

水资源承载力研究方法总结与再思考

左其亭^{1,2}

(1. 郑州大学水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学水科学研究中心, 河南 郑州 450001)

摘要: 回顾梳理了我国水资源承载力研究的发展历程, 将其分成“概念提出、初步研究、逐步完善、艰难发展、开创新时代”5 个阶段; 在对研究方法对比分析的基础上, 把水资源承载力计算方法分为经验公式法、综合评价法、系统分析法 3 大类, 并重点介绍了基于模拟和优化的控制目标反推模型 (COIM) 方法及应用情况。认为未来几年水资源承载力研究的重点包括: 在水资源承载力计算方法选择上, 全国层面宜采用经验公式法, 更详细的研究宜采用系统分析法; 在研究方向上, 应构建水资源承载力计算模型和预警系统平台; 应着重开展变化环境下水资源动态承载力研究; 应与现代治水成果、与寻找“和谐平衡”结合。

关键词: 水资源承载力; 现代治水思想; 和谐平衡; 计算方法

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2017)03-0001-06

Review of research methods of water resources carrying capacity//ZUO Qiting^{1,2}(1. School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Center for Water Science Research, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The development process of research on the water resources carrying capacity in China is systematically summarized, and it can be divided into five stages: the creation of conception, the preliminary study, the gradual improvement, the difficult development, and the innovation era. On the basis of comparison of research methods, the calculation methods of water resources carrying capacity can be divided into three categories: the empirical formula method, comprehensive evaluation method, and system analysis method. The control objective inversion model (COIM) based on simulation and optimization and its applications are introduced. It is pointed out that research on the water resources carrying capacity in the future focuses on: using the empirical formula method to calculate the national water resources carrying capacity and system analysis method for detailed calculation; constructing the calculation model of water resources carrying capacity and forewarning system platform; studying the dynamic carrying capacity of water resources under the changing environment; and considering the current achievements of water resources regulation and the balance development of water resources and economic society.

Key words: carrying capacity of water resources; modern water resources regulation; harmony balance; calculation method

水资源是人类赖以生存和发展不可或缺的一种宝贵资源,具有多种用途,但水资源量是有限的,因此在一定条件下可能会导致不同用水途径之间、不同地区之间为争水而出现矛盾,以及用水与供水之间出现矛盾。一个地区或流域的水资源到底能支撑多大的经济社会规模,一直是水资源研究的核心内容之一,也是区域或流域发展的重要制约因素。

随着经济社会发展,特别是我国自 20 世纪 70 年代末期大规模经济建设以后,快速的经济增长和社会发展,带来了用水量增加、排污量增加、生态系统受人工干扰强烈的局面,迫使人们不得不认真考

虑水资源系统的承载能力。在这一背景下,20 世纪 80 年代末出现了水资源承载力(也称作“水资源承载能力”)的概念^[1],随后,我国学者对此开展了一系列研究工作^[2-5],到 21 世纪初基本上形成了相对完善的理论方法及应用体系,对支撑我国水资源可持续利用、人水和谐治水思想的贯彻起到了非常积极的作用。当然,其研究也存在比较大的瓶颈:一方面,概念仍未统一,仁者见仁,智者见智;另一方面,计算方法还有待完善,特别是理论研究仍不够成熟,还存在比较大的争议;再一方面,在应用上也难以推广,特别是监测、预警、调控技术并不成熟。为了解

决这些技术瓶颈和推广应用问题,2016年水利部组织开展了全国水资源承载力监测预警机制建设工作,科技部设立了国家重点研发项目“国家水资源承载力评价与战略配置”。2016年12月6日,国家重点研发项目“国家水资源承载力评价与战略配置”项目组组织召开了“2016国家水资源承载力高层论坛”,笔者有幸应邀参会并作学术报告,本文在此学术报告基础上,系统梳理了水资源承载力的研究历程,总结计算方法并对各方法的优缺点进行分析,最后根据笔者的理解,提出了水资源承载力进一步研究的看法和建议。

1 我国水资源承载力研究历程

水资源承载力的概念最早由我国学者提出,主要研究工作也是由我国学者完成的。在国外,很少有专门以水资源承载力为题的研究报道,而在国外期刊发表的有关成果也主要是我国学者的研究成果(如文献[6-7])。这可能与我国近30多年经济快速发展、水资源短缺、供需水矛盾日益突出的现状有关。当然,国外也有与水资源承载力概念相近的研究工作,比如国外提出的可持续利用水量、河流开发利用率极限、水资源紧缺程度指标等概念^[8-10];而纳入可持续发展、水资源综合管理范畴进行的水资源利用与管理研究,也与水资源承载力的思路接近^[11]。基于国内外研究现状,本文主要以我国水资源承载力研究成果为基础,总结其研究历程。

a. 概念提出(20世纪80年代末期)。随着20世纪70年代末我国开始改革开放,经济建设快速发展,对自然界的改造日新月异,在带动经济增长的同时,也出现了水资源短缺、水环境质量下降、生态退化的严峻局面,促使人们在开发的同时不得不考虑水资源的承载问题。在这一背景下,逐步演化出“水资源承载力”这一概念。从发表的文献来看,水资源承载力概念最早于20世纪80年代末期出现,1989年新疆水资源软科学课题研究组发表了新疆水资源承载力的研究成果^[1],到20世纪90年代初期,大量文献给出该概念的定义,至于谁先定义则难以考证。

b. 初步研究(20世纪90年代)。主要讨论概念、计算方法及应用,但成果不系统。自水资源承载力概念提出以后,便引起广泛关注,大批学者开始研究这一问题。在20世纪90年代,研究成果主要集中于概念讨论、计算方法提出及实践应用^[2-5]。该时期水资源承载力研究具有以下特点:①对水资源承载力的概念争论较多,从不同角度提出不同的理解和定义,但没有形成主流定义;②定量计算方面则是在实

践中提出一些计算方法,但无法统一,也没有形成主导方法;③应用成果多,理论方法研究不系统;④主要是在可持续发展思路大背景下进行思考和研究。

c. 逐步完善(21世纪10年代)。研究成果逐步完善,形成了比较系统的概念、方法。到了21世纪初,随着水资源问题越来越突出,人们期待解决水问题的愿望越来越强烈,特别是伴随着人水和谐理念、节水型社会建设、最严格水资源管理制度的提出,对水资源承载力的研究提出了更高的要求 and 期待,激发了更多学者的研究热情^[12-18],包括笔者在此期间所做的研究工作^[19-22]。此外,随着10多年的争论和基础研究,水资源承载力研究成果逐步走向成熟,慢慢形成了比较有代表性的概念和计算方法。该时期水资源承载力研究具有以下特点:①在前期讨论的基础上,基本形成了几种代表性的概念、计算方法。这个时期相关争论减少,说明该问题已经阐述得比较清晰,观点趋于成熟;②除发表大量学术论文外,还出版了较多的相关学术专著,说明成果趋于完善和系统;③主要是在人水和谐思想、节水型社会建设大背景下进行思考和研究。

d. 艰难发展(2010—2015年)。主要以应用成果为主,理论方法创新少。由于水资源承载力的概念、计算方法已经研究了近20年,基本的理解和计算方法已经比较明晰,又没有太大的突破和创新驱动,因此,到了研究发展的瓶颈时期,这期间创新成果较少。该时期水资源承载力研究具有以下特点:①大量成果以应用为主,可能与上个10年理论方法研究已经比较系统有关,客观上难以创新;②关于计算方法的讨论存在“炒剩饭”、玩数学游戏现象,原创性新方法少见;③部分成果与最严格水资源管理“三条红线”联系起来,是具有创新思路的主要方面。

e. 开创新时代(2016年以后)。期待开创研究新时代。在水资源承载力研究方面,2016年有两件具有里程碑意义的事件,一是水利部组织开展全国水资源承载力监测预警机制建设工作,水利部水利水电规划设计总院编制了《建立全国水资源承载能力监测预警机制技术大纲》;二是科技部启动了国家重点研发项目“国家水资源承载力评价与战略配置”。在这两大事件的驱动下,将掀起水资源承载力研究的热潮,预测未来5~10年会产出丰硕的成果,包括技术方法创新和全国应用等成果。

2 水资源承载力研究方法总结与讨论

2.1 概念

“承载力”(或“承载能力”)(*carrying capacity*)一词,起源于物理学,即“物体在不产生任何破坏时

所能承受的最大负荷”。可简单理解为,一个系统对另一个系统所支撑的最大负荷。目前,对水资源承载力的定义有很多种,从不同的角度有不同的理解,这里不再一一列举。无论怎样的定义,大都强调了“水资源的最大开发规模”或者“水资源对经济社会发展的支撑能力”。由于出发点不同,对概念的理解也存在较大差距,致使概念不统一。当然也没有必要一定要统一,因为出发点不同、理解不同、应用需求不同,对概念的理解和定义也可以不一样。

在现有研究中,有些学者将水资源承载力、水资源承载程度两个概念混为一谈。实际上,两者是有区别的。仅从字面上理解两者就不同,水资源承载力是通过计算得到的水资源支撑经济社会的最大规模;水资源承载程度是通过评价得到的水资源支撑目前经济社会规模所达到的程度(即对严重超载、超载、不超载等水平的评价)。如果按照这样的理解,水资源承载力是通过计算得到的最大经济社会规模(能力),水资源承载程度是通过多指标对照标准评价得出的承载程度。

为了说明水资源承载力的概念,简单画一个示意图(图1),可以定性描述为:当水资源系统无法支撑经济社会发展规模时,就是“超载”;如果可以支撑,就是“承载”;处于二者的临界,可以认为处于“平衡”状态,此时的经济社会状态是水资源支撑的最大规模。

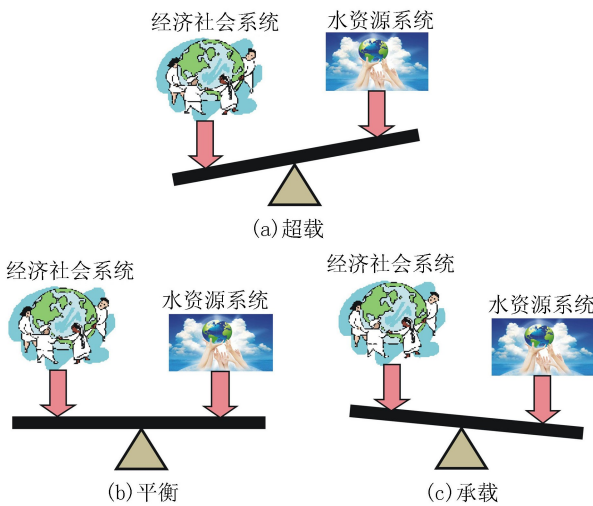


图1 水资源系统对经济社会系统支撑情况示意图

根据图1和上文的描述,就很容易理解水资源承载力的概念。这里简要介绍笔者曾给出的定义:水资源承载力是指,一定区域、一定时段,维系生态系统良性循环,水资源系统支撑经济社会发展的最大规模^[19],可以用图2简单示意(引自文献^[19],略有改动)。

根据图2和上述定义,可以把水资源承载力内

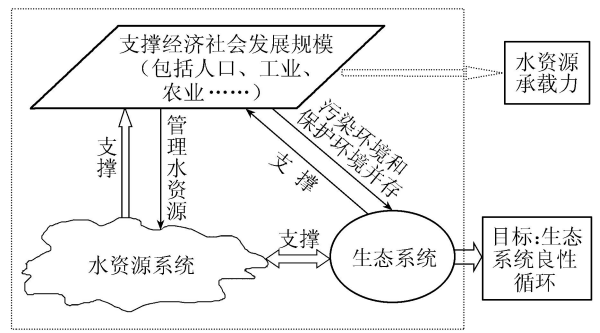


图2 水资源承载力概念示意图^[19]

涵解读为:①水资源承载力的主体是水资源,客体是人类及其赖以生存的经济社会系统和生态系统。②具有空间属性、时间属性。也就是说,同样 1 m^3 水在不同区域所承载的能力可能是不同的,与不同区域的经济社会发展水平、科技水平等因素有关;此外,同样 1 m^3 水在不同时期其所承载的能力也可能是不同的,与不同发展阶段的经济社会发展水平、科技水平等有关。③维系生态系统良性循环作为其控制目标,也就是在实现这一目标的前提下所能支撑的最大经济社会发展规模,判断为水资源承载力。④必须在经济社会-水资源-生态复合系统中进行综合研究,这是水资源承载力计算的基础性工作。

2.2 水资源承载力计算方法

除了对概念进行了很多讨论外,还有非常重要的一方面内容是对水资源承载力进行定量计算,目前已有大量的研究成果,概括起来可以分为3类。

2.2.1 经验公式法

就是运用某些经验公式或指标进行计算,以此来判断承载力大小。目前已有的经验公式法有背景分析法、常规趋势法、简单定额法、指标计算法等^[1,3]。

这类方法的特色是计算相对简单,不足是对资源、环境、经济社会之间的联系考虑较少,对调控方案的技术支撑不足。如水利部水利水电规划设计总院2016年制定的《建立全国水资源承载能力监测预警机制技术大纲》水量要素评价推荐采用如下公式:

$$I_1 = W/W_0 \quad (1)$$

$$I_2 = G/G_0 \quad (2)$$

式中: I_1 、 I_2 分别为采用用水总量和平原区地下水开采量计算得到的水量要素评价系数; W 为用水总量; W_0 为用水总量指标; G 为平原区地下水开采量; G_0 为平原区地下水开采量指标。

水质要素评价推荐采用如下公式:

$$J_1 = Q/Q_0 \quad (3)$$

$$J_2 = P/P_0 \quad (4)$$

式中: J_1 、 J_2 分别为采用水功能区水质达标率和污染

物入河量计算得到的水质要素评价系数; Q 为水功能区水质达标率; Q_0 为水功能区水质达标率要求; P 为污染物入河量; P_0 为污染物入河限排量。

该方法的优势很明显:方法简单、便于操作、便于推广,推荐在全国范围内开展水资源承载力评价时采用该方法。但其存在的问题也比较明显:①主要还是围绕水资源,与经济、社会、生态的直接联系少;②对环境发生变化的水资源动态承载力很难计算或把握;③如果水资源超载,其调控方案很难量化,或制定的调控方案理由可能不充分。

2.2.2 综合评价法

基本思路是通过选定的指标与评价标准,采用某种评价方法,进行综合评价计算,得到计算值,据此进行承载力评价^[2,4,12]。目前已有的综合评价法有综合指标法、模糊综合评价法、主成分分析法、投影寻踪法、物元可拓模型法等。

该方法的优点是数学理论应用比较深入,但对水资源的系统性考虑不足,指标选择难以统一,评价标准难以确定,所以可能存在对评价结果的异议。

比如多指标综合评价方法,一般研究过程为:选择指标—确定标准—综合计算—得出结果。这其中的问题有:指标选择多少、选择哪些因人而异,很难统一;评价标准如何确定,特别是承载或不承载的阈值很难统一;在综合评价计算中权重的确定既重要又困难,很难有较好的方法来解决。

2.2.3 系统分析法

基本思路是将水资源承载力的主体和客体作为整体一并考虑,通过系统研究,计算得到水资源承载力^[5]。目前已有的系统分析法有系统动力学法、优化模型法、控制目标反推模型(control objective inversion model, COIM)法等^[22]。

该方法的优势是考虑了水资源-经济社会生态的复杂性和系统性,不足是计算方法复杂,不直观,推广应用难;在水资源系统模拟方面仍有欠缺,如何将水资源系统模型纳入统一模型中是难点。

比如系统动力学方法,其思路是:以反馈控制理论为基础,方程主要包括状态变量(L)方程、速率(R)方程、辅助(A)方程等。存在的显著弊端是:无法包括或耦合复杂的水资源系统模型。为此,笔者曾提出嵌入式系统动力学的思路:在系统动力学中增加专业模型(M)方程^[23],在此基础上,再构建水资源承载力计算模型。

2.3 水资源承载力 COIM 方法及应用

笔者于2005年紧扣水资源承载力概念,提出了基于模拟和优化的控制目标反推模型方法(简称COIM方法)^[22]。该方法是系统分析法的一种,比

较好地紧扣了水资源承载力概念,反映了水资源与经济社会系统、生态系统的复杂关系,体现了水资源系统对经济社会系统的支撑作用,笔者自认为COIM方法是目前比较科学的一种定量描述模型方法。

图3为水资源承载力 COIM 的结构和构建思路,其大致思路是:以“水资源循环转化关系方程、污染物循环转化关系方程”为基础系统模型,以“经济社会系统内部相互制约方程、水资源承载程度指标约束方程、生态系统控制目标约束方程”为约束方程,以“经济社会规模(人口、工业产值、农业产值等指标)最大”为目标函数,构建一个含众多系统方程、约束方程和目标函数的复杂系统优化模型。通过该模型的求解就可以得到水资源系统支撑的最大经济社会规模,即称作水资源承载力。该模型的最大优点是:紧扣水资源承载力概念,基于复杂的经济社会-水资源-生态复合系统模型,考虑水资源承载目标,通过优化模型,反推或优化计算得到最终结果。

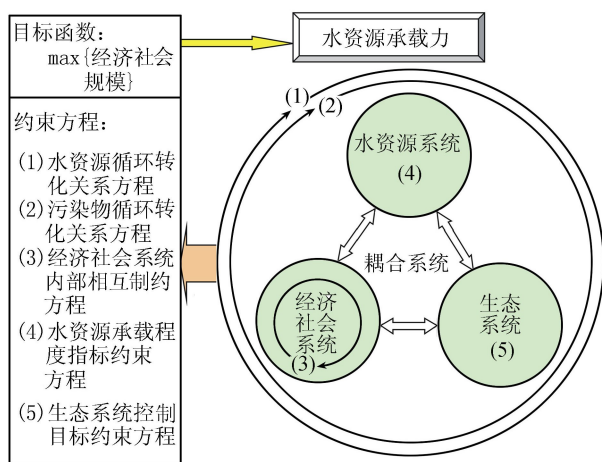


图3 水资源承载力 COIM 示意图

在文献[22,24]中,笔者介绍了COIM方法的几个应用实例,后来又在中原经济区国土规划专题“中原经济区水资源承载力研究”(2009—2011年)项目中再次应用,通过定量计算,很好地回答了以下两个问题:①当前水资源条件能满足未来多大的发展规模;②如果不能满足未来发展要求,该如何提高承载力。通过研究,提出了中原经济区重大水利工程布局以及水资源集约利用和高效开发的战略思路,为提升国土开发利用水平、调控国土空间利用提供支撑。

3 对水资源承载力进一步研究的再思考

3.1 计算方法的选择

前文已把目前的水资源承载力研究方法概括为

3类,实际应用时,到底选用哪种方法,需要作出选择,笔者认为:

a. 全国层面推广应用,最好采用较简单、易理解的方法,推荐采用《建立全国水资源承载能力监测预警机制技术大纲》提出的方法。但该方法对水资源与经济社会、生态系统之间的复杂关系把握不够,很难制定切实可行的调控方案。为此,建议在调控方案制定时参考系统分析法得到的结果,可采用国家重点研发项目“国家水资源承载力评价与战略配置”的研究成果。

b. 对未来水资源承载力分析、预警和调控,建议构建基于经济社会-水资源-生态复合系统模型、以维系良性水环境状况为控制约束、以支撑最大经济社会规模为优化目标的、类似 COIM 的水资源承载力计算模型。

3.2 水资源承载力的研究方向

笔者认为,水资源承载力进一步研究的方向应该是:基于“二元水循环”的经济社会-水资源-生态耦合分布式模型,基于经济社会发展规律、水循环自然规律,结合水资源可持续利用、人水和谐治水思想、节水型社会建设、最严格水资源管理制度、水生态文明建设等成果,构建水资源承载力计算模型,并开发基于大数据的水资源承载力预警系统平台,进行水资源承载力(动态)评价、配置、预警、调控等工作。其重点研究内容包括:基础模型、内部机制、治水成果、计算模型、系统平台、动态评价、预警调控等。

3.3 水资源动态承载力

受气候变化、人类活动的影响,水资源系统始终处于变化之中,其承载力也必定随之变化。此外,伴随着人类社会的发展,科学技术水平、用水效率不断提升,同样会促进水资源承载力提升。因此,非常有必要研究环境变化下的水资源动态承载力计算问题。

为了定量计算水资源动态承载力,需要做好两方面工作:一是需要建立能反映环境变化条件下的水系统模型,也就是笔者上面提到的建立经济社会-水资源-生态复合系统模型;二是需要构建基于上述复合系统模型的水资源承载力计算模型,类似于上文提到的 COIM,如笔者有关气候变化下水资源动态承载力计算方法的研究^[25]可供参考。从这一需求也可以看出,采用类似 COIM 方法的系统分析法的必要性和重要意义。

3.4 水资源承载力与现代治水成果的结合

自 20 世纪 90 年代以来,针对我国水资源问题和治水的需要,我国政府提出了一系列水资源管理新思想,并进行了大规模的治水活动,取得了大批的研究和应用成果。这些治水思想或战略包括水资源

可持续利用、人水和谐、节水型社会建设、最严格水资源管理制度、水生态文明建设、河湖水系连通战略、海绵城市建设、智慧水利(或流域)等。水资源系统是一个复杂的巨系统,水资源开发利用与保护不仅涉及水资源系统本身还涉及与水资源相关联的经济活动、社会活动、生态环境,是一项十分复杂的管理问题。因此,针对水资源问题提出众多治水新思想是十分必要的。

在理论和实践中,围绕现代治水思想体系,我国政府和科技界做了大量的工作,这是进一步研究水资源承载力的重要基础,水资源承载力应与现代治水成果结合。①与节水型社会建设的关系:要充分体现“节水优先”,在节水条件下谈水资源承载力;②与最严格水资源管理制度的关系:“三条红线”是水资源承载力计算的约束条件,水资源承载力至少要满足“三条红线”的要求;③与河湖水系连通战略的关系:河湖水系连通战略的目标之一是提高水资源承载力,在满足水资源承载力条件下才能实施河湖水系连通;④与海绵城市建设的关系:海绵城市建设目标之一是提高水资源承载力,海绵城市建设首先要符合水资源承载力的要求;⑤与智慧水利(流域)的关系:水资源承载力是智慧水利建设的主要依据之一;⑥与水资源可持续利用、人水和谐、水生态文明建设的关系:水资源承载力是保障水资源可持续利用、实现人水和谐、支撑水生态文明建设的重要基础、前提条件和主要抓手,反过来,水资源可持续利用、人水和谐、水生态文明建设是计算水资源承载力的指导思想和目标要求。

3.5 水资源承载力与寻找“和谐平衡”的结合

一方面,水资源承载力是水资源系统对经济社会系统支撑达到“平衡”的临界状态(图 1);另一方面,水资源承载力应满足水资源系统与经济社会系统达到“和谐平衡”状态。其核心内容是要找到水资源系统与经济社会系统的“平衡点”。然而,寻找“平衡点”是非常不易的工作。基于此,笔者提出了和谐平衡理论,包括和谐平衡的概念、理论观点、和谐平衡表达式^[26]。

从理论上讲,只有在水资源系统与经济社会系统达到“和谐平衡”的状态下,得到的经济社会规模才是水资源承载力。因此,计算水资源承载力的过程也是寻找水资源系统与经济社会系统“和谐平衡”的过程,二者的有机结合是非常重要的。

4 结 语

本文在对水资源承载力前期研究成果系统梳理的基础上,阐述了其发展历程,总结了其研究方法并

对3类方法的优缺点进行了对比分析,提出了推荐的方法,最后对水资源承载力的进一步研究提出了建议。分析认为:①水资源承载力经历了近30年的研究,取得了大批的研究成果,基本概念和研究方法已比较成熟,但仍存在许多难点问题亟待研究,比如,水资源承载的经济社会规模如何表述,即选用哪些定量指标问题;水资源与经济社会系统、生态系统之间联系机制与定量关系如何表达,即耦合模型问题;在水资源承载力超载后控制用水量但如何消减生活、生产、生态用水量,即他们之间的内部制约机制问题。②从研究方法来看,在实际工作中可以采用简单的经验公式法,但从动态预警和调控方案制定来看,需要建立基于系统模型,即类似于笔者提出的COIM方法的水资源承载力计算模型,开发基于大数据的水资源承载力预警系统平台。③水资源系统是一个十分复杂的系统,其承载力计算涉及经济社会、生态系统诸多方面,应与现代治水成果、与寻找“和谐平衡”结合。

由于本文仅仅是前期工作的总结和分析,对将来进一步研究方向提出个人看法,没有进一步深入研究,期待国家重点研发项目“国家水资源承载力评价与战略配置”项目组的新成果问世以及全国水资源承载力监测预警机制建设工作取得巨大成就,为进一步支持我国治水实践提供理论方法和应用实践经验。

参考文献:

[1] 新疆水资源软科学课题组. 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, 20(6): 2-9. (The Research Group of Water Resources Soft Science in Xinjiang. Water resources carrying capacity and its development strategy in Xinjiang [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1989, 20 (6): 2-9. (in Chinese))

[2] 许有鹏. 干旱区水资源承载能力综合评价研究:以新疆和田流域为例[J]. 自然资源学报, 1993, 8(3): 229-237. (XU Youpeng. A study of comprehensive evaluation of the water resource carrying capacity in the arid area: a case study in the Hetian River Basin of Xinjiang [J]. Journal of Natural Resources, 1993, 8(3): 229-237. (in Chinese))

[3] 高彦春, 刘昌明. 区域水资源开发利用的阈限分析[J]. 水利学报, 1997, 28(8): 73-79. (GAO Yanchun, LIU Changming. Limit analysis on the development and utilization of regional water resources [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 28(8): 73-79. (in Chinese))

[4] 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. (FU Xiang, JI Changming. A comprehensive elevation of the regional water resource carrying capacity: application of main component analysis method [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 1999, 8(2): 168-172. (in Chinese))

[5] 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, 21(2): 16-21. (CHEN Bing, LI Lijuan, GUO Huaicheng, et al. System analysis on water resources supporting alternatives for Chaidamu Basin [J]. Environmental Science, 2000, 21(2): 16-21. (in Chinese))

[6] SONG Xiaomeng, KONG Fanzhe, ZHAN Chesheng. Assessment of water resources carrying capacity in Tianjin City of China [J]. Water Resources Management, 2011, 25(3): 857-873.

[7] WANG Zhonggen, LUO Yuzhou, ZHANG Minghua. Quantitative evaluation of sustainable development and eco-environmental carrying capacity in water-deficient regions: a case study in the Haihe River Basin, China [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(1): 195-206.

[8] JONATHAN H M. Carrying capacity in agriculture: globe and regional issue [J]. Ecological Economics, 1999, 29(3): 443-461.

[9] FALKEMARK M, LUNDQVIST J. Towards water security: political determination and human adaptation crucial [J]. Natural Resources Forum, 1998, 21(1): 37-51.

[10] RIJISBERMAN M A, FRANS H. Different approaches to assessment of design and management of sustainable urban water system [J]. Environment Impact Assessment Review, 2000, 129(3): 333-345.

[11] LOUCKS D P. Quantifying trends in system sustainability [J]. Hydrological Sciences Journal, 1997, 42(4): 513-530.

[12] 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(3): 180-188. (ZHU Yizhong, XIA Jun, TAN Ge. A primary study on the theories and process of water resources carrying capacity [J]. Progress in Geography, 2002, 21(3): 180-188. (in Chinese))

[13] 冯耀龙, 韩文秀, 王宏江, 等. 区域水资源承载力研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(1): 109-113. (FENG Yaolong, HAN Wenxiu, WANG Hongjiang, et al. Study on the region water resources carrying capacity [J]. Advances in Water Science, 2003, 14(1): 109-113. (in Chinese))

[14] 龙腾锐, 姜文超, 何强. 水资源承载力内涵的新认识[J]. 水利学报, 2004, 35(1): 38-45. (LONG Tengrui, JIANG Wenchao, HE Qiang. Water resources carrying capacity: new perspectives based on eco-economic analysis and sustainable development [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 35(1): 38-45. (in Chinese))

(下转第54页)

- [7] CHEN D, TANG F E, CHEN C. Pollutant trapping at a coastal headland[J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 2005, 131(3) :98-114.
- [8] 晏智锋. 浅水尾流流动特征及污染物输移扩散特性研究[D]. 北京:清华大学, 2010.
- [9] FLUENT Inc. FLUENT 6.3 user's guide[R]. Lebanon: New Hampshire, 2006.
- [10] NORBERG C. Effects of Reynolds number and a low-intensity freestream turbulence on the flow around a circular cylinder[R]. Gothenburg: Department of Applied Thermodynamics and Fluid Mechanics, Chalmers University of Technology, 1987.
- [11] ONG L, WALLACE J. The velocity field of the turbulent very near wake of a circular cylinder[J]. Experiments in Fluids, 1996, 20:441-453.
- [12] 于定勇, 崔肖娜, 唐鹏. 并列双圆柱绕流的水动力特性研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(5) :107-113. (YU Dingyong, CUI Xiaona, TANG Peng. Hydrodynamic characteristics of viscous flow past two side-by-side cylinders [J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(5) :107-113. (in Chinese))
- [13] KRAVCHENKO A G, MOIN P. Numerical studies of flow over a circular cylinder at $Re_D = 3\ 900$ [J]. Physics of Fluids, 2000, 12(2) :403-417.
- [14] KIM S E. Large eddy simulation of turbulent flow past a circular cylinder in subcritical regime [C]//Aiaa Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Reno: [s. n], 2006.
- [15] 窦国仁. 紊流力学:下册[M]. 北京:高等教育出版社, 1987.

(收稿日期:2016-06-22 编辑:郑孝宇)

(上接第6页)

- [15] 黄莉新. 水资源承载能力评价方法探讨[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(6) :613-615. (HUANG Lixin. Study on evaluation methods of water resources carrying capacity[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2007, 35(6) :613-615. (in Chinese))
- [16] 郭海丹, 邵景力, 谢新民, 等. 基于压力-状态-响应模型的城市水资源承载能力研究[J]. 水资源保护, 2009, 25(2) :46-49. (GUO Haidan, SHAO Jingli, XIE Xinmin, et al. Urban water resources carrying capacity based on pressure-state-response model [J]. Water Resources Protection, 2009, 25(2) :46-49. (in Chinese))
- [17] 方国华, 胡玉贵, 徐瑶. 区域水资源承载能力多目标分析评价模型及应用[J]. 水资源保护, 2006, 22(6) :9-13. (FANG Guohua, HU Yugui, XU Yao. Research on the multi-objective evaluation model of regional water resources carrying capacity and its application[J]. Water Resources Protection, 2006, 22(6) :9-13. (in Chinese))
- [18] 戴薇, 汪群, 王华. 太湖流域水资源承载力研究[J]. 水利经济, 2005, 23(6) :11-15. (DAI Wei, WANG Qun, WANG Hua. Research on bearing capacity of water resources of Taihu Basin [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2005, 23(6) :11-15. (in Chinese))
- [19] 左其亭, 张培娟, 马军霞. 水资源承载能力计算模型及关键问题[J]. 水利水电技术, 2004, 35(2) :5-8. (ZUO Qiting, ZHANG Peijuan, MA Junxia. Calculating model and key questions about carrying capacity of water resources [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(2) :5-8. (in Chinese))
- [20] 左其亭, 马军霞, 高传昌. 城市水环境承载能力研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(1) :103-108. (ZUO Qiting, MA Junxia, GAO Chuanchang. Study on carrying capacity of urban water environment [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(1) :103-108. (in Chinese))
- [21] 左其亭. 论水资源承载能力与水资源优化配置之间的关系[J]. 水利学报, 2005, 36(11) :17-22. (ZUO Qiting. Relationship between carrying capacity and optimal development of water resources [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(11) :17-22. (in Chinese))
- [22] 左其亭. 城市水资源承载能力:理论·方法·应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.
- [23] 左其亭. 人水系统演变模拟的嵌入式系统动力学模型[J]. 自然资源学报, 2007, 22(2) :268-273. (ZUO Qiting. The embedded system dynamic model used to human-water system modeling [J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(2) :268-273. (in Chinese))
- [24] 陶洁, 左其亭, 齐登红, 等. 中原城市群水资源承载力计算及分析[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(6) :56-61. (TAO Jie, ZUO Qiting, QI Denghong, et al. Calculation and analysis of water resources carrying capacity in Central Henan urban agglomeration [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2011, 22(6) :56-61. (in Chinese))
- [25] 左其亭, 张修宇. 气候变化下水资源动态承载力研究[J]. 水利学报, 2015, 46(4) :387-395. (ZUO Qiting, ZHANG Xiuyu. Dynamic carrying capacity of water resources under climate change [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 46(4) :387-395. (in Chinese))
- [26] 左其亭, 赵衡, 马军霞. 水资源与经济社会和谐平衡研究[J]. 水利学报, 2014, 45(7) :785-792. (ZUO Qiting, ZHAO Heng, MA Junxia. Study on harmony equilibrium between water resources and economic society development [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7) :785-792. (in Chinese))

(收稿日期:2016-12-13 编辑:熊水斌)