

# 水资源承载力研究进展及启示

党丽娟<sup>1,2</sup>, 徐勇<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 水资源是资源环境的重要组成部分之一, 对水资源承载力研究历程、方法及应用成果的梳理总结, 有益于我国资源环境承载能力监测预警工作的开展以及生态文明建设。该文在划分国内外关于水资源承载力研究历程阶段特征的基础上, 重点对水资源承载力的概念、指标体系及研究方法等进展进行了总结评述。研究认为: (1) 水资源承载力内容主要集中在水资源开发规模、水资源承载最大人口规模以及经济系统持续发展规模等方面; (2) 水资源承载力指标体系的建立不应以数量多占优, 关键在于建立水资源系统与承载对象之间的耦合关系, 即成为联接被承载对象(人口、经济、生态)结构、规模及未来发展变化的桥梁, 实现各个指标能够清晰解释承载力所刻画的内容及特征; (3) 水资源承载力研究方法可概括为现状评价方法和情景预测方法, 分别对应水资源的开发能力和对经济社会可持续发展的支撑规模。基于人均综合效用水平的水资源承载力的研究, 如何量化可持续发展这一概念成为研究难点。该研究认为以最小用水单元为主线, 通过每个用水单元与社会、经济、生态、环境系统的联接关系, 构建用水指标体系, 从而确定水资源承载的各个系统发展潜力和规模, 可为区域发展和水资源承载力的研究提供新思路。

**关键词:** 水资源承载力; 概念; 指标体系; 研究方法; 评述

中图分类号: TV213

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)03-0341-08

## Review of Research Progress in Carrying Capacity of Water Resources

DANG Lijuan<sup>1, 2</sup>, XU Yong<sup>1</sup>

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research*,

*CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

**Abstract:** Water resources is one of the most critical factors of resources and environment. The review of research on water resources carrying capacity including research history, method and application is not only beneficial to implement of monitoring and forecasting the national resources and environmental carrying capacity, but also valuable to ecological civilization construction. By analyzing the feature and phases division of domestic and international research history on carrying capacity of water resources we reviewed and summarized the definition, indicator systems and calculation methods of water resources carrying capacity. This research suggested that: (1) maximum water resources development scale, maximum population scale and sustainable economic scale were emphasized in previous researches; (2) building up the tight coupling between water resources system and carrier of water resources carrying capacity was more critical than list quantity of indicators, the indicators connecting the water resources system and the structure, scale and tendency of population, economic and ecological system could describe the feature and content of carrying capacity in a clear way; (3) the representative method could be categorized into assessment method and forecast method, which is specific to maximum water resources development scale and social-economic supporting scale. Although these researches have achieved great advances and made substantial progress, how to qualify the sustainable development in this field becomes difficulty to determine the social-economic scale and capability of water resources development. The way of taking minimum water utilization units as thread, by connecting social, economic, ecological and environment system, constructing effective index system to calculate the potential and scale for regional development, could be the reference and idea for the future researches.

**Keywords:** water resources; carrying capacity; evaluation indicators; calculation method; reviews

改革开放 30 多年来,我国经济社会面貌发生了深刻而广泛的变化,但经济的快速增长和人民生活水平的显著提高也付出了沉重的资源环境代价<sup>[1]</sup>。资源环境问题究其本质,是经济结构、生产方式和发展模式问题。粗放型经济增长方式不仅使经济发展难以持续,资源环境也不堪重负<sup>[2]</sup>。实践证明,我国的资源环境与发展关系正在发生重大变化。党的“十七大”报告(2007)把经济增长的资源环境代价过大列为发展面临的首要问题,首次把“生态文明”这个概念写入党代会的政治报告,强调要建立人与自然的和谐相处关系;“十八大”报告(2013)再次提出“建立资源环境承载能力监测预警机制,对水土资源、环境容量和海洋资源超载区域实行限制性措施”等内容,将发展中依然存在的不协调、不可持续问题、资源环境约束加剧等压力列为重点关注对象。

水资源作为资源环境重要的组成部分,与经济社会发展和人民生活密切相关。随着人类活动的加剧和全球气候变化问题的凸显,水循环过程正在发生不利于人类维持既有生产生活秩序的改变<sup>[3]</sup>,淡水资源的供给能力正在持续减弱,很多地区发生了严重的水问题和水危机<sup>[4]</sup>。目前,联合国及相关国际机构已把淡水资源的有效供给和高效利用作为衡量一个国家或地区经济社会发展和科技水平的重要标志,水利调蓄能力和开源节流潜力也被视作检验一国或地区发展潜力和政府执政能力的关键指标<sup>[5]</sup>。为推进我国资源环境承载能力监测预警工作的有效开展,本文针对水资源单项要素,在回顾水资源承载力研究的起源和发展历程的基础上,重点对水资源承载力的概念、指标、评价方法等研究进展进行较为系统的梳理、总结和评述,希望能对未来我国资源环境承载能力尤其是水资源承载力评价工作的开展具有一定启示意义。

## 1 水资源承载力研究的起源及历程

承载力(Carrying Capacity)的思想萌芽于古希腊的亚里士多德时代,1798 年马尔萨斯(Malthus)人口论提出食物线性增长不及人口的指数增长速度,饥荒和战争会抑制人口数量;1838 年弗赫斯特(Verhulst)基于此理论提出了对数增长方程(Logistic Equation),用容纳能力反映食物的约束对人口增长的限制作用,被认为是如今承载力定量研究的起源。后有学者提出增长的极限这一概念<sup>[6]</sup>,承载力的主流思想延伸至人口学<sup>[7]</sup>、社会经济领域的“适度”人口<sup>[8]</sup>,以及生物生态领域的生态环境能够承载的最大种群数量等。20 世纪 60 年代以后爆发了全球性资源环境危机,随着人口的增长和经济的发展,资源短

缺、生态环境恶化等现象日趋显著,人们不得不从资源环境的角度研究其所能支撑的社会经济系统规模,承载力的研究逐渐回归到人口和产业的承载力层面上<sup>[9]</sup>。针对资源短缺在全球许多国家或地区的蔓延问题,20 世纪 70 年代开始,联合国粮农组织(FAO)、联合国教科文组织(UNESCO)、经济合作与发展组织(OECD)开展了一系列承载力项目研究,包括土地资源承载力、水资源承载力、森林资源承载力以及矿产资源承载力等,共同提出了“资源承载力”的概念,即“一个国家或地区的资源承载力是指在可以预见到的时期内,利用本地能源及其自然资源和智力、技术等条件,在保证符合其社会文化准则的物质生活水平条件下该国家或地区能持续供养的人口数量”。在资源承载力研究中较早的是土地承载力,20 世纪 80 年代初由联合国粮农组织(FAO)主持的土地资源人口承载力研究<sup>[10]</sup>,对全球和区域经济、社会发展的规划与可持续发展做出了积极的贡献。

历史地分析,水资源承载力的研究大致可分为 4 个阶段:1985—1991 年为概念及内涵的形成阶段;1992—1999 年为理论探索阶段;2000—2005 年为方法模型的发展阶段;2005 年至今为技术和应用的拓展阶段。从承载力的研究地域上看,由最早的西北干旱地区发展到几乎国土全域覆盖的程度;在研究内容上,以水资源开发利用的能力,逐渐扩展至水资源承载社会经济规模的能力;在承载对象上,从计算水资源开发利用规模的基础上,延伸至人口规模、灌溉面积、工业产值、生态环境安全等内容<sup>[11]</sup>;从承载力计算结果的表达来看,除人口规模、产业规模外,丰富了水资源超载度、承载压力度等内容。

## 2 水资源承载力的概念及理论进展

### 2.1 水资源承载力概念、内涵及发展

国外学者对于水资源承载力的研究最早可见 Shelby 等<sup>[12]</sup>对伊利诺伊斯河的承载力研究,认为河流承载力由物理承载力、生态承载力、社会承载力组成,物理承载力是由水资源的可利用量决定的,生态承载力受到人类活动强度的制约,社会承载力取决于经验参数,且决定了河流在提供旅游休闲功能方面的承载力大小。Slessor M.<sup>[13]</sup>运用 SD 法提出了承载力估算的综合资源计量技术模型(Enhancement of Carrying Capacity Options)模拟人口数量与承载力之间的动态变化,推动了发展中国家资源环境承载力的动态研究;Harris<sup>[14]</sup>将水资源可利用量作为影响农作物产量的一个因素,研究了基于逻辑增长方程的农业承载力的上限;美国 URS 公司<sup>[15]</sup>在对佛罗里达

keys 群岛的自然环境、岛群生态系统、以及海洋系统的承载能力的研究中,将承载力定义为在不对自然和人工资源造成破坏的前提下该地区所能承载的最大发展水平,并采用由社会经济、财政、基础设施、水、海洋及陆地等子系统和图形用户界面(Graphical User Interface)共同构成的承载力分析模型(Carrying Capacity Analysis Model)对该流域的社会经济和生态系统整体进行了模拟和评价,确定 Florida Keys 流域生态系统及其构成因子对各种人类活动影响的承受能力;Sawunyama T. 等<sup>[16]</sup>利用遥感与 GIS 技术对非洲东南部流域小水库的调蓄能力进行承载能力评估,指出小水库作为水资源系统的一部分应该在水资源的规划与管理中得到充分利用。

相比之下,我国对水资源承载力的探索始于西北干旱区水资源<sup>[17]</sup>的研究,以水资源供需关系作为研究思路,贯穿区域水资源及与其联接被承载对象(人口、经济、生态)的结构、规模及未来发展变化进行分析。因此,区域内水资源的供需平衡是我国水资源承载力研究的基本思想。新疆水资源软科学课题研究组<sup>[18]</sup>最早针对水资源承载力进行研究;在国家政策层面上,“九五”攻关计划中“关中水资源承载能力研究”课题<sup>[19]</sup>、“973”项目“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”均重点对西北地区水资源承载能力展开了研究<sup>[20-22]</sup>,旨在为缺水地区经济发展决策提供依据。

基于不同的研究目的,水资源承载力的定义侧重不同。已有的关于水资源承载力的定义可被大致归纳为水资源开发利用的最大能力、水资源的最大支撑规模两种类型。水资源开发利用的最大能力也指水资源的最大开发容量、最大供水能力、水资源可利用量,许有鹏<sup>[23]</sup>、高彦春等<sup>[24]</sup>的研究认为水资源供需盈亏状况、水资源进一步开发利用的潜力大小就代表水资源承载力的大小。相比之下,水资源的最大支撑能力、规模这一内涵得到了更多学者的认可,具体指水资源的最大支撑能力,水资源能够承载的最大人口规模、工农业生产规模等。其中,施雅风<sup>[25]</sup>、惠泱河<sup>[26]</sup>等以及国家“九五”科技攻关“西北地区水资源合理配置与承载能力研究”项目,认为水资源承载力是在特定条件下,对某一地区社会经济发展所能提供的最大支撑能力;这一内涵通常采用人口数量、经济发展规模等指标描述区域发展的合理性和可持续性<sup>[27]</sup>,采用不同方案制定出符合区域水资源承载力相应的人口、经济政策。另一方面,水资源能够支撑的最大人口规模、经济规模这一内涵迄今得到了最为深入地研究及拓展。以阮本青<sup>[28]</sup>、何希吾<sup>[29]</sup>、夏军<sup>[30]</sup>、王浩<sup>[3-4]</sup>、段春青<sup>[31]</sup>等为代表的“规模论”直接

利用人口规模、工农业产值作为刻画承载力大小的指标,其概念可被定义为:在一定阶段的经济水平和技术条件下,以社会经济可持续发展与生态良性循环相协调为原则,区域/流域内水资源能够承载的合理人口数量和经济规模。

总体上看,国内的水资源承载力概念在一定程度上延用了国外研究和土地资源承载力的定义,强调了水资源开发利用的可持续性。对比地看,水资源承载力概念的表述可以从环境学和社会经济学两个角度进行区分,涵盖了以下几个影响因素:一是水资源禀赋因素;二是社会经济技术发展的影响;三是对人口社会经济系统的支撑情况;四是生态环境保障因素。水资源承载力的计算不应割裂整个资源环境系统,片面追求水资源的承载力最大值而忽略系统的整体性,违背了可持续性理论。从研究对象上看,水资源承载力的研究主要体现在水资源开发利用潜力、区域发展规模(人口规模或经济载量)两个方面,可分别概括为水资源的最大开发能力和最大支撑规模。已有研究关于水资源承载力本身表达比较宏观,定量描述不够精确。定义水资源承载力,在考虑水资源承载力影响因素的同时,宜以用水指标为线索,建立起限制因素(如可供水量、水质)与增长因素(如人口、经济)之间的定量关系,从而更好地刻画和测算水资源能够承受的人口、社会经济规模与发展方向。

## 2.2 水资源承载力理论框架及进展

水资源承载力研究是可持续发展理论在水资源管理领域的具体体现和应用。可持续发展强调 3 个主题:代际公平、区际公平以及社会经济发展与人口、资源、环境间的协调性。作为水资源承载力研究的指导思想和理论基础,在可持续发展理论的指导下,资源的可持续利用,人与环境的协调发展取代了以前片面追求经济增长的发展观念。冯尚友等<sup>[32]</sup>基于水资源的最大开发能力这一内涵,提出由可持续发展概念和水持续利用的理论研究、水资源的规划管理技术研究、水资源发展的战略和制度研究 3 个部分组成的基本理论框架。虽然三者实现持续发展和资源持续利用是不可或缺的因素,但忽略了水资源系统之外的社会经济以及生态环境等因素的存在;姚治君<sup>[33]</sup>基于水资源的“规模论”将水资源承载力的研究从低到高概括为 3 个层次:区域水资源的内部转换以及区域水资源开发利用与环境之间平衡关系研究、区域水资源状态与社会经济结构的适配关系的研究、社会需求与水资源承载力之间平衡关系研究。这一理论得到了朱一中等<sup>[34]</sup>的支持,进一步将水资源承载力研究的理论基础具体化为可持续发展理论、“水—生态—社

会经济”复合系统理论和“自然—人工”二元模式下的水文循环过程与机制,这些理论基础在后续研究城市化地区水资源承载力<sup>[35]</sup>时得到应用。

水资源承载力研究对象涉及社会、经济、水资源、生态、环境等众多与人类活动密切相关的因素,研究主体是水资源系统、客体是社会经济系统和生态与环境系统。水资源承载力受供、需水双方矛盾的影响,需要从受自然变化和人类活动影响的水循环系统出发,通过“自然生态—社会经济”系统对水的需求和区域能够提供多少可利用水资源量的支撑能力方面加以度量。结合学者们对水资源承载力的理论研究,可将理论框架分为基础、概念、量化三部分。基础理论包括可持续发展理论、生态经济系统理论、二元模式下水循环理论及水资源优化配置管理理论等;概念体系包括水资源承载力的内涵、特征、影响因素、研究内容、判别标准和研究方法等;量化部分包括供水量化、需水量化、水质量化、耦合量化、优化配置及管理系统等。

### 3 水资源承载力指标体系

建立评价指标体系的目的在于通过选取适当的度量指标,并依据指标间的耦合关系形成有序而全面的评价指标系统,用以定量反映和衡量不同区域水资源系统特征及其对社会经济系统和生态系统的承载状况,识别和诊断、保持或维持承载客体正常运行的限制性环节及其制约程度。水资源承载力评价指标体系的构建是水资源承载力研究中的一个基础性工作。水资源承载力评价指标的选取有不同的做法。通常将指标类型划分为宏观指标、综合指标两大类,宏观指标对应水资源承载人口、产业规模;综合指标表征水资源的支撑能力。宏观指标描述的是区域水资源的可利用量支撑的经济规模和人口数量,用工农业产业和人口数量表示,包括4类二级指标,即水资源系统指标、社会系统指标、经济系统指标、生态环境系统指标;其中,水资源量的大小、可利用程度、水质总体情况、水资源开发利用情况等指标刻画水资源系统背景值;社会系统指标则反映人口和社会发展对水资源的利用情况;经济系统指标描述区域整体发展方向、产业结构、工农业用水情况等;生态环境系统指标主要反映人类活动、经济建设、水资源的开发利用对生态环境的影响。综合指标包括承载力指数和协调指数两项指标,通过指数的范围值来判断水资源承载状态。

水资源承载力评价指标体系种类繁多复杂,然而指标数量多寡并不代表刻画概念是否清晰准确。另外,繁复的指标在计算过程中可操作性低,并不能满

足刻画承载力的精确度要求。有效刻画水资源承载力的指标体系是能够抓住问题的关键,既能反映水资源系统的可利用量及其动态变化,又能准确表达水资源系统与承载系统之间的耦合关系。以区域内某工厂为例,采用其土地占用面积、生产单位产品的耗水量、其他资源消耗量、供水水源与用水单元的距离等指标从资源角度刻画水资源量的承载力;采用总产值、利润、职工数量及工资水平、职工住宅情况等指标从社会经济角度刻画水资源的人口、产业承载力<sup>[36-38]</sup>;采用排水量、废渣、废水处理以及对大气、环境影响等指标从环境污染的角度刻画水资源的生态与环境承载力;以最小用水单元为主线,从这三个角度选取关键指标能够清晰地建立起水资源系统与承载对象(人口、经济、生态)的空间关系,计算出可供水量与该工厂的产品发展规模、职工人数等数量关系,进而评价和测算整个区域的水资源承载能力。

### 4 水资源承载力计算方法

目前,水资源承载力的研究方法有单因素评价法、多因素综合评价法、主成分分析法、多目标规划方法、多指标评判方法、系统动力学法、常规趋势法等。

#### 4.1 水资源承载力的计算方法述评

常规趋势法是在以各部门供、用水量及预测结果的基础上,分析水资源可利用量能否满足用水需求,即水资源的承载能力或承载潜力。具有代表性的是新疆水资源软科学课题调研组对新疆的水资源承载能力和开发战略对策的研究,采用了水文统计法、树木年轮法、太阳活动强弱3种方法对新疆水资源长期变化趋势进行预测研究,按照75%来水保证率计算可利用水量,假设工业、农业、人民生活用水之间远景分水比例为15%,80%,5%,基于未来工农业生产的承载能力,计算新疆的人口规模;曲耀光<sup>[43]</sup>在黑河流域水资源承载力分析计算与对策的研究中,利用趋势法和灰色模型预测方法,分析在高低方案下黑河流域的水资源能否满足各用水部门的需求。此方法简便直观,基于区域/流域水资源供需平衡的思路,利用水资源可利用量来预测分析未来用水需求的发展趋势,沿用至今。

多目标分析评价方法,即在列出影响水资源系统的主要约束条件下,运用系统分析手段寻求多个目标的整体最优。阮本青等<sup>[28]</sup>以系统工程方法为依据,以水资源供需动态平衡、供水能力、行业取用水量、人均粮食产量、耕地面积、人均经济收入为约束,以水资源综合利用效益最大为目标函数,计算水资源所能持续供养的人口数量。这种模型建立规则是以约束条

件为基础的,构成约束的因子和约束条件的设置在某种程度上对模型有很大影响。例如,多目标分析评价方法中,对约束条件的设置主要可概括为产业生产总值最大、用水量最小、人均资源占有量最大等。而就

现有技术水平、用水节水水平而言,任意两种约束条件之间存在矛盾关系<sup>[44]</sup>。约束条件的集合可以满足供需平衡、可持续发展的要求,但多种约束条件的耦合效果差强人意。

表 1 水资源承载力指标类型划分、表示方法及作用<sup>[39-42]</sup>

指标	指标类型	表示方法	单位	指标作用
水资源系统指标	单位面积水资源量	当地水资源量/土地面积	万 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup>	水资源量的多少
	水资源可开发利用率	平均水资源可利用量/当地水资源总量	%	水资源可利用程度
	水资源变差系数	75%水平年水资源量/多年平均水资源总量	%	水资源数量的变化情况
	水质综合达标率	符合水质要求水体量/多年平均水资源总量	%	水质总体状况
	水资源利用率	生态环境用水之外的用水量/水资源总量	%	水资源开发利用情况
	水资源供需平衡指数	多年平均水资源需求总量/平均水资源可利用量		区域水资源供需平衡状态
	过境水利用状况	平均过境水利用量/用水总量	%	区域对过境水利用情况
社会系统指标	人口密度	总人口/区域土地总面积	人/km <sup>2</sup>	人口压力
	人口自然增长率	年净增人数/总人口	‰	人口对区域水资源的压力
	人口城镇化率	城镇人口/总人口	%	社会发展水平与城乡构成
	生活用水定额	生活用水量/总人口/365	L/(d·人)	综合用水指标与节水情况
	生活污水达标处理率	生活污水达标排放量/排放总量	%	污水处理能力
	人均 GDP 指数	人均 GDP/社会发展某水平上限 GDP		社会发展所处某阶段的状态
经济系统指标	GDP 增长率	较前一年 GDP 的增长率	%	区域整体发展能力
	第一产业比例	第一产业增加值/GDP 总量	%	区域产业结构状况
	工业用水定额	工业用水量/工业总产值	m <sup>3</sup> /万元	工业用水水平
	工业用水重复利用率	重复用水量/总用水量	%	节水水平
	灌溉覆盖率	有效灌溉面积/耕地面积	%	区域农业灌溉发展水平
	灌溉用水定额	灌溉用水量/有效灌溉面积	m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup>	作物对灌溉水的依赖程度
生态环境系统指标	生态环境用水率	生态环境用水量/水资源总量	%	生态系统对水资源的需求
	水污染综合指数	受污染水体总量/水资源总量	%	水体受污染情况
	植被覆盖率	植被面积/土地面积	%	水资源更新的基础
	土地面积污染率	污染土地面积/土地总面积	%	生态环境状况
	河流断流率	年平均发生断流天数/全年天数	%	区域生态环境状况
	湿地减少率	湿地减少量/湿地总面积	%	人类活动对生态环境影响
	地面沉降情况	地面沉降面积/土地面积	%	水资源开发利用对环境影响
	自然灾害损失率	各种自然灾害损失估值/GDP	%	生态环境对社会经济的影响
	污径比	平均废污水排放量/平均地表径流量	%	经济发展对水环境的影响

综合评价的方法多样,可拓物元模型、数据包络模型、灰色评价模型等。最常用的综合评价方法为模糊评判法,在对影响水资源承载能力的各个因素进行单因素评价基础上,通过综合评判矩阵对其承载能力进行多因素综合评价。如许有鹏<sup>[23]</sup>以新疆和田流域为例,利用模糊综合评判法,选取耕地率、水资源利用率、供水模数、需水模数、人均供水量和生态用水率6个因素作为评价因素,再通过评判矩阵建立分析评价模型,以小区、综合流域的尺度探讨了我国西北干旱区水资源承载能力综合评价方法。该方法解决了单因素评价方法中的缺陷,比较全面地反映水资源承载能力的状况。这种方法是一种主观因素突出型的评判法,在运算过程中容易造成有效信息遗失及误判,在赋值、权重分配、指标选取方面并不具备普适性。

针对模糊综合评判法在综合评价中存在的主观

随意性问题<sup>[45]</sup>,傅湘等<sup>[46]</sup>提出采用主成分分析法进行区域水资源承载能力综合评价。根据主成分分析法的原理,分析了灌溉率、水资源利用率、水资源开发程度、供水模数、需水模数、人均供水量和生态环境用水率7个主要因素,通过评价参数的分级标准进行最佳综合与简化,通过主成分关系式,最终对水资源承载能力进行分级评判。主成分分析法用综合指标代替原来指标所包含的信息,同时客观地确定权重,避免了主观随意性。

系统动力学法通过借助系统动力学方法最为突出的优点,即处理高阶次、非线性、多重反馈、复杂时变的系统问题,王建华等<sup>[47]</sup>根据“需水—社会经济水平—供水”相互作用、反馈的机制,建立了水资源承载力系统,即投资、水资源分配、农业节水、灌溉、生活用水、人口、工业节水和循环用水8个子系统,预测了水

资源的工农业承载能力,并指出节水和降低单位产值耗水是提高水资源利用率的主要途径。陈冰等<sup>[48]</sup>利用 SDIMWRSCCB 模型仿真了高、中、低 3 种发展方案,分别从人口、经济、水资源供需和水环境污染及治理 4 个方面来评价柴达木盆地社会经济进一步发展与水环境承载力的关系。系统动力学方法能够很好地解决水资源承载力各影响因素之间的定量关系,系统且快速地计算出各子模块的值。在绘制系统流图

时,涉及到模型参数众多,因此数据需求量也很大。

**4.2 代表性研究方法的探讨**

通过梳理以往具有代表性的研究,根据不同的研究方案,水资源承载力的计算主要体现在人口规模、经济载量(产业经济总产值、灌溉面积等)和水资源开发利用潜力 3 个方面;针对主流研究方法进行展开分析可见,水资源承载力是通过评价、预测的方法来实现。

表 2 水资源承载力主流研究方法及概况

研究方法	研究主题	研究内容与目标	作者及年份
常规趋势法	新疆的水资源承载能力和开发战略对策	满足维护生态环境的起码要求条件下,工农业总产值、灌溉面积、人口发展规模的上限	新疆水资源软科学课题组,1985
多目标分析评价	区域水资源适度承载能力研究	多目标约束下的水资源综合利用效益,即人口载量、经济载量	阮本青,1998
模糊评判法	干旱区水资源承载能力综合评价研究——以新疆和田河流域为例	水资源可供给工农业生产、生活和生态环境保护等用水的能力,即水资源开发利用的最大容量	许有鹏,1993
主成分分析法	区域水资源承载能力综合评价——主成分分析法的应用	区域水资源允许开发水量维持人口、社会经济发展的支持能力,水资源开发潜力	傅湘,1999
系统动力学法	乌鲁木齐干旱区城市水资源承载力	水资源持续支撑社会体系的能力,表现为工农业产值	王建华等,1999

常规趋势法、系统动力学法、多目标综合分析法等方法在设定不同方案下进行预测和优化,从影响水资源承载力的各因素之间相互作用关系入手,构建数学方程模拟各因素的动态变化,并通过不同变量将这些数学方程耦合成水资源承载力量化模型,通过情景预测手段计算水资源承载力。这一类方法在探索各个因素的分析以及相互作用关系上有所突破,但过程复杂,且其中涉及的参变量太多,不易掌握。而模糊评价法、灰关联评价法、主成分分析法等方法是从分析水资源承载力系统中的现象入手,构建指标体系,构建评价方法及模型,综合评价水资源对某种发展规模的支撑程度。这一类方法往往局限于水资源承载力系统中各个因素上,在指标体系、评价标准和评价方法的选择上主观性较大,定量分析计算的结果会引起不同解读。

此外,新方法在水资源承载力研究领域的应用也得到了推广和发展。人工神经网络(ANN)的非线性映射关系能够反映出水资源承载力与人类社会经济活动的必然联系<sup>[49]</sup>,通过建立神经网络模型可预测和判别区域未来水平年水资源承载力状态;遗传算法(GA)模型采用遗传算法建立目标函数及约束条件<sup>[50]</sup>,能够有效解决多目标优化问题;动态模拟递推法通过水的动态供需平衡计算来显示水资源承载力的状况和支持人口与经济发展的最终规模<sup>[51]</sup>;投影寻踪评价模型<sup>[52]</sup>将高维数据向低维空间数据进行投影,通过低维投影数据的散布结构来研究高维数据特

征;最大信息熵原理<sup>[53]</sup>提出了基于极大熵原理的水资源承载力评价模型对水资源承载能力进行评价;粗糙集理论<sup>[54]</sup>采用了层次分析和熵权法对指标进行赋权,采用集对分析(SPA)构建评价样本与评价标准的联系度,建立了水资源承载力评价 RS-SPA 模型。这些新方法突破了以往数据获取与分析手段,避开传统方法中面临的复杂问题及难点,利用各自的优势提供了解决耦合系统量化关系的新思路,既使水资源承载力的结果更真实可靠,又是未来水资源承载力研究方法的新方向<sup>[55]</sup>。

5 结论与讨论

- (1) 通过对国内外水资源承载力相关研究的梳理和归纳,将国内外关于水资源承载力研究历程划分成概念及内涵形成、理论和方法探索、方法模型发展和技术及应用拓展 4 个阶段。水资源承载力的概念可被定义为在一定阶段的经济发展水平和技术条件下,以社会经济可持续发展与生态良性循环相协调为原则,区域/流域内水资源能够承载的合理人口数量和经济规模。
- (2) 在总结以往水资源承载力的研究关于指标体系及方法的基础上,探讨了针对水资源最大开发能力的现状评价方法、水资源最大支撑规模的情景预测方法,提出了从微观层面上计算水资源承载力的思路,厘清水资源贯穿社会经济系统、生态系统而产生的供需关系,从而正确评价和判断区域发展的水资源

承载能力。

(3) 水资源承载力的计算,归根结底是解决动态变化下水资源供需平衡和生活质量、生产效率的问题。另外,快速城镇化、工业化背景之下的人口格局变化又为区域水资源承载力的空间差异研究增加了新的研究内容。传统研究方法和思路已难以突破,不妨通过“以小见大”的方式,将最小用水单元作为主线,结合不同角度(资源环境、社会经济、生态)测算最小单元的水资源承载力<sup>[56]</sup>,进而确定整个区域的水资源承载人口规模、经济发展潜力,为合理配置区域资源、调整产业结构和生产布局、制定社会经济发展战略提供决策参考;同时,也为积极促进我国资源环境承载能力监测预警工作的开展提供科学依据。

#### 参考文献:

- [1] 刘昌明,王红瑞. 浅析水资源与人口、经济和社会环境的关系[J]. 自然资源学报,2003,18(4):635-644.
- [2] 樊杰. 我国主体功能区划的科学基础[J]. 地理学报,2007,62(4):339-350.
- [3] 汪党献,王浩,马静. 中国区域发展的水资源支撑能力[J]. 水利学报,2000,21(11):21-26.
- [4] 王浩. 区域缺水状态的识别及其多维调控[J]. 资源科学,2003,25(3):66-74.
- [5] Magrath J. WWDR2: Water, a Shared Responsibility [R]. Mexico: Development in Practice,2006.
- [6] Meadows D H, Meadows D, Randers J, et al. The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind [M]. New York: Universe Books,1972.
- [7] Park R E, Burgess E W. Introduction to the Science of Sociology [M]. Chicago: University of Chicago Press,1921.
- [8] Karanth K R. Ground Water Assessment: Development and Management[M]. New York: Tata McGraw-Hill Education,1987.
- [9] Allan W. The African Husbandman[M]. London: LIT Verlag Münster,1965.
- [10] Higgins G M, Kassam A H, Naiken L, et al. Potential population supporting capacities of lands in the developing world[R]. Roma: FAO,1982.
- [11] 张威,郭善丽莉,穆克华,等. 资源环境因素对城市建设用地增长的影响[J]. 水土保持研究,2006,13(6):255-259.
- [12] Uzun O, Muderisliglu H. Visual landscape quality in landscape planning: Examples of Kars and Ardahan cities in Turkey [J]. African Journal of Agricultural Research,2011,6(6):1627-1638.
- [13] Sleeser M. Enhancement of Carrying Capacity Options [M]. London: The Resource Use Institute,1990.
- [14] Harris J M. Carrying capacity in agriculture: Globe and regional issue [J]. Ecological Economics,1999,129(3):443-461.
- [15] Peterson D H. Florida keys carrying capacity study [J]. Proceedings of the Water Environment Federation,2002(13):489-501.
- [16] Sawunyama T, Senzanje A, Mhizha A. Estimation of small reservoir storage capacities in Limpopo River Basin using geographical information systems (GIS) and remotely sensed surface areas: Case of Mzingwane catchment[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C,2006,31(15):935-943.
- [17] 汤奇成. 塔里木盆地水资源与绿洲建设[J]. 干旱区资源与环境,1990,4(3):110-116.
- [18] 新疆水资源软科学课题研究组. 新疆水资源及其承载能力和开发战略对策[J]. 水利水电技术,1989(6):1-7,9.
- [19] 惠洪河,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.
- [20] 李丽娟. 柴达木盆地水资源承载力研究[J]. 环境科学,2000,23(2):20-23.
- [21] 王煌,杨立彬,张新海,等. 西北地区水资源承载能力研究[J]. 水科学进展,2001,12(2):523-529.
- [22] 王浩,秦大庸,王建华,等. 西北内陆干旱区水资源承载能力研究[J]. 自然资源学报,2004,19(2):151-159.
- [23] 许有鹏. 干旱区水资源承载能力综合评价研究:以新疆和田河流域为例[J]. 自然资源学报,1993,8(3):229-237.
- [24] 高彦春,刘昌明. 区域水资源开发利用的阈限研究[J]. 水利学报,1997(8):73-79.
- [25] 施雅风,曲耀光. 乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用[M]. 北京:科学出版社,1992:48-63.
- [26] 惠洪河. 水资源承载力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报,2001,12(2):85-89.
- [27] 谢高地,周海林等. 中国水资源对发展的承载能力研究[J]. 资源科学,2005,27(4):2-7.
- [28] 阮本青,沈晋. 区域水资源适度承载能力计算模型研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(3):57-61,85.
- [29] 何希吾. 水资源承载力[M]. 北京:中国大百科全书出版社,2000:155-162.
- [30] 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,2002,17(3):262-269.
- [31] 段春青,刘昌明,陈晓楠,等. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J]. 地理学报,2010,65(1):82-90.
- [32] 冯尚友,刘国金. 水资源生态经济复合系统及其持续发展[J]. 武汉水利电力大学学报,1995,28(6):624-629.
- [33] 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.
- [34] 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,2002,21(2):180-188.
- [35] 张永勇,夏军,王中根. 区域水资源承载力理论与方法探讨[J]. 地理科学进展,2007,26(2):126-132.



- [36] 徐德鸿. 区域工业用水与工业结构调整系统分析[J]. 环境科学研究, 1990, 3(4): 1-6.
- [37] 程国栋. 承载力概念的演变及西北水资源承载力的应用框架[J]. 冰川冻土, 2002, 24(4): 361-367.
- [38] 陈洋波, 陈俊合. 水资源承载能力研究中的若干问题探讨[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2004(S1): 181-185.
- [39] 徐良芳, 冯国章, 刘俊民. 区域水资源可持续利用及其评价指标体系研究[J]. 西北农林科技大学学报, 2002, 20(6): 119-122.
- [40] 贾绍凤, 张军岩, 张士锋. 区域水资源压力指数与水资源安全评价指标体系[J]. 地理科学进展, 2002, 21(6): 538-545.
- [41] 刘恒, 耿雷华, 陈晓燕. 区域水资源可持续利用评价指标体系的建立[J]. 水科学进展, 2003, 14(3): 265-270.
- [42] 王友贞, 施国庆, 王德胜. 区域水资源承载力评价指标体系的研究[J]. 自然资源学报, 2005, 20(4): 597-604.
- [43] 曲耀光, 樊胜岳. 黑和流域水资源承载力分析计算与对策[J]. 中国沙漠, 2000, 20(1): 1-8.
- [44] 刘佳骏, 董锁成, 李泽红. 中国水资源承载力综合评价研究[J]. 自然资源学报, 2011, 26(2): 258-269.
- [45] 林衍, 顾恒岳, 盛湘渝. 模糊综合评判误判原因的探讨[J]. 系统工程理论方法应用, 1997, 6(2): 67-70.
- [46] 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): 168-173.
- [47] 王建华, 江东, 顾定法, 等. 基于 SD 模型的干旱区城市水资源承载力预测研究[J]. 地理学与国土研究, 1999, 15(2): 18-22.
- [48] 陈冰, 李丽娟, 郭怀成, 等. 柴达木盆地水资源承载方案系统分析[J]. 环境科学, 2000, 5(3): 17-21.
- [49] 刘树峰, 陈俊合. 基于神经网络理论的水资源承载力研究[J]. 资源科学, 2007, 29(1): 99-105.
- [50] 董益华, 王延辉, 李跃鹏. 基于多目标遗传算法的水资源承载力模型研究[J]. 黑龙江水专学报, 2007, 34(3): 41-43.
- [51] 冯尚友. 水资源持续利用与管理导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 213-215.
- [52] 王顺久, 侯玉, 张欣莉, 等. 流域水资源承载能力的综合评价方法[J]. 水利学报, 2003(1): 88-92.
- [53] 孙才志, 左海军, 杨静. 基于极大熵原理的黄河流域水资源承载力研究: 以山西段为例[J]. 资源科学, 2004, 26(2): 17-22.
- [54] 丁爱中, 陈德胜, 潘成忠, 等. 基于粗糙集和集对分析的中国水资源承载力现状评价[J]. 南水北调与水利科技, 2010(3): 71-75.
- [55] 熊建新, 陈端吕, 彭保发, 等. 2001—2010 年洞庭湖区经济、社会和环境变化及其生态承载力响应[J]. 地理科学进展, 2014, 33(3): 356-363.
- [56] 党丽娟, 徐勇, 王志强. 陕西省榆林市水资源人口承载规模研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 90-97.

~~~~~  
(上接第 340 页)

- [23] 朱震达, 刘恕, 高前兆, 等. 内蒙古西部古居延: 黑城地区历史时期环境的变化与沙漠化过程[J]. 中国沙漠, 1983, 3(2): 1-8.
- [24] 景爱. 沙漠考古通论[M]. 北京: 紫禁城出版社, 2002.
- [25] 李并成. 河西走廊汉唐古绿洲的调查研究[J]. 地理学报, 1998, 53(2): 106-115.
- [26] 摆万奇, 赵士洞. 土地利用变化驱动力系统分析[J]. 资源科学, 2001, 23(3): 39-41.
- [27] 杨东, 郑凤娟, 窦慧亮, 等. 干旱内陆河流域土地利用变化的人文驱动因素探究: 以甘肃省酒泉市为例[J]. 水土保持研究, 2010, 17(2): 217-222.
- [28] 姚檀栋, 杨梅学, 康兴成. 从古里雅冰芯与祁连山树轮记录看过去 2000 年气候变化[J]. 第四纪研究, 2001, 21(6): 514-519.
- [29] 张振克, 吴瑞金, 王苏民, 等. 近 2600 年来内蒙古居延海湖泊沉积记录的环境变迁[J]. 湖泊科学, 1998, 10(2): 44-51.
- [30] 肖生春, 肖洪浪. 两千年来黑河流域水资源平衡估算与下游水环境演变驱动分析[J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 733-739.
- [31] 康兴成, 程国栋, 康尔泗, 等. 利用树轮资料重建黑河近千年来出山口径流量[J]. 中国科学: D 辑, 2002, 32(8): 675-685.
- [32] 张勃, 石惠春. 河西地区绿洲资源优化配置研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [33] 汪桂生, 颀耀文, 王学强. 黑河中游历史时期人类活动强度定量评价: 以明、清及民国时期为例[J]. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1225-1234.
- [34] 赵永复. 历史时期河西走廊的农牧业变迁[M]. 上海: 上海人民出版社, 1986.
- [35] 柯英, 卢学银. 注目黑河[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [36] 刘蔚, 王涛, 郑航, 等. 黑河流域不同类型土地沙漠化驱动力分析[J]. 中国沙漠, 2008, 28(4): 634-641.
- [37] 甘肃省张掖地区行政公署水利电力处. 张掖地区水利志[M]. 甘肃张掖: 《张掖地区水利志》编纂委员会, 1993.
- [38] 王元第. 黑河水系农田水利开发史[M]. 兰州: 甘肃民族出版社, 2003.
- [39] 肖生春. 近 2000 年黑河下游水环境演变及其驱动机制研究[D]. 兰州: 中国科学院, 2006.