

流域生态学及模型系统

陈求稳, 欧阳志云

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要:流域生态学是一门复杂的交叉学科, 主要研究流域自然、社会和经济之间的动态关系。虽然流域生态学的发展较晚, 尚处于初期阶段, 但却有重要的研究意义和应用前景。分析了目前国内外流域生态学研究现状和存在的问题, 然后结合在荷兰参与流域生态研究的经验探讨流域生态学研究的一些思路和框架; 重点论述了如何应用现代计算科学和信息技术建立流域生态学研究的定量方法和模型系统, 最后给出了荷兰 Veluwe 湖和莱茵河下游的流域生态研究及模型实例。

关键词:流域; 系统生态; 水过程; 信息科学; 模型系统

文章编号: 1000-0933(2005)05-1184-07 **中图分类号:** Q14 **文献标识码:** A

Watershed ecology and modeling system

CHEN Qiu-Wen, OUYANG Zhi-Yun (Reserch Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1184~1190.

Abstract: watershed ecology is a complex and interdisciplinary subject which investigates the dynamics between nature, society and economy. However, at the present watershed ecology mainly focuses on the mutual interactions between water resources and ecosystem with the disturbance from human activities. Although watershed ecology is a relatively new topic and it is at the infant stage, it has great research significance and promising practical applications. This paper first reviewed the recent developmens of watershed ecology, and then emphasized the framework of future research in this field by incorporating the experiences in watershed research in the Netherlands. The paper especially highlighted the applications of the advanced computation science and information technology to developing quantitative methods and modeling system for watershed ecology research. The case studies of the watersheds of the Veluwe Lake and the River Rhine in the Netherlands were presented as well.

Key words: watershed; system ecology; hydrological process; information technology; modelling system

流域是指某个水系及其集水区域, 是内陆生态系统的基本单元。由于自然事故和人类干扰, 流域经常面临着很多的问题, 如洪水、干旱、山地灾害、水资源短缺和生态退化等, 因此流域综合管理成为重要的研究课题。

流域综合管理在真正意义上不应单纯以保护为目标, 而以发展为根本出发点, 并把资源综合利用, 生态结构平衡和生态安全作为绝对约束条件, 以保证发展的可持续性。目前的流域综合研究主要在水利和生态两个方面进行: 其中水利方面主要研究流域的水文情势、水资源开发和水环境容量等, 对生态的考虑主要是在水土保持、水污染防治和水利工程环境影响评价上; 生态方面主要研究流域的土地利用、生物生理特征、生态栖息地、生态结构及功能和生物多样性, 较少涉及与水文、水动力学和水工建筑物运行之间的相互关系, 这种分离对流域综合管理带来了一定的问题, 譬如:

在水利方面, 生态对水的影响目前还较少考虑(1)浮游生物的种群结构变化对水体自净能力的影响;(2)河床及岸边带植物的生长对减少冲刷、维护河流形态的作用;(3)洪泛区植被的变化对河流糙率及水流演进的影响等^[1]。虽然水资源对生态的影响

基金项目: 中国科学院“百人计划”资助项目

收稿日期: 2005-01-10; **修订日期:** 2005-03-15

作者简介: 陈求稳(1974~), 男, 湖北人, 博士, 研究员, 主要从事内陆水及河口生态环境研究和模型系统开发应用。E-mail: qchen@mail.rcees.ac.cn

Foundation item: the “100 Talents Program” of Chinese Academy of Sciences

Received date: 2005-01-10; **Accepted date:** 2005-03-15

Biography: CHEN Qiu-Wen, Ph. D., Professor, mainly engaged in eco-environment research and modeling system development for inland and coastal waters. E-mail: qchen@mail.rcees.ac.cn

考虑了水文情势、水污染和水资源工程等因素,但是影响程度的确定很少结合受影响生物自身的生理特征,因此基本停留在单方向定性描述上,很少定量地评价生物在受干扰下的适应性生长及相应的种群结构的变化。

在生态方面,生态对水资源的影响主要集中在土地利用和植被变化对产流和水质的影响以及湿地对水体的净化作用,基本不涉及对水动力过程的影响。水资源对生态的影响则很少考虑:(1)水体的流场,(2)泥沙过程和河床地貌,(3)地下水变化,(4)洪流、水利工程运行以及生态紧急输水所形成的水流脉冲等因素的作用,而这些因子既能直接影响生物的生长,又能间接影响生物的栖息地和繁殖,从而可能对某些生物的生长创造有利或者不利条件,以致改变流域的生态结构^[2]。

20 世纪 90 年代后期河流研究开始提出环境流量的概念,但概括说来主要包括两个方面:其一是以水质达标为目的的河道最小需水量,实际是以纳污为目的的环境容量;另外一个就是以保护鱼类资源为目标的河道必须保持的流量,在某种意义上接近于后来提出的生态流量。但无论是环境流量还是生态流量,基本局限在水体内,而较少涉及流域的陆地部分,甚至连边滩和水陆交错带也很少包括。

生态水文学^[3,4]主要研究水循环和生态之间的相互关系,生态水力学^[2,5]则重点研究水动力学与生态演变之间的基础动力学过程。另外,生态水工学^[6,7]主要从宏观上研究水资源工程对生态的影响、相应的生态补偿以及未来生态型水工建筑物的设计思路。生态水文学和生态水力学的定量描述为生态水工提供技术支持,而生态水工为前者明确了研究的方向。

流域(区域)生态水资源,包括生态需水、生态用水和生态耗水^[8,9]的发展开始逐步实现水资源、水生态和陆生生态的结合,但目前这方面的研究还缺乏系统的方法^[10]。此外,虽然水资源研究者和生态学研究者在流域生态水资源的定义和目标上还存在很大差别,但基本上都围绕着水量配置去讨论^[11],而较少涉及水资源和生态系统之间的双向动力学关系。蔡庆华等于 1997 年正式提出流域生态学概念^[12],现已有不少研究对其背景、必要性、理论框架和研究内容进行了阐述^[13~17],但却较少涉及到定量方法和模型系统,因此还存在很大的发展空间。20 世纪 90 年代末,荷兰在流域生态恢复项目“还空间予河流(Ruimte voor de rivier)”中提出了“流域生物多样性目标”的理念,研究流域内水过程对生态系统的影响以及生态结构变化对水过程的作用,并初步展开了流域生态学的定量研究^[18];类似的工作在美国亦有所开展^[19]。目前国际上流域生态学定量研究还面临着几个主要难点:(1)空间异质性和生态系统动力过程的影响;(2)局部相互作用的影响;(3)多过程、复合时空尺度的耦合问题。

本文在分析我国目前流域生态学研究现状和问题的基础上,结合在荷兰多年参与流域生态研究的经验探讨流域生态学研究的一些思路和框架。文章重点论述了流域生态学研究的定量方法和系统模型,以及与现代计算科学和信息技术集成。

1 流域生态学及模型系统

流域生态学是一门新兴的交叉学科,它把整个流域作为一个系统,研究其自然、社会和经济等组件的结构和功能以及他们之间的相互作用。但目前流域生态学的研究范围还基本局限于在一定的人类活动干扰下水资源和生态系统之间的相互关系,即狭义流域生态学。

狭义流域生态学综合考虑局部气候、水文、水力学和生态动力学之间的相互动态关系,研究不同水文、水力情势下水生生物、陆生植被、岸边带(边滩和水陆交错带)以及生物栖息地等生态演变;同时研究生态变化如土地利用、植物覆被和水生生物结构对流域水量及水质的影响。狭义流域生态学可以认为是生态水文学^[3,4]和生态水力学^[5]的耦合,其基本构架可用图 1 所示。为了更好地阐述流域生态学的结构,图 2 给出了特征河流断面的概化图。

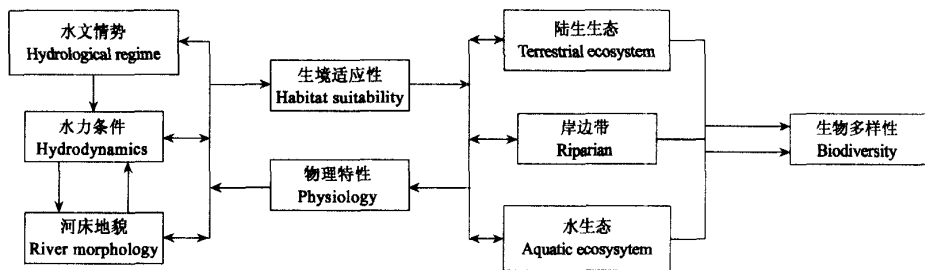


图 1 流域生态学的基本构架

Fig. 1 Fundamental framework of watershed ecology

其中水文情势主要是指流域的产流情况及控制断面的流量,它受降雨、土壤、流域地貌,土地利用和水力调节等因素的影响。水文情势的计算主要采用分布式流域水文模型,如新安江模型,丹麦水力研究所开发的 MIKE-SHE 模型以及美国环保局的 HSFP 模型等。水文情势直接影响河道的水力条件,如图 3 所示。

水力条件主要包括流场、水质、地表水位和地下水位,是流域生态学中生态水文学和生态水力学联系的纽带。水力条件受水

文情势、河床特征、土壤结构、水生植物和岸边带植被等因素的影响;同时水力条件通过流速和紊流强度、泥沙输送、营养物输送以及地下水补给等方式直接或者间接影响河床地貌、水生生物和陆生植被,如图4所示。流域生态学中水力条件的计算采用水动力-水质耦合模型,地下水位通常采用三维地下水模型。

河床地貌是流域生态的一个十分活跃的部分,一方面河床地貌受流场的影响产生冲刷,使某些生物丧失其栖息地,如水生植物所需的土壤介质以及鱼类的产卵场,或者产生淤积造成局部河段断流;另一方面河床及岸边植物的生长可以改变水力糙率和稳固泥沙,从而改变流场和减少冲刷,如图5所示。因此,近年来围绕河床演变的研究非常多^[10, 20]。河床地貌的演变一般采用二维泥沙模型进行计算,并用一维全河段水力模型的结果作为边界条件。

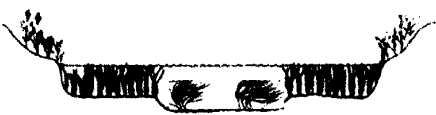


图2 特征河流断面概化

Fig. 2 Sketch of a typical river cross-section

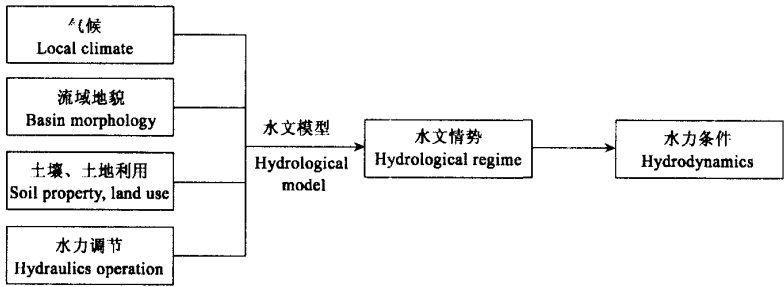


图3 流域生态学的水文情势组件

Fig. 3 Component of hydrological regime in watershed ecology

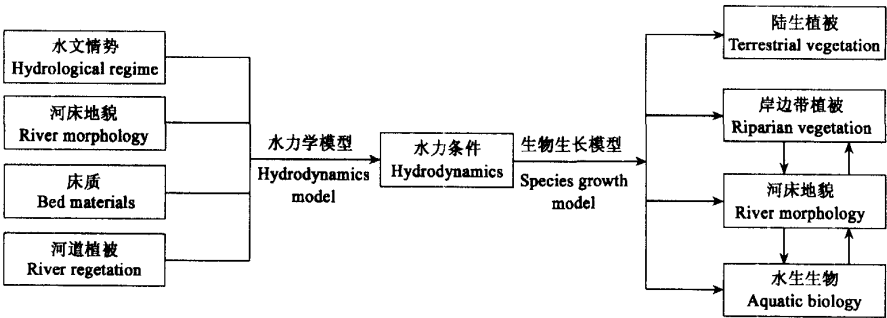


图4 流域生态学的水力条件组件

Fig. 4 Component of hydrodynamics in watershed ecology

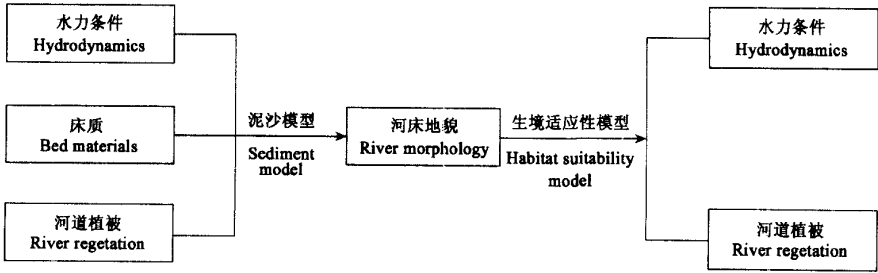


图5 流域生态学的河床地貌组件

Fig. 5 Component of river morphology

陆生植被在流域生态系统中有重要功能,它通过降雨截留、植物蒸发和根系持水等作用改变流域的水文情势^[21]。陆生植被除了受到土地利用改变的急剧影响,还受到局部气候和水力条件变化的缓慢影响,例如黑河流域的陆生植被退化在很大程度上是受到地下水位改变的影响。因此在干旱半干旱地区,流域生态研究的重点是综合演算水文过程和植被覆盖之间的双向动态关系。陆生植被的变化可以根据土地利用、地下水位、局部气候等条件并结合植物的生理特征采用经验方法和模糊数学进行生境适应性分析;而植被对水文情势的影响在分布式流域模型中通过参数体现。

岸边带(边滩和水陆交错带)植被对维护和恢复水体生态健康有极为重要的功能,首先水陆交错带植被可以维护和提供水生动物的栖息地^[22];其次从岸边带至水体建立的植被梯度形成一定的生态缓冲区,可以大量降低侧流对水体的污染,另外当岸边带植被达到一定的覆盖率时,会明显改变流态,从而对洪水演进、湿地净化效率以及河床地貌产生显著影响。岸边带植被主要受水力条件的影响:持续稳定的水流可以促进其生长和蔓延,而河道长期低水位或者干涸容易造成植物死亡;此外丰水期快速水流可能引起植物杆茎折断^[23]甚至生长地被冲刷,这在边滩以及湿地中比较常见。所以流域生态学研究的重点之一是岸边带的生态水力学过程。水力条件对岸边带植被的影响通常是结合生物的生理特征采用数字模拟的方法进行计算;而植被对水动力学的作用则通常采用经验公式估算和调整水力糙率系数,如曼宁系数或者谢才系数^[1]。

水生生物主要包括浮游生物、挺水植物和鱼类,对水环境有重要功能。但流域生态学对水生生物关注的重点是研究在不同的水力和水质条件下微型藻类和挺水植物之间的竞争关系以及相应的种群结构变化和生态平衡点迁移^[5, 24]。微型藻类主要受流速和水质的影响,流速减缓和水体富营养化容易促使某些藻类取得生长竞争优势而大量快速地繁殖,并抑制水生植物的生长,严重时甚至导致水华。挺水植物主要受水下光照条件和泥沙冲淤的影响,充足的水下光照和相对稳定的河床有利于其生长。另外河床植被本身可以稳固底质,降低水体浑浊度,从而加强水下光照,为其生长创造有利条件。由于河床植被的发展可以增强水体净化,提高水体清澈度,制约藻类的爆发性生长,因此挺水植物的恢复和生长是富营养化水体修复的转折点。在我国某些湿润地区,水体富营养化引起的流域生态问题十分突出,因此研究水流和水质变化与生物种群结构以及生物多样性改变之间的动态关系成为流域生态学的重点,这同样对流域生态修复具有重要的指导意义。水生生物的竞争性生长通常是依据生物的生理特征采用一阶动力学方程进行模拟^[25]。

2 流域生态学模型系统的实现

由于现代计算科学和信息技术的高速发展,使得大规模数据采集和流域性尺度的定量计算成为可能,为开发建立流域生态模型系统提供了支持。但是流域生态包含多个过程和复合时空尺度,其中有些过程相互耦合同步进行,因此在实现模型系统的开发和应用时须根据目的和重点进行系统分解和简化处理。首先在时间尺度上包括短时脉冲、季节变化和长期变化。

短时脉冲主要由洪水过程、水工调节和生态应急供水等形成,其作用范围一般局限在水体及边滩以内,而且其生态影响是暂时的和随机的。但是如果是大洪水并造成洪灾,其生态影响则是大面积而且长期的。例如长江中下游洪水会造成携带血吸虫病毒的钉螺的大面积扩散^[26]。短时脉冲采用一维-二维耦合水动力学模型进行模拟,然后利用经验方法定量评价水位和水温对流域生态的影响;对于洪水过程,还要考虑河床地貌的影响。

季节变化主要与流域所处的地理位置有关,通常是由于降雨变化引起湿周改变所带来的生态影响,包括干涸的面积和持续的时间。由于季节变化对流域生态的影响一般具有周期性的,所以不是流域生态学研究的重点。

长期变化主要包括局部气候变化、地貌变迁和土地利用改变,其影响是长久、复杂和大范围的,因此是流域生态学研究的重点。局部气候变化着重考虑在未来各水平年的丰、平、枯水期降雨量的增加或者减少;土地利用重点是依据社会经济政策和发展规划预测研究区域未来的土地利用结构;河床地貌主要研究未来流域水文情势改变时河床及边滩的变迁。局部气候的变化通常采用统计方法,土地利用的改变可以采用元胞自动机模式,然后利用分布式水文模型模拟它们对流域水文情势的影响,再运用水力学-泥沙耦合模型模拟河床地貌的变迁,最后利用生态模型分析对流域生态的作用;流域生态的变化又反馈到流域物理特征中去。由于这些动态变化既相互作用、同时进行,又在速度上存在很大的差异,所以在模拟的过程中先依据生态系统等级嵌套理论^[27]进行系统分解和异步化处理,再执行多尺度的耦合^[5]。

在空间上,根据实际情况流域生态研究的侧重点也有很大差异。从大的尺度上看可以分为干旱半干旱区和湿润区,在每个区内又可以分为水体、边滩和水陆交错带、以及陆地部分。在干旱半干旱地区,流域生态学研究的重点一般是水量,即生态水文学;而在湿润地区,研究的重点是水环境,即生态水力学。

对于水体,重点研究不同水力条件下微型藻类与挺水植物之间的竞争性生长以及对水生态的影响,关键因子包括河道水位、流速、水质指标和生物生理特征,在方法上主要采用水流——水质模型和生物生长方程进行数字模拟。

对于边滩和水陆交错带,重点研究水力条件与河床地貌变迁以及相应的植被结构和生态梯度变化之间的关系,关键因子包括河道水位、边滩地下水位、泥沙冲淤和生物生理特征,在方法上主要运用二维水流——泥沙耦合模型、三维地下水模型和基于元胞自动机模式的生境适应性模型。

对于陆地部分,重点研究土地利用变化与流域水文情势之间的关系,关键因子包括区域社会经济规划和植被结构,其中土地利用结构的预测可以运用具有约束条件的元胞自动机模式,其对水文情势的影响以及水土流失和面源问题通常采用分布式流域水文模型。

由于在整个系统中要用到大量的空间数据,流域生态学研究一般尽可能应用地理信息系统(GIS)和遥感(RS)技术。在模型模式(paradigm)上,水文情势、水力条件、河床地貌采用均质性模式;考虑到生态系统和土地利用结构受空间异质性和局部相互作用的影响较大,故一般采用元胞自动机模式^[28]或基于个体的模式^[29]。在方法(technique)上,水文、水力学和地貌采用基于数学物理方程的数字模拟,而生态演变由于其复杂性,可以采用经验方法或者模糊数学予以补充。

3 流域生态学模型系统的应用实例

流域生态学虽是一门相对新兴的学科,但已经开始逐步在流域综合管理、生态修复和栖息地建设等方面得到具体应用。

3.1 湖泊小流域生态修复

荷兰 Veluwe 湖是从 IJssel 大湖人工分离出来的一部分(图版 I),湖泊总面积 3300hm²,平均水深 1.4m。根据长期观测资料发现 Veluwe 湖形成初期,水体非常清澈,长有种类丰富的水草。后来由于周边小城镇的发展带来的生活污水的排放,流域及湖内的水体出现了富营养化现象,湖泊本身的水生植物结构也相应地发生了改变,水草 *Chara aspera* (*C. aspera*) 逐步消失,蓝藻和 *Potamogeton pectinatus* (*P. pectinatus*) 成为绝对主导物种^[30]。从 20 世纪 70 年代末开始,荷兰政府采取了一项长期的污染消减和湖泊恢复措施,至 20 世纪 90 年代后期,Veluwe 基本实现了湖泊修复。

为了推广其经验,进一步更好地治理该湖泊和其他湖泊,研究开发了一套以生态水力学模型为核心的流域生态系统,模拟在不同的污染消减计划下湖泊的生态恢复状况。系统中湖泊支流的水力学和水质采用一维数学模型;由于是浅水湖泊,几乎没有分层效应,所以湖泊本身采用二维数学模型,模拟在风力和入流的扰动下湖泊的水力学和水质条件。湖泊中浮游植物(微型藻类)、两种挺水植物(*Chara aspera* 和 *Potamogeton pectinatus*)之间的竞争性生长选用了元胞自动机算法,其演变规律根据生物的生理特征,采用一阶动力学生长模型,包括光合作用、呼吸、自然死亡率和繁殖扩散等^[31]。

图版 II 给出了模型的部分计算结果,与同年的观测值比较,虽然从准确的量方面存在一定的差异,但空间扩展模式以及生物种群结构变化趋势与实际比较吻合,因此该流域生态学系统经过不断改善和参数调整后逐步应用到其他 3 个湖泊的管理中去^[32]。类似的生态水力学模型和模糊数学方法也应用到太湖的富营养化预测^[33,34]。

3.2 莱茵河下游流域生态

荷兰位于莱茵河和马斯河的河口处,为了应对上游来水的压力,荷兰政府在研究人员的建议下计划实施“还空间予河流(Ruimte voor de rivier)”工程,并组织进行了系统的研究。项目要求尽可能维护和恢复河流的自然特征,改善流域的生态栖息地,以及提高流域的生物多样性。

研究依据政府长期的社会经济规划预测了研究区域未来土地利用的情况,然后在长序列水文资料的基础上计算未来各水平年来水量不同增幅下的水文情势,然后运用水动力学和泥沙模型计算不同的边滩和洪泛区恢复方案下的水力条件,并采用模糊数学方法对影响区域的生境适应性(HSI)和生物多样性进行评价,以选取优化方案。图版 III 是模拟的在实施洪泛区和边滩恢复后丰水期的沿程水位,图版 IV 是应用二维水力泥沙模型模拟的河床地貌的变化。

根据计算的水力条件和河床地貌,结合流域内各河段优势种和关键种的生理特征,采用模糊数学的方法进行生物栖息地适应性分析,如彩版 V 所示,从而定量地确定对生物多样性以及流域生态系统稳定性的影响,并提出相应的保护措施^[18, 35, 36]。

4 讨论

流域生态学虽然是生态学科的一门新兴分支,但其发展比较迅速。当前流域生态学的重点发展方向是:(1)与其他学科如文学、景观生态学^[37]等动态耦合,研究流域格局-过程-尺度和流域生态演变的关系;(2)充分利用现代信息技术和高性能计算科学,建立经济社会约束条件下的流域生态模型系统^[38];(3)应用流域生态模型系统进行情景模拟和方案优化,实现流域生态规划^[39]。

我国近几年在黑河流域多次启动生态应急供水,虽然起到一定的效果,但要取得根本性的改善,有必要依照流域生态学的思路对黑河流域进行综合研究和治理。类似地在我国西部以及西北生态脆弱区,应该着力开展以生态水文为主的流域生态研究;而在南方及东南湿润地区如太湖流域^[14],应重点开展以生态水力学为主的流域生态研究。

密云水库是北京的重要水源地,但近几年不断出现水资源问题,即使是在出现大的降雨年份,因此很有必要从生态和水资源相结合的角度对密云水库流域进行综合研究。另外由于三峡工程的带动,已经在长江流域进行了大量的水生生态学和陆地生态学的调查研究,积累了许多有关自然资源、生态环境和社会经济方面的资料,是进一步开展流域生态学研究的基础。尤其怒江开发一直是人们关心的问题,结合新兴的流域生态学理念,综合规划怒江开发具有重要的意义。

References:

- [1] Erduran K S, Kutija V. Quasi-three-dimensional numerical model for flow through flexible, rigid, submerged and non-submerged vegetation. *Journal of Hydroinformatics*, 2003, **5**(3): 189~202.
- [2] Jorde K, Schneider M, Peter A, et al. Fuzzy based models for the evaluation of fish habitat quality and instream flow assessment. *Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics*.
- [3] Eagleson P S. *Ecohydrology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [4] Eagleson P S. *Ecohydrology: Darwinian Expression of Vegetation Form and Function*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [5] Chen Q. *Cellular Automata and Artificial Intelligence in Ecohydraulics Modelling*. Taylor & Francis Group plc, London UK, 2004.
- [6] Dong Z. On the design principles of eco-hydraulic engineering. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, **10**: 1~7.
- [7] Dong Z. *Ecological compensation of Dammed River*. Proceedings of UN Conference on Hydropower and Sustainable Development, 2004.
- [8] Yang Z, Cui B, Liu C. *Theory, method and practice of ecological and environmental water demand*. Beijing: Science Press, 2003.
- [9] Wang G, Cheng G. Water resources development and its influence on the eco-environment in arid areas of China-The case of the Heihe river basin. *Journal of Arid Environment*, 1999, **43**(2), 121~131.
- [10] Baptist M J, Lee G E M, Kerle F, et al. Modelling of morphodynamics, vegetation development and fish habitat in man-made secondary channels in the river Rhine. In: King J ed. *Proceedings of the 4th Ecohydraulics Conference and Environmental Flows*. Cape Town, South Africa, 2002.
- [11] Liu L, Tan H. Study on the method of determining downstream minimal ecological flow in river. In: Lee J ed. *Proceedings of the 14th IAHR-APD Conference*. Hong Kong, 2004.
- [12] Cai Q, Wu G, Liu J. Watershed ecology-New discipline, idea and approach. *Science & Technology Review*, 1997, **5**: 24~26.
- [13] Cai Q, Liu J. Watershed ecology and management system-an ecological review on disaster restoration. In: Xu H, Zhao Q, eds. *Flood Disaster and Scientific Countermeasures in Yangtze River Basin*. Beijing: Scientific & Technological Press, 1999. 130~134.
- [14] Yan S, Wang X. Watershed Ecology, Flood Disaster Control, Water Pollution Control and Sustainable Development in Taihu Basin. *Journal of Lake Sciences*, 2001, **13**(1): 1~8.
- [15] Deng H, Wang Q, Cai Q. Study on watershed ecosystem management. *China Population Resources and Environment*, 2002, **12**(6): 18~20.
- [16] Cai Q, Lou Z, Deng H. Watershed Ecology. In: Li W, Zhao J. eds. *Review and Prospects of Ecology Research*. Beijing: China Meteorological Press, 2004. 524~533.
- [17] Feng H, Wang C, Li J. Practice of ecological view in basin sustainable management. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2001, **14**: 21~23.
- [18] Duel H, Lee G E M, Penning W E, et al. Habitat Modelling of Rivers and Lakes in the Netherlands: An Ecosystem Approach. *Canadian Water Resources Journal*, 2001, **28**: 231~248.
- [19] O'neefe T C, Elliott S R, Naiman R J, et al. Introduction to Watershed Ecology. EPA Training Modules (<http://www.epa.gov/owow/watershed/wacademy/acad2000/ecology>).
- [20] van Rijn L C. Principles of sedimentation and erosion engineering in rivers, estuaries and coastal seas. Aquapublications, the Netherlands, 2005.
- [21] Hu F, Yu Wei. *Principle Hydrology*. Beijing, China Waterpower Press, 1988.
- [22] Penning W E, Van der Lee G, Kerle F, et al. Using habitat modeling to quantify the ecological potential and effectiveness of rehabilitation measures. In: Ruoppa M, et al. Eds. *How to assess and monitor ecological quality in freshwater*. 2003. 97~102.
- [23] Jinadasa K, Tanaka N, Yutani K, et al. Effects of vegetation and litter on flow. In: Lee J ed. *Proceedings of the 14th IAHR-APD Conference*. Hong Kong, 2004.
- [24] Scheffer M, Carpenter S, Foley J A, et al. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 2001, **413**: 591~596.
- [25] Jørgensen S E. *Fundamentals of Ecological Modelling* (2nd Edition). Elsevier Science B V, 1994.
- [26] Li D, Fu X. Oncomelania's environmental property and its control. In: Lee J ed. *Proceedings of the 14th IAHR-APD Conference*. Hong Kong, 2004.
- [27] Wu J, David J L. A spatially explicit hierarchical approach to modelling complex ecological systems: theory and applications. *Ecological Modelling*, 2002, **153**: 7~26.
- [28] Engelen G, White R, Uljee I. Integrating Constrained Cellular Automata Model, GIS and Decision Support Tools for Urban Planning and Policy Making. In: Timmermans H, Ed. *Design and Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning*. Dordrecht,

- Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [29] DeAngelis D L, Gross L J. *Individual Based Models and Approaches in Ecology: Concepts and Models*. Routledge, Chapman and Hall, New York, 1992.
- [30] Hosper S H. Clearing lakes: An ecosystem approach to the restoration and management of shallow lakes in the Netherlands. PhD thesis of Agriculture University Wageningen, 2001.
- [31] Chen Q, Mynett A E, Minns A W. Application of cellular automata to modelling competitive growth of two underwater species *C. aspera* and *P. pectinatus* in Lake Veluwe. *Ecological Modelling*, 2002, **147**: 253~265.
- [32] Meijer M L. Biomanipulation in the Netherlands, 15 years of experience. PhD thesis of Agriculture University Wageningen, 2000.
- [33] Chen Q. Self organisation feature maps in analysis of aquatic ecological data-a case study of Tai Lake. *Journal of Hydraulics Engineering*, 2001, **6**: 91~99.
- [34] Chen Q, Mynett A E. Integration of data mining techniques with heuristic knowledge in a fuzzy logic modelling of eutrophication in Taihu Lake. *Ecological Modelling*, 2003, **162**: 55~67.
- [35] Lee G E M, Aarts H P A, Boogaard, H F P, *et al.* Analysis of uncertainty in expert rules and input data for habitat suitability models. In: King J ed. *Proceedings of the 4th Ecohydraulics Conference and Environmental Flows*. Cape Town, South Africa, 2002.
- [36] Ducl H, Baptist M J, Geerling G J, *et al.* Cyclic Floodplain Rejuvenation as a strategy for both flood protection and enhancement of the biodiversity of the river Rhine. In: King J ed. *Proceedings of the 4th Ecohydraulics Conference and Environmental Flows*. Cape Town, South Africa, 2002.
- [37] Ma K, Fu B, Chen L. *Advances of landscape ecology research. Review and Prospects of Ecology Research*. Beijing: China Meteorological Press, 2004. 534~553.
- [38] Engelen G, White R, Uljee I, *et al.* Numerical modelling of small island socio-economic to achieve sustainable development. *Coastal and Estuarine Studies*, 1996, **51**: 437~463.
- [39] Ouyang Z Y, Zheng H. *Ecological Planning. Review and Prospects of Ecology Research*. Beijing: China Meteorological Press, 2004. 512~523.

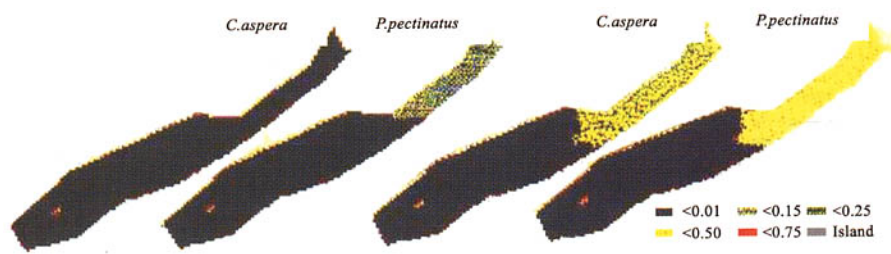
参考文献:

- [6] 董哲仁. 试论生态水利工程的基本设计原则. 水利学报, 2004, (10): 1~7.
- [7] 董哲仁. 筑坝河流的生态补偿. 见: 联合国水电与可持续发展国际研讨会论文集, 2004.
- [8] 杨志峰, 崔保山, 刘昌明. 生态环境需水量理论、方法与实践. 北京: 科学出版社, 2003.
- [12] 蔡庆华, 吴钢, 刘建康. 流域生态学: 水生态系统多样性研究和保护的一个新途径. 科技导报, 1997, **5**: 24~26.
- [13] 蔡庆华, 刘建康. 流域生态学与流域生态系统管理-灾后重建的生态学思考. 见: 许厚泽, 赵其国主编. 长江流域洪涝灾害与科技对策. 北京: 科技出版社, 1999. 130~134.
- [14] 阎水玉, 王祥荣. 流域生态学与太湖防洪、治污及可持续发展. 湖泊科学, 2001, **13**(1): 1~8.
- [15] 邓红兵, 王庆礼, 蔡庆华. 流域生态系统管理研究. 中国人口、资源与环境, 2002, **12**(6): 18~20.
- [16] 蔡庆华, 姜治平, 邓红兵. 流域生态学. 见: 李文华, 赵景柱主编. 生态学研究回顾与展望. 北京: 气象出版社, 2004. 524~533.
- [17] 丰华丽, 王超, 李剑超. 生态学观点在流域可持续管理中的应用. 水利水电快报, 2001, **14**: 21~23.
- [21] 胡芳荣, 于唯忠. 水文学原理. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [37] 马克明, 傅伯杰, 陈利顶. 景观生态学研究进展. 见: 李文华, 赵景柱主编. 生态学研究回顾与展望. 北京: 气象出版社, 2004. 534~553.
- [39] 欧阳志云, 郑华. 生态规划. 见: 李文华, 赵景柱主编. 生态学研究回顾与展望. 北京: 气象出版社, 2004. 512~523.



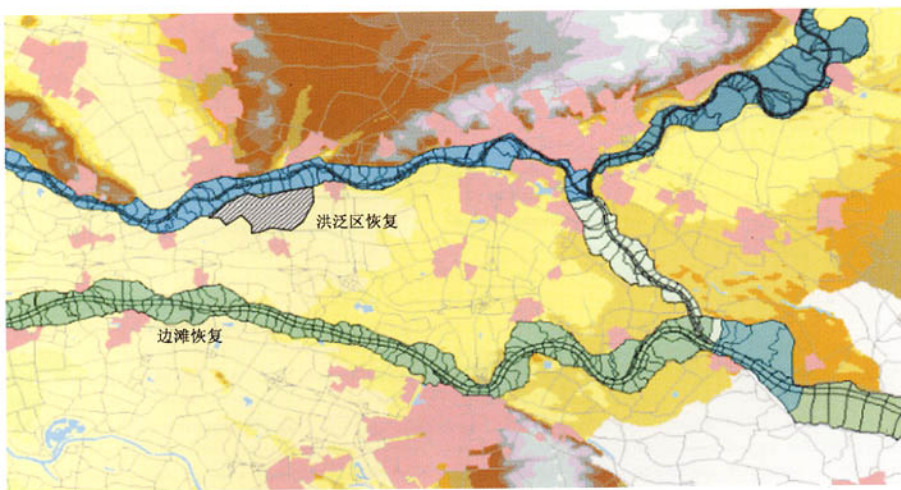
图版 I 研究区域 Veluwe 湖所处的位置^[31]

Plate I Location of the study area Lake Veluwe^[31]



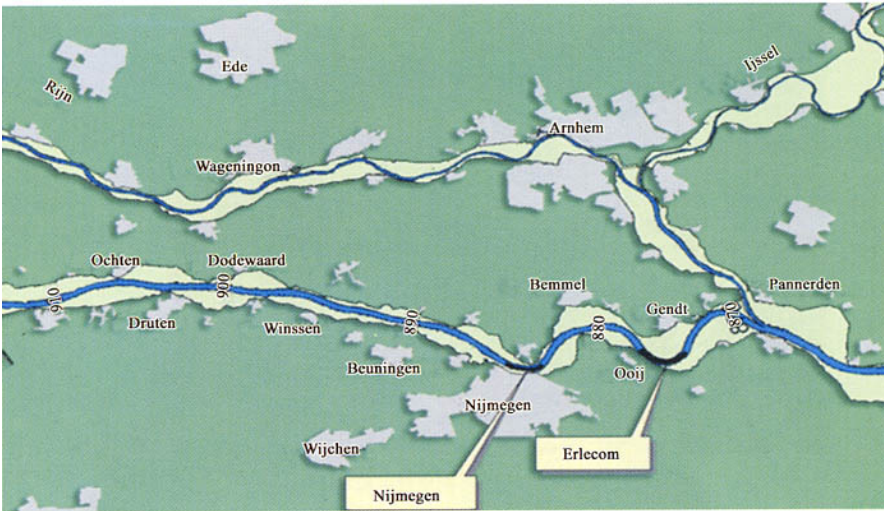
图版 II 模拟的荷兰 Veluwe 湖两种水生植物的生长和扩散情况^[31]

Plate II The simulated growth and colonization patterns of the two species in Lake Veluwe^[31]



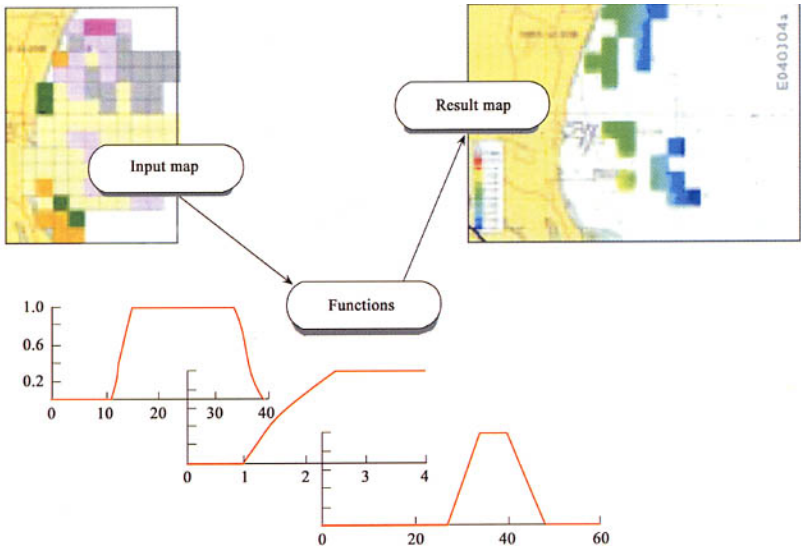
图版 III 模拟实施洪泛区和边滩恢复后的丰水期沿程水位

Plate III the simulated water level along the river during high flow period with the restoration of floodplain and detention area (from Delft Hydraulics))



图版 IV 计算相应的河貌形态演变

Plate IV Calculation of the dynamics of river morphology (from Delft Hydraulics)



图版 V 基于GIS和模糊数学方法的生物栖息地适用性分析系统

Plate V GIS and fuzzy rule based system for habitat suitability analysis (from Delft Hydraulics)