

ICS 13.020  
CCS Z06

# 团 体 标 准

T/CTESGS 04—2022

## 长江流域河流生态流量确定技术导则

Technical Guidelines for Determination of Ecological Flow of Rivers  
in the Yangtze River Basin

团体标准

长江流域河流生态流量确定技术导则  
T/CTESGS 04—2022



长江出版社出版发行  
地 址:武汉市解放大道1863号  
网 址:www.cjpress.cn  
电 话:027-82926557 82926805

140mm×203mm 32开本 1.375印张 28千字  
2023年3月第1版 2023年3月第1次印刷

书号 978-7-5492-2677-1  
定价:32.00元

版权所有·侵权必究

2022—12—07 发布

2023—01—01 实施



长江技术经济学会 发布

# 前 言

为贯彻《中华人民共和国长江保护法》中生态用水保障相关要求,制定本导则。本导则按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分:标准化文件的结构和起草规则》的规则起草。

本导则共 10 章和 2 个附录,主要技术内容有:

- 资料收集与调查分析;
- 生态流量需求分析;
- 生态流量控制断面选取;
- 生态基流计算;
- 敏感期生态流量计算;
- 成果合理性分析与综合确定。

主 编 单 位:长江水资源保护科学研究所

参 编 单 位:水利部中国科学院水工程生态研究所

长江水利委员会水文局

武汉大学

主要起草人员:李 斐 王 孟 肖 洋 惠 军

邓志民 刘宏高 邴建平 刘扬扬

陶江平 王中敏 邵 骏 陈小娟

陈 蕾 张 翔 阮 娅 樊 皓

王 栋 翟红娟 张登成 刘金珍

彭才喜 朱国亮 余伟钰 陶士勇

主要审查人员:陈 进 夏细禾 穆宏强 陈 力

魏开湄 张建永 邱光胜 王永强

本标准由长江技术经济学会负责管理,由长江水利委员会长江科学院和长江水利委员会河湖保护与建设运行安全中心负责具体技术内容解释。本标准在执行过程中,如有意见或建议,请反馈给长江技术经济学会(地址:湖北省武汉市江岸区黄浦大街 23 号,邮编:430010,电子邮箱:tb@cjxh.org.cn),以供今后修订时参考。

# 目 次

1 范 围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	2
3 术语和定义 .....	3
3.1 生态流量 .....	3
3.2 基本生态功能 .....	3
3.3 生态基流 .....	3
3.4 生态环境保护对象 .....	3
3.5 敏感期生态流量 .....	4
3.6 生态流量控制断面 .....	4
3.7 生态流量满足程度 .....	4
4 基本规定 .....	5
5 资料收集与调查分析 .....	8
6 生态流量需求分析 .....	10
7 生态流量控制断面选取 .....	13
8 生态基流计算 .....	14
9 敏感期生态流量计算 .....	16
10 成果合理性分析与综合确定 .....	19
附录 A .....	22
附录 B .....	25

# 1 范 围

本导则规定了长江流域河流生态流量确定工作的内容和  
技术要求,适用于长江流域水利综合、专业和专项规划编  
制中的生态流量确定,江河流域水量分配方案制定、水资源  
论证报告编制中的河流生态流量确定,水资源配置、调度、保  
护等管理工作涉及的控制断面生态流量确定。水工程规划、  
设计、调度、管理等涉及的生态流量确定可参考本导则。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 25173 水域纳污能力计算规程

SL 196 水文调查规范

SL 613 水资源保护规划编制规程

SL/T 278 水利水电工程水文计算规范

SL/T 712 河湖生态环境需水计算规范

NB/T 35091 水电工程生态流量计算规范

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1 生态流量 ecological flow

为维系河流生态系统的结构和功能需要保留在河道内符合水质要求的流量(水量、水位)及其过程。

#### 3.2 基本生态功能 basic ecological function

为维持河流生态系统基本特性须具有的基础功能,主要包括河流基本形态维护、基本水生生境维持、基本自净能力保障等。

#### 3.3 生态基流 ecological base flow

保障河流基本生态功能,维持水生态系统功能不丧失需要保证的底线流量(水量、水位)。

#### 3.4 生态环境保护对象 natural environmental protection entities

具有特殊保护价值的物种、种群、群落、生境等敏感保护对象及相关水环境敏感区,主要包括以鱼类为主的重要水生生物及其自然产卵场、索饵场、越冬场和洄游通道、天然渔场,水产种质资源保护区,涉及珍稀、特有、保护植物的重要湿地,涉水自然保护区等。富营养化现象在长江流域易出现

且威胁水生态环境安全,富营养化现象频发区(河段)也应纳入生态环境保护对象,保障其生态流量以防患富营养化风险。

### **3.5 敏感期生态流量 ecological flow of sensitive-period**

有生态环境保护对象的河流在敏感期需要的生态流量,是为维系河流生态系统中某些组分或功能在特定时段对于流量(水量、水位)及其过程的需求。

### **3.6 生态流量控制断面 control section for ecological flow**

为了保障河流生态安全,需确定生态流量目标并便于生态流量管理而设置的断面。

### **3.7 生态流量满足程度 satisfaction degree of ecological flow**

生态流量控制断面流量(水量、水位)满足生态流量目标的程度,用评价时段内满足生态流量目标的流量样本数与流量样本总数的百分比表示。



## 4 基本规定

### 4.1 生态流量确定应遵循以下原则：

1)人水和谐、统筹兼顾。坚持以水而定、量水而行,综合考虑河流水资源开发利用和生态环境保护需求,统筹生活、生态、生产用水,科学配置水资源,强化水资源刚性约束,维系河流生态功能,促进人与自然和谐共生。

2)因地制宜、分区分类。充分考虑流域气候水文特征、水资源禀赋条件、水资源开发利用状况和水生态环境保护要求的时空差异,针对长江流域不同区域、不同类型、不同阶段、不同水情的河流特点、问题和需求,分区分类确定河流生态流量。

3)科学合理、客观可达。尊重河流水资源状况、径流特征以及生态系统的历史演变与现状情况等自然规律,统筹需要与可能,采用有关水文数据和生态环境调查成果,科学合理确定生态流量,确保成果的科学性和可达性。

4.2 生态流量确定的工作内容应包括资料收集与调查分析、生态流量需求分析、控制断面选取、生态基流和敏感期生

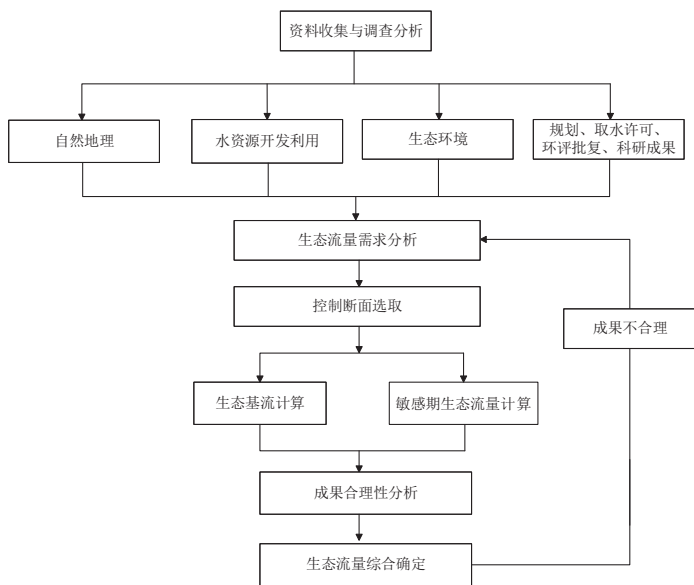
态流量计算、成果合理性分析与综合确定,按图 1 所示程序进行。

**4.3** 一般河流应确定生态基流,具有生态环境保护对象的还应确定敏感期生态流量。

**4.4** 生态流量计算应根据不同区域水资源禀赋条件、生态环境保护对象分布、现状水资源开发利用程度和经济社会发展用水需求等,结合资料条件选择适宜的方法。

**4.5** 生态基流一般用流量表征;水资源开发利用程度高且长期断流的河流,生态基流宜用生态水量表征;天然季节性河流有水时段的生态基流宜用流量表征;平原河网地区河流的生态基流宜用生态水位表征;敏感期生态流量应根据河流类型以流量、水位或过程表征。水资源开发利用程度分类按 SL/T 712 规定执行。

**4.6** 生态流量计算应采用天然径流系列。生态流量计算依据的水文系列应具有可靠性、一致性和代表性,并符合 SL/T 278 的相关要求。人类活动对径流影响较大的河流,应按 SL/T 278 的相关规定,对实测径流系列进行一致性处理。



注:虚线表示当成果合理性不满足要求时,应复核和完善控制断面生态流量计算成果。

图 1 长江流域河流生态流量确定程序

## 5 资料收集与调查分析

**5.1 河流生态流量确定应收集有关流域(区域)自然地理、水资源开发利用、生态环境等资料和有关规划与科研成果。**

**5.1.1 自然地理资料主要包括但不限于以下内容：**

1)水资源分区、流域(区域)地形地貌、河流水系特征及相关图件等河流水系资料。

2)计算范围内及其周边的气象与水文站分布,选定设计依据站的气象水文资料,包括降水量、蒸发量,区域径流系数图集,单站历年逐月(旬、日)实测和天然径流或水位系列资料等。

3)河床形态、河道横纵断面特性、水下地形与河流比降等河流形态资料。

**5.1.2 水资源开发利用资料**主要包括现状生活生产取排水口位置,供水量、耗水量和排水量,社会经济发展用水需求,各类水工程建设、运行与调度情况。

**5.1.3 生态环境资料**主要包括但不限于以下内容：

1)生态功能区类型、保护对象和保护方向等河流(河段)生态功能区资料。

2)以鱼类为主的水生生物种类、数量及分布,国家和地

方重点保护物种及珍稀、濒危、特有、重要经济物种的生物学、生态学和行为学特征等水生生物资料。

3)湿地类型、面积及空间分布,湿地植物区系、植被类型,植物群落结构及演替规律,群落中的关键种、建群种、优势种及其生长规律等湿地资料。

4)富营养化现象发生范围和时间,富营养化现象发生期水体氮磷浓度、藻类群落结构和密度以及演变规律、流速和水位监测数据等富营养化现象频发区资料。

**5.1.4** 规划、取水许可、环评批复、科研成果资料,主要包括流域综合规划和各专项规划,涉及水资源规划、水文站网规划、河流水生态环境保护规划、水量分配方案等规划及批复情况,规划水资源论证及建设项目取水许可,规划与建设项目环境影响评价文件及批复,河流生态需水研究成果等。

## **5.2 资料分析应满足以下要求:**

1)基本资料缺乏或不能满足需求时,应根据需要开展必要的补充调查。补充调查可通过实地勘察、典型调查与补充监测等方式进行,调查工作应符合 SL 196 等相应规范和标准的要求。

2)收集的气象水文资料应进行复核评价,确保资料系列的可靠性、一致性和代表性。径流资料的复核评价和插补延长应按 SL/T 278 的相关规定执行。

3)径流资料短缺的河流,可根据本流域降水资料,采用本流域或邻近相似流域的降雨径流关系估算径流,也可采用经主管部门审批的最新水文图集或水文比拟等方法估算径流。

## 6 生态流量需求分析

**6.1** 生态流量需求分析包括维持基本生态功能用水需求分析和生态环境保护对象用水需求分析。

**6.2** 从河流基本形态维护、水生生境保护和自净能力维持等角度,分析河流基本生态功能用水需求。

**6.2.1** 应按照确保河流不断流、河流基本生态功能不发生不可逆变化等要求,分析维持河流基本形态用水需求。

**6.2.2** 应按照满足维持水生生物种群延续和基本生命活动对水生生境的要求,分析维持河流水生生境质量用水需求。

**6.2.3** 应按照维持一定的水环境容量,保障自然条件下水质不恶化的要求,分析维持基本自净能力用水需求。

**6.3** 应以生态环境保护对象识别为基础,开展生态环境保护对象用水需求分析。

**6.3.1** 应依据法律法规、国际公约、重要规划等要求,以及河流各物种和各类生境在全球或区域的独特性、受胁程度、科学价值、生态服务价值等属性,确定河流生态环境保护对象。

**6.3.1.1** 符合以下任一条件的以鱼类或湿地植被为主的水生生物物种及其生境应作为生态环境保护对象:

1)已列入国家级和地方级重点保护野生动植物名录。

2)中国濒危动物红皮书、中国生物多样性红色名录或自然保护联盟名录中的濒危(EN)及以上等级。

3)珍稀、特有或作为重要水产种质资源保护的物种。

4)其他具有重要生态、科学、社会价值且有保护需求的物种。

**6.3.1.2** 由政府部门或相关规划列入重点治理保护的长期存在富营养化现象的河段应列入生态环境保护对象。

**6.3.1.3** 长江流域河流生态环境保护对象包括但不限于以下内容：

1)江源区以原生态保护为主,以青藏高原特有鱼类和其他土著水生生物类群及其生境为生态环境保护对象。

2)金沙江以金沙鲈鲤、胭脂鱼、圆口铜鱼、长鳍吻鲈、细鳞裂腹鱼等保护、珍稀、特有物种及其生境为生态环境保护对象。

3)长江上游地区(不含江源区和金沙江)以长江鲟、川陕哲罗鲑、胭脂鱼、稀有鮡鲫、圆口铜鱼、长鳍吻鲈、平鳍鳅鲇、金线鲃属所有种、四川白甲鱼、多鳞白甲鱼、细鳞裂腹鱼、重口裂腹鱼、厚唇裸重唇鱼、岩原鲤、红唇薄鳅、长薄鳅、青石爬鳅等保护、珍稀、特有物种,干支流流水江段典型产漂流性卵和库区典型产黏性卵的重点经济物种及其生境,具有珍稀、特有、保护植物的湿地为生态环境保护对象。

4)长江中下游地区以江豚、中华鲟、鲟、花鳗鲡、鲸等保护、珍稀、特有物种,干支流典型产漂流性卵和附属湖库典型产黏性卵的重点经济物种,具有洪泛平原特征的河网和具有

珍稀、特有、保护植物的湿地,以及富营养化现象频发区为生态环境保护对象。

**6.3.2** 应根据河流存在的生态环境保护对象类型和特征,识别敏感期生态环境保护对象的流量需求:

1)生态环境保护对象生态流量需求包括但不限于以鱼类为主的重要水生生物完成生活史关键节点的流量需求、维护河流湿地生态系统稳定的流量需求、防控富营养化风险的流量需求等。

2)应根据生态环境资料识别生态环境保护对象的类型、分布范围和敏感期。

3)应根据河段水文变化特点,结合河流保护动植物生活完成史以及富营养化现象发生规律,识别生态环境保护对象对径流变化的响应关系。



## 7 生态流量控制断面选取

**7.1** 控制断面选取应以反映流域(区域)生态流量保障的总体状况为目标,结合生态环境保护需求和监测实际现状,合理确定生态流量控制断面位置。

**7.2** 生态流量控制断面的确定,应遵循以下原则:

1)生态流量控制断面的选取应充分考虑河流(河段)生态环境保护对象分布特征和水资源开发利用管理要求。

2)优先依托水文监测断面。

3)综合考虑水文资料情况、流域(区域)水资源管理需求等因素,宜选择主要支流汇入口,重要水系节点,入干流、入尾间汇口,跨行政区边界,主要控制性水工程等作为控制断面。

4)经济社会用水与生态用水矛盾突出的河段应设置控制断面。

5)长期存在富营养化现象的河段宜设置控制断面。

**7.3** 选取的生态流量控制断面应考虑干支流均衡,与已批复的流域综合规划、水资源综合规划、生态环境保护规划、水量分配方案、重点河湖生态流量保障目标等相关成果中确定的断面相协调。

## 8 生态基流计算

**8.1** 根据河流基本生态功能用水需求,考虑河流水资源禀赋条件、河流规模和河道水力特性(断面形态)、资料详尽程度,选择合适的计算方法。

**8.2** 当存在以下情形之一时,宜按汛期和非汛期分别计算生态基流:

1)控制断面 90%保证率最枯月平均流量占多年平均流量的比例小于 5%。

2)控制断面无径流实测资料,且汇流区间年径流系数大于 0.5,汛期降水量与非汛期降水量的比值大于 6。

**8.3** 生态基流应根据河流规模和河道水力特性等,采用多种方法计算、比较、分析、确定,河流规模分类按 GB/T 25173 规定执行。

**8.3.1** 生态基流计算可采用水文学法或水力学法,各方法原理和应用见附录 A。不同类型河流生态基流计算方法选择可按下列要求执行:

1)对于中、小型河流,宜采用  $Q_p$  法、近 10 年最枯月平均流量法等水文学法或河床形态分析法、湿周法、R2-Cross 法等水力学法计算。对于大型河流,宜采用 Tennant 法、 $Q_p$  法、频率曲线法、RVA 法等水文学法计算。

2)当河道断面为形状稳定的宽浅矩形或抛物线形河流时,宜采用河床形态分析法、湿周法、R2-Cross 法等水力学法计算,否则宜采用水文学法计算。

3)当河流兼具以上多种特征时,宜采用多种方法计算生态基流,并分析比较,选取合理的计算结果。

**8.3.2** 采用水文学法计算生态基流,当依据的水文站具有30年以上水文资料系列时,可采用 $Q_p$ 法、Tennant法、频率曲线法或RVA法;当依据的水文站水文资料系列不足30年或系列代表性不足时,可采用近10年最枯月平均流量法。

**8.3.3** 采用水力学法计算生态基流,应具有河道断面形态资料和水位—流量关系曲线,否则可采用水文学法,并应在开展有代表性的补充监测工作后采用多种方法对计算成果进行复核。

## 9 敏感期生态流量计算

**9.1** 根据生态环境保护对象分布,敏感期生态流量主要包括但不仅限于水生生物敏感期生态流量、湿地植被敏感期生态流量及水环境风险敏感期生态流量等。

**9.2** 根据河流生态环境功能的差异,水生生物敏感期生态流量计算宜采用生态水文学法、生境分析法和生态水力学法,湿地植被敏感期生态流量计算宜采用单位面积用水量法、潜水蒸发法、彭曼公式和水量平衡法,水环境风险敏感期生态流量计算宜采用富营养化评价模型,各方法原理和应用见表 1 和附录 B。

**9.3** 水生生物敏感期生态流量计算按下列规定执行:

1)应在分析重要水生生物类群及水生生物生活史的基础上,选择具有特殊保护价值的水生生物作为代表性物种。

2)依据水生生物生物学特点、生态学习性和行为学特征,考虑代表性物种完成生活史关键节点及维持种群规模的需求,确定适合的流量和过程。

3)在资料条件允许的情况下,可依据河流历史天然流量和过程,采用同倍比或同频率缩放方法设计敏感期生态流量过程。

#### **9.4 湿地植被敏感期生态流量计算按下列规定执行：**

1)应综合考虑湿地面积、范围、功能区划、湿地水文特征和主要保护物种对流量的需求选择合适的计算方法，确定敏感期生态流量。

2)当计算范围内河岸植被、相连湿地保护目标在生长期或繁育期对河流水文过程有特殊需求时，应计算河流湿地相应时期流量及其过程。

#### **9.5 水环境风险敏感期生态流量计算按下列规定执行：**

1)富营养化现象易发，存在珍稀、特有鱼类或下游存在饮用水水源地的河流(河段)，宜计算水环境风险敏感期生态流量。

2)富营养化现象发生期间流量、流速和营养盐以及藻类浓度等监测资料较少的河流(河段)，水环境风险敏感期生态流量计算宜采用连续生物反应器模型或改进 Dillon 模型，资料丰富的河流(河段)宜采用水质生态模型，方法应用应符合附录 B 第 B.7 节规定。

表 1 敏感期生态流量计算推荐方法

敏感期	保护需求	适用条件	计算方法
水生生物敏感期	保障重点水生生物完成生活史关键节点所需的流量及过程	圆口铜鱼、“四大家鱼”等产漂流性卵鱼类	生态水文学法
		中华鲟、川陕哲罗鲑、裂腹鱼类等产黏性、沉性卵鱼类	生态水力学法、生境分析法
		胭脂鱼、岩原鲤、鲤、鲫等产黏性卵鱼类	生态水力学法、生境分析法
		其他产卵类型鱼类	生态水力学法、生境分析法
		不同类型植被的需水定额资料收集完备	单位面积用水量法
湿地植被敏感期	保障与河流有水力联系的重要湿地基本生态功能	河岸植被主要依赖地下水生存	潜水蒸发法
		区域植被资料和气象资料收集完备	彭曼公式
		河流相连湿地区域蒸发量、降水量、土壤厚度等资料收集完备	水量平衡法
水环境风险敏感期	保障河流控制断面下游河段富营养化现象发生概率处于可接受程度所需的流量	富营养化现象发生期间流量、流速和营养盐以及藻类浓度等监测资料较少	连续生物反应器模型、改进Dillon 模型
		富营养化现象发生期间流量、流速和营养盐以及藻类浓度等监测资料丰富	水质生态模型

## 10 成果合理性分析与综合确定

**10.1** 生态流量成果合理性分析与综合确定应以生态基流和敏感期生态流量计算成果为基础,对计算成果进行汇总协调,拟定控制断面生态流量,并开展合理性分析和协调性分析,综合确定河流生态流量。

**10.2** 应根据不同生态环境保护对象对应的控制断面生态流量推求结果,统筹协调各生态环境保护对象的关系,拟定控制断面生态流量。

**10.3** 成果合理性分析包括已有成果一致性分析和满足程度分析。

**10.3.1** 基于已批复流域综合规划、水资源综合规划和水量分配方案等相关规划或方案,规划水资源论证及建设项目取水许可,规划与建设项目环境影响评价批复,以及已审定河流生态需水研究成果提出的河流(控制断面、水工程)生态流量合理性分析,复核生态流量计算成果。

**10.3.2** 满足程度分析应符合下列要求:

1)通过近 10 年径流监测资料,分析生态流量满足程度。根据生态环境保护对象用水需求,流量宜采用旬或日时间尺度,水位宜采用旬或月时间尺度,水量可采用旬、月、水期(汛期、非汛期)、年时间尺度进行满足程度分析。

2)生态基流满足程度原则上不低于90%；敏感期生态流量满足程度应结合生态环境保护对象关键水文过程的天然重现期合理确定。

**10.4** 同一水系不同控制断面生态流量成果应考虑上下游、干支流关系,开展协调性分析,并满足下列要求:

1)同一条河流应在上下游各控制断面拟定生态流量的基础上,统筹河段生活、基本生态、生产用水需求,考虑各河段水资源条件与水量平衡关系,综合确定河流各控制断面生态流量。

2)同一个水系应在干流和各支流控制断面生态流量确定的基础上,按先干流、后支流顺序,根据干流生态流量的需求,进一步协调各支流控制断面生态流量。

**10.5** 为加强长江流域生态环境保护和修复,促进资源合理高效利用,保障生态安全,结合不同区域河流规模、水资源禀赋条件及开发利用状况,长江流域河流生态流量确定成果应满足以下要求:

1)长江干流和重要支流等大型河流(河段)生态基流占多年平均流量的比例宜不低于15%。

2)对于丰枯变化不大、水资源开发利用程度低的金沙江流域涉及的川西、滇西北地区,澜水流域和耒水流域涉及的湘西南地区,嘉陵江流域涉及的甘南、陕南地区,生态基流占多年平均流量的比例宜介于10%~20%。

3)对于丰枯变化剧烈、开发利用程度高的渝西地区,澧水流域涉及的湘西北地区,渠江流域涉及的川渝东北地区,



府澧河流域涉及的鄂北地区,唐白河流域涉及的豫西南地区,生态基流占多年平均流量的比例宜介于 5%~10%。

4)按汛期和非汛期分别确定生态基流时,非汛期值占多年平均流量的比例宜不低于 5%,汛期值宜不低于 15%。

5)根据生态环境保护对象的用水特征,敏感期生态流量宜与指示性生态环境保护对象所需的天然水文过程相协调。

## 附录 A

### (资料性附录)

#### 生态基流计算方法

**A.1** 生态基流计算方法以水文学法和水力学法为主。水文学法常用的代表方法有  $Q_p$  法、Tennant 法、频率曲线法、RVA 法等,水力学法主要有河床形态分析法、湿周法、R2-Cross 法。

**A.2**  $Q_p$  法。又称不同频率最枯月平均值法,以河流控制断面长系列( $n \geq 30$  年)天然月平均流量、月平均水位或径流量为基础,用每年的最枯月排频,选择不同频率下的最枯月平均流量、月平均水位或径流量作为河流控制断面的生态基流。

频率  $P$  根据流域水资源开发利用程度、规模、来水情况等实际情况确定,宜取 90%。实测水文资料进行还原和一致性修正时,水文计算按 SL/T 278 的规定执行。不同工作对系列资料的时间步长要求不同,各流域水文特性不同,因此最枯月也可为最枯旬、最枯日或瞬时最小流量。

**A.3** Tennant 法。依据观测资料建立的流量和河流生态状况之间的经验关系,采用历史天然流量资料,确定年内不同时段生态流量。

**A.4** 近 10 年最枯月平均流量(水位)法。缺乏长系列水文

资料时,可用近 10 年最枯月(或旬)平均流量、月(或旬)平均水位或径流量,即 10 年中的最小值,作为生态基流。本方法适合水文资料系列较短时近似采用。

**A.5 频率曲线法。**用长系列水文资料的月平均流量、水位或径流量的历史资料构建各月水文频率曲线,将一定频率相应的月平均流量、月平均水位或径流量作为对应月份的河流控制断面生态流量,组成年内不同时段值,用汛期、非汛期各月的平均值复核汛期、非汛期的生态流量。

计算生态基流,频率宜取 90%。该方法一般需要 30 年以上的水文系列数据。

**A.6 河床形态分析法。**维持河床形态的河流造床功能所需水量,可根据对枯水期、平水期、丰水期,或汛期、非汛期维持河床形态的水量分析,分别求得。维持河流形态功能不丧失的水量,可用维持枯水河槽的水量估算,通过分析枯水期河道横、纵断面形态和水量—流量的关系,推求维持枯水河槽对应的需水量。

**A.7 湿周法。**水力学法中最常用的方法,利用湿周作为水生生物栖息地指标,通过收集水生生物栖息地的河道尺寸及对应的流量数据,分析湿周与流量之间的关系,建立湿周—流量的关系曲线。本方法主要适用于河床形状稳定的宽浅矩形和抛物线形河道。

**A.8 R2-Cross 法。**采用河宽、平均水深、平均流速以及湿周率等指标来评估河流栖息地的保护水平,从而确定河流生态流量。其中,湿周率指某一过水断面在某一流量时的湿周

占多年平均流量满湿周的百分比。利用曼宁公式,计算特定浅滩处的河道最小流量代表整个河流的最小流量。R2-Cross 法确定最小流量的标准见表 A. 1。

**表 A. 1                    R2-Cross 法确定最小流量的标准**

河宽/m	平均水深/m	湿周率/%	平均流速/(m/s)
0.3~6.3	0.06	50	0.3
6.3~12.3	0.06~0.12	50	0.3
12.3~18.3	0.12~0.18	50~60	0.3
18.3~30.5	0.18~0.30	≥70	0.3

**A.9 RVA 法(变化范围法)。**通过分析河流长系列(通常为 20 年以上)的日流量资料,计算反映人类活动影响的水文变化指数(IHA),一般选取一定概率发生的指标值作为上下限值,得到河流天然生态系统可承受的变化范围,拟定的生态流量过程线应落在允许改变范围内。

## 附录 B

### (资料性附录)

#### 敏感期生态流量计算方法

**B.1** 敏感期生态流量计算方法主要有生态水文学法、生态水力学法、生境分析法、河岸植被需水经验公式法、水量平衡法、富营养化评价模型法。河岸植被需水经验公式法包括单位面积用水量法、潜水蒸发法、彭曼公式法。富营养化评价模型法包括水质生态模型、连续生物反应器模型和改进 Dillon 模型。

#### **B.2 生态水文学法**

**B.2.1** 生态水文学法用于计算产漂流性卵鱼类自然规模与涨水过程之间的映射关系,包括皮尔逊相关分析、系统重构分析方法、分类决策支持树和随机森林模型等。

**B.2.2** 将鱼类繁殖期(生态敏感期)的水文过程进行指标分解,获取初始流量、上涨率、持续涨水时间等多个生态水文指标,并进行“鱼类繁殖规模—涨水过程”的映射分析。

**B.2.3** 当鱼类自然规模与涨水过程之间呈现线性关系时,采用皮尔逊相关分析等描述性统计学方法分析。

**B.2.4** 当鱼类自然规模与涨水过程之间呈现非线性关系时,采用系统重构分析方法、分类决策支持树和随机森林模

型等方法分析。

### B.3 生态水力学法

**B.3.1** 生态水力学法以鱼类对河流水深、流速等水力生境参数以及急流、缓流、浅滩、深潭等水力形态指标的要求评估河流生境状况。水力生境参数按下列公式计算：

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (\text{B. 1})$$

$$H_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = H_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_\epsilon \quad (\text{B. 2})$$

式中  $A_1$ ——上游过水断面面积,  $\text{m}^2$ ;

$v_1$ ——上游断面平均流速,  $\text{m/s}$ ;

$A_2$ ——下游过水断面面积,  $\text{m}^2$ ;

$v_2$ ——下游断面平均流速,  $\text{m/s}$ ;

$H_1$ ——上游水位,  $\text{m}$ ;

$\alpha_1$ ——上游动能修正系数;

$H_2$ ——下游水位,  $\text{m}$ ;

$\alpha_2$ ——下游动能修正系数;

$g$ ——重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;

$h_\epsilon$ ——水头损失,  $\text{m}$ 。

**B.3.2** 水力生境参数的计算结果宜按表 B.1 的标准进行判别。多年平均流量小于  $150\text{m}^3/\text{s}$  的河流可根据天然情况适当降低评估标准。

表 B.1 生态水力学法判定水生生态基流的指标标准

生境参数指标	标准	
	最低标准	累计河段长段的百分比
最大水深	性成熟鱼类体长的 2~3 倍	$\geq 95\%$
平均水深	$\geq 0.3\text{m}$	$\geq 95\%$
平均速度	$\geq 0.3\text{m/s}$	$\geq 95\%$
水面宽度	$\geq 30\text{m}$	$\geq 95\%$
湿周率	$\geq 50\%$	$\geq 95\%$
过水断面面积	$\geq 30\text{m}^2$	$\geq 95\%$
水域水面面积	$\geq 70\%$	不同流量情况下水面面积大小及占枯水期多年平均流量情况下水面面积的百分比
水温	适合鱼类生存、繁殖	
水力形态指标	概念界定	
急流	$F_r > 1$	各流态的段数无较大变化,急流、较急流段累计河段长度减少小于 20%
缓流	$F_r < 1$	

注: $F_r$  为弗劳德数。

## B.4 生境分析法

**B.4.1** 生境分析法以鱼类繁殖对水深、流速、基质和覆盖物等指标的要求评估鱼类产卵生境状况,结合产卵场水力计算成果建立流量—加权可利用生境面积( $A_{WUA}$ )曲线,以曲线中的拐点对应的流量作为适宜流量,结合鱼类繁殖期的天然

涨水过程,分析确定鱼类繁殖期所需的水文过程。

**B. 4. 2**  $A_{WUA}$  可按式计算:

$$A_{WUA} = \sum_{i=1}^n A_i (S_h, S_v, S_s, S_c) \quad (B. 3)$$

式中  $A_i$ ——单元面积,  $m^2$ ;

$S_h$ ——水位喜好度,取值范围 0~1;

$S_v$ ——流速喜好度,取值范围 0~1;

$S_s$ ——基质喜好度,取值范围 0~1;

$S_c$ ——河面覆盖喜好度,取值范围 0~1。

**B. 4. 3** 根据水生生态调查与评价结果,并在征询专家意见的基础上,分析确定目标物种生存繁殖所需的生境参数适宜范围。

## **B. 5 河岸植被需水经验公式法**

### **B. 5. 1 单位面积用水量法**

单位面积用水量法可用于计算河岸植被需水量,按下式计算:

$$W_{hl1} = \sum_{i=1}^n A_{pi} \cdot N_{pi} \quad (B. 4)$$

式中  $W_{hl1}$ ——河岸植被生态需水量,  $m^3$ ;

$A_{pi}$ ——植被类型  $i$  的面积,  $m^2$ ;

$N_{pi}$ ——第  $i$  种植被补充水量的定额,  $m^3/m^2$ 。

$N_{pi}$  应按下列要求确定:

1) 可参考当地植被定额、农作物灌溉定额确定,必要时,可依据年降水量、年蒸发量、植被类型、植被盖度进行修正,



无资料地区可参考相似地区确定。

2)若需参考农作物灌溉定额,宜参考冬小麦灌溉定额。

3)若需计算各月植被生态需水,则应确定各月的  $N_{pi}$ 。

### B. 5. 2 潜水蒸发法

潜水蒸发法基于植被生长与潜水位和水面蒸发量之间的关系,计算干旱区河岸植被需水量,按下列公式计算:

$$W_{hl1} = E_t \cdot A_h \cdot k / 1000 \quad (\text{B. 5})$$

$$E_t = \sum_{i=1}^n \left[ E_{0t} \left( 1 - \frac{h}{h_0} \right)^{n_1} \right] \quad (\text{B. 6})$$

式中  $E_t$ —— $\Delta t$  时段潜水蒸发量,mm;

$A_h$ ——地下水埋深  $h$  时植被面积,  $\text{m}^2$ ;

$E_{0t}$ ——第  $t$  日水面蒸发量,mm;

$h$ ——地下水平均埋深,m;

$h_0$ ——潜水停止蒸发时的地下水埋深(极限埋深),m;

$n_1$ ——与土质和气候有关的指数,一般为 1~3。

计算参数应按下列要求确定:

1)植被系数  $k$  可通过实地试验方法确定,亦可采用类似区域相关研究成果确定的经验公式计算确定。

2) $n_1$  可采用当地经验值或通过实测数据率定确定。

### B. 5. 3 彭曼公式法

彭曼公式法依据能量平衡原理,通过计算参考作物腾发量,推算河岸植被需水量,可用于各类型河流河岸植被需水计算,按下列公式计算:

$$W_{hl1} = \sum_{i=1}^n (N_{i,t} - P_{e,t}) \cdot A_i \quad (\text{B. 7})$$

$$N_t = k_1 \sum_{t=1}^n E_{T0,t} \quad (\text{B. 8})$$

$$E_{T0} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (\text{B. 9})$$

式中  $N_{i,t}$ ——第  $i$  种植被生态需水定额, mm;

$P_{e,t}$ —— $\Delta t$  时段有效降水量, mm;

$A_i$ ——第  $i$  种生态植被的面积,  $\text{m}^2$ ;

$N_t$ —— $\Delta t$  时段生态需水定额, 扣除有效降水量后为净需水定额, mm;

$k_1$ —— $\Delta t$  时段生态需水系数;

$E_{T0}$ ——参考作物腾发量, mm/d;

$\Delta$ —— $\Delta t$  时段平均气温时饱和水汽压随温度的变化率, kPa/°C;

$R_n$ ——净辐射, MJ/( $\text{m}^2 \cdot \text{d}$ );

$G$ ——土壤热通量, MJ/( $\text{m}^2 \cdot \text{d}$ );

$\gamma$ ——湿度计常数, kPa/°C;

$U_2$ ——地面以上 2m 高处平均风速, m/s;

$e_a$ ——达到平均气温时的饱和水汽压, kPa;

$e_d$ ——达到平均气温时的实际水汽压, kPa。

生态需水系数  $k_1$  应根据植被生长状况、土壤供水条件等因素合理确定。草地生态需水系数为 0.30~1.25, 收割后的作物系数最低, 有效覆盖后的作物系数最大, 可按表 B.2 取值; 乔木林生态需水系数为 0.40~1.35, 可按表 B.3 取值。

表 B. 2 干旱区草地生态需水系数

气候条件	苜蓿		干贮草		三叶草和草—豆科植物		草场	
	低值	峰值	低值	峰值	低值	峰值	低值	峰值
风速小于 4. 7m/s	0. 40	1. 15	0. 55	1. 10	0. 55	1. 15	0. 50	1. 10
风速大于 4. 7m/s	0. 30	1. 25	0. 50	1. 15	0. 55	1. 20	0. 50	1. 15

注：1. 对于苜蓿，峰值在两次收获之间时段一半时达到，第一次收割时则在开始生长到第一次收获间时段一半时间时达到。对于籽用作物，初始期过后即为峰值，直到收获。

- 2. 干贮草在收获前 7～10d 达到峰值。
- 3. 对于过度放牧的草场，基本作物系数的低值可与苜蓿相近。

表 B. 3 干旱区乔木林生态需水系数

气候条件	有地面覆盖作物									
	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	
风速小于 4. 7m/s	—	0. 45	0. 85	1. 15	1. 25	1. 25	1. 20	0. 95	—	
风速大于 4. 7m/s	—	0. 45	0. 85	1. 20	1. 35	1. 35	1. 25	1. 00	—	
气候条件	没有地面覆盖作物及杂草									
	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	
风速小于 4. 7m/s	—	0. 40	0. 60	0. 85	1. 00	1. 00	0. 95	0. 70	—	
风速大于 4. 7m/s	—	0. 40	0. 65	0. 90	1. 05	1. 05	1. 00	0. 75	—	

注：对于郁闭度为 0. 20 和 0. 50 的幼林，当有地面覆盖作物时，其生育中期的值分别降低 10%~15%和 5%~10%；当没有地面覆盖作物时，其生育中期的值分别降低 25%~35%和 10%~15%。

## B.6 水量平衡法

**B.6.1** 水量平衡法通过计算分析相连湿地各项输入、输出水量的平衡关系,确定相连湿地补给需水,适用于与河道有水力联系的河道外湿地和尾间湿地。相连湿地补给需水量按下列公式计算:

$$W_{hl2} = 10^3 \times A_{hl2} (E_Z - P) + W_{sl} \quad (\text{B.10})$$

$$G = \alpha H_t A_t \quad (\text{B.11})$$

式中  $W_{hl2}$ ——相连湿地补给水量,  $\text{m}^3$ ;

$A_{hl2}$ ——相连湿地水面面积,  $\text{km}^2$ ;

$E_Z$ ——相连湿地水面面积水面蒸发需水量,  $\text{mm}$ ;

$P$ ——相连湿地区域多年平均降水量,  $\text{mm}$ ;

$W_{sl}$ ——相连湿地区域土壤渗漏需水量,  $\text{m}^3$ ;

$\alpha$ ——田间持水量或饱和持水量体积百分比,根据研究的土壤类型而定,一般最小取 20%~30%;

$H_t$ ——土壤平均厚度,  $\text{m}$ ;

$A_t$ ——沼泽湿地土壤面积,  $\text{m}^2$ 。

**B.6.2** 宜选择与计算范围距离最近的气象站资料,统计多年平均蒸发量和多年平均降水量。

**B.6.3** 当湿地有其他支流汇入时,相连湿地补给水量为依据水量平衡法计算的补给需水量减去支流汇入水量。

## B.7 富营养化评价模型法

### B.7.1 水质生态模型

水质生态模型是一个含有诸多因素的综合性水质评价

预测模型,多用于湖库的水质预测和管理,但通过耦合适用于动态水体藻类生长、溶解氧和营养物质变化的生态模型,该模型也可用于河流型水库富营养化评价。水质生态模型包括河流水力学模型、守恒物质对流扩散模型和富营养化动力学模型。

1)河流水力学模型计算原理如下:

$$B \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + u \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial z}{\partial x} + gA \frac{n^2 Q^2}{R^{4/3}} = 0 \quad (\text{B. 12})$$

2)守恒物质对流扩散模型计算原理如下:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + u \frac{\partial c_i}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (E_x \cdot \frac{\partial c_i}{\partial x}) + S_{Li} + S_{Bi} + S_{Ki}$$

$$(\text{B. 13})$$

3)富营养化动力学模型计算原理如下:

• 浮游植物动力学系统:

$$S_{k4} = (G_{pl} - D_{pl} - G_{pz} - K_{s4})C_4 \quad (\text{B. 14})$$

• 磷循环:

$$S_{K3} = K_{83} \theta_{83}^{T-20} C_8 f(C_4) + D_{pl} C_4 A_{PC} f_{op} - K_{s3} C_3$$

$$(\text{B. 15})$$

$$S_{K8} = D_{pl} C_4 A_{PC} (1 - f_{op}) - K_{83} \theta_{83}^{T-20} C_8 f(C_4) - K_{s8} C_8$$

$$(\text{B. 16})$$

$$f(C_4) = \frac{C_4}{K_{mPC} + C_4} \quad (\text{B. 17})$$

• 氮循环:

$$S_{K7} = D_{pl}C_4A_{NC}f_{on} - K_{71}\theta_{71}^{T-20}C_7f(C_6) - K_{s7}C_7 \quad (B.18)$$

$$S_{K1} = D_{pl}C_4A_{NC}(1 - f_{on}) + K_{71}\theta_{71}^{T-20}C_7 - G_{pl}C_4P_{NH_4}A_{NC} - K_{12}\theta_{12}^{T-20}f(C_6)C_1 \quad (B.19)$$

$$S_{K2} = K_{12}\theta_{12}^{T-20}f(C_6)C_1 - G_{pl}C_4(1 - P_{NH_4})A_{NC} \quad (B.20)$$

$$P_{NH_4} = \frac{C_1C_2}{K_{mm} + C_1K_{mm} + C_2} \cdot \frac{C_1K_{mm}}{K_{mm} + C_1K_{mm} + C_2} \quad (B.21)$$

$$f(C_6) = \frac{C_6}{K_{NIT} + C_6} \quad (B.22)$$

• 溶解氧平衡:

$$S_{K5} = K_D C_4 A_{OC} - K_D \theta_D^{T-20} C_5 - K_{s5} C_5 \quad (B.23)$$

$$S_{K5} = K_a \theta_a^{T-20} (C_5 - C_6) - K_d \theta_d^{T-20} C_5 - \frac{64}{14} K_{12} \theta_{12}^{T-20} C_1 - \frac{32}{12} K_R \theta_R^{T-20} C_4 - \frac{k_{sOD} \theta_{sOD}^{T-20}}{h} + G_{pl} C_4 \left[ \frac{32}{12} + \frac{48}{14} A_{NC} (1 - P_{NH_4}) \right] \quad (B.24)$$

式中参数及其物理意义见表 B.4。

水质生态模型的构建需要 1 : 2000 以上的水下地形资料,计算河段上下边界实测的日尺度以上流量和水位资料,以及月尺度以上的水质监测资料。结合初始值和边界值条件,采用追赶法进行求解,动量方程、连续性方程采用耦合求解,水质成分和浮游植物的对流扩散方程采用多次迭代方法

求解,最终确定河流各断面的水流、水位,以及各水质成分和浮游植物的含量。

表 B. 4 水质生态模型参数的物理意义

参数	物理意义	单位	参数	物理意义	单位
$z$	水位	m	$B$	河宽	m
$A$	断面面积	$m^2$	$R$	水力半径	m
$Q$	流量	$m^3/s$	$u$	断面平均流速	m/s
$H$	断面平均水深	m	$g$	重力加速度	m/s
$n$	糙率		$E_x$	扩散系数	m/s
$c_i$	水质成分	mg/L	$S_{Li}$	直接的扩散 负荷强度	mg/(L·d)
$S_{Bi}$	边界负荷强度	mg/(L·d)	$S_{Ki}$	水质成分间 动态转化率	mg/(L·d)
$G_{pl}$	浮游植物内 出生率	$d^{-1}$	$G_{plmax}$	浮游植物最 大生长速率	$d^{-1}$
$D_{pl}$	死亡及呼吸率	$d^{-1}$	$G_{pz}$	浮游植物捕 食率	$d^{-1}$
$K_R$	浮游植物内 源性呼吸率	$d^{-1}$	$C_1$	水体中氨氮 含量	mg/L
$C_2$	水体中硝氮 含量	mg/L	$C_3$	水体中有机 磷含量	mg/L
$C_4$	浮游植物含 碳量	mg/L	$C_5$	生化需氧量 含量	mg/L
$C_6$	水体中溶解 氧(DO)含量	mg/L	$C_7$	水体中有机 氮含量	mg/L



续表

参数	物理意义	单位	参数	物理意义	单位
$C_8$	水体中无机磷含量	mg/L	$I_s$	浮游植物光合作用饱和光强度	Ly/d
$I$	入射的太阳辐射强度	Ly/d	$K_e$	水体消光系数	$m^{-1}$
$C_z$	水体中浮游动物质量	mg/L	$\theta_4$	温度系数	
$K_D$	浮游植物非捕食死亡率	$d^{-1}$	$K_R$	浮游植物内源性呼吸率	$d^{-1}$
$\theta_{pz}$	浮游动物捕食温度系数		$K_{p2}$	浮游动物捕食半饱和常数	mg/L
$TP$	内源性磷	mg/L	$TN$	内源性氮	mg/L
$\theta_{83}$	有机磷对无机磷转化温度系数		$K_{83}$	有机磷对无机磷转化率系数	$d^{-1}$
$K_{si}$	各水质成分沉降率	$d^{-1}$	$C_z$	水体中浮游动物质量	mg/L
$K_{mn}$	植物生长摄取氮米氏系数	mg/L	$T$	水体的温度	$^{\circ}C$
$K_{mp}$	植物生长摄取磷米氏系数	mg/L	$K_{mPC}$	浮游动物捕食半饱和常数	mg/L

续表

参数	物理意义	单位	参数	物理意义	单位
$K_a$	复氧系数	$d^{-1}$	$\theta_a$	复氧系数的温度系数	
$K_d$	耗氧系数	$d^{-1}$	$\theta_d$	耗氧系数的温度系数	
$A_{PC}$	磷相对碳的转化率		$k_{SOD}$	底泥耗氧量系数	
$A_{NC}$	藻类的氮碳比		$\theta_{SOD}$	底泥耗氧的温度系数	
$K_{NIT}$	硝化反应极限半饱和常数	mg/L	$f_{di}$	溶解水质成分比重	
$K_{12}$	硝化系数	$d^{-1}$	$\theta_{12}$	硝化反应的温度系数	
$K_{71}$	有机氮的矿化系数	$d^{-1}$	$\theta_{71}$	矿化反应的温度系数	
$A_{OC}$	浮游植物呼吸作用的氧碳比		$f_{op}$	死亡浮游植物转化无机磷的转化率	
$V_{si}$	净沉降速率	m/d	$f_{on}$	死亡浮游植物转化无机氮的转化率	

### B. 7. 2 连续生物反应器模型

富营养化现象发生的实质是水体中的藻类急剧增殖,流

动的河水符合推流式连续流生物反应器流体特性,以此建立藻类浓度与流速的关系如下:

$$L_a = m \exp(k/v) \quad (\text{B. 25})$$

式中  $L_a$ ——某断面河水中藻密度,万个/L;

$m$ ——与上游来水藻密度相关的常数;

$k$ ——混合常数;

$v$ ——断面平均流速, m/s。

连续生物反应器模型中参数的确定需要历史富营养化现象发生期间藻类浓度和河流断面流速数据,但该方法同时兼具参数和变量少、应用方便的特点。根据流速与流量的关系,可建立藻类浓度与流量的关系。

### B. 7. 3 改进 Dillon 模型

Dillon 经验模型是以营养盐的滞留率系数和沉降率系数之间的相关性为分析基础,而改进 Dillon 模型将 Dillon 经验模型的参数范围进一步扩大,综合考虑水文、水质、气象因素,计算藻细胞数量及其变化状况,通过水深建立流量与藻细胞浓度之间的关系。按下列公式计算:

$$Y_{\text{algal}} = a \left[ \frac{L(1-R)}{Hq} \right]^{\beta_1} T^{\beta_2} \quad (\text{B. 26})$$

$$R = \frac{\sigma}{\sigma + \frac{1}{\tau_w}}$$

式中  $Y_{\text{algal}}$ ——藻密度,万个/L;

$a, \beta_1, \beta_2$ ——参数;

$L$ ——磷营养盐负荷,  $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ ;

$R$  ——营养盐在水中的滞留系数；

$H$  ——平均水深, m；

$q$  ——水力冲刷系数,  $q=1/\tau_w$ ；

$T$  ——温度；

$\sigma$  ——沉降率系数,  $d^{-1}$ ；

$\tau_w$  ——水体平均滞留时间, 用库容与年径流的比值表示, d。