

流域水环境承载力动态演化机制研究

胡阿芹^{1,2} 谢乃明¹¹

(1. 南京航空航天大学 经济与管理学院, 江苏 南京 211106;

2. 临沂大学 商学院, 山东 临沂 276000)

【摘要】: 流域水环境承载力是衡量流域社会经济发展与流域水环境系统是否协调、流域经济社会是否可持续发展的关键性指标。水环境承载力是以水环境系统为承载主体, 在保证良好的生态环境、水量平衡和水质平衡的前提下, 水环境系统对社会经济系统的承载能力。在对区域水环境承载力影响因素分析的基础上, 提出区域水环境承载力概念模型, 从社会经济子系统、水资源子系统、水环境子系统三个分系统角度分析区域水环境承载力的演化机理。从综合维度、空间维度、时间维度分别给出流域水环境动态演化概念模型, 揭示流域水环境承载力的动态演化规律。以长江流域为例, 解析长江流域水环境承载力的演化机理, 并给出具体研究思路、研究方法及其概念模型。

【关键词】: 水环境承载力 流域水环境 动态演化 概念模型

【中图分类号】: X196; F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2022)08-146-07

流域水资源短缺、水环境恶化、生态功能减退等问题, 给流域社会经济、自然生态系统的可持续发展带来了巨大的危机。面对流域突出的水环境问题, 20 世纪 30 年代美国率先提出, 从流域尺度给出维持和恢复流域生态系统生态完整性的目标^[1], 建立统一的流域管理机构对流域水资源、水环境进行一体化管理。我国也先后以淮河流域、太湖流域、长江流域为基础, 尝试从环境及资源的单一要素管理向流域水环境系统综合管理转变^[2]。

2020 年 12 月 26 日我国政府颁布《中华人民共和国长江保护法》, 为我国从流域整体性及系统性推动长江流域生态环境综合治理与保护提供了法律支撑, 《长江保护法》强调坚持系统性、整体性、协同性的理念实现长江流域生态环境保护和修复。流域水环境承载力是流域自然水环境系统与社会经济系统协调程度的体现, 掌握流域水环境承载力的演化过程, 并以此指导流域水环境治理, 对促进流域可持续发展具有重要的意义。

关于水环境相关的承载力问题, 学者们开展了大量的理论和实证研究, 关注的主题主要有水资源承载力^[3]、水环境容量^[4]、水环境承载力^[5]、水生态资源承载力^[6]、水生态承载力^[7]等。针对水资源承载力问题, 夏军和朱一中^[8]指出, 水资源承载力是度量区域经济发展受水资源制约的阈值。汪恕诚^[9]认为, 水资源承载能力是在一定流域或区域内, 其自身的水资源能够持续支撑经济社会发展规模, 并维系良好的生态系统的能力。对水环境承载力, 学者们也给出了许多不同的表述。贾振邦等^[10]认为, 水环境承载力是在一定的自然环境条件和特定的社会经济发展模式下, 区域水环境(包括水资源和水污染)对其经济社会发展的支撑能力。崔凤军^[11]认为城市水环境承载力是指某一城市, 某一时期、某种状态下的水环境条件对该城市经济发展和生活需求的支持能力。汪恕诚^[9]认为, 水环境承载能力指的是在一定的流域, 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

作者简介: 胡阿芹, 博士, 讲师, 研究方向为区域可持续发展、不确定性评价与决策。E-mail:huaqin@nuaa.edu.cn; 谢乃明, 博士, 教授, 研究方向为灰色系统理论、可持续发展。E-mail:xienaiming@nuaa.edu.cn

基金项目: 教育部人文社会科学研究青年基金项目“长江经济带水环境承载力评价及区域协同提升研究”(20YJC630038)

染物的最大能力。曾维华等^[12]给出了水环境承载力的定义：在某一流域/区域内，在某一时期特定技术经济水平和社会生产条件下，水环境维持水系统功能结构不发生明显改变的情况下，所能承载的人口与工农业发展规模阈值。水生态承载力综合考虑水量、水质、栖息地、生物多样性，在一定程度上是水资源承载力和水环境承载力的结合和深化^[13]，是从生态角度衡量自然生态系统对人类社会经济系统的承载能力^[14]。彭文启^[15]认为，流域水生态承载力是维护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、一定技术水平下的最大经济规模。这些承载力概念的演化及所涉及的研究领域的变化，体现了人类对自然的认知和利用程度的阶段性变化。

围绕这些概念，学者们先后对沁河流域^[1]、松花江流域^[16]、太湖流域^[17]、湟水流域^[18]、长江流域^[19]、黄河流域^[20]等流域的水环境承载力展开了研究，其研究内容包括：(1)流域水环境承载力的评价^[21]，(2)流域水环境承载力的时空格局分析^[22]，(3)基于流域水环境承载力评价的流域环境优化调控^[1]，(4)流域水环境承载力计算系统构建^[23]，(5)流域水环境库兹涅茨曲线的上下游递进规律^[24]，(6)流域水资源承载力动态预测^[20]与调控^[25]等。学者们虽然从流域的视角对流域水环境承载力开展研究，但研究仍主要针对流域上某城市^[26]、某一小河流域水环境承载力评价，对流域内各区域之间的水环境变化的相互影响思考较少，忽略大河流域水环境承载力整体性、可靠性、动态变化等特征的分析。而位于流域的不同城市之间水源关系密切，其水环境状态及其相互影响决定了流域水环境的整体状况，仅对单一城市或局部区域水环境承载力进行评价，对流域整体水环境承载力的提升显然是低效的，从流域整体角度来理解和应对现有的流域水环境问题，成了现实需求^[27]。

本文明确界定区域水环境承载力、流域水环境承载力的定义及内涵基础上，构建区域水环境承载力概念模型；从流域整体性、系统性角度出发给出流域水环境动态演化概念模型，揭示流域水环境承载力的动态演化规律。最后，以长江流域沿岸主要州、市为例，从整体性、系统性角度出发，给出长江流域水环境承载力动态演化机制的研究思路，以期后续从整体角度开展长江流域水环境承载力评估、构建流域水环境协同治理机制、提升长江流域水环境承载力打下坚实的基础，为保护和改善长江经济带生态环境、修复流域生态功能、推动长江经济带高质量发展提供一定智力支持。

1 流域水环境承载力概念及内涵界定

1.1 水体相关的承载力概念比较

水资源承载力对经济社会发展的支撑，包括对居民生活用水、农林牧渔业用水、工业用水、环境用水、生态用水等多方面的支撑，是从水量的角度来分析水资源的支撑能力，主要约束为人类社会及自然界发展所需用水量与自然界及社会技术进步共同作用下的取水量之间的关系。水资源承载力是以水供应量为主要约束条件，测量水资源量对社会与经济发展的支撑程度，强调的是水资源供需情况。

水生态承载力是一类复合承载力，其按照水生态系统完整性保护要求，以水生生物保护为基点，借助水生生物栖息地质量要求，来确定水生态环境支持的经济社会系统的能力。水生态承载力主要从水生态平衡的角度，衡量水生态对社会与经济发展的支撑程度，强调的是生态完整性。

水环境是由多个影响因素决定的一种水的状态，水环境承载力考虑的是在满足水质、水量要求，不破坏生态环境前提下，能够容纳的最大的人口数量及最大的经济规模，其更多强调水环境系统的功能性。水资源承载力、水环境承载力和水生态承载力的概念表明，它们具有不同的研究对象、研究角度和约束条件，具体比较见表1。

1.2 区域水环境承载力

区域水环境承载力是指在一个时间阶段、一定经济技术条件和社会生产条件下，满足区域一定居民生活水平、环境质量要求，维持水系统结构不发生质的变化，并保持生态系统良好状态所能承受的人口及经济的最大规模。

1.3 流域水环境承载力

表 1 水体相关的承载力概念的比较

比较内容	水资源承载力	水环境承载力	水生态承载力
承载主体	水资源系统	水环境系统	水生态系统
承载客体	社会经济系统—自然生态系统	社会经济系统—自然生态系统	社会经济系统—自然生态系统
研究角度	水资源供需平衡	保证良好的生态环境条件下， 水体量的平衡和质的平衡	水生态平衡
约束条件	水资源的供应量	水资源供应能力、水环境容量、水生态服务能力	水生态服务能力

流域水环境承载力是在保证一定水资源流量、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。流域水环境承载力是在以水循环为驱动的“水资源系统—水环境系统—社会经济系统”互动机制基础上形成的一种动态变化过程，其支撑能力的大小取决于流域上下游城市之间水环境承载力在时间层面和空间层面上的动态影响。

2 区域水环境承载力的概念模型

区域水环境系统是由“水资源—水环境—水生态—社会经济”互动机制决定的复杂系统，人类行为主导着整个复杂系统的发展和演变。一方面，人类发展需要消耗大量水资源，同时将自身产生的各类污染物排放到水环境系统中。另一方面，依托自然代谢功能，水环境系统对自身状态进行自我维持和调节，针对社会经济系统带给自身的压力进行反应，使水环境系统形成一种新的状态，水环境承载力相应也发生变化。水环境系统除了满足人类生存和发展的需求之外，还需要满足自然生物界的需求。人类具有一定的能动性，在给自然系统带来压力的同时，还会根据自身已经掌握的知识及技能调整自身创造的社会经济系统的结构，将技术与投资作用于水环境及水资源系统，以此调节水环境的承载能力。社会经济系统与水生态系统之间的关系状态，大致经历三个阶段：低社会经济发展水平与高水生态环境状态，高社会经济发展水平与低水生态环境状态，高社会经济发展水平与高水生态环境状态。水环境问题研究的最终目标是，维持良好的水生态系统基础上，实现人类社会经济的最优化发展。根据分析，给出了区域水环境承载力概念模型，用以呈现影响区域水环境承载力的子系统以及子系统之间的逻辑关系，具体见图 1。

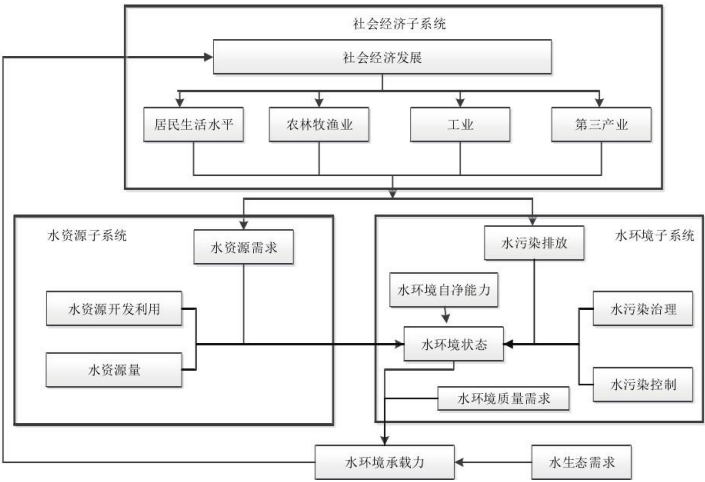


图 1 区域水环境承载力概念模型

2.1 社会经济子系统

社会与经济是两个不同却又密切联系的概念，社会是以一定物质生产活动为基础而相互联系的人类的总体，经济是社会生产关系的综合，经济发展为社会发展提供物质基础，两者相互制约又相互联系，我们采用“社会经济系统”一词来概括两者组成的系统。这一系统是水环境系统的主要承载客体，主要包括人口规模、城镇化率、产业结构、产业规模等，其系统的结构对水环境的承载状态具有较大的影响。在经济子系统中，产业结构是影响区域水环境承载力的一个重要因素，通过产业结构调整可以缓解水环境压力，是提升水环境承载力的一个重要方式。

2.2 水资源子系统

水资源系统为社会经济系统提供自然物质基础，是区域社会经济发展的支撑，与此同时还要接受社会经济系统带来的压力和改善：比如区域调水、提升水资源开发利用率等等。水资源系统自身具备一定的自然禀赋条件，为人类及水生态系统提供其生存所需要的水资源，是社会经济系统发展的限制条件，是影响区域水环境承载能力的重要因素。在水资源系统中，人类对其水资源的开发利用程度以及其他水利技术的采用等，对于区域水环境承载能力也有着重要影响。

2.3 水环境子系统

水环境系统具有自净能力，其状态具备一定程度的结构与功能稳定性，既可以缓解经济社会作用的各种压力与扰动破坏，又可以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。随着环保意识的提升，人们根据自身需求进行水功能区的划分，并对不同功能区提出了不同的水环境质量要求，同时，将最先进的水环境科学与技术应用到水环境的治理和控制过程中，以保证健康的水环境状态。为了更清晰地呈现各子系统之间的关系，将区域“社会经济系统—水资源系统—水环境系统”复合系统细分为人口子系统、经济子系统、水资源子系统、水生态系统、水环境子系统 5 部分，并将 5 个子系统内各因素之间的关系进行呈现，如图 2 所示。

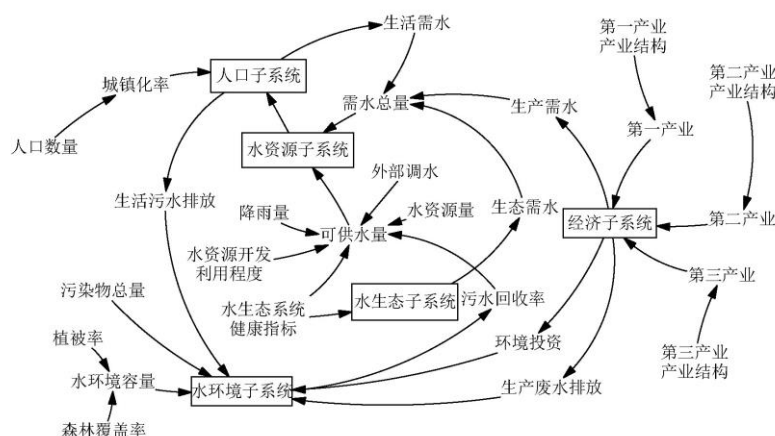


图 2 区域社会经济系统、自然水生态系统相关因素关系图

区域水环境承载力的大小取决于某一个阶段该区域经济社会子系统、水资源子系统、水环境子系统以及水生态系统之间的

相互作用。水环境承载力以承载主体水资源、水环境、水生态的最大承受阈值为约束条件，在一定的水环境质量要求、技术水平支持、环境治理投资等作用下，对承载对象人口、社会经济的最大承载规模，可以采用多目标优化的方法来确定。

3 流域水环境承载力动态演化概念模型

从流域的维度来看，流域上下游区域水体间物质、能量等不断地进行更新和循环，加之区域水域空间特征的不同，位于流域上不同区域的水环境承载力状态呈现出较强的关联性、斑块性、尺度性及空间变异性。针对流域水生态完整性保护这一要求，在维持和修复流域水生态系统时，需要从以对位于流域某一区域的水环境承载力进行评价及管理，向流域整体水环境系统综合管理转变，水环境承载力的研究视角，应以区域水环境承载力为基础，结合流域水环境变化的基本原理，从流域整体性、系统性角度对流域水环境进行管理。

3.1 流域水环境承载力综合演化概念模型

流域水环境系统的演化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。从流域水生态系统的斑块性、尺度性、整体性特征来看，流域水环境承载力是由结构功能上相对独立的一系列节点上的“社会经济—自然”复杂系统共同作用决定的，从各个节点的空间尺度上的水生态环境入手，融合空间、时间尺度上的生态系统演化过程，构建流域水环境承载力综合演化概念模型，概念模型见图 3。

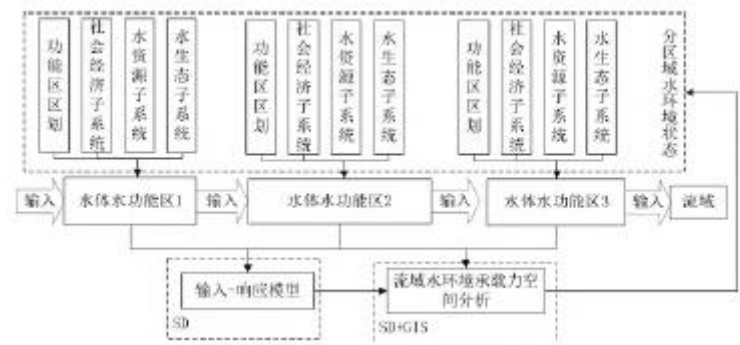


图 3 流域水环境承载力综合演化概念模型

从图 3 呈现的流域水环境承载力的综合演化模型来看，一方面，流域沿岸城市人口的增长、经济发展、工业化及城市化状态决定了流域水生态环境质量；另一方面，通过对整个流域时间上、空间上水环境质量的反馈，人们可以对人口结构、产业结构、污染排放等情况进行适度的空间调配，从而保证整个流域水生态环境的可持续发展。在对流域水环境承载力进行空间分析时，从整体角度保证水生态需求、流域的水质达标以及水量调配的平衡是极其重要的一个环节，采用先整体后局部的思路来解决。具体量化控制表达见式(1)。

$$E = \sum_{i=1}^n E_i / n, R = \sum_{i=1}^n R_i / n, B = \sum_{i=1}^n B_i / n \quad (1)$$

式中：n 为流域内功能区个数，E_i 代表第 i 个功能区的水环境状况，R_i 代表第 i 个功能区的水资源状况，B_i 代表第 i 个功能区的生物多样性状况，E 代表整个流域水环境状况，R 代表整个流域的水资源状况，B 代表整个流域的水生物多样性状况。从整体流域角度要求 E、R、B 不超过拟定指标，在这一条件下，保证 i 功能区不超过拟定标准，从而实现流域的整体性控制。

结合综合概念模型中所给出的流域水环境的演化原理，以流域城市为基本单元，基于相邻城市单元之间的水力联系及物质与信息交换，建立各城市之间的水量、水质联系。基于城市间经济社会之间的物质及信息交流，建立各城市之间的经济社会联系。以流域整体水环境承载力的提升为主要目的，优化流域水环境承载力布局，以最大限度实现流域水环境系统与经济、社会、资源、生态子系统的协调发展将成为未来研究的重点。

3.2 基于空间维度的流域水环境演化概念模型

流域水环境状态具有基于水循环驱动的动态演变的特点，流域内的城市水环境状态之间既存在着一定的空间差异，又存在着一定的空间联系。从流域的尺度研究水环境的演化过程，需要在考虑位于流域不同位置城市对流域水环境状态的影响基础上，整体性把握城市之间水环境状态的空间影响，从而更准确把握整个流域的水环境状态。图 4 从空间尺度展示了流域水环境状态的演化规律。

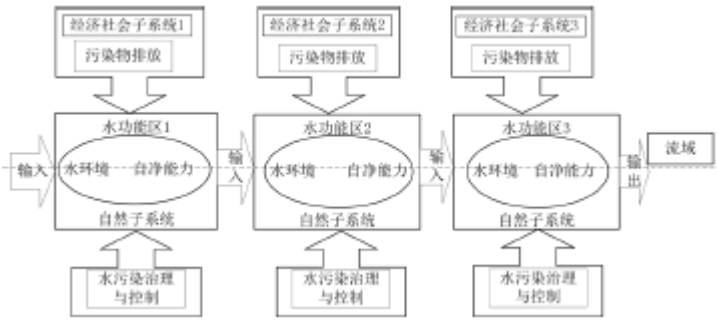


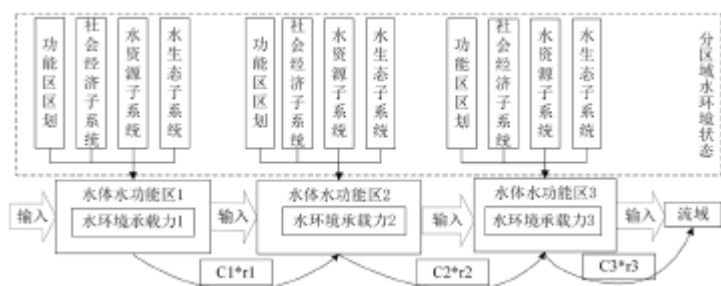
图 4 空间维度流域水环境演化概念模型

在以人类为主导的流域水环境生态系统中，结合地形、地貌、自然植被、产业结构以及行政区划空间分布特征，对流域水环境系统进行分区，在分区的基础上，对水功能区之间的水环境承载力的关系进行空间演化建模，从整体性、系统性角度把握流域水环境承载力的整体状况。在水环境承载力空间演化建模时，需要考虑的影响因素有：(1)社会经济系统—水资源系统的耦合关系。通过社会系统、经济系统及生态系统的需水情况，确定水资源的配置格局。(2)社会经济系统—水环境系统的耦合关系。通过社会系统、经济系统的排污、治污情况、水环境系统自身的自净能力以及不同水功能区的水环境要求等约束条件，重点思考城市发展、产业结构对水环境系统的影响，思考社会经济子系统与水环境系统的耦合关系。(3)水功能区之间的耦合关系。通过水力、水质、水量以及水代谢在功能区上下游之间的传递关系，寻找不同功能区之间的耦合关系。

3.3 基于时间维度流域水环境演化概念模型

水资源代谢、结构功能的变化、人类应对环境的反馈机制均需要一定的时间，因此，水环境状态的变化对于人类经济社会活动的反映具有一定的时间滞后性。水环境状态是人类社会的压力和水环境系统的支撑力两个变量相互博弈的结果，其在时间上也具有一定的规律。在对流域水环境承载力的评价时，加入时间变量，考虑不同功能区的水质、水量、生物栖息地质量状况的动态变化过程，以提高流域水环境承载力的评价准确性。基于时间维度流域水环境演化概念模型见图 5。图中的指标 C 代表上游水功能区对下游功能区的污染物排放量浓度，r 指标代表某时间函数下上游对下游的影响率，r 指标由流速、降解率、上下游的距离等因素决定。因上游所有功能区污染物的排放对下游都有影响，但也可以将其影响叠加在一起，故模型 5 中加入的影响指标只表达相邻区域之间的时间影响。

4 流域水环境承载力动态演化分析



长江经济带地处长江流域，覆盖上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南、贵州，面积约 205 万平方千米，人口和生产总值均超过全国 40%，是我国的经济重心所在，具有独特优势和巨大发展潜力。流域水环境承载力是衡量流域可持续发展的重要指标，是保证社会经济发展与自然生态环境协调发展的关键所在。为了整个流域的社会经济及生态环境的可持续发展，以水环境承载力为抓手，在保证健康的流域水生态环境基础上，对流域沿岸城市的产业结构、产业布局、生产要素等进行协调，成为流域发展的必然选择。

长江沿岸中心城市以其特有的地理位置及资源条件,发挥着“黄金水道”的引领功能,成为推动长江流域发展的核心节点,因沿岸中心城市之间存在着明显的区域性、整体性及系统性特征,能够反应长江流域水环境承载力的整体状况,因此在分析长江流域水环境承载力动态演化时,长江沿岸中心城市就成了重点研究对象,其中重点选取长江干流沿岸 39 个州、市作为具体的研究对象。

长江流域水生态环境状态,很大程度上由沿岸城市的社会经济发展状况、自然资源禀赋、社会技术进步、污染治理投资、产业结构、环保意识等因素决定。流域水环境管理的核心是平衡流域内各城市水环境系统之间的关系,协调区域环境子系统之间各系统之间的冲突,进而从流域的整体性角度,解决流域水环境所面临的问题。

通过对区域水环境承载力概念模型系统的分析, 可以把水环境承载力的影响因素分为: 水环境系统压力、水环境系统支撑力、水环境系统状态、水环境系统响应四个类别。水环境压力代表各类污染物的排放及水资源的需求; 水环境系统支撑力代表自然系统对人类系统、自然系统的支持; 水环境状态代表着水环境目前所处的状态; 水环境系统响应代表人类为改善自然生态系统所采取的措施。

$$\text{s.t.} \begin{cases} S_E \leq 1 \\ S_R \leq 1 \\ S_B \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中：WECC 代表区域水环境承载力，P 表示区域人口数量，G 代表区域经济规模，g 函数中的 P_i 代表水环境系统的压力，R 代表着人类对水环境的改变的响应， S_0 代表自然系统对水环境系统的支撑力， $S_E = Q_0/Q$ 代表水环境系统的承载状态， $S_R = W_0/W_i$ 代表水资源系统的承载状态， $S_B = B_i/B_r$ 代表生物多样性要求的达标状态， Q_0 是水污染物的排放量， Q_r 水质要求， W_0 代表水资源的需求量， W_i 代表水资源可利用量， B_r 代表生物多样性值， B_i 代表生物多样性的限值。

考虑长江流域水环境承载力的系统性和整体性，长江流域水环境承载力 T_{WECC} 可以用公式 (5) 来表示。

$$T_{WECC} = \sum_{i=1}^{39} WECC_i / 39 \quad (5)$$

约束条件可以用式 (6) 表示。

$$\text{s.t.} \begin{cases} T_{S'_E} \leq 1 \\ T_{S_R} \leq 1 \\ T_{S_B} \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中： $T_{S'_E} = \sum_{i=1}^{39} S'_{Ei} / 39$, $T_{S_R} = \sum_{i=1}^{39} S_{Ri} / 39$, $T_{S_B} = \sum_{i=1}^{39} S_{Bi} / 39$ 。

考虑时间维度相邻城市间水环境的影响，式 (6) 中和式 (4) 的 S_E 不完全相同，需要对其进行时间维度的变换。 $S'_{Ei} = (Q_{0i} + Q_{0i-1} \cdot r_{i-1}) / Q_{ri}$ ，式中的 r_{i-1} 代表第 $i-1$ 个城市的降解率， Q_{0i-1} 代表着 $i-1$ 在 $t-1$ 时刻的污染物排放量，因相邻城市间的距离、水的流速等因素的影响，这里的 $t-1$ 在一定程度上不是完全确定的。

通过前面构造的模型，进行分析求解，就可以得到长江流域水环境承载力的值。系统动力学(systemdynamics, SD)模型模拟能够对系统进行动态仿真实验，通过系统的不同参数或策略的输入，模拟系统的动态变化行为和趋势。为了体现长江流域水环境承载力的动态演化，我们需要借助 SD 模型来展开。

采用 SD 模型构建长江流域水环境承载力动态演化模型具体步骤如下：首先构建 39 个州、市的水生态环境子系统，确定各子系统的系统要素、要素关系、系统参数、流图、数学方程和系统结构。借助长江流域干流沿岸城市水生态环境的动态演化过程分析，将 39 个州、市的水生态环境系统彼此之间的时空影响关系加入模型之中，形成动态演化模型。

运用该演化模型，可以对流域承载状态进行模拟，也可以对水环境承载力相关的各要素进行预测。依据预测结果，对各城市水环境系统压力、水环境系统支撑力、水环境系统状态、水环境系统响应进行分析，从而揭示人口结构变化、产业结构变化等与水环境系统的相互关系，进而对长江流域水环境进行科学的管理和调控。

5 结论

(1)通过对水体相关的承载力概念的比较分析,明确水环境承载力的研究目标、约束条件、承载主体,进而给出区域及流域水环境承载力的概念。

(2)遵循分析问题“从上到下”,解决问题“从下到上”的策略,在对区域水环境承载力的影响因素分析的基础上,给出区域水环境承载力概念模型,从社会经济子系统、水资源子系统、水环境子系统三个分系统角度分析区域水环境承载力的演化机理。

(3)从整体性、系统性角度出发,从综合维度、空间维度、时间维度分别对水环境演化过程进行分析,构建流域水环境演化概念模型,把握流域水环境承载力的演化机理,明确流域水环境承载力的研究思路。

(4)以长江流域为例,对流域水环境承载力的演化机制进行分析,并给出具体研究思路、研究方法及其模型,以期从流域水环境承载力角度入手,有效实现流域水环境综合治理提供思路。

参考文献:

[1]叶龙浩,周丰,郭怀成,等.基于水环境承载力的沁河流域系统优化调控[J].地理研究,2013(6):1007-1016.

[2]何大伟,陈静生,颜廷真.我国大河流域水资源与水环境综合管理模式探讨:机构、法律、制度[J].科技导报,2001(1):44-47.

[3]Pandey V P,Babel M S,Shrestha S,et al.A framework to assess adaptive capacity of the water resources system in Nepalese river basins[J].Ecological Indicators,2011,11(2):480-488.

[4]冯健,周怀东,彭文启,等.基于分期分区控制思想的洱海总磷水环境容量计算[J].水电能源科学,2013(10):34-37.

[5]Pandey V P,Shrestha S.Groundwater environment in Asian cities[M].Oxford:Butterworth-Heinemann,2016.

[6]夏军,王中根,左其亨.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(6):786-794.

[7]苏岫,索安宁,宋德瑞,等.基于遥感的长江经济带邻近海域滩涂生态承载力评估[J].海洋环境科学,2018(4):528-536.

[8]夏军,朱一中.水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J].自然资源学报,2002(3):262-269.

[9]汪恕诚.水环境承载能力分析 with 调控[J].中国水利,2001(11):9-12.

[10]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(3):8-11.

[11]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(2):140-144.

[12]曾维华,薛英岚,贾紫牧.水环境承载力评价技术方法体系建设与实证研究[J].环境保护,2017(24):17-24.

[13]曾晨,刘艳芳,张万顺,等.流域水生态承载力研究的起源和发展[J].长江流域资源与环境,2011(2):203-210.

-
- [14]朱洁,王烜,李春晖,等.系统动力学方法在水资源系统中的研究进展述评[J].水资源与水工程学报,2015(2):32-39.
- [15]彭文启.流域水生态承载力理论与优化调控模型方法[J].中国工程科学,2013(3):33-43.
- [16]杨丽花,佟连军.基于BP神经网络模型的松花江流域(吉林省段)水环境承载力研究[J].干旱区资源与环境,2013(9):135-140.
- [17]许玲燕,杜建国,刘高峰.基于云模型的太湖流域农村水环境承载力动态变化特征分析——以太湖流域镇江区域为例[J].长江流域资源与环境,2017(3):445-453.
- [18]贾紫牧,陈岩,王慧慧,等.流域水环境承载力聚类分区方法研究——以湟水流域小峡桥断面上游为例[J].环境科学学报,2017(11):4383-4390.
- [19]万炳彤,赵建昌,鲍学英,等.基于SVR的长江经济带水环境承载力评价[J].中国环境科学,2020(2):896-905.
- [20]黄昌硕,耿雷华,颜冰,等.水资源承载力动态预测与调控——以黄河流域为例[J].水科学进展,2021(1):59-67.
- [21]Yang J,Lei K,Khu S,et al.Assessment of water environmental carrying capacity for sustainable development using a coupled system dynamics approach applied to the Tieling of the Liao River Basin,China[J].Environmental Earth Sciences,2015,73(9):5173-5183.
- [22]王维,张涛,王晓伟,等.长江经济带城市生态承载力时空格局研究[J].长江流域资源与环境,2017(12):1963-1971.
- [23]严子奇,夏军,左其亭,等.淮河流域水环境承载能力计算系统的构建[J].资源科学,2009(7):1150-1157.
- [24]许凤冉,王成丽,阮本清.流域水环境库兹涅茨曲线的上下游演递规律及其启示[J].长江流域资源与环境,2010(8):975-978.
- [25]张礼兵,胡亚南,金菊良,等.基于系统动力学的巢湖流域水资源承载力动态预测与调控[J].湖泊科学,2021(1):242-254.
- [26]姜大川,肖伟华,范晨媛,等.武汉城市圈水资源及水环境承载力分析[J].长江流域资源与环境,2016(5):761-768.
- [27]赖锡军.流域水环境过程综合模拟研究进展[J].地理科学进展,2019(8):1123-1135.