

基于复杂自适应理论的 水资源承载力决策理论与实践

胡震云 王世江 著



科学出版社

基于复杂自适应理论的 水资源承载力决策理论与实践

胡震云 王世江 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书基于复杂自适应理论,从理论、方法和应用三个方面对水资源承载力做了较为全面、系统的研究,创建了基于复杂自适应水资源承载力的基本理论、决策方法和决策模型,从交互—协调—适应的全新视角,分析了水资源系统各主体的刺激—反应规则,揭示了主体自我学习演化和交互学习演化机理;构建了基于复杂自适应理论的水资源承载力计算模型,设计了基于复杂自适应理论的水资源承载力决策支持平台;结合国家及省部级基金项目,将理论研究成果应用到新疆哈密,为政府和有关行政管理部門进行水资源有效管理、制定水资源规划政策提供决策支持。

本书可作为水资源管理专业的本科生和研究生的参考书,以及规划部門、水利行业的工作人员和科研技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

基于复杂自适应理论的水资源承载力决策理论与实践/胡震云,王世江著. —北京:科学出版社,2013.12

ISBN 978-7-03-039442-2

I. ①基… II. ①胡…②王… III. ①水资源-承载力-研究
IV. ①TV211

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 311410 号

责任编辑:黄 海 刘婷婷 陈会迎 / 责任校对:郑金红
责任印制:肖 兴 / 封面设计:许 瑞

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 12 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 12 月第一次印刷 印张:15

字数:300 000

定价:79.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

现今工业、农业、生活和生态环境的发展对水的依赖程度越来越高，一个地区、一个流域的水资源到底能够支撑多大规模的社会，成了制定区域发展规划的基础性尺度和指标。水资源承载力的大小对一个国家或地区的综合发展有着至关重要的影响。

水资源危机是我国可持续发展面临的重大挑战。面对这项挑战，如何评价和把握人口、经济、水资源和生态环境等协调发展成为一项迫在眉睫的任务，通过对水资源承载力的研究，能通俗和直接地描述水资源社会需求：在一定的限定条件下，可再生利用的水资源究竟能够支撑多大规模的社会？回答这个问题，有助于解决我国水资源危机的核心问题。

因此，进行水资源承载力评价研究，提出普遍意义上的水资源承载力内涵，根据水资源承载力评价的目的和问题导向的技术思路，建立一套评价水资源承载力的技术途径和实施方法，对水资源可持续利用和国家可持续发展有着重要的理论价值与实际意义。

本书在把复杂自适应系统（complex adaptive system, CAS）方法应用于水资源系统可行性分析的基础上，研究了复杂适应水资源系统的特征、机制、演化过程，给出了基于 CAS 的水资源承载力定义；分析了复杂自适应水资源系统学习的特点和本质，建立了复杂自适应水资源系统主体自我学习的动态模型和交互学习的动态模型；在分析各主体用水影响因素的基础上，构建了工业主体、农业灌溉主体、牧业主体、渔业主体、第三产业主体、城镇生活主体、农村生活主体、供水主体自我学习演化的刺激—反应规则和主体间交互学习演化的刺激—反应规则；建立了基于 CAS 的水资源承载力计算模型，该模型包含两层意义上的自适应，即整体层在个体层刺激—反应规则作用下进行选择、交叉、变异的系统自适应演化，个体作为整体层的部分在整体的协调下根据自身的刺激—反应规则进行个体的自适应调整；建立了个体层的刺激—反应规则算法库，包括多元回归算法、带时间序列的多元回归算法、灰色关联神经网络模型；给出了整体层构建基于真实世界锦标赛选择法（real world tournament selection, RWTS）的自适应并行遗传算法；从多层分布式角度构建由业务处理层、信息资源管理层和网络数据服务层构成的系统总体架构，建立系统功能结构，分析各功能模块的需求，在可行性分析基础上构建基于 Flex/MVC/REST 的水资源承载力决策支持系统技术架构；分析“以用户为中心的设计”的概念和它所依据的心理学理论，构建

以迭代式开发为蓝本、加入“以用户为中心的设计”（user-centered design, UCD）心理模式的水资源承载力决策支持系统的设计流程，建立基于改进型的GOMS模型的系统界面量化评估模型；给出系统个体层和整体层的实现思路，建立系统各功能的纸上原型，评价系统效率并进行改进，设计完成基于CAS的水资源承载力决策支持系统。最后，本书进行了新疆哈密基于CAS的水资源承载力决策的实证研究，构建新疆哈密第一产业主体、第二产业主体、生活主体和第三产业主体自我学习演化的刺激—反应规则和各主体的交互刺激—反应规则，应用决策支持系统进行分析，得出哈密可承载的各主体规模，并进行情景分析。

本书的研究成果得到国家自然科学基金项目“基于CAS范式的流域水资源系统管理研究”（编号：70471083）、水利部948项目“基于CAS的水资源承载力评价决策支持系统的研究与开发”（编号：200943）、水利部公益性行业科研专项经费项目“新疆经济需水结构调整与控制技术与集成”（编号：200901068）、江苏省社会科学基金项目“太湖流域水污染物排放总量控制机制研究”（编号：09SHB003）的资助，在此表示感谢。

感谢王慧敏教授给予的指导，感谢新疆水利厅、新疆哈密水利局、新疆水利水电科学研究院在实证研究中给予的帮助。感谢硕士生吴洲、雷明，他们参与完成了决策支持系统的建设；感谢硕士生马伟康、李璐、周贝、李亚涛，他们参与了实证研究中的资料收集、整理工作。

鉴于水资源系统的复杂性，水资源承载力研究涉及内容广泛，各主体刺激—反应规则梳理时涉及的影响因素众多，且难以定量表达，加之作者水平和时间有限，书中难免会有疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

胡震云

2013年6月18日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水资源承载力研究意义	1
1.2 国内外研究进展	4
1.2.1 水资源承载力研究进展	4
1.2.2 决策支持系统及其可用性研究进展	21
1.2.3 研究评述	26
1.3 本书主要内容	27
第 2 章 基于 CAS 的水资源承载力基本内涵	29
2.1 复杂自适应水资源系统的基本理论	29
2.1.1 复杂自适应系统理论	29
2.1.2 复杂自适应系统理论应用于水资源系统的可行性分析	34
2.1.3 复杂自适应水资源系统的特征和机制	35
2.2 复杂自适应水资源系统的演化过程	38
2.2.1 执行系统	38
2.2.2 竞争机制与信用分派	39
2.2.3 基于遗传算法的规则发现	41
2.3 基于 CAS 的水资源承载力的基本概念	43
第 3 章 复杂自适应水资源系统的演化分析	45
3.1 复杂自适应水资源系统的演化机制	45
3.1.1 复杂自适应水资源系统的受限生成过程	45
3.1.2 复杂自适应水资源系统主体的演化动力因素分析	45
3.2 复杂自适应水资源系统主体自我学习演化的刺激—反应规则	47
3.2.1 系统主体自我学习演化的动态模型	47
3.2.2 工业主体的刺激—反应规则	48
3.2.3 农业主体的刺激—反应规则	51

3.2.4	第三产业主体的刺激—反应规则	59
3.2.5	生活主体的刺激—反应规则	64
3.2.6	生态环境主体的刺激—反应规则	66
3.2.7	供水主体的刺激—反应规则	69
3.3	复杂自适应水资源系统主体交互学习演化的刺激—反应规则	70
3.3.1	系统主体交互学习演化的动态模型	70
3.3.2	系统主体交互学习演化的刺激—反应规则	71
第4章	基于CAS的水资源承载力计算模型	75
4.1	基于CAS的水资源承载力计算逻辑框架	75
4.2	水资源承载力整体层数学模型	76
4.2.1	模型适应度函数	76
4.2.2	模型约束条件	77
4.3	个体层刺激—反应规则演化学习过程的计算方法	78
4.3.1	多元回归算法	78
4.3.2	带时间序列的多元回归算法	80
4.3.3	灰色关联神经网络模型	80
4.4	整体层算法——基于RWTS的自适应并行遗传算法	82
4.4.1	基本遗传算法	82
4.4.2	基于RWTS的自适应并行遗传算法	84
第5章	基于CAS的水资源承载力决策支持系统框架与技术架构	90
5.1	系统架构	90
5.2	系统功能模块	91
5.2.1	系统总体功能结构	91
5.2.2	基础信息管理	91
5.2.3	系统管理	93
5.2.4	主体刺激—反应规则构建	93
5.2.5	主体刺激—反应规则设置	95
5.2.6	水资源承载力决策	96
5.2.7	情景分析	99
5.2.8	信息查询	99

5.2.9 资料管理	100
5.2.10 空间查询	100
5.3 基于 RIA 的水资源承载力评价决策支持系统技术框架	101
5.3.1 基于 Flex 的 RIA 技术可行性分析	101
5.3.2 基于 Flex/MVC/REST 的水资源承载力技术架构可行性分析	106
5.3.3 基于 Flex/MVC/REST 的水资源承载力决策支持系统技术架构	111
第 6 章 以用户为中心的基于 CAS 的水资源承载力决策支持系统实现	116
6.1 以用户为中心设计的基本理论	116
6.1.1 以用户为中心设计的概念	116
6.1.2 以用户为中心的心理基础	117
6.2 以用户为中心的水资源承载力决策支持系统设计的基本理论	121
6.2.1 以用户为中心设计的必要性	121
6.2.2 以用户为中心的水资源承载力决策支持系统设计原则	122
6.2.3 以用户为中心的水资源承载力决策支持系统设计流程	124
6.2.4 基于改进型 GOMS 的水资源承载力决策支持系统界面可用性评估模型	129
6.3 以用户为中心的水资源承载力决策支持系统个体层模型的设计 与实现	132
6.3.1 以用户为中心的水资源承载力个体层计算模型实现思路	132
6.3.2 个体层纸上原型设计	133
6.3.3 个体层设计评价与再设计	135
6.4 以用户为中心的水资源承载力决策支持系统整体层模型的设计 与实现	139
6.4.1 整体层计算模型实现思路	139
6.4.2 整体层纸上原型设计	140
6.4.3 整体层设计评价与再设计	144
6.4.4 基于 JGAP 的整体层改进遗传算法的实现	151
第 7 章 新疆哈密基于 CAS 的水资源承载力决策	158
7.1 哈密概况	158
7.1.1 自然概况	158
7.1.2 自然资源	164

7.1.3 社会经济概况	167
7.1.4 水资源概况	169
7.1.5 水资源利用现状	172
7.2 哈密各主体的刺激—反应规则	175
7.2.1 哈密第一产业主体刺激—反应规则	175
7.2.2 哈密第二产业主体刺激—反应规则	184
7.2.3 哈密生活主体和第三产业主体刺激—反应规则	190
7.2.4 哈密各主体交互刺激—反应规则	194
7.3 哈密水资源承载力决策	195
7.3.1 哈密第一产业发展前景	195
7.3.2 哈密第二产业发展前景	200
7.3.3 各主体可承载规模分析	205
7.4 哈密水资源承载力情景分析	207
7.4.1 提高节水水平	207
7.4.2 提高水资源利用率	209
7.4.3 加快产业结构调整	210
7.5 提高水资源承载力的对策措施	211
参考文献	215

第 1 章 绪 论

1.1 水资源承载力研究意义

1. 研究水资源承载力是确定流域或区域社会发展的基础

水是生命之源，既是人类和一切生物赖以生存和发展的不可替代的自然资源，又是自然环境的重要组成部分。人类文明的发展与水有着不可分割的联系，世界上几乎没有一个文明发源地不是傍依河湖而发展起来的^[1]。在人类进入了高度发达的工业时代和逐步进入信息时代的今天，水资源已成为制约人类社会发展的瓶颈。国家生产力布局和地区社会经济的发展是一个地区的地理位置、资源条件（包括水资源）和社会条件的综合产物，水资源是其中的重要条件。现今工业、农业、生活和生态环境的发展对水的依赖程度越来越高，一个地区、一个流域的水资源到底能够支撑多大规模的社会，成了制定区域发展规划的基础性的尺度和指标。水资源承载力的大小对一个国家或地区的综合发展有着至关重要的影响^[2]。

2. 研究水资源承载力是解决我国水资源问题的需要

我国降水总量达 6.2 万亿立方米，年均降水深 648 毫米，降水中约有 56% 的水量为陆面蒸发和植物蒸腾所散发，只有 4% 的水量形成地表径流。全国陆地水资源总量达 2.81 万亿立方米，居世界第 6 位^[3]。

我国地域辽阔，地形复杂，大陆性季风气候非常显著，加之各地开发利用差异，造成水资源如下特点。

1) 时空分布不均，年际年内变幅大

我国降水丰富，但时空分布不均，总的来说降水量从东南沿海向西北内陆递减，全国大部分地区夏秋多雨、冬春少雨。长江以南，3~6 月的降水量约占全年降水量的 60%，而长江以北地区，6~9 月的降水量常常占全年降水量的 80%。降水过分集中，造成雨期大量弃水，非雨期水量缺乏，并且出现过连续丰水年和连续枯水年的情况。而且，我国外流河大多分布在东南部，内流河大多在西北内陆地区，这更加剧了水资源时空分布不均，从而导致我国水旱灾害频繁，同一时间此地旱彼地涝，同一地区此时旱彼时涝。此外，水资源与土地等资源也

不甚匹配,我国水资源南多北少,耕地南少北多。长江及其以南水资源总量占到全国的 81%,但其耕地面积只占全国的 38%,淮河以北地区耕地占全国的 62%,而其水资源总量仅为全国总量的 19%。这不利于地区的可持续发展^[4],也决定了我国江河治理和水资源开发利用的长期性、艰巨性和复杂性^[5,6]。

2) 人均水资源占有少,水资源供需矛盾突出

我国因人口众多,人均水资源量排在世界第 121 位,仅约为世界人均水资源量平均值的 1/4^[7]。1993 年“国际人口行动”提出的《持续水——人口和可更新水的供给前景》报告^[8]认为:人均水资源量少于 1700 立方米的为用水紧张国家,人均水资源量少于 1000 立方米的为缺水国家,人均水资源量少于 500 立方米的为严重缺水国家。到 21 世纪中叶,我国人均水资源量将接近 1700 立方米,进入用水紧张的国家行列^[9]。

全国可利用水资源量,扣除生态环境用水后为 9500 亿~11 000 亿立方米。按照国际标准,中国约 54%的人口、50%的省份、76%的城市处于用水紧张或缺水状况。全国城市正常年份缺水 60 亿立方米,日缺水量达 1600 万立方米。缺水已严重影响中国社会经济的发展和人民生活水平的提高^[10]。

进入 21 世纪,我国水资源供需矛盾将进一步加剧。据预测,2050 年全国 16 亿人的需水量将增加到 7200 亿~8000 亿立方米,供水量将比 1997 年增加 1300 亿~2300 亿立方米。黄、淮、海三流域 2010 年以后人均水资源已低于 350 立方米,缺水十分严重,需要从长江调水来解决。由于中国的国土辽阔,地形复杂,人口众多,人口与水资源、土资源的分布又不可能完全协调,再加上季风的影响,今后水资源紧缺的局面几乎是不可避免的,21 世纪我国水资源供需面临非常严峻的形势。如果在水资源开发利用上没有大的突破,在管理上不能适应这种残酷的现实,水资源很难满足国民经济迅速发展的需求,水资源危机将成为所有资源问题中最为严重的问题,中国 21 世纪面临的挑战比世界上其他国家更严峻^[11]。

3) 水资源浪费严重,加重了用水紧缺程度

由于管理不善,工程配套差,用水技术、工艺落后,一方面水资源紧缺,另一方面又大量浪费。由《2011 年中国水资源公报》^[12]可知,1997~2011 年,全国人均用水量基本维持在 410~454 立方米,万元国内生产总值用水量和万元工业增加值用水量虽呈显著下降趋势,按 2000 年可比价计算,万元国内生产总值用水量由 1997 年的 705 立方米下降到 2011 年的 208 立方米,万元工业增加值用水量由 1997 年的 363 立方米下降到 2011 年的 114 立方米,但与发达国家仍有较大差距;农业用水大多采用大水漫灌,水的利用系数在 0.5 左右,而发达国家灌溉水利用系数在 0.7 以上,渠道渗漏严重,不仅浪费水资源,也易引起土壤的次生盐碱化和潜育化,降低土地质量。

4) 水污染日益严重

水资源是质与量的高度统一。21 世纪我国面临水量危机的同时,水质危机也日趋严重。由《2011 年中国水资源公报》可知,2011 年,全国 18.9 万千米的河流中,全年Ⅰ类水河长占评价河长的 4.6%,Ⅱ类水河长占 35.6%,Ⅲ类水河长占 24.0%,Ⅳ类水河长占 12.9%,Ⅴ类水河长占 5.7%,劣Ⅴ类水河长占 17.2%,全国全年Ⅰ~Ⅲ类水河长比例为 64.2%;全国有水质监测资料的 103 个湖泊中,全年水质为Ⅰ类的水面占评价水面面积的 0.5%、Ⅱ类占 32.9%、Ⅲ类占 25.4%、Ⅳ类占 12.0%、Ⅴ类占 4.5%、劣Ⅴ类占 24.7%;全国 634 个地表水集中式饮用水水源地中,合格率在 80%及以上的集中式饮用水水源地有 452 个,占评价水源地总数的 71.3%,其中合格率达 100%的水源地有 352 个,占评价总数的 55.5%,全年水质均不合格的水源地有 31 个,占评价总数的 4.9%。

进入 21 世纪,随着人口的增长、经济的发展,如果不采取有力措施,水污染问题将成为我国不少地区和城市生存与发展的巨大障碍。

5) 生态环境用水问题突出

我国不少河流泥沙含量大,为保证多泥沙河流的河道不致萎缩,需要安排汛期冲沙水量。西北内陆地区气候干旱,生态环境十分脆弱,必须优先保证生态环境用水,以维持荒漠绿洲的有限生存环境,而河道汛期输沙水量和枯季河川基流等环境用水需求,进一步加剧了北方水资源短缺地区的用水竞争。

在水资源开发利用中,不少地方无限制地开采地下水,从而产生一系列严重后果。全国地下水年平均超采约 80 亿立方米,黄淮海地区超采约 50 亿立方米,其他地区 30 亿立方米。太原、济南、西安、沧州、淮北、阜阳等北方地区出现大范围的降落漏斗,上海、天津、郑州甚至出现了地面下沉问题。

总之,我国的水资源面临着人均占有量少、供需矛盾突出、水污染日趋严重和水土资源过度开发造成生态环境破坏等严重问题^[13],特别是经济的发展和人口的增长对有限水资源的潜在压力,加剧了水资源问题的严重性。无疑,水资源危机将是我国可持续发展面临的最大挑战^[14]。

面对这项挑战,如何评价和把握人口、经济、水资源和生态环境等协调发展成为一项迫在眉睫的任务,通过对水资源承载力的研究,能通俗和直接地描述水资源社会需求:在一定的限定条件下,可再生利用的水资源究竟能够支撑多大规模的社会?也就是说:水资源对社会到底有多大的承受能力?回答这个问题,有助于解决我国水资源危机的核心问题,因此,研究水资源承载力是解决我国诸多水问题的需要。

3. 研究水资源承载力是延伸资源承载力理论、水资源研究理论的需要

自然资源是人类赖以生存和发展的物质基础,无论是可再生的自然资源,还

是不可再生的自然资源都是有限的,因此存在着界限问题,也就是资源承载力问题^[15],分析和评估各种资源对可持续发展的支持能力,特别是找出瓶颈资源的承载力是可持续发展研究的一项重要内容^[16]。

资源承载力是表达资源对人类社会和经济发展支撑能力的明确指标,能反映出资源对人类社会和经济发展的贡献和限制,能够动态描述人类社会和经济发展不同时段的状态和变化趋势。水资源承载力是一个国家或地区持续发展过程中各种自然资源承载力的重要组成部分,水资源承载力理论研究和实践对资源承载力理论的完善有不可替代的作用和支撑。

水资源理论研究是逐步深化的。随着人类社会的进步和科技的发展,经济全球化和资源环境问题日趋严重,水利事业已演化到了目前以防洪、供水、排水、灌溉、发电、航运、养殖、水土保持和美化生态娱乐环境等为主要任务,为国民经济提供水量、水能和旅游等水商品和水服务为主要目的的理论研究、工程建设和管理及政策等更广的范围^[17]。可见,水问题的研究范围和深度在不断扩大,从工程水利扩展到资源水利,再到水资源、社会、经济协调发展的理论和方法研究。相应地,水资源理论也从偏重于定性分析的水利可持续发展、水资源合理配置、水资源可持续利用理论,发展到了定性、定量分析相结合的社会经济系统水循环研究、水安全问题和水资源承载力等理论的研究。

水资源承载力的研究目的是试图以水资源这单维资源作为约束条件来反映水资源对社会、生态环境和经济的贡献,从一个侧面来表征水资源与社会、生态环境和经济的协调发展特性,是水资源可持续利用的量的限制和测度,体现可持续发展的基本思想,力求达到水资源合理配置,将水资源的开发和利用控制在水资源承载力范围内。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 水资源承载力研究进展

1. 国外水资源承载力研究进展

21 世纪,水资源问题已成为关系到贫困、可持续发展乃至世界和平与安全的重大问题。联合国组织近来一再强调水资源问题是世界经济可持续发展的重点,而优化管理又是水资源问题的核心。国外对于水资源承载力的研究甚少,大多将其纳入可持续发展理论中,这大概在于:第一,承载力本身是一个高度模糊和难于量化的概念;第二,欧美等发达国家的水资源相对比较丰富,其对水质问题的关心一般要甚于水量问题;第三,受西方分析式思维的影响,其水资源管理更偏重于具有分析特征的经济和政策措施方面。在国外为数不多

的有关水资源承载力研究中,北美湖泊协会曾将湖泊承载力定义为在不引起湖泊水质重大变化的前提下,特定湖泊内能够进行的人类发展活动数量;1998年美国陆军工程兵团(US Department of Community Affairs)和佛罗里达州社会事务局(Florida Department of Community Affairs)共同委托URS公司研究佛罗里达地区所能承载的最大发展水平,其中心内容是一个由社会经济、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),该模型允许用户切换不同的用地方案并评估其对环境承载力的影响^[18,19]。此外,Falkenmark等用较简单的数学计算研究了全球或一些发展中国家的水资源的使用限度,为水资源承载力的专门研究提供了一定的基础^[20]。英国爱丁堡大学M.史勒瑟(M. Slessor)教授首先采用系统动力学方法,综合考虑人口、资源、环境与发展之间的关系,模拟不同发展策略下,人口变化与承载力之间的动态变化,并在一些发展中国家得到成功运用。Harris和Kennedy从供水的角度对城市水资源承载力进行了相关研究,并将其纳入城市发展规划当中^[21]。Rijberman和van de Ven在研究城市水资源评价和管理体系中将承载力作为城市水资源安全保障的衡量标准^[22]。Hrlich从供水的角度对城市水资源承载力进行了相关研究,提出在制定发展战略的时候,应该把水资源供给的大小纳入早期战略发展中^[23]。Varis和Vakkilainen以水资源开发利用为核心,分析了中国长江流域日益快速的工业化、不断增长的粮食增长需求、环境退化等问题给水资源系统造成的压力,并参照不同地区的发展历史,把长江流域的经济社会现状同其水环境承载力进行了初步比较^[24]。

2. 国内水资源承载力研究进展

国内水资源承载力的研究起步较晚,一般认为最早开展水资源承载力研究是在1985年,新疆水资源软科学课题组首次对新疆的水资源承载力和开发战略对策进行了研究。总体而言,我国水资源承载力的研究可分为三个阶段:1985~1991年为初始阶段,1992~2000年为发展阶段,2000年后为拓展阶段(包括理论、方法、技术等)。

1) 水资源承载力内涵研究进展

早在1921年帕克和伯吉斯就在有关人类生态学的研究中,提出了承载力的概念。承载力原为力学中的一个指标,是指物体在不产生任何破坏时的最大荷载。19世纪末期,承载力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不可避免的概念。20世纪80年代初,联合国教科文组织和联合国粮食及农

业组织提出了“资源承载力”的概念：“一个国家或地区的资源承载力是指在可以预见的期间，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”^[25]，目前这一概念已在生态规划与管理等多个领域得到广泛的应用。水资源承载力是承载力概念与水资源领域的自然结合，目前有关研究主要集中在我国，现有的关于水资源承载力的定义与内涵大多是在资源、生态、环境大系统的承载力中论述，它们体现了水资源承载力定义的准则，归纳起来有以下五种类型。

(1) 采用“能力”定义。例如，贾嵘等认为“水资源承载力是指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”^[26]。施雅风和曲耀光认为“水资源承载能力是指某一地区的水资源，在一定社会历史和科学技术发展阶段，在不破坏社会和生态系统时，最大可承载（容纳）的农业、工业城市规模和人口的能力，是一个随着社会、经济、科学技术发展而变化的综合目标”^[27]。惠泱河等对水资源承载力的定义是“某一地区的水资源在某一具体历史发展阶段下，以可以预见的技术、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循环发展为条件，经过合理优化配置，对该地区社会经济最大支撑能力”^[28]、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”项目大纲则定义水资源承载力为“在某一具体的历史发展阶段下，以可以预见的技术、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，经过合理的优化配置，水资源对该地区社会经济最大支撑能力”。冯耀龙等将区域水资源承载力定义为“一定时期，在某种环境状态下（现状的或拟定的），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，在水资源得到充分合理开发利用下，区域水资源对该区域人类社会经济活动支持能力的阈值（极限值）”^[29]。程国栋认为水资源承载力是“某一区域在具体的历史发展阶段下，考虑可预见的技术、文化、体制和个人价值选择的影响，在采用合适的管理技术条件下，水资源对生态经济系统良性发展的支持能力”^[30]。

(2) 以用水能力（容量）定义。例如，高彦春和刘昌明认为“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 and 生态环境的用水能力，即水资源开发的最大容量”^[31]。许有鹏提出“水资源承载力是指在一定的技术经济水平和社会生产条件下，水资源可最大供给工农业生产、人民生活 and 生态环境保护等用水的能力，即水资源最大开发容量，在这个容量下水资源可以自然循环和更新，并不断地被人

们利用,造福于人类,同时不会造成环境恶化”^[32]。冯尚友和傅春对水资源承载力的定义是“在一定区域内、在一定物质生活水平下,水资源所能够持续供给当代人和后代人需要的规模和能力”^[33]。陈传友指出“水资源承载力是社会发展到一定阶段和一定的经济技术水平下,各种水体可供开发的水资源量,满足人类社会经济活动对水需求的供水能力”^[34]。

(3) 用人口或社会经济发展规模定义。例如,1985年新疆水资源软科学课题研究组提出“水资源承载能力是水资源可开发利用量,在满足维护生态环境用水要求后,所能支撑的工农业最大产值和人口数量”^[35]。阮本青和沈晋对水资源承载力的定义为“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物质生活条件下,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”^[36]。李令跃和甘泓认为水资源承载力是“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”^[37]。何希吾给出的定义为“一个流域、一个地区或一个国家,在不同阶段的社会经济和技术条件下,在水资源合理开发利用的前提下,当地天然水资源能够维系和支撑的人口、经济和环境规模总量”^[38]。邓欢和郭纯青认为水资源承载力可定义为“某一地区的水资源,在一定社会历史和科学技术发展阶段,对社会和生态环境不构成危害的条件下,以可持续发展为原则,经过合理优化配置,最大可支撑的社会经济活动规模和具有一定生活水平的人口数量”^[39]。王忠静认为“水资源承载力不只是资源承载能力的一个具体限制方面,它还是环境承载能力的一个主要影响因素,具有资源承载能力和环境承载能力的双重特性,因此,水资源承载力是某具体状态下可养活的人口及其生活质量”^[40]。许新宜等认为水资源承载力是“指在某一具体的历史发展阶段下,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前提,在水资源合理配置和高效利用的条件下,区域社会经济发展的最大人口容量”^[41]。夏军和朱一中认为“水资源承载力指某一区域在特定历史阶段的特定技术和社会经济发展水平条件下,以维护生态良性循环和可持续发展为前提,当地水资源系统可支撑的社会经济活动规模和具有一定生活水平的人口数量”^[42]。段春青等认为区域水资源承载力为“区域在一定经济社会和科学技术发展水平条件下,以生态、环境健康发展和社会经济可持续发展协调为前提的区域水资源系统能够支撑社会经济可持续发展的合理规模”^[43]。

(4) 用外部作用来定义。如曾维华和程声通认为水资源承载力是“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”^[44]。

(5) 用二元结构定义。刘登伟认为水资源承载力是静态和动态的结合, 其中静态水资源承载力是指一个地区(尺度可以无限小), 在一定历史发展阶段下、一定福利水平下, 其本地可更新的自产水资源(自然水)对该地区人口、经济和生态的最大支撑能力。其研究尺度可以无限小而且水资源仅指当地的自产水资源(地下水、地表水), 不包括客水。动态水资源承载力是指一个完整区域(或流域)内, 区域内所有单元的静态水资源再加上区域外流入的水资源(自然水和社会水)所能支撑的最大人口、经济和生态规模。区域内每个单元的静态水资源承载力都可以通过水资源的重新分配, 进行区域内部的自由流动^[45]。

2) 水资源承载力指标体系研究进展

许有鹏参照全国水资源供需分析的指标体系结合所研究干旱地区的水资源特点, 选取了供需水量模数、耕地率、水资源利用率、人均供水量和生态用水率等指标评价新疆和田流域水资源承载力^[32]。肖满意和董诤立把水资源承载力评价指标体系分为 5 类, 包括水资源条件、供水状况、需水量、社会经济指标、生态环境指标, 最终在 29 项指标中选取 9 项指标(人均水资源可利用量、水资源利用率、人均供水量、供水量模数、耕地灌溉率、城市生活用水定额、需水量模数、工业用水重复利用率、生态环境用水率)对山西省各流域及 15 个水资源分区的水资源承载力进行了分析评价^[46]。王余标和王献平选取耕地率、水资源利用率、需水量模数、供水量模数、人均供水量、单位产值需水量为指标, 应用模糊综合评价方法建立水资源承载力模型, 对周口市的水资源承载力进行研究^[47]。朱一中等选取人均水资源量、水资源利用率、人均用水量、林草覆盖率、化学需氧量(chemical oxygen demand)浓度、生态需水量、人口自然增长率、城市化水平、人均 GDP、第三产业 GDP 比重、人均粮食占有量、用水效益等作为指标, 建立西北地区水资源承载力模糊综合评判模型, 为西北地区的水资源利用提出了一些切实可行的建议^[48]。陈洋波等从广义的水资源承载力角度建立综合评价指标体系, 利用人均 GDP、万元 GDP 耗水量、居民人均用水量、水资源开发利用率、污水处理率、人均水资源可用量、植被覆盖率、水质优质率及水资源管理效率等指标对深圳市水资源承载力进行评价^[49]。王浩等提出了水资源承载力评价的 4 类 16 项指标: 可比性指标(可承载总人口、单位绿洲面积可承载人口、单位绿洲面积现状人口)、均衡性指标(人均 GDP、人均收入、人均粮食占有量、人均棉花占有量、人均油料占有量、人均蔬菜占有量、人均肉类占有量)、效率性指标(水资源开发利用程度、单方供水费用、单方水国内生产总值)、极限性指标(工业用水重复利用率、单方水粮食产量、地表水灌溉平均渠系有效利用系数)^[50]。陈正虎和唐德善选取灌溉率、水资源利用率、水资源开发程度、供水量模数、需水量模数、人均供水量、生态用水率等, 采用模糊识别分析法研究新疆水资源可持续利用程度, 为新疆地区水资源的进一步开发提供了一定的理论