

丛书主编 / 王尚义

流域环境变迁与
科学发展研究 | 丛书

流域生态环境变化 及质量评估理论与实践： 以汾河流域为例

| 马义娟 侯志华 / 著



科学出版社

山西省普通高等学校人文社会科学重点研究基地项目成果

流域环境变迁与
科学发展研究丛书

丛书主编 / 王尚义

流域生态环境变化 及质量评估理论与实践： 以汾河流域为例

■ 马义娟 侯志华 / 著

科学出版社
北京

内 容 简 介

本书以流域的整体观和历史观为视角,以汾河流域为实证地域,以地表景观为切入点,以 RS 和 GIS 技术为支撑,开展流域生态环境变化及质量评估的科学研究。

本书分为理论研究和实证分析两大部分。理论部分,简要探讨流域生态环境质量的研究现状、研究价值与发展趋势,流域系统的构成、特征及演化过程,流域系统生态环境质量研究的理论基础与方法;实证部分,从汾河流域自然条件和社会经济等环境基础出发,利用遥感影像,探讨地表景观的格局特征、变化规律及过程驱动,并在此基础上对流域生态系统服务价值和生态环境质量进行定量评价与分析,并提出汾河流域的生态质量建设对策。

本书可作为从事 LUCC 研究、景观生态、资源环境、地理科学等领域研究的高校师生、科研院校和政府决策部门的相关人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

流域生态环境变化及质量评估理论与实践:以汾河流域为例 / 马义娟, 侯志华著. —北京: 科学出版社, 2018.12

(流域环境变迁与科学发展研究丛书 / 王尚义主编)

ISBN 978-7-03-059748-9

I. ①流… II. ①马… ②侯… III. ①流域环境—生态环境—研究
IV. ①X321

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 263811 号

责任编辑: 王 媛 / 责任校对: 王晓茜

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 黄华斌

编辑部电话: 010-64011837

E-mail: yangjing@mail.sciencep.com

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>

北京建宏印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 12 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2018 年 12 月第一次印刷 印张: 14 1/2 彩插: 4

字数: 260 000

定价: 97.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

目 录

第一章	绪论	/ 1
第一节	生态环境研究的历史和现状	/ 1
第二节	流域生态环境质量的研究进展	/ 5
第三节	流域生态环境质量的研究价值与发展趋势	/ 18
第二章	流域系统环境的特征及演化	/ 22
第一节	流域系统及其构成	/ 22
第二节	流域系统的特征	/ 26
第三节	流域系统的演化过程	/ 29
第三章	流域生态环境质量研究的理论基础与方法	/ 39
第一节	理论基础	/ 39
第二节	研究方法	/ 46
第四章	汾河流域的环境基础	/ 52
第一节	地理区位	/ 52

第二节	自然地理环境	/ 54
第三节	社会经济发展	/ 62
第五章	汾河流域景观格局及变化特征	/ 63
第一节	研究数据与方法	/ 63
第二节	景观空间格局特征	/ 79
第三节	景观动态演变分析	/ 86
第四节	景观空间地域分异	/ 95
第六章	汾河流域景观格局变化过程驱动	/ 118
第一节	景观变化分析方法概述	/ 118
第二节	回归方法与尺度选择	/ 125
第三节	Binary Logistic 回归模型模拟	/ 129
第四节	景观格局变化驱动分析	/ 136
第七章	汾河流域生态系统服务价值评估	/ 146
第一节	生态系统服务功能概述	/ 146
第二节	生态系统服务价值评估方法	/ 151
第三节	生态系统服务价值变化分析	/ 158
第四节	县域生态经济协调度分析	/ 162
第八章	汾河流域生态环境的质量评价	/ 169
第一节	生态环境质量评价的原则与方法	/ 170
第二节	生态环境质量评价的计算过程	/ 180
第三节	生态环境质量评价的结果分析	/ 192
第四节	生态环境质量影响因素分析	/ 195
第九章	汾河流域生态环境的建设对策	/ 210
第一节	树立流域系统生态文明建设新理念	/ 211

第二节	建立基于流域整体观的生态环境管理模式	/ 212
第三节	采用针对突出问题的生态环境建设保障措施	/ 217

后记	/ 222
----	--------------

第一章 绪论

第一节 生态环境研究的历史和现状

一、生态环境认识的历史沿革

自 18 世纪中期英国工业革命以来,工业化的发展深刻改变了人类社会的生产与生活方式。工业化带来了物质财富的爆炸式增长,为人类提供了舒适的生活条件,社会日益进步,经济持续发展,与此同时,城市规模不断扩展,新城市纷纷出现,城市化的步伐也越来越快。然而,工业化和城市化也导致了严重的生态环境问题。例如,全球变暖、臭氧层空洞、淡水资源危机、不可再生能源空前短缺、森林锐减、土地退化、垃圾成灾、有毒化学品的滥用、物种加速灭绝等。1962 年,美国海洋生物学家蕾切尔·卡逊(Rachel Carson)所著的《寂静的春天》(*Silent Spring*)一书问世,它标志着人类关心生态环境的开始。卡逊根据大量事实,科学论述了 DDT (dichlorodiphenyltrichloroethane, 又名滴滴涕,化学名为双对氯苯基三氯乙烷,是一种有机氧类杀虫剂)等农药污染的迁移、转化及与空气、土壤、河流、海洋、动植物和人的关系,从而警告人们,要全面权衡和评价使用

农药的利弊，要正视人类自身的生产活动导致的严重后果。^①1972年，罗马俱乐部完成了一项重大研究，以美国德内拉·梅多斯（Donella Meadows）教授为首，发表了以《增长的极限》（*Limits to Growth*）为题的报告，该报告从资源、环境对经济增长的制约角度，对单一追求国民经济增长的绝对增长论提出了挑战。^②从《寂静的春天》到《增长的极限》，在这10年时间里，学者、国际机构等出版了各种各样有关环境方面的报告、书籍等，并引起了国际社会的强烈关注。

1972年6月，在瑞典斯德哥尔摩召开的联合国人类环境会议上，发表了题为《只有一个地球》（*Only One Earth*）的人类环境宣言。该宣言指出^③，人类享有自由、平等和充足的生活条件的基本权利，并且负有保护和改善这一代和将来世代代的环境的庄严责任；地球上的自然资源以及生产非常重要的再生资源的能力必须加以保护和保持、恢复和改善；保护和改善人类环境已经成为人类一个紧迫的目标，这个目标将同争取和平、全世界的经济和社会发展这两个既定的基本目标共同和协调地实现。这次会议呼吁各国政府和人民为全体人民和他们的子孙后代的利益而作出共同的努力。这是世界各国政府共同讨论环境问题、探讨保护全球环境战略的第一次国际会议，标志着环境问题开始列入发展的日程。这次会议唤起了世人对环境问题尤其是环境污染问题的觉醒，人们已经认识到环境问题与发展问题密切相关，并且西方发达国家已经开始了对环境的认真治理。

1983年11月，联合国成立了世界环境与发展委员会（World Commission on Environment and Development, WCED），该委员会由来自21个国家的社会活动家和科学家组成。1987年，该委员会把经过长达4年研究、充分论证的报告《我们共同的未来》（*Our Common Future*）提交联合国大会，正式提出“可持续发展”的模式概念，即“可持续发展是既满足当代人的需要，又不对后代人满足其需要的能力构成危害的发展”^④。该报告明确提出了可持续发展战略，提出保护环境根本目的在于确保人类的持续存在和持续发展。从此，可持续发展的思想和战略逐步得到各国政府和社会各界的广泛认同。

1992年6月，在巴西里约热内卢召开了联合国环境与发展大会，有183个国家的代表团和70个国际组织的代表出席了会议，102个国家元首或政

① Carson R. *Silent Spring*. New York: Penguin Classics, 2000.

② Donella M. *Limits to Growth*. Vermont: Chelsea Green Publishing Company, 2004.

③ 《斯德哥尔摩人类环境宣言》，《世界环境》1983年第1期，第4-6页。

④ 世界环境与发展委员会：《我们共同的未来》，王之佳、柯金良等译，长春：吉林人民出版社，1997年，第52页。

府首脑在会上发言。^①在这次大会上,环境与发展密不可分的道理被广泛接受;产业革命以来的“高生产、高消费、高污染”的传统发展模式受到普遍批判;保护地球生态环境,为实现可持续发展建立“新的全球伙伴关系”被认可。^②大会通过了《里约环境与发展宣言》《21世纪议程》《关于森林问题的原则声明》3项文件和《气候变化框架公约》《生物多样性公约》2个公约。^③会议的成果具有积极意义,这次会议是人类转变传统发展模式和生活方式,走可持续发展道路的一个里程碑,在人类环境保护与可持续发展进程上迈出了重要的一步。自此以后,可持续发展被世界普遍接受,各国政府纷纷制定了符合本国国情的可持续发展战略。里约热内卢会议以后,我国从自身国情出发,于1994年制定了《中国21世纪议程——中国21世纪人口、环境与发展白皮书》,首次把可持续发展战略纳入我国经济发展的长远规划。

二、生态环境研究现状

20世纪90年代以来,随着联合国环境与发展大会的召开,生态环境的相关研究一直是国内外关注的热点。2001年6月5日,联合国秘书长安南宣布启动一项为期4年(2001—2005年)的国际合作项目“千年生态系统评估”(Millennium Ecosystem Assessment, MA),这是在全球范围内第一个针对生态系统及其服务功能与人类福祉的联系的项目,通过整合各种资源,对各类生态系统进行全面、综合评估的重大项目。该项目自启动以来,经过来自约95个国家1300多位著名学者的共同努力,在全球尺度及亚全球尺度上对世界生态系统进行了全面、综合的评估。项目的实施取得了巨大成就,但是必须认识到,项目提供的信息具有极强的时效性;它只是在全球尺度上概括地揭示了生态系统变化与人类福祉的一些关系,而没有全面涉及人们通常更为关注的区域、国家乃至局地尺度的一些问题,此外,科学界对项目的理念、方法和数据尚有不少争论,仍需不断完善。^④

近年来,国内外的众多专家学者从不同的视角对生态环境进行了研究,

① 王焕校、常学秀主编:《环境与发展》,北京:高等教育出版社,2003年,第13-14页。

② 夏光:《人类发展道路上的重要一步——联合国环境与发展大会简介》,《环境保护》1992年第8期,第6-7页。

③ 王焕校、常学秀主编:《环境与发展》,北京:高等教育出版社,2003年,第14页。

④ 赵士洞、张永民:《生态系统与人类福祉:千年生态系统评估的成就、贡献和展望》,《地球科学进展》2006年第9期,第895-902页。

研究内容不断广泛和深入,具体表现如下^①:在指标因素方面,从简单到复杂、从有形到无形,从单纯的客观存在到同时顾及人类的主观感受和心理满足;在研究目标方面,从认识和理解过去到对未来的模拟和预测,从对纯理论的探讨、研究到实际应用,切实为规划政策服务;在研究手段方面,从定性描述到分等定级和比较,再到各指标因素的遥感定性解译及至定量反演;在研究对象方面,从小尺度的城市内部的不同功能区(如中心商业区、居住区和工矿区、农业生产区、生态给养区等),到中尺度的县域、市域、省域、流域、国内区域,再到大尺度的国家、国际性地区、全球等。

20世纪80年代末到90年代初,随着美国陆地卫星(Landsat)系列和法国地球观测卫星SPOT系列的投入运行,英国、法国、德国、美国、日本、澳大利亚等均围绕城乡环境信息开始应用计算机兼容磁带遥感数据,并利用地理信息系统(geographic information system, GIS)手段结合数学方法进行生态环境综合评价。1999年至今,商用高分辨率卫星伊科诺斯(IKONOS)、快鸟(Quick Bird)等的成功发射和中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)数据的广泛使用,降低了资料成本,人们能定期获取详细的土地利用、覆被及代表温度的信息。遥感技术推动了生态环境方面研究的效率和深度;遥感解译的进步和定量遥感的系列成果为生态环境研究提供了实时可靠的数据和信息。

水与人类的生产、生活息息相关,河流是地表水存在的主要形式,而河流又由所在的流域环境所决定,因此,流域作为特殊的区域单元,其整体性、系统性、动态性、非线性、多维性等特点,使流域资源、环境与生态问题越来越复杂化与多样化,人与自然、人与社会的矛盾日益尖锐与突出,流域生态环境问题已经引起多数业内外人士的认识和关注。我国学者王守春在1988年发表的《论历史流域系统学》一文中,针对历史时期河流演变原因研究之不足提出:“今后研究的侧重点应当放在把河流与流域作为一个整体或一个系统来进行研究。”^②之后,国内各大研究机构、高校的众多专家学者针对某一具体流域(长江流域、黄河流域、黑河流域、石羊河流域、太湖流域、淮河流域等)开展水资源、水循环、水环境、土地利用、景观格局、生态安全、环境演变等方面的科学研究。

近年来,国内以“流域科学”为研究对象的实验室、研究中心不断增加,研究内容由流域的某一方面转向对“流域科学”系统性、整体性的关注,并针对某一流域展开系统的实证研究。例如,中国科学院寒区旱区环

① 颜梅春、王元超:《区域生态环境质量评价研究进展与展望》,《生态环境学报》2012年第10期,第1781-1788页。

② 王守春:《论历史流域系统学》,《中国历史地理论丛》1988年第3辑,第34页。

境与工程研究所甘肃省黑河生态水文与流域科学重点实验室的程国栋、冯起等^①，以黑河流域为研究对象，以水生态作为切入点，开展黑河流域生态-水文过程集成研究，系统探索流域尺度上水、生态、社会经济的系统耦合关系；太原师范学院汾河流域科学发展研究中心的王尚义等^②，以汾河流域为研究对象，依托地理学，从历史地理学、生态学、经济学、文化学、管理学等多角度对汾河流域展开科学研究。

总之，人们越来越认识到流域是一个相对完整而特殊的地理单元，流域上游是重要的生态环境保护建设区，中、下游是传统的人口密集区和土地高度集约化利用生产区，如何在保证整个流域生态环境和社会经济持续发展的基础上，协调流域上、中、下游在生态、经济、生活用水、用地等资源与环境方面的矛盾，实现经济效益、社会效益、环境效益的和谐统一和协调发展，已经成为一个极为重要的研究领域。

第二节 流域生态环境质量的研究进展

流域是人类生活的主要生境，对人类生存与社会发展起着重要的支撑作用。然而，随着人口的快速增长及经济的迅猛发展，资源、能源的承载力不断超载，生态系统遭到破坏，环境污染日益加重，各类生态环境持续恶化，多种资源、能源危机共存，并呈现流域性特征，使流域社会-经济-生态可持续发展面临重大挑战，因此，越来越多的人开始关注和研究流域单元生态环境质量的变化和评估。

一、流域生态环境质量变化的研究进展

目前，对流域生态环境质量变化的研究，主要是针对某一或大或小的

① 程国栋等著：《黑河流域水-生态-经济系统综合管理研究》，北京：科学出版社，2009年；陆志翔、肖洪浪、Wei Y P，等：《黑河流域近两千年人-水-生态演变研究进展》，《地球科学进展》2015年第3期，第396-406页。

② 王尚义、张慧芝：《历史流域学论纲》，北京：科学出版社，2014年；王尚义、张慧芝：《关于创建历史流域学的构想》，《光明日报》，2009年11月19日，第9版；王尚义、张慧芝：《流域问题研究的创新和不足》，《光明日报》，2009年11月21日，第7版；王尚义、张慧芝：《科学研究解决流域问题》，《光明日报（理论综合版）》，2009年11月25日，第10版；任世芳：《汾河流域水资源与水资源安全》，北京：科学出版社，2015年；孟万忠：《汾河流域人水关系的变迁》，北京：科学出版社，2015年；郭文炯、姜晓丽、张侃侃，等：《汾河流域城镇变迁与城镇化》，北京：科学出版社，2017年。

具体流域在或长或短的时间尺度下，从不同的视角研究其质量变化的主要特征、演变规律及影响因素等。流域生态环境质量变化研究的视角众多，但最终基本可归为气候变化和人类活动两大方向。

（一）气候变化对流域生态环境质量影响的研究

气候变化一般通过气温、降水等因素的改变影响陆地水文循环系统，驱动径流量等水文要素的变化，改变区域的水量平衡，严重影响流域水资源量及其时空分布^①，从而进一步影响流域的水环境、生物特性等生态环境。例如，黄朝迎运用数理统计方法，诊断分析研究近 40 年黑河流域的气候变化对其生态环境与自然植被的影响，结果表明，黑河流域植被变化主要表现为绿洲与沙漠的相互转化，且气候因素自始至终都在起作用^②；赵庆由和明庆忠，基于 1971—2009 年金沙江流域（云南段）35 个气象站逐月平均气温、降水量和蒸发量，分析了近 40 年金沙江流域上段、中段、下段的气象要素变化趋势及其对生态环境的影响^③，结果表明，金沙江流域（云南段）的气候变化对流域内自然生态系统、水资源量和自然灾害等都会产生影响，从而加剧流域内生态系统的脆弱性。

（二）人类活动对流域生态环境质量影响的研究

人类活动主要通过土地利用和土地覆被变化（land-use and land-cover change, LUCC）、点源及非点源污染物的大量排放和水利工程的建设，从而对流域生态环境质量产生重要影响，目前关于人类活动对流域生态环境质量影响的研究也基本体现在以下三个方面。

1. LUCC 对流域生态环境质量影响的研究

土地利用和土地覆被变化是地表最直观、在大尺度上最突出的变化形式。土地是各种陆地生态系统的载体，土地利用是人类改造自然的主要方式和途径，人类活动影响下的土地利用变化会导致区域生态系统结构和功

① 吕振豫、穆建新、刘姗姗：《气候变化和人类活动对流域水环境的影响研究进展》，《中国农村水利水电》2017 年第 2 期，第 66 页。

② 黄朝迎：《黑河流域气候变化对生态环境与自然植被影响的诊断分析》，《气候与环境研究》2003 年第 1 期，第 84-90 页。

③ 赵庆由、明庆忠：《1971—2009 年金沙江流域气候变化特征及对生态环境的影响》，《气象与环境学报》2010 年第 6 期，第 18-23 页。

能发生变化,进而对流域生态环境产生影响^①,因此,LUCC对流域生态环境变化造成的影响成为近年来的关注重点和热点课题。

LUCC的广泛应用,主要依托遥感和GIS技术的发展,在卫星数据多时相性的支持下,较长时间序列上的LUCC分析成为便捷、主流的研究方式。就研究内容而言,基于不同尺度开展了大量关于LUCC对流域大气环境、水文过程、土壤侵蚀和土壤污染,以及生物多样性等区域环境质量变化的研究;同时,也有众多专家学者关注LUCC对流域景观生态格局、物质能量循环、生态系统服务价值和功能的变化影响,并进行定量和定性的分析与研究。

例如,曹丽娟等使用区域气候模式(region climate model 3, RegCM3)和大尺度汇流模型(large-scale routing model, LRM),研究LUCC对长江流域气候及水文过程的影响^②;郑璟等以典型快速城市化过程的深圳市布吉河流域为例,在测量与分析该流域土地利用变化的基础上,应用分布式水文模型(soil and water assessment tool, SWAT)模拟研究土地利用变化对流域水文过程的影响^③;祖拜代·木依布拉等选用SWAT模型定量分析了乌鲁木齐河流域土地利用与气候变化对径流的影响,并分别分析了单一土地利用类型和不同气候变化情景对流域径流的影响^④;傅伯杰等选择黄土丘陵沟壑区的羊圈沟流域,应用GIS系统,结合野外采样分析,从小流域、坡面和单一土地利用类型三个尺度层次研究土地利用变化对流域土壤侵蚀、土壤养分和土壤水分的影响^⑤;冯异星等以新疆玛纳斯河流域为例,运用遥感、GIS技术及景观生态学方法,依据建立的五期土地利用数据,研究近50年土地利用变化对干旱区典型流域景观格局的影响^⑥;李屹峰等以密云水库流域为例,分析1990—2009年流域土地利用的变化,采用空间显式的生态系统服务功能评估软件(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs, InVEST)中的“产水量”“土壤保持”“水质净化”模型,

① 杜习乐、吕昌河、王海荣:《土地利用/覆被变化(LUCC)的环境效应研究进展》,《土壤》2011年第3期,第350-360页。

② 曹丽娟、张冬峰、张勇,等:《土地利用变化对长江流域气候及水文过程影响的敏感性研究》,《大气科学》2010年第4期,第726-736页。

③ 郑璟、方伟华、史培军,等:《快速城市化地区土地利用变化对流域水文过程影响的模拟研究:以深圳市布吉河流域为例》,《自然资源学报》2009年第9期,第1560-1572页。

④ 祖拜代·木依布拉、师庆东、普拉提·莫合塔尔,等:《基于SWAT模型的乌鲁木齐河上游土地利用和气候变化对径流的影响》,《生态学报》2018年第14期,第5149-5157页。

⑤ 傅伯杰、陈利顶、马克明:《黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响:以延安市羊圈沟流域为例》,《地理学报》1999年第3期,第241-246页。

⑥ 冯异星、罗格平、周德成,等:《近50a土地利用变化对干旱区典型流域景观格局的影响:以新疆玛纳斯河流域为例》,《生态学报》2010年第16期,第4295-4305页。

研究流域土地利用变化对生态系统服务功能的影响^①；孙慧兰等以伊犁河流域为研究对象，运用 GIS 手段和生态经济学方法，采用美国生态经济学家罗伯特·科斯坦斯（Robert Costanza）提出的生态系统服务价值计算公式，参照谢高地等的中国陆地生态系统服务单位面积价值，结合敏感度分析，探讨了 1985—2005 年该流域土地利用和生态系统服务价值的变化特征^②。

2. 污染物排放对流域生态环境质量影响的研究

人类活动包括生活污水、工业废水和农业污水等在内造成的点源及非点源污染，是流域水环境恶化的主要和直接影响因素。它们通过影响水体的物质组成，改变水体中污染物质的含量，点源及非点源污染将直接影响流域水环境生物化学特性，进而导致流域生态质量环境的恶化。近年来，随着流域水污染事故的频繁爆发，污染物排放对流域生态环境质量影响的研究日益受到学界的关注。例如，王磊等在估算工业点源、城乡生活污染、农业面源污染等产业结构污染负荷的基础上，分析了江苏省太湖流域产业结构的水环境污染效应^③；沈园等基于《2012 年废水国家重点监控企业名单》，分析松花江流域沿江企业潜在污染风险的大小和分布，并揭示不同区域间水环境潜在污染风险空间差异的原因^④；李志涛等以经济增长与环境污染水平计量模型——环境库兹涅茨曲线为理论基础，利用鄱阳湖流域 1992—2006 年经济和水环境污染因子变化数据，分析并模拟流域经济增长与水环境的关系^⑤；班璇等通过对四湖流域的主要湖泊及四湖总干渠水质现场的监测和水样采集，对其水环境污染现状空间分布和污染源进行分析^⑥；弥艳等对艾比湖流域地表水进行系统采集，分析水体中各形态氮磷含量的分布特征，以此来研究农业面源污染对丰水期艾比湖流域水环境的影响^⑦。

① 李屹峰、罗跃初、刘纲，等：《土地利用变化对生态系统服务功能的影响：以密云水库流域为例》，《生态学报》2013 年第 3 期，第 726-736 页。

② 孙慧兰、李卫红、陈亚鹏，等：《新疆伊犁河流域生态服务价值对土地利用变化的响应》，《生态学报》2010 年第 4 期，第 887-894 页。

③ 王磊、张磊、段学军，等：《江苏省太湖流域产业结构的水环境污染效应》，《生态学报》2011 年第 22 期，第 6832-6844 页。

④ 沈园、谭立波、单鹏，等：《松花江流域沿江重点监控企业水环境潜在污染风险分析》，《生态学报》2016 年第 9 期，第 2732-2739 页。

⑤ 李志涛、黄河清、张明庆，等：《鄱阳湖流域经济增长与水环境污染关系研究》，《资源科学》2010 年第 2 期，第 267-273 页。

⑥ 班璇、杜耘、吴秋珍，等：《四湖流域水环境污染现状空间分布和污染源分析》，《长江流域资源与环境》2011 年 Z1 期，第 112-116 页。

⑦ 弥艳、常顺利、师庆东，等：《农业面源污染对丰水期艾比湖流域水环境的影响》，《干旱区研究》2010 年第 2 期，第 278-283 页。

3. 水利工程建设对流域生态环境质量影响的研究

水利工程建设作为人类改造自然的一项实践活动,通过改变天然河流的形态及流动状态,对流域系统进行物质和能量的输入及重新分配,势必打破系统原有的水量、能量及生态平衡。这种旧平衡的破坏和新平衡的产生将引发水环境物理、化学及生物特性的改变,具体从泥沙输移变化、水体富营养化、水环境容量变化,以及水生生物生存及生长状况等方面对流域生态环境质量产生重要影响。在此背景下,也有众多学者展开了这方面的研究。

袁文昊选择长江中游宜昌至汉口河段,对这一区域在三峡建坝前后水沙过程及河床动力响应过程进行剖析,并对建坝后百年内的河床冲淤变化及泥沙供应情况进行预测^①;曹亚丽等以乌江中上游流域洪家渡水电站至乌江渡水电站的水利工程干扰典型段为研究区域,利用一维水动力模拟软件(Mike11)模拟水电站建设前、建设后单库运行及与上下游水电站联合调度3个时间段坝址处径流量、水位月均变化过程,并对乌江干流水电梯级开发对水文情势累积影响进行分析^②;王秀艳等在对大量已有相关资料的分析基础上,结合野外定点观测、室内实验测试和遥感技术(remote sensing, RS)图像解译,综合研究了水坝对滹沱河流域石家庄段地表水、地下水、湿地、土地沙化等生态环境要素的影响^③;吕军等在分析松花江流域河湖水系连通性现状的基础上,分别从纵向连通性、横向连通性和垂向连通性角度,采取定性、定量相结合的方式,分析了河湖连通性对流域水环境、鱼类生境、泡沼湿地面积及地下水的影响^④;农定飞等以金沙江一级支流马过河流域为研究对象,在GIS支持下,分析水利工程建设前后流域土地利用类型、植被覆盖度的变化,以及进行流域梯级开发对植被及景观格局的影响研究^⑤;杨远祥等以高山峡谷区白龙江上游降扎河段为例,采用市场价值法、机会成本法等评价方法,研究了该河段小水电梯级开发对流域河流水力发电、河流输沙、大气组分调节、植被生产、控制侵蚀、生物多样性保护等生态系统服务功能的影响^⑥。

① 袁文昊:《三峡建坝后长江中游河床冲淤的水沙动力过程》,华东师范大学博士学位论文,2014年。

② 曹亚丽、贺心然、姜文婷:《水电梯级开发水文情势累积影响研究》,《水资源与水工程学报》2016年第6期,第20-25页。

③ 王秀艳、詹黔花、刘长礼,等:《水坝建设对滹沱河流域石家庄段生态环境的影响》,《水利水电科技进展》2006年第6期,第6-10页。

④ 吕军、汪雪格、刘伟,等:《松花江流域主要干支流纵向连通性与鱼类生境》,《水资源保护》2017年第6期,第155-160,174页。

⑤ 农定飞、韩方虎、杨美临:《马过河流域梯级开发对植被及景观格局的影响研究》,《华中师范大学学报(自然科学版)》2018年第1期,第80-88页。

⑥ 杨远祥、申文金、杨占彪,等:《白龙江上游水电梯级开发对河流生态系统服务功能的影响》,《水利水电技术》2014年第7期,第21-25页。

二、流域生态环境质量评估的研究进展

流域是一个以水为主要纽带的“自然-社会-经济”复合巨系统。当流域生态环境受各种自然或人为因素干扰，超过自身的适应能力时，必然在某些方面出现不可逆转的损伤或者退化，如生产力下降、生物多样性减少、对环境的调节能力下降等，具有一定的脆弱性，因此，流域生态环境质量的研究已日益受到人类的重视。流域生态环境的质量评价，将为流域的规划、管理和保护及流域综合治理提供决策依据，也是保障流域生态安全的基础，因此，不同国家和地区的政府、专家学者纷纷从各种角度对流域生态环境质量进行评价和研究。作为流域生态环境平衡状况指标的生态环境健康评价、生态环境风险评价和生态环境承载力评价，成为近年来流域生态环境质量评价研究的基本主题和大趋势。

（一）流域生态环境健康评价

生态健康是我国 20 世纪 80 年代兴起的一个新的研究领域。国外对有关流域生态健康的评价研究工作开展得较早。19 世纪末期，针对已出现严重污染的欧洲少数河流，对河流健康的评价主要停留在对水质的评价上。20 世纪 80 年代初，河流管理的重点由水质保护转到河流生态系统的恢复，河流健康评价的内容也开始转向对河流生态质量的评价。而流域作为河流生态系统的外源影响因素，其气候、地质特征和土地利用状况等决定着流域内河流的径流、河道、基质类型等物理及水化学特征。从任何角度都可认为流域决定河流，有什么样的流域就有什么样的河流，反之亦然。^①因此，随着水土保持和生态系统建设的深入及经济社会的发展，国内外对流域的综合治理也已提高到流域的保育、健康等更高的目标上，对流域生态系统健康的研究日益受到人类的重视，不同国家和地区将越来越重视以流域为单元，建立生态系统健康评价体系、恢复流域生态系统或从生态系统健康的角度综合整治流域环境作为流域开发的重要措施。^②

从流域巨系统出发，综合考虑流域内部不同生态系统，分析流域生态系统演变过程，评价系统的健康状况，对促进流域生态系统建设及稳定发展在理论和实践上都具有重要意义。^③对流域尺度上的生态健康评价，美国

① 唐涛、蔡庆华、刘建康：《河流生态系统健康及其评价》，《应用生态学报》2002 年第 9 期，第 1193 页。

② 罗跃初、周忠轩、孙轶，等：《流域生态系统健康评价方法》，《生态学报》2003 年第 8 期，第 1607 页。

③ 龙笛、张思聪、樊朝宇：《流域生态系统健康评价研究》，《资源科学》2006 年第 4 期，第 38 页。

尝试得较早,于2005年前后分别对美国的密西西比河流域、新泽西州流域和波特兰市流域开展了生态健康评价工作,并根据专家和公众的意见,拟订了健康评价指标体系,并据此进行了流域生态健康评价。^①近年来,我国学者也开始尝试在一些具体流域进行生态环境健康评价的个案分析。

国内外流域生态系统健康评价的方法主要有两种:一是生物监测法,二是指标体系评价法。生物监测法,是依据生态系统的关键物种、特有物种、指示物种、濒危物种、长寿命物种和环境敏感物种等的数量、生物量、生产力、结构指标、功能指标及一些生理生态指标来描述生态系统的健康状况,是河流生态系统健康评价的重要手段。例如,张方方等根据2009—2010年赣江流域60个采样点的底栖动物数据,基于底栖生物完整性指数,对流域的河流健康进行分析和评价^②;殷旭旺等以辽宁省太子河流域为研究范例,调查了全流域范围内69个采样点的着生藻类群落和水环境理化特征,并在此基础上应用硅藻生物评价指数(diatom biology index, DBI)和着生藻类生物完整性评价指数(periphyton index of biological integrity, P-IBI),同时结合栖息地环境质量评价指数(qualitative habitat evaluation index, QHEI),对太子河流域水生态系统进行健康评价^③。

指标体系评价法,就是选用能够表征流域生态环境的主要特征,对这些特征进行归类区分,并确定每个特征因子在流域生态环境健康中的权重,最后选用适当方法进行综合。由于指标体系评价法综合物理、化学、生物及社会经济指标,能反映流域的自然、社会、经济等不同方面的信息,因此,指标体系评价法成为目前生态环境健康评价的主要方法,尤以经济合作与发展组织(Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD)建立的“压力-状态-响应”(press-state-response, PSR)模型框架应用得最为广泛。该评价结构不仅对流域生态系统的现状和变化趋势进行了评价,而且在流域管理中可针对生态系统的变化趋势给出响应或治理对策。其中,“压力”包括直接或间接的人类活动对流域环境的改变;“状态”主要是指流域的物理、化学和生物条件,或自然系统的状态,包括人类的健康和财富;“响应”包括政府行为或政策、部门、个人对环境改变的应对和治理。^④例如,吴炳方和罗治敏以生态系统健康理论为基础,利用PSR

① 李春晖、崔嵬、庞爱萍,等:《流域生态健康评价理论与方法研究进展》,《地理科学进展》2008年第1期,第10页。

② 张方方、张萌、刘足根,等:《基于底栖生物完整性指数的赣江流域河流健康评价》,《水生生物学报》2011年第6期,第963-971页。

③ 殷旭旺、渠晓东、李庆南,等:《基于着生藻类的太子河流域水生态系统健康评价》,《生态学报》2012年第6期,第1677-1691页。

④ 龙笛、张思聪、樊朝宇:《流域生态系统健康评价研究》,《资源科学》2006年第4期,第39页。