

水环境承载力研究述评

赵 卫^{1,2}, 刘景双¹, 孔凡娥³

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100019; 3. 中山大学城市与区域研究中心, 广州 510275)

摘 要:回顾了水环境承载力研究的酝酿、兴起和发展阶段,总结了水环境承载力的基础理论和研究方法,分析了水环境承载力的概念、内涵和承载机制,着重论述了水环境承载力的研究方法。认为水环境承载力的进一步研究应该完善其基础理论和支撑理论,促进研究方法向模式化和模式的动态化方向发展,加强水环境承载力的应用研究。

关键词:水环境承载力;内涵;承载机制;研究方法

中图分类号:X144

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2007)01-0047-04

Review on Water Environmental Carrying Capacity

ZHAO Wei^{1,2}, LIU Jing-shuang¹, KONG Fan-e³

(1. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Science, Changchun 130012, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100019, China;

3. Center for Urban and Regional Studies, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: There are three stages in the water environmental carrying capacity study. The authors summarized the basic theory and evaluation methods of water environmental carrying capacity, and analyzed the concept, connotation and carrying mechanism of water environmental carrying capacity, discussed its evaluation methods. Finally, it points out that the further study of water environmental carrying capacity should consummate its basic theory and supporting theory actively, develop its evaluation method and strengthen the application study of water environmental carrying capacity.

Key words: water environmental carrying capacity; connotation; carrying mechanism; evaluation methods

随着人类社会的发展,因社会经济规模过大、产业结构不合理、生产布局不适当和环境保护措施不得力等引起的水环境问题日显突出,成为区域可持续发展的制约因素^[1]。水环境与社会经济的协调发展是解决水环境问题的根本途径,而前提在于确定水环境系统所能持续支撑的人口总量和经济规模,因此,水环境承载力成为区域可持续发展研究的热点之一。水环境承载力的概念自 1990 年代初提出以来,被广泛应用于环境管理、环境规划和区域发展等领域,国内外学者从不同角度论述了水环境承载力的基础理论和研究方法。本文综述了水环境承载力的主要研究进展,分析了当前研究中存在的不足和亟待解决的问题。

1 水环境承载力研究进程

目前水环境承载力研究主要集中在国内,国外的专门研究还较少,一般仅在可持续发展文献中提及^[2]。根据水环境承载力研究的特点,将其研究进程大致分为三个阶段:

1.1 酝酿阶段(1990 年代初以前)

日趋严重的水环境问题迫使人类积极探索环境问题的产生原因。1972 年,《人类环境宣言》指出环境问题的根源在于发展,《我们共同的未来》(1987)进一步提出了可持续发展战略^[3]。而发展规模的确定和发展方式的选择必须以环

境的承载能力为基础,因此,环境承载力包括水环境承载力被推到可持续发展研究的前沿。这一时期水环境承载力主要以容纳能力、生态极限等形式出现,尚没有明确的水环境承载力概念;研究方法以定性分析为主;因而应该是水环境承载力研究的酝酿阶段。

1.2 兴起阶段(1990 年代初~1990 年代末)

可持续发展在《21 世纪议程》(1992)中成为世界共同的发展战略目标,环境与发展的协调问题也被提到空前高度。鉴于此,1990 年代初《本溪市新经济开发区水环境规划》提出了水环境承载力的概念,即某一地区、某一时间、某种状态下水环境对人类活动的支持能力^[4]。水环境承载力研究开始更多地关注概念、特征和研究方法等方面,如郭怀成、崔凤军等^[5-8];研究方法较为单一,以向量模法为主;研究结果多是无量纲值即水环境与人类活动的协调程度,并非严格概念意义上的水环境承载力;而且忽略了生态环境需水研究。因此,这一时期被作为水环境承载力研究的兴起阶段。

1.3 发展阶段(1990 年代末~目前)

进入 21 世纪,研究的深度和可操作性不断提高,内容涉及承载对象、判定条件等方面。如 2000 年蒋晓辉等采用多目标函数界定了水环境承载力的承载对象^[9];2005 年宋宏杰等从浓度控制、总量控制和生态需水三方面论述了水环境承载

* 收稿日期:2006-01-09

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2004CB418507)

作者简介:赵 卫(1981-),男,山东枣庄人,博士研究生,主要从事生态承载力与生态安全研究;通讯作者:刘景双。

力的判定条件^[10]。研究方法日趋多样化,系统科学、模糊数学和灰色系统等理论逐渐被引入到该领域,如张文国等(2002)从水环境承载力概念的模糊性入手,运用模糊优选理论分析了华北某地地下水环境承载力的变化趋势^[11];李如忠等(2005)针对水环境系统-社会经济系统的随机不确定性,建立了区域水环境承载力评价模糊随机优选模型^[12]。此外,研究成果愈来愈广泛地应用于环境管理、环境规划与区域发展等领域^[13~15]。水环境承载力研究进入了发展阶段。

2 水环境承载力研究回顾

2.1 水环境承载力基础理论

2.1.1 概念

国内外学者采用不同形式定义了水环境承载力,主要包括纳污能力、支撑能力、外部作用和社会经济规模等^[16~22]。归纳起来,水环境承载力概念可以分为:广义水环境承载力,指在某一时期、某种状态下,某一区域水环境对人类活动的支持能力^[5~8];狭义水环境承载力,被等同于“水环境容量”、“水环境(水体)纳污能力”或者“水环境容许污染负荷量”等,即在一定水域,其水体能够被继续使用并仍保持良好生态系统时,所能够容纳污水及污染物的最大能力^[16,17]。

水环境承载力概念均强调水环境的纳污功能,关键分歧在于其水资源供给功能上。水环境作为生态环境的组成部分,具有环境属性;其水体属于水资源范畴,具有资源属性,因此水环境承载力研究仅仅考虑质量是不够的,还要有数量表征。考虑到水环境承载力研究的现实和长远意义,对其理解和界定,应该遵循持续、系统和综合的原则。持续原则指必须在可持续发展战略构架下进行,离开或偏离社会的可持续发展模式都是没有意义的;系统原则指水环境承载力不仅考虑水环境的水质,还要考虑其水量;综合原则指从水-生态-社会经济系统耦合机理上综合考虑水环境对人口、资源、环境和经济协调发展的支撑能力。

2.1.2 内涵

综上所述,水环境承载力可理解为“某一区域水环境系统在特定历史阶段,一定自然条件和技术水平下,当水管理和社会经济达到最优时,持续支撑社会经济系统的最大能力”。水环境承载力包括污染承受能力和资源承受能力两部分;“持续承载”表示以维护生态环境良性发展为条件,以可持续发展为原则,保证水环境系统功能的可持续正常发挥。

(1)时空内涵。“一定自然条件和技术水平”决定了水环境系统的水资源量和环境容量,构成了水环境承载力的基础。自然条件和技术水平具有明显的时序性和空间性,相应的水环境承载力也具有明显的时空内涵。首先,水环境承载力是一定区域尺度上水环境系统自身的承载力,具有相应的空间性;其次,水环境承载力是相对于一定时期而言的,不同时期水资源的内涵和外延以及人类的价值观念是不断发展的;最后,水管理和社会经济也存在明显的时空差异。

(2)技术内涵。水环境承载力离不开特定的技术背景,一方面水环境承载力的生态极限与一定技术水平有关;另一方面通过提高技术水平和优化水管理可以提高水环境承载力。水环境承载力的定义将技术水平与水管理区分开来,技术水平相对于社会经济具有一定的独立性和稳定性,水管理则是水环境承载力的内在部分。因此水环境承载力意味着最优的水管理状态,而且通过技术水平预测可以得到大致唯一、确定的水环境承载力^[23]。

(3)社会经济内涵。在一定水环境容量和水资源量条件下,通过水管理和社会经济优化,社会经济系统规模会有所

不同。水管理包括水资源和排污总量的优化配置;社会经济优化包括产业结构、消费结构和发展模式的调整优化,而且人类价值观和效用需求影响水环境承载力的判定条件。社会经济系统作为水环境承载力的最终表象,其大小可以通过人口总量和经济规模来衡量。

(4)持续内涵。水环境承载力的前提条件是“持续承载”,包括水环境系统对社会经济系统的持续承载、社会经济可持续发展和水环境承载力持续增强三方面。其中,水环境对社会经济的持续承载要求:水资源的开发利用量不得超过可更新的水资源量;水环境质量符合水环境功能要求,污染物的浓度值和累积值处于极限值以下;满足区域生态环境的用水需求^[24,25]。

2.1.3 特征与影响因素

水环境承载力兼具自然属性和社会属性,主要受环境条件、资源禀赋、技术水平和制度安排等方面的影响^[25]。水环境承载力具有以下特征:客观性与主观性:水环境承载力是水环境结构特性的反映,是客观存在的;人类对水环境价值特性和资源特性的认识水平影响其承载与否的判定条件。

时空性:源于自然条件、技术水平、经济基础和价值观念等影响因素的时空差异。变异性和可调性:变性源于水环境系统自身的运动演变和人类开发目的所引起的系统功能变化。基于此,人类可以通过自身行为调整水环境承载力的大小和变化方向^[26]。有价补偿性:对水环境价值特性和资源特性的物质表征,为解决水环境问题的外部不经济性提供了有效手段。有限性和弹性:一定水环境系统拥有有限的水资源量和环境容量,受技术水平和生态环境条件的约束,其支撑能力也是有限的;弹性源于水环境系统的弹性恢复力和人类开发利用方式的变化,具有最适、最大值^[27]。

2.1.4 承载机制

水环境承载机制是影响水环境系统功能的重要因素,包括支撑机制和约束机制两方面。

(1)支撑机制。水环境承载力的支撑机制源于水环境系统的自我维持、自我调节和自净能力,反映在环境方面即为水环境容量和水资源量。其中水环境自净能力表征水环境通过物理、化学和生物作用降低污染物浓度,恢复水质的能力;水环境容量以量化的形式表示水环境自净能力的大小,成为水环境承载力的发生基础^[28]。水环境的核心要素水体具有供给能力,可以满足生产、生活和生态环境需水;水资源量定量表征了水资源供给能力的大小,构成了水环境承载力的支撑基础。水环境容量和水资源量的有限性是水环境承载力存在极限的根本原因。

人口、经济和生态环境构成了水环境承载力的承载客体。其中人口系统是其最终承载目标;经济的发展不仅是人类生存和社会进步的基础,而且为生态建设和环境保护提供了资金支持;水环境作为生物生存必需的物质条件,是生态良性循环的保证;而生态环境是所有环境资源的载体,水环境系统对人类活动的持续承载依赖于生态环境的良性发展^[29]。

(2)约束机制。水环境承载力的约束机制主要包括:生态效应约束机制,指水环境中的污染物达到一定数量或者水资源量低于一定水平后,对水中植物和动物产生不良效应,破坏生态良性循环。首先,进入水环境的污染物,其性质和数量一旦超过水生态系统所能容纳的阈值,生物生长将受到抑制,甚至造成有毒物质向人体转移;其次,过度开发利用水资源,挤占生态环境用水,不仅会破坏水资源的持续利用和生态环境的良性发展,引起诸如植被退化、水土流失等生

态问题,而且会降低水环境的自净能力,加剧水环境污染。

环境效应约束机制,指当水环境中的污染物达到一定数量后,不仅会引起水环境系统结构组合和功能状态的质变,降低其使用价值,而且会通过降水、径流、淋溶和下渗等一系列水循环过程,对地下水、土壤和大气环境产生危害。水环境中的污染物一旦超过其自净能力,就会造成污染物的过量累积,进而通过水循环过程危害其它环境单元。

2.2 水环境承载力研究方法

2.2.1 指标体系评价法

指标体系评价法根据各项评价指标的具体数值,应用统计方法或其它数学方法计算出综合指数,实现对水环境承载力的评价^[30]。水环境承载力指数常用的计算方法有:向量模法、模糊综合评价法和主成分分析法。

向量模法将水环境承载力表示为 n 个定量描述的指标(n 维空间向量),以归一化后的向量模表征水环境承载力的大小。该方法简单易行,广泛应用于水环境承载力早期研究;但由于忽视了水环境承载力概念的模糊性和向量所具有的方向性,而且一般采用均权数法确定指标权重,忽略了指标相对大、小对承载力的贡献,进而影响了评价结果的可靠性^[11]。

模糊综合评价法在对水环境承载力的影响因素进行单因素评价的基础上,通过综合评判矩阵对其承载能力做出多因素综合评价。该方法在应用中逐渐与物元模型、随机理论等相结合,综合考虑了水环境承载力概念的模糊性和指标信息的随机不确定性,提高了水环境承载力评价的准确性和可操作性^[12,31]。但模糊综合评价法是一种对主观产生的“离散”过程进行综合的处理,其方法本身存在缺陷,取大取小的运算法则会遗失大量有用信息。

主成分分析法在力保数据信息丢失最小的原则下,对高维变量系统进行最佳综合与简化,以少数综合变量取代原始多维变量,同时客观地确定各综合变量的权重,避免了主观随意性;而水环境承载力评价的焦点正是如何科学、客观地将一个多目标问题综合成一个单指标形式。因此主成分分析法不失为一种评价的好方法,而且在一定程度上克服了上述方法的缺陷;但在评价参数分级标准的制定和对主成分、控制点的选取方面存在一定的困难^[32]。

指标体系评价法依赖于不同承载力的指标数值之间或者指标数值与标准值之间的对比,评价结果都是无量纲值,因此实际上是水环境与人类活动的协调程度并非严格概念意义上的水环境承载力^[33]。该方法忽略了水-生态-社会经济复合系统要素间的反馈机制,所描述的水环境承载力变化仅仅是指标变化的汇总;而且指标体系的建立缺乏严格的筛选框架。

2.2.2 系统动力学方法

系统动力学方法从系统的内部要素和结构分析入手,通过一阶微分方程组来反映系统各个模块的变量之间的因果反馈关系,进而建立系统动力学模型。系统动力学模型以现实存在为前提,通过改变系统的参数和结构,模拟不同发展方案下人口总量、经济发展和承载力之间的动态变化。如 ECCO 模型(Slessor, 1990)借用系统动力学模型模拟不同发展策略下人口与资源环境承载力之间的弹性关系,从而确定以长远发展为目标区域发展优选方案^[34,35];崔凤军等(1998)采用系统动力学方法预测了某城市不同发展策略、各个规划阶段的策略变量值,再运用综合评价方法计算各方案对应的水环境承载力^[1]。而且系统动力学方法并非局限于系统要素的预测或者简单地给出区域水环境所能支撑的人口总量和经济规模,而是从整体上定量描述人口、资源、环境

和发展之间的关系,揭示水环境承载力的动态行为^[36]。

系统动力学的优点在于处理高阶次、非线性、多重反馈、复杂时变的系统问题^[37];而水环境承载力涉及社会、经济、资源、环境等诸多要素,要素之间存在着相互影响、相互制约的动态联系。因此系统动力学方法适用于水环境承载力的评价与预测,并具有较强的可操作性。但应用该方法模拟长期发展情况时由于参变量不好掌握,有时易导致不合理的结论。因此系统动力学方法大多应用于中短期发展情况的模拟。

2.2.3 多目标最优化方法

水环境承载系统是由水环境系统、生态环境系统和社会经济系统组成的动态复杂系统。多目标最优化方法采用分解-协调的系统分析思路将水环境承载系统划分为若干子系统,并采用数学模型对其进行刻画,子系统模型之间通过多目标核心模型的协调关联变量相连接。目前多目标核心模型通常采用契比雪夫算法进行求解,在权重叠代收敛时采用融合了决策者对邻近点和 tradeoff 矢量的意见的 Z-W 算法。

水环境承载力研究旨在依据一定技术水平和生态环境约束条件,确定水环境所能持续支撑的人口数量和经济规模,指导水管理和社会经济的优化。若事先确定需要达到的优化目标和约束条件,结合模型模拟和决策变量在不同水平上的预测结果,借助多目标最优化方法就可解出同时满足多个目标整体最优的发展方案,相应的人口数量和经济规模即为区域水环境承载力。可以看出,方案的拟定和筛选对于优化求解结果的准确性具有决定意义,为了避免方案确定太早而产生次优解,可采用情景分析法来筛选备选方案^[38]。

多目标最优化方法不仅可以采用目标函数对承载对象进行详细界定,而且能够定量表征持续承载的约束条件,确定实现可承载所需的条件和时间^[19,39]。但是多目标最优化方法求解技术存在一定难度,难以全面考虑系统的影响因素,而且该方法无论在其优化目标的选定还是水-生态-社会经济内涵联系的刻画上都存在一定难度。

2.2.4 单目标最优化方法

在水环境承载力分析与调控中,汪恕诚(2001)采用单目标最优化方法以最大的人口当量数为目标,以区域或流域内特殊用地(如森林用地、湿地等)的面积比和水环境质量等为约束条件,求解出最佳的用地规划模式。单目标最优化方法实际上是一种水污染控制系统规划方法。与其它方法相比,该方法简洁合理,所需计算量较小。

3 结论和展望

纵观整个研究进程,水环境承载力研究的深度、可操作性和应用性不断提高,研究成果愈来愈广泛地应用于环境管理、环境规划和区域发展等领域。但是水环境承载力还没有形成完整的理论体系,研究中仍然存在一些问题:由于缺乏对水环境承载对象的清晰界定,水环境承载力尚未形成统一的概念和衡量标准;水环境承载力研究对水环境系统功能的描述存在分歧,对其水资源供给功能考虑不足,而且忽略了系统要素间的动态联系及其对承载力判定条件的影响;

研究方法渐趋多样化,但缺乏兼顾水环境承载力动态性、模糊性、随机性和要素间相互作用的综合模型;生态环境需水研究缺乏准确性,其研究方法以定性分析与宏观定量分析为主,研究尺度过大,而且数据多源于野外宏观资料或历史资料。

鉴于目前研究中存在的不足,水环境承载力进一步研究的重点主要包括:

(1) 完善水环境承载力的基础理论。重点探讨水环境承载力的概念和内涵,尤其是水环境承载系统的要素组成和承载机制,准确界定水环境承载对象,确定清晰的判定条件。

(2) 建立水环境承载力的支撑理论。着重研究自然-人工二元模式影响下的水循环演变、水循环和水环境的作用机制以及人类活动对水环境条件的影响等,揭示人类活动和自然条件对水环境承载力的影响机理,从水-生态-社会经济耦合机理上揭示人口、资源、环境和发展之间的关系。

(3) 重视生态环境需水研究,提高生态环境约束条件的可操作性和准确性。生态环境需水量不仅影响到区域可利用水资源量,而且是生态环境良性发展的保证,尤其是水环

境承载力用于解决水生态环境问题时。

(4) 加强水环境承载力量化研究,促进研究方法向模式化和模式的动态化方向发展。水环境承载力本身具有动态性,应该加强其动态模拟研究,建立一套能反映水环境承载力本质的模拟体系;突破传统的数据获取与分析手段,将地面观测与空中遥感信息相结合,利用地理信息系统进行数值计算和模拟,将水环境承载力研究方法与 GIS 集成。

(5) 加强水资源优化配置、水环境管理和社会经济优化等应用研究。依据水环境承载力的大小和动态变化,确定水资源开发利用、污染排放和社会经济发展的最优规模,选择最优发展策略,发挥水环境承载力对区域发展的指导作用。

参考文献:

- [1] 崔凤军. 城市水环境承载力及其实证研究[J]. 自然资源学报, 1998, 13(1): 58 - 62.
- [2] United States Environmental Protection Agency. 2002. Four Township Environmental Carrying Capacity Study [EB/OL]. <http://www.kbs.msu.edu/ftwrc/publications/Envcapacity.pdf>. 1 - 26.
- [3] 张承中. 环境管理的原理和方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997. 24 - 39.
- [4] 郭怀成, 尚金城, 张天柱, 等. 环境规划学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001. 159 - 167.
- [5] 郭怀成. 我国新经济开发区水环境规划研究[J]. 环境科学进展, 1994, 2(5): 14 - 22.
- [6] 贾振邦, 董安生. 本溪市水环境承载力及指标体系[J]. 环境保护科学, 1995, 21(3): 8 - 11.
- [7] 郭怀成, 唐剑武. 城市水环境与社会经济可持续发展对策研究[J]. 环境科学学报, 1995, 15(3): 363 - 369.
- [8] 崔凤军. 城市水环境承载力的实例研究[J]. 山东矿业学院学报, 1995, 14(2): 140 - 144.
- [9] 蒋晓辉, 惠泱河. 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.
- [10] 宋宏杰, 马军霞, 左其亭. 郑州市水环境承载能力计算及调控对策[J]. 郑州大学学报(工学版), 2005, 26(1): 103 - 107.
- [11] 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.
- [12] 李如忠, 钱家忠, 孙世群. 模糊随机优选模型在区域水环境承载力评价中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2005(1): 31 - 34.
- [13] 左其亭, 马军霞, 高传昌. 城市水环境承载能力研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(1): 103 - 108.
- [14] 王玉敏, 周孝德, 冯成洪, 等. 湖泊水环境承载力研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 179 - 184.
- [15] 王秀兰, 李红亮. 河北省水环境承载力及污染物总量控制方案研究[J]. 海河水利, 2004, (4): 31 - 33.
- [16] 崔树彬. 论河流环境承载能力及其应用[J]. 水问题论坛, 2003, 38(1): 32 - 39.
- [17] 汪恕诚. 水环境承载力分析与调控[J]. 水利发展研究, 2002, (1): 2 - 6.
- [18] 曾维华, 程声通. 区域水环境集成规划刍议[J]. 水利学报, 1997, (10): 77 - 82.
- [19] 廖文根. 水环境承载能力及其评价体系探讨[J]. 中国水力水电科学研究院学报, 2002, 6(1): 1 - 8.
- [20] 申献辰. 水环境承载能力及其定量描述方法 [EB/OL]. [Http://tech.waterinfo.net.cn/News/NewsDisplay.asp?Id=24688](http://tech.waterinfo.net.cn/News/NewsDisplay.asp?Id=24688), 2001 - 12.
- [21] 宋宏杰, 马军霞, 左其亭. 郑州市水环境承载能力计算及调控对策[J]. 郑州大学学报(工学版), 2005, 26(1): 103 - 107.
- [22] 李清龙, 张焕祯, 王路光, 等. 水环境承载力及其影响因素[J]. 河北工业科技, 2004, 21(6): 30 - 32.
- [23] 马文敏, 李淑霞. 西北干旱区域城市水环境承载力分析方法研究进展[J]. 宁夏农学院学报, 2002, 23(4): 68 - 70.
- [24] 龙腾锐, 姜文超, 何强. 水资源承载力内涵的新认识[J]. 水利学报, 2004, (1): 38 - 45.
- [25] 姚治君, 王建华, 江东, 等. 区域水资源承载力的研究进展及其理论探析[J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 111 - 115.
- [26] 陈祥彬. 环境承载力及其应用[J]. 福建环境, 1995, 12(5): 13 - 14.
- [27] 崔凤军. 论环境质量与环境承载力[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 1995, 26(1): 71 - 77.
- [28] 李清龙, 王路光. 水环境承载力的运行机制研究[J]. 河北环境科学, 2003, 11(4): 20 - 22.
- [29] 刘宝勤. 水资源承载力理论、方法及实证研究——以北京为例[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2003.
- [30] 王俭, 孙铁珩, 李培军, 等. 环境承载力研究进展[J]. 应用生态学报, 2005, 16(4): 768 - 772.
- [31] 李如忠, 汪家权, 钱家忠. 模糊物元模型在区域水环境承载力评价中的应用[J]. 环境科学与技术, 2004, 27(5): 54 - 56.
- [32] 傅湘, 纪昌明. 区域水资源承载能力综合评价——主成分分析法的应用[J]. 长江流域资源与环境, 1999, 8(2): 168 - 172.
- [33] 龙腾锐, 姜文超. 水资源(环境)承载力的研究进展[J]. 水科学进展, 2003, 14(2): 249 - 253.
- [34] Slessor M. Enhancement of Carrying Capacity Options - ECCO[M]. the Resource Use Institute, 1990.
- [35] 郝晓辉. ECCO 模型: 持续发展的全新定量分析方法[J]. 中国人口、资源与环境, 1995, (2): 43 - 46.
- [36] 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.
- [37] 王其藩. 高级系统动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [38] 徐中民. 情景基础的水资源承载力多目标分析理论及应用[J]. 冰川冻土, 1999, 21(2): 99 - 106.
- [39] 朱永华. 流域生态环境承载力分析的理论与方法及其在海河流域的应用[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2004.