

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.06.013

# 蜿蜒型河流地貌异质性及生态学意义研究进展

王宏涛,董哲仁,赵进勇,张晶

(中国水利水电科学研究院,北京 100038)

**摘要:**基于蜿蜒型河流丰富的地貌异质性,回顾了蜿蜒型河流形成机理及影响因素,论述了蜿蜒型河流的地貌结构和动态变化特征,总结了地貌异质性的生态功能,重点分析了深潭-浅滩序列结构的相关研究进展,归纳了蜿蜒型河流异质性的生态学意义。

**关键词:**蜿蜒型河流;地貌异质性;生境;生物多样性;深潭-浅滩序列

中图分类号:X826 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2015)06-0081-05

## Review on geomorphological heterogeneity of meandering river and its ecological significance

WANG Hongtao, DONG Zeren, ZHAO Jinyong, ZHANG Jing

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

**Abstract:** Based on abundant geomorphological heterogeneities in meandering river, the shaping mechanism of meandering rivers and its influence factors are reviewed; geomorphological structure of a meandering river and its dynamic change features are discussed; and the ecological functions of geomorphological heterogeneities are summarized. Pool-riffle sequence and its relevant researches are mainly analyzed. The ecological significance of various geomorphological characteristics in meandering river is summed up.

**Key words:** meandering river; geomorphological heterogeneity; habitat; biodiversity; pool-riffle sequence

河流是最具动态变化的地表系统,不断影响着地球水文、生物和地貌过程,对于陆地水沙输移、景观演替和河流生态系统具有重要意义<sup>[1]</sup>。河流地貌是水流作用下形成各种侵蚀、堆积形态的总称,包括河型、河床侵蚀地貌和河床堆积地貌<sup>[2]</sup>。河流地貌格局是水流的自然边界条件,决定了河段尺度内的水力学特性,影响着河流演变趋势和过程。同时,河流地貌为生物提供栖息地,是河流生物多样性和生态系统功能的基础<sup>[3]</sup>。河流地貌的多样性决定了沿河生境的有效性和总量、生境的复杂性和连通性<sup>[4]</sup>。

河流地貌研究有助于理解河流演变过程和预测河流变化趋势,河流演变、河段水力结构分析及河岸稳定性研究为传统河流地貌学的研究重点,对水利、交通、工农业生产和城镇建设都具有重要意义。但近年来全球水资源危机和水生态恶化的趋势严重制

约了人类的用水需求和经济的可持续发展,促使河流地貌的生态意义得到了更多的关注,探求河流地貌与生物多样性关系的研究日趋活跃,大量研究表明生物多样性与河流地貌多样性呈正相关关系<sup>[5-6]</sup>,河流地貌异质性已成为河流健康评价的重要因子和河流生态修复的主要对象<sup>[7]</sup>,河流地貌的原则已广泛应用到河流恢复中<sup>[8]</sup>。作为世界上分布最广的河流形态<sup>[9]</sup>,蜿蜒型河流包含有多种空间异质性的地貌单元,对于稳定河流物理结构和维持生态系统具有重要意义,逐渐成为河流生态地貌学的研究热点<sup>[10]</sup>。但由于河流地貌的变动性和难以量化,使得有关河流地貌对不同地貌结构单元和整体河段的生态功能的研究不多,成为河流综合管理的一个瓶颈<sup>[11]</sup>。笔者结合蜿蜒型河流的形成机理,论述蜿蜒型河流的地貌结构、动态变化特征和生态功能,并重

基金项目:国家自然科学基金(51279113);国家“十二五”科技支撑计划(2012BAC06B04);水利部公益性行业科研专项(201201113)

作者简介:王宏涛(1986—),男,博士研究生,主要从事河流生态修复研究。E-mail: waterdream86@163.com

点分析总结深潭-浅滩序列结构的相关研究进展,旨在归纳蜿蜒型河流地貌结构的生态学意义。

## 1 蜿蜒型河流形成机理及影响因素

### 1.1 河流分类

河流分类,是根据河流各种信息的相似性或关系进行河流的分组或排序<sup>[12]</sup>。目前,主要依据河流平面形态进行分类<sup>[13]</sup>。河流是高度非线性动态系统,在长时间尺度的演变中,塑造了缤纷多彩的平面形态<sup>[14]</sup>,河道的平面形态可以分为3种类型:蜿蜒型(sinuosity/meandering)、微弯顺直型(straight-low sinuosity)和分汊型(multichannels),其中蜿蜒型河流类型有弯曲型、不规则蜿蜒型、规则蜿蜒型和曲折蜿蜒型等,分汊型河流可分为辫状型(braided)、网状型(anastomosing/anabranching)和游荡型(wandering)。弯曲率在1.3~3.0范围的河道属于蜿蜒型河流<sup>[15]</sup>,该分类方法与钱宁<sup>[16]</sup>将河流分为顺直、弯曲、分汊、游荡4种类型相似,既反映了河流的平面形态,也体现着河流的演变规律<sup>[17]</sup>。

### 1.2 形成机理

河流的蜿蜒性是河流系统自组织行为的体现方式<sup>[18]</sup>,蜿蜒型河流的形成是水流、流域地质结构、柯式力共同作用的结果。河流演变初期表现为沿轴线的左右摆动,因受柯式力的影响轴线逐渐弯曲,由于摆幅的增大和轴线曲率半径减小,使河流呈现出顺直→微弯→蜿蜒→裁弯的演变过程<sup>[19]</sup>。蜿蜒型河流的形成和转化理论主要有基于河谷比降分类的地貌界限假说<sup>[20]</sup>,反映流水能量规律的能耗率极值原理(包括最大能耗假说、最大统计熵理论、最小能耗假说等<sup>[21]</sup>),基于地球自转的柯氏力效应<sup>[22]</sup>,基于中性稳定理论的边界干扰说<sup>[23]</sup>,应用随机过程模拟的随机理论<sup>[24]</sup>,反映河流直观平面结果的体现形态几何规律的统计分析<sup>[25]</sup>,结合质量守恒定律的“动能自补偿”的弯曲机理<sup>[26]</sup>。由于上述假说主要侧重形态、能量和水力条件的某一个方面,具有一定的局限性,如地貌界限缺乏力学机理支撑、随机理论缺乏严格的理论证明、动能自补偿机理未考虑河岸约束,但它们反映了河流变化的周期性和趋向性基本规律,各个理论的相互补充对河型成因认识和阈值划分有重要意义。人们对蜿蜒河流演变动力过程的研究从理论和实践方面均已取得了丰硕的成果<sup>[27-28]</sup>。

### 1.3 影响因素

区域尺度上,Stark等<sup>[29]</sup>通过研究环太平洋5个岛屿的河道蜿蜒性情况,分析得到蜿蜒型河流的成因与降雨量、洪水频率、岩石破碎化呈正相关关系。河段尺度上,钱宁<sup>[16]</sup>对于弯曲河流的边界条

件、来水条件和来沙条件进行了总结,指出河岸组成物质具有二元结构,有一定的抗冲性,但也能坍塌后退。来沙条件是河床沙质来量相对较小,但有一定冲泻质来量。纵向冲淤变化基本保持平衡,汛期微淤,非汛期微冲。来水条件是流量变幅和洪峰流量变差系数小,洪水起落平缓,并且河谷比降较小。该理论得到了试验验证<sup>[30-31]</sup>。Gibling等<sup>[18]</sup>指出蜿蜒型河流形成需要4个基本条件:足够的空间、平缓的坡度、细颗粒沉积物和软土岸坡。而水中的倒木、巨石、黏土塞和其他障碍也是形成河道弯曲的原因。河床材料构成对形成深潭-浅滩序列有着重要作用。在卵砾石河床的河道中,容易形成匀称的深潭-浅滩序列;具有沙质河床的河道由深潭依次分布,但没有形成真正意义上的浅滩;较高坡降的河流形成深潭-跌水的序列。

## 2 蜿蜒型河流地貌异质性及生态功能

### 2.1 地貌异质性结构

蜿蜒型河流包含有多种空间异质性的地貌单元,河漫滩区地貌结构包括以下部分(图1):黏土塞(clay plug),指在主河道与牛轭湖之间的淤积体;牛轭湖(oxbow lake),指黏土塞完全形成后,牛轭状河道从主河道中分离出来形成的水体;蜿蜒河湾(meander scroll),指已经淤积的旧河道;自然堤(nature levee),指由于局部河段流速降低,导致粗沙沿河岸所形成的淤积体;河漫滩沼泽(backswamps),指由于自然堤防的围隔作用形成的沼泽<sup>[32]</sup>。主河道内的地貌单元是深潭-浅滩序列(pool-riffle sequence)。深潭位于蜿蜒性河流弯曲的顶点,并在河道深泓线弯曲凸部的外侧(或称凹岸侧)。浅滩是两个河湾间的浅河道,位于河流深泓线相邻两个波峰之间,它的起点位于蜿蜒河流的弯段末端,其长度取决于纵坡降,纵坡降越大,浅滩段越短。深潭的横剖面为窄深式,一般为几何非对称型;而浅滩的横剖面属宽浅式,大体呈对称形态。

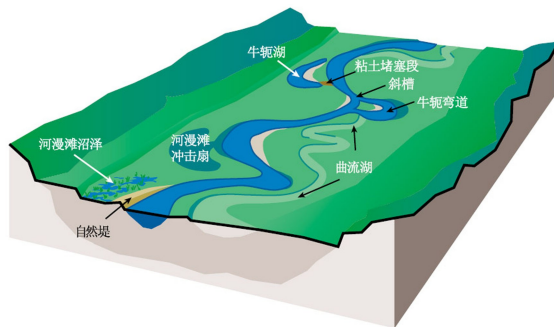


图1 蜿蜒型河道的侧向运动形成河漫滩地貌的多样性

## 2.2 地貌动态变化特征

河流地貌具有空间复杂性和时间变异性<sup>[33]</sup>。蜿蜒型河流的动态变化在不同的时间尺度上:①宏观尺度上(>1a),地貌动态变化包括自然堤不断增高、弯曲半径逐渐扩大、裁弯取直后新的牛轭湖和蜿蜒河湾形成;②中观尺度上(1d~1a),随着水文周期产生周期性变化,深潭和浅滩周期性填充和恢复,主河道横向迁移变化,凹凸岸向下传递;③微观尺度上(数小时),地貌动态主要是随水力条件不断调整而发生底质特征变化。

## 2.3 地貌异质性的生态作用分析

蜿蜒型河流地貌复杂性是生物多样性的自然基础,通过与河流的物理、化学和水文过程的交互作用直接或间接影响着河流生态系统动态。首先,河流结构的稳定性是影响水生生物特别是底栖动物多样性的关键因素<sup>[34]</sup>,蜿蜒型河流可以有效提高河道的稳定性:整体河段尺度上,由于沿程水面线及糙率的变化率相对于顺直型河道更低,因此,弯曲型河道比顺直型河道更为稳定<sup>[35]</sup>;局部河段尺度上,阶梯-深潭系统可以有效增大阻力和河床抗冲刷力,从而稳定了河床和岸坡<sup>[36]</sup>。其次,底质结构是决定河段是否适合鱼类产卵的重要因素<sup>[37]</sup>,也影响着底栖大型无脊椎动物的分布<sup>[38]</sup>。蜿蜒型河流维持了河道的输沙平衡和底质的有序分布:整体河段尺度上,螺旋流保证河流输沙的平稳性和连续性,确保泥沙的有序传播,从上游来的泥沙在凸岸堆积,从上一个序列的凸岸流向下一个序列的凹岸<sup>[18]</sup>;局部河段上,蜿蜒型河流产生的河岸侵蚀也是河岸带植被演替的驱动力。凸岸边滩随着时间推移越来越高,相应的河岸带植被也随之发生一系列演替作用。众多的鸟类和野生动物可以利用河岸带植被演替的不同阶段进行摄食、筑巢和繁育<sup>[39]</sup>;生境单元尺度上,通过水流的分拣作用,在不同区域形成适合不同生物栖息的底质条件。更为重要的是,蜿蜒型河流的地貌复杂性直接为不同物种提供多样化生境:牛轭湖作为河成湖,长年处于静水沉积过程,为水生和湿生动植物提供了多样化的生境空间,是温水鱼类,如大口鲈鱼和猫鱼的理想栖息地;漫滩沼泽适于鸟类、禽类和两栖动物生存,并为生物在洪水期提供避难所和产卵场;有学者<sup>[40]</sup>指出,洪水后无脊椎动物建群来源于受洪水影响较小的相邻区域,这也说明了牛轭湖和漫滩沼泽的重要性。同时,在水文过程的时间变异中,河道和河漫滩形成的水流—漫滩—静水—干涸等动态栖息地多样性条件,促进了物种的演化。

## 3 深潭-浅滩序列的生态学意义

深潭-浅滩序列是中等坡度混合砂砾石河床的

典型自然地貌特征,对蜿蜒型河流的形成和发展起到了关键作用<sup>[41]</sup>,也是多样化流速和水深的基础,有效地支撑了鱼类和无脊椎动物的繁殖<sup>[42]</sup>。目前,对于深潭-浅滩序列的形成机理<sup>[43]</sup>、地貌识别<sup>[44]</sup>和空间分布<sup>[45]</sup>都有了深入的认识,对于该结构的生态学研究<sup>[46-51]</sup>也在不断深化。

Ock 等<sup>[45]</sup>采用同位素示踪法研究了不同河流对静水浮游生物的影响,结果显示浅滩可以有效截留静水浮游生物,深潭可以截留陆地植物,表明深潭-浅滩结构对于运输和截留颗粒有机物(POM)有重要作用,可以增加下游河段颗粒有机物的空间异质性。Chung 等<sup>[46]</sup>采用 River2D 二维平均水深模型对 Gapcheon 河的 10 种地貌类型进行了水力学模拟,并采用水深和流速适宜性曲线对宽鳍鱻的加权可利用面积进行了分析,表明深潭对于鱼类生存具有极其重要的影响。Hauer 等<sup>[47]</sup>通过对不同弯曲特性、河道坡度、流量的 13 条浅滩-深潭河段的水力学特性进行研究,分析了浅滩-深潭河段的中等尺度栖息地特性,为河流栖息地修复提供了指导。Schwartz 等<sup>[48]</sup>结合现场鱼类密度和生物量测量结果,研究了潭前端、中部和末尾等 9 种不同中尺度河道栖息地单元的长度、水深、河道坡度的复杂水力条件对鱼类分布的影响。Lee 等<sup>[49]</sup>通过对韩国 17 条河流的采样调查,采用冗余分析(RDA)和电典范对应分析(CCA)法分别对底栖大型无脊椎动物和河岸植被的地貌影响因子和水化学因子进行研究,结果表明:水化学因子中,只有 COD 与二者具有显著相关关系,而河道底质多样性、河道曲率和边滩的横向变化对无脊椎生物和植被均具有重要影响。Kim<sup>[50]</sup>采用综合评价法对 4 条河流的顺直河段和弯曲河段的生态状况与河道底质的相关关系进行研究,结果表明:由于河道底质、泥沙淤积和深潭-浅滩结构的分布,粗糙河床底质具有极好的地貌条件;砂质河床占主导的多样化河床,多样性和稳定性欠缺,地貌条件为良好;而砂质河床的地貌条件一般。综合现有研究成果可知,深潭-浅滩序列的研究内容覆盖了浮游生物、底栖动物和鱼类等水生生物类群,并逐渐向影响生物的非生物因子追溯;研究方法注重将统计分析、水力模拟与现场调查相结合,并不断将新技术融入其中;研究尺度也从河段尺度逐渐向细化的生境单元推移;研究结论均凸显了深潭-浅滩序列的重要生态学意义。

## 4 结 语

由于河流生态系统是水文、物理、化学、生物交互作用的复杂有机体,现有研究成果难以反映地貌

异质性对生物多样性的影响程度,同时,对河流地貌的生态效益量化和动态变化特性的研究也明显不足,因此,将来应加强河流蜿蜒型地貌异质性和水文情势变动与生物多样性耦合关系的定量研究。

## 参考文献:

[ 1 ] GÜNERALP I, MARSTON R. Process-form linkages in meander morphodynamics: bridging theoretical modeling and real world complexity [ J ]. *Progress in Physical Geography*, 2012, 36(6) : 718-746.

[ 2 ] 沈玉昌, 龚国元. 河流地貌学概论 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1986.

[ 3 ] ELOSEGI A, DÍEZ J, MUTZ M. Effects of hydromorphological integrity on biodiversity and functioning of river ecosystems [ J ]. *Hydrobiologia*, 2010, 657:199-215.

[ 4 ] 董哲仁. 河流生态修复 [ M ]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.

[ 5 ] 董哲仁. 河流形态多样性与生物群落多样性 [ J ]. *水利学报*, 2003(11) : 1-7. ( DONG Zheren. Diversity of river morphology and diversity of bio-communities [ J ]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003(11) : 1-7. ( in Chinese ) )

[ 6 ] 王兆印, 程东升, 何易平, 等. 西南山区河流阶地-深潭系统的生态学作用 [ J ]. *地球科学进展*, 2006, 21(4) : 409-416. ( WANG Zhaoyin, CHENG Dongsheng, HE Yiping, et al. A study of the ecological functions of step-pool system in southwest mountain streams [ J ]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(4) : 409-416. ( in Chinese ) )

[ 7 ] POOLE G C. Stream hydrogeomorphology as a physical science basis for advances in stream ecology [ J ]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2010, 29(1) : 12-25.

[ 8 ] DARBY S E. Reappraising the geomorphology-ecology link [ J ]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 35(3) : 368-371.

[ 9 ] 张俊勇, 陈立, 王家生. 河型研究综述 [ J ]. *泥沙研究*, 2005(4) : 76-81. ( ZHANG Junyong, CHEN Li, WANG Jiasheng. Review on the research of river patterns [ J ]. *Journal of Sediment Research*, 2005(4) : 76-81. ( in Chinese ) )

[ 10 ] KONDOLF G M. River restoration and meanders [ J ]. *Ecology and Society*, 2006, 11(2) : 42.

[ 11 ] MOSLEY M P. River channel inventory, habitat and instream flow assessment [ J ]. *Progress in Physical Geography*, 1985, 9(4) : 494-523.

[ 12 ] PLATTS W S. A plea for fishery habitat classification [ J ]. *Fisheries*, 1980, 5(1) : 1-6.

[ 13 ] LEOPOLD L B, WOLMAN M G, MILLER J P. *Fluvial processes in geomorphology* [ M ]. Dover: Dover Publications, 1995:86.

[ 14 ] FRASCATI A, LANZONI S. Morphodynamic regime and long-term evolution of meandering rivers [ J ]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114:1-12.

[ 15 ] BRIERLEY G J, KIRSTIE A F. *Germorphology and river management* [ M ]. New Jersey: Blackwell, 2004:94.

[ 16 ] 钱宁. 河床演变学 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1987:8.

[ 17 ] 王光谦. 河流泥沙研究进展 [ J ]. *泥沙研究*, 2007(2) : 64-81. ( WANG Guangqian. *Advances in sediment research* [ J ]. *Journal of Sediment Research*, 2007(2) : 64-81. ( in Chinese ) )

[ 18 ] GIBLING M R, DAVIES N S. Palaeozoic landscapes shaped by plant evolution [ J ]. *Nature Geos*, 2012(5) : 99-105.

[ 19 ] 殷瑞兰. 蜿蜒性河流演变机理研究 [ J ]. *长江科学院院报*, 2002, 19(3) : 15-18. ( YIN Ruilan. *Research on mechanism of evolution for meandering river* [ J ]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2002, 19(3) : 15-18. ( in Chinese ) )

[ 20 ] SCHUMM S A, KHAN H R. Experimental study of channel patterns [ J ]. *Geology Society of American Bulletin*, 1972, 83:1755-1770.

[ 21 ] CHANG H H. Minimum stream power and river channel patterns [ J ]. *Journal of Hydrology*, 1979, 41:303-327.

[ 22 ] EAKING H M. The influence of the earth's rotation upon the lateral erosion of stream [ J ]. *Journal of Geology*, 1910, 18:435-447.

[ 23 ] PARKER C. On the development of river bend [ J ]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1986, 140:139-156.

[ 24 ] 倪晋仁, 张仁. 河型成因的各种理论及其间关系 [ J ]. *地理学报*, 1991, 46(3) : 366-372. ( NI Jinren, ZHANG Ren. *Theories on the cause of channel pattern formation* [ J ]. *Acta Geographica Sinica*, 1991, 46(3) : 366-372. ( in Chinese ) )

[ 25 ] BEGIN Z B. The relationship between flow-shear and stream pattern [ J ]. *Journal of Hydrology*, 1981, 52:307-319.

[ 26 ] 姚文艺, 郑艳爽, 张敏. 论河流的弯曲机理 [ J ]. *水科学进展*, 2010, 21(4) : 534-540. ( YAO Wenyi, ZHENG Yanshuang, ZHANG Min. *Discussion on the mechanism of river meandering* [ J ]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(4) : 534-540. ( in Chinese ) )

[ 27 ] 白玉川, 黄涛, 许栋. 蜿蜒河流平面形态的几何分形及统计分析 [ J ]. *天津大学学报*, 2008, 41(9) : 1052-1056. ( BAI Yuchuang, HUANG Tao, XU Dong. *Fractal and statistical analysis of planar of meandering rivers* [ J ]. *Journal of Tianjin University*, 2008, 41(9) : 1052-1056. ( in Chinese ) )

[ 28 ] 许栋, 白玉川, 谭艳. 蜿蜒河流演变动力过程及其研究进展 [ J ]. *泥沙研究*, 2011(4) : 73-80. ( XU Dong, BAI Yuchuang, TAN Yan. *Research progress of meandering river dynamic development* [ J ]. *Journal of Sediment*

- Research,2011(4):73-80. (in Chinese))
- [29] STARK C P, BARBOUR J R, HAYAKAWA Y S, et al. The climatic signature of incised river meanders [ J ]. Science, 2010, 327: 1497-1501.
- [30] 金德生. 边界条件对曲流发育影响的过程响应模型试验研究 [ J ]. 地理研究, 1986, 5 ( 3 ): 12-21. ( JIN Desheng. An experimental study of the influence of boundary conditions on meandering development with process response model [ J ]. Geographical Research, 1986, 5(3):12-21. (in Chinese))
- [31] SMITH C E. Modeling high sinuosity meanders in a small flume [ J ]. Geomorphology, 1998, 25: 19-30.
- [32] PLESSIS V D, PRETORUIS P. Environmental best practice guidelines [ M ]. South Perth, Australia: Department of Water Affairs and Forestry, 2005: 125-127.
- [33] ROSGEN D L. Applied river morphology: wildland hydrology [ M ]. Colorado: Pagosa Springs, 1996: 88.
- [34] 段学花, 王兆印, 徐梦珍. 底栖动物与河流生态评价 [ M ]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 7.
- [35] 倪晋仁, 王随继. 论顺直河流 [ J ]. 水利学报, 2000 ( 12 ): 14-20. ( NI Jinren, WANG Suiji. On straight river [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(12):14-20. (in Chinese))
- [36] 徐江, 王兆印. 山区河流阶梯-深潭的发育及其稳定河床的作用 [ J ]. 泥沙研究, 2003 ( 5 ): 21-27. ( XU Jiang, WANG Zhaoyin. The formative mechanism of step-pool and its role in bed stabilization of mountain streams [ J ]. Journal of Sediment Research, 2003 ( 5 ): 21-27. (in Chinese))
- [37] KENNEDY G J A, CROZIER W W. Factors affecting recruitment success in salmon [ C ] // The Ecological Basis for River Management. Chichester: John Wiley, 1995: 349-362.
- [38] ZHAO Jinyong, PENG Jing, ZHAO Xianfu, et al. Correlation between river substrate heterogeneity and benthic macroinvertebrate diversity [ C ] // JIAO Rong, KALONJI G. Proceedings of the 35th IAHR World Congress. Chengdu: IAHR, 2013: 267-276.
- [39] NILLSON C, SVEDMARK M. Basic principles and ecological consequences of changing water regimes: riparian plant communities [ J ]. Environmental Management, 2002, 30(4):468-480.
- [40] 董哲仁. 生态水利工程原理与技术 [ M ]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 276.
- [41] Assessment and Watershed Protection Division. National management measures to control nonpoint source pollution from hydro-modification [ R ]. Washington, D. C. : EPA, 2007: 38.
- [42] RICHARDS K S. The morphology of riffle-pool sequence [ J ]. Earth Surface Process, 1976 ( 1 ): 71-88.
- [43] 张辉, 危起伟, 杜浩, 等. 长江上游干流基于河床地形的深潭浅滩识别方法比较研究 [ J ]. 淡水渔业, 2011, 41 ( 1 ): 3-9. ( ZHANG Hui, WEI Qiwei, DU Hao, et al. Comparison of pool and riffle identification methods based on riverbed topography in the upper Yangtze mainstream [ J ]. Freshwater Fisheries, 2011, 41 ( 1 ): 3-9. (in Chinese))
- [44] NEWBURY R, GABOURY M. Exploration and rehabilitation of hydraulic habitats instreams using principles of fluvial behavior [ J ]. Freshwater Biology, 1993, 29: 195-210.
- [45] OCK G, MUTO Y, TAYASU I, et al. Roles of riffle and pool structure for increasing retention of lentic plankton in dam tailwater reaches [ C ] // JEE H K, WOO H. 8th International Symposium Ecohydraulics. Seoul: IAHR, 2010: 639-648.
- [46] CHUNG S, AHN H, IM D. Analysis of the aquatic physical habitat of a channel-connected pool in Korea [ C ] // JEE H K, WOO H. 8th International Symposium Ecohydraulics. Seoul: IAHR, 2010: 2325-2331.
- [47] HAUER C, UNFER G, TRITTHART M, et al. Variability of mesohabitat characteristics in riffle-pool reaches: testing an integrative evaluation concept for mem-application [ J ]. River Research and Applications, 2011, 27: 403-430.
- [48] SCHWARTZ J S, HERRICKS E E. Fish use of ecohydraulic-based mesohabitat units in a low-gradient Illinois stream: implications for stream restoration [ J ]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 2008, 18: 852-866.
- [49] LEE D, KIM H, RHEE D S. Physical and ecological characteristics of sand-bed and gravel-bed streams in Korea [ C ] // JEE H K, WOO H. 8th International Symposium Ecohydraulics. Seoul: IAHR, 2010: 2336-2337.
- [50] KIM K H. Assessment of potential natural state by River Bed Materials [ C ] // JEE H K, WOO H. 8th International Symposium Ecohydraulics. Seoul: IAHR, 2010: 2338-2345.

( 收稿日期: 2014 - 11 - 16 编辑: 彭桃英 )

