

Theory and Practice of
Watershed Compound Environmental Systems Analysis and Evaluation

流域复合环境系统分析评价 理论与实践

薛联青 饶群 吴义锋 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

流域复合环境系统分析评价 理论与实践

薛联青 饶群 吴义锋 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要针对当前和未来人类干扰及外界不确定性因素所引发的系列流域复合生态环境问题,系统介绍了作者在流域复合水生态环境分析、模拟与评价的理论及实践的研究成果。内容主要涉及流域开发过程中出现的水污染模拟、复合生态系统评价、非点源污染分析、水体富营养化评价以及流域综合治理等相关问题,采用不确定性、随机理论以及生态动力学等理论方法,重点研究了流域复合环境系统评价理论,水环境随机模拟和污染风险的建模方法,以及水体富营养化的生态动力学和随机模拟技术,进行了流域农业非点源污染模拟及关键源区识别研究,以此为基础,讨论分析了典型流域最佳管理模式的实施效果及其影响。

本书可供水文水资源、环境科学、农业工程及水利工程等学科的科研人员、大学教师和相关专业的本科生、研究生,以及从事水资源管理、水土保持及环境保护的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

流域复合环境系统分析评价理论与实践 / 薛联青,
饶群, 吴义锋著. — 北京: 中国水利水电出版社,
2012.3

ISBN 978-7-5084-9390-9

I. ①流… II. ①薛… ②饶… ③吴… III. ①流域环
境—水污染—系统分析—研究 IV. ①X522

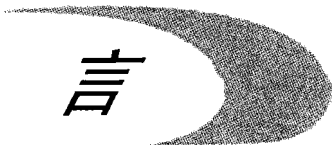
中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第281485号

书 名	流域复合环境系统分析评价理论与实践
作 者	薛联青 饶群 吴义锋 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	170mm×240mm 16开本 15印张 294千字
版 次	2012年3月第1版 2012年3月第1次印刷
印 数	001—500册
定 价	48.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言



水是生命之源、生产之要、生态之基。随着经济的持续发展、人口密度的增加以及土地利用类型多元化，流域复合生态系统的破坏现象将更为严重。加之气候变化和高强度的人类活动对流域环境产生了较大影响，流域水环境恶化、旱涝灾害频繁发生、湖泊湿地萎缩、水源地引水安全以及水土流失加剧等流域性水问题日益突出，水资源危机已更为突出地反映在水生态的恶化上，并成为世界上一个尖锐的社会问题。流域作为一个相对独立的自然—社会—经济复合系统，是各种人类活动和自然过程对环境影响的汇集地和综合反映。我国流域环境持续恶化，环境质量下降反作用于经济发展，严重影响了流域发展的协调性和可持续性，加强流域复合生态环境系统建设对流域可持续发展至关重要。

20 世纪 70 年代，水体污染、水质下降等水环境问题就已经得到了发达国家的重视，在 1992 年召开的环境与发展大会上把环境问题作为一个重要议题，会议明确提出了环境保护要系统综合以流域为单元进行开发和管理的思路。目前，虽然已实施了许多水质保护策略和流域管理措施，如传统的水土流失保护、河道缓冲保护区建设、改变农业耕作方式以及集约化生产等措施，但流域环境问题仍十分突出，如人均耕地减少、自然资源退化、水资源缺乏和全球变暖等，人类已深切感受到流域资源的开发利用必须与环境保护相协调。尤其是在众多复杂的不确定外界因素的影响下，流域水生态退化严重，流域生态环境安全、饮水安全等都处于临危状态，流域水环境破坏已成为不亚于洪灾、旱灾甚至更为严重的灾害，社会经济增长对水环境压力巨大。流域是一个具有明确边界的地理单元，将流域作为一个具有因果联系

的复合生态系统，是实现资源和环境管理的最佳单元，流域综合管理也已被认为是实现资源利用和环境保护相协调的最佳途径。

因此，考虑外界不确定因素影响，进行流域水环境系统分析是流域生态综合管理、恢复健康的水生态系统、实现人与自然和谐发展的必然要求。本书旨在从流域环境的复合特征分析，加强流域复合生态系统分析评价的原理和模型研究，重点分析人类活动干扰等外界不确定因素影响的河流、湖泊、复合生态等流域环境问题，建立流域复合环境系统分析评价理论体系，为制定科学实用的流域环境保护策略，防灾减灾、流域综合管理提供参考。

作者在总结以往研究成果的基础上，系统结合并采用流域水文学原理、水质模拟方法、随机理论、生态动力学机理、不确定性分析方法以及环境水利工程等措施，进行流域水环境模拟预测和流域水环境治理实践研究，为流域水环境管理的定量化提供了参考。

全书共包含五个方面内容，分为 11 章。第 1、第 2 章主要分析讨论了流域开发环境问题以及不确定信息下的水生态环境评价方法；第 3、第 4 章介绍了相关的流域复合生态环境系统分析评价理论，基于生态系统阈值特性的流域开发累积环境效应分析评价以及基于复合生态的河流环境评价及生态修复模式；第 5、第 6 章重点探讨了河流水环境随机模拟及污染风险分析方法；第 7、第 8 章以流域湖泊水库富营养化问题为出发点，建立了水质富营养化生态动力学模拟及随机模拟方法；第 9~第 11 章以典型流域农业非点源污染模拟及敏感性分析为基础，进行了初步的流域非点源污染风险及关键源区识别，并以此为基础进行了流域最佳管理模式的仿真模拟研究。

本书主要是作者在流域水文模拟和水环境保护领域长期的研究成果的总结，也包括了作者培养的研究生参与的科研项目中的部分相关科研成果和论文。在本书撰写过程中，黄硕、吴春玲给予了大力支持，参与了本书部分章节的编写工作，李永坤、宋佳佳、范正行等参与了本书的整编及校验，在此表示感谢，全书由薛联青统稿。感谢河海大学崔广柏教授、李杰友教授、郝振纯教授、王家虎副教授以及东南大学吕锡武教授、程光教授等的帮助和支持。

本书的出版得到国家自然科学基金（50979027）、水利部公益性行业科研专项（201001057，201001066）、水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项经费（2011585512，2009585512）、中央高校基本科研业务费专项资金资助（B1020068，2010B00914，2010B01014）以及江苏省高校优势学科建设工程的资助，在此表示感谢！同时感谢江苏省“青蓝工程”优秀骨干教师及“河海大学新世纪创新人才计划”的支持。

在本书的撰写过程中，也得到了河海大学水文水资源学院、水文水资源与水利工程科学国家重点实验室、中国水利水电出版社等单位领导和专家的大力支持，在此深表谢意！

同时对作者所引用的参考文献的作者及不慎疏漏的引文作者也一并致谢！

由于作者水平有限，在编写过程中难免存在不足及顾此失彼之处，敬请读者给予批评指正！

作者

2011年11月于河海大学

目 录

前言

第 1 章 水资源开发与流域环境问题	1
1.1 水资源开发与流域环境	1
1.2 流域开发与流域复合生态系统	3
1.2.1 流域复合生态系统内涵	3
1.2.2 流域环境保护与可持续发展	4
1.3 流域开发引发的主要环境问题	5
1.3.1 水环境污染模拟与评价	5
1.3.2 流域非点源污染与水体富营养化模拟评价	8
1.3.3 流域开发复合生态系统环境评价问题	10
1.3.4 水源地水安全问题	11
1.3.5 外界变化条件下的流域环境模拟评价	12
1.4 流域水环境生态系统修复与综合整治	14
1.4.1 水环境治理发展历程	14
1.4.2 河流生态环境治理发展趋势	15
1.4.3 河流水环境治理及生态修复	17
1.4.4 河流水环境生态治理展望	21
参考文献	22
第 2 章 不确定信息下的水生态环境评价方法	25
2.1 流域水环境评价	25
2.1.1 水环境评价的提出	25
2.1.2 常规水环境评价方法	25
2.2 水体富营养化驱动因子分析及评价	30
2.2.1 湖泊富营养化	30
2.2.2 湖泊富营养化评价指标选择及评价方法	31
2.2.3 污染因子的粗糙集数学模型建立	32
2.2.4 不确定信息下的水体污染因子分析及富营养化评价	34

2.3 不确定信息下的水质风险评价	36
2.3.1 水质评价未确知数学模型建立	37
2.3.2 水质风险超标可信度计算模型	38
2.3.3 水质风险度评价	39
2.3.4 与确定性水质风险评价对比	42
参考文献	44
第3章 流域复合生态环境系统分析评价	46
3.1 流域开发的环境影响	46
3.2 常规流域环境影响评价方法	47
3.3 流域开发累积环境效应特征提取及分析	52
3.3.1 环境效应的累积特征及分析原则	52
3.3.2 环境效应累积类型及途径	54
3.4 基于动力学机理的复合系统环境效应分析	56
3.4.1 环境效应及环境影响的非线性理论	56
3.4.2 复合生态环境系统动力学机制	57
3.4.3 环境效应的协同作用分析	58
3.4.4 流域开发的生态响应	60
3.4.5 累积影响及累积效应度量	62
3.5 流域复合生态环境压力—累积效应评估	63
3.5.1 累积影响评价时空边界确定	63
3.5.2 流域开发压力—响应系统变量体系	63
3.5.3 协同作用下的累积环境影响交互作用及计算	64
3.5.4 流域水电开发累积效应分析计算 (CEA)	67
3.6 基于生态系统阈值特性的流域开发累积环境效应分析评价	68
3.6.1 复合生态系统阈值特征	68
3.6.2 复合生态系统环境因子量化的动态赋权	69
3.7 流域水电梯级开发累积效应示例分析	74
3.8 本章小结	78
参考文献	79
第4章 河流复合生态系统评价及生态修复模式	81
4.1 城市河流复合生态环境	81
4.2 城市河流复合生态系统评价方法	82
4.2.1 评价指标筛选原则	82
4.2.2 评价指标体系结构模型	82

4.2.3 评价方法构建	82
4.2.4 评价的标准	83
4.2.5 评价方法	84
4.3 基于复合生态的河流生态修复模式	85
4.3.1 生态修复的内涵	85
4.3.2 虞河复合生态系统的环境影响	86
4.3.3 生态修复的目标及设计原则	87
4.3.4 基于复合生态系统的城市河流生态修复模式	87
参考文献	89

第5章 河流水环境随机模拟方法 90

5.1 河流水环境模拟预测	90
5.2 水质模型研究进展	91
5.2.1 确定性水质模型	91
5.2.2 不确定性水质模型	93
5.3 水质模型的建立	96
5.3.1 确定性一维水质模型	96
5.3.2 河流一维 BOD 随机模型	99
5.3.3 BOD—DO 耦合随机模型	101
5.3.4 模型概率分布确立	106
5.3.5 随机变量特征值计算分析	108
5.4 本章小结	110
参考文献	110

第6章 河流水质随机模拟及污染风险分析 113

6.1 研究区概况	113
6.2 随机水质模型参数确定	114
6.2.1 河道概化与设计流量	114
6.2.2 水质参数确定	116
6.3 河流水质随机模拟验证	118
6.4 水质模拟对比分析	120
6.4.1 随机与确定性模型的对比	120
6.4.2 不同分布形式的水质随机模拟对比	122
6.5 河流水污染风险概率预测评价	123
6.5.1 gamma 分布函数参数确定	123
6.5.2 水污染风险概率分析	124

6.6 本章小结	127
参考文献	128
第7章 水体富营养化生态动力学模拟	130
7.1 湖泊富营养化的数学模型	130
7.1.1 水体富营养化模拟预测	130
7.1.2 水体富营养化经验模型	131
7.1.3 水体富营养化模拟机理模型	132
7.1.4 水体富营养化模拟的生态动力机制	134
7.2 湖泊富营养化主要影响因素	136
7.2.1 水温和光辐射	136
7.2.2 温度分层	137
7.2.3 湖泊深度、湖泊形状及水流	137
7.2.4 湖泊底泥	137
7.3 湖泊（水库）富营养化的生态动力学模型	138
7.3.1 湖泊生态系统结构及影响因素	138
7.3.2 湖泊生态浮游植物生长的影响因素	139
7.3.3 湖泊富营养化生态动力学模型建立	143
7.3.4 模型求解及参数率定	145
7.4 水体富营养化生态模拟	146
7.4.1 隔河岩水库及流域概况	146
7.4.2 隔河岩水库富营养化评价	147
7.4.3 隔河岩水库富营养化状况生态模拟	150
7.4.4 水体富营养化生态模型简化	153
7.5 水体富营养化二维生态动力学模型	155
7.5.1 引言	155
7.5.2 模型建立	155
7.5.3 模型的求解	157
7.5.4 模型应用	160
参考文献	162
第8章 水体富营养化随机模拟方法及应用	164
8.1 水体富营养化模拟的不确定性	164
8.2 随机微分方程建模方法	165
8.2.1 随机过程	165
8.2.2 均方微积分	166

8.2.3 随机微分方程	167
8.3 随机水体富营养化模型建立	168
8.3.1 模型的建立	168
8.3.2 模型解析解法	169
8.3.3 模型数值解法	172
8.4 随机模型和确定型模型对比分析	173
8.5 水库富营养化随机模拟应用	174
参考文献	176
第9章 流域农业非点源污染模拟及敏感性分析	178
9.1 非点源污染模拟研究	178
9.1.1 研究背景及意义	178
9.1.2 非点源污染研究进展	180
9.2 非点源污染模型 (SWAT)	183
9.2.1 SWAT 模型结构	183
9.2.2 水量平衡方程	184
9.2.3 土壤侵蚀模型	186
9.2.4 营养物流失模型	187
9.3 典型流域农业非点源污染模拟	189
9.3.1 研究区域概况	189
9.3.2 空间信息提取	191
9.3.3 降雨—径流特征分析	195
9.3.4 模型参数率定及验证	197
9.4 模型参数敏感性分析	205
9.4.1 参数敏感性分析方法	205
9.4.2 参数选取	206
9.4.3 参数敏感性影响分析	206
9.5 本章小结	208
参考文献	209
第10章 典型流域非点源污染风险及关键源区识别	211
10.1 水文敏感区非点源污染	211
10.2 降雨—径流—污染因子时间分布模拟	212
10.3 降雨—径流—污染因子空间分布模拟	214
10.3.1 径流的空间分布模拟	214
10.3.2 TN 和 TP 侵蚀模数空间分布	215

10.3.3	TN 和 TP 流失风险划分	216
10.4	流域内非点源污染关键源区识别	217
10.4.1	模糊隶属风险模型	217
10.4.2	TN 流失高风险区识别	218
10.4.3	TP 流失高风险区识别	218
10.5	本章小结	219
	参考文献	219
第 11 章	典型流域最佳管理模式仿真模拟研究	221
11.1	最佳管理模式分类	221
11.1.1	工程性管理措施	221
11.1.2	非工程性管理措施	222
11.2	SWAT 模型中最佳管理模式应用分析	222
11.2.1	流域内最佳管理模式构建与仿真	222
11.2.2	非点源污染控制措施效果分析	225
11.3	本章小结	225
	参考文献	226

第 1 章 水资源开发与流域环境问题

1.1 水资源开发与流域环境

水资源、水环境作为人类赖以生存的基本物质条件，是经济社会可持续发展的基础。随着人口增长和对自然系统的压力加大，人类对水资源的需求越来越大，流域开发活动对水资源的影响也越来越显著。目前，世界上大部分地区都遇到由于人类活动所带来的与水有关的问题，水资源危机已经成为世界上一个十分尖锐的社会问题，水资源危机不仅表现为水量的不足，而且反映在水质的恶化上，流域水资源短缺和水环境生态系统的破坏是流域水环境所面临的重要问题。加之气候变化和高强度的人类活动对流域环境产生了较大影响，流域性旱涝灾害频繁发生、人均水资源短缺、水环境恶化、湖泊湿地萎缩、水源地引水安全以及水土流失加剧等流域性水问题日益突出。流域水环境污染和水资源短缺已成为全球淡水资源面临的两大难题，严重影响了经济的发展。

中国是世界上人均水资源贫乏的国家之一，水资源时空分布极不均匀，水资源的开发利用难度大，尽管针对流域水资源开发的大量人类活动，可以通过一系列工程措施调节影响水循环，使之有利于人类生产和生活的需要，但随着人口的增加，人民生活水平的逐步提高，工业化和城市化步伐的加快，用水量急剧增加，污水处理率低，污水排放量也相应增加，对流域用水量和污水排放量也相应增加，更进一步加剧了淡水资源的短缺和流域水环境破坏，且非点源污染已经成为流域复合水环境生态系统破坏的重要因素之一，很大程度上加剧了淡水资源短缺和水环境污染情势，越来越严重地破坏了我们赖以生产和发展的水环境。

水环境是一切影响水的存在、循环、分布及其化学物理特性的各种自然因素的总体，在天然条件下，水环境处于相对平衡状态，其变化过程缓慢，但在人类活动较为频繁、工业较发达的地区，河流水环境及其区域水环境受影响的程度则较大，水体污染也较为严重，尤其是面临的非点源污染对人类依赖的水环境造成了严重的危害，引起了一系列的流域环境问题。由于非点源污染的形成过程受到区域的地理条件、气候条件、土壤条件、土壤结构、土地利用方式、植被覆盖和降雨过程等多因素的影响，因而具有随机性大、分布范围广、形成机理模糊、潜

伏性强、滞后发生和管理控制难度大等特点。流域作为土地利用规划、水资源开发利用及环境管理的一个天然空间实体，承载着一个复合生态大系统的运行。近年来，人类认识和改造自然的能力不断加强，对能源、资源的需求不断增长，对环境的影响也愈发显著，经济发展依赖的对环境资源的透支所造成的负面影响，已经严重威胁到人类的生存，流域性的自然灾害频繁发生，异常极端事件发生频率和强度都显著增强，人类活动已经改变了地球表面的土地覆盖，减少了生物多样性，改变了流域水生生态系统及生态水文过程。水资源和流域水环境问题已成为制约社会经济和复合生态系统可持续性发展的瓶颈。

水资源开发是人类改造自然、利用自然的重大举措。但是，随着近代水利工程规模的不断扩大，对环境的影响也越来越大。在过去的50年内，世界各主要河流都在一定程度上进行了开发。20世纪70年代以来，各国都在继续大量建设大坝，且一些国家建坝速度有所增长，而且规模也越来越大。水利工程的兴建和运用，对周围的自然环境和社会环境将必然产生各种有利或不利影响，主要涉及物理、化学、生物、生态、社会、经济等问题。它对环境的影响不仅是自然环境和社会环境这两个方面，而且危及到整个流域生态系统的动态平衡。G. E. 别兹曾指出：“一条河流的特点是许多因素相互作用而决定的，因此难以单独地分析各个因素的作用，物理、化学和生物因素总是相互作用而产生影响的，然而，由于河流被拦蓄所产生的后果的层次结构，有时不得不分析各个因素的影响。”

在全球气候变暖日益加剧的大背景下，极端气候事件频繁出现，尤其是极端降水事件的频率增大，对于当前和未来人类社会与生态环境的影响将更加明显，全球资源短缺和水生态问题日趋严重，流域开发等人类干扰已严重影响了流域复合生态系统环境，未来气候变化的速度进一步加快，洪涝、干旱等气象灾害将继续对自然生态系统和社会经济部门产生重要影响，尤其是对农牧业生产、水资源供需、森林和草地生态系统、沿海地带等的影响更为显著。面对世界性的环境破坏问题，专家对水资源开发已提出了一些新的概念和战略思想，如对水资源进行环境开发；统一管理和保护水土资源；恢复环境；可以承受的水资源开发问题等。从开发流域水资源的长期性考虑，不仅可以取得显著的效益，而且可保证流域环境的可持续发展与流域经济增长。因此，为了更快地改善我国的水环境，保护水资源，因地制宜、合理进行流域水资源开发和保护，实现水的良性循环和水资源的可持续利用，对流域环境健康和整个复合生态系统的持续发展将起到至关重要的作用。结合自然和人为过程，分析流域水环境系统的整体复杂性，评估复合系统的生态、社会和经济可持续性，力求解决水资源开发利用与河流生态环境的矛盾，也就成为目前流域治理过程中迫切需要解决的重大问题。

1.2 流域开发与流域复合生态系统

1.2.1 流域复合生态系统内涵

复合生态系统是生态系统和经济系统相互作用、相互交织、相互渗透而构成的具有一定结构和功能的统一体。生态环境本身复杂的动力学特性决定了它对开发活动（压力）的响应不是一种线性关系，而是一种“协同”、“阈值”和“复合”的非线性关系。区域（流域）生态系统对外界的干扰响应取决于生态系统的两大基本特性：区域生态系统的结构与失控特性和区域生态系统的动力学特性。

复合生态系统从系统的内容看，是一个物质系统；从系统的组成要素看，是一个自然与人工叠加的复合系统；从系统的状态与时间关系看，复合生态系统是一个动态系统；从系统的结构看，复合生态系统具有“结构功能统一率”，并且系统具备一定的承载能力。外界与自然本身对系统的作用可以使系统环境良性循环，也可以使自然生态急剧恶化，尤其是开发资源对复合生态系统造成的影响已不是各子系统之间的简单叠加，其效应往往远离平衡态并且呈非线性特性。

流域自然生态系统与水资源系统同样是一个相互关联、相互作用、相互耦合而成的复合生态系统，受生态系统最基本特性的影响，在一定时间及相对稳定条件下，该复合生态系统各部分结构与功能处于相互适应与协调的动态平衡中，其结构和功能总是随着时间而变化。生态系统在其自身的调节能力作用下，不断地适应外界因素的变化，在自然条件下，生态演替总是使生态系统向生物种类多样化、结构复杂化、功能完善化转变。

生态系统在无人为干扰的情况下，其形成的结构多样，各组分协调稳定，各种功能畅通，从这一定义来讲，保护生物多样性，也是保持生态平衡的重要原因。当外界干扰超过生态系统的自我调节能力时，即超过生态阈值时，将造成生态系统的结构破坏、功能受阻、生态功能紊乱以及反馈自控能力下降，即生态平衡失调。在复合生态系统的弹性极限（触发点）内，它仍然能够恢复到最初的水平，但超过其稳定平衡点后，生态系统将呈现其动力学特性，表现为系统的多平衡性。外界干扰消失后，复合生态系统往往不会恢复到原始状况，而是进入一个新的平衡状态。系统对于干扰的这种非线性动力学特性也构成了生态系统自身的“综合”和“累积”的特性。一般来说，复合生态系统的外界响应的这种稳定与弹性特点可通过物理变化来进行解释，如图 1.1 所示。

复合生态系统的生态平衡失调反应主要体现为以下两个方面。

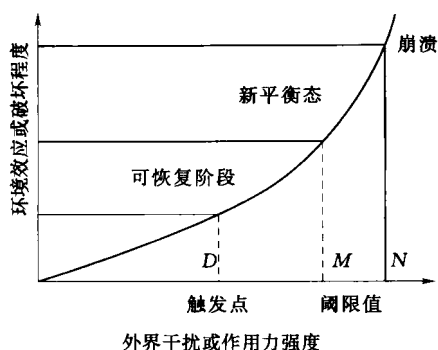


图 1.1 压力—响应曲线示意图

降，最终使生态系统趋于“生态单一化”。

(2) 功能失调。生态系统平衡失调在功能上反应为能量流动和物质循环在系统内的某一营养层上受阻或正常途径的中断。能量受阻表现为初级生产者生产力下降及能量转化效率降低。营养物质循环失调表现为部分物质的输入及输出比例的失调，较为典型的如水域生态系统中悬浮物的增加，将大大影响了水体藻类的光合作用。复合生态系统具有“结构功能统一率”，并且系统具备一定的承载能力。外界人类活动与自然变异本身对流域复合生态系统的作用可以使系统环境良性循环，也可以使自然生态急剧恶化，尤其是开发资源对复合生态系统造成的影响已不是各子系统之间的简单叠加，生态环境承载力、适应性及动力机制决定了它对开发活动的响应不是一种线性关系，而是一种“协同”、“阈值”和“复合”的非线性关系。

1.2.2 流域环境保护与可持续发展

水资源是人类社会发展的重要物质资源，如何在保证整个流域生态环境可持续发展的基础上，最大限度开发利用水资源，实现经济效益、社会效益和环境效益的协调共进，环境与人类发展的和谐统一，已是一个重要的研究领域。

21 世纪以来，流域复合生态系统开发不仅加剧了资源的短缺，而且直接威胁到人类的生存和发展，流域环境对水资源承载能力构成了经济增长的极限，在进行水资源开发利用时，如何把区域或流域明确地作为一个生态系统，谋求人类与环境的协调发展和流域环境的可持续性已成为全世界关注的焦点。水资源开发是人类改造自然、利用自然的重大举措。长期以来，人类对水资源的利用开发偏重于满足工业、农业和生活等方面的需要，过度开发河流、挤占甚至破坏了水资源的生态空间，使河流系统的结构和功能遭到破坏，加速了水资源危机，致使生态环境恶化。其中以水利工程建设对流域生态系统的影响最为显著，如流域水资源梯级开发作为水资源开发的一种形式，在涉及众多经济目标的同时，也涉及复

合生态环境系统的各个领域，包括社会环境和生态环境的多种目标。流域上水工程与环境的关系主要是以兴水利、除水害，协调流域生态关系，改进人们生活质量，维持环境与经济的可持续发展为主要目的，但近代水利工程规模的不断扩大对环境的影响也将愈发显著。

流域水资源开发等一系列人类活动对环境的影响不仅涉及自然环境和社会环境的各类组成因子，而且危及到整个流域生态系统的动态平衡。水资源开发利用对环境的影响主要表现在以下几个方面。

(1) 对水文、泥沙情势的影响，改变了天然河道的水文情势，天然河道水流的季节变化和多样性受到影响，导致河流生物群落发生变化和最终生态环境的变化。

(2) 水库的辐射、热力和动力特征与陆地显著不同，通过水体本身以及水面与大气间水热交换，而形成独特的局地气候状况。流域开发对下垫面的改变引发的对土壤环境的影响，如湿地功能破坏、土壤沼泽化与次生潜育化、次生盐碱化以及水土流失等。

(3) 水利工程的兴建不仅改变河流水体性质，影响水环境的各个方面，同时建坝后上游及库区内污染源的排污、流域开发产生的点源、面源污染以及对复合生态系统水生生物、陆生生物以及环境地质都会产生较大影响，以及人类对河道的渠系化和引水工程也将对整个流域生态系统带来时间和空间上累积生态负效应。

Sibert 研究结论表明，环境对于污染物的容纳能力是一常量，这构成了经济增长的极限。也有学者认为，环境的承载能力与污染物的积累量之间存在两种关系：一是环境吸收和降解污染物的能力随污染物的积累量增加而增加；二是环境吸收污染物的能力是污染物积累量的严格凹函数。由此可见，只有通过研究流域环境对于经济发展的约束，协调经济、社会以及环境效益的统一，达到彼此之间的动态平衡，才可能保证流域复合生态系统的可持续发展。因此，从流域系统管理方面统一考虑经济的、环境的和社会的因素，对自然环境、生态环境和社会环境，做出科学地预测和评价，综合分析复合生态系统的环境承载力，注重开发活动带来的累积影响范围、性质和大小，趋利避害，对实现水资源开发利用与流域的环境经济的持续发展具有重要作用。

1.3 流域开发引发的主要环境问题

1.3.1 水环境污染模拟与评价

水环境质量评价，即对水环境质量优劣的定量描述和评定，是根据影响水质