

山坡地溪流整治对鱼类栖地形态影响之评估^{*}

陈晋琪, 陈欣玫

(华梵大学 环境与防灾设计学系, 台湾 台北 22301)

摘要:以台北县石碇乡之玉桂岭南势坑野溪为研究区域,收集该溪流之环境背景资料包括:整治前后地形图、流速、水深、河床底质分布与鱼种分布等资料。以福祿数为指标,将河川栖地形态区分为深潭、深流及浅滩 3 种类型,再运用陈与陈评估鱼类栖地面积之方法,探讨该溪流在整治前及整治后各种栖地类型(如深潭、深流及浅滩)所占面积的变化,并分析各种栖地形态之鱼类可用栖地面积的改变。研究结果显示:研究区域经整治后,深潭栖地明显减少,其鱼类可用面积较整治前约减少 50%。

关键词:福祿数; 栖地型态; 可用栖地面积

中图分类号:X171.1;S931.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2009)06-0253-06

Influence of Remediation Work of Mountainous Stream on Fish Habitat Types

CHEN Jinn-chyi, CHEN Hsin-mei

(Department of Environmental and Hazards - Resistant Design, Huaan University, Taipei, Taiwan 22301 China)

Abstract:The Nan - Shi - Keng mountainous stream located in Shidin township, Taipei county is selected to study the influence of remediation work on the stream in this study. The data, including the Digital Terrain Model(DTM), flow depth, flow velocity, substrate and fish distribution, etc., in the mountainous stream were collected. Three habitat types, pool, run, and riffle, are classified by the criteria of Froude number. The method proposed by Chen and Chen was applied to evaluate the variations of habitat types for the stream before and after remediation. The results clearly show a decrease of pool habitat for the stream after remediation. The value of weighted usable area (WUA) for the pool habitat is decreased by 50% after stream remediation.

Key words:froude number; habitat type; weighted usable area

近来人们逐渐重视河流环境问题,也体认环境保育与生态平衡的重要性,对于即将开发利用或整治的河川,会透过相关的评估方法来进行溪流环境的整体评估,对于已开发利用或因工程整治而导致生态功能下降之河流,亦进行生态复育或改善计划,以期减低人为干扰对河流生态环境造成的冲击。然而当进行河流整体治理规划、执行河溪复育或改善计划时,常须先针对河道环境改变前及改变后之栖地环境进行评估。过去已有很多的学者透过相关的水理或栖地模式,评估河川环境的改变或河川工程的施作对鱼类栖地环境的影响。例如:孙^[1]曾利用一维水理模式 HEC - RAS 及栖地模式 PHABSIM,评估台北大沟溪中溪哥、石鲮、川鰕虎及鲫鱼等鱼类在工程整治前后之条件下,栖地面积随流量

的变异状况。Mouton 等^[2]以比利时之 Zwalm 河为案例,利用模糊理论建立鱼类流速、深度与底质之适宜度曲线(Suitability curves),再使用 HEC - RAS 与拟似二维水理模拟软件 CASiMiR,来探讨堰移除后鲢鱼栖地面积的变化。Jalon and Gortazar^[3]则以西班牙之 Pas 河为例,使用二维栖地模式 River 2D 来评估当河流建坝与设置导流堤后,其栖地面积之改变情形。

回顾前人的相关研究中,大多以一维水理模式 HEC - RAS 搭配相关之栖地模式(如 PHABSIM)或使用二维栖地模式 River 2D 等来进行水理分析与栖地面积的评估,然由于 HEC - RAS 与 River 2D 模式适于分析缓坡河川,当应用这些模式来评估山地溪流或陡峻河川时,将可能导致结果的误

* 收稿日期:2008-08-15

作者简介:陈晋琪(1970 -),博士,副教授,研究方向:泥石流灾害评估,溪流生态工程。E-mail: jinnchyi @cc. hfu. edu. tw

差^[4-5]。尤其在多山的台湾地区,河流之中上游坡度陡峻,山区河川有许多原生鱼种也有许多的工程整治设施,如何运用较适合于山坡地溪流之水理模式,并结合鱼类之栖地适宜度指数(Habitat Suitability Index)来评估工程整治对鱼类栖地环境之影响,遂成为河流生态工程评估与河川复育研究应重视之课题。因此,陈与陈^[6]曾以较适于分析陡坡河川或山地溪流之二维水理演算模式 FLO - 2D 来进行水理模拟,并结合鱼类之栖地适宜度指数,探讨山地溪流在整治前与后之鱼类栖地适宜度、栖地面积及栖地品质的变化特性。

溪流经整治后会改变水流流况,造成河川栖地形态,如深潭(Pool)、深流(Run)及浅滩(Riffle)等之变化,由于不同鱼种类型所适合之栖地形态并不相同,因此当河川栖地形态之分布特性改变时,将影响鱼类之可用栖地面积。运用陈与陈^[1]评估鱼类栖地面积之方法,以玉桂岭南势坑野溪集水区为案例,探讨该溪流在整治前及整治后,各种栖地类型(如深潭、深流及浅滩)所占面积的变化,并结合鱼类之栖地适宜度指数,分析河川各种栖地形态之鱼类可用栖地面积的改变状况。

1 研究区域

玉桂岭南势坑野溪集水区位于台湾省台北县石碇乡东北方,是景美溪支流永定溪上游之野溪,通往该集水区之主要联外道路为 106 县道,华梵大学约有近 1/2 的校地是位于此集水区内。玉桂岭南势坑野溪终年有水,水质清澈,有许多台湾原生鱼种栖息^[7],也一直是华梵大学师生及附近村民生活用水的主要来源。然近年来,因集水区内居住人口的增加及防灾安全的需要,集水区内分段进行工程整治,局部改变原有的河道断面,也影响原有鱼类之栖息环境。研究区域为紧临华梵大学校区,长度约 800 m 的河段(图 1 中点 1 - 3 之间),自点 3 往集水区上游所包含之集水区面积共 1.26 km²,如图 1 虚线标示范围,在此集水区范围内之溪流主长度为 2.3 km,纵断面高程差约 370 m,平均坡度为 11°。

1.1 整治前之环境概况

在玉桂岭南势坑野溪整治之前,河道形状不规则与流况多变,河床上常见 1~2 m 之块石,以及许多的深潭、深流与浅滩。河岸两侧有高大林木,水面几受树荫所覆盖,山黄麻、水同木、白袍子、香楠与大叶楠等乔木、灌木类的密花芒麻、蕨类植物中的笔筒树以及苔藓类等为本区常见的滨溪植物。在图 1 中之点 1 (华梵大学水源取水口) 下游之溪流左岸尚未

有道路、护岸工程及相关整治工程。

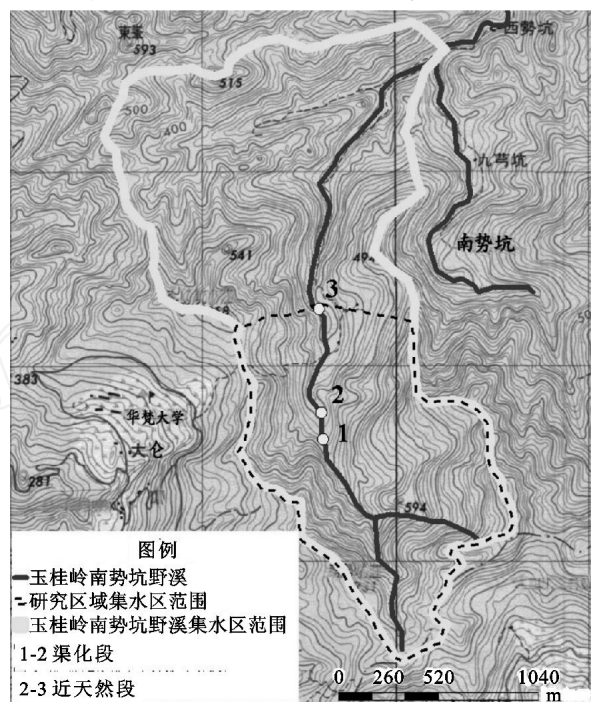


图 1 研究区域范围图

1.2 整治后之环境概况

整治后之玉桂岭南势坑野溪,依整治先后与方式的不同,可大致区分为“渠化段”及“近天然段”两部分。渠化段河道是指在 1996 年 9 月,由水土保持局第一工程所完成之整治工程部分(以图 1 中点 2 “水源取水口”为起点,往上游至点 1,长度约 200 m 之河段),此河段共兴建 9 座高度约 1.5 m 之固床工及两侧之混凝土砌石护岸,河岸两侧原有之高大乔木及灌木因工程之施作已遭砍除。整治后之渠道横断面宽度明显缩减且断面形状相当一致,也因为系列固床工的兴建,造成河道纵向剖面有明显的落差。在点 2 往下游至点 3,约 600 m 之河道范围为近天然段,由现场调查得知,此河段虽有部分人工构造物如干砌式护岸、箱笼护岸及砌石式固床工等之兴建,但相较于渠化段来说,近天然段在整治前后,河道纵剖面与河床底质特性的改变不大,两岸植生多样且丰富;在河道横断面部分,因河道左岸道路与护岸的兴建,造成整治前后之渠道宽度约缩减 2 m。

本研究并进行河床底质、河道曼宁系数(Manning coefficient)及鱼种之调查分析^[6]。经由调查得知之鱼类名录,共计有 5 种(2 目 3 科):鲤形目爬鳅科之台湾纓口鳅(*Crossostoma lacustre*)、鲤形目鲤科之台湾马口鱼(*Candidia barbata*)与台湾铲颌鱼(*Varicorhinus barbatulus*)、鲈目鰕虎科之明潭吻鰕虎(*Rhinogobius candidianus*)与短吻红斑吻鰕虎(*Rhinogobius rubromaculatus*)等,这些均为台湾北部常见之特有淡水鱼种,也多符合吴等^[8]所归纳之

台湾北区特有淡水鱼种名录。在台湾北区特有淡水鱼种名录^[8]中,共有台湾马口鱼、台湾石鱼宾、粗首鳢、菊池氏细鲫、高身短吻小鰮、短吻小鰮、台湾细鰮及饭岛氏颌须鰮等鲤科 8 种、鰕虎科 3 种(短吻红斑吻鰕虎、明潭吻鰕虎与台湾名古屋鰕虎)、爬鳅科 2 种(台湾缨口鳅、台湾间爬岩鳅)及鮡科 2 种(脂鮡、台湾鮡)。

2 研究方法

运用陈与陈^[6]评估鱼类栖地面积之方法,其步骤大致为:先运用 FLO - 2D 水理模式,推算不同流量下之流速与水深;其次,结合本研究区鱼类之流速、水深及底质之适宜度曲线,再利用几何平均法(Geometric method),计算栖地适宜度指数(Habitat Suitability Index) HSI 与权重可用面积(Weighted Usable Area) WUA。

2.1 水理分析方法

本文在运用 FLO - 2D 进行玉桂岭南势坑野溪整治前与后之数值模拟时,野溪整治前之地形是取自华梵大学校区开发前之地形测量资料与 1994 年经建版之 1 : 5 000 地形图,利用 AutoCAD 将属于研究范围内的等高线数化,建立其高程属性数据。并将 AutoCAD (. dxf) 格式先利用 ArcGIS 转换为 ShapeFile (. shp) 之数据格式,再利用 ArcGIS 的 3D 分析模拟出玉桂岭南势坑野溪集水区整治前之数值地形模型 DTM (Digital Terrain Model)。工程整治后之地形,乃参考水土保持局第一工程所提供之整治工程设计图与测量数据,并配合现地的勘察,进而建立整治后之高程属性数据及 DTM。将整治前后之 DTM 分别输入至 FLO - 2D 附属软件 GDS 后,利用 Existing ASCII Grid File 之功能,产生 FLO - 2D 所能读取之档案格式,以便推算各种不同流量下之流速与水深。

进行模拟计算之网格尺寸为 3 m,整治前后之曼宁系数图层,系根据现地之调查结果。模拟流量为定量流,输入之流量范围为 0.1 ~ 42 m³/s,此范围乃参考研究区域实测之常流量数据(0.1 ~ 0.9 m³/s),以及依台湾水土保持技术规范^[9],以合理化公式推估不同降雨重现期距下之设计流量,当降雨重现期距为 10, 25, 50 a 时,设计流量分别为 34, 39, 42 m³/s。

2.2 鱼类适宜度曲线

主要探讨溪流整治前后对鱼类栖地环境的影响,溪流整治后因护岸与系列固床工的兴建,造成河道宽度的缩减与河床坡度的改变,这些改变将直接反映于水流流速、水深与水面宽度等水理特性的改

变。在河床底质部分,近天然段的底质特性与整治前之底质特性相似,渠化段则因砌石护岸与混凝土固床工的兴建,部分改变底质的分布状况,例如:在混凝土固床工设置处并无底质的存在;在固床工下游之跌水区,为防止水流对基础的淘刷,抛放大量的大块石,使该区域之底质有粗化的现象。此外,水质也是另一项重要的评估参数,一般在水质因子的评估上,必须考虑水中溶氧量、生化需氧量、浊度及 pH 值等因子。本研究根据华梵大学每年定期委托台湾大学严庆龄工业发展基金会合设工业研究中心之水质检验报告,显示本研究区域在溪流整治前与后的浊度与 pH 值并无明显的变化,对于溶氧量、生化需氧量等相关因子,由于缺乏相关检验数据,并无法做进一步分析。若以水中生物类型的可见度为指标,由水质简易目测评估法^[10]分析,本溪流在整治前与后的水质均维持在清淨的等级,并未改变。因此,本文未将水质列入评估的因子,仅以流速、水深及河床底质为评估因子,利用这些因子之适宜度曲线,来评估溪流整治前与后对鱼类栖地特性之影响。在前人所探讨溪流整治前后对鱼类栖地影响之相关研究^[11-12]中,亦多以较能反映溪流整治前后变化之流速、水深及河床底质,来做为鱼类栖地适宜度之评估因子。

适宜度曲线是一般用来描述鱼类或其它指标物种生存环境适宜度的关系曲线,其适宜度指数值范围介于 0 ~ 1 之间,0 代表完全不适合指标物种的栖地状况,1 代表达到理想及最适合指标物种的栖地状况,适宜度越高代表越适合指标物种生存^[13]。研究区域内之鱼种包括:台湾缨口鳅、台湾铲颌鱼、台湾马口鱼、明潭吻鰕虎与短吻红斑吻鰕虎等多种台湾淡水特有鱼种,不同的鱼种所适合之流速、水深及底质的特性并不相同,但仅以单一鱼种做为探讨对象,又过于极端或不具说服力,难以符合溪流生态环境保育之宏观目标。因此,以本溪流已存在之所有淡水特有鱼种为探讨目标,利用本研究区内之特有淡水鱼种流速、水深及底质之平均适宜度曲线,来反映本研究区内淡水特有鱼种于流速、水深及底质等之平均喜好程度。吴等^[8]曾建立台湾北区特有淡水鱼种之流速、水深及底质之平均适宜度曲线,由于研究之区域位置与调查之鱼种名录,与吴等^[8]所探讨之区域及鱼种名录相符。因此,本文以吴等^[8]所建立之台湾北区特有淡水鱼种之流速 V 、水深 D 及底质糙度 S 之平均适宜度曲线(如图 2)。

2.2 权重可用面积

当完成水理计算后,会得到在计算区域内,每一计算网格所产生之流速与水深的图层资料,若再配合现场调查所取得之河床底质分布图层,将可由图 2 之流速、水深及底质糙度适宜度曲线,得到每一计

算网格 i 之流速适宜度指数 $I_v(i)$ 、水深适宜度指数 $I_D(i)$ 及底质糙度适宜度指数 $I_S(i)$ ，并进而推算出

栖地适宜度指数 HSI 。一般 HSI 常以几何平均法做推估，即

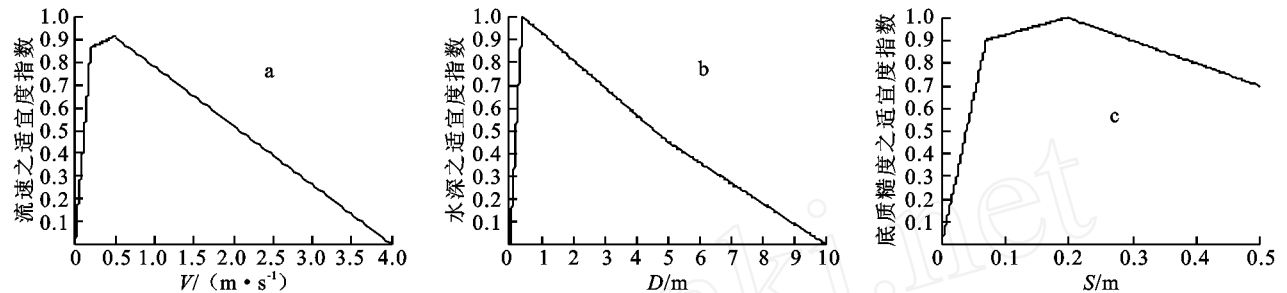


图 2 台湾北区特有淡水鱼种适宜度曲线^[8]

$$HSI(i) = [I_v(i) I_D(i) I_S(i)]^{1/3} \quad (1)$$

当每一网格 i 之 $HSI(i)$ 值计算完成后，由式 (2) 将可推求权重可用面积 (Weighted Usable Area) WUA ，即

$$WUA = \sum_{i=1}^m [HSI(i) A(i)] \quad (2)$$

式中： m ——水域内之总网格数； $A(i)$ ——每一计算网格 i 之面积。

3 分析与讨论

3.1 河川栖地形态

河川栖地形态依河川流况特性的不同或因应不同的分析需求，所分类的形态并不一致，采用的分类参数亦有所差异^[14-17]。如表 1 所列之 7 种栖地形态之分类方式，这些分类方式中，浅滩 (Riffle)、深潭 (Pool) 与深流 (Run) 为常见之河川栖地形态，在栖地形态的分类参数上，前人采用之参数包括：流速 V 、水深 D 、底质 S_b 、福祿数 F_r (Froude number) 或水面坡度 SI 等，其中以福祿数 F_r 的使用最为广泛。福祿数 F_r 定义为水流惯性力与重力之比值，是描述河川水

流特性或进行河川栖地形态分类常使用之无因次参数^[18]，其定义为

$$F_r = V / \sqrt{gD} \quad (3)$$

式中： g ——重力加速度。在水流特性上，当福祿数 $F_r = 1$ 时，称为临界流 (Critical flow) 流况；当 $F_r > 1$ 时为超临界流 (Supercritical flow)； $F_r < 1$ 时为亚临界流 (Subcritical flow)。本文参考 Jowett^[14] 之分类方法，将河川栖地形态分为下列 3 类型：(1) 水流流速快，在大部分水面上形成白色水花之浅滩形态；(2) 水流流速慢，水面平稳，未有明显波纹之深潭形态；(3) 介于深潭与浅滩 2 种栖地形态之间，通常在水面上产生明显波纹之深流形态。本文藉由现地资料的调查分析，并参考 Jowett^[14] 所探讨之几种不同栖地分类方法，显示当以福祿数 F_r 为分类指针时，能反映本研究区域内之深潭 (当 $F_r < 0.18$ 时)、浅滩 (当 $F_r > 0.41$ 时) 及深流 (当 $0.18 < F_r < 0.41$ 时) 等栖地形态。因此，本文将栖地形态分类为：当 $F_r < 0.18$ 时为深潭；当 $0.18 < F_r < 0.41$ 时为深流；及当 $F_r > 0.41$ 时为浅滩。

表 1 栖地形态之分类一览表

学者	分类参数	栖地形态									
		回水潭	深潭	浅流	缓流	深流	浅滩	急流	岸边缓流	洄	溢
Jowett ^[14]	F_r	-	<0.18	-	-	0.18~0.41	>0.41	-	-	-	-
Jowett ^[14]	V/D	-	<1.24	-	-	1.24~3.20	>3.20	-	-	-	-
Jowett ^[14]	F_r & SI	-	$F_r<0.18$	-	-	$F_r>0.18$ & $F_r>0.18$ & $SI<0.01$ $SI>0.01$		-	-	-	
Jowett ^[14]	V/D & SI	-	$V/D<1.24$	-	-	$V/D>1.24$ & $SI<0.01$ $SI>0.01$		-	-	-	
Wadeson 等 ^[15]	F_r	0.00005~0.004	0.00033~0.066	0.330~0.635	-	0.108~0.161	0.108~0.312	0.102~0.306	-	0.097~0.392	0.189~0.581
汪等 ^[16]	D/m	-	>0.3	<0.3	-	>0.3	<0.3	-	-	-	-
	$V/(m\cdot s^{-1})$	-	<0.3	>0.3	-	>0.3	>0.3	-	-	-	-
	S_b	-	小型底石	砂土、砾石、卵石	-	-	大型漂石与圆石	-	-	-	-
林等 ^[17]	F_r	-	<0.095	-	0.095~0.255	-	0.255~1	>1	-	-	-

注：表中符号 SI 为水面坡度； S_b 为底质； V 为流速； D 为水深； F_r 为福祿数；“-”表示未做表列该项之栖地形态分类。

3.2 栖地面积之变化

以 FLO - 2D 模式模拟本研究区域在各种不同流量下之水深与流速,并以福祿数 F_r 为分类指针,将栖地形态区分为深潭(当 $F_r < 0.18$ 时)、浅滩(当 $F_r > 0.41$ 时)及深流(当 $0.18 < F_r < 0.41$ 时)3 种类型,进而计算本溪流在整治前与整治后,不同流量下各栖地形态所占面积百分比 F (定义为:某形态栖地面积与总和各类型态栖地面积之比值乘以 100),如图 3。结果显示,本溪流在整治前与整治后,各种栖地形态所占面积百分比均呈现浅滩最大、深流居次及深潭最小之比例分布。浅滩、深流及深潭所占面积百分比并随流量的变化而改变,浅滩类型之面积百分比 F 会随流量的增加而增加,深流及深潭类型之 F 值则随流量的增加而减少。不同流量 Q 下,溪流整治后各栖地类型之栖地面积改变率 R (定义为:整治后与整治前面积之比值),如图 4。由于所有 R 值均小于 1,显示浅滩、深流及深潭在整治后之栖地面积均有减少,其中以深潭之 R 值最低,即深潭在整治后所减少的面积比例最高。

3.3 权重可用面积之变化

不同鱼种适合之栖地形态不同,整治后之溪流因栖地形态的变化,将影响鱼类可用栖地面积的改变,为能够了解鱼类可用栖地形态之面积变化,以下将进一步结合鱼类适宜度曲线,分析溪流整治前后各栖地类型之权重可用面积 WUA 的变化。

利用几何平均法式(1)计算 $HSI(i)$,再利用式(2)计算各类型栖地在不同流量 Q 下溪流整治前与后之 WUA 值。权重可用面积 WUA 值的高低反映鱼类可用栖地面积的大小,图 5 为各种栖地类型(深潭、深流或浅滩)之鱼类可用面积在溪流整治前后随流量的变化,浅滩之鱼类可用面积最大,深流居次,深潭最小。溪流整治前与后,深潭与深流之鱼类可用栖地面积均有随流量的增加而略为减少的趋势,属于浅滩形态之鱼类可用栖地面积则随流量的增加而增加(整治后)或呈现先增加后减少(整治前)的变化趋势。倘若定义各类型栖地之鱼类可用面积改变率 R_w 为溪流整治后之权重可用面积 $(WUA)_a$ 与整治前之权重可用面积 $(WUA)_b$ 之比值,即

$$R_w = \frac{(WUA)_a}{(WUA)_b} \tag{4}$$

当 $R_w = 1.0$ 时,表示溪流整治前与后之栖地面积并没有改变;当 $R_w < 1.0$ 时,表示溪流整治后之栖地面积较整治前减少;当 $R_w > 1.0$ 时,表示溪流整治后之栖地面积较整治前增加。图 5 为不同流量 Q 下,各栖地类型在溪流整治前后之鱼类权重可用面积比率 R_w 之变化,在流量 $10 \sim 15 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,深流栖地形态之 R_w 值接近于 1.0,即在此流量范围内,溪流整治前

后深流之栖地面积并未有明显改变,但其它流量下之 R_w 则是小于 1.0 ($0.55 < R_w < 0.75$),代表其栖地面积在整治后有减少的趋势,整体平均来说,深流栖地形态之 R_w 约 80%,平均减少了 20%的可用栖地面积。图 5 亦显示,深潭之 R_w 值介于 0.40~0.65,平均为 0.5,浅滩之 R_w 值介于 0.5~0.7,平均为 0.6,即溪流整治后深潭之可用栖地面积减少 50%,而浅滩之可用栖地面积减少 40%。此结果反应本溪流在局部渠化(Channelized)与固床工兴建下,会对深潭栖地形态产生较明显的影响。

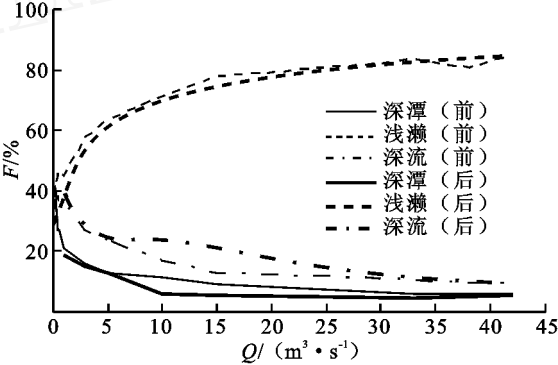


图 3 不同流量 Q 下,溪流整治前后各栖地类型之面积百分比 F 之变化

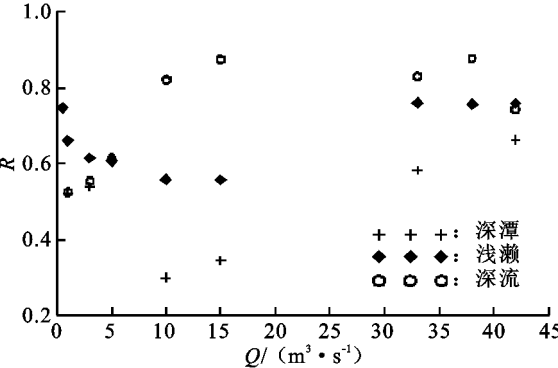


图 4 不同流量 Q 下,各栖地类型在溪流整治前后之栖地面积改变率 R 之变化

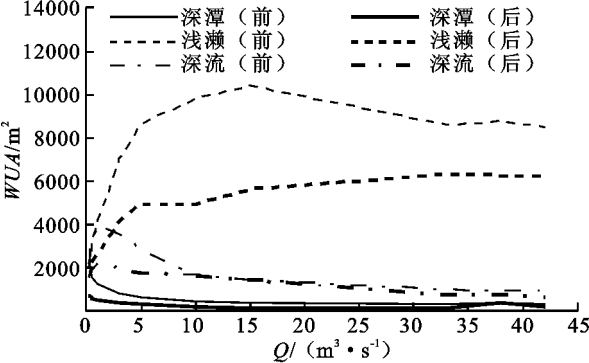


图 5 各种栖地类型之权重可用面积 WUA 在溪流整治前后随流量 Q 的变化

4 结论与建议

研究以玉桂岭南势坑野溪为案例,应用 FLO -

2D 水力模式并结合鱼类适宜度曲线,探讨坡地溪流在整治前与后之河川栖地形态与鱼类可用栖地面积之变化,所获结论如下:

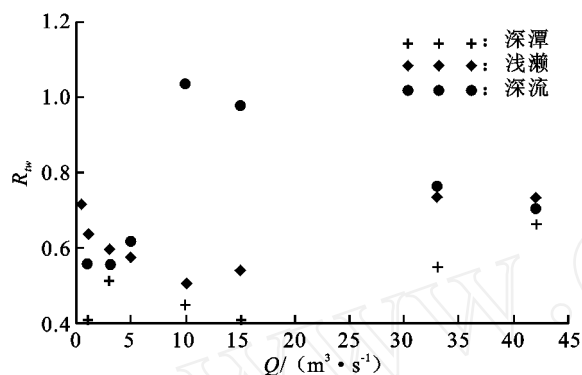


图 6 不同流量 Q 下,各栖地类型在溪流整治前后之鱼类可用面积改变率 R_m 之变化

(1) 以福祿数 F_r 为指标,能反映本研究区域内之深潭(当 $F_r < 0.18$ 时)、浅滩(当 $F_r > 0.41$ 时)及深流(当 $0.18 < F_r < 0.41$ 时)栖地形态。本溪流在整治前与整治后,各栖地形态之频率分布改变不大,均维持以浅滩为主、深流其次及深潭最低之比例分布,但在整治后之浅滩、深流及深潭之栖地面积均较整治前减少,其中以深潭在整治后所减少的面积比例最高。

(2) 分析不同流量下,各栖地类型在溪流整治前后之鱼类可用栖地面积之变化,显示整治后深流栖地形态之鱼类可用栖地面积较整治前平均减少 20%,深潭之可用栖地面积减少 50%,而浅滩之可用栖地面积减少 40%。此结果反映本溪流在局部渠化与固床工兴建下,会对深潭栖地形态产生较明显的影响。

(3) 本文主要针对研究区内所有可能出现鱼种,其在不同栖地类型下之可用栖地面积做整体性评估,此评估结果仍待更多的调查资料来加以验证;此外,由于不同鱼种所适合之栖地形态不同,未来有必要透过鱼种的调查分析,建立某指标鱼种与栖地形态之关系,以进一步了解既有工程兴建可能会对某指标鱼种造成的影响。

参考文献:

[1] 孙凯政. 利用 WUA 法评估流量对鱼类栖地之影响[D]. 台北:台湾大学环境工程所,2004.
[2] Mouton A, Schneider M, Depestele J, et al. Fish habitat modelling as a tool for river management[J]. Ecological Engineering, 2007, 29: 305-315.
[3] Jalon D G, Gortazar J. Evaluation of instream habitat enhancement options using fish habitat simulations: case studies in the river Pas (Spain)[J]. Aquatic Ecol-

ogy, 2007, 41: 461-474.

[4] Brunner G W. HEC - RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual, Hydrologic Engineering Center[R]. Davis, California, USA: Institute for Water Resources, US Army Corps of Engineers, 2001.
[5] Steffler P, Blackburn J. River Z D, Two-Dimensional Depth Averaged Model of River Hydrodynamics and Fish Habitat [M]// Introduction to Depth Averaged Modeling and User's Manual. Edmonton, Alberta, Canada: University of Alberta, 2002.
[6] 陈晋琪, 陈欣玫. 应用 FLO - 2D 模式评估山地溪流整治前后对鱼类栖地影响之研究[J]. 中华水土保持学报, 2009, 40(3): 出版中.
[7] 陈晋琪, 陈欣玫, 黄世彬. 玉桂岭南势坑野溪鱼类之初步调查分析[C]// 2008 设计与文化学术研讨会论文集(上册). 2008: 390-396.
[8] 吴瑞贤, 毛振泰, 余燕妮. 台湾河川淡水特有鱼种各区适合度曲线研订[J]. 中国土木水利工程学刊, 2007, 19(3): 431-424.
[9] 台湾农业委员会水土保持局, 水土保持技术规范[S]. 2005.
[10] 林镇洋, 陈彦璋, 吴明圣. 河溪生态工法[M]. 明文书局, 2004: 176.
[11] Gillenwater D, Granata T, Zika U. GIS-based modeling of spawning habitat suitability for walleye in the Sandusky River, Ohio, and implications for dam removal and river restoration[J]. Ecological Engineering, 2006, 28: 311-323.
[12] Tomsic C A, Granata T C, Murphy R P, et al. Using a coupled eco-hydrodynamic model to predict habitat for target species following dam removal[J]. Journal of Ecological Engineering, 2007, 30: 215-230.
[13] Edwards E A, Twomey K. Habitat suitability index models: smallmouth buffalo, FWS Report[R]. USA: Washington, 1982: 1-25.
[14] Jowett I G. A method for objectively identifying pool, run, and riffle habitats From physical measurements[J]. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 1993, 27: 241-248.
[15] Wadeson R A, Rowntree K M. Application of the hydraulic biotope concept to the classification of in-stream habitats[J]. Aquatic Ecosystem Health and Management, 1998, 1: 143-157.
[16] 汪静明, 邓文楷, 柯善勇, 等. 浊水溪流域上游栗栖溪河川生态研究及鱼类保育计划第一阶段研究[J]. 台电工程月刊, 1998, 603: 34-49.
[17] 林德贵, 赖原崇, 刘文宗. 河溪整治自然生态工法之设计与分析[C]// 土木科技新展望研讨会. 2004.
[18] Chow V T. Open-channel hydraulics [M]. New York: McGraw - Hill. , 1959.