

# 台湾地区溪流生态基础流量推估 ——和平溪上游案例研究

李 载 鸣

(中国文化大学土地资源学系, 台湾)

**摘 要:** 在研究山区河川的水理计算方法时有争议, 尚未有定论, 一般研究河川基础流量以采用历史流量评估法及水理评估法为常用的量化方式。本研究主要以“历史流量评估法”进行生态基础流量分析。依据面积与流量经验值估算, 本研究推估之最小生态基础流量约为  $0.32 \sim 0.95 \text{ cm s}$ ; 依照日本一般生态基础流量计算标准, 则维护生态最小放流量应为  $1.06 \text{ cm s}$ 。利用 Tennant 法计算生态基础流量时应随时间季节及水文条件变化。推估值于丰水期之基础流量应为  $1.46 \text{ cm s}$ , 枯水期应为  $0.61 \text{ cm s}$ 。若按日流量延时曲线之 95% 为分析基础, 则查询历年最低日流量为  $3.12 \text{ cm s}$ ; 若按日流量延时曲线之最低标准 100% 为分析基础, 则推估之基础流量应至少为  $1.87 \text{ cm s}$ 。依水理评估法分析结果, 最小生态基础流量应在  $2.0 \text{ cm s}$  至  $3.0 \text{ cm s}$  之间, 如此河道水深为主要鱼种生存之最低限。有鉴于山区陡坡河道水理计算迄今于学术界仍未具定论, 计算成果仍需辅以现地实测成果予以验证。

**关键词:** 台湾; 溪流; 基础流量

中图分类号: P332.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2001)04-0146-05

## The Estimation of Minimum Flow in Streams of Taiwan ——A Case Study of Eastern Taiwan

LI Zaiming

(Department of Natural Resources, Chinese Culture University, Taiwan, China)

**Abstract:** The flow assessment methods have been extensively discussed but have no real resolution. Minimum flow in rivers and streams provides a certain level of protection for the aquatic ecosystem. Therefore, the estimation of minimum flows becomes one of the major considerations in dam construction. Three major categories of quantitative instream flow assessment methods, including historic flow, hydraulic geometry, and habitat have been examined last decade. Historic flow and hydraulic geometry methods are used in this study to estimate the minimum flow in the upstream of Hoping Stream. The historic flow methods rely on the recorded or estimated flow of the river. Tennant method, flow duration curve and the watershed area estimation are the most widely known methods. The estimations of the minimum flows are  $1.46 \text{ cm s}$  in the flooding season and  $0.61 \text{ cm s}$  in the dry season. The results based on the daily flow duration curve are  $3.12 \text{ cm s}$  to  $1.87 \text{ cm s}$  while the exceeding probability from 96% to 100%. According to the watershed areas versus flow experience value estimation method, the estimations of the minimum flows are  $0.95 \text{ cm s}$  and  $1.06 \text{ cm s}$  by using different parameters. Hydraulic geometry methods based on various parameters such as width, depth, velocity, and wetted perimeter. The estimation of this study is from 3 to 2  $\text{cm s}$  in different parameters. Habitat methods are not examined in this study due to the complicated procedure to establish the habitat suitable curves.

**Key words:** Taiwan; streams; minimum flow

## 1 前言

台湾地区山高水急, 河川丰枯水期水量具明显差异, 因此水资源开发往往需考虑符合人类所需之多重利益; 而筑坝截流开发水资源, 往往影响河川生态至巨。河川之基本条件即为有水, 水质尚需足以维护河川生物之基本需求, 如此河川生态方得以运行无碍, 此亦为台湾地区积极推动之“活水计划”。

人类开发水资源历史悠久, 而今警觉河川生态极为脆弱, 过度开发利用往往造成无法弥补之损失, 因此于开发水资源之同时, 如何兼顾河川生态保育, 维护资源永续发展之长远效益, 为现阶段水利资源开发极为重视之课题。

台湾东部水力资源丰富, 为因应未来东部地区发展需求, 规划于东部地区次要河川和平流域拦水发电, 建筑水坝对河川生态产生不同程度的影响, 对水坝下游生物而言, 水量的改变为首要之冲击, 因此预先评估建坝前后河川环境的变化, 推估未来维护河川生态环境品质所需维护生态最小之基础流量并研拟相关保育河川生态之改善措施, 为河川保育及经营工作之首要任务。

## 2 基地背景

### 2.1 基地概况

研究河川发源于台湾中央山脉, 主流全长为 50.73 km, 平均坡降为 1:14, 受地形影响, 河川上游段属陡坡急流之状态, 主要有南溪及北溪两大支流, 于花莲县与宜兰县间汇流入太平洋。南溪位于宜兰县与花莲县交界, 大致呈东西流向, 上游至南溪坝址预定地之流域长度约为 27.8 km, 集水面积约 158.0 km<sup>2</sup>, 上游边界高程达 3 632 m, 平均坡度约为 11.10%。

### 2.2 气象资料

研究基地长期气象观测资料显示, 本地区 5~9 月之平均气温较高, 在 27.2~30.8 间, 12 月至翌年 2 月平均气温较低, 在 16.3~18.4 间; 各月平均气温以 7 月最高, 2 月最低。全年平均气温约为 23.7。蒸发量变化与气温相似, 以 6~9 月最大, 在 174~123 mm 间, 而以 12 月至翌年 2 月较低, 在 53~65 mm 间。全年平均蒸发量约为 1 226 mm。

历年雨量统计显示计划区域雨量大部分集中于 5~11 月间, 约占年雨量之 90%, 为丰水期; 12 月至翌年 4 月则雨量稀少, 仅占年雨量之 10%, 为枯水

期。年平均雨量约在 2 319~3 568 mm 之间, 月雨量以 9 月为最高。

### 2.3 生物结构

研究基地水栖昆虫丰富, 随季节更迭种类变化明显。然鱼类资源较为贫乏, 须直降至河口地区较清澈小支流, 方具丰富鱼类相, 此现象应与研究范围河川栖地海拔高, 河川多为梯状潭, 鱼类栖息条件较艰难, 以及溪流浊度较高, 致洄游性鱼类上溯困难等相关。且依据调查季节资料分析, 显示丰水期鱼群量显著减少, 推测应为研究范围河道陡急, 高流量时流况湍急, 逢台风洪水期河床破坏度高, 导致鱼类缺乏庇护场所, 或被急流冲下以致于调查数量锐减。

## 3 生态基础流量理论

维护自然河川生态系统稳定所需之流量, 一般称为生态基础流量, 而自引水或蓄水设施, 利用人为方式控制溢出之流量, 以维持最低程度稳定生态律动所需之流量则称之为“维护生态最小放流量”(Minimum instream flow requirement)。为维护河川生态稳定发展, 台湾地区在建筑堰坝或其它拦水设施前, 均要需对未来河川的最小生态基础流量加以评估及研拟, 以维持河川生态及水体正常使用。

各国对生态基础流量评估法之适用性仍存有极大的争议, 探究原因除河川生态环境复杂, 整体规划考量难以周全外, 各国河川性质差异迥异, 且河川上、下游水文特性及生物与集水区之互动关系亦各不相同, 因而河川流量变化对河川生态系之影响程度实难精确界定。评估适宜之生态基础流量受既有资料、设计经验、参考案例及用水量目标之限制, 难以订定绝对标准; 一般以河川生态系统最低之容忍界限为基本要求, 具文献纪录之河川生态基础流量评估理念概述如后:

### 3.1 历史流量评估法

历史流量评估法(Historic flow methods)之推估理念系依据过去曾发生之流量纪录特性, 认为其足以展现生态系于自然状态中之运行模式。河川生物因长期适应流量变化, 所以评估时采用河川平均流量之百分比, 或采用日流量延时曲线(Flow duration curve)之某个超越机率之流量, 即可代表维护该生态系统最低之保育标准。如 Tennant 法系研究鱼类于不同百分比之年平均流量时之生活状态, 进而归纳出河川年平均流量之 10% 为维持生态机能之最低极限, 定为该河川之生态基础流量。另如订几

年一遇之枯水流量、日流量延时曲线超越机率 96% 等为生态基流量 (Jowett, 1997)。历史流量评估法之主要限制为流量纪录需完整且应为未遭人为干扰前之纪录, 并应具备统计特性, 推估值方具意义。

除以河川流量纪录推估生态基础流量外, 日本则依据水系集水面积之大小估算生态基础流量, 其优点为仅需该集水区面积之资料, 即可进行推估, 对水文资料缺乏之流域而言, 为简捷之推估方法; 缺点则为水系复杂之集水区, 推估值难以反应整体河川生态之基本需求。一般日本采用之估算基准为每  $100 \text{ km}^2$  集水面积应维持  $0.67 \text{ cm s}$  为生态基础流量之计算基准。

### 3.2 水理评估法

水理评估法 (Hydraulic method) 之基本理念系认为生态功能与某项水理参数具相对应之关系, 例如河道内水流之湿周 (Wetted perimeter) 与河川初级生产力关系密切, 因此藉由分析湿周与流量之率定关系, 以评估生态机能。当湿周随流量加大而递增之速率由快变缓时之分界点流量, 认为其系维持河川生态最经济有效率之流量; 当流量降低至常流量湿周之 20% 时, 则为维持生态机能之极限, 一般定其为生态基础流量。

水理评估法之分析方法为首先研选可代表水族生态之水理参数, 佐以该河段各流量之水理计算成果, 最后选定合宜水理参数之对应流量为生态基础流量。此评估法常选择之湿周参数, 因受限于河槽型态, 相较于一般河川生态评估常采用之水深、流速等较为固定之因子, 推估之变异性极高, 误差亦偏高, 因此较少被引用。水理评估法之限制为湿周与流量之率定关系不明显时, 如辫状河系、人工化河槽等均无法引用本方法分析生态基础流量。

### 3.3 栖地评估法

栖地评估法 (Habitat methods) 可视为水理评估法之展延, 其推估理念在于不仅讨论某个水理 (环境) 参数之多寡, 更要建立实际生态需求与水理 (环境) 参数之关联, 反应出生态需求在某种水理 (环境) 条件下之满足程度。美国最常使用之 IFM (In-stream flow incremental methodology) 法为此评估法之代表, 其分析过程为首先界定各保育目标 (如鱼类、人类游憩品质) 对栖地重要水理 (环境) 因子 (如水深、流速、覆盖度、底质) 之栖地适应性曲线 (Habitat suitability curve), 然后计算河川在不同流量下各河段之水理量, 查得对应之适合度指数, 推估求得不同流量时之有效栖地面积 (Weighted usable area), 作为决策之量化指针 (Jowett, 1997)。

栖地评估法之优点为可设定多种目标函数, 较其它分析法有弹性, 且其为定量之描述, 适合多维环境分析评量。栖地评估法之限制包括需有正确栖地适合度指针及水理 (环境) 条件资料; 河道边界环境变化高者, 如辫状河道, 坝下游持续冲刷河道等, 则无法求得正确水理因子, 使用者在量化指针时, 往往疏忽其它环境限制因子, 例如饵料来源、水质优劣、集水区环境容量等限制条件, 易造成误判; 而考量因素不完整, 例如忽略时间因素等, 则对相继效应无法妥善预估。

## 4 生态基础流量分析

目前于高度经济发展地区之河川生态基础流量分析较倾向采用“栖地评估法”, 主要着眼于其具量化指标, 容易进行决策比较; 然因该评估法需多元分析资料佐证, 考虑层面复杂, 限制条件亦多, 因此“历史流量评估法”仍广为使用。鉴于坝址预定地具超过 30 年之日流量相关纪录, 且评估河川环境品质进行之水深、流速调查, 应具相当程度反应河川生态特性, 因此本报告主要以“历史流量评估法”, 辅以“水理评估法”进行生态基础流量分析。

### 4.1 历史流量评估法

4.1.1 集水区面积推估法 台湾地区利用历史流量评估法之案例包括大甲溪及大安溪流域分析, 因该流域下游鱼类资源丰富, 计算基准系以每  $100 \text{ km}^2$  集水面积泄放  $0.6 \text{ cm s}$  为流量泄放标准估算。日本之水文、地文条件与台湾相似, 若依照日本文献记载一般生态基础流量计算, 则应采用每  $100 \text{ km}^2$  泄放  $0.67 \text{ cm s}$  为计算之标准。依据前述计算基准, 则本研究南溪之生态基础流量推估值应为  $0.95 \text{ cm s}$ ; 而以日本生态基础流量估算法, 则生态基础流量推估值应为  $1.06 \text{ cm s}$ 。

4.1.2 平均流量推估法 台湾地区河川水量丰枯差别明显, 近年多项研究建议利用 Tennant 法计算生态基流量时, 计算基准值 (即平均流量) 应随时间季节及水文条件而改变。鉴于研究河川丰、枯水期之差别明显, 因此分别依据丰、枯水期平均流量之 10% 推估不同时期之生态基础流量。计算结果丰水期之生态基础流量应为  $1.46 \text{ cm s}$ , 枯水期应为  $0.61 \text{ cm s}$ 。

若按日流量延时曲线之 95% 为分析基础, 则研究河川最低日流量为  $3.12 \text{ cm s}$ ; 若按日流量延时曲线之最低标准 100% 为分析基础亦达  $1.87 \text{ cm s}$ , 亦即所有以此方法为基础推估之生态基础流量应至少为  $1.87 \text{ cm s}$ 。

4 2 水理评估法

利用水理评估法首先应选择水理参数及评选生态可接受之最低水理参数限度, 虽有学者以湿周为重要之水理参数, 然未被普遍接受。一般认为以调查之简易性与生态评定之接受度而言, 利用水深与流速二项参数, 应足以反应生态特性, 配合研究河川主要鱼种台湾铲颌鱼惯常活动之流速与水深之分析研究, 选取该二项参数应为合理之评估依据。

鱼类一般以深潭为栖息地, 浅滩与缓流为其觅食区域, 并以浅滩为各水潭间迁徙之信道, 因此维持浅滩一定限度之水流, 亦是鱼类生息之重要条件。多项研究显示, 水深 0.3 m 为一般水族活动之最低限度, 而台湾铲颌鱼于濑区活动之最低水深应为 0.3 ~ 0.5 m。台湾铲颌鱼偏好中高流速, 休憩时处于深潭缓流区, 常时活动于流速 1.0 m/s 以上之急流地带。因此本研究研订以水深大于 0.30 m 及流速为 1.0 m/s 为分析最小生态基础流量之限度。

本研究基地为山区陡坡河川, 流量小时之流况为急湍, 浅潭及跌水交错出现, 即为超临界流与亚临界流交错之混合流况。经比较国内外商用软件之演算特质后, 选择美国陆军工兵团发展之 HEC- RAS (River Analysis System) 模式为水理分析工具。该模式为一维河道水理数值模式, 可演算混合流况, 分析之基本数据包括河道断面测量计算及曼宁糙度系数 ( $n$  值)。应用 HEC- RAS 模式演算成果显示不同流量对应于全河段各断面平均流速、平均水深、与深溪线(河道各断面最深点之联机)水深等三项参数于各断面值加总后取平均值之分布特性。当曼宁系数为 0.07 时, 平均水深大于 0.30 m 时流量需达 3.0  $\text{cm}^3/\text{s}$  以上, 此时深溪线水深为 0.51 m, 此流量值约为南溪日流量延时曲线超越机率 95% 之流量, 平均流速 0.92  $\text{m}/\text{s}$ , 约为台湾铲颌鱼喜好之流速。若采  $n$  值 0.11 分析结果为平均水深大于 0.30 m 时, 流量需达 2.0  $\text{cm}^3/\text{s}$  以上, 此时深溪线水深达 0.50 m, 流量值已略大于日流量延时曲线上超越机率 100% 之流量 1.87  $\text{cm}^3/\text{s}$ , 此条件下之平均流速 0.67  $\text{m}/\text{s}$  约为台湾铲颌鱼喜好流速之最低限。

依水理评估法分析结果, 初步推论南溪最小生态基础流量应在 2.0~ 3.0  $\text{cm}^3/\text{s}$  之间。由于山区陡坡河道水理计算于学术界仍未具定论, 计算成果需经现地实测成果验证; 惟研究基地河道巨石交错, 河床及水位于丰、枯水期变化明显, 为河道观测技术之障碍, 难以论断具代表性之水理特性。

4 3 栖地评估法

本研究无法利用“栖地评估法”估算, 主要因为

研究基地属山区河川, 水理计算仍属水利学上尚待探讨处, 下游冲刷河段之生态栖息环境, 水理条件随时间呈不规则变动, 此皆为执行“栖地评估法”之限制; 且河川中营养位阶较高之物种贫乏, 尚未建立足以反应栖地适合度指数之量化关系, 主要鱼类族群于不同栖地型态之生态习性差异明显, 显示其对环境变化具高度之适应性, 增加界定栖地适应性曲线之变异性, 此亦“栖地评估法”之限制。

目前于高度经济发展地区之河川生态基础流量分析较倾向采用“栖地评估法”; 主要着眼于其具量化指针, 容易进行决策比较; 然因该评估法需多元分析资料左证, 考虑层面复杂, 限制条件亦多, 因此“历史流量评估法”仍广为使用。

5 结 论

本研究范围属山区河川, 水理计算仍有争议, 下游河段之生态栖息环境, 水理条件随时间呈不规则变动, 此皆为执行“栖地评估法”之限制。研究基地因具有超过 30 年的日流量相关纪录, 且辅以分析水深及流速等调查资料, 反应河川生态特性据相当可信度, 因此主要以“历史流量评估法”进行生态基础流量分析。

依据面积与流量经验值为估算基准, 则本研究推估之最小生态基础流量约为 0.32~ 0.95  $\text{cm}^3/\text{s}$ ; 计算系数之选择尚须参考水域生态状况, 若河川下游鱼类资源丰富, 则未来人为控制释放流量应取较大值为泄放标准。依照日本一般生态基础流量计算标准, 则维护生态最小放流量应为 1.06  $\text{cm}^3/\text{s}$ 。

表 1 理论分析方法推估之生态基础流量估计值汇总表

| 分析方法        |   | 推估基准及相关参数   | 推估结果   |
|-------------|---|---|--|
| 历史流量<br>评估法 | 集水区面积   | 每 100 $\text{km}^2$ 以 0.6 $\text{cm}^3/\text{s}$  | 0.95 $\text{cm}^3/\text{s}$                                |
|             |   | 每 100 $\text{km}^2$ 以 0.67 $\text{cm}^3/\text{s}$ | 1.06 $\text{cm}^3/\text{s}$<br>丰水期                         |
|             | 河川平均流量百分比   | 河川平均流量之 10%                                       | 1.46 $\text{cm}^3/\text{s}$<br>枯水期                         |
|             |   | 日流量延时曲线超越机率 95% ~ 96%                             | 0.61 $\text{cm}^3/\text{s}$                                |
|             |   | 日流量延时曲线超越机率 100%                                  | 3.12 $\text{cm}^3/\text{s}$<br>1.87 $\text{cm}^3/\text{s}$ |
| 水理评估法       | HEC- RAS;<br>水深 0.30 m,<br>流速 1.0 $\text{m}/\text{s}$ | 曼宁系数 $n = 0.07$                                   | 3.00 $\text{cm}^3/\text{s}$                                |
|             |   | 曼宁系数 $n = 0.11$                                   | 2.00 $\text{cm}^3/\text{s}$                                |

台湾地区河川水量丰枯季差异明显, 近年多项研究建议利用 Tennant 法计算生态基础流量时应随时间季节及水文条件变化。鉴于研究基地丰、枯水期之差别明显, 因此亦可分别依据丰枯水期平均流量之 10%, 推估不同时期之生态基础流量。推估值

于丰水期之基础流量应为 1.46 cm/s, 枯水期应为 0.61 cm/s。若按日流量延时曲线之 95% 为分析基础, 则查询历年最低日流量为 3.12 cm/s; 若按日流量延时曲线之最低标准 100% 为分析基础, 则推估之基础流量应至少为 1.87 cm/s。

依水理评估法分析结果, 最小生态基础流量应在 2.0~3.0 cm/s 之间, 如此河道水深为主要鱼种生存之最低限。有鉴于山区陡坡河道水理计算迄今于学术界仍未具定论, 计算成果仍需辅以现地实测成果予以验证。

#### 参考文献:

- [1] Jowett, I G. Instream flow methods: A comparison of approach[J]. Regul. Rivers: Res. Mgmt. 1997, 13, 115~127.
- [2] Karim, K., M. E. Gubbels, & G. Goulter. Review of determination of instream flow requirements with special application to Australia[J]. Water Resources Bulletin, 1995, 31(6): 1063~1077.
- [3] Karr, J. R., P. R. Yant, & K. D. Fausch. Spatial and temporal variability of the index of biotic integrity in three mid-western streams[J]. Trans. Am. Fish. Soc., 1987, 116, 1~11.
- [4] Lorenz, C. M., G. M. Van Dijk, A. G. M. Van Hattum, & W. P. Cofino. Concepts in river ecology: Implications for indicator development[J]. Regul. Rivers: Res. Mgmt. 1997, 13, 501~516.
- [5] Montgomery, D. R. & J. M. Buffington. Channel-reach morphology in mountain drainage basins[J]. GSA Bulletin, 1997, 109(5): 596~611.
- [6] 吴富春, 李国升. 河川栖地模式 PHABSM 之水理计算敏感度分析[J]. 台湾水利, 1998, 46(2): 60~70.
- [7] 李载鸣. 台湾地区重要河川鱼道设计之研究[Z]. 文化大学土地资源学系, 1996.
- [8] 徐荣秀, 管立豪, 潘彦宏, 等. 森林溪流淡水鱼类保育工作资料汇整[Z]. 溪流环境保育研讨会讲义, 1997. 101~113.
- [9] 曾晴贤. 鲤鱼潭水库土林水力发电工程土林坝下游河道最小生态维护放水量检讨工作. 中兴工程顾问公司, 1995.
- [10] 谢国正, 吴素祯. 谁是最之赢家- 台湾鱼类 vs 水利工程师[J]. 中兴工程, 1995(45). 134~139.
- [11] 顾培森. 高山地区防砂坝与生态维护[C]. 第一届治山防洪研讨会论文集, 1995, 115~144.

(上接第 82 页)

用, 排水辅之。若使左坝肩下游岩体处于无水状态, 除要做好沿坝轴线的防渗帷幕和排水, 并使之与副坝防渗很好连接外, 还应防止副坝下游古河槽砂砾石层中地下水对左坝肩岩体的影响。

(3) 坝基排水起主导作用, 防渗帷幕作用较小。为有效降低坝基扬压力, 应做好排水。

(4) 因此, 基于上述分析结果, 防渗和排水系统布置如下:

a 右坝肩岩体内设置一道排水系统, 同时为防止断层和夹层的渗透, 布置一道灌浆帷幕, 并在断层

和夹层部位采用超细水泥灌浆。

b 坝基除布置排水系统外, 为使坝体与基岩能很好接触以及防止夹层渗漏, 仍然布置一道灌浆帷幕。

c 左坝肩 1340 m 高程以下因其渗透性低, 仍以排水系统为主, 并同设置一道灌浆帷幕以防止断层和夹层的渗漏。左坝肩 1340 m 高程以上因渗透性大, 设置两道灌浆帷幕, 并辅之一道排水系统。

d 副坝防渗靠黏土心墙和混凝土防渗墙, 防渗墙深入到下部基岩, 其右侧与主坝防渗帷幕相连接, 其左岸深入到基岩, 切断库水通过砂砾石层的渗漏。

#### 参考文献:

- [1] Carrera J. J. and K. L. Lurdes. Mixed discrete-continuum models: a summary of experiences in test interpretation and model prediction[A]. Dynamics of Fluid in Fractured Rock[M], Editors: Boris Faybishenko, Paul A. Witherspoon and Sally M. Benson, Washington, D. C: American Geophysical Union 2000.
- [2] 王恩志, 王洪涛, 孙役. 双重裂隙系统渗流模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(4): 400~406.
- [3] 田开铭, 万力著. 各向异性裂隙介质渗透性的研究与评价[M]. 北京: 学苑出版社, 1989.
- [4] Pruess K., A mechanistic model for water seepage through thick unsaturated zones in fractured rocks of low matrix permeability[J]. Water Resour. Res. 1999, 35(4): 1039~1051.
- [5] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990a.
- [6] 李茂芳, 孙钊编. 大坝基础灌浆(第二版)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987a.