

水资源(环境)承载力的研究进展

龙腾锐, 姜文超

(重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘要: 概述了水资源(环境)承载力的概念、特征、量化评价方法及其总体研究的进展。强调了系统研究水资源(环境)承载力的重要现实意义。指出了当前研究中的不足, 以及有待进一步研究的问题。

关键词: 水资源承载力; 水环境承载力; 概念; 特征; 量化

中图分类号: TV 213.4; G 353.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2003)02-249-05

随着人口增长和社会经济的发展, 水资源短缺和水环境破坏已经成为全球性的严峻问题。我国是人均水资源短缺的国家, 加之水资源时空分布不均, 水土资源的布局不相匹配^[1], 水资源紧张的态势加剧, 水资源已成为保障我国社会经济可持续发展的制约因素。因此, 研究水资源(环境)承载力理论具有十分重要和迫切的现实意义。本文综述了水资源(环境)承载力的研究进展, 并指出了当前研究存在的不足之处和未来的研究需要。

1 水资源(环境)承载力研究的总体状况

承载力(Carrying Capacity)是一个生态学概念, 指一个生态环境所能支持的某一物种的最大量^[2], 19世纪末期开始在畜牧场管理中得到应用, 后来逐渐被写入生态学教材。20世纪60年代以后, 随着人口、资源和环境问题日趋严重, 人口和环境承载力得到了较多的研究和探讨, 承载力成了一个探讨可持续发展问题所不可避免的概念, 目前已在生态规划与管理等多个领域得到广泛的应用。水资源承载力(Water Resources Carrying Capacity, WRCC)和水环境承载力(Water Environmental Carrying Capacity, WECC)是承载力概念与水资源和水环境领域的自然结合, 目前有关研究主要集中在我国, 国外专门的研究较少, 一般仅在可持续发展文献中简单地涉及。其中, 北美湖泊协会曾对湖泊承载力进行定义^[3]; 美国的URS公司对佛罗里达Keys流域的承载能力进行了研究^[4], 内容包括承载力的概念、研究方法和模型量化手段等方面。此外, Falkenmark等学者的一些研究也涉及到水资源的承载限度^[5~7]。

我国对WRCC研究始于20世纪80年代后期, 其中以新疆水资源承载能力的研究^[8]为代表, 但当时的概念、理论和计算方法等都处于萌芽状态^[9], 1992年施雅风等采用常规趋势法对新疆乌鲁木齐河流域的WRCC进行研究^[10], 次年许有鹏等采用模糊分析法对和田河流域的WRCC进行研究^[11], 1995-2000年WRCC的研究达到了空前鼎盛, 多个“九五”攻关项目和自然科学基金课题都涉及这一领域, 如王建华等采用系统动力学方法对乌鲁木齐市^[12]、徐中民采用情景基础的多目标分析方法对黑河流域^[13]、贾嵘等^[14]及蒋晓辉等^[15]采用多目标模型及修改的契比雪夫算法对陕西关中地区、中国水利水电科学研究院以水循环、水资源合理配置和生态需水理论为基础对西北地区^[16]、阮本青等采用水资源适度承载能力计算模型对黄河下游地区^[17]、高彦春和刘昌明^[18]、傅湘和纪昌明^[19]分别采用模糊综合和主成分分析法对陕西关中地区的WRCC进行研究。同期其它有

收稿日期: 2001-11-08; 修订日期: 2002-05-08

基金项目: 国家自然科学基金资助重点项目(59838300)

作者简介: 龙腾锐(1939-), 男, 湖南邵阳人, 重庆大学城市建设与环境工程学院教授, 博士生导师, 主要从事水资源保护与水环境污染控制研究。

关研究也不断开展^[1,20,21]。上述研究大都基于水资源的优化配置和评价理论,具有水利或自然资源学科的背景,1990年后环境承载力概念在我国得以提出,在环境科学方向又独立发展起了 WECC 这一研究方向^[22~28],不过其概念和量化方法与 WRCC 大抵相同。2001年以来,汪恕诚多次对 WR(E)CC 进行论述^[29,30],引起了新的研讨热潮^[31,32]。总体上看,我国大陆地区的研究一般偏重于应用和量化方法的研究而对概念的系统探讨较少。我国台湾地区的一些学者立足于水污染控制系统最优化规划方法,也开展了 WECC 的研究^[33,34]。

2 水资源(环境)承载力的概念和特征

WR(E)CC 概念尚未有公认的定义,归纳起来有以下 4 种类型: 采用“能力”定义,如“在一个地区或流域的范围内,在具体的发展阶段和发展模式条件下,当地水资源对该地区经济发展和维护良好的生态环境的最大支撑能力”^[14];“某一地区、某一时间、某种状态下水环境(资源)对经济发展和生活需求的支持能力(的阈值)”^[22,23,25]; 以用水能力(容量)定义,如“水资源开发的阈限指在社会生产条件、经济技术水平都达到相当水平的条件下水资源系统可供工农业生产、人民生活和生态环境的用水能力,即水资源开发的最大容量”^[18];

用人口或社会经济发展规模定义,如“在未来不同的时间尺度上,一定生产条件下,在保证正常的社会文化准则的物质生活水平下,一定区域(自身水资源量)用直接或间接方式表现的资源所能持续供养的人口数量”^[17];“在某一历史发展阶段,以可预见的技术、经济和社会发展水平为依据,以可持续发展为原则,以维护生态环境良性发展为条件,在水资源得到合理的开发利用下,该地区人口增长与经济发展的最大容量”^[9];“一个流域在追求整个流域的最大效益且不减少未来承载数量的情况下所能承载的最优人口当量”^[33]; 用外部作用来定义,如“一个地区(水资源)在给定的技术和人类偏好的水平下随时间所能承载的最大人口作用”^[4];“在流域水环境系统结构特征与功能不发生变化的前提下,流域水环境所能承受的最大外部作用”^[26]。上述定义都认为 WR(E)CC 是水资源或水环境自身的特性,并与一定的科技水平、时期和地域空间有关,但在 WR(E)CC 的内涵和具体约束条件上则差别较大,如:WR(E)CC 是最大规模还是最优规模? 用什么样的承载对象来界定 WR(E)CC? WR(E)CC 是一个不可能突破的极限还是一个在突破之后会导致系统崩溃的适度规模? 等等。上述定义都存在着以下缺陷: 未能给出具体的判断原则,尤其在社会经济方面未能给出清晰的判断标准; 将人口、社会经济发展和资源环境孤立甚至对立地看待,忽视了社会经济、人口和环境状态之间的相互对应关系,不能反映水资源与人类相互作用的整体特征; 社会经济结构和具体的水资源管理模式是技术不可或分的方面,以一定的技术水平为条件,而用人类的社会经济活动来描述 WR(E)CC 的定义在逻辑上前后不一致,导致 WR(E)CC 在惟一性和动态性上难以理解和统一; 未能给出 WR(E)CC 的状态,导致 WR(E)CC 的外延不够清楚。

WR(E)CC 具有以下主要特征^[9,14,25,35,36]: 客观性或固有性。一定地区的水资源不但具有可利用水量和水环境容量方面的自然限度,而且有社会经济方面的限度,表现为水资源管理技术和社会生产力的水平是有限的,在一定的历史时期,水资源系统对社会经济发展总有一个客观存在的承载阈值,WR(E)CC 是一个地区水资源系统的固有特征; 主观性、动态性和可调控性。WR(E)CC 涉及到人们有怎样的生活期望和判断标准,因而具有主观性,同时它也与特定历史时期的水资源开发利用水平、产业结构形式和生产力水平有关,这些因素是不断发展变化和可以调节的,所以 WR(E)CC 的具体承载方式、内容及大小也是动态变化和可以调节的; 相对极限性。WR(E)CC 不是任何时间、任何技术水平和任何管理水平下的绝对极限,而是一个有条件的、可能发生跳跃式变化的相对极限; 区域性和时间性。由于水资源或水环境有较强的地区性,它对社会经济发展的支撑形式也有较强的地区性,WR(E)CC 只有相对于某一区域才有意义;WR(E)CC 是人类活动与自然水资源之间长期作用关系的综合体现,具有长期性和时间性; 模糊性。由于水资源系统的复杂性、影响因素的不确定性和人类认识自然能力的局限性,WR(E)CC 的承载指标和数量大小会有一定的模糊性。

3 水资源(环境)承载力的量化评价方法

3.1 WR(E)CC 的指标体系评价方法

指标体系评价方法是目前应用较为广的一种量化模式,主要有向量模法^[22~25]、模糊综合评价法^[12,18]和主成分分析法^[19]等方法。向量模法是将 WR(E)CC 视为一个由 n 个指标构成的向量,设有 m 个发展方案或 m 个时期(地区)的城市发展状态,分别对应着 m 个 WR(E)CC,对 m 个 WR(E)CC 的 n 个指标进行归一化,则归一化后向量的模即是相应方案、时期或地区的 WR(E)CC。模糊综合评价法是将 WR(E)CC 的评价视为一个模糊综合评价过程,其模型为:设给定两个有限论域 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 和 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$,其中 U 代表评价因素(即评价指标)集合; V 代表评语集合,则模糊综合评价为下面的模糊变换: $B = A \cdot R$,其中 A 为模糊权向量,即各评价因素(指标)的相对重要程度, B 为 V 上的模糊子集,表示评价对象对于特定评语的总隶属度, R 为由各评价因素 u_i 对评语 v_j 的隶属度 v_{ij} 构成的模糊关系矩阵,其中的第 i 行第 j 列元素 r_{ij} 表示某个被评价对象从因素 u_i 来看对 v_j 等级模糊子集的隶属度。通过上面的合成运算,可得出评价对象从整体上来看对于各评语等级的隶属度。再对上面的隶属度向量 B 的元素取大或取小,就可确定评价对象的最终评语。由于这种方法取大或取小的运算法则会使大量有用信息遗失,文献^[19]采用主成分分析法来克服这一缺陷,它通过对原有变量进行线性变换和舍弃一小部分信息,将高维变量系统进行综合与简化,同时客观地确定各个综合变量的权重。可以看出,指标体系评价方法依赖人为的评价,以及不同承载力的指标数值之间或指标数值与标准值之间的对比,得出的结果都是无量纲的数值,因而实际上是社会经济系统与水生系统的协调程度而非严格概念意义上 WR(E)CC。

3.2 多目标模型和单目标最优化方法^[12,13,15,27,28,33,34]

多目标模型最优化方法是另一种常用的量化方法,它采用分解—协调的系统分析思路,将特定地区的水资源-人类社会经济系统划分成若干个子系统,并采用数学模型对其进行刻画,各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。若事先确定需要达到的优化目标(文献^[15]中包括国内生产总值、人口、粮食产量和污染负荷量等方面)和约束条件,结合模型模拟和对决策变量在不同水平年上的预测结果,就可解出同时满足多个目标整体最优的发展方案,其所对应的人口或社会经济发展规模即为这一城市或地区的 WR(E)CC。目前多目标核心模型通常采用契比雪夫算法进行求解,对于权重叠代收敛,有时采用融合了决策者对邻近点和 tradeoff 矢量的意见的 Z-W 算法进行。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^[13],这种方法开始只粗略提供一些可行的情景给决策者,设定出后台情景,然后根据决策者意见采用多目标模型方法筛选出前台情景作为规划方向。

系统动力学方法也是目前使用的一种重要的量化方法。这种方法的重要特点是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。在实用中,对不同的发展方案采用系统动力学模型进行模拟,并对决策变量进行预测,然后将这些决策变量视为 WR(E)CC 的指标体系,再运用前述的综合评价方法进行比较,得到最佳的发展方案及相应的承载能力。

文献^[30]采用的单一目标的最优化方法是以最大的人口当量数为目标,以地区或流域内特殊用地(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。这种方法实际上是一种水污染控制系统规划方法。

4 结论和未来研究展望

WR(E)CC 是处理水资源(环境)与人类社会经济活动之间关系的有力工具,目前已经在多个方面取得进展,特别是量化方法呈现出多样化的态势,但总体看来仍未形成系统的理论框架,在概念的内涵方面失之于经验性强而系统分析不足:现有研究都未能给出完整的 WR(E)CC 的判别条件,对 WR(E)CC 的概念在内涵和外延上都

较模糊,在极限性和非极限性、抽象和具体、承载主体和承载客体上游移不定,逻辑上不统一。因此,WR(E)CC的量化方法也存在许多不足: 量化结构及量化结果与WR(E)CC的内涵和概念不一致,如采用量化指标体系方式给出的承载力指标其实是水资源与社会经济之间的协调程度; 指标的形成方法和具体的指标体系过于简单,没有给出分析和筛选框架; 多目标模型方法虽然注意到了水资源承载内容的多样性,但没有注意到它们对人来说的统一性,如用人均实际收入为最优化目标要比用国内生产总值和人口规模两个优化目标为好;用绿色GDP为优化目标要比用国内生产总值和水污染负荷两个优化目标来反映发展与环境之间的关系更准确,现有的系统分析方法实际上是将现实系统孤立静止地看待; 在确定发展方案时,水资源工程投资和水污染保护资金的来源被忽视,常常被视为独立于该地区经济发展的外部因素,而它们实际上终究要来自于本地区的生产活动;

忽略对自然生态系统各因子间相互作用规律的研究,忽视了自然极限和判断标准方面的研究,而它们是WR(E)CC的内在部分; WR(E)CC与当前其它水资源管理理论相比,最大的优势在于提供了将水资源与宏观经济相联系的框架,而当前的研究并没有从宏观自然资源或环境经济学的角度研究水资源的优化配置和开发利用规模问题。

笔者认为,今后的研究应在以下方面加强:

(1) 系统地研究WR(E)CC的基础理论,包括确定WR(E)CC的判别标准、研究目的、服务对象和研究范围;建立WR(E)CC的概念体系、完善其内涵和特征;建立WR(E)CC的概念模型和研究方法等。

(2) 完善WR(E)CC的支撑理论,包括人类活动对水文现象和水循环的影响机理、生态系统各因子的相互作用规律、生态环境标准、水资源在国民经济各部门的优化配置理论等。

(3) WR(E)CC的量化体系和方法。以基础理论为前提,研究适用于不同承载力内涵的量化体系和量化方法,量化体系应包括3个层次:能够作为中长期城市规划限制规模的承载力的量化方法;与不同地域用地方式和产业结构相结合的承载力的最优化规划方法,能够给出短期的城市发展方案和水资源开发利用方案;指标体系评价方法,用于对某一定时期的水资源-社会经济系统对下一时期人口增长和经济发展的承载能力,或水资源开发利用与社会经济之间的协调程度进行评价,这种承载能力可以是无量纲的相对指标,这一量化方向应侧重于给出建立指标体系和综合评价的方法体系,以便各地自行分析和评价其当地水资源承载力。

参考文献:

- [1] 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,(11):21-26,33.
- [2] Odum E P. Fundamentals of Ecology [M]. Philadelphia: W B Saunders, 1972.
- [3] North American Lake Management Society [EB/OL]. <http://www.nalms.org/glossary/1kword-c.htm> (undated)
- [4] Committee to review the Florida Keys Carrying Capacity Study, National Research Council. Interim Review of the Florida Keys Carrying Capacity Study [Z]. Washington D C: National Academy Press, 2001. Also on: <http://books.nap.edu/books/NI000343/html>.
- [5] Falkenmark M, Lundqvist J. Towards water security: political determination and human adaptation crucial [J]. Natural Resources Forum, 1998, 21(1): 37-51.
- [6] Kuylenstierna J L, Bjorklund G, Najlis P. Sustainable water future with global implications: everyone's responsibility [J]. Natural Resources Forum, 1997, 21(3): 181-190.
- [7] 桑德拉·波斯泰尔著,吴绍洪,等译. 最后的绿洲[M]. 北京:科学技术文献出版社,1998.2.
- [8] 新疆水资源软科学课题研究组. 新疆水资源及其承载力的开发战略对策[J]. 水利水电技术, 1989,(6):2-9.
- [9] 李令跃,甘泓. 试论水资源合理配置和承载能力概念与可持续发展之间的关系[J]. 水科学进展, 2000, 11(3):307-313.
- [10] 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,1992.210-220.
- [11] 许有鹏. 干旱地区水资源承载能力综合评价[J]. 自然资源学报,1993,8(3):229-237.
- [12] 王建华,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.
- [13] 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.
- [14] 贾嵘,等. 区域水资源承载力研究[J]. 西安理工大学学报, 1998, 14(4):382-387.
- [15] 蒋晓辉,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.

- [16] 中国水利水电科学研究院. 西北地区水资源合理开发利用与生态环境保护研究[J/OL]. <http://tech.waterinfo.net.cn/NewsR/NewsDisplay.asp?Id=11245>
- [17] 阮本清,等. 流域水资源管理[M]. 北京:科学出版社,2001. 152-169.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 林虎林,等. 河西走廊水资源供需平衡及其对农业发展的承载潜力[J]. 自然资源学报,1997,12(3):224-232.
- [21] 水利部南京水文水资源研究所,中国水利水电科学研究院水资源研究所. 21世纪中国水供求[M]. 北京:中国水利水电出版社,1998. 131-138.
- [22] 郭怀成,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(5):14-22.
- [23] 魏斌,张霞. 城市水资源合理利用分析与水资源承载力研究——以本溪市为例[J]. 城市环境与城市生态,1995,8(4):19-24.
- [24] 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.
- [25] 王淑华. 区域水环境承载力及其可持续利用研究[D]. 北京:北京师范大学,1996.
- [26] 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.
- [27] 陈冰,等. 柴达木盆地水资源承载方案系统分析[J]. 环境科学,2000,21(3):16-21.
- [28] 李丽娟,等. 柴达木盆地水资源承载力研究[J]. 环境科学,2000,21(2):20-23.
- [29] 汪恕诚. 水权管理与节水社会[EB/OL]. <http://international.waterinfo.net.cn/NewsR/NewsDisplay.asp?Id=11012>,2001-04.
- [30] 汪恕诚. 水环境承载力分析与调控[EB/OL]. <http://news.waterinfo.net.cn/NewsR/NewsDisplay.asp?Id=22743>,2001-10.
- [31] 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/NewsR/NewsDisplay.asp?Id=24688>,2001-12.
- [32] 刘青勇,张保祥. 水资源承载能力特性与影响因素分析[EB/OL]. <http://tech.waterinfo.net.cn/NewsR/NewsDisplay.asp?Id=26157>,2001-12.
- [33] 钟建宏,等. 水环境承载容量评估模式之发展与应用[A]. 第四届海峡两岸学术研讨会会议论文集[C],台湾中坜,中央大学,1996,1247-1254.
- [34] Chen C H, et al. A study of water-land environmental carrying capacity for a river basin [J]. Water Science & Technology, 2000, 42(3~4): 389-396.
- [35] 王建华,等. 水资源承载力的概念和理论[J]. 甘肃科学学报,1999,11(2):1-4.
- [36] 唐剑武,等. 环境承载力及其在环境规划中的初步应用[J]. 中国环境科学,1997,17:6-9.

Advances in water resources and water environmental carrying capacity *

LONG Teng-Rui, JIANG Wen-Chao

(Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Water resources scarcity and water environmental degradation have been the serious problems facing the world today, especially in developing countries. It is very urgent and significant to carry out the studies concerning water resources and water environmental carrying capacity to address the relationships and coordination between/of water system and human socio-economic system. This paper reviews the state of the art of the studies on water resources and water environmental carrying capacity, their concepts, characteristics, quantification and assessment methodology, and points out the deficiencies in current studies and the future research requirements.

Key words: water resources carrying capacity; water environmental carrying capacity; concept; characteristics; quantification

* The project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 59838300).