

我国水资源承载能力研究进展

杨金鹏^{1 2}, 秦大庸¹, 魏怀斌³, 鲁欣¹

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044; 2. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100044;

3. 华北水利水电学院, 河南 郑州 450011)

摘要 简要回顾我国水资源承载能力研究成果, 从承载条件、承载主体、承载客体和承载形式 4 个方面分析水资源承载能力定义的异同, 将其研究方法划分为 3 类(简单分析与估算方法、综合评价方法和复杂系统分析方法)进行重点评述, 探讨了今后的研究趋势。

关键词 水资源承载能力; 研究进展; 研究方法; 发展趋势

中图分类号: TV211.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-764X(2007)S2-0005-06

由于绝大多数发达国家水资源供需状况都远没有我国严峻, 因而在国外很少有关于水资源承载能力的专门研究, 大多将其纳入其他研究中进行(如 Joardor^[1]和 Rijiberman 等^[2]分别把水资源承载能力纳入城市发展规划、城市水资源管理中研究, Harris^[3]将水资源农业承载能力作为区域发展潜力的一项衡量标准等等)。相对于国外大多数国家, 我国水资源人均占有量偏低, 时空分布变异性大, 人口、社会经济、资源的匹配状况不理想, 生态环境相对脆弱。为解决我国日益突出的水问题, 20 世纪 80 年代末水资源承载能力的研究应运而生, 进入 21 世纪以后, 随着我国经济社会的快速发展和人口压力的增大、资源短缺加剧和环境恶化, 资源、环境、人口、发展之间的矛盾日益尖锐, 如何处理好社会发展、人口与资源以及可持续发展的关系, 研究水资源承载能力成为我国当前水资源科学领域中的一个重点和热点问题。限于篇幅, 本文就带有普遍性的重要问题及近年来的研究热点进行评述, 探讨今后的发展趋势。

1 我国水资源承载能力的研究进展概述

20 世纪 80 年代末, 新疆水资源软科学课题组^[4]最早开展了新疆的水资源承载能力和开发战略对策研究, 由此揭开了我国水资源承载能力研究的序幕。在中国水利水电科学研究院等单位^[5]承担的国家“九五”科技攻关“西北地区水资源合理配置与承载能力研究”项目之后, 水资源承载能力的研究受

到了更多地关注, 理论得到不断发展, 研究的时空范围也逐渐扩大, 时间上既有对水资源承载能力的现状研究, 也有对未来水资源承载能力的预测, 空间上既有对流域的水资源承载能力研究, 也有对区域及具体城市的水资源承载能力研究。按照空间尺度, 对水资源承载能力的研究进展概述如下:

a. 流域水资源承载能力的研究。流域水资源承载能力的研究主要集中在黄河流域、黑河流域和淮河流域等, 如许有鹏^[6]对新疆和田河流域的研究, 徐中民^[7]对黑河流域的研究, 秦莉云等^[8]、王顺久等^[9]和酆建强等^[10]对淮河流域的研究等。

b. 区域水资源承载能力的研究。区域水资源承载能力的研究主要集中在北方干旱与半干旱区, 新疆水资源软科学课题组最早开展的新疆水资源承载能力研究, 开创了区域水资源承载能力研究的先河。国家“九五”重点科技攻关计划“西北地区水资源合理配置与承载能力研究”项目对水资源承载能力进行了量化分析, 基本上实现了定性定量相结合的研究, 提出了干旱区水资源承载能力计算方法及重点区不同发展阶段的水资源承载能力, 在该项目的支撑和影响下, 很多专家开展了西北及相关地区的水资源承载能力的研究, 如贾嵘等^[11]对关中地区的研究, 李丽娟等^[12]对柴达木盆地的研究, 程国栋^[13]、朱一中等^[14]和贾绍凤等^[15]分别对西北地区进行了研究, 王浩等^[16]对内陆干旱区的研究, 秦大庸等^[17]对宁南山区的研究, 周维博^[18]对河西走廊的研究。此外, 在其他地区, 王在高等^[19]研究了岩

溶地区的水资源承载能力 酈建强等^[20]对山西省的水资源承载能力进行了研究。

c. 城市水资源承载能力的研究。城市水资源承载能力的研究和流域、地区有很大的差别,城市中农业用水相对比例较前两者少,而工业用水是城市的主要用水方式。由于城市用水广泛,其研究内容也趋于多元化。城市水资源承载能力的研究成果主要有 魏斌等^[21]对重工业城市本溪市的研究,姜文超等^[22]研究了水资源承载能力理论在城市规划中应用的必要性及其对城市规划的影响,吴九红等^[23]和赵新宇等^[24]分别对郑州市的研究,范英英等^[25]对北京市的研究,陈洋波等^[26]对深圳市的研究等等。

2 水资源承载能力的概念

20 世纪 80 年代末,新疆水资源软科学课题研究组虽然没有明确提出水资源承载能力的定义,但间接表明: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,给出了水资源承载能力定义的雏形。此后在众多相关研究中,很多专家如施雅凤等^[27]、许有鹏^[6]、阮本清等^[28]、贾嵘等^[11]、王浩等^[16]、王建华等^[29]、冯尚友^[30]、李令跃等^[31]、惠泱河^[32]、程国栋^[13]、夏军等^[33]、贾绍凤等^[15]和张丽^[34]等等分别给出了水资源承载能力的定义,具有代表性的有:

施雅凤等^[27]首次明确提出: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。

王浩等^[16]将水资源承载能力定义为:在某一具体的区域和发展阶段下,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,区域社会经济活动的最大人口容量。

冯尚友^[30]将水资源承载能力的定义表述为:在一定区域内,在一定生活水平和一定生态环境质量下,天然水资源的可供水量能够支持人口、环境与经济协调发展的能力或限度。此外,提出了水资源承载能力由水资源量的承载能力、水资源质量或水环境承载能力、地区水害防御能力 3 个部分组成。

程国栋^[13]结合承载能力概念的发展,在综合考虑各种影响因素的条件下,将水资源承载能力定义为: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。

分析这些定义可以看出,它们大多参照了联合国教科文组织给出的资源承载能力的定义:“一个国家或地区的资源承载能力是指在可以遇见的期间内,利用本地能源及其他资源和智力、技术等条件,在保证其社会文化准则的物质生活水平条件下,所能持续供养的人口数量。”定义的基本构成也大多为一定的承载条件下,承载主体对承载客体的某一形式的承载。为更清楚地分析这些定义之间的异同,对它们从承载条件、承载主体、承载客体和承载形式 4 个方面进行对比可知:

a. 从承载条件看,几乎全部的定义的承载条件都是“以技术、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”,只是某些定义的承载条件不是很全面。

b. 从承载主体看,部分定义的承载主体为当地(自身)水资源、可利用(可开采)水资源和天然水资源的可供水量,更多的定义的承载主体为水资源。

c. 从承载客体看,大多数定义的承载客体都不同,有的以人口(生活质量)为承载客体,有的以人口增长与经济发展为承载客体,很多是以社会经济(农业、工业、城市规模和人口)为承载客体,也有一些把承载客体扩展到了生态环境系统(即承载客体为社会经济发展和生态环境),有的更是强调承载客体为人口、环境与经济协调发展。可以看出,随着水资源承载能力的研究越来越深入,其承载客体越来越全面。

d. 从承载形式看,有的定义为对承载客体的支持能力或限度,有的定义为水资源的最大开发(供给)容量,有的为对承载客体的持续供养能力,有的为对承载客体的最大的支撑(维系)的规模。

3 水资源承载能力的研究方法

由于水资源承载能力与地区环境、人口、经济发展规模和代际可持续发展等有关,涉及面广,内容复杂,国内外目前尚没有很成熟的研究方法。常见的定量研究方法很多,如背景分析法、模糊综合评价法、灰色关联投影法、系统动力学法、多目标分析法等,按照应用技术和复杂程度的不同大致分为简单分析与估算方法、综合评价方法和复杂系统分析方法 3 类。

3.1 简单分析与估算方法

简单分析与估算方法包括常规趋势法、背景分析法、简单定额估算法和供需平衡分析法,这类方法计算方便,直观简单,但由于对水资源承载能力的影响因素考虑得比较简单,其计算结果可能与实际值有较大差距,在早期的水资源承载能力研究中应用较多。

3.1.1 常规趋势法

常规趋势法是以可开采水量为基本依据,在满足维持生态环境的起码要求以及合理分配国民经济各部门用水比例的前提下,计算水资源所承载的工农业及人口量。这种方法计算方便,直观简单,对某些承载因子的潜力估算有借鉴意义。但水资源承载能力的研究涉及水资源、宏观经济、社会、人口、环境、生态等众多因素,该方法往往仅考虑单承载因子的发展趋势,而忽略各承载因子之间的相互联系,因而具有局限性。1992年,施雅风等^[27]采用常规趋势法对新疆乌鲁木齐河流域水资源的承载能力进行了研究,2001年,王在高等^[19]建立了基于 LOGISTIC 曲线水资源承载能力趋势模型,对岩溶地区的水资源承载能力进行了预测。

3.1.2 背景分析法

背景分析法是将历史长度下,世界范围内的经济发展、水资源利用、生产力水平、生活水平及生态环境演化情景以及相应的自然和社会背景同研究区域的实际情况进行对比,得到该区域可能的承载能力。最经典的例子是河西走廊石羊河流域与以色列全国的比较。背景分析法采用一个或几个承载因子分析,因子之间相互独立,简单易行。但多局限于静态的历史背景,割裂了资源、社会、环境之间相互作用的联系,其结果不一定符合实际,因此该法在实际中的应用不多。

3.1.3 简单定额估算法

简单定额估算法首先计算出区域水资源的可利用水量和用水定额,然后利用简单的供需平衡计算出水资源的承载能力(承载人口或承载农田面积)。2000年,曲耀光等^[36]用黑河流域水资源开发利用各个阶段的可用水量减去不同历史发展阶段除农田灌溉外的社会经济各部门的需水量,得到农田灌溉用水量再除以农田灌溉定额计算区域适宜绿洲及农田面积,2001年,王煜等^[37]通过分析西北地区的水资源量、可利用量及人均需求量,计算了不同水平年最大可承载的人口数量。

3.2 综合评价方法

综合评价方法选择科学、合理的水资源承载力评价指标体系,反映水资源—社会经济—生态环境系统的发展规模与质量,采用有效的评价方法对不同时段、不同策略下的水资源承载状况(水平)进行综合评判。按照评价技术方法的不同,综合评价法有模糊综合评价法、主成分分析法、投影寻踪方法及其他评价方法等。

3.2.1 模糊综合评价法

模糊综合评价法就是用模糊数学对受多种因素

制约的事物和现象做出总体评价的方法。其实质就是将评价对象的各项属性和性能作为因素集或参数指标,然后建立评判集和评判矩阵,因素集、评判集和评判矩阵整体构成一个评判空间,然后对于因素集中各因素不同的重要程度赋予不同的权重,进行综合评价。由于模糊综合评判的实质就是对主观产生的离散过程进行综合处理,将模糊综合评判运用于区域水资源承载能力的评价中,无论是在评判因素的选取上,还是因素对承载能力的影响程度上,都存在太强的主观性。1993年,许有鹏^[6]率先应用模糊综合评价方法对新疆和田河流域水资源承载能力进行了评价,1998年,肖满意等^[38]建立灰色与模糊综合评判模型,对山西省各流域及水资源分区的水资源承载能力进行了评价,2001年,秦莉云等^[8]采用模糊综合评判方法对淮河流域水资源承载能力进行了评价分析,2001年,王余标等^[39]应用模糊综合评判方法建立水资源承载能力综合评价模型,对周口市的水资源承载能力进行了评价研究,2005年,周维博^[18]采用模糊综合评判方法,对河西走廊灌溉农业发展的水资源承载能力进行了分析。

3.2.2 主成分分析法

主成分分析法是统计分析中的一种重要方法,近年来也被引入到水资源承载能力的研究中。其原理是利用数理统计的方法找出系统中的主要因素和各因素之间的相互关系,然后将系统的多个变量(或指标)转化为较少的几个综合指标的一种统计分析方法。具体操作是首先将高维变量进行综合与简化,同时确定各个指标的权重,通过矩阵转换和计算,将多目标问题综合成单目标形式,将反应系统信息量最大的综合指标确定为第一主成分,其次为第二主成分,依此类推。主成分的个数一般按所需反映全部信息量的百分比来确定。1999年,傅湘等^[40]利用主成分分析法对平坝区的水资源承载能力进行了评价研究,2004年,孟凡德等^[41]采用主成分分析法分析了北京市自20世纪80年代以来水资源承载能力变化的总体趋势和驱动因子,结果表明,人口和GDP是影响北京市水资源承载能力变化的主要驱动因素。

3.2.3 投影寻踪方法

投影寻踪是根据数据群自身的特征结构和信息进行评价分析,它是将多元数据的信息压缩为一个能反映原问题特征的综合信息指标,并依据此特征信息指标对水资源承载能力进行综合分析。其原理是按照实际问题的需要,把高维数据投影到低维子空间上,使用者通过观察投影图像,采用投影目标函数来衡量投影揭示数据某种结构的可能性大小。投影寻踪法不仅可利用等级值来判定水资源承载能力

所处的等级,而且可利用投影值的大小进一步判断处于同一等级的水资源承载能力的相对大小。2003年王顺久等^[9]采用投影寻踪法对全国30个省、区和淮河流域水资源承载能力进行了综合评价;2004年酆建强等^[20]构建了遗传投影寻踪插值模型,对山西省水资源承载能力进行了综合评价。

3.2.4 其他评价方法

随着水资源承载能力研究的不断深入,很多专家提出了一些新的评价方法。2003年张戈平^[42]提出了水资源承载能力评价的密切值法,即根据备选决策方案及其技术经济指标,找出关于方案集(决策点集)的最优点和最劣点,然后找出尽可能接近最优点而远离最劣点的决策点,便是寻找的满意方案,并对黑龙江省8个地级城市的水资源承载能力进行综合评价和分析。2004年袁晓宇^[43]提出了灰色关联投影法,即采用决策方案集中各方案点与理想方案点的关联度表示决策方案中的各因素指标、目标之间的灰色关系,把各方案向理想方案投影,计算各方案的投影值,作为多目标决策的依据,并应用该法评价了淮河流域的水资源承载能力。2004年酆建强等^[10]对多目标理想点法进行改进,把评价标准处理成区间的形式,建立多目标决策—理想区间模型,对淮河流域的水资源承载能力进行了综合评价。

3.3 复杂系统分析方法

复杂系统分析方法是采用较复杂的技术方法建立的能够确切描述水资源—社会经济—生态环境三大系统之间关系,较准确计算水资源承载能力的概念性模型的计算分析方法。复杂系统分析方法包括系统动力学法、多目标分析法、动态模拟递推法和PSR模型方法。这类方法对水资源承载能力的计算分析比较深入,考虑的因素比较全面,计算结果科学合理。

3.3.1 系统动力学法

系统动力学法是应用系统动力学原理采用动态系统反馈模拟评价一个地区水资源承载能力的方法。系统动力学模型本质上是带时滞的微分方程组,能方便地处理非线性和时变现象,能做长期、动态、战略性的仿真分析与研究,较适用于分析研究系统的结构与动态行为,其主要流程包括系统分析、确定重要变量、明确系统反馈结构。系统动力学法把社会经济、资源环境在内的大量复杂因子作为一个整体,综合考虑众多因子的相互关系,通过模拟不同发展战略得出人口增长、区域资源承载能力和经济发展间的动态变化趋势及其发展目标,即对一个区域的资源承载能力进行动态计算,不仅具有系统发展的观点,而且具有分析速度快、模型构造简单、可

以使用非线性方程等优点,受到广泛的关注和应用推广。1995年魏斌等^[21]运用指数评价模型和SD模型,对城市工业用水变化情况和城市水资源系统发展趋势进行了分析预测;1999年王建华^[29]利用系统动力学模型对乌鲁木齐市1993~2020年间水资源承载能力进行预测分析;2000年李丽娟等^[12]建立了以期望人口为核心的水资源承载能力指标体系,运用系统动力学仿真模型对柴达木盆地水资源承载能力及承载人口进行了预测和分析;2003年吴九红等^[23]以动态序列研究为主,运用系统动力学(SD)模型,分析了影响郑州市水资源承载能力的各层次要素间的反馈关系;2005年王薇等^[44]采用系统动力学方法建立了共和盆地水资源承载能力模型,对该地区的水资源承载能力进行了定量研究;2005年范英英等^[25]在水资源合理配置的前提下,以北京市社会经济环境系统为研究对象,建立北京市水资源系统动力学模型,通过动态仿真模拟,预测北京市5项水资源政策对水资源承载能力的长期影响。

3.3.2 多目标分析法

多目标分析法是选取能够反映水资源承载能力的社会、经济、人口、生态环境等若干目标,用系统分析和动态分析方法研究不同水平年、不同策略方案下水资源所能承载的生态、经济、人口规模,建立以水资源承载能力度量指标为目标的数学模型,采用多目标优化方法,计算确定水资源承载能力。该法可以将水资源系统(自然系统)与区域宏观经济系统(社会系统)作为一个综合体来考虑,按照社会可持续发展的原则,不追求单个目标的优化,只追求整体的最优。在这个综合体中全面研究水资源开发利用与区域社会经济、生态环境发展目标间的动态联系,供水需水间的动态联系,以及投资与效益间的动态联系等。1998年贾嵘等^[11]从水资源、环境、人口、发展之间的关系入手,分析探讨了水资源承载能力的内涵及研究思路,建立了区域水资源承载能力研究的多目标分析评价模型,研究了关中地区的水资源承载能力;1999年徐中民^[7]根据水资源承载能力分析的结构特点,在传统多目标分析决策技术的基础上,结合黑河流域的具体情况,建立了黑河流域水资源承载能力情景分析模型;2000年薛小杰等^[45]应用系统科学的原理和方法,建立了水资源承载能力多目标核心模型,对西安市水资源承载能力进行了实例研究;2003年朱一中等^[35]则具体从水循环模拟研究切入,采用多目标情景分析方法和综合评判方法,从面域尺度对西北地区2010年和2020年不同情景方案下的水资源承载能力进行了预测分析和评价;2005年赵新宇等^[24]根据城市水资源承载系统的特

点及其与社会经济系统、生态环境系统的相互作用关系,建立了城市水资源承载能力的多目标分析模型,对郑州市水资源承载能力进行了实例研究。

3.3.3 动态模拟递推法

动态模拟递推法主要是通过水资源的动态供需平衡计算来显示水资源承载能力的状况和支持人口与经济发展的最终规模,其实质是运用模拟法,将动态模拟和数学经济分析相结合,利用计算机模拟程序,对区域水资源供需真实系统的运动行为进行模拟预测,根据逐年运行的实际结果,有目的地改变模拟参数或结构,使其与真实系统尽可能一致。当水资源供应能力达到“零增长”(对水资源紧缺地区)或地区人口增长或经济增长达到“零增长”(对水资源丰裕地区)时,水资源承载能力达到最大。该法由冯尚友提出,至今没有具体的应用实践。

3.3.4 PSR 模型方法

PSR(压力-状态-响应)模型是加拿大统计学家 Anthony Friend 提出,后来被广泛应用的指标分析模型。其原理为:人类从自然环境取得各种资源,通过生产消费又向环境排放,从而改变了资源的数量和环境质量,进而影响了人类的社会经济活动及其福利,如此循环往复,形成了人类活动与自然环境之间的“压力-状态-响应”关系。该模型设计的指标的优点是较好地反映了自然、经济、环境、资源之间的相互依存、相互制约关系。陈洋波等^[26]把 PSR 模型扩展为 DPSIR(驱动力-压力-状态-影响-响应)模型,对深圳市水资源承载能力进行了研究。

从上面的综述中,可以看出水资源承载能力的研究方法的计算原理各不相同、角度各异,既有水资源承载能力的简单分析计算和评价分析方法,又有复杂系统的动态模拟方法,各有各的特点和适用范围。简单分析与估算方法计算方法相对较简单,不能很好地刻画水资源承载能力,对水资源、社会经济和生态环境之间相互作用的关系考虑不足,对水资源承载能力这一复杂的水资源—生态环境—社会经济系统来说显得过于单薄,综合评价方法实质上是对水资源—社会经济—生态环境系统的协调程度的评价,并非计算水资源最大承载能力,同时由于指标选取和对指标评价依据的设定有很大的主观性,计算结果显得可靠性不高;复杂系统分析方法是复杂系统分析理论为指导思想,将水资源、社会经济和生态环境系统作为一个整体,综合考虑各子系统之间的相互联系,通过模拟、情景分析和优化等方法分析计算区域水资源承载能力,这使其具有很高的可信性,但计算分析过程复杂、繁琐。

4 水资源承载能力研究展望

根据我国水资源承载能力研究的进展情况,对未来研究进行展望,今后水资源承载能力的研究将主要集中在以下几个方面。

4.1 加强对水资源承载能力基础理论的研究

当前水资源承载能力的研究缺乏公认的理论基础和通用的研究方法,对水资源承载能力本身的认识和研究还欠深入。今后研究应立足于系统研究水资源承载能力的基础理论,确定水资源承载能力的判别标准、研究目的、服务对象及其研究范围,建立水资源承载能力的概念体系;完善水资源承载能力的支撑理论,研究人类活动对水文现象和水文循环的影响机理,加强水文循环的尺度问题研究,探讨水资源在人口、社会经济发展、生态环境需水等方面的优化配置理论^[46]。

4.2 加强交叉综合研究,以系统的观点研究水资源与其他资源的综合承载能力

人类社会的可持续发展需要水资源和其他资源的共同支撑,因此必须从系统的角度研究水资源与其他资源的综合承载能力,水资源承载能力研究也必将从单学科、单因子研究趋向多学科交叉综合研究。要以系统的观点,研究水资源与国土资源、矿藏资源、森林资源等的综合承载能力将是今后承载能力研究的方向和趋势^[34]。而且,随着研究的深入,各种资源之间的相互广义替代性研究将逐渐受到重视。

4.3 开展水资源承载能力的空间差异性研究

现有的水资源承载能力研究着重研究了水资源可承载人口和社会经济发展总量规模和结构,这只是表征水资源承载能力大小的一个面上的宏观指标,事实上水土资源与社会经济活动的空间配置状况对水资源承载能力有着极为重要的影响,因此有必要加强空间差异与区域组合研究,以进一步增强水资源承载能力研究成果的适应性。在水资源承载能力研究中考虑区域分异与空间配置问题,不但是水资源承载能力研究的一个重要方面,也必将使水资源承载能力研究成果对社会实践具有更明确的指导作用^[35]。

4.4 加强水资源承载能力影响因素定量分析及增强模式的研究

影响水资源承载能力的因素,不仅包含资源的量与质,而且还包括政策、法规、经济和技术水平,人口状况、生态环境状况和水资源综合管理水平等。目前对区域水资源承载能力影响因素定量分析及增强模式的研究较少,而研究水资源承载能力的目的就是研究如何增强水资源承载能力。研究水资源承

载能力的驱动力,探讨区域水资源承载能力增强模式,使区域水资源承载能力研究的成果具有更强的实际操作性。

4.5 引入新的技术方法

对于水资源承载能力的定量研究,方法较多,但新理论和新技术较少。作为人工智能(AI)研究中的两个新领域人工神经网络(ANN)和遗传算法(GA)已广泛应用于水资源的优化管理和预测预报等方面,而将其应用于水资源承载能力研究中甚少;3S技术在解决复杂的水资源、水环境规划和管理等方面已显示出强大的功能^[46]。今后对于水资源承载能力研究必须突破常规的技术方法,采用新的技术方法使水资源承载能力研究取得突破性进展。

致谢:本文得到了中国水利水电科学研究院王建华教授级高工的帮助,深表感谢。

参考文献:

[1] JOARDAR S D. Carrying capacity and Standards as Bases Towards Urban Infrastructure Planning in Indian: A Case if Urban Water Supply and Sanitation[J]. Urban Infrastructure Planning in Indian. 1998, 22(3): 327-337.

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

[3] HARRIS J M ,et al. Carrying capacity in Agriculture : Globe and regional issue. Ecological Economics[J]. 1998, 129(3): 443-461.

[4] 新疆水资源软科学课题组. 新疆的水资源承载能力和开发战略对策研究[J]. 水利水电技术, 1989(6): 2-9.

[5] 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]. 中国水利, 2001(5): 9-11.

[6] 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.

[7] 徐中民. 情景基础的水资源承载能力多目标分析理论及应用[J]. 冰川冻土, 1999, 21(2): 99-106.

[8] 秦莉云, 金忠青. 淮河流域水资源承载能力的评价分析[J]. 水文, 2001, 21(3): 14-17.

[9] 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.

[10] 酈建强, 陆桂华, 杨晓华, 等. 流域水资源承载能力综合评价的多目标决策——理想区间模型[J]. 水文, 2004, 24(4): 1-4.

[11] 贾嵘, 薛惠峰, 解建仓, 等. 区域水资源承载能力研究[J]. 西安理工大学学报, 1998, 14(4): 382-387.

[12] 李丽娟, 郭怀成, 陈冰, 等. 柴达木盆地水资源承载能力研究[J]. 环境科学, 2000(2): 20-23.

[13] 程国栋. 承载能力概念的演变及西北水资源承载能力的应用框架[J]. 冰川冻土, 2002(4): 361-367.

[14] 朱一中, 夏军, 谈戈. 西北地区水资源承载能力分析预测与评价[J]. 资源科学, 2003, 25(4): 43-48.

[15] 贾绍凤, 周长青, 燕华云, 等. 西北地区水资源可利用量与承载能力估算[J]. 水科学进展, 2004, 15(6): 801-807.

[16] 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.

[17] 秦大庸, 裴源生, 于福亮, 等. 宁南山区水资源承载能力及移民规模研究[J]. 自然资源学报, 2004, 19(4): 430-437.

[18] 周维博. 河西走廊灌溉农业发展的水资源承载能力分析[J]. 自然资源学报, 2005, 17(5): 565-570.

[19] 王在高, 梁虹. 岩溶地区水资源承载能力指标体系及其理论模型初探[J]. 中国岩溶, 2001, 20(2): 144-148.

[20] 酈建强, 陆桂华, 杨晓华, 等. 区域水资源承载能力综合评价的 GPPIM[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(1): 1-4.

[21] 魏斌, 张霞. 城市水资源合理利用分析与水资源承载能力研究——以本溪市为例[J]. 城市环境与城市生态, 1995, 8(4): 19-24.

[22] 姜文超, 腾锐. 水资源承载能力理论在城市规划中的应用[J]. 城市规划, 2003, 27(7): 78-82.

[23] 吴九红, 曾开华. 城市水资源承载能力的系统动力学研究[J]. 水利经济, 2003, 21(3): 36-39.

[24] 赵新宇, 费良军, 高传昌. 城市水资源承载能力多目标分析[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2005, 33(9): 100-102.

[25] 范英英, 刘永, 郭怀成, 等. 北京市水资源政策对水资源承载力的影响研究[J]. 资源科学, 2005, 27(5): 113-119.

[26] 陈洋波, 陈俊合, 李长兴, 等. 基于 DPSIR 模型的深圳市水资源承载能力评价指标体系[J]. 水利学报, 2004(7).

[27] 施雅凤, 曲耀光. 乌鲁木齐河流域水资源承载能力及其合理利用[M]. 北京: 科学出版社, 1992.

[28] 阮本清, 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): 58-85.

[29] 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): 19-22.

[30] 冯尚友. 水资源可持续利用与管理导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000, 213-215.

[31] 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(9): 307-313.

[32] 惠决河, 蒋晓辉, 黄强, 等. 水资源承载能力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 30-34.

[33] 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量: 水资源承载能力的研究与挑战[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 262-269.

[34] 张丽. 水资源承载能力与生态需水量理论及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005. (下转第 48 页)

里假设有一污染物在流域 X - Y 平面上沿坐标轴正方向运动,目标状态由 $[x, \dot{x}, y, \dot{y}]$ 组成。它的运动受到一个具有 $0.15I$ 协方差矩阵的零均值、白色高斯过程噪声的扰动 (I 为单位矩阵)。定义该目标的期望协方差为 P_d , 它从 0 时刻以初始特征值为 $0.25I$ 的一个对角矩阵开始,随着时间的推移,污染物浓度降低,跟踪精度要提高,因此在时刻 25 将期望协方差减小到一个特征值为 $0.15I$ 的矩阵。协方差误差的 2-范数的阈值为 0.15。仿真实验结果如图 2、图 3 所示。

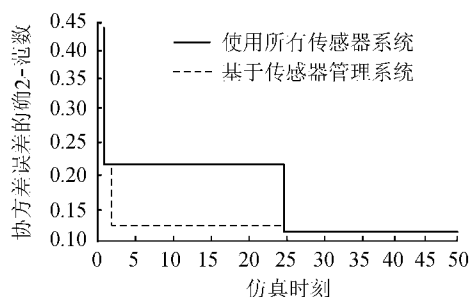


图 2 协方差误差的 2-范数

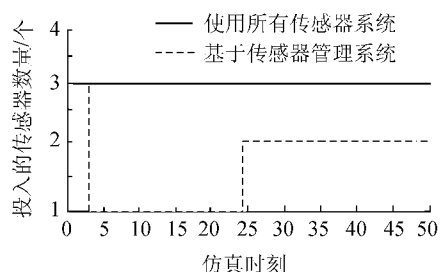


图 3 投入使用的传感器数量

由图 2、图 3 可以看出,采用传感器管理技术,可以在满足跟踪精度要求下节约宝贵的传感器资源,而且随着跟踪精度要求的提高,可以自动地投入更多的传感器资源,满足系统要求。

3 结 语

为了充分发挥信息融合系统的功能和性能,传感器管理技术得到越来越多的重视。本文在介绍流域水质监测存在问题的基础上,探讨传感器管理技术在流域水质监测方面的应用情况,并介绍了一种基于协方差控制的传感器分配算法,给出了一个仿真实例。下一步的工作重点是研究新的、更适应水质监测的传感器管理算法、传感器管理的体系结构等。

参考文献:

[1] 刘先省,申石磊,潘泉.传感器管理及方法综述[J].电子学报,2002,30(3):394-398.
 [2] 杨秀珍,何友,鞠传文.多传感器管理系统研究现状与发展趋势[J].传感器技术,2004,23(1):5-8.
 [3] 王峰,张洪才,潘泉.传感器管理及其在相控阵雷达中的应用[J].现代雷达,2004,26(2):14-17.

[4] KREUCHER C. HERO III A O, KASTELL K, et al. Efficient Methods of Non-myopic Sensor Management for Multitarget Tracking[C]//43rd IEEE Conference on Decision and Control, 2004:722-727.
 [5] 李建中,李金宝,石胜飞.传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展[J].软件学报,2003,14(10):1717-1727.
 [6] 柴成果.关于黄河水质监测方式的思考[J].中国水利,2004(5):48-49.
 [7] 刘先省,程咏梅,潘泉,等.多传感器数据融合系统闭环控制模式的构成与分析[J].信息与控制,2000,29(2):145-151.
 [8] WANG Feng, TIAN Qi-chuan, GAO Quan-xue, et al. A study of sensor management based sensor networks[C]//Proceeding of the 2003 IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing, Changsha: 2003: 1058-1062.
 [9] 周文辉,胡卫东,余安喜,等.基于协方差控制的集中式传感器分配算法研究[J].电子学报,2003,31(12A):2158-2162.

(收稿日期 2006-11-14 编辑:高建群)

(上接第 10 页)

[35] 朱一中,夏军,谈戈.关于水资源承载力理论与方法研究[J].地理科学进展,2002,21(3):180-188.
 [36] 曲耀光,樊胜岳.黑河流域水资源承载能力分析计算与对策[J].中国沙漠,2000,20(1):1-8.
 [37] 王煜,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(12):524-529.
 [38] 肖满意,董翊立.山西省水资源源承载能力评估[J].山西水利科技,1998(4):5-11.
 [39] 王余标,王献平.周口市水资源承载能力综合评价[J].河南农业大学学报,2001,35(9):97-100.
 [40] 傅湘,纪昌明.区域水资源承载能力综合评价——主成分分析法应用[J].长江流域资源与环境,1999,8(2):169-173.
 [41] 孟凡德,王晓燕.北京市水资源承载能力的现状及驱动力分析[J].首都师范大学学报:自然科学版,2004,25(3):100-105.
 [42] 张戈平.城市水资源承载能力评价指标体系研究[D].东北农业大学,2003.
 [43] 袁晓宇.多目标决策灰色关联投影法在水资源承载能力分析中的应用[J].江苏水利,2004(12):10-13.
 [44] 王薇,雷学东,余新晓,等.基于 SD 模型的水资源承载能力计算理论研究——以青海共和盆地水资源承载能力研究为例[J].水资源与水工程学报,2005,16(3):11-15.
 [45] 薛小杰,惠泱河,黄强,等.城市水资源承载能力及其实证研究[J].西北农业大学学报,2000,28(6):135-139.
 [46] 赵西宁,吴普特,王万忠,等.水资源承载能力研究现状与发展趋势分析[J].干旱地区农业研究,2004,22(4):173-177.

(收稿日期 2007-01-14 编辑:高建群)