

大沙河护岸生态效果的数值模拟

刘盈斐, 许士国

(大连理工大学土木水利学院, 辽宁 大连 116024)

摘要 利用 River2D 软件模拟了大连市大沙河多孔栖息单元式生态护岸修建后的水流状况和鱼类栖息地条件。为了选定护岸铺设的位置, 以便达到最佳的河流恢复效果, 把护岸铺设分为 4 种方案。方案一维持原貌, 不铺设护岸; 方案二在整个河段沿岸修建护岸; 方案三在需要保护的地方修建河流护底; 方案四护岸与护底同时修筑。对比了 4 种方案下鲤鱼流速适宜指数和河段权重可利用面积, 指出了在不同流量下的护岸最佳铺设方式。结果表明利用软件进行数值模拟的方法可以弥补室内实验方法和实地观测方法的不足。

关键词 生态护岸 数值模拟; River2D 软件 大沙河

中图分类号: TV861

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2007)04-0023-04

Numerical simulation of ecological riverbank protection for Dasha River//LIU Ying-fei, XU Shi-guo (College of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract : The state of water flow and fish habitat after the construction of new interstitial unit ecological riverbank along Dasha River was simulated by use of River2D software. The effect of ecological riverbank was evaluated by calculation and comparison of the velocity suitability index of cyprinoid and weighted usable area (WUA) in 4 plans, i. e. without construction of ecological riverbank, construction of ecological riverbank, construction of streambed protection, and construction of ecological riverbank and streambed protection simultaneously, and the optimum riverbank construction mode at different flow discharge was worked out. The result of study shows that the numerical simulation method by using software can remedy the defects of laboratory experiments and field observation.

Key words : ecological riverbank protection; numerical simulation; River2D software; Dasha River

目前, 国内外科技人员已经开始设计各种生态护岸^[1-3], 如稳定河岸并提供生境的木本植物栽培技术 (woody plantings) 和草本植物覆盖技术 (Herbaceous cover)、利用自然或合成材料的土壤加固技术 (Soil reinforcement) 等, 以期改善河流的生态环境。对于生态护岸效果的验证主要有两类方法, 一是缩小比例尺进行模型试验^[4-5], 二是铺设生态护岸后进行实地生态观测^[6-7]。第一种方法很难进行长期的生态效果验证, 而第二种方法是事后验证, 一旦生态护岸不能发挥实际的生态效果, 就会产生巨大的资金浪费。此外, 生态护岸如果应用在具体河流中, 需要选定护岸铺设的位置, 以便达到最佳的河流恢复效果。特别是随着河流流量的变化, 护岸的效果也可能发生变化, 甚至起不到恢复生态的作用, 这些都要在假设流量后进行典型断面的数值模拟研究。

River2D 软件是加拿大 Alberta 大学 2002 年 9 月

发布的用于计算河流流速和鱼类栖息地条件的软件。Katopodis^[8] 利用该软件计算了加拿大 Prairie 河鱼类生境; Lacey 等^[9] 用该软件模拟了河流中木屑效果及防波堤上的栖息地结构。这种利用软件进行数值模拟的方法可以弥补比例尺方法和实地观测方法的不足, 可视化效果好, 计算快捷, 避免了经济上的浪费。

本文进行验证的生态护岸为大连理工大学水环境教研室于 2006 年 7 月设计并申请专利的多孔栖息单元式生态护岸 (护底)。该种生态护岸 (护底) 利用多孔隙结构营造局部小生境、提高糙率、减缓流速, 提供鱼类产卵、幼鱼躲避敌害、水生植物生长、水生昆虫筑巢、水生昆虫上岸的场所。本文以大连市大沙河宫屯附近的一段为例, 用 River2D 软件模拟生态护岸修建后的水流状况和鱼类栖息地条件, 对护岸的生态效果进行验证。

基金项目 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2003AA601050)

作者简介 刘盈斐 (1980—), 女, 吉林长春人, 硕士研究生, 从事水资源及水环境研究。E-mail: lilytlyf@163.com

1 研究方法

1.1 研究区域概况

大沙河属黄海水系,流域面积 964.2 km^2 ,河道全长 96.5 km ,是大连市 4 条主要河流之一,如图 1 所示。河床杂草灌木丛生,洪水过后河床淤积严重,夹心岛随处可见,使得行洪断面束窄,河床左右摆动较大,直接威胁到两岸耕地和人民群众的生命财产安全。河道除大田段两岸有堤防外,其他河段基本无堤防。根据《大沙河治理工程规划设计》,研究河段的最大流量为 $438.0\text{ m}^3/\text{s}$ 。

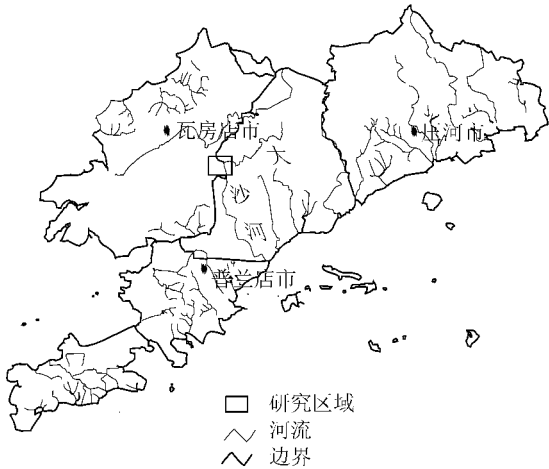


图 1 大沙河位置示意图

根据不同条件下糙率 n 的取值范围^[10]和 Cowan^[11]改进的方法,综合考虑修建护岸后研究河段的断面、植被和河流内障碍物情况的河段整体糙率。经计算,糙率 $n = 0.05$,粗糙度 $k_s = 5.85$ 。为了寻找最佳的护岸铺设方式,本文对 4 种方案进行了对比分析。方案一是维持原貌,不铺设护岸;方案二是整个河段沿岸修建护岸;方案三是在需要保护的地方修建河流护底,形成多变的水流条件,减少流速;方案四是护岸与护底同时修筑。小岛西南和东北方向的流速较大,因此方案三中的护底(多孔栖息单元式生态护岸有护底的功能)铺设在该处。

1.2 技术路线

River2D 软件采用垂向平均二维水动力学模型,包括 4 个软件包:R2D_Bed, R2D_Ice, R2D_Mesh 和 River2D。在 R2D_Bed 模块中,需要输入具体的河段坐标以及高程、粗糙度 k_s ,以便生成河段网格 R2D_Mesh 模块。

生成 R2D_Mesh 模块后,确定分割线和节点数量,生成 CDG 模块。在运行 CDG 模块之前,首先要设定边界条件。边界条件以入口的总流量和出口断面的固定水面高程表示。边界条件分为有水流通过边界条件(入口和出口)和无水流通过边界条件(河

岸)两种。本文选择大沙河主要鱼类鲤鱼为河流的指示物种,因为鱼类具有足够的敏感性来指示早期的环境变化,具有较广的地理分布范围,而且能够用来指示由于人类干扰而产生的自然循环和周期变化。此外,由于植物和昆虫等对生境的要求比鱼类狭窄,所以鱼类较宽的生境范围就能将河流要求的生境类型包括在内。

2 鱼类流速适宜指数的对比分析

鱼类需要可以生存、捕食和繁殖的栖息地以及可以迁移的通道。鱼类栖息地指鱼类赖以产卵、捕食和繁殖的水体和基质。水体包括水流区域及与之相关的物理、化学以及生态环境,如水深、流速基质以及植被覆盖情况等;基质包括水体的沉积物。鱼类对栖息地的要求也会随着生长阶段的不同而不同。如果对栖息地的要求得不到满足,鱼类数量就会下降,乃至灭绝。当流速降低、流量减少、水流动能不足以形成漩涡时,鱼卵下沉,无法孵化成幼鱼,而水流如果过大鱼类仍无法存活。

2.1 鲤鱼流速适宜指数的确定

鱼类流速适宜指数(velocity suitability index)描述了鱼类产卵和幼鱼生长等所需的栖息地条件,最适宜流速下的适宜指数为 1,最不适宜流速下的适宜指数为 0,其数值大多是基于现有数据进行分析得出。鱼类流速适宜指数在国外研究较多,而国内极少见。本文取鲤鱼的最适宜流速为 $0.3 \sim 0.7\text{ m/s}$,最不适宜流速为大于 1 m/s ^[12-13]。

2.2 不同方案下的鲤鱼流速适宜指数对比分析

由于研究河段最大流速出现在 A—A' 断面,因此以通过小岛、流态多样的 A—A' 断面为例,进行 4 个方案的鲤鱼流速适宜指数的对比分析。A—A' 断面坐标为 $(x_3, y_3) = (1\ 300, 1\ 230)$, $(x_4, y_4) = (1\ 300, 1\ 055)$,如图 2 所示。当流量 $Q = 100\text{ m}^3/\text{s}$ 时,结果如图 3 所示。可以发现,与方案一相比,方案二、方案三和方案四的鲤鱼流速适宜指数在接近岛屿处有了明显提高,

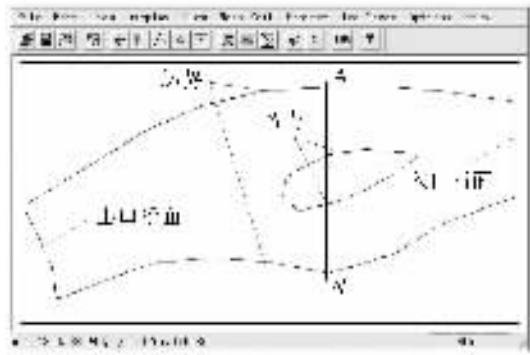


图 2 River2D 软件中河段地形及边界条件的确定

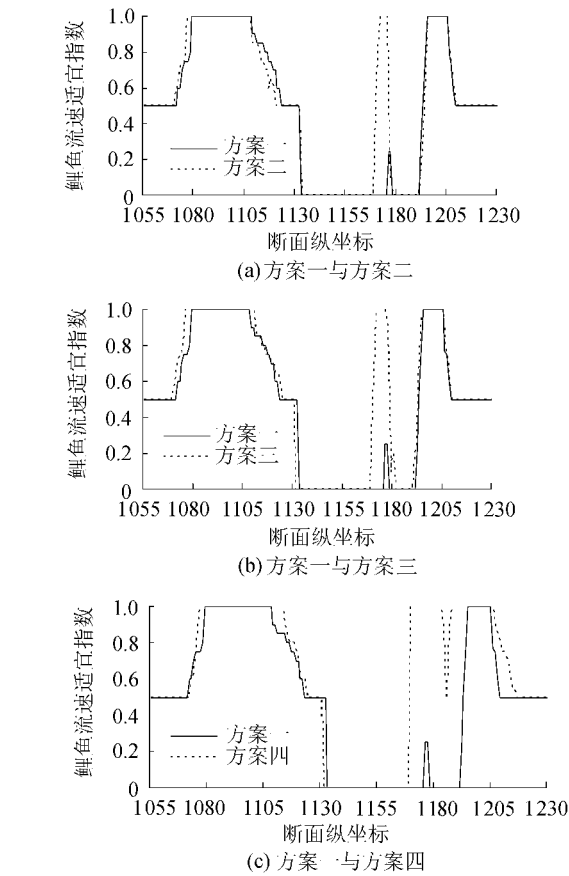


图3 鲤鱼流速适宜指数对比

而其他位置变化不大。方案三中的鲤鱼流速适宜指数提高范围最大。

3 变化流量下的生态效果对比分析

River2D 软件中的鱼类栖息地构成是根据 PHABSIM 法中的权重可利用面积 WUA 进行计算的。

$$WUA(k) = \sum_{i=1}^n [S_d(i) S_v(i) S_o(i)] A(i) \quad (1)$$

式中： A 为通水面积； S_d 为水深适宜指数，取 $S_d = 0 \sim 1$ ，若为最适宜水深则 $S_d = 1$ ，若 $S_d = 0$ 则该水深不可能有鱼类存活； S_v 为流速适宜指数， $S_v = 0 \sim 1$ ，若为最适宜流速则 $S_v = 1$ ，若 $S_v = 0$ 则该流速不可能有鱼类存活； S_o 为其他物理量适宜指数。

PHABSIM 法是利用水力模型预测水深、流速等水力参数，然后与生境适宜性标准相比较，计算适于指定水生物种的生境面积。该方法的优点在于能将生物数据与河流流量研究相结合，因而更具有说服力，不仅可用于水生生物需水评价，也适用于景观、娱乐等功能需求。

分别计算入流 $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ ， $100 \text{ m}^3/\text{s}$ ， $150 \text{ m}^3/\text{s}$ ， $200 \text{ m}^3/\text{s}$ ， $250 \text{ m}^3/\text{s}$ ， $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ， $350 \text{ m}^3/\text{s}$ ， $400 \text{ m}^3/\text{s}$ ， $438 \text{ m}^3/\text{s}$ 时河段的 WUA 值。研究过程中发现，同一方案在不同流量下的 WUA 是变化的，如图 4 所示。

为了分析不同条件下 4 个方案的效果，特将 4

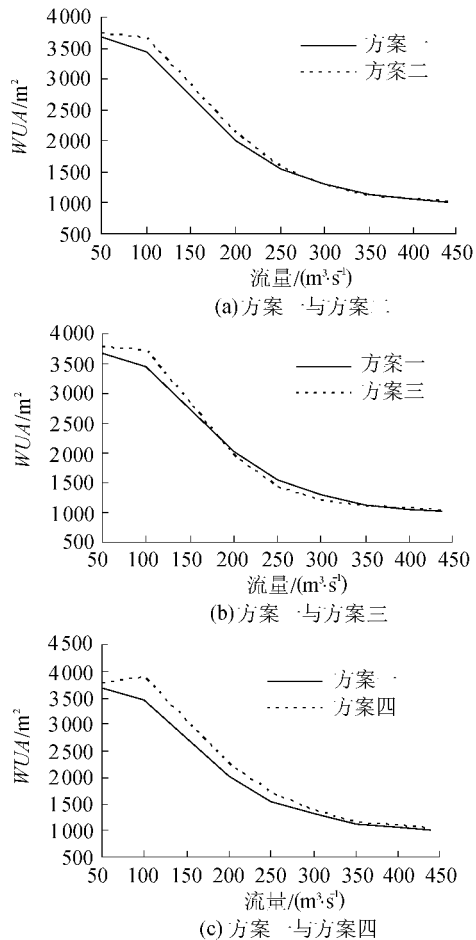


图4 不同流量下的 WUA 对比

个方案进行变化流量下的生态效果对比分析，结果如表 1 所示。

表 1 流量变化时方案二、三、四与方案一的 WUA 对比

方案	$Q \leq 180 \text{ m}^3/\text{s}$	$180 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q < 270 \text{ m}^3/\text{s}$	$270 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q < 350 \text{ m}^3/\text{s}$	$350 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 438 \text{ m}^3/\text{s}$
二	上升	上升	下降	下降
三	上升	下降	下降	上升
四	上升	上升	上升	上升

从表 1 中可以看出，在小流量时，方案二、方案三和方案四都可以提高 WUA 值，但是在 $270 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q < 350 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，随着流量的增大，方案二和方案三中的 WUA 与方案一相比有所下降，只有方案四中的 WUA 一直随着流量的增加而增大。这说明除了方案四中的生态护岸发挥了生态效果外，方案二和方案三中生态护岸的铺设反而造成了鱼类栖息地条件下降。这可能是由于单纯铺设护岸或者单纯铺设护底造成了河流内糙率分布不均匀，大流量时河流内存在流速迅速增大的区域。

因此，当 $Q \leq 180 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，方案二、方案三和方案四都是可采纳方案；当 $180 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q < 270 \text{ m}^3/\text{s}$ 时方案二和方案四都是可采纳方案；当 $270 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q < 350 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，仅方案四是可采纳方案； $350 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 438 \text{ m}^3/\text{s}$ 时方案三、四均为可采纳方案。

4 参数敏感性分析

River2D 软件在计算 WUA 时,有 3 个主要输入参数会对结果产生影响,即粗糙度、鱼类流速适宜指数和水深适宜指数。在计算中,粗糙度 k_s 由糙率 $n = 0.05$ 计算得出,因此,令 n 值变化 40%,观察其对结果的影响 鲤鱼所能承受的最小适宜水深根据经验值取 $h = 0.3\text{ m}$,令 h 值变化 40%,观察其对结果的影响 鲤鱼的最大承受流速 v 取值为 1 m/s ,令 v 值变化 40%,观察其对结果的影响。敏感性分析结果如图 5 所示。可以看出,与 WUA 的变化成正比关系的有糙率与最大承受流速,而最小适宜水深的变化与 WUA 的变化成反比关系。3 个参数中,鲤鱼的最大承受流速对 WUA 的影响最大,是最敏感因子。关于鱼类所能适应的流速范围,国外已经展开了很多研究^[14-16],特别对于大鳞大麻哈鱼(*Chinook Salmon*)、硬头鲑(*steelhead trout*)、虹鳟(*Rainbow Trout*)和‘切喉’鲑鱼(*Cutthroat Trout*)的研究最为深入,而对于鲤鱼种类的研究,国内仍是空白,是亟待解决的问题。

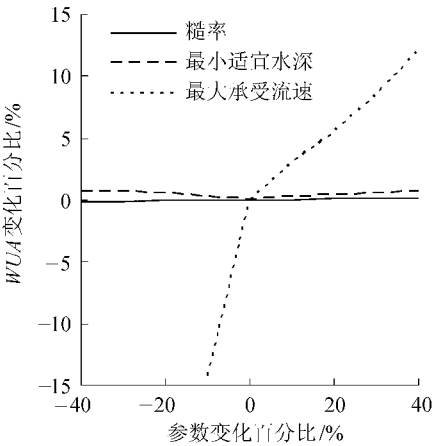


图 5 参数敏感性分析

5 结 论

- a. 在固定流量 $Q = 100\text{ m}^3/\text{s}$ 时,与方案一相比,方案二、方案三和方案四的鲤鱼流速适宜指数在接近岛屿处有了明显提高,而其他位置变化不大。方案三中的鲤鱼流速适宜指数提高范围最大。
- b. 对于变化的流量来说,当 $Q \leq 180\text{ m}^3/\text{s}$ 时,方案二、方案三和方案四都是可采纳方案 当 $180\text{ m}^3/\text{s} \leq Q < 270\text{ m}^3/\text{s}$ 时方案二和方案四都是可采纳方案 当 $270\text{ m}^3/\text{s} \leq Q < 350\text{ m}^3/\text{s}$ 时,仅方案四是可采纳方案 当 $350\text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 438\text{ m}^3/\text{s}$ 时方案三、四均为可采纳方案。
- c. 与 WUA 的变化成正比例关系的有糙率与最大承受流速,而最小适宜水深的变化与 WUA 的变化成反比例关系。3 个参数中,鲤鱼所能适应的最大

- 流速对于 WUA 的影响最大,是最敏感因子。
- d. 利用软件进行数值模拟的方法可以弥补比例尺方法和实地观测方法的不足,可视化效果好,计算快捷,避免了经济上的浪费。
- 参考文献：
- [1] 夏继红,严忠民.国内外城市河道生态型护岸研究现状及发展趋势[J].中国水土保持,2004(3):20-21.
 - [2] SHIELDS J D,SCOTT K,NATHALIE M. Response of fishes and aquatic habitats to sand-bed stream restoration using large woody debris[J]. Hydrobiologia,2003,494(3):251-257.
 - [3] 夏继红,严忠民.生态河岸带研究进展与发展趋势[J].河海大学学报:自然科学版,2004,32(3):252-255.
 - [4] 赵亚楠,杨海军,内田泰三,等.受损河岸生态系统生态修复材料的研究[J].东北师大学报:自然科学版,2004,36(1):107-113.
 - [5] SCHAEFER J F,KERFOOT J R. Fish assemblage dynamics in an adventitious stream :a landscape perspective [J]. American Midland Naturalist,2004,151(1):134-145.
 - [6] 刘丽.新型生态护坡材料及应用[D].北京:北京工业大学,2005.
 - [7] ANITA F,PIERO F,STEFANO M,et al. Fish assemblages in different shallow water habitats of the Venice Lagoon [J]. Hydrobiologia,2006,555(1):159-174.
 - [8] KATOPODIS C. Case studies of instream flow modelling for fish habitat in canadian prairie rivers[J]. Canadian Water Resources Journal,2003,28(2):199-200.
 - [9] LACEY R W J, MILLAR R G. Reach scale hydraulic assessment of instream salmonid habitat restoration [J]. Journal of the American Water Resources Association,2004,40(6):1631-1644.
 - [10] 李鉴初,杨景芳.水力学教程[M].北京:高等教育出版社,1995.
 - [11] COWAN W L. Estimating hydraulic roughness coefficients [J]. Agricultural Engineering,1956,37(7):473-475.
 - [12] 柳文成,胡通哲,谢文雄.溪流生态工法之规划:以雾社溪为例[J]. Journal of National United University,2004,24(1):73-104.
 - [13] 王所安.河北动物志:鱼类[M].石家庄:科学技术出版社,2001.
 - [14] BEREJIKIAN B A, TEZAK E P, SCHRODER S L. Reproductive behavior and breeding success of captively reared Chinook salmon [J]. North American Journal of Fisheries Management,2001,21(1):255-260.
 - [15] SHIRVELL C S. Role of instream rootwads as juvenile coho salmon and steelhead trout cover habitat under varying stream flows [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences,1990,47(1):852-861.
 - [16] MESA M G. Variation in feeding, aggression, and position choice between hatchery and wild cutthroat trout in an artificial stream [J]. Transactions of the American Fisheries Society,1991,120(6):723-727.

(收稿日期:2006-10-11 编辑:熊水斌)