

“长江经济带”战略背景下武汉城市 水环境承载力综合评价

蓝 希¹, 刘小琼², 郭 炎³, 陈昆仑^{2*}

(1. 中国地质大学(武汉)公共管理学院, 湖北 武汉 430074; 2. 湖北大学资源环境学院, 湖北 武汉 430062;
3. 武汉大学城市设计学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 为揭示长江经济带战略背景下武汉城市水环境承载力的演化特征, 理解长江经济带建设过程中武汉城市水环境的承载基础, 从水资源环境、水污染控制和社会经济承载 3 个子系统来构建城市水环境承载力指标体系, 采用结构熵权法和均方差决策法进行主客观联合赋权, 对长江经济带战略下的武汉城市水环境承载背景进行研究。研究表明: (1) 2004~2013 年武汉城市水资源、环境与社会经济的发展协调性较好, 城市水环境承载力综合值呈上升态势, 具有较好的水环境承载基础; (2) 水资源环境和水污染控制两个子系统在武汉城市水环境承载力中贡献较大; (3) 长江经济带建设背景下水污染控制是提升武汉水环境承载力的关键, 未来控制城市生活污水、加强城市环保基础设施的建设和管理是武汉城市水环境管理的重中之重。

关键词: 城市水环境承载力; 结构熵权法; 均方差决策法; 武汉市

中图分类号: X143; X826 文献标识码: A 文章编号: 1004-8227(2018)07-1433-11

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201807003

水环境作为社会、经济系统存在和发展的基本因素, 它的承载能力状况对城市和区域发展起着重要作用^[1]。随着人口增长和社会经济发展, 水资源短缺和水环境恶化已成为全球性的严峻问题。如何有效地保护和改善水环境, 实现水资源可持续利用, 已经成为我国城市和区域发展亟需解决的问题^[2-4]。

城市水环境承载力是指某一时期、某种状态下的水环境条件对该城市的经济发展和生活需求的支持能力, 它是该城市水环境系统结构性的一种抽象表示方法, 可以作为衡量该城市经济发展活动与水环境条件适配程度的指标^[4-6]。水环境承载力的理论雏形为水环境容量, 最早于 1968 年日本学者提出, 并经历了由水资源承载力、水环境承载力和水生态承载力等多个概念的演化^[7]。水资源承载力是指某一地区的地表和地下水在保证正常的社会物质生活水平下, 供给工农业生产、生态环境保护等用水的最大能力, 以及水资源所能持续供养的人数量; 水环境承载

力是表征水环境系统的一个客观属性, 是水环境系统与外界物质输出输入、能量交换、信息反馈的能力和自我调节能力的表现, 它体现了水环境与人类社会经济发展活动之间的联系; 而水生态承载力则是在维持水生态系统自身及其支持系统健康的前提下, 基于一定的生态保护和承载目标, 自然水生态系统所能支撑的人类活动的阈值^[8-10]。这 3 个概念分别从用水、污水排放以及水生态系统 3 个角度研究水环境, 体现了随着社会经济的发展, 当前对于水环境的研究已逐步深入和精细。

美国 URS 公司研究了佛罗里达的 Keys 流域承载力, 内容涉及承载力概念、研究方法和研究模型^[11]; Munther^[12]从供水的角度对城市水资源承载力进行了研究; Rijiberman^[13]将水资源承载力列为城市水资源保障的衡量标准; Harris^[14]研究了农业生产区域水资源农业承载力, 并将其作为区域发展潜力的衡量标准。国内对城市水环境承载力的理论和实证研究均较多, 重点包括从城

收稿日期: 2017-09-15; 修回日期: 2017-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401181; 41601153)

作者简介: 蓝 希(1988~), 女, 博士研究生, 主要从事土地利用规划与调查方面研究. E-mail: lanxi_cug@163.com

* 通讯作者 E-mail: ckl_2001@163.com

市人口、社会、经济、生态角度出发的城市水环境承载力评价,并强调城市水环境与社会系统之间的关系以及此基础上的城市水环境对城市可持续发展的支撑^[15-18]。从具体研究方法来看,主要有偏向主观的层次分析法^[19-20]、德尔菲法、环比评分法等^[21]和偏向客观赋权法的多目标规划决策法^[22-23]、人工神经网络评价^[24]、主成分分析法、集对分析法^[25]、熵值法^[26]等,并开始注重主客观方法结合进行指标权重值的测度^[27-28]。综合来看,水环境承载力研究是涉及到人口、社会、经济以及资源环境在内的复杂巨系统^[19],目前国内外对城市水环境承载力的评价模型、方法、指标选取均处于各有侧重的探索和完善过程之中,且在时间尺度上多偏重于时间断面或短时期的探讨,缺乏长时间序列的演化研究对比。

改革开放以来,我国空间发展战略经历了沿海开放、西部大开发、中部崛起等多轮布局,从空间梯级开发的角度关注了经济建设与社会发展。2014年“长江经济带战略”成为“一带一路”国家重大战略的组成部分之一,该战略的出台对我国的空间发展战略进行了重新定义,其追求空间开发、经济发展的同时,强调流域视角纵深融合的区域综合开发模式,追求区域协同发展的同时,更强调资源环境的承载与支撑。长江流域无论从空间区位还是资源环境来看,都属于我国社会经济持续发展和区域均衡增长的重要承启地带和支撑区域。长江经济带战略强调要将长江经济带发展成为“具有全球影响力的内河经济带,东中西互动合作的协调发展带,沿海沿江沿边全面推进的对内对外开放带,生态文明建设的先行示范带”,其要求“切实保护和利用好长江水资源,严格控制和治理长江水污染,妥善处理江河湖泊关系,加强流域环境综合治理,强化沿江生态保护和修复,促进长江岸线有序开发”,长江水资源保护和污染治理是长江经济带战略的重点任务之一^[29-30]。武汉作为长江经济带的核心城市之一,因长江而兴的同时分布有汉江和众多湖泊资源,是一座以水为特色的特大型城市,水资源利用与水环境保护一直都是各层面持续讨论的重要议题。近十多年来的快速城市化进程更是加剧了城市发展与水环境之间的矛盾,随之而来的水环境治理与保护探索与尝试不断开展,并积累了一系列经验^[31]。2003年在汉阳地区率先开展的国

家重大科技水专项(“城市水环境质量改善技术与综合示范”)以及之后持续推进的“六湖连通”工程都是武汉城市水环境问题应对的重要举措。面对长江经济带建设的战略机遇和生态文明建设的国家目标,工程技术角度的实践之外,城市水环境承载能力和演化的全面认识和宏观把握也非常重要和紧迫。

因此,本研究拟以长江经济带战略实施前的2004~2013年为时限,构建城市水环境承载力综合评价模型,对长江经济带核心城市武汉的城市水环境承载力进行定量化研究,以期从时间序列和综合评价两个方面出发,较为全面地揭示长江经济带战略背景下武汉城市水环境承载力的演化特征,较为深刻地理解长江经济带建设过程中武汉城市水环境的承载基础,从而为长江经济带城市的可持续发展和水环境管理提供借鉴。

1 研究说明

1.1 案例选择

武汉被称为“百湖之市”和“江城”,是长江中下游重要的中心城市,也是长江经济带的重要核心城市。全境水域面积 2 217.6 km²,比重超过全域国土面积的 1/4,除长江、汉江等河流外,还有大小湖泊 140 余个,其中仅城区湖泊就多达 42 个,水资源赋存特色非常明显。2004~2013 年 10 a 间,武汉常住人口由 850 余万人增长到 1 022 万人,城市化水平由不到 70% 提高到超过 80%,全年地区生产总值由 1 956 亿元增加到 9 051.27 亿元,城市建成区面积 216 km² 扩大到 534 km²。过去十年的高速城市化进程给武汉的土地利用、城市景观、产业结构、人口社会等层面都带来了翻天覆地的变化。2016 年 12 月,《国家发展改革委关于支持武汉建设国家中心城市的指导意见》指出“武汉市作为我国中部和长江中游地区唯一人口超千万人、地区生产总值超万亿元的城市”,“具备建设国家中心城市的基础条件”,“武汉建设国家中心城市”,“有利于支撑长江经济带发展”,“有利于构筑内陆开放平台,纵深拓展国家开放总体格局”。因此 2004~2013 年的武汉城市水环境承载力研究,对认识和把握武汉参与长江经济带建设的资源环境背景、建设国家中心城市并提升其现代化与国际化水平城市地位具

有重要意义。

1.2 评价指标体系

科学合理的水环境承载力指标体系的构建,是城市水环境资源合理开发与管理的^[32]。影响水环境承载力的因素复杂多样,水环境不仅为人口和经济的发展提供必要的物质基础和条件,而且还是污水排放的受纳体。因此,城市水环境承载力指标应从与社会、经济有关的水资源及水环境指标中提取,而且这些指标是可以度量的。

本研究参考已有文献中的水环境承载力评价指标体系,结合武汉的实际情况,综合考虑指标数据的可获取性和连续性,构建了包括3个准则

层、7个目标层共23个指标的评价体系(表1)。3个准则层分别为水资源与环境(A)、水污染控制(B)、社会经济承载(C)。水质状况、污染排放和水资源供需分别从用水基础、排污以及供需3个方面反映水资源与环境的整体状况;技术管理作为技术保障体现社会对水污染控制的总体水平,生活污水作为当前污水排放最重要且相对比较难控制的部分,成为水污染控制的重中之重;而经济、人口和社会发展水平则最为直观的体现了社会经济承载力。23个指标的选择是基于统计年鉴对于相应目标的数据统计以及相关权威研究的参考^[33,34]。

表1 城市水环境承载力综合评价指标体系

Tab.1 Evaluation index system of urban water environmental comprehensive carrying capacity

准则层	目标层	指标层	指标效用
A 水资源与环境	A1 水质状况	A11 符合功能区类别的河流断面比例(%)	+
		A12 符合功能区类别的湖泊比例(%)	+
		A13 湖泊富营养化状态(中轻营养比重%)	+
		A14 饮用水源水质达标率(%)	+
	A2 污染排放	A21 废水排放总量(10 ⁴ t)	-
		A22 废水中COD排放量(10 ⁴ t)	-
		A23 废水中氨氮排放量(t)	-
	A3 水资源供需	A31 人均日生活用水量(m ³ /d)	+
		A32 城市供水总量	+
A33 工业用水量		+	
B 水污染控制	B1 技术管理	B11 万元GDP耗水量	-
		B12 工业用水重复利用率(%)	+
		B13 工业废水达标排放率(%)	+
	B2 生活污水控制	B21 城镇生活污水集中处理率(%)	+
		B22 城市生活污染处理能力(10 ⁴ t/d)	+
		B23 建成区排水管道密度	+
C 社会经济承载	C1 经济发展	C11 人均GDP	+
		C12 第三产业比重	+
	C2 人口发展	C21 城镇人口比重	+
		C22 人口密度	+
	C3 社会发展	C31 建成区绿化覆盖率	+
		C32 城市化水平	+
		C33 人均社会消费水平	+

1.3 评价方法

为了克服多指标变量间信息的重叠和人为确定权重的主观性,本文利用结构熵权法和均方差决策法进行指标权重的综合确定。

1.3.1 结构熵权法

结构熵权法(SEM)是一种定性定量相结合的权重系数结构确定方法,将德尔斐专家调查法(专家打分法)与模糊分析法相结合得到“典型排

序”,通过熵值计算和“盲度”分析,同时对可能产生潜在的偏差数据统计处理得到最后的权重值^[35,36]。具体分析步骤如下:

①用“德尔菲法”采集城市水环境相关行业专家的意见,进行匿名打分,形成专家意见的“典型排序”;

②对“典型排序”进行定量转化,转化的隶属函数为:

$$\mu(a_{ij}) = \frac{\ln(m-l)}{\ln(m-1)} \quad (1)$$

式中：始终 a_{ij} 为第 i 个专家对第 j 个指标的评价； m 为转化参量，数值上为 $j+2$ ；记 b_{ij} 为 a_{ij} 定量转化值，并求得指标的平均认识度：

$$b_j = \frac{b_{1j} + b_{2j} + \dots + b_{kj}}{k} \quad (2)$$

③定义专家对因素 j 由认知产生的不确定性为“认识盲度” $Q_j (\geq 0)$ ，

$$Q_j = \left| \frac{\max(b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{kj}) + \min(b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{kj})}{2} - b_j \right| \quad (3)$$

④对每一个因素，定义 k 个专家的“总体认识度” $x_j (> 0)$ ，

$$x_j = b_j(1 - Q_j) \quad (4)$$

⑤归一化处理。在④得到全体专家对指标的评价向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_j)$ 归一化处理，令

$$a_j = \frac{x_j}{\sum_{i=1}^m x_j}, \text{ 最后得到权重向量:} \\ W = \{a_1, a_2, \dots, a_j\} \quad (5)$$

1.3.2 均方差决策法

均方差决策方法 (MSD) 是确定权重系数的另一种客观赋权法。均方差决策法反映随机变量离散程度，最重要的、常用的指标是该随机变量的均方差^[37, 38]，离散程度的大小决定均方差大小。本文以三个准则层中各单一评价指标为随机变量，取各指标随机变量的均方差，然后将单一均方差进行归一化处理，结果就是每个评价指标的权重系数。计算步骤为：

①求变量的均值：

$$E(Q_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ij} \quad (6)$$

②求 Q_i 的均方差：

$$\sigma(Q_i) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{ij} - E(Q_i))^2} \quad (7)$$

③求 Q_i 的权系数：

$$w_j = \sigma(Q_j) / \sum_{i=1}^m \sigma(Q_j) \quad (8)$$

④进行多指标决策与排序：

$$D_i(w) = \sum_{i=1}^m y_{ij} w_j \quad (9)$$

即求得各子系统（即三级指标）的权重系数。再计算城市化与生态环境的 4 个维度即二级指标，采用多目标线性加权函数法计算：

$$B_i = \sum_{i=1}^m D_i(w) w_k \quad (10)$$

式中： $D_i(w)$ 为三级层次指标属性值； B_i 为二级层次指标属性值； w_k 为三级层次指标权重； w_j 为单项指标权重。

1.3.3 组合赋权法

为获得结构熵权法和均方差决策法两者的组合权重，在分别算出二者的权重之后，将二者的结果进行求均值，得到组合赋权，以期获得主观与客观相统一的组合权重，其计算公式为：

$$AW_{1,2} = \frac{SWM + MSD}{2} \quad (11)$$

式中： $AW_{1,2}$ 表示组合权重； SWM 表示由结构熵权法所得权重； MSD 表示由均方差决策法所算的权重。

1.4 数据来源及预处理

本文研究时限选取 2004~2013 年，这是“长江经济带”战略实施前的 10a，也武汉城市化发展最为迅速的 10a，更是武汉参与长江经济带建设的基础背景。数据来源于 2004~2013 年武汉市环境状况公报、2005~2014 年武汉市统计年鉴、2004~2013 年湖北省水资源公报以及湖北省统计年鉴。

为消除指标间数量级和量纲差异的影响，对各类数据采用极差法标准化处理^[27]，计算公式为：

$$Y_{ij} = (X_{ij} - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin}) \quad (12)$$

$$y_{ij} = (X_{imax} - X_{ij}) / (X_{imax} - X_{imin}) \quad (13)$$

式中： Y_{ij} 和 y_{ij} 为样本城市 j 第 i 个指标的标准化值； X_{ij} 为样本城市 j 第 i 个指标的原始数值； X_{imax} ， X_{imin} 分别为样本城市指标 i 的最大值和最小值。正向指标值即所选指标的值越大效果越好，逆向指标即所选指标的值越小越好。研究中所选取的指标正逆向皆有，正向指标采用公式 (12)，负向指标采用公式 (13)。

2 结果分析

2.1 城市水资源与环境承载力分析

水资源与环境子系统包括水质状况、水环境压力、水资源供需 3 个分系统共 10 个指标。利用上述两种主客观结合的权重赋值方法，计算得到各目标层和指标层的综合权重（表 2）。

表 2 水资源与环境子系统(A)各指标层权重

Tab. 2 Weight of each layer of index of water resources and environmental subsystem

目标层	指标权重			指标层	指标权重			
	SEM	MSD	AW ₁		SEM	MSD	AW ₂	AW ₃
A1 水质状况	0.378	0.395	0.386	A11 符合功能区类别的河流断面比例	0.324	0.336	0.330	0.127
				A12 符合功能区类别的湖泊比例 (%)	0.294	0.214	0.254	0.098
				A13 湖泊富营养化状态	0.227	0.223	0.225	0.087
				A14 引用水源水质达标率 (%)	0.155	0.227	0.191	0.074
A2 污染排放	0.360	0.264	0.312	A21 废水排放总量 (10 ⁴ t)	0.459	0.388	0.423	0.132
				A22 废水中 COD 排放量 (10 ⁴ t)	0.307	0.326	0.317	0.099
				A23 废水中氨氮排放量 (t)	0.234	0.286	0.260	0.081
A3 水资源供需	0.262	0.341	0.302	A31 人均日生活用水量 (m ³ /d)	0.324	0.336	0.330	0.100
				A32 城市供水总量	0.348	0.266	0.307	0.093
				A33 工业用水量	0.328	0.398	0.363	0.110

注: $AW_{1,2} = (SEM+MSD) / 2$, $AW_3 = AW_1 * AW_2$, 后文表格同此原理.

由表 2 的 AW₃ 综合权重计算结果可知, 在水资源与环境子系统中, A21 废水排放总量指标 (0.132)、A11 符合功能区类别的河流断面比例指标 (0.127) 及 A33 工业用水量指标 (0.110) 的综合权重值相对更大, 这意味着城市水资源与环境承载力的提升需要重点控制废水排放总量、提升河流断面水质状况以及控制工业用水量。

城市水资源与环境子系统的综合承载力计算结果 (图 1) 表明: ①2004~2013 年 10a 间, 武汉城市水资源与环境子系统的承载指数呈现波动中递增的趋势, 其中 2008 年以后总体趋于平缓。这主要得益于 2008 年以来, 武汉围绕“两型社会”建设, 快速推进水环境治理与保护工作 (其中“大东湖”生态水网构建工程总体方案获国家发改委的批复并启动实施、水生态系统保护与修复试点工作通过国家验收), 提升了城市水资源和环境的承载能力和水平。②3 个目标层的承载指数有着不同的变化特征。其中, 水质状况在 2004~2008 年呈现递增趋势并于 2008 年达到最高值 0.274, 而后略有下降并趋于稳定 (2012~2013 年维持在 0.24 左右), 符合功能区类别的河流断面比例下降是影响水质状况的重要因素。水环境压力则在 2007 年后呈现明显下降的趋势, 说明武汉在城市水污染排放方面有改善。这与李磊等的研究结果一致, 其研究表明 2006~2007 年由于氨氮治理水平和技术的明显提高, 武汉城市水环境的污染物承载力呈现增长并趋于稳定^[16]。一定程度上也表明, 武汉参与长江经济带建设具有较好的水环境承载能力和基础。

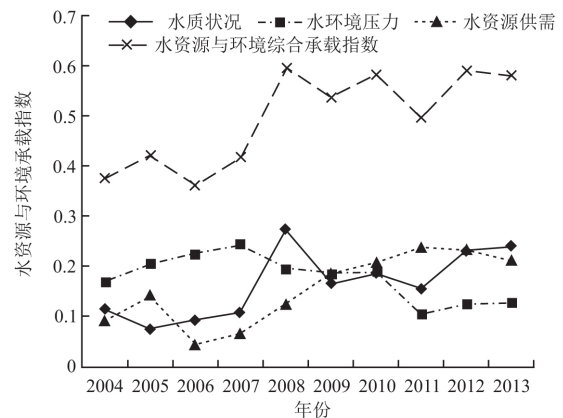


图 1 城市水资源与环境子系统综合承载力变化

Fig. 1 Changing of comprehensive evolution of capacity of urban water resource and environmental subsystem in Wuhan

2.2 城市水污染控制承载指数分析

城市水污染控制能力主要从技术管理和生活污染控制两方面 6 个指标进行评价, 利用前述方法和原理进行指标权重计算得到如下结果 (表 3)。

由表 3 的 AW₃ 综合权重计算结果可知, 在城市水污染控制子系统中, B23 建成区排水管道密度 (0.158)、B22 城市生活污染处理能力指标 (0.190)、B11 万元 GDP 耗水量 (0.169) 的综合权重值相对更大, 是城市污水控制的重点。因而, 加强城市排水系统等环保基础设施建设、提升生活污水处理能力、推动产业技术革新升级以降低单位 GDP 的耗水量, 势在必行, 需在未来城市发展中重点关注。

从城市水污染控制综合承载力计算结果 (图 2) 可以发现: ①城市水污染控制综合承载力总体

表 3 城市水污染控制子系统(B)各指标层权重

Tab. 3 Weight of each layer of index of urban water pollution control subsystem

目标层	指标权重			指标层	指标权重			
	SEM	MSD	AW ₁		SEM	MSD	AW ₂	AW ₃
B1 技术管理	0.500	0.467	0.484	B11 万元 GDP 耗水量	0.314	0.389	0.352	0.170
				B12 工业用水重复利用率 (%)	0.345	0.273	0.309	0.149
				B13 工业废水达标排放率 (%)	0.341	0.338	0.339	0.164
B2 生活污染控制	0.500	0.533	0.516	B21 城镇生活污水集中处理率 (%)	0.314	0.339	0.327	0.169
				B22 城市生活污水处理能力 (10 ⁴ t/d)	0.345	0.389	0.367	0.190
				B23 建成区排水管道密度	0.341	0.272	0.306	0.158

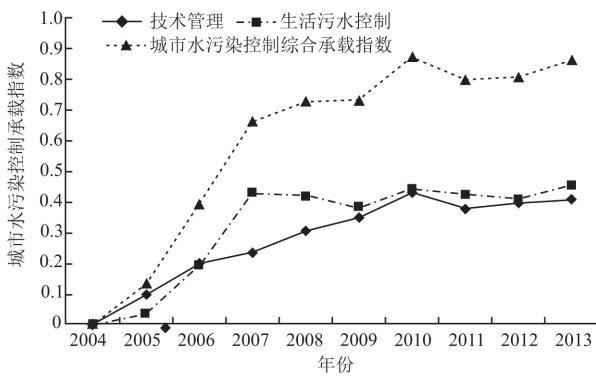


图 2 城市水污染控制综合承载力变化

Fig. 2 Changing of comprehensive carrying capacity of urban water pollution control

呈现稳定增长趋势,其得分由 2004 年的 0.132 增长到了 2013 年的 0.862,说明随着武汉社会经济的全面发展、技术工艺的不断更新改进,城市在工业用水重复使用及废水处理水平上有了较大进步,城市生活污水处理能力也在不断增强。②2006 年以后,城市生活污水控制能力提高所带来的承载力提升逐渐大于技术管理所带来的承载力提升。由于城市生活污水排放在城市废水排放总量的比重不断增大(图 3),已由 2004 年的 52.91% 增长到了 2013 年的 77.87% (共 6.65×10⁸ t),

这说明未来的长江经济带战略背景下控制城市生活污水是武汉城市水环境管理的重中之重,城市生活污水处理设施的不断完善和处理能力的不断增强也是现实所需。

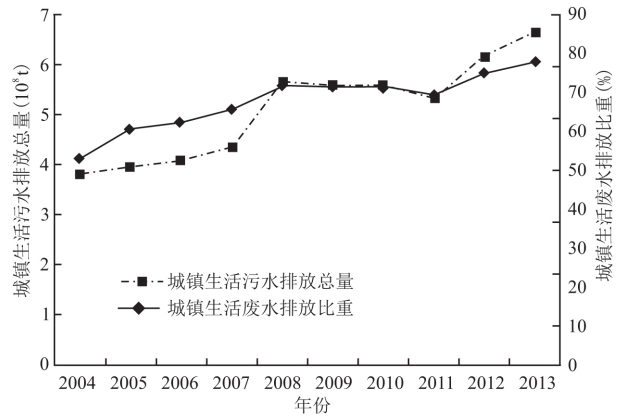


图 3 城市生活污水排放总量及比重变化

Fig. 3 Total amount of domestic wastewater discharge and the changing of its proportion

2.3 城市社会经济承载指数分析

城市社会经济承载指数主要分为经济发展、人口发展、社会发展承载能力 3 个目标共 7 个指标,利用前述方法和原理进行指标权重计算得到如下结果(表 4)。

表 4 城市社会经济承载子系统(C)各指标层权重

Tab. 4 Weight of each layer of index of urban socio-economic carrying subsystem

目标层	指标权重			指标层	指标权重			
	SEM	MSD	AW ₁		SEM	MSD	AW ₂	AW ₃
C1 经济发展	0.287	0.319	0.303	C11 人均 GDP	0.613	0.509	0.561	0.170
				C12 第三产业比重	0.387	0.491	0.439	0.133
C2 人口发展	0.367	0.341	0.354	C21 城镇人口比重	0.568	0.451	0.509	0.180
				C22 人口密度	0.432	0.549	0.491	0.174
C3 社会发展	0.346	0.340	0.343	C31 建成区绿化覆盖率	0.361	0.272	0.317	0.109
				C32 城市化水平	0.314	0.365	0.339	0.116
				C33 人均社会消费水平	0.325	0.363	0.344	0.118

由表4的 AW_3 综合权重计算结果可知，在城市社会经济承载子系统中，C21 城镇人口比重指标(0.18)、C22 人口密度指标(0.174)和C11 人均GDP 指标(0.17)的权重值相对较大，说明人口规模 and 经济发展水平对城市社会经济承载有更重要影响。

城市社会经济的综合承载力计算结果(图4)表明：①10a 来武汉的高速城市化伴随着社会经济和城市建设的快速发展，水环境治理方面的投资亦不断增多，同时水资源使用效率也在不断提高，故而城市社会经济综合承载能力呈现明显增长。②目标层中，人口和社会的承载力值变化大体上表现出持续增长趋势，且两者呈现交替推进。研究期内武汉城市人口密度和城镇人口比例逐年增加，水资源需求压力也随之不断增大，因此人口承载力水平逐年提高。社会生活水平方面，随着人均消费水平逐年提高，人民生活水平有了很大改善，因此社会生活承载力评价也逐年增大。但值得注意的是，2010 年后经济承载力评价略有下降，其主要原因是城市产业结构调整尤其是第三产业比重不断增大，带来了城市用水压力的增加，亦即城市水资源需求持续增长，因而经济承载力呈现一定下降的趋势。这说明长江经济带战略强调的经济转型升级、走新型工业化道路、提高工业发展质量和效益等方面非常契合未来武汉发展的需要，武汉未

来有必要担负起应有的使命，通过自身发展模式的调整转型来推动长江流域生态环境维育重任的完成。

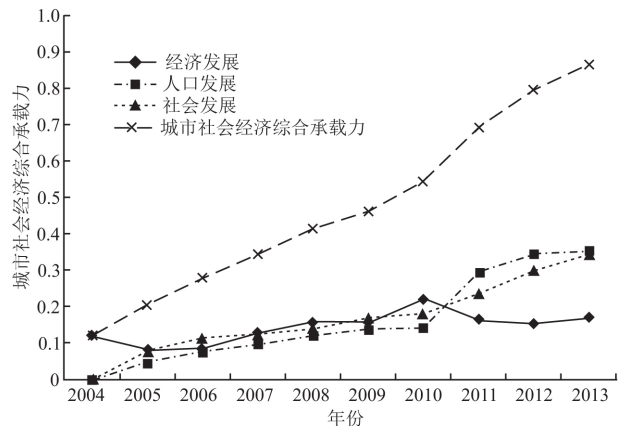


图4 城市社会经济综合承载指数变化

Fig. 4 Changing of comprehensive carrying capacity of socio-economic index

2.4 城市水环境综合承载力评价及演化

前面主要从3个准则层对城市水环境承载力子系统进行了分析评价，这里用准则层评价计算武汉城市水环境承载力综合值，计算过程同上(结构熵值法和均方差决策法获得3个子系统权重值：A 水资源环境承载力权重 0.496、B 水污染控制承载力权重 0.340、C 社会经济承载力权重 0.254)，最后得到2004~2013 年武汉城市水环境承载力综合评价值(表5)。

表5 武汉城市水环境承载力综合值及变化

Tab. 5 Comprehensive calculations of carrying capacity of water environment in Wuhan

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
水资源环境	0.153	0.171	0.147	0.170	0.242	0.219	0.237	0.202	0.240	0.235
水污染控制	0	0.049	0.133	0.202	0.232	0.259	0.307	0.282	0.291	0.314
社会经济承载	0.031	0.052	0.066	0.084	0.102	0.116	0.139	0.173	0.198	0.220
武汉城市水环境承载力	0.184	0.272	0.346	0.456	0.576	0.594	0.683	0.657	0.729	0.769

由表4 结果可知，2004~2013 年武汉城市水环境承载力综合值呈上升态势，其得分由0.184 增大到0.769，其中水资源环境和水污染控制两个子系统对武汉城市水环境承载力影响较大。水资源环境子系统的综合承载力贡献主要表现在2004~2006 年，其得分值总体较为稳定；水污染控制子系统的综合承载力贡献主要表现在2007 年以后(尤其是2009 年以后其贡献值均大于水资源环境子系统)，这表明2007 年以后武汉对城市湖泊、河流的污染控制和治理能力持续改善，提升了城市综合水环境承载力。随着武汉城市社会

经济的全面发展，其水资源需求和生活污水排放压力都将持续增大，因此，努力提升城市水污染控制水平(城市管网和污水处理设施建设以及工业技术革新)对维护治理成果和防止水环境质量恶化有着显著意义。总的来说，长江经济带建设大背景下，武汉未来的发展一方面要努力推进经济发展的转型升级，一方面也需要持续推动环境基础设施的建设、环境治理技术的革新以及环境保护制度的先行先试，多维度地践行生态文明建设，从而推动长江经济带经济建设和生态环境协同发展目标的实现。

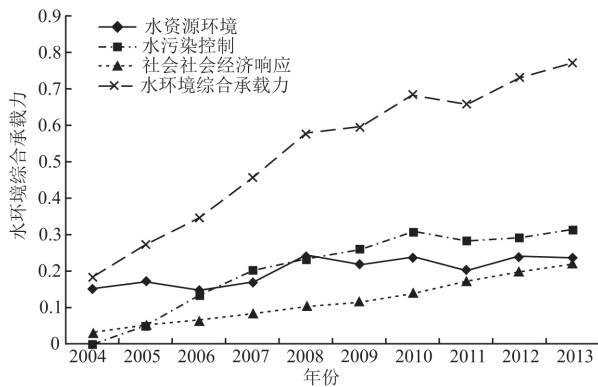


图 5 城市水环境综合承载力及变化

Fig. 5 Comprehensive carrying capacity of urban water environment and its changing

3 结论与讨论

在长江经济带战略背景下,为较为全面地掌握长江经济带核心城市武汉的水环境承载基础,本文从水资源环境、水污染控制和社会经济承载 3 个子系统来构建城市水环境承载力指标体系(3 个准则层、7 个目标值共 23 个指标),采用结构熵权法和均方差决策法主客观结合的测度方法确定城市水环境承载力的指标权重,并据此对长江经济带建设背景下的武汉城市水环境承载力进行了评价,取得主要结论如下:

(1) 结构熵权法和均方差决策法计算所得的指标权重值有一定的差异,计算两者的综合权重值,可实现对评价指标的赋权达到主观与客观统一,量化结果更加准确与合理,可为城市水环境承载力评价研究提供新思路,应用较为简单、方便。

(2) 武汉的实证研究,从时间序列和综合分析上对长江经济带战略背景下的滨江核心城市的水环境承载力形成可较为全面的认知。2004~2013 年武汉城市水环境承载力综合值呈上升态势,其得分由 0.184 增大到 0.769,表明近些年武汉城市水环境承载能力不断增强,水资源、环境与社会经济的发展协调性较好,武汉参与和推进长江经济带建设以及建立国家中心城市打下良好的水环境承载基础。而长江经济带的建设更加强调水污染治理和流域环境综合治理,这势必会进一步影响未来武汉市的水资源承载力。

(3) 水资源环境和水污染控制两个子系统对武汉城市水环境承载力影响贡献较大,前者主要

表现在 2004~2006 年,后者主要表现在 2007 年以后。这表明 2007 年以前武汉的城市水环境维持主要有赖于其良好的水资源和环境基础,而 2007 年以后的承载力提升,主要源于城市水环境污染控制和治理水平的持续进步。未来长江经济带战略下的武汉城市发展,要更多关注水环境综合治理和水环境特色维护,以切实推进生态文明建设目标的实现。

(4) 城市生活污水治理是武汉城市水资源环境管理的重中之重,城市污水处理系统等环保基础设施的建设是武汉城市水环境承载力维护的前提和基础。这些具体方面同城市发展转型升级、走新型工业化道路一起,不仅是现实所需也是武汉实现城市可持续发展的基本保障,更是长江经济带建设“切实保护和利用好长江水资源,严格控制和治理长江水污染,妥善处理江河湖泊关系,加强流域环境综合治理,强化沿江生态保护和修复,促进长江岸线有序开发”的战略任务,还是武汉的战略机遇和城市使命。

(5) 本研究通过长时间序列和综合性的城市水环境承载力定性加定量评估,在“长江经济带”战略背景下,从人文地理学视角寻求武汉市快速城市化过程与城市水环境互动关系的表达,希望这种基于流域或区域大背景下城市水环境承载力的评估分析技术和研究框架的搭建,能为未来的武汉及其他长江经济带城市乃至全国其他依托大流域或大区域的城市的城市的水环境承载力研究提供技术示范和分析框架。

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.
CUI F J. The carrying capacity of municipal water environ and its case study[J]. Journal of Natural Resources, 1998, 13(1): 58-62.
- [2] 王莉芳,陈春雪. 济南市水环境承载力评价研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(5): 199-202.
WANG L F, CHEN C X. Carrying capacity assessment of water environment in Jinan[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(5): 199-202.
- [3] ZHENG Z H, YU Y X. Improvement of the vertical “scatter degree” method and its application in evaluating water environmental carrying capacity[J]. Tecnologia Y Ciencias Del Agua, 2017, VIII(2): 71-76.
- [4] 李 姣,严定容. 湖南省及洞庭湖区重点城市水环境承载

- 力研究[J]. 经济地理, 2013, 33(10): 157-162.
- LI J, YAN D R. Water environmental carrying capacity of hunan province and the key cities in the Dongting Lake Area [J]. Economic Geography, 2013, 33(10): 157-162.
- [5] 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, 26(3): 445-453.
- XU L Y, DU J G, LIU G F. Dynamics of rural water environmental carrying capacity of the lack basin based on cloud model-taking zhenjiang region of the Taihu lake basin as example [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(3): 445-453.
- [6] 张姗姗, 张落成, 董雅文, 等. 基于水环境承载力评价的产业选择——以扬州市北部沿湖地区为例[J]. 生态学报, 2016, 37(17).
- ZHANG S S, ZHANG L C, DONG Y W, et al. Selecting industries based on evaluation of the water environment's carrying capacity: a case study of the northern lakeside region of Yangtze city [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 37(17).
- [7] 侯丽敏, 岳 强, 王 彤. 我国水环境承载力研究进展与展望[J]. 环境保护科学, 2015, 41(4): 104-108.
- HOU L M, YUE Q, WANG T. Research and prospect of the theoretical framework of water environmental carrying capacity in China [J]. Environmental Protection Science, 2015, 41(4): 104-108.
- [8] 王西琴, 高 伟, 何 芬, 等. 水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, 09(1): 41-46.
- WANG X Q, GAO W, HE F, et al. Discussion on the conception and connotation of water ecological carrying capacity [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2011, 09(1): 41-46.
- [9] 邹 进, 张友权, 潘 锋. 基于二元水循环理论的水资源承载力质量能综合评价[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(1): 117-123.
- ZOU J, ZHANG Y Q, PAN F. Assessment on the quality, quantity and power potential of water resources carrying capacity based on dualistic water cycle model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(1): 117-123.
- [10] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems [M]. Annual Review of Ecology and Systematic, 1973: 1-23.
- [11] Committee to Review the Florida Keys Carrying Capacity. National research council. a review of the florida keys carrying capacity study [M]. Washington D. C. National Academy Press, 2002.
- [12] MUNTHER J HADDADIN. Water issue in Hashemite Jordan [J]. Arab Study Quarterly Belmont, 2000, 22(5): 54-67.
- [13] RIJIBERMAN. Different approaches to assessment of design and management of sustainable urban water system [J]. Environment Impact Assessment Review, 2000, 129(3): 333-345.
- [14] HARRIS JONATHAN M. Carrying capacity in agriculture: globe and regional issue [J]. Ecological Economics, 1999.
- [15] ZHOU X Y, LEI K, MENG W, et al. Industrial structural upgrading and spatial optimization based on water environment carrying capacity [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 165.
- [16] LIAO H, ZHANG Y, CHEN Z, et al. Evaluation and prediction of regional water resources carrying capacity: a case study of shandong province [J]. Environment and Natural Resources Research, 2017, 7(1): 21.
- [17] ZHOU X Y, LEI K, MENG W, et al. Space-time approach to water environment carrying capacity calculation [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 149: 302-312.
- [18] MA P, YE G, QI J, et al. Development of an index system for evaluation of ecological carrying capacity of marine ecosystems [J]. Ocean & Coastal Management, 2017: 23-30.
- [19] 齐 心, 赵 清. 北京市水环境承载力评价研究[J]. 生态经济(中文版), 2016, 32(2): 152-155.
- QI X, ZHAO Q. Study on the water environmental carrying capacity of Beijing [J]. Ecological Economy, 2016, 32(2): 152-155.
- [20] 蒋晓辉, 惠决河. 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.
- JIANG X H, HUI Y H. Study on the models of bearing capacity of regional water environment [J]. Acta Scientiae Circumstantiel, 2001, 21(3): 312-317.
- [21] 张晓青, 李玉江. 山东省水土资源承载力空间结构研究[J]. 资源科学, 2006, 28(3): 13-31.
- ZHANG X Q, LI Y J. Spatial structure of water and land resources carrying capacity in Shandong Province [J]. Resources Science, 2006, 28(3): 13-31.
- [22] 景跃军, 陈英姿. 关于资源承载力的研究综述及思考[J]. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(5): 11-14.
- JING Y J, CHEN Y Z. Review and thinking on the research of the resources carrying capacity [J]. China Population Resources and Environment, 2006, 16(5): 11-14.
- [23] 樊庆铨, 于 森, 徐东川, 等. 大庆地区水环境承载力计算分析与评价[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(2): 66-70.
- FAN Q X, YU M, XU D C, et al. Computing analysis and evaluation of water environment carrying capacity in Daqing area [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(2): 66-70.
- [24] 王 俭, 孙铁珩, 李培军, 等. 基于人工神经网络的区域水环境承载力评价模型及其应用[J]. 生态学杂志, 2007, 26(1): 139-144.
- WANG J, SUN T H, LI P J, et al. Evaluation model of regional water environment carrying capacity based on artificial neural network and its application in Liaoning Province [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(1): 139-144.
- [25] 贺瑞敏, 张建云, 王国庆, 等. 基于集对分析的广义水环境承载能力评价[J]. 水科学进展, 2007, 18(5): 730-735.

- HE R M, ZHANG J Y, WANG G J, et al. Evaluation on generalized water environment carrying capacity based on SPA [J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(5): 730-735.
- [26] 贺瑞敏, 张建云, 王国庆, 等. 基于集对分析的广水环境承载能力评价[J]. *水科学进展*, 2007, 18(5): 730-735.
- HE R M, ZHANG J Y, WANG G J, et al. Evaluation on generalized water environment carrying capacity based on SPA [J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(5): 730-735.
- [27] 张美玲, 梁虹, 祝安. 贵州省水资源承载力的空间地域差异[J]. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(1): 68-72.
- ZHANG M L, LIANG H, ZU A, et al. Spatial Regional Difference of Water Resources Carrying Capacity in Guizhou Province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(1): 68-72.
- [28] 刘启明, 张晨岚, 林锦美, 等. 厦门城市水环境承载力综合指标体系评价[J]. *华侨大学学报*, 2008, 29(1): 94-96.
- LIU Q M, ZHANG C L, LE J M, et al. The study of bearing capacity of water environment in Xiamen [J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2008, 29(1): 94-96.
- [29] 方大春, 孙明月. 长江经济带核心城市影响力研究[J]. *经济地理*, 2015, 35(1): 76-81.
- FANG D C, SUN M Y. Influence of core cities in Yangtze River Economic Belt [J]. *Economic Geography*, 2015, 35(1): 76-81.
- [30] 段学军, 虞孝感, 邹辉. 长江经济带开发构想与发展态势[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(10): 1621-1629.
- DUAN X J, YU X G, ZOU H. Analysis on the development strategy and trend of Yangtze river economic belt [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(10): 1621-1629.
- [31] 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, 25(5): 761-768.
- JIANG D C, XIAO W H, FAN C Y, et al. Research on water resources and water environment carrying capacity of Wuhan city circle [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(5): 761-768.
- [32] 李新, 石建屏, 曹洪. 基于指标体系和层次分析法的洱海流域水环境承载力动态研究[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(6): 1338-1344.
- LI X, SHI J P, ZAO F. Water environment carrying capacity of Erhai Lake based on index system and analytic hierarchy process [J]. *Acta Scientiae Circumstantiel*, 2011, 31(6): 1338-1344.
- [33] 汪嘉杨, 翟庆伟, 郭倩, 等. 太湖流域水环境承载力评价研究[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(5): 1979-1987.
- WANG J Y, ZHAI Q W, GUO Q, et al. Evaluation of water environment carrying capacity in Taihu basin [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(5): 1979-1987.
- [34] 郑毅, 蒋进元, 杨延梅, 等. 基于向量模法的南宁市水环境承载力评价分析[J]. *环境影响评价*, 2017, 39(1): 65-68.
- ZHENG Y, JIANG J Y, YANG Y M, et al. Assessment and analysis on water environment carrying capacity based on vector norm method in Nanning [J]. *Environmental Impact Assessment*, 2017, 39(1): 65-68.
- [35] 黄四霞, 薛小杰. 水资源承载力可拓评价模型的改进及应用[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(2): 175-180.
- HUANG S X, XUE X J. Improvement and application of extension evaluation method for carrying capacity of water resources [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(2): 175-180.
- [36] 程启月. 评测指标权重确定的结构熵权法[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(7): 1225-1228.
- ChENG Q Y. Structure entropy weight method to confirm the weight of evaluating index [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2010, 30(7): 1225-1228.
- [37] REID W. Sustainable development: sons from success [J]. *Environment*, 1989, 31(17): 7-9.
- [38] COCKLIN C R. Methodological problems in evaluating sustainability [J]. *Environment Conservation*, 1989, 16(4): 27-32.

Comprehensive Evaluation of Urban Water Environmental Carrying Capacity in Wuhan Under the Context of the Yangtze River Economic Belt Strategic

LAN Xi¹, LIU Xiao-qiong², GUO Yan³, CHEN Kun-lun²

(1. School of Public Administration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Faculty of Resources and Environmental Science, Hubei University, Wuhan 430062, China; 3. School of urban design, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To reveal the evolution characteristic of urban water environmental carrying capacity in Wuhan under the background of the Yangtze river economic belt strategy, so as to understand the carrying foundation of urban water environment in Wuhan through the process of the construction of the Yangtze river economic belt, This paper build up the assessment index system of urban water environmental carrying capacity (UWECC) was built up with 3 subsystems, including urban water environment, urban water pollution control and urban social economic carrying capacity. And then a much clearer definition and associated evaluation for UWECC in Wuhan were carried out based on structure entropy weight method and mean-squared deviation weight decision method. The results show that: (1) UWECC of Wuhan was increasing in the period of 2004–2013 which means that the development of water resources, environment and eco-social were coordinate during the past decades and there is a good foundation for water environment carrying in Wuhan. (2) The subsystems of the water environment and the urban water pollution control contribute more to the UWECC. (3) Water pollution control is the key to enhance the Wuhan water environmental carrying capacity. The water environment management in Wuhan should focus on the control of municipal sewage, and strengthen the construction and management of urban sewage treatment facilities in the future.

Key words: urban water environmental carrying capacity; structure entropy weight method; mean-squared deviation weight decision method; Wuhan city