

吴明豪, 刘志成, 李豪, 吴竑. 景观水文视角下的城市河流生态修复：以洛杉矶河复兴为例 [J]. 风景园林, 2020, 27 (8): 35-41.

景观水文视角下的城市河流生态修复——以洛杉矶河复兴为例

Urban River Ecological Restoration from the Landscape Hydrology Perspective: A Case Study of the Los Angeles River Revitalization

吴明豪 刘志成 李豪 吴竑*
WU Minghao, LIU Zhicheng, LI Hao, WU Hong*



中图分类号: TU986
文献标识码: A
文章编号: 1673-1530(2020)08-0035-07
DOI: 10.14085/j.fjyl.2020.08.0035.07
收稿日期: 2020-04-15
修回日期: 2020-06-16

吴明豪 / 男 / 北京林业大学园林学院在读博士研究生 / 美国宾夕法尼亚州立大学访问博士生 / 研究方向为风景园林规划与设计、城市河流景观、城市河流生态修复
WU Minghao is a Ph.D. candidate in the School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, and a visiting Ph.D. candidate of The Pennsylvania State University. His research focuses on landscape planning and design, urban river landscape, and urban river ecological restoration.

刘志成 / 男 / 博士 / 北京林业大学园林学院副院长、教授、博士生导师 / 本刊社长 / 研究方向为风景园林规划与设计
LIU Zhicheng, Ph.D., is associate dean, professor, and Ph.D. supervisor in the School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, and the president of this journal. His research focuses on landscape planning and design.

李豪 / 男 / 北京林业大学园林学院在读硕士研究生 / 研究方向为风景园林规划与设计、城市河流景观、城市河流生态修复
LI Hao is a master student in the School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University. His research focuses on landscape planning and design, urban river landscape, and urban river ecological restoration.

吴竑 / 女 / 博士 / 美国宾夕法尼亚州立大学景观学系助理教授 / 研究方向为城市可持续发展、流域管理、绿色基础设施、景观绩效及社会生态系统
通信作者邮箱 (Corresponding author Email): huw24@psu.edu
WU Hong, Ph.D., is an assistant professor in the Department of Landscape Architecture, The Pennsylvania State University. Her research focuses on urban sustainability, watershed management, green infrastructure, landscape performance and social-ecological systems.

摘要: 河流生态系统退化问题近几十年来受到全球广泛关注, 城市河流复兴运动自 20 世纪 90 年代起全面展开。河流生态修复离不开流域景观水文的恢复, 引入功能流量概念恢复河流关键生态过程, 是城市现实挑战下河流生态修复的最佳途径。针对中国河流修复中对河流生态系统整体结构和功能的研究和实践均很匮乏的现状, 以几乎完全渠化的美国加利福尼亚州洛杉矶河为例, 解析其过去 20 余年间 3 项主要复兴规划和研究成果, 重点讨论与河流生态系统修复, 尤其是水文恢复直接相关的规划与研究内容, 包括河道防洪保障、区域生态系统构建、具体生态恢复策略以及远期生态流量研究等, 并为中国 (尤其是北方干旱地区) 城市河流的生态修复工作提供有关规划尺度、技术支持及协调管理机制 3 方面的借鉴经验。

关键词: 景观水文; 河流生态恢复; 流域恢复; 水文情势; 功能流量; 城市河流; 洛杉矶河

基金项目: 国家科技重大专项独立课题 (编号 2018ZX07101005)

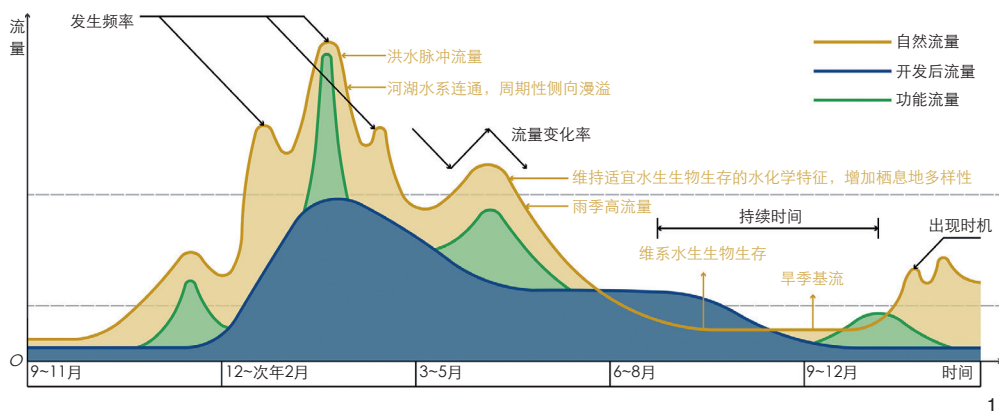
Abstract: The deterioration of river ecosystems has attracted worldwide attention in recent decades, and the urban river revitalization campaign has been launched since the 1990s. Successful river ecological restoration is inseparable from the restoration of landscape hydrology at the watershed scale. Applying the concept of "functional flows" to restore the essential ecological processes may be the best option under the current challenging urban situations of China. In view of the lack of research and practice to restore the overall structure and function of river ecosystems in China, this study analyzed three planning and research projects of almost entirely channelized Los Angeles River in California, USA, during the past two decades. In this process, we focused on the stream ecosystem restoration, hydrological restoration in particular, including flood protection, establishment of regional ecosystem, specific ecological restoration measures, and long-term ecological flow study. We concluded with implications in following three aspects: the planning scale, technical support, and collaborative mechanism for urban river restoration in China, especially for the arid northern region.

Keywords: landscape hydrology; river ecological restoration; watershed restoration; flow regime; functional flow; urban river; Los Angeles River

Fund Item: National Science and Technology Major Project (No. 2018ZX07101005)

近几十年来, 由人类活动引起的河流退化问题引起了各国普遍关注, 河流生态修复实践自 20 世纪 90 年代起在全球范围内广泛开展^{[1][43]}。1992 年美国国家研究委员会 (National Research Council) 将河流恢复 (restoration) 定义为“将河流生态系统重塑

至接近其受干扰前的状态”, 其关键在于水生态系统功能及相关物理、化学和生物特性的修复^[2]。美国和欧洲各国 (如英国、德国、瑞士等) 的河流生态修复研究和实践较为领先^[3], 经过数十年探索, 其研究内容已由水质治理、河道改造、河岸修复逐渐拓



1 城市河流恢复应力求恢复功能流量——维持关键地貌、生态或生物地球化学过程的流量^[20]
Urban river restoration should manage to restore functional flows that sustains critical geomorphic, ecological and biogeochemical processes^[20]

展至河流-河漫滩连通性恢复、河内栖息地恢复、生态流量调节、洄游鱼类保护、流域雨水管理等，修复尺度也逐渐由河道本身扩展到整个流域^{[11][4]}。

中国河流生态修复起步较晚，早期研究和实践着重于治理河道污染^[4-5]、修整和绿化河岸等，近年来在滨水区开放空间系统规划和景观设计等领域取得显著进展，包括河道近自然化设计^[6-7]、结合流域自然水文循环的河流防洪规划^[8]、河流风景及文化价值保护^[9]等内容。然而针对河流生态系统整体结构和功能的研究还很匮乏^[10]；从景观的整体视角理解水文和生态现象，并引以为依据恢复城市河流的实践进展甚微^{[11][6]}。例如上海苏州河^[12]，北京菖蒲河、转河^[13]等治理工程，虽然其政府专家主导发展的驱动模式使水质和滨水景观得到了快速提升，但仍处于以工程学思维为主导的“治水”阶段，未跨入整体提升河流生态系统功能的阶段，尚未贯彻以可持续的内生生态动力来提升滨水空间综合价值的理念。本底生态、水文等数据不足，各学科（气候、地貌、水文、水力、生态、工程、规划设计等）之间合作交流有限，河流管理协调体制缺失等，都是限制河流生态修复进展的主要因素^{[14][15]}。

近30年来，美国城市和郊野河流修复项目呈指数级增长^[16]，较成功的大尺度生态修复案例包括佛罗里达州基西米河、密西西比河上游修复等；综合型城市河流修复案例则有休斯敦市白鸥绿道规划，芝加哥河、纽约市哈德逊河复兴等。笔者选取加利福尼亚州的

洛杉矶河（Los Angeles River）为例对其修复过程进行分析，主要因为修复前其与中国许多北方城市河流高度相似，城市开发度及河道渠化度高，日常流量很小甚至没有，且多为污水处理厂出流和雨水径流，水质恶化，植被退化，生态系统破坏严重，河流与公众生活割裂，历史、文化和社会价值丧失^[17]。笔者以景观水文视角解读河流生态系统修复重要理论，归纳自20世纪90年代起洛杉矶河的各项规划和研究，尤其是恢复河流水文和生态系统健康的措施和途径，有利于推动景观风貌与河流水文、生态功能的一体化研究^{[11][6]}，并为中国高度城市化背景下的河流修复实践提供借鉴经验。

1 结合景观水文理念恢复河流生态系统

河流的生态系统健康状况由水文情势（flow regime）、河道地貌、水温、水质、栖息地结构、各生物间的相互作用等众多因素共同决定^[18]。水文情势指河流各水文要素随时空的变化情况，是决定河流生态系统健康状况的主变量（master variable）^{[19][77]}。水文情势的5个要素，即流量（magnitude）、频率（frequency）、持续时间（duration）、时机（timing）及变化率（rate of change），均与生态过程紧密相关^{[19][77]}（图1）。例如，旱季基流（baseflow）是维系大部分水生生物和常年淹没的河滨植物生存的基本条件^[21]。洪水脉冲流量（high flow pulses）促进水系连通，为河漫滩输送营养物质，塑造动态栖息地，并为鱼卵漂流、植物种子扩散等提供适宜的水流条件^[22]。

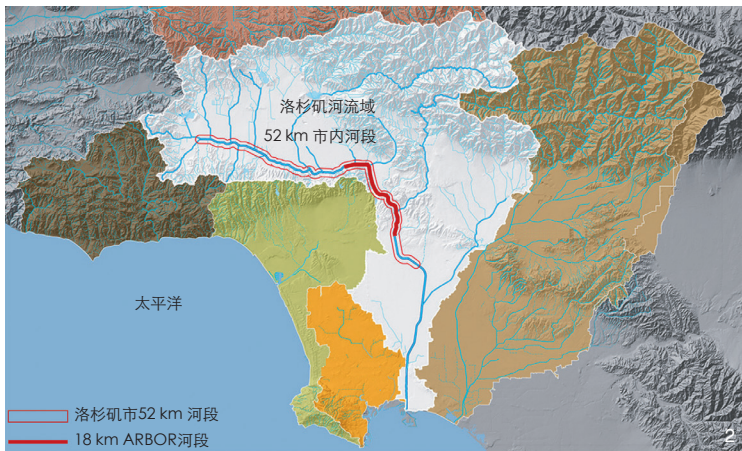
水文事件的频率和持续时间同样重要，如过度频发的洪水易造成对底栖生物的过度干扰，而持续过久的干旱则可能导致水生生态系统向陆生生态系统不可逆的演替^[23]。水文事件的时机则常与水生生物的繁殖行为相关，如洄游鱼类常于雨季河水开始上涨时前往大河产卵，雨季时机的过大偏差会对种群繁衍产生深远影响^[24]。本质上，河流的水文过程对维系河流及河漫滩生态系统功能至关重要。

然而，大多数城市河流的水文情势在城市化、水利工程等影响下已经发生了根本性改变，如年最大洪水流量剧增、高流量事件更为频发、断流时间延长、雨季较产卵季提前、流量变化率加快等^[25]。水文变化与其他因素如水温升高、水质恶化等共同作用，加剧了河流生态系统的退化。由于河流水文的恢复本质上依赖于整个流域的生态修复，在开发度高、城市与河流生态用水存在严重竞争的流域，将水文情势恢复至城市化前的状态已不再现实。因此，应尽最大可能恢复河流的“功能流量”（functional flows，图1），即维持关键地貌、生态或生物地球化学过程的流量，以部分恢复河流生态功能^[26]。

河流是其流域的产物^[27]，景观与水文密不可分。一方面自然水文过程对流域景观演变、形态结构、系统功能等发挥着根本影响，另一方面任何地区的景观转化都会改变该区域的水文状态。因此，河流恢复不是简单地重塑河道自然形态，而应基于景观水文理念^{[11][6]}，理解河流演变与各驱动力之间的关系，结合流域尺度水资源综合管理（如水库流量管理、雨洪管理等）^[28-30]、景观规划设计（如土地利用规划、低影响开发设计）、河流廊道生态连通性恢复^[31-32]及河内栖息地修复等措施，恢复关键生态过程和功能^[33]。

2 从生命之源到城市伤痕

洛杉矶河全长约82 km，流域面积2 253 km²（图2），在加州夏季炎热干燥、冬季温和多雨的条件下形成了典型的地中海气候型河流^[35]特征，年内流量高度动态变化，夏季大部分时间断流，冬季则频发使河流频繁改道的山洪，城市开发前河漫滩内遍布沼泽，呈典型



3



4

2 洛衫矶河流域、52 km 市内河段及 18 km 重点修复 ARBOR 河段^{[34][52]}
The Los Angeles River Basin, the 52 km river reach in Los Angeles City, and the 18 km ARBOR reach as the focus area of ecological restoration^{[34][52]}
3 1931 年渠化前（3-1）及 2010 年渠化后（3-2）的洛衫矶河
The Los Angeles River before^[36] (3-1, c.a. 1931) and after channelization^[37] (3-2, ca. 2010)
4 生态系统修复功能目标及实施策略^{[37][3-418]}
Expected functions of Los Angeles River ecosystem restoration and implementation strategies^{[37][3-418]}

的辫状河流形态（图 3-1）。尽管其变化无常，洛衫矶河作为南加州少数全年有水的河流之一，决定了人类早期聚落的选址。随着洛衫矶市逐渐发展为美国第二大城市，河流洪泛区被大幅开发，洛衫矶河几乎全部的地表流被上游水库截断，地下水也遭到过度开采。此外，雨季的灾难性山洪迫使早期城市对河流进行工程化改造。20 世纪 30—60 年代，美国陆军工程兵团（U.S. Army Corp of Engineers，简称 USACE）建造了大量高容水库，并将洛衫矶河几乎全线拉直，将其限制在混凝土堤岸和河床中（图 3-2）。缺水、生态恶化及与公众生活的完全割裂使洛衫矶河成为城市对自然极端掠夺和改造的象征。

在全球城市河流复兴运动的大趋势下，洛衫矶河修复工作自 20 世纪 90 年代起正式启动^[36]，从联邦到各级市县政府和机构都有不同程度的参与。这项庞大的系统性工程除修复和连接生态系统之外，还包括复兴社区、保护文化遗产、增加休闲机会、提供公众健康福祉等多层面社会、经济目标^{[34][27]}（图 4）。笔者将重点讨论与河流生态系统修复相关的规划和研究工作，主要包括：1）1997—2007 年间出台的洛衫矶河复兴总体规划（Los

Angeles River Revitalization Master Plan，简称 LARRMP）^[34]，规划范围为位于洛衫矶市内的 52 km 河段（图 2）；2）2007—2015 年间评估各子河段具体生态修复策略的综合可行性报告（Integrated Feasibility Report，简称 IFR）^[37]，研究范围缩减为 18 km 具有高度恢复利益和潜力的河段（Area with Restoration Benefits and Opportunities for Revitalization，简称 ARBOR，图 2）；3）2016 年至今的远期生态流量研究^[38-39]。

3 生态修复策略与工程技术措施

3.1 流域尺度修复策略

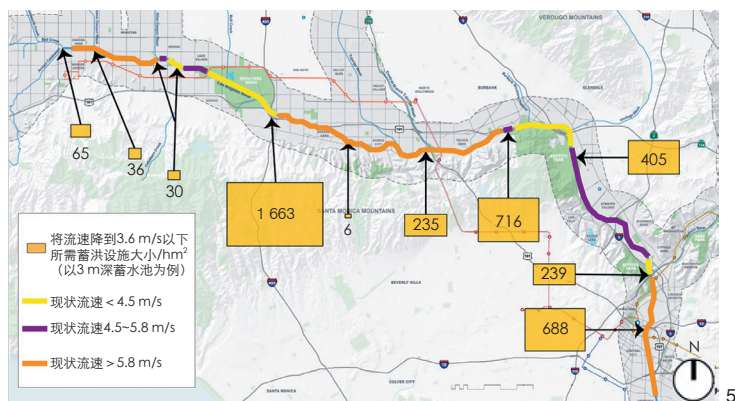
规划在流域尺度的主要内容是协调洛衫矶河防洪功能和生态功能的关系，针对各河段的具体情况制定最优的修复策略，包括统一计算各河段蓄洪容量，设置蓄洪设施，保障河道防洪需求；恢复河道与周边区域的连接，构建区域生态系统。

3.1.1 保障河道防洪需求

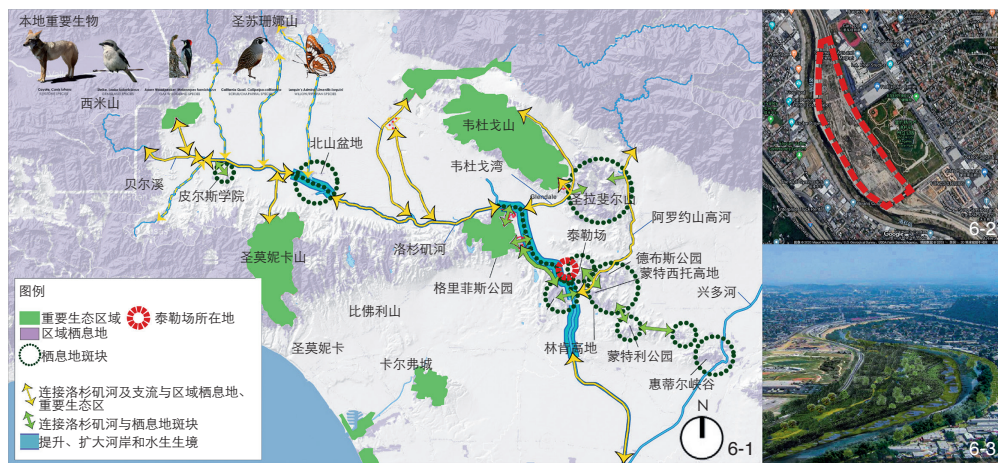
洛衫矶河水文修复的总体目标是在不影响河道行洪能力的前提下，形成更自然的水文状态以支持河流生态的远期恢复。LARRMP 中最早的研究是针对防洪策略展开的，首先对当前水流状态进行分析，得出洛

衫矶河每年 90%~95% 的时间水深不足 0.6 m，旱季基流不足 0.03 m³/s，4%~9% 的时间水深为 0.6~1.2 m；其余 1% 时间面临洪水威胁，历史最高流量可达 5 100 m³/s，暴雨时最高河道流速可达 10 m/s^[40]。剧烈变化的水文情势无法满足水生态系统需求，且雨季时的高流速条件使得多河段内植物无法稳定生长。

保障蓄洪容量和控制河水流速这 2 个与水力相关的重要考量决定了 LARRMP 中具体的河道改造策略^{[34][39]}。1）河道绿化或对河岸进行梯级式改造等策略虽然可以改善生态系统状况并提高河道游憩价值，但均会削减河道蓄洪容量。除在上游广泛实施雨水控制措施以减少洪水入流外，可采取扩宽或加深河道，或建造地下箱式涵洞将洪流输送到河道之外等措施来保障防洪安全（图 5）^{[34][39]}。河内植被类型也对蓄洪能力产生影响，如以木本植被为主的河段对洪水的滞碍作用更大，比以草本为主的河段所需的附加蓄洪容量更多^{[34][39]}。因此，规划应在生态和蓄洪功能之间仔细权衡，基于各河段的具体情况制定最优化的策略组合。2）控制河水流速对于保障河道结构完整性和植被稳定性至为关键。根据 USACE《防洪河道水力设计导则》^[41]，为维持河内植物生长，河水流速



5 现状流速及所需蓄洪设施的位置和大小^{[34]38}
Existing flow velocities and locations and estimated areas of flood storage facilities^{[34]38}
6-1 提高栖息地连接性的理想区域^{[34]44}
Desirable areas to improve habitat connectivity^{[34]44}
6-2 泰勒场邻河 17 hm² 土地已被收购以连接河道和毗邻的州立公园
17 hm² of the Taylor Yard purchased to reestablish connection to adjacent state park
6-3 泰勒场拟建公园效果^{[37]1}
Park to be constructed at Taylor Yard^{[37]1}
7 方案 20 的生态恢复措施（以子河段 6~8 为例）^{[37]v2-108}
Ecological restoration measures in Alternative 20 (Reaches 6-8)^{[37]v2-108}



的后工业废弃地泰勒场，图 6-2、6-3）^{[34]45}。

3.2 具体子河段生态修复策略

2007—2015 年间制定的综合可行性报告^{[39]v1-26}将生态恢复重点范围定为前文提及的 18 km ARBOR 河段，以恢复滨河及淡水沼泽栖息地和增加其连接性为最重要目标，对 8 个子河段（编号 1~8）进行具体生态策略研究。首先通过专家工作营及公众参与遴选出数类生态恢复策略——蓄洪、软化及重塑河道，改造支流，提供野生动物通道及种植等，并筛选出 22 项具体措施^②。继而依子河段具体情况将各措施组合成 19 种初步方案，经专家研讨和公众意见征集后制定出 5 种候选方案（Alternatives 10、13、13v、16、20）^③，并对其进行环境、社会、经济效益等多层面的比较^④。洛杉矶市最终将纳入较多河道重塑措施、水文连接性较高的方案 20 定为“本地优选方案”实施（图 7）。下文对各类具体生态恢复策略进行解读。

3.2.1 蓄洪

为保障河道蓄洪能力和植被稳定性，首先对 5 个候选方案下的河水流速和水面高度进行了模拟^⑤。模拟显示：1）所有方案下局部（尤其是下游）子河段流速仍将超过 3.6 m/s，这些河段不建议种植，并且应对任何最大流速高于 2.4 m/s 的河段进行工程化防护，依据冲刷和沉积分析选择合理材料和措施。另外可允许部分植被在 50 年一遇以上洪水条件下被冲刷掉，这符合河流自然进程^{[37]v1-181}。2）所有方案下大部分子河段水面高度可维持在现状水平以下，但局部河段，尤其是河流交叉口和河道材料发生转变的区域（如硬质和软质河底交接处），水面高度可能会上升。这些河段

不应超过 1.8~2.4 m/s。由于目前洛杉矶河多河段流速达 6~9 m/s，规划将 3.6 m/s 定为主河道最大流速，2.4 m/s 为远期理想流速^{[37]v1-181}。继而通过水力模型计算出所需蓄洪设施的位置和大小（图 5）^{[34]38}，以求在 50 年一遇洪水条件下，在没有任何其他河道内或上游措施的情况下，将大部分子河段流速维持在 3.6 m/s 以下，保障河道植被稳定性^{[34]64}。

3.1.2 区域生态系统构建

基于上述研究中对流域重要生态区域（significant ecological areas，简称 SEA）、重要栖

息地类型及物种的认定，82 km 已渠化河道是恢复区域生态系统连接性的最关键瓶颈^{[37]v1-46}。因此 LARRMP 对应建立连接的理想栖息地进行了规划（图 6-1），在现存区域尺度生态修复项目^①的基础上，进一步恢复河道与各 SEA 的连接；此外，应修复和扩建仅存的滨河和沼泽栖息地（如主河道与各支流的交叉口），并重点保护受威胁物种的栖息地^{[37]v1-338}。LARRMP 还提出以多种形式（如栖息地公园、自然式公共空间、休闲设施等）共 240 多个具体项目修复并连接河道与周边高潜力区域（如沿河最大

须加强维护管理，以河道扩容为主，减少种植，必要时对自生植被进行移除^{[37]v1-191}。

依据模拟结果，应结合以下 4 种措施提升河道蓄洪能力：1) 建立地下蓄洪池以减少河道内洪水流量；2) 使用地下隧道将主河道峰流引入下游指定蓄洪区；3) 在上游和河道外恢复湿地以截留雨水径流，连接湿地与主河道，结合湿地创造蓄洪空间；4) 利用新建的支流或滨河蓄洪区分流主河道或支流河水。

3.2.2 软化及重塑河道

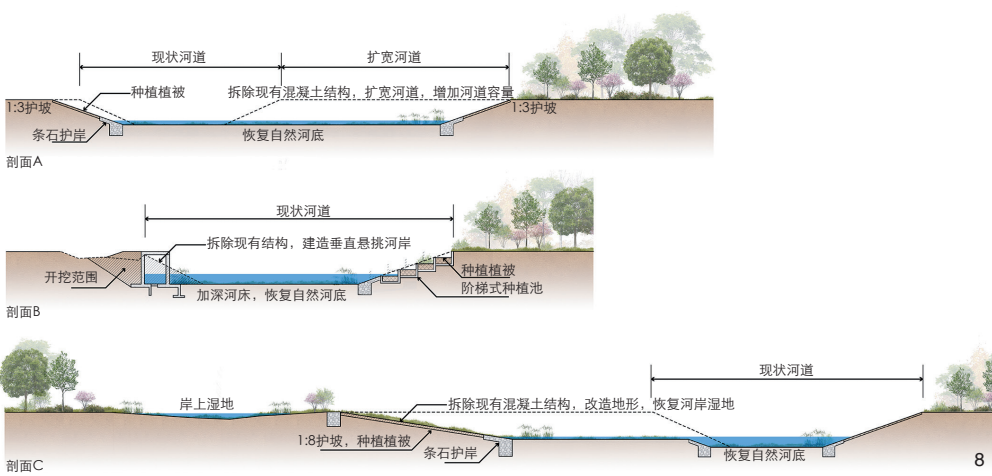
为重塑河内栖息地，应移除混凝土河底，创造软质河床，必要时减缓河底坡度及河水流速，以维护河床稳定。在用地充足的河段降低和拓宽河岸以增加栖息地；而针对须扩容却用地紧张的河段，可在软化河底后将坡形河岸改为以爬藤植物覆盖的垂直河岸，以拓宽河床宽度；在须增加交通连接的河段可建造悬挑式河岸。

3.2.3 改造支流及临河区域

支流改造是恢复河道整体生态连通性的重要举措。为修复和扩建仅存的重要沼泽栖息地（常位于主河道与支流交叉口），应在移除混凝土河底后，塑造高低起伏的河底地形，将水深控制在 2 m 以下，并依推荐湿地植物列表进行种植。针对河道内原有开放水面，可增加深度以形成水深大于 2 m 的开阔水面栖息地。此外，为形成河流－河漫滩栖息地，应在适宜河段降低临河区域高程，塑造缓坡（坡度 <3 : 1）或阶梯式河岸，并依照挺水—河岸的植物群落梯度进行种植。对于闲置的滨河工业用地，应在棕地清理后塑造种植式缓坡或阶梯式河岸。最后，应将已成为暗沟的支流恢复为明渠，在适宜区域恢复湿地，将雨水管入河口改道连接至恢复后的明渠和湿地，结合湿地改良水质并提供栖息地。

3.2.4 提供野生动物通道

建造野生动物通道对恢复河道与流域重要生态区域的生态联系至为重要，可结合以下 4 种措施提升河道生物可达性：1) 根据各类野生动物需求改造桥下穿越空间；2) 移除雨水管及其他地下涵洞，或对其剖面进行改造（如增加断面面积等），使野生动物能够顺利进入河流廊道；3) 将河岸坡度降至 3 : 1 以



8 不同周边用地潜力下适用的子河段生态恢复措施^{[37]v2-30-68}
Ecological restoration measures for reaches with various land use potential^{[37]v2-30-68}

下，以便野生动物在河流廊道内迁移；4) 在适宜地点建造跨越河流或其他障碍的野生动物生态桥。

3.2.5 种植

上文已提及应依推荐植被列表对沼泽栖息地、河岸—河漫滩过渡区进行种植，并以多种方式尽最大可能绿化河岸（如阶梯式河岸种植箱、垂直绿化等）。除此之外，应在种植前最大程度（清除度 >90%）清除现有的入侵植物和垃圾；新的种植应采用本土物种，并形成 2~3 层（乔灌木）植被结构；还应在人类活动区和修复区之间提供与周围生态系统相一致的植被缓冲区。总体种植目标为将主河道和支流廊道内的乔木和灌木数量分别恢复为城市开发前 50% 的水平。

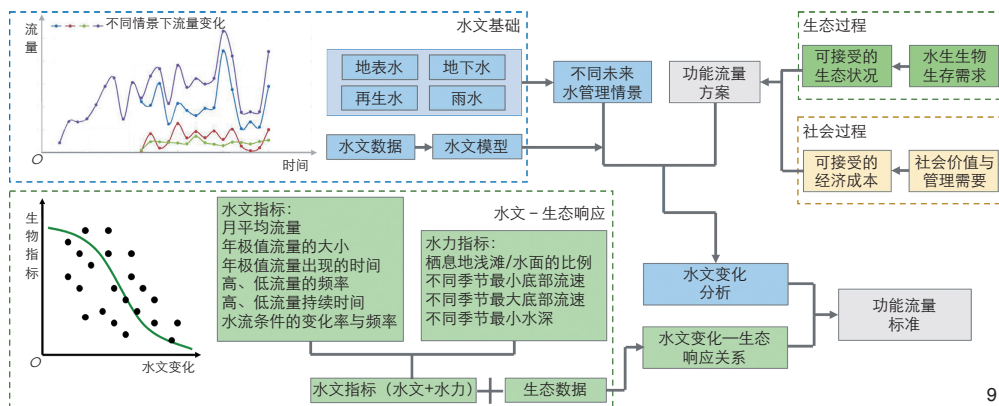
为具体解释各生态恢复措施如何实施于不同河段，规划对各子河段的关键剖面进行了数轮概念性设计。图 8 以河道周边用地潜力一般、较低或很高 3 种情形为例，展示可能实施的恢复措施。剖面 A 中以常见的河道重塑方式最大限度拓宽河道，并将驳岸改造为植被覆盖的 3 : 1 斜坡。剖面 B 中在用地有限的河段建造带有种植池的阶梯式河岸；如需进一步扩大蓄洪能力并维持交通联系，可建造垂直挡土墙形成悬挑式河岸。剖面 C 适用于用地宽裕的河段，可对邻近土地进行开挖，重塑鹅卵石河床以恢复河内淡水沼泽栖息地；如条件允许，可进一步恢复河道周边

湿地，并以支渠将湿地与主河道相连。

4 远期生态流量研究

为实现远期部分恢复河流自然水文情势的目标，加州各级水资源委员会、市县府及土地保护机构开展了 2 轮河流生态流量研究。2016—2018 年间的首轮研究以《同一个水世界——洛杉矶 2040 规划》（*One Water LA 2040 Plan*^[38]）为基础，衡量在未来区域水资源综合管理的情景下（如加大再生水回用力度等），如何应对河流流量（尤其是旱季低流量）的进一步减少，评估 ARBOR 河段可能出现的宽度、深度及流速变化，未来所需流量，以及如何维持其理想水位等^{[38]18}。

2018 年底至今的第二轮生态流量研究^{[39]1}旨在为制定远期流量管理方案提供技术依据。在对未来区域水资源管理及栖息地恢复情景、社会需求及生态系统需求进行综合考量后，以水文模拟和监测为手段制定最终生态流量标准（图 9）^[42]。1) 未来情景：考虑了各污水处理厂不同百分比再生水回用、各类雨水径流截流策略及对不同生态关键河段进行栖息地修复等情景；2) 社会需求：总结休闲、钓鱼、划船等“非水生生物有益用途”（non-aquatic life beneficial uses）的类型及热点区域，按季节和河段制定水深、水速及最小流量等标准；3) 生态系统需求：选择须重点保护或恢复的物种及栖息地类型，归纳现状栖息地



9 2018—2020洛杉矶河流量研究技术方法^[42]
Methods of Los Angeles River flow study (2018–2020)^[42]

位置及各物种全生命周期需求（季节、温度、栖息地类型、河道坡度、河床材料、水深、植被等），继而按季节和河段量化各物种的流量需求。基于现有水文、生态数据建立耦合模型，确定关键水文、水力参数及水文-生态响应关系^[43]⑥，模拟得出各流量方案与保护物种出现概率之间的关系。根据社会和水生生态系统需求依子河段和季节整合各关键水文事件的流量、频率、持续时间、时机和变化率的建议变化范围。

5 结论与借鉴

洛杉矶河复兴是在高度城市化环境下，对几乎完全渠化的城市河流进行的系统性生态修复工程，其内容庞大，目标多样。LARRMP中拟用5~15年的时间增加游憩空间，改善河道可达性和水质；而用25~40年甚至更久的时间来恢复河流自然功能，并将洛杉矶河建设为美国最长的城市绿道之一。在多方面挑战下，项目至今仅完成了沿河慢行交通和几个社区公园的建设，大型修复项目仍处在概念阶段。尽管如此，其规划研究方法及实施经验教训仍可为中国城市河流的生态修复工作提供借鉴，主要包括3个方面。

1) 河流生态功能的恢复离不开流域尺度的生态修复，景观风貌与水文特征的一体化研究，是河流修复研究的根本途径。洛杉矶河复兴将规划范围扩展到整个流域，强调对上游地区及支流的保护和修复，建立河流与流域内自然区域的联系，并对河道周边每个

汇水区的雨水径流都设置了管理要求。目前中国河流修复主要针对河道及河道外扩5 km的范围，关注项目的经济、社会和文化价值，而对河道本身生态功能的修复重视不足，采用自然式设计途径引导生态系统修复的做法还很缺乏，在建成区恢复河道与流域内重要自然区域连接的做法也很罕见。全国尺度的海绵城市建设虽可为大尺度流域生态修复提供重要契机，但其初期主要关注减轻水涝、改善水质2个方面，远期目标还应逐渐转化至全面改善流域生态系统功能、带动区域经济发展和提高社会、文化价值等综合性目标。

2) 翔实的基础数据与多学科合作是解决城市河流修复中复杂问题的基础。洛杉矶河规划团队基于长期气象、水文、水力、水质、地貌、生物及社会经济等数据，采用水文水力模拟、远景规划等方法，为选择具体实施方案提供有力的科学支持。目前中国许多地区仍处于基础数据采集的初级阶段，长期气象及河流水文资料普遍缺乏，与水文相匹配的河流生态数据则更为罕见，且数据时效性和信息化程度低，难以科学有效地支撑研究和实践。长期水文资料的短缺导致对河流自然水文情势认知不足，而生态数据的匮乏则造成无法对水文-生态响应关系进行分析，功能生态流量的研究和实施因此而难以开展。即便上游水库或其他水源有能力为河流分流，也难以保证流量补给方案能够达到预期的生态效应。这需要各高校、研究机构和管理部门积极合作，采用勘察、监测、访问调查和

历史资料收集等多种手段，对目标河流进行长期、全面的数据收集和分析。另外，也可将气候地理条件相近的自然、半自然河流作为参照来制定适当的城市河流修复目标。最后，生态修复项目一旦实施，应对其进行水文和生态监测，评估流量方案是否实现了预定的生态目标，依此对远期环境流量进行适应性管理。

3) 河流修复项目的实施与保障离不开长期、跨机构的协调管理。尽管洛杉矶河规划最初已对管理框架、资金来源等保障条件做了详细架构，但资金、项目协调及公众参与等挑战仍使项目进展十分缓慢。由于整个流域涉及66个联邦、州、县、市级机构和社会组织，各利益相关方之间的矛盾频繁出现，多部门间的沟通协作以及公众支持对保障项目顺利推行至关重要。中国也存在河道管理职责重叠，各机构目标不尽相同的情况，也许可以在统一的管理框架和指导原则下形成规划的协调机制（如由各主要部门的代表组成协调委员会）和综合性项目评价标准等，以进一步推动流域尺度下环境、社会和经济等综合目标的实现。

目前中国已设立《环境保护法》《水污染防治法》等与河流管理相关的法律，也制定了《河湖生态保护与修复规划导则》，为河流修复提供技术支撑，国内各重点河流规划项目中已体现出由河道单一目标到流域综合目标的转变，在法规、技术和实践层面均建立了一定基础。未来需要将防洪、水文、水力、水生态等领域的科学研究与规划设计专业的实践相结合，建立多学科交叉的协作机制以深入科学认识，推动风景园林、城市规划设计等行业以更科学和理性的方式来处理水的问题。

致谢 (Acknowledgments):

感谢国家留学基金提供美国宾夕法尼亚州立大学访学资助。

注释 (Notes):

① 现存区域尺度生态修复项目包括阿罗约河生态系统修复可行性研究 (Arroyo Seco Ecosystem Restoration Feasibility Study)、渠首水库持续运行项目修复研究 (Headworks Continuing Authority Program Restoration Study)、图俊加湾生态恢复工程 (Tujunga Wash Ecosystem Restoration Project) 及太阳谷生态系统修复可行性研究 (Sun Valley Ecosystem Restoration Feasibility Study)。

② 措施筛选标准：直接服务于复兴规划的总体目标，合理应对各地场的特殊限制条件，技术和经济上可行，并能高效地达到恢复滨河和淡水沼泽栖息地及增加栖息地连接性这 2 项最重要的绩效指标。

③ 5 种候选方案简述：A 方案 10——河岸改造，着重对现状为软质河床的子河段上下游进行全面河岸改造，其他子河段（即 3、4 和 5）仅进行有限改造；B 方案 13——河流廊道扩展，对全部子河段进行改造，着重加强河道与市中心的联系；C 方案 13v——在方案 13 的基础上对子河段 7 实施额外的修复和连接；D 方案 16——对全部子河段以及子河段 7、8 的外围区域进行改造，其中子河段 1~4 的改造同前述方案，并对子河段 5 进行扩宽；E 方案 20——河流综合改造，对所有子河段的河岸和河道进行改造，并对子河段的 3、6、7、8 的外围区域进行改造。

④ 比较了各候选方案的成本（初期建设、贷款利息、后期管理等），生态系统修复效益（修复后栖息地总数量、栖息地数量的增长程度），生态系统连通性（增加的重要生态区域、流域尺度总修复面积等），环境影响（施工、交通、噪声、温室气体排放等）及社会效益（公众健康、娱乐机会、社会公平等）等。

⑤ 模拟采用 USACE 开发的 HEC-RAS（River Analysis System computer program from Hydrologic Engineering Center）模型，模拟了 4 种未来河道植被前景、6 种不同流量条件下的流速和水面高度。4 种植被前景包括：A 河道内及岸坡植被量适中，河道外邻近区域植被量大；B 河道内植被量少，岸坡植被量适中，河道外邻近区域植被量大；C 河道内植被量适中，岸坡及河道外邻近区域植被量少；D 河道内、岸坡及河道外邻近区域植被量均较大。6 种流量条件包括平滩流量（bankfull flow），2 年、5 年、10 年、25 年、50 年一遇。

⑥ 水文－生态响应关系是基于长期水文生态数据分析得出的定量的生态响应（如底栖动物完整性指数变化）与水文参数变化（如高流量水文事件频率加倍）之间的关系（参见参考文献 [43]）。

参考文献 (References):

[1] 王文君, 黄道明. 国内外河流生态修复研究进展 [J]. 水生态学杂志, 2012, 33 (4) : 142-146.
[2] National Research Council. Restoration of Aquatic Ecosystems: Science, Technology, and Public Policy[M]. Washington D.C.: National Academy Press, 1992.
[3] 沈振锋, 黄子纯, 周杰, 等. 基于 HistCite 的河流修复研究历史引文分析 [J]. 水生态学杂志, 2019, 40 (3) : 83-91.
[4] 董哲仁. 河流保护的发展阶段及思考 [J]. 中国水利, 2004 (17) : 5, 16-17, 32.
[5] 李兴德, 颜宏亮, 马静, 等. 污染河流生态修复研究进展 [J]. 水利科技与经济, 2011, 17 (8) : 4-6.
[6] 牛铜钢. 河流近自然化学说在河流景观规划设计中的应用 [D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
[7] 刘桂玲. 浙江省城镇近自然河道设计方法研究 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2010.
[8] 刘海龙, 俞孔坚, 詹雪梅, 等. 遵循自然过程的河流防洪规划: 以浙江台州永宁江为例 [J]. 城市环境设计, 2008 (4) : 29-33.
[9] 束晨阳. 河流风景保护: 以桂林漓江为例 [J]. 中国园林, 2007, 23 (12) : 15-18.
[10] 陈兴茹. 国内外河流生态修复相关研究进展 [J]. 水生态学杂志, 2011, 32 (5) : 122-128.
[11] 刘海龙. 景观水文: 一个整合、创新的水设计方向 [J].

中国园林, 2014, 30 (1) : 6.
[12] 王敏, 叶沁妍, 汪洁琼. 城市双修导向下滨水空间更新发展与范式转变: 苏州河与埃姆歇河的分析与启示 [J]. 中国园林, 2019, 35 (11) : 24-29.
[13] 沈来新, 邓卓智. 北京水系生态治理的理念与实践 [J]. 中国水利, 2010 (20) : 86-88, 77.
[14] 刘海龙, 周语夏, 吴书悦, 等. 基于中美比较的中国西部自然风景河流保护 [J]. 中国园林, 2019, 35 (11) : 59-64.
[15] 刘京一, 吴丹子. 国外河流生态修复的实施机制比较研究与启示 [J]. 中国园林, 2016, 32 (7) : 121-127.
[16] BERNHARDT E S, PALMER M A, ALLAN J D, et al. Synthesizing U.S. River Restoration Efforts[J]. Science, 2005, 308(5722): 636-637.
[17] 张振兴. 北方中小河流生态修复方法及案例研究 [D]. 长春: 东北师范大学, 2012.
[18] KARR J R. Defining and Measuring River Health[J]. Freshwater Biology, 1999, 41(2): 221-234.
[19] POFF N L, ALLAN J D, BAIN M B, et al. The Natural Flow Regime[J]. BioScience, 1997, 47(11): 769-784.
[20] MOUNT J, GRAY B, CHAPPELLE C, et al. Managing California's Freshwater Ecosystems: Lessons from the 2012-16 Drought[R]. San Francisco: Public Policy Institute of California, 2017.
[21] 董哲仁, 等. 河流生态修复 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013: 35.
[22] BUNN S E, ARTHINGTON A H. Basic Principles and Ecological Consequences of Altered Flow Regimes for Aquatic Biodiversity[J]. Environmental Management, 2002, 30(4): 492-507.
[23] LYTLE D A, POFF N L. Adaptation to Natural Flow Regimes[J]. Trends in Ecology and Evolution, 2004, 19(2): 94-100.
[24] FAUSCH K D, TANIGUCHI Y, NAKANO S, et al. Flood Disturbance Regimes Influence Rainbow Trout Invasion Success among Five Holarctic Regions[J]. Ecological Applications, 2001, 11(5): 1438-1455.
[25] KONRAD C P, BOOTH D B. Hydrologic Changes in Urban Streams and Their Ecological Significance[J]. American Fisheries Society Symposium, 2005, 47: 21.
[26] YARNELL S, PETTS G E, SCHMIDT J C, et al. Functional Flows in Modified Riverscapes: Hydrographs, Habitats and Opportunities[J]. Bioscience, 2015, 65(10): 963-972.
[27] PALMER M A, HONDULA K L, KOCH B J. Ecological Restoration of Streams and Rivers: Shifting Strategies and Shifting Goals[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2014, 45: 247-269.
[28] WALSH C J, FLETCHER T D, LADSON T. Stream Restoration in Urban Catchments Through Redesigning Stormwater Systems: Looking to the Catchment to Save the Stream[J]. Journal of the North American Benthological Society, 2005, 24(3): 690-705.
[29] GILVEAR D J, CASAS-MULET R, SPRAY C J. Trends and Issues in Delivery of Integrated Catchment Scale River Restoration: Lessons Learned from a National River Restoration Survey within Scotland[J]. River Research and Applications, 2012, 28(2): 234-246.
[30] RONI P, BEECHIE T. Stream and Watershed Restoration: A Guide to Restoring Riverine Processes and Habitats[M]. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2012.
[31] JUNGWIRTH M, MUHAR S, SCHMUTZ S. Re-establishing and Assessing Ecological Integrity in Riverine

Landscape[J]. Freshwater Biology, 2002,47(4): 867-887.
[32] LAKE P S, BOND N, REICH P. Linking Ecological Theory with Stream Restoration[J]. Freshwater Biology, 2007, 52(4): 597-615.
[33] KONDOLF G M. Lessons Learned from River Restoration Projects in California[J]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystem, 1998(8): 39-52.
[34] City of Los Angeles Department of Public Works, Los Angeles River Revitalization Master Plan[EB/OL]. (2007-05-03)[2020-04-29]. https://boe.lacity.org/lariverrmp/CommunityOutreach/masterplan_download.htm.
[35] KONDOLF G M, PODOLAK K, GRANTHAM T E. Restoring Mediterranean-Climate Rivers[J]. Hydrobiologia, 2013, 719: 527-545.
[36] Los Angeles County Department of Public Works, Los Angeles River Master Plan[EB/OL]. (1996-06)[2020-04-29]. <https://ladpw.org/wmd/watershed/LA/LARMP/>.
[37] U.S. Army Corps of Engineers, Los Angeles River Ecosystem Restoration Integrated Feasibility Report[EB/OL]. (2015-09)[2020-04-29]. <https://www.spl.usace.army.mil/Missions/Civil-Works/Projects-Studies/Los-Angeles-River-Ecosystem-Restoration/>.
[38] City of Los Angeles, One Water LA 2040 Plan Volume 4: LA River Flow Study[EB/OL]. (2018-04)[2020-04-29]. https://www.lacitysan.org/san/faces/home/portal/s-lsh-es/s-lsh-es-owla-s-lsh-es-owla-r/s-lsh-es-owla-r-owlap?_adf.ctrl-state=18dshe7rj0_5&_afLoop=11854751875088921#!.
[39] Los Angeles River Flow Project Stakeholder Working Group, Los Angeles River Instream Flow Criteria Technical Study Progress Report[EB/OL]. (2019-07-05)[2020-04-29]. https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/docs/lar/lar_progressreport070519.pdf.
[40] US Army Corps of Engineers, Los Angeles County Drainage Area Review Feasibility Study Report[EB/OL]. [2020-04-29]. https://eng2.lacity.org/projects/fmp/pdf/LACDA_Review_Study_Main.pdf.
[41] U.S. Army Corps of Engineers, EM1110-2-1601, Hydraulic Design of Flood Control Channels[EB/OL]. [2020-04-29]. https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-1601.pdf.
[42] Los Angeles River Flow Project Stakeholder Working Group, Meeting Presentations[EB/OL]. [2020-04-29]. <https://www.sccwrp.org/about/research-areas/ecohydrology/los-angeles-river-flows-project/>.
[43] POFF N L, RICHTER B D, ARTHINGTON A H, et al. The Ecological Limits of Hydrologic Alteration (ELOHA): A New Framework for Developing Regional Environmental Flow Standards[J]. Freshwater Biology, 2010, 55(1): 147-170.

图片来源 (Sources of Figures):

图 1 改绘自参考文献 [20]; 图 2、5 改绘自参考文献 [34]; 图 3-1 源自网络 <https://tessa.lapl.org/cdm/singleitem/collection/photos/id/27858/rec/7>; 图 3-2 源自网络 <https://www.flickr.com/photos/auntylaurie/4613811031>; 图 4、7、8 改绘自参考文献 [37]; 图 6-1 改绘自参考文献 [34]; 图 6-2 源自网络 <https://www.google.com/maps/@34.0988416,-118.246261,15z>; 图 6-3 源自参考文献 [37]; 图 9 由作者绘制，部分内容引自参考文献 [42]。

(编辑 / 刘玉霞)