

流域水生态承载力理论与优化调控 模型方法

彭文启

(中国水利水电科学研究院水环境所,北京 100038)

[摘要] 流域管理正在从环境及资源的单一要素管理向流域水生态系统综合管理转变,流域水生态承载力是流域水生态系统综合管理的基本理论。针对流域水生态完整性保护管理需求,建立了流域水生态承载力概念模型,提出了流域水生态承载力概念,揭示其“分区、分期”属性和“量、质、序”递进综合约束作用等基本内涵,通过分析其优化调控特性及优化调控关键变量,建立了流域水生态承载力分区耦合概念模型,形成了基于系统动力学方法的流域水生态承载力分区分期耦合模型方法,并以辽河太子河流域为例,进行了实例应用。

[关键词] 流域水生态承载力;优化调控模型

[中图分类号] X171.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)03-0033-11

1 前言

承载力以人口资源环境相均衡、经济社会生态效益相统一为基本原则,是系统表征人类经济社会活动与生态资源环境协调关系与程度的重要指标。承载力的概念最早可追溯到18世纪末提出的资源环境对人口增长的限制理论^[1],指的是一定资源空间下承载人口的最大值。20世纪20年代, Park和Burgess在生态学领域首次使用了承载力的概念^[2],并将其定义为在某一特定条件下某种个体存在数量的最大极限。随着资源约束趋紧、环境污染严重、生态系统退化等问题的出现,承载力概念也不断延伸与拓展,在不同的发展阶段,产生了不同的承载力概念和相应的承载力理论^[3, 4]。针对不同阶段的水资源及水环境问题特征及管理需求,先后提出了水资源承载力^[5, 6]、水环境承载力^[7]和生态承载力^[8, 9]等概念与理论。

当前,全球流域生态系统承受了人类高强度的大规模改造活动,导致水资源短缺、水环境恶化、生

态退化、水生生物数量和多样性大幅度减少,严重威胁流域水生态系统服务功能的可持续利用。20世纪80年代以来,欧美国家和地区率先开始了流域生态管理思想的转变以应对挑战,提出了维持或恢复流域生态系统生态完整性的管理目标。例如,美国《清洁水法》明确提出维持或恢复水体的物理、化学及生物完整性;《欧盟水框架指令》提出到2015年达到河湖生态良好状况^[10]。我国在大规模经济开发和全球气候变化双重因素的交织作用下,流域水生态问题尤其突出,更加需要从流域环境及资源的单一要素管理向流域水生态系统综合管理转变。

现有的流域水资源承载力、水环境承载力主要局限于流域水资源系统及水环境系统的单一要素,已不能完全适应以保护流域水生态健康为目标的流域生态管理的需求。水资源承载力理论强调的是水资源系统的可支撑能力^[11],水环境承载力的关键元素是水环境容量或者水体的纳污能力。流域生态承载力尽管是流域水、土等各种生态环境要素的综合,但从其指标体系^[12, 13]分析,对流域生态系统

[收稿日期] 2012-12-11

[基金项目] 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07526-004)

[作者简介] 彭文启(1967—),男,湖南双峰县人,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为流域水环境模型、河湖健康评估与水生态保护;

E-mail:pwq@iwahr.com

主要关注的是陆地生态系统。因此,需要构建既能够体现当前流域水生态问题,又能将经济社会发展与水生态系统相联系,综合水量、水质、栖息及生物多样性的承载力理论,作为流域经济社会发展与流域水生态完整性保护协调管理的重要依据。

国家水体污染控制与治理科技重大专项“流域水生态承载力与总量控制技术课题”对流域水生态承载力内涵及评估方法进行了多方面的研究^[14-21],在上述成果基础上,本文针对流域水生态完整性保护管理需求,建立了流域水生态承载力概念模型,提出了流域水生态承载力概念,揭示其“分区、分期”属性和“量、质、序”递进综合约束作用等基本内涵,分析了其优化调控特性及优化调控关键变量,建立了流域水生态承载力分区耦合概念模型,形成了基于系统动力学方法的流域水生态承载力分区分期耦合模型方法,并以辽河太子河流域为例,进行了实例应用。

2 流域水生态承载力的内涵与概念

2.1 流域水生态承载力概念模型

流域水生态系统演变过程是流域内经济社会活动和气候变化驱动下基于水循环、化学过程和生物过程综合作用的结果。流域复合生态系统可以分为3个层面,即底层的水生态系统和顶层的经济社会系统,以及将水生态系统和经济社会系统紧密联系在一起的水资源系统和水环境系统(见图1)。水生态系统与经济社会系统二者之间存在竞争性用水(水质及水量需求)和空间占用关系。由于人类与水生生物需求之间的差异性,导致在对水生态系统的利用中更多地强调了人的需求,而压制了水生生物的需求。在“天然-人工”二元水循环^[22]驱动下,“经济社会-水资源-水环境-水生态”的相互耦合关系的整体性特征不断加强,流域复合生态系统更多呈现人类主导特征,导致水生态系统和经济社会系统之间的关系更趋紧张。

水生态系统具有一定程度的结构与功能的稳定性,既可缓解经济社会作用的各种压力与扰动破坏,又可最大限度地保障水生态承载力的正常调节作用及功能发挥。维持物理、化学、生物完整性的水生态系统,即良好的水生态状况,是维持健康的水资源系统及水环境系统的基础,是流域经济活动可持续发展的前提。因此,所谓的流域水生态承载力就是维持流域良好水生态状况条件下水资源系

统及水环境系统所能支撑的经济社会系统(以一定生活水平的人口最大数量和一定技术水平下的最大的经济规模表示);所谓的流域水生态承载力优化调控就是根据维持及恢复流域水生态系统完整性的要求,调整水资源系统及水环境系统结构,进而优化经济社会结构、规模与布局。



图1 流域水生态承载力概念图

Fig.1 Concept map of water ecological carrying capacity

2.2 流域水生态承载力内涵

2.2.1 “量、质、序”的综合递进限制决定了流域水生态承载力的复合特征

流域水生态承载力评价对象是人类主导下的“经济社会-水资源-水环境-水生态”流域复合生态系统。流域水生态承载力是一类复合承载力,包括水资源承载力、水环境承载力、栖息地环境承载力等,但并非这些承载力的简单加和,而是反映出限制条件不断递进、时空异质性不断加强的关系。其中,水资源承载力主要反映水量的支撑作用,表现为“量”的限制;水环境承载力主要反映水质的限定作用,主要强调的是最差时段的限制作用,表现为“质”的限制;而水生态承载力按照水生生态系统完整性保护要求,以水生生物保护为基点,在“量”和“质”的基础上,借助水生生物栖息地质量需求的限制作用,密切与自然水文情势的关系,具有与时序密切相关的特征,可以表现小尺度的空间分异性和全时段的时间分异性,总体上表现为“量、质、序”的递进限制。

2.2.2 “分区、分期”属性是水生态承载力的固有属性

由于流域水生态系统具有显著的时空异质性特征,因此决定了与流域水生态承载力有关的限制条件也具有高度的时空异质性;同时,不同发展阶

段,人类对流域水生态系统的要求不同,如水生态保护目标的高低随着时间的变化而呈现动态性。因此,“分区、分期”属性是水生态承载力的固有属性。经济社会的人类活动应依据流域水生态承载力时空差异合理布局,以最大限度地实现水生态系统与经济社会发展的协调。

2.2.3 系统协同进化特点确立了流域水生态承载力的弹性特征及可调控性特点

流域复合生态系统通过子系统之间物质、能量和信息的交流不断地协同进化。主要表现在两个方面:一方面,当流域复合生态系统中经济社会系统变化后,会通过耦合机制的作用将压力传到水生态系统内,水生态系统由于自身的“自我维持、自我调节”作用,会使得水生态系统与周围环境形成一个新的动态平衡,水生态承载力也相应发生改变;另一方面,对于最具能动作用的人类而言,其具有自我调节行为和知识技能不断积累的功能,从而能够主动地调整经济社会系统的结构和功能,进而影响到水生态承载力。

在人类主导下的流域复合生态系统中,经济社会与水生态之间的耦合关系和协同进化关系一般呈现3种典型状态(见图2):低发展水平的经济社会与良好的水生态系统(典型状态1),粗放发展水平的经济社会和非良好状态的水生态系统(典型状态2),可持续发展的经济社会和良好的水生态系统(典型状态3)。因此,水生态承载力的内涵强调了一定社会发展阶段的限定作用。

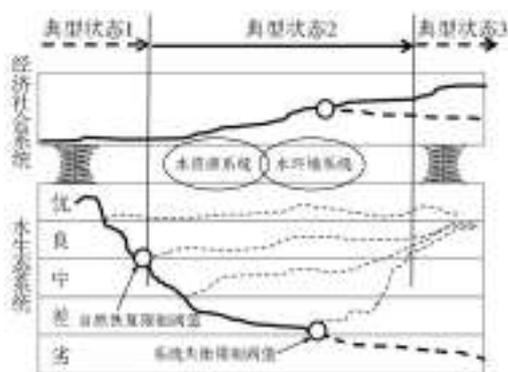


图2 流域水生态承载力典型状态概念图

Fig.2 Concept map of water ecological carrying capacity typical states

经济社会与水生态之间的耦合关系和协同进化过程中有两类重要阈值(见图2):a.水生态系统退

化过程发展到某一点,水生态系统所承受的压力仍然没有超出其“自我维持”与“自我调节”能力,仍然可以无需借助生态修复措施,通过自身调节实现自然恢复,称之为自然恢复限制阈值;b.水生态系统退化过程发展到某一点,水生态系统呈现劣的状态,经济社会及水生态复合系统整体严重失衡,有滑入系统崩溃通道的风险,称之为系统失衡限制阈值。

维持物理、化学、生物完整性的水生态系统,即良好的水生态状况,是流域经济活动可持续发展的基础。维持水生态系统良好状态,支持最大的经济社会福利,实现流域水生态保护与经济社会发展双赢,达到“人水和谐”,是流域水生态承载力调控的理想目标(典型状态3)。阻止水生态系统退化至劣状态,并扭转整个系统发展态势,免于崩溃所导致的不可逆,是流域水生态承载力不可突破的底线。

2.2.4 环境流量与环境容量控制是流域水生态承载力调控的两个关键变量

水体水质状况、水量或水文节律、河湖物理形态是水生态系统的3类重要的非生物要素指标,是流域水生态系统水生生物状况良好与否及人类社会关于河湖水资源功能预设目标满足与否的主要限制因素。环境流量及环境容量是这些限制因素的综合表征。因此,环境流量及环境容量调控是水生态系统及水环境系统结构调整的关键变量。

环境流量及环境容量的调控既包括经济社会发展方式的调控,控制河道外用水总量和污染物排放强度,也包括流域水生态系统保护与修复,提高水生态系统自我调节能力。在人类主导的流域复合生态系统中,前者是前提,后者是重要的辅助手段。因此,社会经济活动强度和具有一定生活水平的人口数量的优化控制应该是流域水生态承载力调控的重要内容。

2.3 流域水生态承载力定义

前文分析提出的流域水生态承载力定义,即维持流域良好水生态状况条件下流域水资源系统及水环境系统所能支撑的一定生活水平的人口最大数量和一定技术水平下的最大的经济规模,这一定义实际上是自然恢复限制阈值的定义。

我国流域水生态系统状况整体特点及经济社会发展阶段特点均表明我国流域复合系统主要处于流域水生态承载力演变过程的典型状态2阶段。为了保证流域水生态承载力调控的可操作性,以更好地指导该阶段的流域水生态保护并保障经济社

会发展,结合流域水生态承载力调控关键变量进行分析,可以进一步提出系统失衡限制阈值的定义:在保证一定的环境流量、水体水质目标及栖息地质量以支持流域水生态系统完整性不断修复的前提下,流域水资源及水环境系统所能支撑的最大人口数量和经济规模。

3 流域水生态承载力分区耦合优化调控系统动力学模型

3.1 流域水生态承载力量化分析方法

现有的承载力评价量化分析方法包括向量模法^[23-25]、多目标决策分析方法^[26]、模糊综合评价法^[27]和系统动力仿真模型法^[28-34]等。系统动力学(SD)法在研究复杂系统的行为,处理高度非线性、高阶次、多变量、多重反馈问题方面具有优势^[35],因此SD法是目前使用较多的一种研究承载力的方法。但是,现有的流域水资源或水环境承载力系统动力学模型^[28-34]以流域整体为单元,属于集总模型,不能描述和模拟流域空间要素及其状态,无法根据流域水生态分区特点及经济社会格局差异提出分区优化调控方案。由于难以反映流域水生态系统固有的“分区、分期”特质,因此其调控方案的效用往往相对较低。

针对需要模拟系统分区差异性的要求,国外学者提出了利用栅格式SD方法描述局地动态的方法。该类方法通过物质和信息的水平流动连接各栅格单元,从而构成系统总体的演变动态^[35]。Ahmad等^[36]提出了GIS与SD耦合的空间SD方法,用来模拟环境管理、水资源管理、自然资源管理、气候变化、灾害管理中空间-时间的相互作用过程,并以加拿大红河流域的洪水管理作为案例加以应用。裴相斌等^[37]将SD方法和GIS方法结合起来,提出了GIS-SD结合的概念框架,建立了大连湾水污染控制系统模型,并进行了时空模拟和调控策略研究。

3.2 流域水生态承载力分区分期调控概念模型

根据流域水生态承载力固有的“分区、分期”特质,本文提出流域水生态承载力分区分期耦合SD概念模型(见图3)。该分区分期耦合概念模型具有以下主要特点。

1)分布式模型。基于流域水生态功能分区建立控制单元分区,以流域控制单元分区为基本单

元,建立各控制单元的流域水生态承载力SD模型。

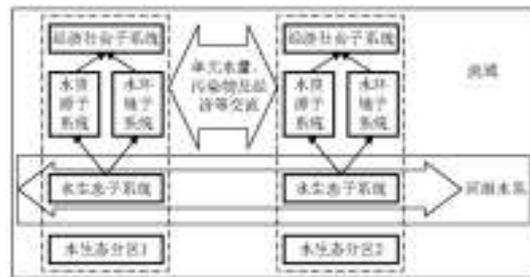


图3 流域水生态承载力分区耦合概念图

Fig.3 Concept map of water ecological carrying capacity distributed model

2)空间耦合。控制单元分区系统耦合包括控制单元内部的水陆耦合(内部耦合)和基于水力联系及物质与信息交换的控制单元之间的耦合(外部耦合)。水陆耦合(内部耦合)是指通过水生态功能区及其控制单元的划分,引入水域与陆域经济社会系统的空间对应关系,以取水排水为主要途径,沟通控制单元以及用水排水体系与流域水生态系统的对应关系。单元之间的耦合(外部耦合)是指依托不同水生态功能区的水力联系,建立各水生态功能分区的水量及水质联系,基于水生态功能区分区进行经济社会的物质及信息交流,建立各水生态功能分区经济社会联系。

3)分期。按照流域水生态功能区目标生物的保护时序限制条件,以生物栖息地质量时变过程为基础,引入水量、水质动态变化过程(月或旬过程),实现时间尺度的缩小,强化对流域水生态系统年内变化特征的响应,以提高流域水生态承载力调控方案的生态学意义。

4 辽河太子河流域水生态承载力“分区、分期”调控方案研究

4.1 辽河太子河流域概况

太子河是辽河下游左侧支流,主要流经辽宁省本溪、辽阳、鞍山3个城市,其主要特点是经济发展速度快,水资源短缺,水污染严重和生态环境问题突出。依据水生态分区特点,结合流域生态功能区划、水功能区划、水资源区划、行政区划等,将太子河观音阁水库以下流域划分为8个水生态功能分区,各生态功能分区的基本特点及问题如表1所示。

表1 太子河流域各水生态功能分区特点

Table 1 Characteristics of the water ecological function regions in Taizi River basin

水生态功能分区	基本特点	存在问题
观音阁水库下游区	人口稀少,城镇化率较低,经济发展水平不高,水污染较少,生态状况较好	—
本溪城区	人口较多,城镇化率较高,经济发展水平较高,工业增加值占GDP比例都比较大,尤其高用水工业占GDP比例较大,污染负荷重	高用水工业占GDP比例较大,污染负荷重
稷窝水库区	人口相对稀少,经济发展速度相对较快,主要污染源为工业污水	—
汤河区	人口相对稀少,主要污染源为农业面源	—
辽阳城区	人口较多,城镇化率较高,经济发展水平较高,工业增加值占GDP比例都比较大,尤其高用水工业占GDP比例较大,污染负荷重	高用水工业占GDP比例较大,污染负荷重
北沙河区	人口较多,多为农业人口,城镇化率较低,农业面源污染负荷重	农业面源污染负荷重
柳壕河区	人口相对较少,城镇化率较低,经济系统中高用水工业占GDP比例较大,主要污染源为农业面源和工业点源,污染负荷重,栖息地面积较大	农业面源污染及工业点源污染负荷重
鞍山城区	人口较多,城镇化率较高,经济总量较高,但人均GDP水平并不高,工业增加值占GDP比例都比较大,尤其高用水工业占GDP比例较大,第三产业发展也比较快,农业灌溉面积也相对偏大,主要污染源为工业污水和生活污水,污染负荷重,但栖息地面积较大	高用水工业占GDP比例较大,工业污染负荷重,农业面源污染也较重

注:GDP为国民生产总值

4.2 辽河太子河流域水生态承载力评价指标

基于流域水生态承载力概念图及内涵分析,并根据太子河流域生态环境特征,提出太子河流域水生态承载力评价指标体系(见表2)。其中的栖息地面积指标,在太子河流域采用麦穗鱼作为水生态功能

区的指示水生生物,采用自然生境模拟法(PHAB-SIM)^[38-40]对其在不同生长条件下所需要的生境条件进行量化,研究提出其对流速、水深、水温、溶解氧等主要生境因子的适宜性标准曲线,并根据流域水环境模型计算不同水质及水量条件的栖息地面积。

表2 太子河流域水生态承载力评价指标

Table 2 Indicators of water ecological carrying capacity for Taizi River basin

序号	指标名称	单位	指标解释
1	城镇化率	%	城镇人口/人口总量
2	人均GDP	万元/人	地区生产总值/人口总量
3	万元GDP需水量	m ³ /万元	需水总量/地区生产总值
4	万元工业总产值污水排放量	m ³ /万元	工业排污量/工业总产值
5	万元GDP污水处理量	m ³ /万元	生活排污量/地区生产总值
6	人均水资源可供量	m ³ /人	水资源可供量/人口总量
7	供水量与需水量比例	%	供水量/需水量
8	河流环境流量满足程度	%	河流径流量/环境流量
9	COD容量利用比例	%	COD入河量/COD水环境容量
10	氨氮(NH ₄ ⁺ -N容量利用比例	%	氨氮入河量/氨氮水环境容量
11	植被覆盖率	%	植被面积/土地面积
12	水生生物适宜栖息地面积满足率	%	现状栖息地面积/适宜栖息地总面积

注:COD为化学需氧量

4.3 辽河太子河流域水生态承载力调控方案

根据流域水生态承载力分区分期强化耦合概念模型,建构基于辽河太子河水生态功能分区的流

域系统动力学模型。该模型由通过水力联系的各水生态功能分区的分系统组合而成,不仅考虑了各分系统内各要素的相互作用关系,还考虑了各分区

间的水量水质的累积影响关系。利用 Vensim 软件绘制出该模型的系统流图,如图4所示;各水生态功

能分区之间的相互作用关系如图5所示。

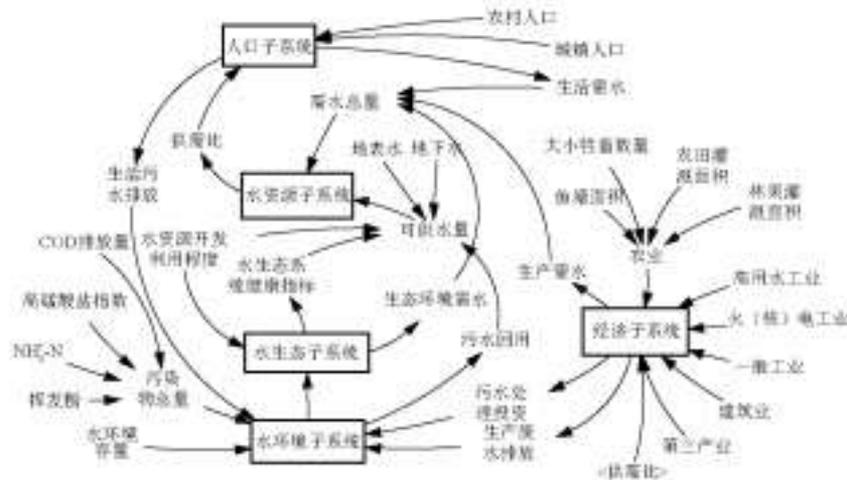


图4 水生态功能分区水生态承载力系统流图

Fig.4 Flow diagram of water ecological carrying capacity system in water ecological function region

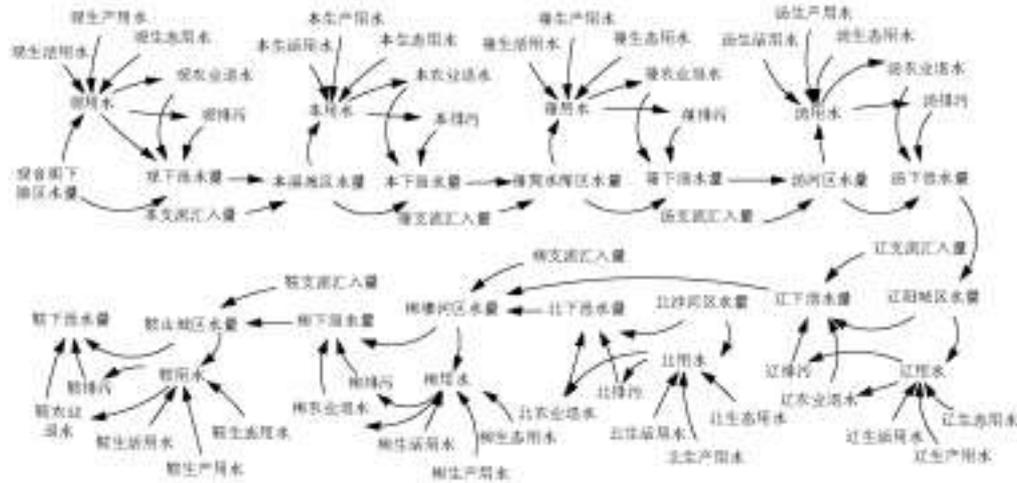


图5 太子河流域水生态功能分区系统关系图

Fig.5 System diagram of water ecological function regions in Taizi River basin

选取总人口、GDP、有效灌溉面积等变量,将其模拟值与历史数据进行比较,各参数的模拟值与实际值拟合较好,表明该模型结构合理,能反映太子河流域水生态承载力的特征,可以用来预测太子河流域水生态承载力动态发展过程。

结合辽宁省的水资源及水污染防治规划,从经济调控、节水、污染物控制等角度设计方案(见表3)

模拟2007—2015年的指标变化情况。

分别考虑水文频率 $P=50\%$ 、 75% 、 95% 的不同水文年,预测评价相应组合方案下系统各项指标的变化情况,评价其相应的水生态承载度。太子河流域50%水文频率下不同方案各生态功能分区的水生态承载度变化曲线如图6~图9所示。

表3 太子河流域水生态承载力调控方案设计

Table 3 Regulatory scenarios of water ecological carrying of Taizi River basin

方案	策略	途径	措施
原规划方案	无	无	不做任何调控
调控方案1	经济调控	产业结构调整	限制高用水工业、污染严重工业企业的发展速度,高用水工业比例(本溪、汤河、辽阳、柳壕河、鞍山)每年递减0.01
调控方案2		控制经济增长速度	
调控方案3	节水	工业节水	高用水工业用水定额和一般工业用水定额分别每年递减8.75 m ³ /万元和2.62 m ³ /万元
调控方案4		农业节水	
调控方案5	污染控制	控制排放	工业废水排放系数每年递减0.01
调控方案6		污水回用	污水回用率每年递增0.03

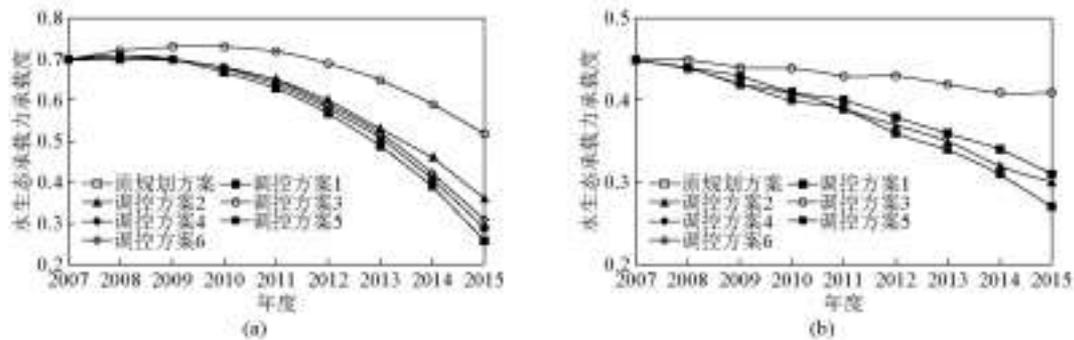


图6 各方案下观音阁下游区(a)、本溪城区(b)的水生态承载力年度变化曲线

Fig.6 Annual change curves of water ecological carrying for Guanyingeco-region (a) and Benxi eco-region (b) in various regulatory scenarios

图6a中调控方案1及调控方案4与原规划方案承载力曲线重合,说明这两类调控方案对观音阁下游区基本没有作用,调控方案3对本区水生态承载力改善相对最好,表明控制本区的工业用水和降低工业用水定额是较优的调控策略。图6b中调控方案4及调控方案6与原规划方案承载力曲线重合,

说明这两类调控方案对本溪城区水生态承载力没有进一步改善,调控方案1与调控方案5的承载力曲线重合,比较而言,调控方案3对承载力改善相对较大,表明本区的较优的调控策略也是控制工业用水和降低工业用水定额。

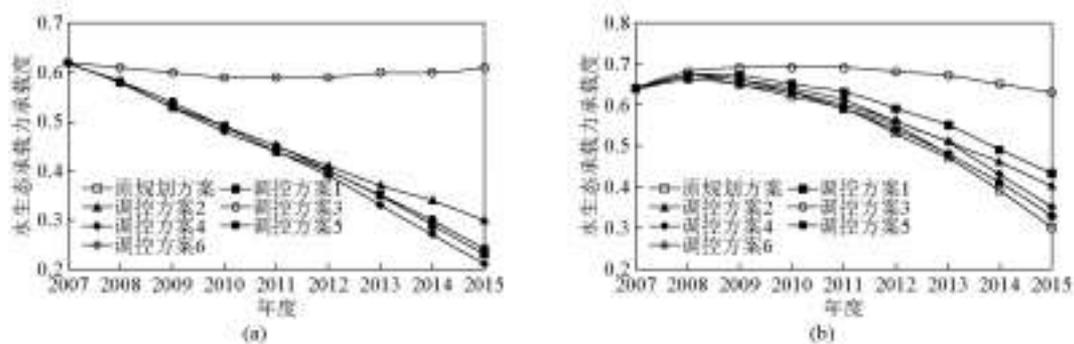


图7 各方案下葭窝水库区(a)、汤河区(b)的水生态承载力年度变化曲线

Fig.7 Annual change curves of water ecological carrying for Shenwo eco-region (a) and Tanghe eco-region (b) in various regulatory scenarios

图7a中调控方案1及调控方案6与原规划方案承载力曲线重合,比较而言,调控方案3对承载力改善相对较大,说明蓼窝水库区需要进一步控制其工

业用水,降低工业用水定额。从图7b可以看出,对于汤河区,调整高用水工业比例和降低用水定额均对其水生态承载力改善较好。

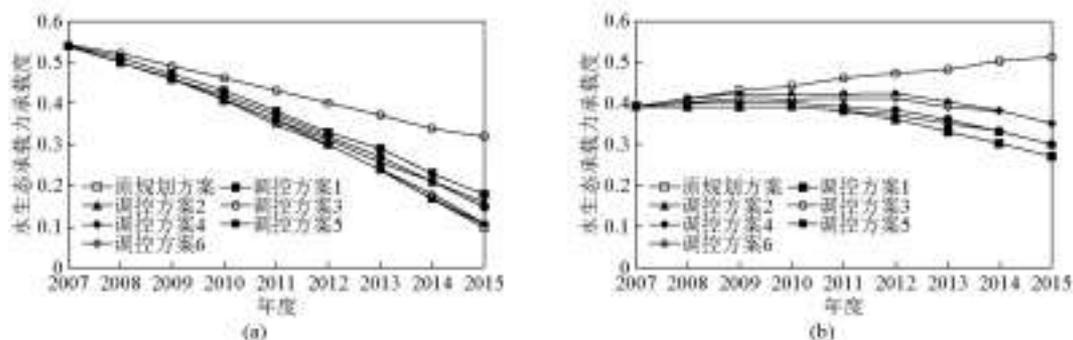


图8 各方案下辽阳城区(a)、北沙河区(b)的水生态承载力年度变化曲线

Fig.8 Annual change curves of water ecological carrying for Liaoyang eco-region (a) and Beishahe eco-region (b) in various regulatory scenarios

图8a中调控方案4及调控方案6与原规划方案承载力曲线重合,调控方案5与调控方案2的水生态承载力曲线基本相似,相对而言,仍然是调控方案3相对较优,表明对于辽阳城区,降低用水定额和调整高用水工业比例对其水生态承载力改善较

好。图8b中调控方案1与原规划方案的承载力曲线重合,比较各调控方案的水生态承载力曲线,可以发现在北沙河区,除了降低用水定额和调整高用水工业比例,降低农田灌溉定额也对其水生态承载力改善较好。

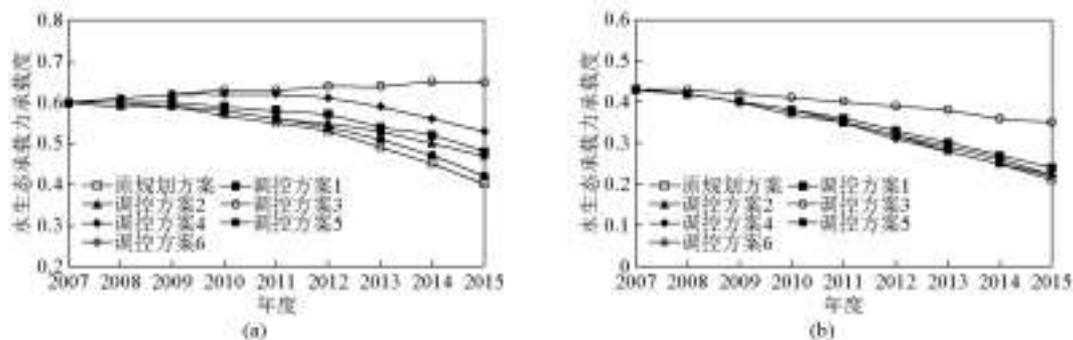


图9 各方案下柳壕河区(a)、鞍山城区(b)的水生态承载力年度变化曲线

Fig.9 Annual change curves of water ecological carrying for Liuhaohu eco-region (a) and Anshan eco-region (b) in various regulatory scenarios

图9a中调控方案5与调控方案6承载力曲线重合,对于柳壕河区,降低用水定额、调整高用水工业比例和降低农田灌溉定额均对其水生态承载力改善较好。图9b中调控方案1与调控方案5、调控方案2与调控方案4的水生态承载力曲线重合,可以发现,对于鞍山城区,仅降低用水定额对其水生态承载力改善较好。

水生态承载力逐月变化情况(见表4)。模拟成果表明,北沙河区、柳壕河区、汤河区和鞍山城区的水生态承载力最小值出现在6月,这是由于这4个水生态功能区在4—10月的需水量较大,面源污染也相对较严重,而6月的水资源量又相对最小,这些都是影响水生态系统承载力的不利因素。因此,对这些水生态功能区水生态系统的治理保护应该把重点放在加大节水力度和农业面源污染控制上。观音

选择2007年计算太子河流域各生态功能分区

阁水库下游区、本溪城区、辽阳城区和葭窝水库区的水生态承载度最小值均出现在1月和2月,这是由于这些水生态功能区用水水平年内变化不大,而

冬季处于冰封期,其水资源量相对较小,水体自净能力较差,因此对于这4个水生态功能区水生态系统的治理保护应该把重点放在点源污染物控制上。

表4 2007年太子河流域各生态功能分区各月的水生态承载度

Table 4 Month water ecological carrying of water ecological function regions in Taizi River basin in 2007

生态区	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
观音阁下游区	0.57	0.57	0.58	0.62	0.62	0.58	0.71	0.65	0.66	0.60	0.59	0.58
本溪城区	0.40	0.39	0.42	0.45	0.46	0.44	0.49	0.47	0.46	0.45	0.42	0.40
葭窝水库区	0.37	0.37	0.38	0.42	0.54	0.43	0.63	0.43	0.42	0.42	0.42	0.39
汤河区	0.59	0.59	0.60	0.60	0.67	0.57	0.69	0.62	0.62	0.62	0.62	0.60
辽阳城区	0.47	0.47	0.49	0.51	0.55	0.50	0.56	0.53	0.52	0.51	0.49	0.48
北沙河区	0.43	0.43	0.43	0.38	0.42	0.24	0.37	0.38	0.40	0.41	0.43	0.43
柳壕河区	0.56	0.56	0.57	0.53	0.62	0.36	0.63	0.56	0.57	0.58	0.59	0.57
鞍山城区	0.45	0.45	0.47	0.45	0.49	0.37	0.48	0.47	0.52	0.50	0.47	0.46

5 结语

本文按照流域水生态完整性保护需求,提出了流域水生态承载力的概念:流域水生态承载力指维持良好状态的流域水资源及水环境系统所能承载的一定生活水平的人口最大数量和一定技术水平下的最大的经济规模。并根据流域复合生态系统中经济社会与水生态系统演变的阶段特点,进一步提出了其狭义定义:在保证一定的环境流量、水体水质目标及栖息地质量以支持流域水生态系统完整性不断修复的前提下,流域水资源及水环境系统所能支撑的最大人口数量和经济规模。本文所提出的流域水生态承载力定义突出了水生态系统在流域复合生态系统中的生态学意义,具有“分区、分期”的时空分异基本属性和“量、质、序”递进综合约束作用等基本内涵,具有区域性、有限性、动态性和可调控性等基本特征。

针对流域水生态承载力需要基于不同时空尺度模拟分析流域水生态承载力时空差异性变化特征的要求,本文以流域水生态功能分区为单元,通过单元内部耦合、单元外部耦合及时间耦合,建立了流域水生态承载力分区耦合优化调控系统动力学模型。

本文以辽河太子河流域为例,证明“分区、分期”的流域水生态承载力系统动力学模拟评价模型是可以实现的,并且能够揭示流域内各生态功能分区的承载特征,具有对流域水生态承载度超载区域

进行识别和形成较为精确的分区调控对策的潜力,是制定既满足流域综合要求,又能体现区域特点的流域水生态分区分期保护与治理方案的有力工具。

参考文献

- [1] Seidl Irm, Tisdell Clem A. Carrying capacity reconsidered: From Malthus' population theory to cultural carrying capacity [J]. *Ecological Economics*, 1999, 31(3): 395-408.
- [2] Park R E, Burgess E W. *Introduction to the Science of Sociology* [M]. Chicago: University of Chicago Press, 1921.
- [3] 杨光梅. 我国承载力研究的阶段性特征及展望[J]. *科技创新导报*, 2009(26): 23-25.
- [4] 张林波, 李文华, 刘孝富, 等. 承载力理论的起源、发展与展望[J]. *生态学报*, 2009, 29(2): 878-888.
- [5] 余卫东, 闵庆文, 李湘阁. 水资源承载力研究的进展与展望[J]. *干旱区研究*, 2003, 20(1): 60-66.
- [6] 周亮广. 水资源承载力研究进展与展望[J]. *水科学与工程学报*, 2009(4): 24-29.
- [7] 赵卫, 刘景双, 孔凡娥. 水环境承载力研究综述[J]. *水土保持研究*, 2007(2): 47-50.
- [8] 许联芳, 杨勋林, 王克林, 等. 生态承载力研究进展[J]. *生态环境*, 2006, 15(5): 1111-1116.
- [9] 顾康康. 生态承载力的概念及其研究方法[J]. *生态环境学报*, 2012(2): 389-396.
- [10] 马丁·格里菲斯. 欧盟水框架指令手册[M]. 水利部国际经济技术交流中心, 译. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [11] 朱一中, 夏军, 谈戈. 关于水资源承载力理论与方法的研究[J]. *地理科学进展*, 2002(3): 180-187.
- [12] 夏军, 王中根, 左其亭. 生态环境承载力的一种量化方法研究——以海河流域为例[J]. *自然资源学报*, 2004, 19(6): 786-794.
- [13] 高吉喜. 可持续发展理论探索——生态承载力理论、方法与应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- [14] 谭红武, 杜强, 彭文启, 等. 流域水生态承载力及其概念模

- 型[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2011, 9(1): 1-8.
- [15] 王西琴, 高伟, 何芬, 等. 河流生态承载力概念与内涵探讨[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2011, 9(1): 41-46.
- [16] Zeng Chen, Liu Yaolin, Liu Yanhang, et al. An integrated approach for assessing aquatic ecological carrying capacity: A case study of Wujin District in the Tai Lake Basin, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2011, 8(1): 264-280.
- [17] 曾晨, 刘艳芳, 张万顺, 等. 流域生态承载力研究的起源和发展[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(2): 203-210.
- [18] 李靖, 周孝德. 叶尔羌河流域生态承载力研究[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(3): 249-255.
- [19] 刘晓波, 彭文启, 董飞, 等. 流域生态承载力与总量控制技术集成系统研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2011, 9(1): 16-28.
- [20] 王卫军, 周孝德, 周彬翀, 等. 河流生态承载力系统动力学模型软件开发[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2011, 9(2): 151-154.
- [21] 李靖, 周孝德, 程文. 太子河流域不同生态分区的水生态承载力年内变化研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2011, 9(1): 74-80.
- [22] 王浩, 王建华, 秦大庸, 等. 基于二元水循环模式的水资源评价理论方法[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1496-1502.
- [23] 郭怀成, 徐云麟, 洪志明, 等. 我国新经济开发区水环境规划研究[J]. 环境科学进展, 1994, 2(4): 14-22.
- [24] 郭怀成, 唐剑武. 城市水环境与社会经济持续发展对策研究[J]. 环境科学学报, 1995, 15(3): 363-369.
- [25] 贾振邦, 赵智杰, 李继超, 等. 本溪市水环境承载力及指标体系[J]. 环境保护科学, 1995, 21(3): 9-11, 76.
- [26] 蒋晓辉, 黄强, 惠泱河, 等. 陕西关中地区水环境承载力研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(3): 312-317.
- [27] 张文国, 杨志峰. 基于指标体系的地下水环境承载力评价[J]. 环境科学学报, 2002, 22(4): 541-544.
- [28] 惠泱河, 蒋晓辉, 黄强, 等. 二元模式下水资源承载力系统动态仿真模型研究[J]. 地理研究, 2001, 20(2): 191-198.
- [29] 王浩, 秦大庸, 王建华, 等. 西北内陆干旱区内水资源承载力研究[J]. 自然资源学报, 2004, 19(2): 152-158.
- [30] 赵青松. 汉江上游流域水环境承载力研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- [31] 王俊英, 杜金辉, 吕培茹, 等. 山东省水生态环境承载力探讨[J]. 山东大学学报: 工学版, 2008, 38(5): 94-98.
- [32] 姚治君, 刘宝勤, 高迎春. 基于区域发展目标下的水资源承载能力的研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(1): 109-113.
- [33] 左其亭. 人水系统演变模拟的嵌入式系统动力学模型[J]. 自然资源学报, 2007, 22(2): 268-274.
- [34] 贺彩霞, 冉茂盛, 廖成林. 基于系统动力学的区域社会经济系统模型[J]. 管理世界, 2009(3): 170-171.
- [35] Motohashi Y, Nishi S. Prediction of end-stage renal disease patient population in Japan by system dynamics model [J]. *International Journal of Epidemiology*, 1991, 20(4): 1032-1036.
- [36] Ahmad S, Simonovic S P. Spatial system dynamics: New approach for simulation of water resources systems [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2004, 18(4): 331-340.
- [37] 裴相斌, 赵冬至. 基于GIS-SD的大连湾水污染时空模拟与调控策略研究[J]. 遥感学报, 2000, 4(2): 118-124.
- [38] Elliott C R N, Willis D W, Acreman M C. Application of the Physical Habitat Simulation (PHABSIM) model assessment tool for riverine habitat restoration techniques [C]// *Ecohydraulics 2000. Proceedings of the 2nd International Symposium on Habitat Hydraulics*. Quebec: INRS-Eau, 1996: B607-618.
- [39] Rachel S, Phil H. The use of PHABSIM in the management of water resources and fisheries in England and Wales [J]. *Ecological Engineering*, 2000, 16(1): 153-158.
- [40] 赵进勇, 董哲仁, 孙东亚. 河流生物栖息地评估研究进展[J]. 科技导报, 2008(9): 82-88.

Watershed water ecological carrying capacity and optimizing regulation model

Peng Wenqi

(Department of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

[Abstract] Watershed management is changing from single factor management of environment and resources to aquatic ecological protection integrated management. Water resources carrying capacity and water environment carrying capacity have not fully adapted to this situation. Therefore, it is necessary to build a new carrying capacity theory to solve the current aquatic problems. According to the demands of watershed water ecological integrity protection management, based on water ecological carrying capacity concept model, water ecological carrying capacity concept, which reveals its basic connotation of “partition, staging” property and “quantity, quality, order” progressive comprehensive constraint effects, was put forward in this paper. Then the paper

analyzed its key optimal regulation variables, and established the water ecological carrying capacity partition coupling concept model using eco-regions as elements. Considering the communication of water flow and water quality among eco-regions, the system dynamics simulation model of Taizi River basin water ecological carrying capacity was established, the water ecological carrying capacity of 8 eco-regions were simulated, and optional regulation schemes of each eco-regions were determined, which can provide a scientific basis for the sustainable development of the watershed.

[Key words] watershed water ecological carrying capacity; optimizing regulation model

(上接25页)

Sediment quality risk assessment in Liaohe River basin

Qin Yanwen, Han Chaonan, Zheng Binghui, Zhang Lei, Cao Wei

(State Environment Protection Key Laboratory of Estuary and Coastal Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

[Abstract] 56 surface sediment samples were collected from Hunhe River, Taizi River, Dahuofang Reservoir in Liaohe River basin. Sediment quality criteria for heavy metals in Liaohe River basin were established by Equilibrium Partitioning(EqP) approach which was modified by author, the *SQC* (base on *CCC*) of Cu, Pb, Zn, Cd were 75.26 $\mu\text{g/g}$, 25.72 $\mu\text{g/g}$, 255.96 $\mu\text{g/g}$ and 2.52 $\mu\text{g/g}$. Based on heavy metal acute and chronic aquatic toxicity, three grades sediment quality standards for heavy metal in Liaohe River basin were set and sediment pollution index (SPI) that a new assessing method was created accordingly. The author applied the established standards of Liaohe River basin to assess the sediment quality by SPI method, results showed that sediment quality in the middle and lower streams of Hunhe River, up and middle streams of Taizi River, middle and end of Dahuofang Reservoir were middle risk which meant that benthic survived in such heavy metal pollution sediment would suffer slight chronic toxicity effect of heavy metal. Hongtoushan Copper Mine that in the middle stream of Hunhe River and Shenyang Industry in the upstream of Xi River made extremely high sediment risk for discharging much wastewater to Liaohe River basin.

[Key words] sediment quality risk assessment; sediment quality criteria; sediment quality standard; sediment pollution index; heavy metal