



海河流域湿地栖息地 完整性恢复及保障技术

Recovery and Support Technology for Wetland
Habitat Integrity in Haihe River Basin

刘静玲 尤晓光 史璇 孟博 孙斌等/著



科学出版社

海河流域湿地栖息地完整性 恢复及保障技术

刘静玲 尤晓光 史璇 孟博 孙斌等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

针对强人为干扰下海河流域水资源短缺、栖息地恶化和生态系统退化复合环境问题,本书面向如何保障流域湿地栖息地完整性这一基础科学问题,以本领域国际最新研究成果和栖息地完整性评价模型为理论和方法支撑,探明海河流域不同时空水系构型和流量特征,进行水生态单元-水系-流域尺度下栖息地完整性评价,研究不同流量和人为胁迫对湿地栖息地完整性的影响机制,开展流域湿地栖息地研究案例分析,构建面向海河流域栖息地改善和生态恢复的保障技术。本书对多尺度栖息地完整性研究与实践具有新的启示,可为流域湿地栖息地恢复与生态系统管理提供重要的科学依据与技术支持。

本书可供环境科学、环境工程、生态学及生态水文等相关领域的水环境/水资源管理者、科技工作者、高校师生和相关技术人员参考。

审图号:GS(2018)1314号

图书在版编目(CIP)数据

海河流域湿地栖息地完整性恢复及保障技术/刘静玲等著. —北京:科学出版社, 2018.3

ISBN 978-7-03-055473-4

I. ①海… II. ①刘… III. ①海河-流域-沼泽化地-栖息地-生态恢复 IV. ①X171.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第281460号

责任编辑:张震 孟莹莹 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:吴兆东 / 封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018年3月第一次印刷 印张:14 1/4

字数:287 000

定价:99.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

2016 年是我国“十三五”的开局之年，也是围绕解决生态文明建设和环境保护重大瓶颈制约、绿色发展和生态环境法律制度密集出台的一年。在全球实施可持续发展和生态文明进程中，中国日益成为有重大影响力的推动力量。

《2030 年可持续发展议程》于 2015 年 9 月 25 日在联合国可持续发展峰会上通过，于 2016 年 1 月 1 日正式启动，确定日后 15 年实现 17 项可持续发展目标。为有效落实议程，2016 年 9 月，二十国集团（G20）承诺推进全球落实《2030 年可持续发展议程》，构建包容和可持续的未来。历经多轮谈判，框定新形势下全球气候变化基本原则和基本方向的《巴黎协定》11 月 4 日正式生效。该协定明确各缔约国在共同但有区别的责任原则下，保持全球升温控制在 2℃ 以内的长期目标。在第 22 届联合国气候大会上，全球 190 多个国家和地区积极促成有效机制的建立，确保《巴黎协定》的执行与落实。2016 年 12 月召开的联合国生物多样性大会上，全球 196 个缔约方达成 72 项决议，通过《将保护和可持续利用生物多样性纳入主流化以增进福祉的坎昆宣言》，决定建立有效制度框架、立法机制和管理体制，推动生物多样性保护成为主流趋势，增加人类福祉。

我国自国务院发布关于环境要素水、土和大气的《水污染防治行动计划》《土壤污染防治行动计划》和《大气污染防治行动计划》之后，2016 年 3 月，第十二届全国人民代表大会第四次会议表决通过《中华人民共和国国民经济和社会发展的第十三个五年规划纲要》，提出创新、协调、绿色、开放、共享五大发展理念。2016 年 12 月，国务院印发了《“十三五”生态环境保护规划》，提出了“十三五”生态环境保护的约束性指标和预期性指标，其中约束性指标 12 项；到 2020 年要实现生态环境质量总体改善。

2016 年 12 月国务院发布的《湿地保护修复制度方案》指出，湿地保护是生态文明建设的重要内容，事关国家生态安全，事关经济社会可持续发展，事关中华民族子孙后代的生存福祉。要实行湿地面积总量管控，到 2020 年，全国湿地面积不低于 8 亿亩（1 亩≈666.7 平方米），自然湿地面积不低于 7 亿亩，新增湿地面积 300 万亩，湿地保护率提高到 50% 以上。严格监管湿地用途，确保湿地面积不减少，增强湿地生态功能，维护湿地生物多样性，全面提升湿地保护与修复水平。在完善湿地分级管理体系方面，根据生态区位、生态系统功能和生物多样性，将全国湿地划分为国家重要湿地（含国际重要湿地）、地方重要湿地和一般湿地进行管理。将湿地面积、湿地保护率、湿地生态状况等保护成效指标纳入地方各级人民政府生态文明建设目标评价考核等制度体系。

海河流域湿地生态系统服务功能结构在强人为活动的作用下发生了巨大变

化,从20世纪50~60年代的调节水分、水资源供给、养分循环、干扰调节和废物处理等服务功能,总生态系统服务价值33.8547亿美元/年,到2005年主要表现为调节水分和养分循环,总生态系统服务价值5.5232亿美元/年,共减少了83.69%,其中栖息地价值减少了94.68%。

针对强人为干扰下海河流域水资源短缺、栖息地恶化和生态系统退化复合环境问题,自2000年起我带领的北京师范大学海河流域湿地生态恢复研究团队,从海河流域生态需水量研究开始,不间断地开展了系列相关研究,获得了国家级和省部级多项奖励。刘静玲教授作为我们科研团队的骨干力量,一直以来贡献了创新性的智慧。我作为刘静玲教授博士后合作导师,亲历了她及其科研团队在科学研究创新道路上的成长过程,从项目普通成员、项目骨干、创新团队成员、子课题负责人一步步成长为课题负责人。她从负责湖泊湿地生态需水量计算起步,一路不断克服困难,勇敢攀登科研高峰,秉承和发扬北京师范大学环境学院励精图治和开拓创新的科学精神,以开放包容的心态积极参与国内外相关学科领域的各种学术交流,相互切磋、共同探索、勇于创新,带领团队探索海河流域尺度不同湿地生态单元的水环境变化规律和生态风险评估,研究成果在流域湿地生态及其相关研究领域产生了一定的学术影响。在“十二五”期间,她关注流域尺度上湿地栖息地完整性这一学科前沿和热点,并与海河流域湿地生态保护与管理相结合,在理论方法创新的同时兼顾生态修复保障技术,为海河流域的湿地生态恢复与管理提供了关键的科学依据和技术支撑,为“十三五”战略层面流域湿地栖息地恢复和生态系统综合管理提供了新视角和途径。

《海河流域湿地栖息地完整性恢复及保障技术》呈现了最新的科研成果,针对如何保障流域湿地栖息地完整性这一基础科学问题,以本领域国际最新研究成果和栖息地完整性评价模型作为理论和方法支撑,以海河流域湿地生态系统为研究案例,探索海河流域不同时空水系构型和流量特征,进行水生态单元、水系和流域/子流域尺度下三维物理完整性评价,研究不同环境流量和人为胁迫对河流物理完整性的影响机制,开展流域湿地栖息地恢复的深层次机理与解决对策的研究;针对不同的湿地栖息地特征,开展面向海河流域栖息地改善和生态恢复的技术集成与优化。

期待该书的出版能在多尺度湿地栖息地完整性保障和流域水生态系统管理方面引起相关管理部门的关注和学术界的积极探讨,从不同学科角度共同开展跨学科的科研探索,努力为国家湿地生态保护与恢复积累重要的科学数据和提供有力的科技支撑。

中国工程院院士

北京师范大学环境学院教授

2017年3月22日

前 言

流域作为一个完整的生态系统，以生态水文过程为中心，流域生态系统过程之间的相互作用具有其综合性和复杂性。其中，湿地生态系统对于流域生态系统服务功能中水循环、养分循环、调蓄洪水、水量和能量平衡、环境净化和栖息地等方面具有不可替代的重要作用。其作为重要的栖息地为鸟类、鱼类、底栖生物、浮游生物和高等植物提供繁殖和生活的场所，同时也是物质与能量进行交换的重要生态单元。

本书基于流域生态系统完整性理论与方法，以海河流域湿地生态系统为研究案例，探索海河流域不同时空水系构型和流量特征，辨析栖息地完整性概念与内涵，明确水生态单元、水系和流域/子流域尺度下三维栖息地完整性评价体系，定量描述不同环境流量和人为胁迫对河流物理完整性的影响机制，通过物理、化学和生物完整性的案例分析，开展流域湿地栖息地恢复机理与保障技术研究。

本书分为三篇共 8 章。

第一篇：栖息地完整性恢复与保障理论基础。包括第 1 章和第 2 章。

第二篇：栖息地完整性评价及案例分析。包括第 3 章、第 4 章、第 5 章和第 6 章。

第三篇：栖息地完整性保障技术与展望。包括第 7 章和第 8 章。

本书分工如下：

前言由刘静玲完成；第 1 章由刘静玲、尤晓光完成；第 2 章由史璇、刘静玲、杨涛完成；第 3 章由刘静玲、杨涛、张璐璐完成；第 4 章由刘静玲、李毅、孟博、孙斌完成；第 5 章由孟博、刘静玲、孙斌完成；第 6 章由张璐璐、刘静玲、李毅、尤晓光完成；第 7 章由刘静玲、尤晓光完成；第 8 章由刘静玲、尤晓光、史璇、孟博、孙斌完成；全书统稿人为刘静玲、尤晓光、孙斌。

作者在本书写作过程中得到北京师范大学环境学院杨志峰院士、中国科学院生态环境研究中心单宝庆研究员和水利部海河流域水资源委员会水资源保护局林超副局长给予的真诚指导与帮助，在此一并表达我们团队衷心的感谢！

本书研究得到“十二五”期间国家水体污染控制与治理科技重大专项“海河流域生态完整性影响机制与恢复途径研究”（项目编号：2012ZX07203-006）、“长江学者和创新团队发展计划”项目（项目编号：IRT0809）和北京师范大学学科交叉建设项目的资助。

流域湿地生态恢复之路任重而道远，需要环境保护管理部门与相关政府、企业、科研单位以及全社会共谋良策，兼顾生态、环境和社会效益，为从根本上改善环境质量进行理论方法、技术和管理创新与优化，以实现绿色发展。

作 者

2017年3月于北京师范大学

目 录

序 前言

第一篇 栖息地完整性恢复与保障理论基础

第 1 章 绪论	3
1.1 流域湿地栖息地完整性保障的必要性和紧迫性	3
1.2 栖息地完整性恢复与保障技术研究进展	4
1.2.1 栖息地完整性概念与研究进展	4
1.2.2 环境流量恢复与保障研究进展	12
1.3 小结	15
第 2 章 海河流域湿地栖息地恢复的理论体系	16
2.1 栖息地完整性恢复的理论基础	16
2.2 海河流域湿地栖息地问题辨析	18
2.2.1 水资源现状	18
2.2.2 水环境现状	18
2.2.3 河流物理栖息地现状	19
2.3 河流栖息地完整性评价模型	20
2.3.1 水系尺度下河流栖息地完整性评价方法	20
2.3.2 河段尺度下平原河流栖息地完整性评价指标体系	25
2.4 环境流量保障技术	31
2.4.1 栖息地完整性恢复环境流量概念模型	31
2.4.2 栖息地完整性恢复环境流量计算模型	32
2.5 底栖生境完整性评价模型	34
2.5.1 河流栖息地适宜度概念内涵	34
2.5.2 中尺度河流栖息地模型方法比较	37
2.5.3 大型底栖动物中尺度栖息地模型	39
2.6 小结	45

第二篇 栖息地完整性评价及案例分析

第3章 海河流域湿地栖息地完整性评价	49
3.1 海河流域概况及水系特征	49
3.2 流域-水系尺度栖息地完整性评价	52
3.2.1 典型水系选取及监测断面布设	52
3.2.2 河流栖息地完整性评价	55
3.3 河段尺度下平原河流栖息地完整性评价	58
3.3.1 评价断面及样品采集	58
3.3.2 评价指标权重的确定	60
3.3.3 评价指标值的确定	61
3.3.4 评价指标要素层分析	62
3.3.5 平原河流栖息地完整性评价	66
3.4 小结	67
第4章 案例分析 1: 河流物理栖息地完整性的人为影响因子识别	68
4.1 研究区与研究方法	68
4.1.1 研究区概况	68
4.1.2 采样方案设计	70
4.1.3 沉积物样品采集与实验室测定	70
4.2 海河流域河床表层沉积物粒度空间分布	70
4.2.1 徒骇马颊河水系沉积物粒度空间分布	70
4.2.2 漳卫河水系沉积物粒度空间分布	75
4.2.3 黑龙港及运东水系沉积物粒度空间分布	79
4.2.4 子牙河水系沉积物粒度空间分布	83
4.2.5 大清河水系沉积物粒度空间分布	87
4.2.6 永定河水系沉积物粒度空间分布	91
4.2.7 北三河水系沉积物粒度空间分布	95
4.2.8 滦河水系沉积物粒度空间分布	99
4.3 海河流域河流沉积物粒度参数空间分布的地理差异分析	103
4.3.1 海河流域沉积物粒度参数分布比较	103
4.3.2 海河流域山区与平原水系沉积物粒度参数分布差异分析	108
4.3.3 海河流域山区及平原水系沉积物粒度参数分布的南北差异分析	111
4.4 滦河水系沉积物粒度参数空间分布的人为影响因素研究	115
4.4.1 滦河干流粒度参数空间分布	116
4.4.2 滦河支流粒度参数空间分布	120

4.4.3 滦河水系大中型水库对沉积物粒度影响研究	121
4.5 小结	122
第 5 章 案例分析 2: 城市段河流湿地化学完整性的影响因子识别及风险分析	124
5.1 研究区与研究方法	124
5.1.1 研究区概况	124
5.1.2 研究方法	124
5.2 凉水河沉积物粒径分布规律及影响因素	127
5.2.1 凉水河沉积物粒径分布规律	127
5.2.2 闸坝对于粒径的影响	128
5.3 凉水河重金属分布规律及潜在生态风险分析	130
5.3.1 凉水河重金属形态含量的分布	130
5.3.2 城市和农村河段沉积物中重金属含量对比	131
5.3.3 不同粒径中重金属形态的分布规律	131
5.3.4 重金属来源识别及潜在生态风险分析	133
5.4 小结	135
第 6 章 案例分析 3: 生物完整性评价在湖泊重金属生态风险评价中的应用	136
6.1 研究区概况	136
6.1.1 研究区物理概况	136
6.1.2 研究区生物概况	137
6.2 材料与方法	139
6.2.1 沉积物物理化学特征及重金属浓度	139
6.2.2 底栖动物收集和分析	140
6.2.3 重金属生态风险指数计算	141
6.2.4 统计分析	142
6.3 白洋淀重金属及其生态风险的时空分布	142
6.4 白洋淀底栖动物结构特征的时空分布	145
6.5 白洋淀底栖动物结构指标与重金属潜在生态风险的相关性	146
6.6 小结	148

第三篇 栖息地完整性保障技术与展望

第 7 章 栖息地完整性保障技术	151
7.1 基于水力连通的环境流量计算	151
7.1.1 流域水功能分区	151
7.1.2 平原型河流生态类型	152

7.1.3	子生态系统环境流量计算模型	153
7.1.4	河流生态系统环境流量时空分布特征	160
7.1.5	子系统环境流量配置的优先次序	167
7.2	基于生态风险降低的环境流量保障率计算	171
7.2.1	采样点设置	171
7.2.2	样品分析	172
7.2.3	典型生态单元潜在生态风险评价	173
7.2.4	环境流量保障率-生态风险指数响应关系	180
7.2.5	生态风险-环境流量保障率阈值	181
7.3	基于栖息地完整性恢复的环境流量计算	182
7.3.1	典型河段栖息地完整性恢复环境流量计算	182
7.3.2	海河流域平原河流栖息地完整性恢复环境流量计算	184
7.3.3	九大水系栖息地完整性恢复环境流量配置	187
7.4	不同情景下栖息地完整性恢复环境流量保障	189
7.4.1	南水北调中远期实施的环境流量保障率	189
7.4.2	非常规水源利用的环境流量保障率	190
7.4.3	引黄河水补给的环境流量保障率	190
7.4.4	南水北调实施、非常规水源利用和引黄的环境流量保障率	191
7.5	小结	192
第8章	结论与展望	194
8.1	结论	194
8.2	展望	197
	参考文献	199
	附录	208

第一篇 栖息地完整性恢复 与保障理论基础

第 1 章 绪 论

1.1 流域湿地栖息地完整性保障的必要性和紧迫性

流域是水资源管理活动的单元 (Poff et al., 1997; Gupta, 2008), 是由河流、湖泊、沼泽、森林、草原和城市子系统构成的异质性区域和巨型复合生态系统。流域生态系统拥有三大基本功能: 维持流域水循环过程, 保障陆地生态系统结构和功能完整性以及陆地生态系统与海洋生态系统物质循环和能量收支平衡; 满足流域内子生态系统的生态需水; 提供一定质与量的水资源用于生产、生活和经济发展 (杨志峰等, 2005)。出于防洪抗旱、工业生产及农业灌溉的需要, 人们在流域内河流上下游间修建了大量的闸坝。据估计全球 140 个国家共修建了 48 000 个大型闸坝和 800 000 个中小型闸坝, 其中 2/3 的超大型闸坝位于发展中国家, 河流的纵向连续性受到极大的破坏。同时, 大量污染物排入河流, 河岸带植被破坏、外来物种入侵、水土流失及河道固化造成河流的生态服务功能丧失, 破坏了流域湿地栖息地完整性。

从 20 世纪 40 年代, 美国渔业与动物保护组织为保护渔业生产, 提出河流生态需水概念, 到目前流域尺度下, 针对子生态系统生态过程需水量、子生态系统之间生态过程与生态功能需水量、河流生态需水与河流生态系统结构及功能的耦合关系的研究已有 70 多年的历史。生态需水强调生态系统各组成要素维持其正常结构和功能所必需的水量。河流环境流量 (environmental flow) 是在生态需水 (ecological water demand) 概念基础上提出的一种更具实际操作意义的河流水生态系统管理概念和模式, 即保证河流生态服务功能, 维持或恢复河流生态系统基本结构与功能所需的最少流量 (或最少水量)。

河流环境流量的计算方法可分为水文学方法、水力学方法、水文-生物分析法、生境模拟法、综合法和生态环境功能设定法。在实际应用中需根据河流规划、管理目标, 恢复目标、不同用水情景、研究区域特征和经济预算而选择 (Acreman and Dunbar, 2004)。国际上前沿的研究者多是在流域尺度下以恢复河流生态功能或保护目标生物种群为目标确定生态需水量, 或以恢复河流基本结构及功能为目标确定环境流量。也有学者认为应从维持生态系统-社会经济系统健康角度综合考虑河流环境流量所必需的特定流量、频率和时间 (Gupta, 2008)。由于河流水生态系

统在时间和空间尺度上的差异性,应在纵向、横向和垂向三个维度,针对河道、湿地及河口三类子系统,根据其生态退化的不同程度,按照优、中和差三个等级进行环境流量的恢复(杨志峰等,2005)。杨志峰等针对海河流域平原型河流的空间结构特征及各河段的空间连通关系,提出了简单式、汇流式、分流式、组合式、交叉式和河口式六种河道环境流量整合计算模型,为其他流域平原型河流环境流量的计算提供了有益的借鉴。目前,世界范围内的河流,受人类水资源开发活动的不利影响,闸坝众多,河流纵向连续性普遍受损,仅有少数河流具有天然的流量分布特征,根据这些水文数据准确估计子流域内不同类型河流的环境流量,是河流生态恢复的基础。流域尺度下,常规水文监测站点仅设于少量典型水系上,水文计算和河流环境流量评估经常面临长序列水文监测资料缺乏的问题。Alcázar等(2008)采用人工神经网络数学模型,以具有天然流量分布特征的水文数据对西班牙埃布罗河流域河流的环境流量进行了评估,较好地解决了环境流量计算中长序列水文数据不足的问题。Alcázar和Palau(2010)构建了流域尺度下河流水文情势、地形地貌评估指标体系,通过主成分分析法、聚类分析方法,基于具有天然流量分布特征的水文监测数据,将流域划分为若干具有相似水文情势和地形地貌特征的子流域,应用多元线性回归模型建立各子流域的环境流量评估模型,为流域管理者提供了可操作性较强的环境流量评估方法。

海河流域具有人为干扰强度大且水资源、水环境和水生态复合环境问题突出的特征,平原河流严重退化已引起学术界和政府部门的高度重视(王浩和杨贵羽,2010)。目前,流域生态风险管理已成为水资源和水环境管理的发展趋势(Liu et al., 2011)。基于生态风险控制和生态完整性恢复的流域管理目标,对退化湿地进行生态需水量的科学配置,已成为流域社会经济可持续发展的需要(杨志峰等,2005;杨志峰,2012)。高强度人为干扰下水环境风险加剧,流域不同时空尺度下的自然-社会-经济耦合生态系统结构与功能的变化,呈现出水文-环境-生态的综合响应,湿地生态系统完整性既是亟待解决的科学前沿和热点问题,也是我国海河流域湿地生态完整性恢复急需的科学依据和技术支持(Kristensen et al., 2011; 刘静玲, 2012, 2014)。

1.2 栖息地完整性恢复与保障技术研究进展

1.2.1 栖息地完整性概念与研究进展

生态系统是一个包含物理、化学和生物组分及其相互作用的复杂系统(黄宝荣等,2006)。完整性(integrity)指生态系统支持和保护其生物要素和非生物要

素间平衡、完整和相互适应的属性。生物要素包括河流生态系统内部所具有的完整食物网结构,非生物要素指所属地区自然栖息地所有的河流地形地貌、水文情势、气候变化、河道与河岸带景观格局要素和进程。生态完整性指生态系统生物要素和非生物要素相互作用并组成一个有机整体,其生态系统过程和生态系统功能的完整性。生态完整性具有以下三个方面的特征:

(1) 生态健康状况较好,生态系统具有自我维持和良性发展的能力。

(2) 在一定的阈值范围内,生态系统受到外部胁迫时具有较强的抵抗力和恢复力,能恢复其正常的结构和功能。

(3) 自组织能力较好,即生态系统具备结构和功能更加稳定、更加完善的能力。

河流生态完整性是栖息地完整性、化学完整性和生物完整性的综合体现。化学完整性指水体化学要素整体质量的优劣,可用水质指数(water quality index, WQI)表征。生物完整性指水生生态系统生物群落结构及功能的完整性,可用生物完整性指数表征(Ganasan and Hughes, 1998; 黄宝荣等, 2006)。

1.2.1.1 栖息地

目前,世界范围内的河流生态系统,受到人类直接和间接的影响,普遍退化严重(Maddock, 1999)。出于航运及控制洪水的需要,许多天然河道被人为裁弯取直,河岸带植被及河流水生栖境失去了原有的多样性。同时,由于供水、控制洪水、电力生产和流域间调水的需要,修建了大量的闸坝、水库等水利设施,改变了河流自然的流动性特征、水陆循环特征及河道物理结构,加剧了水资源短缺和水生态系统的退化(Petts, 2009; Boon, 1992)。

栖息地是河流生态系统的重要组成部分,良好的栖息地环境是保持河流生态完整性的必要条件(张远等, 2007)。对河流栖息地各组成要素进行定性和定量的分析,可识别河流水生态系统外部胁迫因子和退化原因。河流水生态系统的生产力由以下四个关键因素决定:水质、能量收支平衡(温度、有机物和营养构成)、河道物理结构(宽度、湿周、断面形态、坡度、底质构成、糙率、河岸带组成及结构)和流量分布。河道物理结构和流量分布构成了河流生物栖息地环境的主要因子(Stalnaker, 1979)。河流水生态系统地貌过程决定河流形态,进而决定河流生物要素的生境结构,而良好的生境结构是其生态健康的基础。基于不同的尺度、研究目的和研究人员的主观认识,栖息地评价方法也不同。尺度的正确选择将影响河流栖息地评价结果的客观性,不同尺度下的河流栖息地评价需要采用不同的评估指标体系和方法(图 1-1)。按照尺度由小到大,河流栖息地可分为枯枝落叶、底质、浅滩、深塘等微观栖境,河段、基质、斑块、廊道等中观栖境,以及水系和流域等宏观栖境(赵进勇等, 2008)。

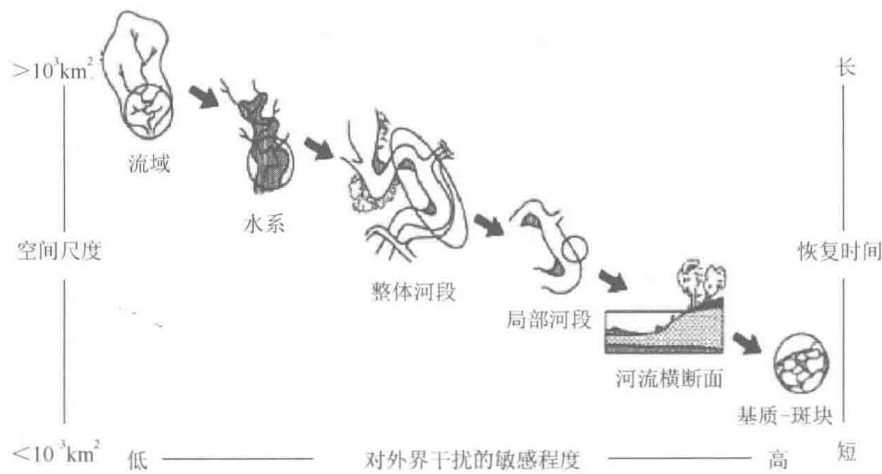


图 1-1 河流栖息地尺度分类

尺度越小，河流栖息地对外界扰动越敏感，生态恢复所需时间就越短（Frissell et al., 1986; Petts et al., 1989）；反之，恢复的难度就越大，恢复所需时间就越长。Harper 等（1995）基于河道物理结构特征及流量分布特征的关系、河流物理环境及其栖居者的关系，认为河流栖息地是一个包括河流地形特征、河道形态特征、流动性特征（能流、物流、信息流）、使用特征、河岸带土地利用特征、景观特征、娱乐特征等七项特征（表 1-1），并影响哺乳动物、鸟类、植被、鱼类、底栖无脊椎动物及陆生动物分布的综合体。Maddock（1999）认为河流栖息地是水生生物重要的生存空间，其时间和空间上的变化机制由河流的形态结构特征和水文交互作用机制共同决定。

表 1-1 河流栖息地特征

河流栖息地特征	属性指标	参考文献
流域地形、地貌特征	水系面积（km ² ）、河道平均坡度、河道平均高度、流域土壤最大持水量、土壤最大下渗量	Alcázar et al., 2008
河道形态特征	河道比降（河道最高点高程-最低点高程）、蜿蜒度	夏霆等, 2007 Alcázar et al., 2008
河流流动性特征	纵向连续性（闸坝控制河段长度/总河长）、横向连续性（河床固化面积/总河床面积）	夏霆等, 2007 张远等, 2007
河流使用特征	河流使用功能（饮水供给、灌溉、排污、泄洪、景观娱乐、水产养殖）	Maddock, 1999
河岸带土地利用特征	河岸带土地利用类型（耕地、道路、缓冲林带等）	张远等, 2007
河流景观特征	河流景观丰富度（河岸带廊道、斑块丰富度）	Maddock, 1999

1.2.1.2 河流栖息地评价

河流栖息地评价是河流栖息地完整性评价的重要组成部分。Downs 和 Brookes