoting water resources protection in the basin[J]. Technology and Economy of Changjiang, 2021, 5(2): 17-20. (in Chinese)) DOI: 10.19679/j.cnki.cjjsj.2021.0202.

[6] 王浩,钮新强,杨志峰. 黄河流域水系统治理战略研究[J]. 中国水利, 2021(5): 1-4. (WANG H, NIU X Q, YANG Z F. Research on the strategy of water system management in the Yellow River basin[J]. China Water Resources, 2021(5): 1-4. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2021.05.006.

[7] TOTH L A. The ecological basis of the Kissimmee River restoration plan[J]. Florida Scientist, 1993, 56(1): 25-51.

[8] 周芬,王丽婷,钟名军. 基于径流频率和河道形态的生态流量分析方法[J]. 人民长江, 2019, 50(10): 73-76. (ZHOU F, WANG L T, ZHONG M J. Ecological flow analysis method based on runoff frequency and river morphology[J]. Yangtze River, 2019, 50(10): 73-76. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.10.013.

[9] 王鸿翔,桑明崎,查胡飞,等. 基于生态水文学法的湘江生态流量研究[J]. 人民长江, 2019, 50(8): 70-73. (WANG H X, SANG M Q, ZHA H F, et al. Study on the ecological flow of Xiangjiang River based on ecological hydrology law[J]. Yangtze River, 2019, 50(8): 70-73. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.08.012.

[10] 姚云泽,姜翠玲,万福涛. 基于多种水文学方法的滦河

- 典型断面生态基流研究[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(5): 941-949. (YAO Y Z, JIANG C L, WAN F T. Research on ecological base flow of classical sections in the Luan River using various hydrology methods [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(5): 941-949. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2021. 0098.
- [11] 葛金金, 彭文启, 张汶海, 等. 确定河道内适宜生态流量的几种水文学方法: 以沙颍河周口段为例[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(2): 75-80. (GE J J, PENG W Q, ZHANG W H, et al. Several hydrological methods for determining the suitable ecological flow in the river: Take the zhoukou section of the Shaying River as an example [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 75-80. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2019. 0036.
- [12] 陈昂, 隋欣, 廖文根, 等. 我国河流生态基流理论研究回顾[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2016, 14(6): 401-411. (CHEN A, SUI X, LIAO W G, et al. Review of the theory of ecological base flow of rivers in China [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2016, 14(6): 401-411. (in Chinese)) DOI: 10. 13244/j. cnki. jiwahr. 2016. 06. 001.
- [13] 徐宗学, 武玮, 于松延. 生态基流研究: 进展与挑战[J]. 水利发电学报, 2016, 35(4): 1-11. (XU Z X, WU W, YU S Y. Ecological base flow research: Progress and challenges [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(4): 1-11. (in Chinese))
- [14] KARIMI S S, ESLAMIAN S. Use of hydrological methods for assessment of environmental flow in a river reach [J]. International Journal of Environmental Science & Technology, 2012, 9(3): 549-558.
- [15] ABDI R, YASI M. Evaluation of environmental flow requirements using eco-hydrologic-hydraulic methods in perennial rivers [J]. Water Science and Technology, 2015, 72(3): 354-363.
- [16] 李法云, 巴晓博, 屠克豹, 等. 辽宁省北部典型河流生态流量计算方法对比[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(6): 168-174. (LI F Y, BA X B, TU K B, et al. Comparison of the calculation methods of ecological flow of typical rivers in northern Liaoning Province [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2015, 31(6): 168-174. (in Chinese))
- [17] 董哲仁, 张晶, 赵进勇. 生态流量的科学内涵[J]. 中国水利, 2020(15): 15-19. (DONG Z R, ZHANG J, ZHAO J Y. The scientific meaning of ecological flow [J]. China Water Resources, 2020(15): 15-19. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1123. 2020. 15. 007.
- [18] 武明亮. 生态基流计算方法的研究综述[J]. 内蒙古水利, 2019(11): 52-53. (WU M L. A review of the research on the calculation method of ecological base flow [J]. Inner Mongolia Water Resources, 2019(11): 52-53. (in Chinese))
- [19] 杨裕桓, 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 Y H, CAO S L, LIU Y, et al. Based on the calculation of the ecological base flow of the Xiaoqing River based on the improvement of Tennant method [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(5): 97-101. DOI: 10. 11705/j. issn. 1672-643X. 2016. 05. 18. (in Chinese))
- [20] 陈凯霖, 冯民权, 王丹丹. 基于径流还原的桑干河生态基流及其盈缺分析研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(2): 90-96. (CHEN K L, FENG M Q, WANG D D. Analysis of the ecological base flow and its defects of the Sanggan River based on runoff reduction [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(2): 90-96. (in Chinese)) DOI: 10. 11705/j. issn. 1672-643X. 2018. 02. 15.
- [21] 石永强, 左其亭. 基于多种水文学法的襄阳市主要河流生态基流估算[J]. 中国农村水利水电, 2017(2): 50-54, 59. (SHI Y Q, ZUO Q T. Estimation of the ecological base flow of major rivers in Xiangyang City based on various hydrographic methods [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(2): 50-54, 59. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2284. 2017. 02. 012.
- [22] 朱晔, 方红远, 王铨洁, 等. 改进的年内展布法在河流生态需水计算中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2021(10): 105-109. (ZHU Y, FANG H Y, WANG C J, et al. Application of improved dynamic calculation method to ecological water demands [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(10): 105-109. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2284. 2021. 10. 016.
- [23] 林梦珂, 魏娜, 卢锟明, 等. 基于改进年内展布法的生态基流计算方法[J]. 水电能源科学, 2021, 39(5): 66-70. (LIN M K, WEI N, LU K M, et al. Based on the improvement of the eco-base flow calculation method of the year-end spreading method [J]. Hydropower and Energy Science, 2021, 39(5): 66-70. (in Chinese))
- [24] 汪青辽, 郝红升, 李永. 基于 Q90 法与 R<sub>2</sub>-Cross 法的麻栗坝水库下游河道生态流量研究[J]. 环境科学导刊, 2021, 40(1): 51-55. (WANG Q L, HAO H S, LI Y. Study on the ecological discharge of the lower reaches of the Maliba reservoir based on Q90 method and R<sub>2</sub>-Cross method [J]. Environmental Science Survey,

- 2021, 40 (1): 51-55. DOI: 10. 13623/j. cnki. hkdk. 2021. 01. 012.
- [25] 潘扎荣, 阮晓红. 淮河流域河道内生态需水保障程度时空特征解析[J]. 水利学报, 2015, 46(3): 280-290. (PAN Z R, RUAN X H. Analysis of the space-time characteristics of ecological water demand in the Huaihe River basin[J]. Journal of Water Resources, 2015, 46(3): 280-290. (in Chinese))
- [26] 黄显峰, 钟婧玮, 方国华, 等. 基于 ME-Tennant 法的河道生态流量过程评价模型研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(2): 20-26. (HUANG X F, ZHONG J W, FANG G H, et al. Evaluation of ecological flow process of river by coupling matter element analysis and tennant method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(2): 20-26. (in Chinese)) DOI: 10. 11988/ckyyb. 20170940.

## Calculation of minimum ecological flow in dewatering section of small hydropower stations: Taking Panxi cascade hydropower stations as an example

LI Yang<sup>1,2</sup>, LIN Jin<sup>1</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210009, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The hydropower resources of small and medium-sized rivers account for a large proportion of domestic hydropower distribution. There is a large space for development and utilization. The development and operation of hydropower inevitably bring adverse effects to the ecological environment, such as the reduction of river runoff, dewatering of local river reach, and the damage to the local ecological environment. To reduce the negative impact of the construction and development of small hydropower on the ecological environment of the downstream river, it is a key method to ensure the minimum ecological discharge of small hydropower. At present, the researches referring to the domestic and overseas ecological discharge mainly concentrate on big rivers. However, the research related to the ecological discharge of small and medium-sized rivers, especially small hydropower stations are few. The available methods for calculating the ecological discharge also lack scientific analysis. A considerable number of small hydropower stations have not yet determined the minimum ecological discharge. Based on this situation, the related research was carried out on the minimum ecological discharge of small hydropower stations.

At present, domestic and overseas calculation methods of ecological flow can be roughly divided into the hydrological method, hydraulic method, habitat norm method, and integral method. The hydrological research method is the most commonly used, convenient, lowest cost of ecological flow calculation method and is one of the classic calculation method. This study uses the improved Tennant method, the annual distribution method, the Q90 method, the improved frequency method, and the NGPRP method to calculate the minimum ecological flow of the leading reservoir. Taking 95% guarantee rate of the runoff data from the recent 30 years as a protection target, this study analyzes the satisfaction degree of the five methods and evaluates the rationality of the calculation results. This shows the evaluating results of calculation in the process of natural runoff of the section with satisfying the degree of 95 percent guarantee rate. If the degree of satisfaction exceeds or is lower than the requirement of the due guarantee rate, this method is considered not suitable for Dayang reservoirs. Finally, by comparing various methods, the calculation method of the minimum ecological discharge of the Dayang reservoir is selected, and the inner envelope of the calculated minimum ecological discharge is taken as the minimum ecological discharge of the reach. Finally, the minimum ecological flow process of Panxi cascade I ~ IV power stations is obtained.

According to the calculation, the lower limit of the minimum ecological discharge of the Dayang reservoir is 0.152 m<sup>3</sup>/s, and the minimum ecological discharge of 0.182 m<sup>3</sup>/s guaranteed between the second and third stage hydropower stations, and 0.102 m<sup>3</sup>/s guaranteed between the third and fourth stage hydropower stations. The discharge also guaranteed in the dry months. The minimum ecological discharge of each hydropower station can be satisfied with the water inflow from each hydropower station. This results have a reference value for the study of the minimum ecological flow of small hydropower stations in China.

**Key words:** minimum ecological flow; Panxi cascade hydropower station; dewatering section; annual distribution method; improved frequency method