

综 述

国内外河流生态修复相关研究进展

陈兴茹

(中国水利水电科学研究院水力学所, 北京 100038)

Progress of River Restoration Research at Home and Abroad

CHEN Xing-ru

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

摘要:河流生态系统是一个复杂、多变、非线性的系统,增加了河流生态修复工作的难度。如何真正修复河流生态系统,国内外许多学者进行了大量的理论和实践研究,取得丰硕的成果和宝贵的经验。总结国外城市化对河流生态的影响、河流生态修复技术、河流生态评价及河流生态修复后评估方面的成果,旨在为我国正在广泛开展的水生态修复工作提供参考;总结国内河流生态修复已有的成果和存在的问题,并展望我国今后河流生态修复工作应重点开展的工作内容。

关键词:河流;生态修复;研究进展

中图分类号:X171.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2011)05-0122-07

欧洲、美国和日本等发达国家,自20世纪60年代就已认识到河流生态环境面临的诸多问题,积极开展生态修复的相关研究与实践活动。至今,经过半个世纪的时间,河流生态修复现状调研、科研、实践等活动开展得较多,研究比较深入,基于多种目标的各种修复技术已得到研发(Nijland & Cals, 2000; Brinson & Malvarez, 2002; Malmqvist & Rundle, 2002);大型河流的生态修复工作也已有不少实例(Kondolf, 1995; Brooks & Shields, 1996; Tockner & Stanford, 2002),以密西西比河、莱茵河为典型代表的许多河流修复工作相对比较具体、细致,并且这些修复活动大多取得了良好的生态环境效益。我国的河流修复工作20世纪末刚起步。本文总结国内外河流生态修复的相关研究进展。

1 国外研究进展

1.1 城市化对河流的生态影响

流域内不透水表面不断增加导致大部分暴雨很快成为地表径流,且无法变成地下径流,城市河流水

文情势发生改变。产流过程的巨大变化对物理栖息地和水质有很大的影响:水力条件单一、洪水峰值增加和基流减少(Booth & Jackson, 1997);岸边带缺失及河床和堤岸被硬化后,水生生物在高流量时缺乏避难所(Paul & Meyer, 2001)。城市河流受城市化影响的另一个特点是水质变差,尤其当含有悬浮固体、有毒物(如重金属)、碳水化合物、营养物和细菌等垃圾的污水汇入时(Lenat & Crawford, 1994),这可能严重地减少河流无脊椎动物群落的存在。许多对城市流域的研究表明,敏感物种(蜉蝣目 Ephemeroptera, 襁翅目 Plecoptera, 毛翅目 Trichoptera, 简称 EPT)的丰度、密度增加了耐污物种(寡毛纲 Oligochaetes, 摇蚊 Chironomids, 蜗牛 Snails)的密度(Pitt & Bozeman, 1982; Garie & McIntosh, 1986; Jones & Clark, 1987; Lenat & Crawford, 1994; Walsh et al, 2001)。

Soballe 和 Wasley(2004)根据城市河流在城市中的重要地位,分析了城市化速度加快对城市河流的影响,指出“城市河流可以成为城市的宝贵财富”,关键是如何解决城市河流面临的渠道化、岸线侵蚀、水体污染等问题,并提出了利用城市河流的方法,客观地评价了城市河流渠道化对于稳定河床和保护财产的重要作用。文中提到的行动方案,涉及内容包括如何改善进入河道的暴雨水质、最大限度

收稿日期:2011-06-27

基金项目:水利部公益性行业科研专项(201101023-2),国家自然科学基金(50879092),中国水科院科研专项(水集0822)。

作者简介:陈兴茹,1978年生,女,高级工程师,主要研究方向为河流生态环境修复。E-mail:chenxr@iwhr.com

地加强河流廊道的治理、稳定河床和保护生物栖息地等。关于城市化对城市河流的影响及城市河流治理方法的研究开展得较多(Nienhuis & Leuven, 2001; Shields et al, 2003; Cook & Pegg, 2004; Kenow et al, 2004; Kreiling et al, 2004; Palmer et al, 2005), 研究内容涉及城市化对河流形态、水文情势、水质和生物等多指标的影响。

1.2 河流生态修复技术与方法

尽管河流生态修复工作已进行了大量的理论研究和实践探索,但尚未形成比较系统的河流生态修复的理论与方法体系,综合来看,相关研究主要集中在河流生态系统修复策略及河流生态系统中的水质、水量和河岸带等要素的修复方面。在河流生态系统修复策略方面,1965年德国的Emst Bittmann在莱茵河用芦苇和柳树进行生态护岸实验,可以看作最早的河流生态修复实践。20世纪70年代末瑞士Zurich州河川保护建设局将生态护岸法发展为“多自然河道生态修复技术”,对河流治理重视恢复植被和建设自然护岸,之后,此方法在欧美及日本推广。

随着修复实践的发展,河流修复已经从单纯的结构性修复发展到生态系统整体的结构、功能与动力学过程的综合修复;Bernhardt等(2005)从修复的范围上进行了解释,认为河流修复不光包括河道本身,还应扩展到河漫滩乃至流域;Malakoff(2004)认为,河流生态系统的退化是人为干扰与自然干扰累积作用的结果,修复规划中必须考虑二者之间的相互作用机制;NAKAMURA(2008)则提出了Leitbild(target vision, 目标期望)思想,将保证生态系统的完整性作为修复的指导思想与目标;Gloss等(2005)从管理角度对此进行论述,认为河流及其水资源的管理方式也是河流修复能否成功的重要影响因素;Miseki和Takazawa(1993)借鉴景观生态学的等级思想,分别以河岸带与流域2个尺度开展研究,并提出了与各自尺度相对应的群落组织和景观组织水平的修复措施;Gore和Shields(1995)的论述较为全面,认为河流修复是一项综合性、系统性的活动,必须综合考虑水文、土地利用、地貌、水质、生物与生态等,甚至要考虑娱乐、经济和文化等方面。

另外,在河流生态修复的方法与具体措施上,很多学者也相继开展了研究。如Fischenich(2001)提出了城市河流修复与流域管理的相关技术,其中详细阐述了城市化对城市河流的影响、城市河流水环境质量下降的经济损失及城市河流生态修复面临的

挑战等;Deason(2001)提出了污水处理的方法,为其他河流污染治理提供了参考;Casagrande(1997)对人类活动在湿地生态修复中的重要作用进行了剖析;Udziela等(1997)运用条件价值法(CVM)对城市盐碱湿地修复的非市场价值进行了评估;Ludwig和Bezirksamt(2001)针对Hamburg河直线化严重、生物多样性消失的现状,采用非政府组织、公众参与的方式,对该河中鲑鱼的生活习性进行了研究,以期通过改善其生活条件来达到修复河流生态的目的;Jukka Jormola(2004)对国际上利用流域洪水过程改善城市河流生态环境的历史进行了简要回顾,并列举了利用洪水管理修复城市河流和湿地的实例;Brilly等(2004)研究了修复城市河流鱼类栖息地的方法;Nakamura和Tockner(2004)对日本河流与湿地的生态修复进行了简要的回顾;Battle等(2004)对密西西比河上游Cape Girardeau附近主河槽内的大型无脊椎动物进行了研究;Best等(2004)针对水下大型植物西米和野芹菜由于对光的竞争性所引起的植物体内N、P含量的变化进行了分析,并建立了模型;Brownlee和Anderson(2004)研究了栖息地对珠蚌壳重和大小的影响;Chick等(2004)对密西西比河上游鱼类的时空分布进行了研究,得出了鱼类空间分布与河流的透明度、水温、流速和植物繁茂度有关。

1.3 河流生态评价

河溪生态评价方法的研究进程可以分为4个代表性阶段,分别是:1)河溪水质指标评价阶段,2)河溪生物指标评价阶段,3)河溪生物栖息地质量评价阶段,4)河溪整体生物指标评价阶段(高甲荣等, 2010)。首先,由于早期河溪生态问题仅仅关注水质污染所造成的环境影响,早期河溪生态评价主要以水质的物理化学指标来评价河溪的健康情况,该评价方法已有数十年的历史,是目前较为成熟的技术方法之一。随后,美国俄亥俄州环保署考虑加入生物指标来评价河溪的健康情况,目前常见的评估方法如生物整合性指标(Index of Biotic Integrity, IBI)(Karr, 1999)、科级生物性指标(Family-Level Biotic Index FBI)、丰富度指标评价法(Taxa Richness)(Plafkin et al, 1989)、EPT丰富度指标(EPT index)(Plafkin et al, 1989)、百分比模式相似性(Percent Model Affinity, PMA)以及快速生物评估方法(Rapid Bioassessment Protocol, RBP)(Plafkin et al, 1989)。1972年,美国俄亥俄州环保署又根据生物评价方法,制定了定性栖息地评价指数,美国国家生

态研究中心于1976年发展了物理栖息地模拟系统,鉴于河溪生态系统中水质、水文等物理—化学指标影响生态系统中生物群体的同时,生物也影响各种栖息地环境因子的发展,因此,将河溪评价范围扩展至整个河溪生态系统整体,如1999年澳大利亚自然资源与环境部发展的河溪状况指标(Index of Stream Condition, ISC)。澳大利亚河溪评价体系来源于澳大利亚河溪健康计划,其评价过程是采用河溪中的水生昆虫作为评价河溪生态状况的目标物种,首先需要确定所受人为干扰最小的地区为参考点,并收集参考点的生物、物理及化学指标参数,再利用聚类分析,将生物划分为若干个相似的生物区系,并由每一个生物区系所对应的物理、化学资料,找出最佳的环境因子作为AUSRIVAS预测模型的依据,其次,将参考点建立标准作为待测河溪的对照组,作为评价其生态系统健康程度的依据。待测河溪也需要收集生物、物理及化学数据,其中物理、化学数据为AUSRIVAS模式中依据参考点建立的预测因子,各生物数据类别分别对应不同的物理化学环境,所以是以生物区系为基础的方法,接着计算待测河溪中由每一分类群体的发生几率,最后比较参考点与待测河溪的发生几率作为评价指标,其特点是采用水生昆虫作为评价目标,水生昆虫常被用来监测水质变化的标准生物,它们可以快速地反映水质的变化,可以作为连续监测水质的指标。

1.4 河流生态修复后评估

河流生态修复后评估是检验河流生态修复实施效果的重要手段,且通过后期监测和评价还能够总结项目方案,改进今后的工作思路。有关河流生态修复后评估准则方面,国外较早且有代表性的文章是Kondolf(1995)发表的“Five elements for effective evaluation of stream restoration”,其中提出测量河流生态修复成功的5个要素:1)明确的目标,2)完备的基线数据,3)优良的方案设计,4)服务于长期,5)愿意承担风险;Shields和Knight(2003)以密西西比西北部的Hotophia河生态修复工程为例,对其生态修复后进行了长期监测,获取了生态修复前后河道内几个生态指标的变化情况,掌握了生态修复对河道生态的影响;Jansson等(2005)针对Palmer等(2005)提出的5条评估河流生态修复成功的准则,提出第6条准则,这将为人们加深对河流生态修复成功机制的理解提供更强有力的引导性框架,为了验证这6个准则在实际中的应用性,作者将其应用于具体的河流生态修复案例;Woolsey等(2007)提

出了评估河流生态修复成功的导则,它包括49个总指标和13个主要针对中小河流的指标,大多数目标与河流生态属性有关,但也考虑了社会经济方面,并提出了一系列的指标测量方法。修复成功通过对比修复措施实施前后指标值的变化来确定;Alexander和Allan(2007)从密歇根、威斯康星州和俄亥俄州1345个河流生态修复项目中选择了39个作为调查的对象,进行后评估;Klein等(2007)采用了场地监测和水动力模型,以定量化17个物理和生物指标在修复工程实施前后的变化,评估了自然河道设计在河流生态系统恢复中的有效性;Goetz等(2007)以Provo河生态修复为例,根据河流生态修复的目标,包括河道的水文、平面形态、横断面、纵向形态、河床质分布等,分别进行了后评估;Buchanan等(2010)对纽约中部2005年秋天完成的河流生态修复项目进行了评估。

2 国内研究进展

我国河流生态修复方面的研究起步较晚,早期的研究中主要是注意到了河流生态系统某个方面的功能,如河岸植被特征及其在生态系统和景观中的作用,基于景观生态学相关理论的河流整治方面的探讨,河岸带的植被的特征和保护,河岸带功能及管理,另外还有一些基于水污染治理的角度的研究,如对受污染河道生态修复机理机制的探讨。近年来,河流生态修复已经成为水利学和生态学领域学术讨论的热点问题。我国水利学者和生态学已经认识到水利工程对河流污染产生的严重影响,从不同角度积极阐明开展河流生态修复研究的重要性。总体上讲,我国河流生态修复工作虽起步较晚,但发展迅速,但仍处于起步阶段,进入21世纪以来至今的10年间,河流生态修复与保护已经引起社会各界的重视,并相继开展了许多研究与实践活动。2000—2005年主要为该项工作在我国萌芽阶段,该阶段的主要研究工作是学习国外在该领域的成果,并形成针对我国河流现状、治理目标及面临问题的学术见解;2005年至今,随着研究的进一步深入,我国的河流生态修复理论与实践活动由初始的理论探讨、整治框架阶段向具体的修复方法、手段和技术转变。

2.1 河流生态修复相关理论研究

我国的河流生态修复理论比较有代表性的是刘树坤于1999年提出“大水利”理论,并在其访日报告(刘树坤,2002—2003)中,就自然环境的保护和修复、湿地生态系统的生态修复、水电站建设中的生

态修复、大坝建设中的生态修复、河道整治与生态修复、河道景观建设和管理等进行了探讨,其中包括比较具体细致的修复思路、步骤、方法和措施等,为之后我国开展河流修复工作提供了参考;2003年董哲仁提出的“生态水工学”概念及内涵,分析研究了人类对河流生态系统的胁迫,从生态系统需要角度,提出了改善河流生态系统、修复河流生态环境的工程措施及思路并相继提出了一系列理论和方法;王超和王沛芳(2004)则比较全面地提出了水安全、水环境、水景观、水文化和水经济五位一体的城市水生态系统建设模式;陈庆伟等(2007)分析了筑坝对河流生态系统的影响及水库生态调度;赵彦伟等(2005)提出了评价河流生态系统健康的指标体系和量化方法。

2.2 河流生态修复相关技术研究

2.2.1 水质净化技术 水质净化技术包括原位净化和异位净化2种,其中水质原位净化技术由于其就地净化、不占用土地的特点,近年来备受关注,相关研究也日益得到开展(李先宁等,2007;李海英等,2009;林惠凤等,2009)。水质原位净化技术包括人工打捞等物理方法,也包括向水体中投放化学药剂等化学方法,还包括近年来广泛被人们研究和应用的利用生物膜法净化水质的生物法、利用植物根系吸收污染物等。异位净化技术包括建设污水处理厂、人工湿地处理污水等技术。这些方法和技术多由国外引进,并经国内消化吸收。

2.2.2 近自然河流治理技术 近自然河流治理技术包括河道形态的确定、稳定性计算、生态需水量确定、生态护岸的构建(夏继红和严忠民,2009)等,使河流的各组成要素接近自然河流的指标,达到修复河流生态系统的目的。

2.2.3 生态需水量确定 我国河流生态需水量研究经历了参照国外水文学法到目前能够根据保护目标的栖息地需求的水文水力学方法,取得了较大的进步(吉利娜等,2006;王玉蓉等,2007;刘苏峡等,2007;吴春华,2007)。今后仍需在河流生态调查、目标物种选择、目标物种习性与水动力的关系研究等多方面深入研究,以便更有效地确定生态需水量和需水过程。

2.3 河流生态修复相关实践活动

在河流生态修复的实践方面,国内进行了很多探索,积累了一定的经验。至今,水利部已在全国选择不同水生态问题的省市共12个作为水生态保护与修复试点,通过对示范区内存在的包括防洪、排

涝、水资源、水生态、水环境、水景观和水文化等诸多问题进行统一梳理,编制适合当地具体特点的、满足水生态系统需求的水生态保护与修复规划,以宏观、系统的视角综合考虑多种涉水问题,为各示范区的水生态保护和修复提供了总体思路和策略;各大城市,如北京、天津、上海、杭州、苏州、广州、沈阳、哈尔滨、成都和西安等,受改善城市人居环境、带动经济发展等因素的驱动,近年陆续开展了基于生态修复、景观建设、滨水空间和水质保护等多方位的河流整治工作,不断推广示范各类水生态保护与修复的理念、技术和方法,进而带动更广范围的河流生态修复工作的开展,为今后其他城市开展此项工作提供了借鉴。除城市河流外,我国的很多大江大河也在注重防洪发电等工程效益的同时,更多地兼顾生态的调水、补水工作,取得了良好的生态效益,如黄河每年汛前调水调沙向河口的湿地补水、博斯腾湖向塔里木河输水、引岳济淀等,取得了良好的生态效益。

3 小结

纵观国内外的相关研究成果,国外研究相对深入,理论、技术、方法的研究比较多,且在实践中应用较广,经验积累比较丰富。目前,我国很多城市都相继开展了城市河流修复工作,但大多停留在模仿国内外已有案例的初步尝试和探索阶段,较少从城市河流所处地区特点出发,深入研究城市河流的生态系统问题,河流的生态数据尚缺乏,生态因子和水动力因子之间的联系尚需进一步掌握,并需要开发适合我国河流的评价指标和生态修复方法等。

目前阶段,国内河流生态修复存在的主要问题有:缺乏对河流生态过程修复的机理研究;缺乏从大尺度流域角度考虑河岸、河内、上下游的整体生态修复;当前的研究大多只停留在对河流某一指标(鱼类指标、流量指标、水质指标和生物栖息地指标等)的生态修复,未考虑河流整体生态系统修复。

生态系统具有动态性、复杂性和非线性等特点,且生态系统构成因素众多,相互之间作用关系复杂,因此,给相关研究工作带来了挑战。今后的河流生态修复工作尚需将水利工程规划、建设、运行过程与生态学相关学科相融合,通过研究大量既有资料和开展长期监测,掌握关键生态因子的生存规律;积极开展相关问题的实践活动,为相关理论的研究积累经验和奠定基础;不断研发适合不同河流特点的河流生态修复的理论、技术和方法;开展长期监测工作,掌握生态系统修复后的动态演变过程,并不断吸

取经验教训,进一步指导河流生态修复工作;形成完善的生态系统修复评价的指标体系,从宏观上能够对生态系统修复状况准确把握。

参考文献

- 陈庆伟,刘兰芬,刘昌明. 2007. 筑坝对河流生态系统的影响及水库生态调度研究[J]. 北京师范大学学报:自然科学版, 43(5): 578-582.
- 董哲仁. 2003. 生态水工学的理论框架[J]. 水利学报, (1): 1-6.
- 高甲荣,冯泽深,高阳,等. 2010. 河溪近自然评价——方法与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社.
- 吉利娜,刘苏峡,吕宏兴,等. 2006. 湿周法估算河道内最小生态需水量的理论分析[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 34(2): 124-130.
- 李海英,冯慕华,李玲,等. 2009. 微曝气生态浮床净化入湖河口污染河水原位模型实验[J]. 湖泊科学, 21(6): 782-788.
- 李先宁,宋海亮,朱光灿,等. 2007. 组合型生态浮床的动态水质净化特性[J]. 环境科学, 28(11): 2448-2452.
- 林惠凤,黄婧,朱联东,等. 2009. 浮床栽培柳树在富营养化水体中的生长特性及水质净化效果研究[J]. 湖北大学学报:自然科学版, 31(2): 210-212.
- 刘树坤. 2002. 刘树坤访日报告: 自然环境的保护和修复(一)[J]. 海河水利, (1): 58-60.
- 刘树坤. 2002. 刘树坤访日报告: 自然环境的保护和修复(二)[J]. 海河水利, (2): 56-61.
- 刘树坤. 2002. 刘树坤访日报告: 湿地生态系统的修复(三)[J]. 海河水利, (3): 61-64.
- 刘树坤. 2002. 刘树坤访日报告: 湿地生态系统的修复(四)[J]. 海河水利, (4): 61-65.
- 刘树坤. 2002. 刘树坤访日报告: 河流整治与生态修复(五)[J]. 海河水利, (5): 64-66.
- 刘树坤. 2002. 刘树坤访日报告: 大坝中的生态修复(六)[J]. 海河水利, (6): 62-65.
- 刘树坤. 2003. 刘树坤访日报告: 水力发电站建设中的生态修复(七)[J]. 海河水利, (1): 63-66.
- 刘树坤. 2003. 刘树坤访日报告: 自然共生型流域圈与都市的再生(八)[J]. 海河水利, (2): 62-64.
- 刘树坤. 2003. 刘树坤访日报告: 日本城市河道的景观建设和管理(九)[J]. 海河水利, (3): 66-68.
- 刘苏峡,夏军,莫兴国,等. 2007. 基于生物习性和流量变化的南水北调西线调水河道的生态需水估算[J]. 南水北调与水利科技, 5(5): 12-17.
- 王超,王沛芳. 2004. 城市水生态系统建设与管理[M]. 北京: 科学出版社.
- 王玉蓉,李嘉,李克锋,等. 2007. 生态水力学法在河段最小生态需水量计算中的应用[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 39(5): 1-6.
- 吴春华. 2007. 雅砻江干流河道内生态需水量生境模拟法研究[J]. 生态科学, 26(6): 536-539.
- 夏继红,严忠民. 2009. 生态河岸带综合评价理论与生态修复技术[M]. 水利水电出版社.
- 赵彦伟,杨志峰. 2005. 城市河流生态系统健康评价初探[J]. 水科学进展, 16(3): 349-356.
- Alexander G G, Allan J D. 2007. Ecological Success in Stream Restoration: Case Studies from the Midwestern United States [J]. Environmental Management, 40(2): 245-255.
- Battle J M, Jackson J K. 2004. Macroinvertebrates in the main channel of the Mississippi River near Cape Girardeau, MO [J]. Proceedings of the Mississippi River Research Consortium, 36(1/2).
- Bernhardt E S, et al. 2005. Synthesizing U. S. river restoration efforts [J]. Science, 308: 636-637.
- Best E P H, Kiker G A, Boyd W A. 2004. On the competition for light between American wildcelery and sago pondweed at high and low nutrient availability: a modeling approach [C]. Proceedings of the Mississippi River Research Consortium, 36(1/2).
- Booth D B, Jackson C R. 1997. Urbanization of aquatic systems: degradation thresholds, stormwater detention, and the limits of mitigation [J]. Journal of the American Water Resources Association, 33(5): 1077-1090.
- Brilly, Povd M, et al. 2004. Monitoring of revitalization measures urban river fish habitat [J]. Geophysical Research Abstracts, 6, 05983.
- Brinson M M, Malvarez. 2002. Temperate freshwater wetlands: types, status and threats [J]. Environmental Conservation.
- Brooks A, Shields F D. 1996. River channel restoration: Guiding principles for sustainable projects [M]. United Kingdom, Chichester: John Wiley.
- Brownlee C D, Anderson R V. 2004. The relationship between habitat and unionid mussel shell weight and size [C]. Proceedings of the Mississippi River Research Consortium, 36(1/2).
- Buchanan B P, Walter M T, Nagle G N, et al. 2010. Monitoring and assessment of a river restoration project in central New York [J]. River Research and Applications.
- Casagrande D G. 1997. The human component of Urban wetland restoration [J]. Yale F & ES Bullutin, 100: 254-270.
- Chick J H, Ickes B, Pegg M A. 2004. Spatial structure and temporal variation of fish communities in the upper Mississippi river [C]. Proceedings of the Mississippi River Research Consortium, 36(1/2).

- Cook T R, Pegg M A. 2004. A comparison of submersed aquatic vegetation in main-stem floodplain habitats and isolated floodplain lakes of the Illinois River; implications for restoration[C]. Proceedings of the Mississippi River Research Consortium, 36 (1/2).
- Deason J P. 2001. The Passaic River Restoration provides a nationwide model for addressing polluted urban rivers[J]. Pollution Engineering;22-26.
- Fischenich J C. 2001. Technologies for urban stream restoration and watershed management [J]. EMRRP Bulletin No. 01-1.
- Garie H L, McIntosh A. 1986. Distribution of benthic macroinvertebrates in a stream exposed to urban runoff [J]. Water Resources Bulletin, 22: 447-455.
- Gloss S P, Lovich J E, Melis T S. 2005. The state of the Colorado River ecosystem in Grand Canyon: A report of the Grand Canyon monitoring and research center;1991-2004 [R].
- Goetz R R, Schmidt J C, Erwin S, et al. 2007. A conceptual framework for post project assessment applied to the Provo River restoration project, Utah [C]. American Geophysical Union, Fall Meeting.
- Gore, Shields. 1995. Can large rivers be restored? [J], Bioscience, 45:142-152.
- Jansson R, Backx H, Boulton A J, et al. 2005. Stating mechanisms and refining criteria for ecologically successful river restoration: a comment on Palmer [J]. Journal of Applied Ecology,42:218-222.
- Jones R C, Clark C C. 1987. Impact of watershed urbanization on stream insect communities [J]. Water Resources Bulletin, 23(6):1047-1055.
- Jukka Jormola. 2004. Restoration of urban streams in connection with stormwater management [J]. Expert Symposium Future Trends & Challenges of Urban Ecosystem Management Salzburg 29Th.
- Karr J R. 1999. Defining and measuring river health [J]. Freshwater Biology, 41(2):221-234.
- Kenow K P, et al. 2004. Development of remote sensing techniques to document the distribution and numbers of tundra swans on the Upper Mississippi River[C]. Proceedings of the Mississippi River Research Consortium, 36 (1/2).
- Klein L R, Clayton S R, Alldredge J R, et al. 2007. Long-term Monitoring and Evaluation of the Lower Red River Meadow Restoration Project, Idaho, U. S. A [J]. Restoration Ecology, 15(2): 223-239.
- Kondolf G M. 1995. Five elements for effective evaluation of stream restoration [J]. Restoration Ecology, 3:133-136.
- Kondolf G M. 1995. Five elements for effective evaluation of stream restoration [J]. Restoration Ecology, 3:133-136.
- Kreiling R M, Richardson W B, et al. 2004. Monitoring of Nitrogen cycling at an upper Mississippi River backwater site; Meiers S T. What phytoplankton communities tell us about mixing of water from the navigation channel and vegetation bed at lock and dam 19, Mississippi River[C]. Proceedings of the Mississippi River Research Consortium, 36 (1/2).
- Lenat D, Crawford J. 1994. Effects of land use on water quality and aquatic biota of three North Carolina Piedmont streams [J]. Hydrobiologia, 294:185-199.
- Ludwig T, Bezirksamt W. 2001. Trout 2010-Restructuring Urban Brooks with engaged Citizens, The Netherlands 2000, ECRR and RIZA[J]//Nijland H, Cals M J R. River Restoration Proceedings of the Conference on River Restoration, Wageningen, ECRR and RIZA. RIZA report nr. , 023: 231-237.
- Malakoff D. 2004. Profile: Dave Rosgen;The river doctor[J]. Science, 305:937-939.
- Malmqvist B, Rundle S. 2002. Threats to the running water ecosystems of the world [J]. Environmental Conservation, 29.
- Miseki, Takazawa. 1993. Project for creation of river rich in nature-towards a richer environment in towns and on water-sides [J]. Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering (special issues), (4):86-87.
- Nakamura K, Tockner K. 2004. River and Wetland Restoration in Japan [C]. 3rd European Conference on River Restoration.
- NAKAMURA K. 2008. River restoration efforts in Japan: overview and perspective.
- Nienhuis P H and Leuven R S E W. 2001. River restoration and flood protection: Controversy or synergism? [J]. Hydrobiologia, 444:85-99.
- Nijland H J, Cals M J R. 2000. River restoration in Europe - practical approaches [C]. Conference on river restoration proceedings.
- Palmer M A, et al. 2005. Standards for ecologically successful river restoration [J]. Journal of Applied Ecology, 42:208-217.
- Paul M J, Meyer J L. 2001. Streams in the urban landscape [J]. Annual Review of Ecological Systems, 32: 333-365.
- Pitt R, Bozeman M. 1982. Sources of Urban Runoff Pollution and its Effects on an Urban Creek [J]. US-EPA.
- Plafkin J L, Barbour M T, et al. 1989. Rapid bioassessment protocols for use in streams and rivers: benthic macroinvertebrates and fish [J]. EPA/444/4-89-001. U. S. Environmental protection Agency, Office of Water, Washington.

Shields F D Jr. , Knight Scott. 2003. Ten Years After; Stream Habitat Restoration Project in Retrospect [C]. Proceedings, World Water&Environmental Resources Congress 2003, Philadelphia, P A. Reston, VA; the American Society of Civil Engineers.

Shields F D, Cooper C M, Knight S S, et al .2003. Stream corridor restoration research: A long and winding road[J]. Ecological Engineering, 20;441 – 454.

Soballe D M, Wasley D M. 2004. Effects of flood timing and spatial distribution on nitrate export from the upper Mississippi Basin[C]. Proceedings of the Mississippi River Research Consortium, 36(1/2).

Tockner K, Stanford J A. 2002. Riverine flood plains: present state and future trends [J]. Environmental Conservation, 29.

Udziela M K. 1997. Contingent Valuation of an Urban Salt Marsh Restoration [J]. Yale F & ES Bullutin,100: 41 – 60.

Walsh C J, Sharpe A K, Breen P F, et al. 2001. Effects of urbanization on streams of the Melbourne region, Victoria, Australia [J]. Freshwater Biology, 46: 535 – 551.

Woolsey S, Capelli F, Gonser T O M, et al. 2007. A strategy to assess river restoration success [J]. Freshwater Biology, 52:752 – 769.

(责任编辑 杨春艳)