

# 城市水生态修复工程生态需水量分析\*

王晨阳<sup>1)</sup> 成晓龙<sup>1)</sup> 申超<sup>2)</sup> 李锡鹏<sup>2)</sup> 王然<sup>2)</sup> 李然<sup>1)†</sup> 冯镜洁<sup>1)</sup>

(1) 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 610065, 四川成都;

2) 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 610041, 四川成都)

**摘要** 针对城市水生态修复工程中河道与塘库交错、季节需水存在差异等特点,对河道部分的需水提出了综合生态水力学法,将河道功能要求转化为水力约束条件,通过河道水力模拟得到生态流量;对塘库部分的需水流量,采用功能法计算.在此基础上,根据河道与塘库水力联系分析,综合确定水生态修复工程生态补水流量.本文以成都市九道堰水生态修复工程为例,分别计算得到河道与塘库不同季节生态需水量,确定了水生态修复工程生态补水流量.研究结果对于城市河流水生态修复工程补水量的确定,以及水生态保护具有重要参考价值.

**关键词** 生态需水;水生态修复;九道堰;城市河道;塘库

**中图分类号** TV213.4

**DOI:** 10.12202/j.0476-0301.2020110

## 0 引言

城市供水通常优先保证工农业发展和人民生活用水,往往不能满足城市生态环境保护和生态建设的需求,且生态需水矛盾随着城市化进程加快更加严重<sup>[1]</sup>,由此导致部分城市河道枯水期水量短缺甚至断流,水质恶化,水生态功能严重退化.因此对城市河流进行生态补水,实施水生态修复工程势在必行.与单纯的天然河道或湖库不同,城市河流水生态修复工程水体形态复杂,河道与生态塘库交错,生态需水涉及水质、景观、水生动植物等方面.如何兼顾河道与生态塘库等不同水体在不同时期的需水要求,确定生态需水阈值成为水生态修复工程中的首要关键问题.

生态需水是指维持水生生态系统所需的流量、时机、水质和水位<sup>[2]</sup>,定量预测河湖的需水量可以获得复合的生态和社会效益<sup>[3]</sup>.近年来,许多研究者分别对河道和湖泊生态需水量的计算开展了研究.

目前河道生态需水量的计算方法主要分为3类:水文学法、水力学法、生态水力学法<sup>[4]</sup>.以 Tennant 法为代表的水文学法,采用多年平均径流量的百分比确定生态基流量<sup>[5]</sup>,该方法未考虑河流功能的不同定位以及河流季节性变化,且各种需水条件下的流量百分比标准难以确定.郑志宏等<sup>[6]</sup>针对北方河流的季节性,对 Tennant 法进行了改进,以典型年流量代替多年平均流量,并分期计算生态需水量.水力学法根据河

道断面的水力参数满足程度确定河道需水量,代表方法有湿周法和 R2-Cross 法.其中湿周法基于河道断面湿周与流量的关系曲线,以曲线拐点对应的流量作为河道需水量,但对于河床形状或湿周-流量关系线不稳定的情况,湿周法无法适用<sup>[7]</sup>.R2-Cross 法以计算浅滩河流断面的水力参数对栖息地的质量进行评估<sup>[8]</sup>,然而计算结果受限于典型断面代表性<sup>[9]</sup>,无法适用于季节性河流<sup>[10]</sup>.生态水力学法是通过河道水力模拟得到不同流量下河段的水力生境参数,将水生生物适宜的水力生境对应的流量作为生态需水量,适用于重点考虑鱼类生境需求的天然河流<sup>[11-12]</sup>.

对于水生态修复工程涉及的城市河道,由于流量受人为调控因素影响较大,且存在季节性断流情况,无法采用水文学法.同时由于渠化或修复后的城市河道形态及其生境较传统意义的河流栖息地具有显著差别,不适合采用单纯基于水生生物栖息地水力参数作为判别指标的水力学法.此外,城市修复工程中河道鱼类多以观赏或经济鱼类为主,对于产卵繁殖等水力生境需求并不特别突出,因而单纯的生态水力学法不能满足水质、景观等其他功能性需水要求.为此在城市河道生态需水量计算中,需要结合生态水力学方法,全面考虑水生态修复工程中的水质、景观等综合功能用水需求,提出水生态修复工程适用的河道需水计算方法.

湖库生态需水量是指保证湖库生态系统发挥正

\* 四川省环境治理与生态保护重大科技专项资助项目(2019YFS0505)

† 通信作者:李然(1968—),女,博士,研究员.研究方向:环境水力学. E-mail: liran@scu.edu.cn

收稿日期:2020-03-26

常生态环境功能,维持生态系统健康必需的水量.计算方法主要包括换水周期法、水量平衡法、功能设定法、水质目标法和最小水位法等<sup>[13]</sup>.

换水周期是水生系统中与自净能力有关的重要因素<sup>[14]</sup>.换水周期法针对水质型缺水湖泊,通过湖泊蓄水量和换水周期确定湖泊需水.吴秋琴等<sup>[15]</sup>针对以再生水为水源的城市封闭湖池,提出了基于水量平衡法的换水周期计算方法,但该计算方法适用于没有流量进出的封闭湖池且未定量计算湖池水体的自净作用.水量平衡法基于水量平衡方程,湖泊蓄水量等于入流、出流量之差,湖泊需水即补充不平衡的出流量<sup>[16]</sup>,水量平衡作为基本思路也可与其他方法结合<sup>[15,17]</sup>.功能设定法根据湖泊系统的特点,从维持湖泊生态系统正常功能的角度考虑<sup>[16]</sup>,将生态需水分为湖泊蒸发渗漏、生物栖息地需水、湖泊净化需水、景观娱乐需水等.肖芳等<sup>[18]</sup>以北京市六海为例分别计算城市湖泊各项功能的需水量得到其生态需水量,但未考虑面源污染和水体自净能力的限度.许文杰等<sup>[19]</sup>通过水质、水深对城市湖泊需水进行分级,以东昌湖为例采用功能法计算了各需水等级下的需水量.该方法对不同湖泊需要重新制定分级标准,受人为因素影响大,计算过程繁琐.水质目标法是指湖泊采用水量稀释的方法满足某一污染物质量浓度标准.巩琳琳等<sup>[17]</sup>基于生态保护的水质目标结合水量平衡方程计算了乌梁素海的生态需水,但计算时仅选取一种污染物质量浓度,并且忽略了水体自净和水生生物的作用.最小水位法<sup>[20]</sup>是从维持生态系统的整体角度出发,通过天然资料统计法、湖泊形态分析法或生物空间最小需求法计算湖泊最低水位,从而计算湖泊生态需水量.

换水周期法适用于人为干扰较小的闭流湖或水量充沛的吞吐湖<sup>[16]</sup>,然而城市湖泊来水量较少,补水量受人为调配;水量平衡法适用于受人类活动影响较小的湿地,并且该方法并未考虑生物作用,显然不适用于受人类影响大、有水生生物活动的城市湖泊;功能设定法应用最广,城市生态塘库各功能需求明确,但公式内系数确定困难,计算量大;水质目标法受水质模型制约,适用于水量充沛地区,若水量不足则难以满足水质要求;最小水位法需要长系列水位观测资料或者多年最低水位,不适用于新建的城市人工湖泊.所以对于城市生态塘库或湖泊可以采用功能设定法计算.

基于上述分析,本文在对水生态修复工程需水特征分析的基础上,分别针对城市河道生态需水和塘库生态需水特点,研究提出了各自适用的生态需水计算方法,并以成都九道堰河道生态修复工程为例,开展

生态需水分析计算.

## 1 水生态修复工程需水特征分析

### 1.1 河道需水特征分析

**1.1.1 自净需水** 生态整治前河道的污染问题主要是底泥的内源污染或排入河道的外源污染.整治后城市河道恢复水体自净能力,但仍有污染汇入,有可能爆发水华现象.为使河道污染维持在水体自净限度内,控制藻类爆发,应保持一定的水量补给和河道流速<sup>[9]</sup>.

**1.1.2 渗漏需水** 水生态修复工程通过混凝土护脚、石笼护坡和堤防稳定河道形态,满足河道行洪需求.若河道为水泥浆砌或采用防渗设计,可忽略渗流量,其他情况河道应考虑渗漏需水量.

**1.1.3 水面蒸发需水** 水面蒸发与气象地理因素和水面面积相关,生态修复后的城市河道闸坝壅水使得水面更宽阔,蒸发量加大.

**1.1.4 水生动物需水** 城市河道内的水生动物以鱼类和底栖动物为主,与天然河道内的鱼类不同,城市河道内的鱼类所需求的水力生境条件较单一.生态修复后,可根据河道内典型鱼类需求确定水深与流速.

**1.1.5 水生植物需水** 城市河道的坡脚或河岸栽植沉水植物或挺水植物,如图1所示.水生植物的生长受到水流流速的双面影响:适宜流速能促进植物气体交换和营养物质的吸收;然而过大的流速影响沉水植物代谢,对其产生胁迫作用<sup>[21]</sup>.不同种类的植物对水深、水质和流速的要求不同.为保证沉水植物和挺水植物良好生长,遏制河道中浮游植物的过度生长,应维持一定的水体流速.

**1.1.6 景观需水** 生态修复后的河道具有景观功能,是提供休闲娱乐、亲水活动的场所.对于具有水上娱乐设施的河流,其需水量可根据娱乐高峰时期所需要的水面面积和水深等参数确定<sup>[22]</sup>.为使水体保持清澈,避免底部泥沙翻滚至上层,河道平均流速应小于泥沙起动流速.

### 1.2 生态塘库需水特征分析

**1.2.1 自净需水** 水生态修复工程多通过构建人工湿地或生态塘以消减污染负荷.这一功能需要保证一定的水量输入,实现生态塘库的水体自净.若面源或点源污染截控不彻底,应考虑污染汇入.对于污染负荷较为分散的湖泊,连续水流冲刷有利于降低污染物质量浓度,对于污染负荷集中的湖泊,连续水流冲刷会使湖泊水质更加恶化<sup>[23]</sup>.

**1.2.2 渗漏需水** 生态塘与天然湖泊渗漏过程类似,与湖底岩性土质、地下水位相关.当生态塘库水位高

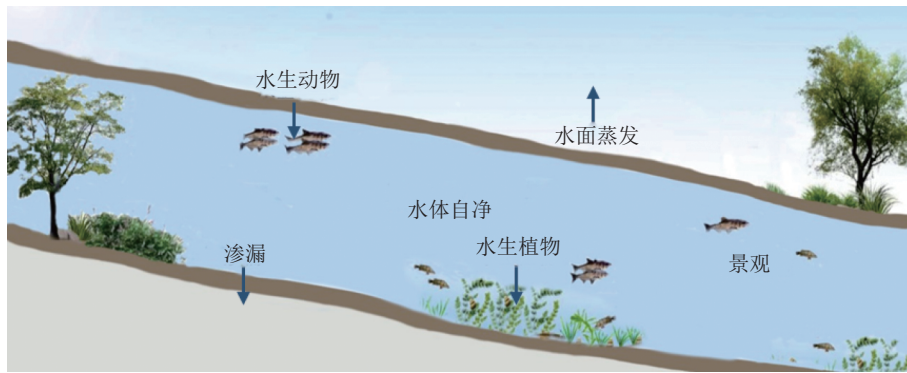


图 1 河道需水示意

于地下水位时,塘库底部和侧岸会产生渗漏.生态塘库一般需要考虑渗漏量,若塘库底设置防渗层可不考虑<sup>[18]</sup>.

**1.2.3 水面蒸发需水** 生态塘库与天然湖泊水面蒸

发条件相似,按照水面蒸发量和降水量逐月计算.

**1.2.4 水生植物需水** 生态塘库底部种植沉水植物,塘岸种植挺水植物,如图 2.植物蒸散发等用水由生态塘提供,若植物分布面积较大则不能忽略.

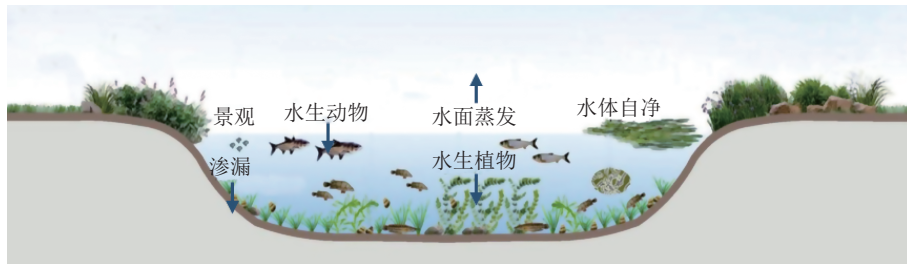


图 2 生态塘库需水示意

**1.2.5 水生动物需水** 与天然湖泊不同,生态塘库不是传统意义的生物栖息地,无珍稀鱼类栖息.水生态修复后为了维持生态稳定,可能按一定生物量比例投放底栖动物、鱼类等水生生物.为保证水生动物生存生长,生态塘库应满足各类生物对水量水深的要求.

**1.2.6 景观需水** 水生态修复后生态塘库应满足人们的娱乐需求,景观和人体非直接接触的娱乐用水按 IV 类水标准管理<sup>[22]</sup>.此外应满足一定的水面面积和流量要求,水面面积可在规划时根据人均水面面积衡量.

## 2 水生态修复工程生态需水量计算方法分析

**2.1 河道生态需水量计算方法分析** 基于前述对城市水生态修复工程需水特征分析,本文提出适用于城市水生态修复工程生态需水计算的综合生态水力学法.该方法分别根据维持水体自净、提供景观、保证水生动物和植物生存等城市河道各部分的需水要求,确定各功能不同时期对流量、流速、水深等水力参数的需求特征,并采用整体最优方法,综合分析提出适宜的水力阈值范围.在此基础上,借助河道水力模拟,计算确定对应河段不同时期的流量.

**2.1.1 确定水力参数** 综合生态水力学法首先应该根据河道水质、渗漏、水面蒸发、水生动物、水生植物、景观娱乐等功能要求确定水力参数.水力参数的选择与具体河段水质、地理因素、气象因素、水生生物种类相关.

1)自净需水计算方法.维持水体自净能力也即保证河道水质.若河道来水量或补水量较小,水体内氮磷质量浓度较高,则会抑制沉水植物的生长和成活,并有可能在适宜温度下发生水华现象.水质降解系数和水华爆发均与流速等水力因素有关,适当提高流速可以加快水质降解速度,抑制浮游藻类生长.自净流速应根据河道具体要求和时间特征比较确定.

2)水生植物需水参数.光照、温度、流速、悬浮物、底质都会影响水生植物的生长状况.各种水生植物适应的水深、流速、水质不同.当水深或流速大于植物适应范围时,植物的生长会受到胁迫作用,植物代谢也会受到影响.应根据水生态修复工程各河段种植的水生植物种类分类,分段确定对应的水力参数.

3)水生生物需水参数.城市河道内水生动物以鱼类为主,可根据调查采集各河段鱼的种类,按照典型鱼类适宜的生境设置流速、水深.若无典型鱼类或具

体资料,则可按照鱼体长的倍数设置最小水深.若鱼类在该河段产卵,应根据产卵期和鱼卵类型确定河段不同时期的生态流速.其中产浮性卵、漂流性卵的鱼类对河道流速要求较高,应避免因流速过低鱼卵沉入水底降低幼鱼孵化率<sup>[24]</sup>.此外还应综合考虑不同鱼类的喜好流速和极限流速.

4)景观功能需水参数.景观需水是在之前功能的基础上更进一步的要求,满足水体自净要求可以降低浊度使水体通透,避免黑臭,使水生植物和鱼类良好生长,充满生机,符合人们审美.景观功能要求一定的水体流速和河道水深使动静相宜,也应确定平均流速上限,避免河底泥沙普遍起动.

**2.1.2 综合约束的确定** 确定各河段流速与水深范围的要求后,即可进行河道水力模拟.进行水力计算时应满足约束方程组,其数学表达式为:

$$v_b > v_{\min} \geq v_a, \quad (1)$$

$$H_{\min} \leq H_i \leq H_{\max}, \quad (2)$$

$$Q_{\min} = \min\{Q_i\}, \quad (3)$$

式中:  $v_{\min}$  为各计算断面的最小流速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $v_a$ 、 $v_b$  分别为选定的河道断面最小、最大流速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $H_{\min}$ 、 $H_{\max}$  分别为河段水生生物适宜最小水深和最大水深 ( $\text{m}$ ),若无适宜最小水深则仅考虑  $H_{\max}$  的约束;  $H_i$  为河段中各计算断面的水深 ( $\text{m}$ );  $Q_{\min}$  为满足约束方程的最小河段流量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $Q_i$  为满足约束方程的河段流量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

**2.1.3 水力学模拟方法** 通过圣维南方程组求解得到河道水深、河宽等水力学参数<sup>[12]</sup>.控制方程为:

连续方程

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q_L}{B}, \quad (4)$$

动量方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A_s)}{\partial x} + gA_s \left[ \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{Q|Q|}{K^2} \right] = 0, \quad (5)$$

式中:  $Q$ 、 $z$  分别为待求的流量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) 和 水位 ( $\text{m}$ );  $A_s$ 、 $B$  分别为过水断面面积 ( $\text{m}^2$ ) 与 河宽 ( $\text{m}$ );  $K$  为流量模数 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $Q_L$  为 旁侧入流流量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

**2.2 生态塘库生态需水量计算方法分析** 生态塘库依据河道地形地貌特点人工构建,采用人工曝气、水生态修复等技术手段构建水下生态系统.生态塘与城市湖池的生态需水计算相似,按照其功能需要分项计算.

**2.2.1 塘库水面蒸发** 生态塘库的水面蒸发需水量

应根据降水量与蒸发量的对比情况分类讨论.当一定时期内水面蒸发量大于降水量时,有必要接受塘库系统以外水体的水量补给,这一部分水量称为水面蒸发需水量<sup>[25]</sup>.当一定时期内降水量大于蒸发量,忽略蒸发需水量.生态塘库大多为宽浅盆状,水面面积变幅与水位关系不显著,简化计算式为

$$Q_E = \begin{cases} A_W \times (E - P) \times 3.858 \times 10^{-4}, & E > P, \\ 0, & E \leq P, \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $Q_E$  为塘库水面净蒸发需水量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $A_W$  为塘库水面面积 ( $\text{km}^2$ );  $E$  为月水面蒸发量 ( $\text{mm}$ );  $P$  为月降水量 ( $\text{mm}$ ).

**2.2.2 塘库渗漏需水量** 生态塘库的渗漏损失量可采用城市湖池的计算方法<sup>[25]</sup>:

$$Q_s = \gamma \times A_W \times 3.17 \times 10^{-8}, \quad (7)$$

式中:  $Q_s$  为塘库年渗漏损失水量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $\gamma$  为不同地质条件下的渗漏系数 ( $\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$ ),中等水文地质条件取 0.5~1.0;  $A_W$  为塘库水面面积 ( $\text{km}^2$ ).

**2.2.3 塘库自净需水量** 生态塘库的自净能力与流速、塘库水深、温度、水质降解系数等因素相关.水生态修复工程可以通过控制上、下游闸门开度来控制塘库的流速和水深.自净需水量应结合补水水质、面源污染汇入量和自净水质目标多方面考虑,计算方法<sup>[26]</sup>为

$$v_M = (\rho_s - \rho_0 e^{-kL/u}) e^{kL/2v} Q_r \quad (8)$$

式中:  $v_M$  为水生态修复控源截污后面源污染物入湖速率 ( $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $\rho_s$  为塘库控制断面污染物目标质量浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $\rho_0$  为塘库起始断面污染物背景质量浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $k$  为污染物综合降解系数;  $L$  为上下断面污染物流经长度 ( $\text{m}$ );  $v$  为塘库设计流速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $Q_r$  为环境目标下需水量 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

塘库自净需水量确定中的关键参数为塘库综合降解系数  $k$ .根据 (GB/T 25173-2010)《水域纳污能力计算规程》计算得到

$$k = \frac{v}{\Delta x} \ln \frac{\rho_A}{\rho_B}, \quad (9)$$

式中:  $\Delta x$  为上下断面间距 ( $\text{m}$ );  $v$  为流速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $\rho_A$  为上断面目标污染物质量浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $\rho_B$  为下断面目标污染物质量浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ).

受监测条件所限,对于无资料河流,亦可选择类比分析法,采用类比河段监测成果或降解系数.

**2.2.4 塘库水生植物需水量计算** 水生植物的需水量以植物蒸腾蒸发量为主,并且水生植物的蒸散发具

有明显的季节性,植物蒸腾会明显改变水面的蒸发量.对于岸边的挺水植物具体蒸散发量可根据样方调查植被群落的方法统计估算<sup>[27]</sup>,对于塘库内沉水植物可按照水面蒸发量一定比例计入.

$$E_T = E_v + E_s, \quad (10)$$

$$E_v = \frac{T_r \times A_l \times M(t+1)}{\rho \times A_0}, \quad (11)$$

式中:  $E_T$  为植物蒸散发量 (mm);  $E_v$  为植物蒸腾量 (mm);  $E_s$  为植物蒸发量 (mm);  $T_r$  为植物蒸腾速率 ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $A_l$  为样方中叶面积 ( $\text{m}^2$ );  $M$  为水的摩尔质量 ( $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ );  $t$  为蒸腾时间 (s);  $\rho$  为水的密度 ( $\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$ );  $A_0$  为样方面积 ( $\text{m}^2$ ).

**2.2.5 塘库水生动物需水量计算** 生态塘库类似人工湖泊,人为活动频繁,一般无珍稀物种栖息,且大多为鱼类,可参考生物最小空间需求法.生物最小空间需求法即以塘底高程加上对应鱼类生存最小水深,一般为 0.5~1.5 m<sup>[20]</sup>.水生动物需水即保持该水位所需要的水量.

**2.2.6 塘库景观需水量计算** 景观需水量目前尚无统一的计算方法.本文分析认为,对于无特殊景观需水要求的塘库,在满足上述生态功能需求和水质要求前提下,景观需水要求亦可得到满足,因此不单独考虑景观需水量.

**2.3 水生态修复工程生态需水的综合确定** 城市水生态修复工程中,人工修复的河道通过闸坝壅水恢复河道景观,闸坝蓄放水受人调控,使得闸坝河道上、下游水力水文因素不连续<sup>[27]</sup>,因此本文根据水生态修复工程需水特征分段计算各河段河道和塘库生态需水流量.

此外,水生态修复工程河道与生态塘库会产生流量交换,因此计算中考虑河段与塘库间的流量输入输

出平衡,综合确定可以同时满足各河段及塘库需求的流量作为最终的生态需水量.需水量确定原则为:如果河库串联,取需水量较大者,如河库并联,取二者需水量之和.

### 3 九道堰生态环境需水量计算

**3.1 九道堰水生态修复工程概况** 九道堰水生态修复工程位于九道堰流域.九道堰流域属于沱江流域,流域面积 75 km<sup>2</sup>.工程范围为九道堰及其左支(牟珠堰)绕城入口断面至九道堰绕城出口,长 15.32 km.九道堰水生态修复工程以成都市第七污水处理厂再生水补水,处理厂出水水质按照地表 IV 类水要求,其总磷质量浓度为 0.3 mg · L<sup>-1</sup>,总氮为 1.5 mg · L<sup>-1</sup>,氨氮为 1.5 mg · L<sup>-1</sup>.

九道堰河道由 7 座挡水钢坝分为 7 段,如图 3.河道无特有鱼类分布,水生生物措施包括刺苦草、轮叶黑藻、马来眼子菜、篦齿眼子菜、狐尾藻等植物恢复河底生态.九道堰河道两侧分布 5 个生态塘库,用以消减污染、净化水质.塘底为黏土、粉砂类土质,水面面积共 2.98 万 m<sup>2</sup>.为维持水体系统稳定,在塘库内按一定生物量比例投放青鱼、鳊鱼等鱼类,青虾、无齿蚌等底栖动物,种植苦草等沉水植物.

九道堰水生态修复工程的流量联系如图 4.各生态塘库入流均通过闸门控制引入,塘库出水重新汇入河道.

### 3.2 河道生态需水量计算

#### 3.2.1 水力参数需求目标的确定

1) 水质需求参数特征.主要考虑控制水华爆发的水质需求.除氮磷等质量浓度外,季节和温度也是影响水体发生水华现象的重要条件,一般认为温度较高,光照强烈的夏季更易于发生,所以分别针对高温期与低温期提出水力学和水质控制要求.

Paerl 等<sup>[28]</sup>认为,对于营养丰富且水力停留时间



图 3 九道堰水生态修复工程布置示意

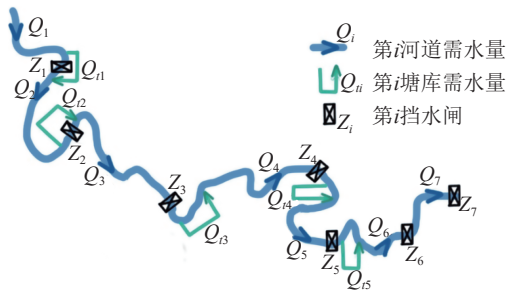


图4 九道堰生态修复工程流量过程示意

较长的水体, 若水温周期性地  $\geq 20\text{ }^\circ\text{C}$ , 极易产生蓝藻水华. 根据成都市气象资料, 以月平均温度  $20\text{ }^\circ\text{C}$  作为高温期和低温期的划分临界, 逐月气温变化如图5. 月平均温度  $\geq 20\text{ }^\circ\text{C}$  的月份代表高温期, 为5—9月共153 d; 月平均温度  $< 20\text{ }^\circ\text{C}$  的月份代表低温期, 为1—4、10—12月共212 d.

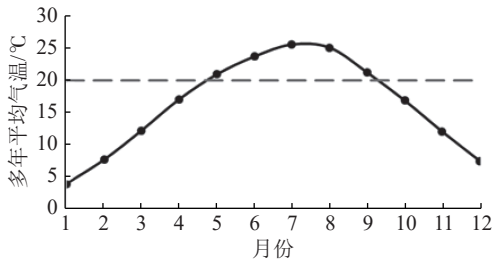


图5 成都市逐月气温变化过程

一定的流动条件可以导致浮游植物生物量和空间分布的变化<sup>[29]</sup>, 避免水体发生水华现象, 符合河道功能要求. 李飞鹏等<sup>[30]</sup>指出, 一系列流速  $0.06\sim 0.10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  对浮游藻类具有明显的抑制作用; 魏桢等<sup>[31]</sup>采用再生水研究认为, 流速为  $0.10\sim 0.15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时藻类细胞生长率达到最低. 澳大利亚城市河网水华控制研究发现在温度较高的季节, 流速  $> 0.05\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  可避免形成稳定的热分层, 从而减小水华发生可能<sup>[32]</sup>. 根据水质需求, 九道堰河道生态需水高温期最小流速为  $0.10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 低温期最小流速为  $0.05\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

2) 水生生物需求参数特征. 修复工程中无特有鱼类分布, 因此按照鱼类平均体长的3~4倍作为鱼类生存水深的下限<sup>[33]</sup>, 九道堰河道鱼类适宜最小水深确定为  $0.45\text{ m}$ ; 取多种鱼类极限流速的平均值  $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  作为鱼类生存的最大流速<sup>[24]</sup>. 九道堰栽种的沉水植物主要为刺苦草、轮叶黑藻、马来眼子菜、篦齿眼子菜、狐尾藻等. 蓝于倩等<sup>[34]</sup>针对轻度富营养化水体发现: 金鱼藻、苦草适应水深范围可达  $2.5\text{ m}$ ; 黑藻适应水深  $< 2.0\text{ m}$ ; 马来眼子菜适应水深范围为  $0.5\sim 1.5\text{ m}$ . 杨岭兰<sup>[35]</sup>认为, 在富营养化的湖泊中沉水植物的最适水深应相应降低, 并且狐尾藻和金鱼藻对水深一般没有太严格要求. Madsen等<sup>[36]</sup>和 Biggs<sup>[37]</sup>概括了水流流速

范围与生长期沉水植物的关系, 认为: 流速  $< 0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 沉水植物生物量较高, 物种多样性丰富; 在  $0.1\sim 0.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的流速范围, 生物量较低, 物种多样性较少; 流速  $> 0.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 沉水植物衰减, 水生附着物, 苔藓类植物增加. 结合九道堰沉水植物种类, 种植眼子菜的河道水深为  $0.5\sim 1.5\text{ m}$ , 其余河道水深  $< 2.5\text{ m}$ , 河道保持流速  $\leq 0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

3) 景观需水参数特征. 判断河道景观是否满足要求最直接的参数为浊度. 在河底清淤且不发生水华现象的条件下, 避免河底泥沙起动可以显著地提高人们观感. 应控制河道平均流速小于河底泥沙起动流速. 按照简化张瑞瑾公式<sup>[38]</sup>估算起动流速, 见式(12). 将河道泥沙起动流速作为平均流速的上限, 计算值为  $0.35\sim 0.40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

$$v_c = 1.33 \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d \left(\frac{h}{d}\right)^{1/7}} \quad (12)$$

式中  $v_c$  为起动流速 ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $\rho_s$  为泥沙密度 ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ),  $\rho$  为水的密度 ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ),  $g$  为重力加速度 ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ),  $d$  为泥沙粒径 ( $\text{mm}$ ),  $h$  为水深 ( $\text{m}$ ).

将各功能水力参数列入表1, 结合城市河道的实际情况, 九道堰生态需水高温期流速确定为  $0.10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 低温期最小流速为  $0.05\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 最大流速为  $0.10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 显然满足平均流速上限  $< 0.40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的景观要求. 种植眼子菜的河段水深为  $0.5\sim 1.5\text{ m}$ , 其余河段最大水深  $< 2.5\text{ m}$ .

表1 河道各功能水力参数选择

河道各功能需水	水力参数特征
水质需水	高温期最小流速 $0.10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
	低温期最小流速 $0.05\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
	保持流速 $\leq 0.10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
水生生物需水	苦草适宜水深 $< 2.5\text{ m}$
	眼子菜适宜水深为 $0.5\sim 1.5\text{ m}$
	狐尾藻适宜水深 $< 2.5\text{ m}$
	鱼类适宜最小水深 $0.45\text{ m}$
	极限流速 $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
景观需水	平均流速上限为 $0.40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

3.2.2 河道水力学计算与需水量确定 采用 Hec-ras 软件对九道堰河段逐段进行一维水力计算, 边界条件由水位条件控制, 其中上游边界条件根据九道堰河道正常水位线确定, 下游边界条件参考闸前正常蓄水位确定; 根据工程特性主槽及滩地选用不同糙率, 分别为  $0.030$  和  $0.035$ . 试算得到各河段高温期与低温期满足约束条件的最小生态流量, 结果见表2.

表 2 九道堰各河段不同时期需水量计算结果  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 

时期	需水量						
	1段	2段	3段	4段	5段	6段	7段
高温期	1.37	1.75	2.08	1.98	1.55	1.12	1.57
低温期	0.70	1.04	1.16	1.21	0.74	0.63	0.78

**3.3 生态塘库需水量计算** 采用 3.2 节生态塘需水计算方法, 分别对九道堰工程 5 个生态塘进行生态需水量计算. 如前所述, 生态需水计算中主要考虑水面蒸发、渗漏损失、塘库自净、水生动植物等需水. 塘库进口水质为 4 类水, 已满足娱乐景观的需要, 若能保证塘库满足上述功能要求, 认为满足景观娱乐要求.

**3.3.1 水面蒸发需水量计算** 根据成都气象站气象要素特征值统计结果和式(7)计算水面蒸发需水量. 5 个生态塘高温期水面总蒸发需水量为  $0.0100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 低温期水面总蒸发需水量为  $0.0065 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ; 考虑降雨量, 高温期水面净蒸发需水量为  $0.00094 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 低温期水面净蒸发需水量为  $0.0039 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

**3.3.2 渗漏损失量计算** 九道堰河段地质土层以黏土、粉土、粉砂为主, 渗漏损失系数  $\gamma$  取 0.7, 根据式(8), 生态塘年总渗漏损失量为  $0.001 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

**3.3.3 塘库自净需水量计算** 氨氮易被水体中藻类吸收, 可能导致水体富营养化, 破坏水生生态系统. 当氨氮质量浓度超过一定时, 鱼类会缺氧中毒, 所以选取氨氮作为目标污染物. Pan 等<sup>[39]</sup>和 Tang 等<sup>[40]</sup>采用成都市锦江原水, 通过环形水槽实验, 建立了水流流速与污染物降解系数的关系, 而污染物的降解与水体的自净功能密切相关. 其中, 氨氮综合降解系数与流速关系为

$$k_{20} = 0.461v + 0.030, \quad (13)$$

式中  $k_{20}$  为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  氨氮综合降解系数,  $v$  为流速.

如前所述, 生态塘需水量的计算分为高温期与低温期. 根据估算, 生态塘库高温期流速约  $0.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 低温期约  $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . 采用式(13), 得到生态塘库高温期综合降解系数为  $0.076 \text{ d}^{-1}$ , 低温期为  $0.053 \text{ d}^{-1}$ . 参考成都市第七污水处理厂出水水质和九道堰初步设计报告, 确定塘库起始断面污染物背景氨氮质量浓度为  $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 控制断面污染物目标氨氮质量浓度为  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 利用式(8), 计算得到各塘库自净需水量, 计算结果见表 3. 可以看出, 虽然低温期入湖污染质量浓度较低, 但由于低温期流速较低, 降解速率慢, 自净需水量稍大.

**3.3.4 塘库水生植物需水量计算** 生态塘库区域内水生植物以沉水植物为主, 挺水植物生物量较小, 植

表 3 九道堰 1#~5#生态塘库自净需水量计算结果  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 

时期	自净需水量				
	1#	2#	3#	4#	5#
高温期	0.119	0.126	0.081	0.163	0.172
低温期	0.124	0.132	0.078	0.176	0.184

物蒸发蒸腾量与水面蒸发需水量相比较小, 水生植物的蒸发需水量可统一按水面蒸发需水量一定比例计入.

**3.3.5 塘库水生动物需水量** 在上述流量下, 按照最小水位法中生物空间最小需求法<sup>[20]</sup>, 生态塘库水深维持在  $1.5 \sim 2.0 \text{ m}$ , 满足青鱼、鳊鱼生活需求. 所以上述塘库需水量计算结果已满足水生生物需水量的要求. 将九道堰生态塘各项需水量相加, 其生态环境需水量见表 4.

表 4 九道堰 1#~5#生态塘库水生动物需水量计算结果  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 

时期	需水量				
	1#	2#	3#	4#	5#
高温期	0.119	0.127	0.081	0.164	0.173
低温期	0.125	0.134	0.078	0.177	0.186

**3.4 生态需水量计算结果** 按照九道堰河段的流量过程计算得到各河段总需水量, 其中各计算河段内河道与塘库为并联关系, 将二者的需水量相加; 九道堰各计算河段之间为串联关系, 取其最大需水量, 如表 5 所示. 以满足九道堰各河段生态需水为目标, 按照最大值原则, 选取高温期(5—9月)  $2.06 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 低温期(10—次年 4 月)  $1.29 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  作为九道堰总生态需水量.

表 5 九道堰各河段总生态需水量  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 

时期	总生态需水量						
	1段	2段	3段	4段	5段	6段	7段
高温期	1.49	1.76	1.95	2.06	1.71	1.29	1.57
低温期	0.83	1.05	1.03	1.29	0.92	0.82	0.78

## 4 结论

城市水生态修复河段内河道与塘库交错且河道受闸坝分隔. 不同于天然河湖, 城市河段来流量季节性显著, 水文水力因素不连续, 需水特征复杂, 再生水补水的河段水质较差, 高温期有水华爆发的可能. 不同于自然栖息地, 城市河段无保护性典型物种, 但各种水生动植物仍有一定的需水要求. 生态塘库不同于河道, 往往具有净化水体的功能要求, 应考虑塘库自净的需水特征. 根据城市水生态修复河段的需水

特点,本文在回顾分析各种生态需水量计算方法的基础上:对于河道需水,提出了综合生态水力学法,结合河道需水的水力因素,通过河道水力模拟得到生态流量;对塘库需水,重点考虑塘库自净能力,采用功能法计算生态流量;对于河段总需水,按照流量过程,基于兼容性与最大值原则采用水量平衡计算得到河道总需水量.这一方法提供了水生态修复工程河段生态需水量计算新思路.

以九道堰河段为例,初步计算得到高温期生态需水量为  $2.06 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,低温期为  $1.29 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,其中河段3和河段4生态需水较大.由于河流流速较小,降解速度较慢,在生态塘库需水中水体自净需水量占主要部分,大部分塘库低温期总需水量大于高温期,低温期水面净蒸发需水量也大于高温期,二者规律一致.此外城市河段的补水应保证一定的流速,有利于提高水体自净能力,发挥水体景观作用.

对河道需水量的计算,本文主要考虑河道需水量的配置,未考虑闸坝调度过程中的非恒定流影响,因此采用一维恒定流水动力学模型,这一计算的实质是在已知水力约束条件下的流量试算.对于地形或水流形态更为复杂的河库,亦可选取二维或三维的水力模型,以提高计算结果的精度.塘库的污染降解系数与塘库本身的水质、水源、温度、降雨等多种因素相关,建议针对具体工程,通过原水实验确定适用的降解系数.

## 5 参考文献

- [1] YAN Z, ZHOU Z, SANG X, et al. Water replenishment for ecological flow with an improved water resources allocation model[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 643: 1152
- [2] ANGELA H A, ANIK B, STUART E B, et al. The brisbane declaration and global action agenda on environmental flows[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2018: 6
- [3] CHEN W, OLDEN J D. Designing flows to resolve human and environmental water needs in a dam-regulated river[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 1
- [4] 国家环境保护总局办公厅. 水电水利建设项目河道生态用水、低温水和过鱼设施环境影响评价技术指南(试行)(环评函(2006)4号)[S]. 北京: 国家环境保护总局环境工程评估中心, 2006
- [5] TENNANT D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation, and related environmental resources. [C]// ORSHORN J F, ALLMAN C H. *Proceedings of symposium and speciality conference on instream flow needs II*. Maryland Bethesda: American Fisheries Society, 1976: 359
- [6] 郑志宏, 张泽中, 黄强, 等. 生态需水量计算Tennant法的改进与应用[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2010, 42(2): 34
- [7] 吉小盼, 蒋红. 基于湿周法的西南山区河流生态需水量计算与验证[J]. *水生态学杂志*, 2018, 39(4): 1
- [8] DARIUSZ M, AGNIESZKA O, ANDRZEJ W. Sensitivity of methods for calculating environmental flows based on hydrological characteristics of watercourses regarding the hydropower potential of rivers[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 250: 1
- [9] YIN X, YANG Z, ZHANG E, et al. A new method of assessing environmental flows in channelized urban rivers[J]. *Engineering*, 2018, 4(5): 590
- [10] 杨志峰, 张远. 河道生态环境需水研究方法比较[J]. *水动力学研究与进展*, 2003(5): 294
- [11] 李嘉, 王玉蓉, 李克锋, 等. 计算河段最小生态需水的生态水力学法[J]. *水利学报*, 2006, 37(10): 1169
- [12] 卢红伟, 李嘉, 李永. 中型山区河流水电站下游的鱼类生态需水量计算[J]. *水利学报*, 2013, 44(5): 505
- [13] 杨薇, 赵彦伟, 刘强, 等. 白洋淀生态需水: 进展与展望[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(2): 294
- [14] TONG Y, LI J, QI M, et al. Impacts of water residence time on nitrogen budget of lakes and reservoirs[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 646: 75
- [15] 吴秋琴, 宋孝玉, 秦毅. 再生水为水源的城市湖池生态环境需水量计算[J]. *水利与建筑工程学报*, 2016, 14(6): 92
- [16] 刘静玲, 杨志峰. 湖泊生态环境需水量计算方法研究[J]. *自然资源学报*, 2002, 17(5): 604
- [17] 巩琳琳, 黄强, 薛小杰, 等. 基于生态保护目标的乌梁素海生态需水研究[J]. *水力发电学报*, 2012, 31(6): 83
- [18] 肖芳, 刘静玲, 杨志峰. 城市湖泊生态环境需水量计算[J]. *水科学进展*, 2004, 15(6): 781
- [19] 许文杰, 曹升乐. 城市湖泊生态环境需水量计算方法研究: 以东昌湖为例[J]. *水力发电学报*, 2009, 28(1): 102
- [20] 徐志侠, 王浩, 董增川, 等. 南四湖湖区最小生态需水研究[J]. *水利学报*, 2006, 37(7): 784
- [21] 王华, 逢勇, 刘申宝, 等. 沉水植物生长影响因子研究进展[J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3958
- [22] 向力. 重庆市龙河流域生态需水量研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006: 37
- [23] JANSSEN A B G, WIJK D, GERVEN L P A, et al. Success of lake restoration depends on spatial aspects of nutrient loading and hydrology[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 679: 248
- [24] 赵长森, 刘昌明, 夏军, 等. 闸坝河流河道内生态需水研究: 以淮河为例[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(3): 400
- [25] 杨薇. 城市河流生态环境需水优化配置理论及应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 30
- [26] 栗玉鸿, 王家卓, 胡应均, 等. 城市明渠生态补水方法初探: 以石家庄海绵城市规划中水环境提升为例[J]. 给水

- 排水, 2019, 45(2): 64
- [27] 王强, 刘静玲, 杨志峰. 白洋淀湿地不同时空水生植物生态需水规律研究[J]. 环境科学学报, 2008, 28(7): 1447
- [28] PAERL H W, OTTEN T G. Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls[J]. *Microbial Ecology*, 2013, 65(4): 995
- [29] LI F, ZHANG H, ZHU Y, et al. Effect of flow velocity on phytoplankton biomass and composition in a freshwater lake[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 447(1): 64
- [30] 李飞鹏, 高雅, 张海平, 等. 流速对浮游藻类生长和种群变化影响的模拟试验[J]. 湖泊科学, 2015, 27(1): 44
- [31] 魏桢, 贾海峰, 姜其贵, 等. 再生水补水河道中流速对浮游藻类生长影响的模拟实验[J]. 环境工程学报, 2017, 11(12): 6540
- [32] 杨毅, 邵慧芳, 唐伟明. 北京城市河道生态环境需水量计算方法与应用[J]. 水利规划与设计, 2017(12): 46
- [33] 蒋红霞, 黄晓, 李文华. 基于物理栖息地模拟的减水河段鱼类生态需水量研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 141
- [34] 蓝于倩, 朱文君, 麦颖仪, 等. 轻度富营养水体水深对四种沉水植物的生长影响[J]. 环境工程, 2018, 36(11): 29
- [35] 杨岭兰. 广州水体生态修复中沉水植物应用设计研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016: 28
- [36] MADSEN J D, CHAMBERS P A, JAMES W F, et al. The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes[J]. *Hydrobiologia*, 2001, 444: 71
- [37] BIGGS B J F. Hydraulic habitat of plants in streams[J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1996, 12: 131
- [38] 张小峰, 刘兴年, 吴保生, 等. 河流动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 48
- [39] PAN X, TANG L, FENG J, et al. Experimental research on the degradation coefficient of ammonia nitrogen under different hydrodynamic conditions[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2020, 104: 288
- [40] TANG L, PAN X, FENG J, et al. Experimental investigation on the relationship between COD degradation and hydrodynamic conditions in urban rivers[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16: 3447

## Ecological water requirements in urban ecological restorations

WANG Chenyang<sup>1)</sup> CHENG Xiaolong<sup>1)</sup> SHEN Chao<sup>2)</sup> LI Xipeng<sup>2)</sup>  
WANG Ran<sup>2)</sup> LI Ran<sup>1)†</sup> FENG Jingjie<sup>1)</sup>

(1) State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, 610065, Chengdu, Sichuan, China;

2) Chengdu Engineering Corporation Limited, Power China, 610041, Chengdu, Sichuan, China)

**Abstract** With water shortage aggravating, problem of poor water quality and eco-environmental deteriorations in rivers and lakes is becoming more serious. Seasonal river flow is almost completely off during dry season, not counting discharges of waste water. Therefore, eco-environmental water supplementation is an important measure in urban watershed ecological restoration project. However, some uncertainties remain regarding the actual supplemented water flow, to avoid either insufficiency or overflow waste of water resource. Characteristics of staggered river channels and ponds, seasonal differences in water requirements, are all taken into account to compute accurate water requirements. A comprehensive ecological hydraulic method is proposed for ecological water requirements of river channel, converting functional requirements of river channel into hydraulic constraints, to obtain ecological flow based on hydraulic simulation of channels. A functional method is used to calculate ecological water requirements of ponds. Ecological water requirements of rivers and ponds in different seasons in Jiudaoyan water ecological restoration project in Chengdu were then calculated. Comprehensive determination of water supplementation in urban watershed ecological restoration project as proposed in this paper is of important reference value to protect water ecology and environment.

**Keywords** ecological water requirements; aquatic ecological restoration; Jiudaoyan; urban river; pond

【责任编辑: 刘先勤】