

# 河流地貌单元研究综述

张晶, 于子铖, 董哲仁, 赵进勇, 彭文启

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:**在河流生态系统嵌套层级结构中,地貌单元作为水流和泥沙输移过程的物理表现,是表征河流形态的重要斑块。多样的河流地貌单元特征决定了栖息地的多样性特征,为生态过程提供了物理基础。为更好地理解地貌单元的结构与功能,通过辨析河流地貌单元内涵,对其分类体系与识别方法、地貌单元的生态响应进行了归纳梳理,并总结了河流地貌单元在栖息地调查评估、河流地貌单元制图及河流分类等方面的应用,从而为认识自然河流、修复受损河流提供技术支持和理论依据。

**关键词:**河流地貌单元;分类;识别;栖息地;生态响应

**中图分类号:**P931.1   **文献标志码:**A   **文章编号:**1674-3075(2021)05-0010-09

河流是一个复杂系统,不同空间尺度的生态系统之间形成嵌套层级结构。生物和非生物成分在不同的时空尺度上相互作用,不同尺度的生态系统对应不同层级的生物组合(Brierley & Fryirs, 2005)。我国河流生态系统复杂而脆弱,伴随近几十年经济高速发展以及河流开发利用和水电站大规模建设,对水生态系统造成胁迫,特别是传统的治河工程改变了河流地貌特征,具有较高空间异质性的地貌单元特征消失,水生生物栖息地退化,河流水生生物多样性降低。为遏制水生态系统退化趋势,近年来探求河流地貌单元异质性特征及其与生物多样性关系的研究日趋活跃。

在河流生态系统嵌套层级结构中,地貌单元作为水流和泥沙输移过程的物理表现,是表征河流形态的重要斑块,在这个尺度上对应生物体水平,其结构反映了生物个体尺寸、形状、组分和生物特征。多样的河流地貌单元特征决定了栖息地多样性特征,为生态过程提供了物理基础;其中,深潭-浅滩序列是研究最多的地貌单元,河道纵向一维对深潭-浅滩序列的识别和特征分析已有较多方法。此外,地貌单元的空间组合对于评估河道的复杂性和栖息地潜力同样重要,尚缺乏充分研究;另一方面,人们越来越认识到河流物理和生物成分之间的关系,河流中

较差的生境条件通常与地貌形态的单一性有关(Maddock, 1999)。董哲仁等(2010)建立了地貌景观空间异质性-生物群落多样性关联模型,描述河流地貌格局与生物多样性的相关关系。然而,由于生物与地貌之间存在复杂的非线性反馈关系,在对河流地貌形态和生物成分关系的认知上尚存在局限,难以预测河流生态系统对其地貌形态改变的响应。

本文以认识河流地貌单元结构与功能为出发点,对相关研究进展进行了梳理,辨析了河流地貌单元的内涵,总结了其分类、识别方法及其生态响应,介绍了河流地貌单元在栖息地调查评估、河流地貌单元制图及河流分类等方面的应用,以期为科学理解与掌握河流水文地貌特征及其变化提供理论基础,为河流生态修复提供相关支持。

## 1 河流地貌单元内涵辨析

河流地貌单元作为河流系统的组成部分,是河道内或河道外河漫滩侵蚀或沉积形成的地貌区域,如深潭、浅滩、边滩等。地貌单元伴随沉积物沉积或基岩侵蚀而产生,是水流和泥沙输移过程的物理表现(Wyrick et al, 2014)。不同的地貌单元其形态、沉积成分、边界表面和位置有所不同,在河道内和河漫滩的形式也有所区别。Hawkins 等(1993)认为河道地貌单元是深度和流量相对同质的区域,每个单元是由流量、泥沙负荷和河道水流阻力之间相互作用形成的。研究者使用多种术语描述河流地貌单元,如地貌单元(geomorphic units)(Brierley & Hickin, 1991; Brierley & Fryirs, 2005)、河道单元(channel units)(Grant et al, 1990; Hawkins et al,

收稿日期:2021-07-21  
基金项目:国家自然科学基金(51509271);中国水科院环基本科研项目(01882104)。  
作者简介:张晶,1981年生,女,教授,主要从事生态水工学研究。E-mail:zhangjing@iwahr.com  
通信作者:赵进勇。E-mail:zhaoyj@iwahr.com

1993)、生境单元(habitat units)(Bisson et al, 1982)、结构要素(architectural elements)(Miall, 1985)、形态单元(morphologic units)(Wyrick et al, 2014)、物理生态单元(physical biotope)(Padmore, 1997; Newson & Newson, 2000)等。地貌单元可以是沉积物,也可以包括木头、植被。通常,地貌学家更倾向于使用“地貌单元”、“形态单元”等术语,而生态学家则更偏爱“生态单元”术语。生态单元是生物群落能适应的最小尺度单元,不同的生态单元类型形成了生境异质性(Padmore, 1997)。在生态系统空间嵌套层级结构中,地貌单元是介于河段和微栖息地之间的一种空间尺度,尺寸在0.1~1000倍河宽,该尺度通常与中尺度生境(Mesohabitats)相关,适于评估自然栖息地的存在和多样性(Knight & Bain, 1996; Parasiewicz et al, 2013; Zavadil & Stewardson, 2013)。地貌单元构成河流动植物的独特栖息地,也可以提供捕食、产卵等临时栖息地。在这个尺度上,地貌单元将生物信息和河流水文形态联系在一起。由于河谷和河床坡度、流量、泥沙大小等边界条件的变化,从河流上游到下游呈现不同的地貌单元。地貌单元组合是整体边界条件(梯度、流量)和局部因素(比降的局部变化、支流、局部基岩出露)的函数。沿河段出现的典型地貌单元组合是决定河道总体格局(类型)的因素之一。

## 2 河流地貌单元分类与识别

### 2.1 分类

对地貌单元进行科学分类是进行河流健康评价、恢复河流生物栖息地、研究地貌过程与生态响应机制的依据(Fryirs & Brierley, 2012; Buffington & Montgomery, 2013; Phillips, 2017)。对河流地貌单元进行分类可以用来简化河流廊道中复杂的连续过程,在识别其过程-形式关系(process-form)的基础上,可以减少描述流域特征所需的时间与工作量(Smartt & Grainger, 1974; Stevens & Olsen, 2004);此外,还可以用来解释河流廊道中的时空变化及其响应机制,评估不同地貌单元是如何相互联系和相互影响的,从而加深对河流系统的整体理解(Buffington & Montgomery, 2013)。

山区河流与平原河流,两者河漫滩发育状况不一致,山区河流应更多地考虑河道内部的地貌单元。地貌单元最初是根据在河道上的空间位置进行分类的,分为河道内与河道外(河漫滩)地貌单元两大类(Brierley & Fryirs, 2005),其边界往往通过实地调

查得到的漫滩水位来确定(Leopold, 1964; 1994)。分类研究主要是基于地貌单元结构与功能两方面,其中结构更多是指地貌单元本身的特性。基于地貌单元的过程-形式关系, Fryirs & Brierley (2012)将其分为冲积与侵蚀的基岩和巨石单元、河道中部的沉积单元、滨岸的沉积单元、冲积与侵蚀的细颗粒单元四大类以及 Rapid、Cascade、Island 等 42 种,旨在解释河流的相关状态。常见典型地貌单元概述见表 1。基于河流地貌理论,相关学者设计了地貌单元划分和分析框架(Brierley & Fryirs, 2005; Wyrick et al, 2014; Wheaton et al, 2015), Brierley 等(2002)提供了一个总体指导性的开放式程序,基于问题来分析地貌单元,该方法允许从形式、形成过程和控制因素方面灵活解释地貌单元; Wyrick 等(2014)借助二维水动力模型,依据地貌特征阈值,建立地貌单元划定程序,将河道内区域划分为 Chute、Pool、Riffle 等 8 种地貌单元。Wheaton 等(2015)描述了基于特定特征如地形阈值、单元形状和特定形态属性(单元位置、沉积物和植被特征)绘制地貌单元的指导框架。

从栖息地的描述与评价角度出发, Bisson 等(1982)开发了西北太平洋河流中地貌单元的详细描述性分类,从而量化鲑不同类型的自然栖息地。Hawkins 等(1993)在 Bisson 分类的基础上,依据水力学原理,基于水流状态(如 Fast water、Slow water 等),建立小型河流栖息地单元三级分类系统。英国的河流栖息地调查(RHS)结合水流类型(Surface Flow Type),将栖息地分为 Waterfall、Boil 等 9 种单元。Beechie 等(2005)用深潭(Pool)、浅滩(Riffle)、Glide 河道内地貌单元与河岸带(Bank)、回水(Back-Waters)、沙坝(Bar)边缘地貌单元表征大型干流河流栖息地。将栖息地单元进一步分解的目的,是由于不少淡水物种有特殊的栖息地需求。某些物种必须寻找特定流速范围、水流漩涡、水温、庇护所、基质、pH 值等。在生命周期的不同阶段,物种有不同的生境条件要求。就鱼类而言,栖息地包括其完成全部生活史过程所必需的水域范围,如产卵场、索饵场、越冬场以及连接不同生活史阶段水域的洄游通道(董哲仁, 2019)。

不同的分类体系中,某些地貌单元术语代表的河流地貌特征不完全一致,例如, Glide 有时含义与 Run 一致,均表示急流,有时则区别于 Run,表示由基岩或粗碎屑(鹅卵石或砾石)组成的流速缓、深度较浅、水力坡降较小的区域。因此, Buffington &

Montgomery (2013)回顾了河流地貌分类的情况,强调了一套一致的地貌单元分类指南的重要性和迫切需要。目前,较为完善的地貌单元分类系统是欧盟 FP7 方案资助的“恢复河流以进行有效的集水区管理”项目(REFORM),基于自行设计的水文形态评估程序,建立的地貌单元调查分类系统(Geomorphic Units survey and classification System, GUS);该系统在地貌单元尺度上,对给定范围内存在的地貌单元集合进行分类、特征描述、分析和监测。GUS地貌单元调查分类系统采用自上而下的方法来识别、表征和分析给定河段内地貌单元的组合,旨在为地貌单元的调查和分类提供一个总体框架,是一个开放、灵活的框架,可以根据调查目标和

可用资源设置调查地貌特征的详细程度和调查的重点,可更好地了解河流形态,并支持对河流状态与演变分析,建立水文形态和生物群落之间的联系。根据空间位置,GUS中划分了平滩河道与河漫滩两种单元;其中,平滩河道单元指位于平滩河道内的所有地貌单元,包括壶穴(Pothole)、Cascade等8种“淹没单元”,近岸沙坝(Bank-attached bar)、干涸河道(Dry channel)等9种“沉积单元”,水生植被(Aquatic vegetation)、Large wood jam等5种植被覆盖地貌单元;河漫滩单元指占据河漫滩的所有单元,包括自然堤(Levee)、Scarp等9种人工主导地貌单元,漫滩湖泊(Floodplain lake)、湿地(Wetland)2种有水地貌单元(Belletti et al,2015;2017)。

表 1 常见典型地貌单元概述

Tab.1 Overview of common typical geomorphic units

| 单元类型        | 概述                                                                                                               | 来源                                                                      |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 深潭(Pool)    | 深潭是纵剖面上交替分布的河道深部区域,通常位于弯曲冲积河道的凹岸,在低流量阶段有平静或稳定的水流。                                                                | Carling et al,2000; Fryirs & Brierley,2012; Belletti et al,2015         |
| 浅滩(Riffle)  | 浅滩纵剖面上的地形高点,通常在弯曲冲积河道的拐点之间。水面坡度局部变陡,在低水位时有波纹状的水面,是河床底部暂时性的泥沙、卵砾石的堆积区。                                            | Fryirs & Brierley, 2012; Wyrick & Pasternack, 2012; Belletti et al,2015 |
| Rapid       | 非常稳定、陡峭的序列,由不规则巨砾排列而成。基岩河道中的急滩与浅滩比较相似,较难区分。在低流量阶段,个别颗粒会露出水面。                                                     | Fryirs & Brierley,2012                                                  |
| Chute       | 流速快、水面坡度陡、水较深,通常位于浅滩下游的收敛收缩处。                                                                                    | Wyrick & Pasternack, 2012; Spurgeon et al,2018                          |
| Glide       | 由基岩或粗碎屑(鹅卵石或砾石)组成的,均匀且相对无特征的岩层。平滑流动区要么是自由流动的,要么是连接深潭的浅水道状特征。                                                     | Fryirs & Brierley, 2012; Wyrick & Pasternack, 2012                      |
| 壶穴(Pothole) | 基岩中存在深的圆形冲刷特征。                                                                                                   | Fryirs & Brierley,2012                                                  |
| Cascade     | 在陡峭、基岩封闭的环境中观察到的非常稳定的、粗粒的(或基岩)特征。水流在大石块上层层叠叠,形成一系列高约一个碎石直径的短台阶,并由范围小于一个渠道宽度的水流区域分隔。                              | Hawkins et al,1993; Fryirs & Brierley,2012; Belletti et al,2015;2017    |
| Island      | 在河道中水位以上出露且与两岸不相连的淤积地,一般为细长型,有植被生长。                                                                              | Belletti et al,2015                                                     |
| Point bar   | 依附于河岸的弧形坝沿弯道凸岸发育。坝的形状遵循弯曲的对齐方式,具有不同的曲率半径。坝面通常倾向于河道,沉积构造也是如此。                                                     | Fryirs & Brierley, 2012; Wheaton et al,2015                             |
| 阶梯跌水(Step)  | 一个相对较短的单元,出现在典型的冲积、半冲积和基岩陡坡河道中。跌水的特点是河床中几乎垂直的落差横跨整个河宽,并且高于跌水顶部上游的满岸水流深度。由于下游水流溢流,跌水具有加速和收敛的水流条件,因此湍流波动有限,水面相当平滑。 | Wilcox et al,2011; Comiti & Mao, 2012; Belletti et al,2015              |

2.2 识别

不同的地貌单元,其空间分布、几何形状与边界、形态特征、沉积物组成及其植被覆盖不同,其过程-形式组合不同,这为观测并识别地貌单元提供了基本路径(Fryirs & Brierley,2012)。如浅滩(Riffle),其形式是沿起伏的河段尺度纵向剖面的地形高程,一般出现在曲折冲积河道弯曲或拐点之间的特征位置,底质多为卵砾石和沙;其过程是暂时性的沉积物堆积区,在高流量(平滩流量及以上)时,较粗的沉积物部分集中在一起,产生了初始的浅滩,而较低的流量(平滩流量以下)一旦达到某种临界高度,

就有足够的能力扩大和维持初始起伏状况。在随后的高流量中,由于这些特征的阻力,导致表面流速下降,从而发生沉积,在高流速阶段,水面是平滑的(Brierley & Fryirs, 2005; Fryirs & Brierley, 2012)。将野外观测、测量和高分辨率遥感数据与每种类型地貌单元的过程-形式关联的理论知识联系起来,再结合沉积物的组成分析,可对河流地貌单元进行识别(Brierley & Fryir, 2005; Belletti et al, 2015)。

另一方面,河床和河岸的形态影响河流水动力,因此可以通过水力学特征识别潜在地貌单元。已有



很多方法基于水深和流速的组合对地貌单元进行分类(Hawkins et al, 1993; Borsanyi et al, 2004; Zimmer & Power, 2006; Klaar et al, 2009)。这些研究大多集中在地表流动模式、地表水力坡降或局部点深度和速度的视觉观察上, 从而主观地划分单元边界, 且这种主观确定方法与研究者的观测位置、主观决策有关, 难以定量区分水深流速, 不同的观测者观察同样的水深流速可能产生不同结论。前期的一些研究人员通过使用数字高程模型进行地貌单元的水力学特征确定, 使用 LiDAR 和回声测深仪收集的高分辨率地形和水深数据为识别地貌单元提供了更可靠的数据。Milne & Sear (1997) 根据对几条高地河流的横断面调查, 使用 ArcGIS 对河流 DEM 进行了分解, 然后通过河床表面的高程变化来区分深潭和浅滩, 即使用深度作为唯一的地貌单元分类指标。O'Neill & Abrahams (1984) 使用地形坡度的变化作为指标, 根据航道水深的纵向剖面客观地确定浅滩顶部和深潭底部, 但这种方法只考虑了纵向一维方向, 不能区分深度相同但河床坡度和河床粗糙度显著不同的两种地貌。Moir & Pasternack (2008) 通过实地考察以及 1 m 分辨率的地形图, 识别了卵砾石河道的 10 种形态单元类型, 利用二维水动力学模型分析各单元的水动力特征, 发现大多数情况下可用弗洛德数(Fr)来区分形态单元, 但最有效的水力分类方法是综合深度-速度分布法, 并且分析了鲑产卵偏好利用的形态单元。Hauer 等(2009) 将激光雷达和地面勘测数据相结合, 创建了砾石河床的数字高程模型, 并使用二维水动力学模型模拟, 根据速度、深度和剪切应力的统计值, 识别了 6 种类型的中尺度生境区域。

### 3 河流地貌单元的生态响应

地貌在控制许多生态系统过程中起基础性作用。在河流连续体概念的背景下, 生态学家倾向于采用“自下而上”的方法进行研究, 从微生境尺度到深潭-浅滩单元的中尺度和整个流域, 地貌学家往往在河段、河流、河谷、山坡等更大的尺度上工作(Padmore, 1997)。无论是“自下而上”还是“自上而下”, 地貌变化都被认为是确定河流生物和其生境特征的重要驱动因素(Walters et al, 2003; Bizzi & Lerner, 2012)。国内外相关学者对地貌单元的生态响应进行了大量研究, 经过梳理, 发现主要集中在地貌单元异质性与生物多样性、地貌单元功能与生物生存等方面。

地貌单元在河段尺度的嵌套分布为水生生物群提供不同的功能, 包括庇护所和避难所、食物来源以及交配和产卵的地点(Harper et al, 1992)。地貌单元多样性增加会增加栖息地的多样性, 从而增加大型无脊椎动物、鱼类和大型植物的丰富度。单个地貌单元的组合构成了一定规模的生境, 这也是大多数生态监测工作的规模。因此, 对地貌单元变化与生态响应之间的联系必须通过考虑地貌单元组合来实现(Williams et al, 2020)。

Hankin & Reeves (1988) 基于目视估计法, 探讨了分层抽样调查对地貌单元类型、面积与鱼类丰度的关系; Thomson 等(2001) 通过现场调查, 对鲑个体进行标记, 利用相关分析和回归分析等方法, 说明了其生存与地貌单元的复杂程度相关性最弱, 但与 500 m 河段内木质残体的数量和地貌单元的密度以及距河口的距离密切相关; Moir 等(2004) 研究表明, 在 2 条苏格兰河流中, 河道类型、地貌单元组合可以用来预测大西洋鲑的产卵活动; Spurgeon 等(2018) 在 5 个空间尺度上计算了当地鱼类的  $\alpha$  和  $\beta$  多样性, 发现  $\beta$  多样性在除中生境尺度之外的其他空间尺度上都大于预期, 表明可能存在生境破碎化和物种相互作用的影响, 中生境尺度偏小, 猜测主坝蓄水、Chute 和 Waterfall 等地貌单元阻碍鱼类的移动; Koutrakis 等(2019) 对 Glide、浅滩(Riffle)、深潭(Pool)、回水(Backwater)的生态意义进行了归纳, Glide 适合喜动态运动的物种, 浅滩(Riffle) 适合动态与需要较多氧气的物种, 深潭(Pool) 适合幼体或作为高流量下大多数物种的避难所, 回水区适合处于早期生命阶段的物种; Wegscheider 等(2020) 基于现场踏勘和水动力模型, 结合 Kruskal-Wallis 检验, 认为深潭(Pool)、Run 和缓流(Slack water) 三者的鱼类丰富度存在显著差异; DeMendonca 等(2021) 经过野外调查, 对地貌单元多样性与生物多样性的关系进行量化研究。用地貌单元密度与地貌单元丰度代表地貌单元多样性, 用 Evenness diversity 指数、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Margalef 指数表征生物多样性。研究表明, 生物和地貌多样性之间最强的正向关系是底栖大型无脊椎动物组, Cascade 的数量与 Shannon-Wiener 和 Simpson 指数正相关; 对于鱼类而言, 地貌单元密度指数与 Margalef 指数存在较强相关性, 阶梯跌水(Step) 数量与 Shannon-Wiener 和 Simpson 指数有显著关系; 两栖动物的地貌多样性和生物多样性之间的响应关系不明显。

## 4 河流地貌单元的应用

### 4.1 栖息地调查与评估

河流地貌形态异质性已成为河流健康评价的重要指标和生态修复的主要对象之一,河流水文地貌形态指标被纳入欧盟水框架指令(WFD),河流物理形态和过程已日益突出,成为河流系统分析和管理的的重要组成部分。河流地貌形态评估是物理栖息地评估的关键(Maddock,1999)。河流地貌的异质性可以通过地貌单元的组成和配置来描述,对地貌单元组合及其动态进行评估,从而为河流提供生境信息。因此,需要在适当的空间范围和对河流地貌理解的基础上,系统地收集和解释有关地貌单元和物理生境的信息。为定量描述河流地貌异质性,Belletti等(2015)在GUS体系中提出了地貌单元密度指数(GUSI-R)、地貌单元丰富度指数(GUSI-D);为定量描述河流地貌单元的组成与空间分布,Wyrick等(2014)在整体上分析研究河段地貌单元的类型与丰度,并且分析了不同地貌单元的纵向分布、纵向间距、彼此相邻概率等。

现有的物理栖息地评估方法中,部分方法设置了地貌单元指标。有学者首先将IFIM(Instream Flow Incremental Methodology)内流量增量法应用到栖息地评估中,并在后续研究中对此方法进行了完善,利用IFIM原理开发的PHABSIM模型应用较广(Bovee 1982;Bovee et al,1998);王晓刚和严忠民(2008)利用IFIM方法,探究了交汇河口汇流比、汇流口下游弗劳德数及汇流口下游宽深比3个主要水力控制因素对鲤科鱼类及平鳍鳅科鱼类栖息地的影响,并计算了加权可用面积(WUA);Brierley等(1999)利用河流形态框架方法(River Style Framework)在流域、景观单元、河段和地貌单元等尺度上对河流栖息地的评估和预测进行了研究;还有学者基于水流类型(例如跌水、破碎驻波等)的识别和分类,指示微生境尺度下的物理栖息地状况(Padmore,1997;Newson & Newson,2000)。

然而,大多数栖息地调查和评估中仅采用浅滩和深潭描述河床结构。现有方法倾向于认为地貌形态多样性越高,则地貌状态越优;实际上,对于特定的河流类型,其自然状态下的地貌结构可能非常简单(Fryirs,2003;Barquasn et al,2011);另外,现有的栖息地评估方法大多通过实地调查来描述河流地貌特征,应用于复杂地貌的大型河流时,则无法准确识别其地貌特征的变异性和复杂性。

### 4.2 河流地貌单元制图

河流地貌单元图将空间上连续的信息(例如地形)简化为河流景观关键特征的离散或连续解释,可解释和量化河流地貌过程关系,评估河流变化及调整潜力,描述地貌单元对流量变化的反应,并评估河流的演化轨迹(Beechie et al,2010;Wheaton et al,2015)。利用河流地貌单元图或中生境图,可确定调查取样的地貌单元或中生境的数量和类型,使得收集到的数据具有真正的代表性,也可指导野外作人员找到这些地貌单元或中生境的位置。在绘制地貌单元图时,一些地貌单元类型可以合并或简化,如fast glide与slow glide可合并为glide;而当这些地貌单元不足以识别河流变化时,地貌单元则需要进一步细分,例如:将深潭(Pool)细分为plunge pools、lateral pool和scour pools。对于较长的河流,为了减少地貌单元制图的工作量,微生境尺度的信息可忽略。由于地貌单元图包括了物理元素的信息,因而比主观评估方法更精确,更加适用于整体河段尺度。Padmore(1997)以河道宽度为标准,选择了11条河、河长为10倍河宽的河段,将河长进行标准化,绘制了一维生态单元图,来确定河道在空间和时间上的特征性生态单元序列,获得各单元的临界流量需求,分析生态单元多样性随流量的变化。根据地貌单元制图数据,可模拟生境有效性和流量之间的关系,这是栖息地模型的步骤之一。Hill等(2008)通过对河道地貌单元进行分类,利用目视法和物理参数测量法对每个地貌单元进行绘制,利用MapInfo、GPS制作地貌单元图,分析流量调节对河流物理形态和水力特性的影响,评估流量变化对鳟产卵栖息地有效性的影响。

目前,地貌单元制图已向着精细化发展。随着新型测量工具的不断开发和遥感技术精度的提升,获得河道地形的高分辨率空间数据集,结合二维水动力学模型,从而精确表征地貌过程和生态功能,克服传统的断面采样方法存在代表性不强等问题。采用高分辨率空间数据绘制的地貌单元分布要比以往用主观技术绘制的详细得多(Milan et al,2010)。Moir & Pasternack(2008)根据对水力学和基质的专家判断,通过实地考察,利用1 m分辨率的地形图,采用ArcGIS绘制了地貌单元图;Hauer等(2009)将激光雷达和地面勘测数据相结合,创建了砾石河床的数字高程模型,并使用二维水动力学模型模拟,根据速度、深度和剪切应力的统计值,在一定的流量范围内绘制了6种类型的中尺度生境单

元; Wyrick 等(2014)采用 2D 水动力模型, 利用水深、流速、地形等指标, 快速、完整地描绘地貌单元图, 减少了制图时的主观误差, 试图揭示河流形态的自然复杂性, 并且分析了鲑产卵栖息地适宜性。但这种方法目前还未能将空间范围向外扩展到河谷。因此, 沙洲、洼地和洪泛区的其他地貌类型尚未包括在内。Wheaton 等(2015)提出了三级河流地貌制图框架, 一级制图使用航空图像、谷歌地球和 ArcGIS 中的 10 m 数字高程模型, 首先绘制谷底和谷底边缘, 然后绘制河道边缘; 二级和三级制图则利用全站仪获得的 10 cm 数字高程模型进行手动绘制, 河谷的其余部分利用机载激光雷达测量。

### 4.3 河流分类

河流地貌具有形式-过程效应, 即河流形式可反映相应的河流水文地貌等过程, 而相关过程也会影响河流形式。因此, 通过对河流进行分类, 可以评估自然和人为干扰对河流地貌的影响, 确定当前的河流地貌状况, 预测河流地貌条件对干扰的可能反应。Buffington & Montgomery(2013)回顾了已开发的不同类型的河流分类方法, 将其分为 8 种类型, 分别是河流分级方法、过程区域方法、河道模式法、河道-河漫滩相互作用法、底质材料、河道单元法、层级分类、统计分类等, 这 8 种类型相互间存在重复和交叉, 很多方法仅在部分区域使用; 其中, 河道单元法即为基于地貌单元类型的河流分类法, 此处不再赘述。层级分类法, 如最广泛使用的 Rosgen 河道分类, 针对物理和生物过程的整体性、流域性研究, 未经过地貌学专业训练的人员也可使用; 另一种广泛使用的层级分类法是在综合野外观测和地貌文献的基础上开发的山区分级河道分类(Montgomery & Buffington, 1997; 1998), 该方法识嵌套了地貌单元分类, 基于视觉可识别 8 种河段形态。河流类型框架法(River styles framework)也是层级分类法的一种, 使用演替模型来评估河道状况并实施河流恢复行动, 描述了从流域到地貌单元尺度的物理过程(Brierley & Fryirs, 2000; Fryirs & Brierley, 2000; Brierley et al, 2002; Fryirs, 2003)。

### 4.4 河流生态修复

在河流生态修复工程中, 可以设置河道内栖息地改善结构, 来提高河栖息地的有效性和复杂性。河道内栖息地改善结构主要指利用木材、块石、适宜植物以及其他生态工程材料在河道内局部区域构筑特殊结构(董哲仁, 2019), 这类结构可通过调节水流及其与河床或岸坡岩土体的相互作用而在河道内形

成多样性地貌和水流条件, 创造避难所、遮蔽物、通道等物理条件, 从而增强鱼类和其他水生生物栖息地功能, 促使生物群落多样性的提高。常见的河道内栖息地改善结构可分为砾石群、树墩构筑物、挑流丁坝和堰坝几类。例如, 英国 Inchewan Burn 河受损的下游河段, 为了复制上游河床地貌结构, 利用卵石构造跌水-深潭结构, 其设计要点是控制河段内跌水-深潭数量以及跌水间距离, 仿照上游地貌和级配来铺设卵石, 从而修复大西洋鲑的产卵栖息地。

## 5 结语

本文以认识河流地貌单元结构与功能为出发点, 以“什么是地貌单元? 不同地貌单元的结构与功能有何异同? 研究地貌单元有何意义?”为问题导向, 从河流地貌单元的内涵、地貌单元分类识别、地貌单元的生态响应及其应用 4 个方面进行了梳理。河流地貌单元是河流系统的组成部分, 也是河道内或河道外侵蚀或沉积形成的地貌区域。多样的河流地貌单元特征决定了栖息地多样性特征, 为生态过程提供了物理基础。地貌单元的空间组合影响河道的复杂性和栖息地潜力, 典型地貌单元组合是决定河道总体格局的因素之一。利用河流地貌单元进行栖息地调查和评估、地貌制图和河流分类, 有助于指导河流生态修复方案的制定, 解决栖息地退化问题。总体来说, 河流二维平面上的物理栖息地特征定量表征和分析方法仍不完善, 在揭示物理和生物过程的应用上受到限制。因此, 亟待开展河流地貌单元特征及其生物响应的量化研究, 为河流生态修复提供有效的技术支撑。

### 参考文献

- 董哲仁, 孙东亚, 赵进勇, 等, 2010. 河流生态系统结构功能整体性概念模型[J]. 水科学进展, 21(4): 550-555.
- 董哲仁, 2019. 生态水利工程学[M]. 北京: 中国水利水电出版社.
- 王晓刚, 严忠民, 2008. 河道汇流水力特性对鱼类栖息地的影响[J]. 天津大学学报, 41(2): 204-208.
- Barquin J, Fernandez D, Alvarez-Cabria M, et al, 2011. Riparian quality and habitat heterogeneity assessment in Cantabrian rivers[J]. Limnetica, 30(2): 329-346.
- Beechie T J, Liermann M, Beamer E M, et al, 2005. A classification of habitat types in a large river and their use by juvenile salmonids[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 134(3): 717-729.
- Beechie T J, Sear D A, Olden J D, et al, 2010. Process-



- based principles for restoring river ecosystems[J]. *Bio-Science*, 60(3): 209–222.
- Belletti B, Rinaldi M, Comiti F, et al, 2015. The Geomorphic Units survey and classification System (GUS) [C]//Proceedings IS Rivers, 2nd International Conference.
- Belletti B, Rinaldi M, Bussettini M, et al, 2017. Characterising physical habitats and fluvial hydromorphology: A new system for the survey and classification of river geomorphic units[J]. *Geomorphology*, 283: 143–157.
- Bisson P A, Nielsen J L, Palmason R A, et al, 1982. A system of naming habitat types in small streams, with examples of habitat utilization by salmonids during low stream flow[C]//Armantrout N B, Acquisition and utilization of aquatic habitat inventory information. Proceedings of a symposium, Portland Oregon, American Fisheries Society.
- Bizzi S, Lerner D N, 2012. Characterizing physical habitats in rivers using map-derived drivers of fluvial geomorphic processes[J]. *Geomorphology*, 169: 64–73.
- Borsanyi P, Alfredsen K, Harby A, et al, 2004. A meso-scale habitat classification method for production modeling of Atlantic salmon in Norway[J]. *Hydroecologie Appliquee*, 14: 119–138.
- Bovee K D, 1982. A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology[M]. Western Energy and Land Use Team, Office of Biological Services, Fish and Wildlife Service, U. S. Department of the Interior.
- Bovee K D, Lamb B L, Bartholow J M, et al, 1998. Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology[R]. U. S. Geological Survey, Biological Resources Division Information and Technology Report.
- Brierley G J, Hickin E J, 1991. Channel planform as a non-controlling factor in fluvial sedimentology: the case of the Squamish River floodplain, British Columbia[J]. *Sedimentary Geology*, 75(1/2): 67–83.
- Brierley G J, Cohen T, Fryirs K, et al, 1999. Post-European changes to the fluvial geomorphology of Bega catchment, Australia: implications for river ecology [J]. *Freshwater Biology*, 41(4): 839–848.
- Brierley G J, Fryirs K, 2000. River styles, a geomorphic approach to catchment characterization: Implications for river rehabilitation in Bega catchment, New South Wales, Australia[J]. *Environmental Management*, 25(6): 661–679.
- Brierley G, Fryirs K, Outhet D, et al, 2002. Application of the River Styles framework as a basis for river management in New South Wales, Australia[J]. *Applied Geography*, 22(1): 91–122.
- Brierley G J, Fryirs K A, 2005. *Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework*[M]. UK: Blackwell Publishing.
- Buffington J M, Montgomery D R, 2013. Geomorphic classification of rivers[C]//In: Shroder J, Wohl E, ed. *Treatise on Geomorphology, Fluvial Geomorphology*, Vol 9. San Diego, CA: Academic Press: 730–767.
- Carling P A, Golz E, Orr H G, et al, 2000. The morphodynamics of fluvial sand dunes in the River Rhine, near Mainz, Germany. I. Sedimentology and morphology[J]. *Sedimentology*, 47(1): 227–252.
- Comiti F, Mao L, 2012. Recent advances in the dynamics of steep channels [M/OL]. Michael Church, Pascale M. Biron, André G. Roy. <https://doi.org/10.1002/9781119952497.ch26>
- DeMendonca B C C, Mao L, Belletti B, 2021. Spatial scale determines how the morphological diversity relates with river biological diversity. Evidence from a mountain river in the central Chilean Andes [J]. *Geomorphology*, 372: 107447.
- Fryirs K A, Brierley G J, 2012. Geomorphic analysis of river systems: an approach to reading the landscape [M/OL]. UK: Blackwell Publishing, John Wiley & Sons.
- Fryirs K, 2003. Guiding principles for assessing geomorphic river condition: application of a framework in the Bega catchment, South Coast, New South Wales, Australia [J]. *Catena*, 53(1): 17–52.
- Fryirs K, Brierley G, 2000. A geomorphic approach to the identification of river recovery potential[J]. *Physical Geography*, 21(3): 244–277.
- Grant G E, Swanson F J, Wolman M G, 1990. Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams, Western Cascades, Oregon[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 102(3): 340–352.
- Hankin D G, Reeves G H, 1988. Estimating total fish abundance and total habitat area in small streams based on visual estimation methods[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 45(5): 834–844.
- Harper D M, Smith C D, Barham P J, 1992. Habitats as the building blocks for river conservation assessment [J]. *River Conservation and Management*, 62(2): 311–319.
- Hauer C, Mandlbürger G, Habersack H, 2009. Hydraulically related hydro-morphological units: description based on a new conceptual mesohabitat evaluation model (MEM) using LiDAR data as geometric input[J]. *River Research and Applications*, 25(1): 29–47.

- Hawkins C P, Kershner J L, Bisson P A, et al, 1993. A hierarchical approach to classifying stream habitat features[J]. *Fisheries*, 18(6): 3–12.
- Hill G, Maddock I, Bickerton M, 2008. River habitat mapping: are surface flow type habitats biologically distinct? [J/OL]. *Gb Physical Geography*. <https://www.researchgate.net/publication/265985657>
- Klaar M J, Maddock I, Milner A M, 2009. The development of hydraulic and geomorphic complexity in recently formed streams in Glacier Bay National Park, Alaska[J]. *River Research and Applications*, 25(10): 1331–1338.
- Knight J G, Bain M B, 1996. Sampling fish assemblages in forested floodplain wetlands[J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 5(2): 76–85.
- Koutrakis E T, Triantafillidis S, Sapounidis A S, et al, 2019. Evaluation of ecological flows in highly regulated rivers using the mesohabitat approach: A case study on the Nestos River, N. Greece[J]. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 19(4): 598–609.
- Leopold A C, 1964. Plant growth and development[M]. *Plant growth and development*.
- Leopold L B, 1994. A View of the River[M]. Harvard University Press.
- Maddock I, 1999. The importance of physical habitat assessment for evaluating river health[J]. *Freshwater Biology*, 41(2): 373–391.
- Miall A D, 1985. Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits[J]. *Earth-Science Reviews*, 22(4): 261–308.
- Milan D J, Heritage G L, Large A R G, et al, 2010. Mapping hydraulic biotopes using terrestrial laser scan data of water surface properties[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(8): 918–931.
- Milne J A, Sear D A, 1997. Modelling river channel topography using GIS[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 11(5): 499–519.
- Moir H J, Gibbins C N, Soulsby C, et al, 2004. Linking channel geomorphic characteristics to spatial patterns of spawning activity and discharge use by Atlantic salmon (*Salmo salar* L.)[J]. *Geomorphology*, 60(1/2): 21–35.
- Moir H J, Pasternack G B, 2008. Relationships between mesoscale morphological units, stream hydraulics and Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) spawning habitat on the Lower Yuba River, California[J]. *Geomorphology*, 100(3/4): 527–548.
- Montgomery D R, Buffington J M, 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 109(5): 596–611.
- Montgomery D R, Buffington J M, 1998. Channel processes, classification, and response[J]. *River Ecology and Management*, 112: 1250–1263.
- Newson M D, Newson C L, 2000. Geomorphology, ecology and river channel habitat: mesoscale approaches to basin-scale challenges[J]. *Progress in Physical Geography*, 24(2): 195–217.
- O'Neill M P, Abrahams A D, 1984. Objective identification of pools and riffles[J]. *Water Resources Research*, 20(7): 921–926.
- Padmore C L, 1997. Physical biotopes in representative river channels: identification, hydraulic characterisation and application[D]. UK: Newcastle University.
- Parasiewicz P, Rogers J N, Vezza P, et al, 2013. Applications of the MesoHABSIM simulation model[M]. *Ecohydraulics: an integrated approach*: 109–124.
- Phillips J D, 2017. Geomorphic and hydraulic unit richness and complexity in a coastal plain river[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(15): 2623–2639.
- Smartt P F M, Grainger J E A, 1974. Sampling for vegetation survey: Some aspects of the behaviour of unrestricted, restricted, and stratified techniques[J]. *Journal of Biogeography*, 1: 193–206.
- Spurgeon J J, Pegg M A, Parasiewicz P, et al, 2018. Diversity of river fishes influenced by habitat heterogeneity across hydrogeomorphic divisions[J]. *River Research and Applications*, 34(7): 797–806.
- Stevens Jr D L, Olsen A R, 2004. Spatially balanced sampling of natural resources[J]. *Journal of the American statistical Association*, 99: 262–278.
- Thomson J R, Taylor M P, Fryirs K A, et al, 2001. A geomorphological framework for river characterization and habitat assessment[J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 11(5): 373–389.
- Walters D M, Leigh D S, Freeman M C, et al, 2003. Geomorphology and fish assemblages in a Piedmont river basin, USA[J]. *Freshwater Biology*, 48(11): 1950–1970.
- Wegscheider B, Linnansaari T, Monk W A, et al, 2020. Linking fish assemblages to hydro-morphological units in a large regulated river[J]. *Ecohydrology*, 13(7): e2233.
- Wheaton J M, Fryirs K A, Brierley G, et al, 2015. Geomorphic mapping and taxonomy of fluvial landforms[J]. *Geomorphology*, 248: 273–295.
- Wilcox A C, Wohl E E, Comiti F, et al, 2011. Hydraulics,



morphology, and energy dissipation in an alpine step-pool channel[J]. *Water Resources Research*, <https://doi.org/10.1029/2010WR010192>

Williams R D, Bangen S, Gillies E, et al, 2020. Let the river erode! Enabling lateral migration increases geomorphic unit diversity[J]. *Science of The Total Environment*, 715:136817.

Wyrick J R, Pasternack G B, 2012. Landforms of the lower Yuba River[M]. University of California, Davis.

Wyrick J R, Senter A E, Pasternack G B, 2014. Revealing the natural complexity of fluvial morphology through 2D hydrodynamic delineation of river landforms[J]. *Geomorphology*, 210: 14 – 22.

Zavadil E, Stewardson M, 2013. The role of geomorphology and hydrology in determining spatial-scale units for ecohydraulics[M/OL]. *Ecohydraulics*. <https://doi.org/10.1002/9781118526576>.

Zimmer M P, Power M, 2006. Brown trout spawning habitat selection preferences and redd characteristics in the Credit River, Ontario[J]. *Journal of Fish Biology*, 68 (5): 1333 – 1346.

(责任编辑 万月华)

Review of Research on River Geomorphological Units

ZHANG Jing, YU Zi-cheng, DONG Zhe-ren, ZHAO Jin-yong, PENG Wen-qi

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, P.R.China)

**Abstract:** In the nested hierarchy of river ecosystems, geomorphological units, as physical manifestations of water and sediment transport processes, are important patches that characterize river morphology. The diversity of river geomorphological units determines the diversity of habitat features and provides the physical basis for ecological processes. In order to better understand the structure and function of geomorphic units, in this paper we defined the typical river geomorphological units, reviewed their classification systems, identification methods and the ecological responses, and summarized the application of river geomorphological units in habitat survey and assessment, river geomorphological unit mapping and river classification. Our study will provide technical support to understand natural rivers and restore damaged rivers.

**Key words:** river geomorphological units; classification; identification; habitat; ecological response