

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2019.06.003

基于知识图谱的水资源承载力研究的文献计量分析

金菊良^{1,2}, 陈鹏飞^{1,2}, 陈梦璐^{1,2}, 郦建强³, 徐翔宇³, 唱彤³

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 合肥工业大学水资源与环境系统工程研究所, 安徽 合肥 230009; 3. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120)

摘要:为分析水资源承载力研究发展状况及趋势,以 CNKI 数据库收录的 2558 篇和 WOS 数据库收录的 512 篇水资源承载力研究文献作为数据基础,采用共著分析和共现分析等文献计量可视化分析方法,通过对文献发表的时间分布、学科和期刊分布、高被引文献分布、研究主体分布及研究热点等方面的深入分析,综述了水资源承载力的研究进展。分析结果表明水资源承载力研究是一个正在迅速发展的新兴领域,国内研究热点主要有水资源管理、水资源承载力评价、可持续发展、水环境承载力、水安全、水资源可持续利用,国外研究热点主要有水资源可持续发展、承载力、气候变化、水资源管理、水质、风险评估。

关键词:水资源承载力;文献计量可视化分析;知识图谱;VOSviewer

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2019)06-0014-11

Bibliometric analysis of research progress on water resources carrying capacity based on knowledge map // JIN Juliang^{1,2}, CHEN Pengfei^{1,2}, CHEN Menglu^{1,2}, LI Jianqiang³, XU Xiangyu³, CHANG Tong³ (1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Water Resources and Environmental Systems Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Water Resources and Hydropower Planning and Design General Institute, MWR, Beijing 100120, China)

Abstract: In order to analyze the development status and trend of water resources carrying capacity research, the research progress of water resources carrying capacity is summarized based on the data of 2558 articles in CNKI database and 512 articles in WOS database on water resources carrying capacity through the analysis of the time distribution of literature publication, the distribution of disciplines and periodicals, the distribution of highly cited literature, the distribution of research subjects and research hotspots, etc, by using co-authorship analysis and co-occurrence analysis and other bibliometric visualization analysis methods. The above analysis shows that the research on water resources carrying capacity is a rapidly developing new field. The domestic research hotspots mainly include water resources management, water resources carrying capacity evaluation, sustainable development, water environment carrying capacity, water security and sustainable utilization of water resources. The foreign research hotspots mainly include sustainable development of water resources, carrying capacity, climate change, water resources management, water quality and risk assessment.

Key words: water resources carrying capacity; bibliometric visualization analysis; knowledge map; VOSviewer

近 40 年来,世界上许多国家在水资源管理方面面临越来越多的挑战,水资源脆弱性、水资源安全等区域水资源问题已成为严重制约全球经济可持续发展的主要瓶颈因素^[1-2]。水资源承载力指区域水资源在临近破坏水资源可持续利用时所能持续支撑区域的最大经济社会发展规模,其相关研究已成为当前水资源研究中的重点和热点,对社会经济可持续

发展、环境保护和水资源优化配置均具有重要意义^[2-4]。同时,由于水资源承载力越来越体现出动态性、相对极限性、模糊性和承载模式多样性等特点,现在的研究日显挑战性^[5]。水资源承载力研究始于 20 世纪 80 年代中后期,但当时的概念、理论和计算方法等尚不成熟,其后随着水资源等学科的发展,我国开始出现定量化研究,如 1993 年许有鹏^[6]

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401303);国家自然科学基金(51579059, 51479045)

作者简介:金菊良(1966—),男,教授,博士,主要从事水资源系统工程研究。E-mail: JINJL66@126.com

通信作者:陈梦璐,博士研究生。E-mail: 516792688@qq.com

进行了新疆和田河流域水资源承载力模糊综合评判研究,2004年王浩等^[5]给出了西北内陆重点地区的水资源承载力。目前,与国内相比国外对水资源承载力的研究较少^[7-8],主要结合水资源综合管理、水资源可持续发展进行研究,如Liu等^[9]认为应以可持续的方式管理水资源,努力提高水安全程度。由于对水资源承载力本身的认识和研究尚处于初步阶段,目前水资源承载力的概念尚未统一,因此国外多使用可持续利用水量^[10]、水资源紧缺程度^[11]、水资源的生态限度^[12]等指标来表述类似含义。水资源承载力研究的现有方法有模糊综合评价法、层次分析法、系统动力学法、多目标决策分析法和主成分分析法等。目前国内外的水资源承载力量化模型主要是以人口和经济为承载目标,而对水资源维持其自身更新和生态环境的能力研究较少,具有明显的局限性^[3]。

张丽敏等^[13]运用文献计量方法,针对国内水资源承载力研究现状分析了其研究进展并做出评价,取得了一定效果。科学知识图谱分析源于美国,引入中国后在多个专业领域得到广泛运用,其定义为可视化地描述人类随时间拥有的知识资源及其载体,绘制、挖掘、分析和显示科学技术知识以及内部联系。本文借助计量工具、运用知识图谱对水资源承载力领域的国内外文献进行分析,针对水资源主要研究热点,在回顾已有研究进展基础上,对水资源承载力进行系统梳理、总结和评述并进行国内外对比,以进一步推动水资源承载力研究。

1 文献计量分析

选择中国知网(CNKI)全文数据库、Web of Science(WOS)核心合集中的SCI-Expanded数据库作为文献统计来源。在CNKI中以“水资源承载能力”或“水资源承载力”为关键词进行检索,时间跨度为1988—2018年,共检索到2692篇文献,通过逐条阅读判断,剔除重复文献、新闻报道、会议论文以及其他领域的干扰文献和不相关文献后,共选定研究文献为2558篇;在WOS数据库中以“TS = water resources carrying capacity”对2003(本文作者所在研究机构数据库仅从2003年开始购买)至2018年11月间发表的文献进行高级检索,选择Article进行精炼,共得到512条检索结果。VOSviewer是基于文献计量方法而开发的用于绘制各个领域知识图谱的软件,本研究主要采用文献计量分析法^[14],利用Excel和VOSviewer绘制相关图表,以定性和定量分析相结合的方法对检索文献的发表时间、学科和期刊、高被引文献及关键词进行分析,展示该领域知识产生、传播、应用的过程,揭示水资源承载力总体研究进展

及未来发展趋势。

1.1 文献发表时间分布

领域内相关文献发表数量随时间变化的分布图,在一定程度上反映了该研究领域的受关注程度和发展趋势。图1显示(由于WOS数据库中所获文献的最早出版年份为2003年,所以绘图时CNKI数据库中文献也仅显示出2003—2018年的文献):历年来国内文献数量明显多于同期的国外文献数量,说明在本研究领域国内学者贡献较大,也说明本研究在国外具有很大的发展空间;CNKI数据库出现了两个明显的波峰,一是2008年发文192篇,二是2016年发文195篇;WOS数据库显示本研究领域在国外研究中的发文量呈逐年缓慢上升趋势,说明国内研究力量大起伏也较大,而国外一直处于缓慢的探索时期,可见它是一个正在蓬勃发展的研究领域、尚需更多的学者予以关注。

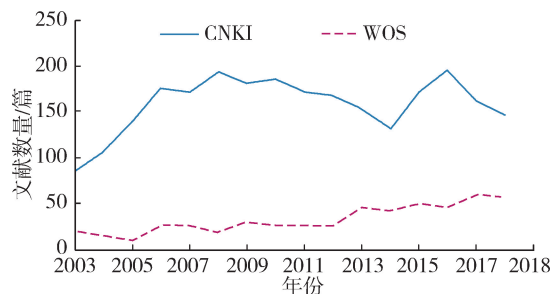


图1 水资源承载力研究领域2003—2018年出版的文数量

1.2 文献发表学科和期刊分布

在CNKI数据库文献中的主要学科是水利工程,发文数为2003篇,占比高达78.3%,是国内水资源承载力研究领域的强势学科;其次是环境学科、国民经济、城市经济等,这说明国内水资源承载力研究与水利、环境、经济密切相关。在WOS数据库中排名前三的学科是Environmental Sciences Ecology(环境科学生态学)、Water Resources(水资源)、Engineering(工程),总发文数占整体数量的80%以上,即为国外水资源承载力研究的热点学科。有些文献内容涉及不同学科的交叉,故出现了同一篇文献归于几个不同学科的现象。

在CNKI数据库文献中发表在期刊《中国水利》最多,其次是《人民黄河》《水资源与水工程学报》;前10名期刊中6种期刊为中文核心期刊,说明国内该研究领域已有被学术界认可的学术成果,发展前景较好。在WOS数据库中Journal of Cleaner Production、Water Resources Management和Water载文数比重最大,且排名前十的期刊中有3种与地球或环境有关,说明国内与国外研究侧重点不同;前10名期刊中有6种为一区刊、3种为二区刊(JCR分

区),说明该研究领域在国外具有一定的研究地位。从期刊分布情况来看,期刊来源比较分散且并未集中地发表在特定期刊,这说明该领域目前并没有形成稳定的期刊群,该领域的研究呈现多样化和交叉性发展态势。

1.3 高被引文献

高被引文献不仅是某研究领域内被广泛认同并被频繁引用的核心文献,更是未来研究的重要知识基础和方法论基础,有较高的学术价值和影响力。

1.3.1 国内高被引文献

国内水资源承载力研究领域被引频次排在前5位的文献中,被引用次数最多的论文为《水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战》,其次为关注水资源承载力评价分析的《水资源承载力评价指标体系研究》和《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》。这5篇文献多集中发表于2000—2002年,说明国内该研究起步早且质量较高;同时文献来源中包括国内该研究领域的权威期刊《自然资源学报》和《水科学进展》,可见水资源承载力研究受关注度很高。

1.3.2 国外高被引文献

国外水资源承载力研究领域被引频次排在前5位的文献中,从被引论文的内容来看,关注可持续发展的有两篇:分别为 *Water problems and hydrological research in the Yellow River and the Huai and Hai River basins of China*、*Human appropriation of natural capital: a comparison of ecological footprint and water footprint analysis*,关注微生物与干旱生态系统关系

的 *Linkages between microbial and hydrologic processes in arid and semiarid watersheds* 引用次数最高,说明国内外研究的侧重点不同。这5篇文献集中发表于2004—2010年,全来自1区(JCR分区),可见国外水资源承载力研究成果质量很高但数量很少,亟待更多优质文献推动本研究的发展。

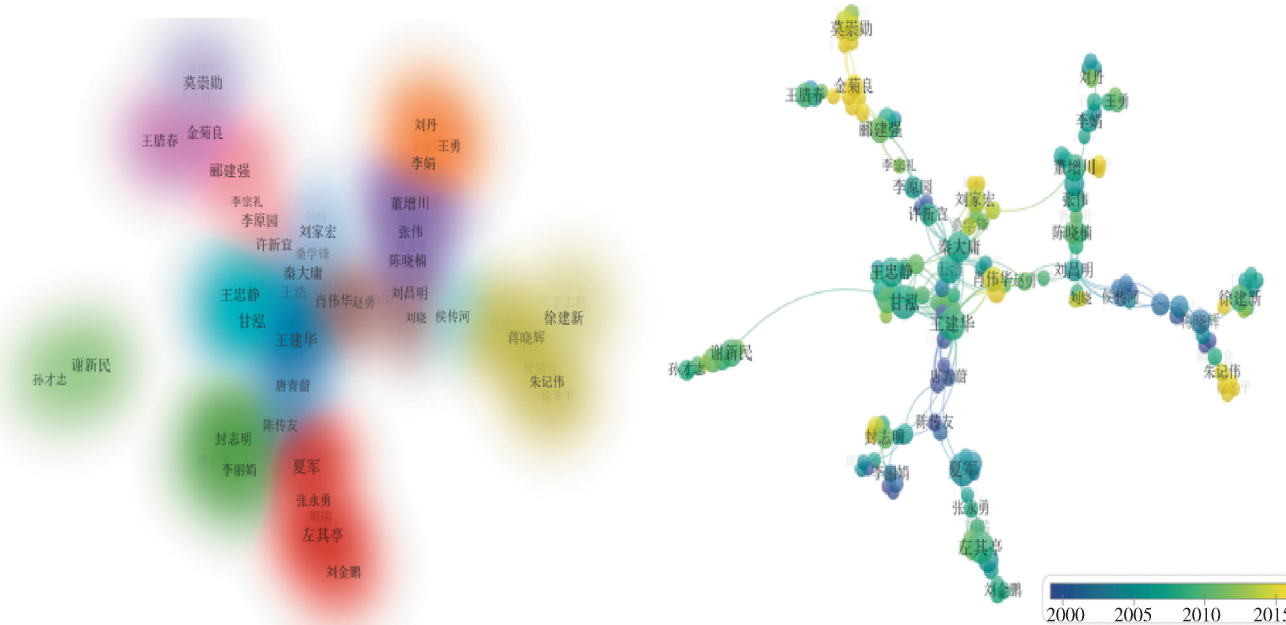
1.4 研究主体

1.4.1 国内研究主体

据统计,CNKI数据库检索到的2558篇文献共包含4175位作者。核心作者是活跃在这一研究领域的代表性学者。依据普赖斯定律的计算公式:

$$m = 0.749n_{\max}^{1/2} \tag{1}$$

式中 $n_{\max}$ 为所统计年限中发表论文最多的作者的发文数,则高产作者就是那些发表论文数在 m 篇以上的作者,由此可确定核心作者群体。统计发现高产作者发文量最多为17篇,故 $m = 3.09$,按照取整原则,高产作者发文量大于等于4篇。通过数据统计与分析,发文量4篇及以上的作者有119位,累计发文681篇,占发文总量的25%,距离普赖斯定律提出的50%相差较大。这说明我国对水资源承载力的研究虽经历了近30年的发展,参与研究的人员也众多,但尚未形成核心作者群和稳定的研究方向,尚需该领域的学者继续努力探索、深入挖掘,发表更多有影响力的研究成果,促进水资源承载力研究的进一步发展。利用VOSviewer软件考察作者的合作情况,取阈值为2且去掉边缘类别,结果如图2所示。在图2(a)中,若作者所处位置颜色越浓、字体越大,则说明作者发表论文数量越多;若作者的姓名标签



(a) 国内作者合著聚类密度 (b) 国内作者合著年代标签

图2 国内作者合著聚类密度和国内作者合著年代标签

靠得越近,则代表合作越密切。由图 2(a)可见,发文量较多的作者呈现出明显的网络特征,说明国内在关于水资源承载力的研究中已开始形成多个产量较高的作者群。图 2(b)呈现了这些主要作者在时间上的分布,标签颜色越接近蓝色,说明该作者发文时间越久远且有的发文持续至今,是该研究领域的早期开拓者;标签颜色越接近黄色,说明该作者发文时间越近,是该研究领域的新近活跃者。

1.4.2 国外研究主体

据统计,WOS 数据库检索的 512 篇文献共包含 1 838 位作者。类似上述国内研究主体分析,根据普赖斯公式计算出 $m = 2.12$,按照取整原则,高产作者发文量大于或等于 3 篇。通过数据统计与分析,发文量 3 篇及以上的作者有 45 位,累计发文 179 篇,占发文总量的 35%,与普赖斯定律提出的 50% 也有一定差距。可见,国外水资源承载力研究领域严格意义上的核心作者群尚未形成,固定作者较少,大部分属于临时性作者,缺少对学科的持久研究和深入

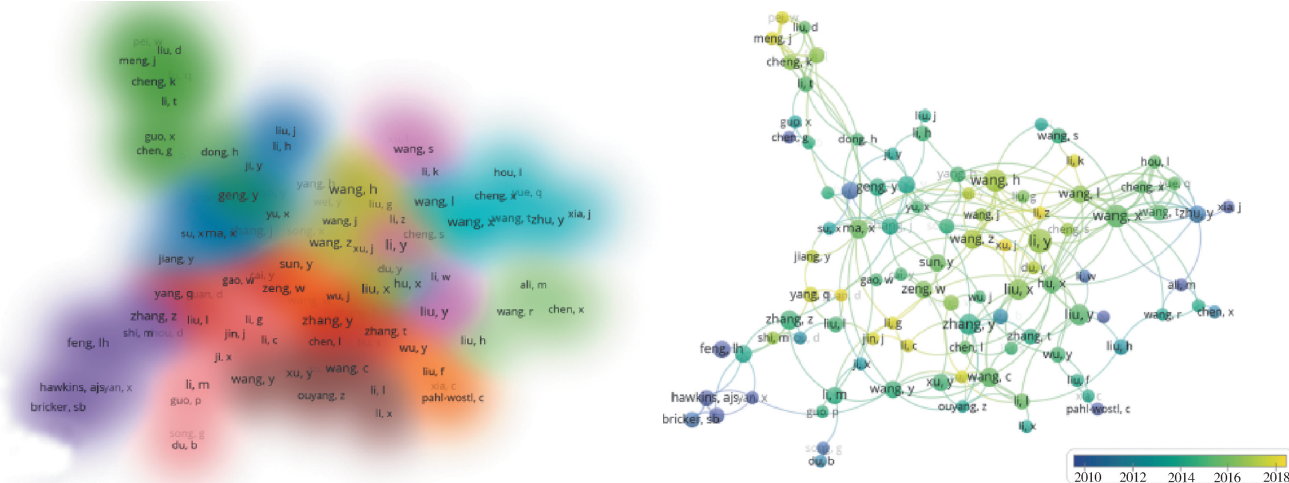
系统探讨。总体而言,国外该研究领域队伍的整体规模与国内相比较小,一些高产学者的影响力没有得到充分发挥,人才队伍的培养和壮大有待进一步加强。利用 VOSviewer 软件考察作者的合作情况,同样取阈值为 2 且去掉边缘类别,如图 3 所示。

由图 3(a)可见,发文量较多的作者呈现出明显的网络特征,说明在国外水资源承载力研究中也已开始形成多个产量较高的作者群。由图 3(b)可见,Feng L H、Hawkins ajs、Zhang L、Xia J 等作者标签颜色接近深蓝色,说明这些作者发文时间较久远且有的持续至今,是该研究领域的先驱。

2 研究热点分析

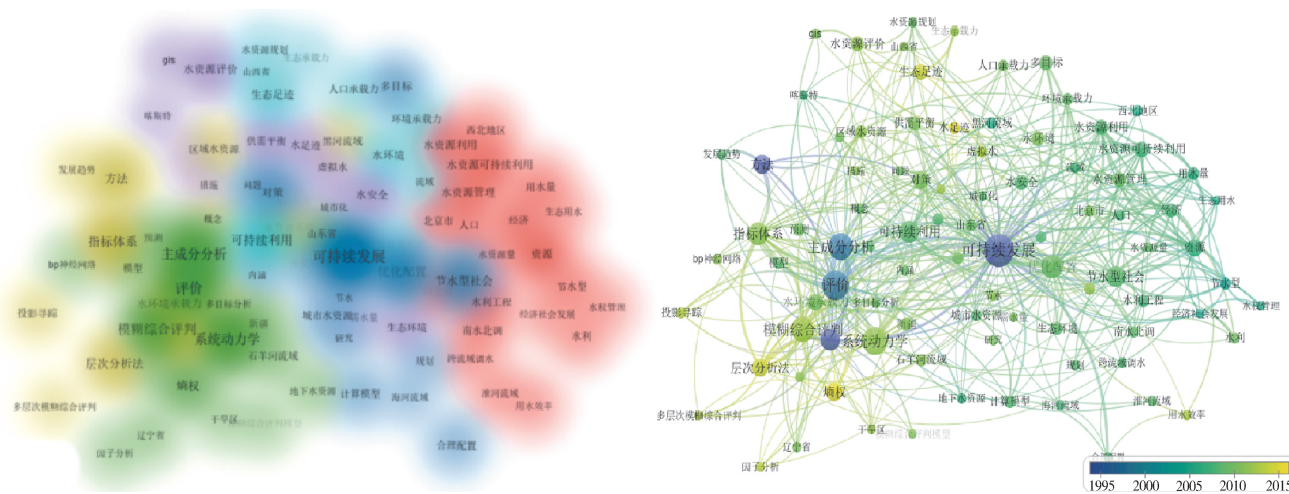
2.1 国内研究热点

运用 VOSviewer 工具取阈值 12 绘制图 4,可发现水资源承载力领域的研究热点^[14]。VOSviewer 聚类分析结果以直观清晰的图形表示,整理其在后台生成的聚类结果文件并删除一些边缘类别(权重较



(a) 国外作者合著聚类密度 (b) 国外作者合著年代标签

图 3 国外作者合著聚类密度和国外作者合著年代标签



(a) CNKI 数据库关键词共现聚类密度 (b) CNKI 数据库关键词共现年代标签

图 4 CNKI 数据库关键词共现聚类密度和 CNKI 数据库关键词共现年代标签

小的类别),可得到水资源承载力研究领域中的6大关键词类簇,形成6个研究主题:水资源管理、水资源承载力评价、可持续发展、水环境承载力评价、水安全、水资源可持续利用,见图4(水资源承载力、水资源、承载力这3个关键词频次过高,影响可视化图谱的可读性,故在图4可视化节点处理时未予显示)。

由图4(a)可知:这6个聚类之间存在一定的混合部分,如主题5“水安全”夹在了主题1“水资源管理”和主题3“可持续发展”之间,说明各研究主题之间存在相互交叉、重合、渗透的部分,这是学术研究中普遍存在的现象,这也有助于水资源承载力研究的深入发展。由图4(b)可知:可持续发展、主成分分析等蓝色字体的关键词是学者们很久以前研究的热点,随着时代的变化,研究重点越来越偏向层次分析法、熵权法、生态足迹等。

2.1.1 水资源管理

图4(a)中红色部分是主题1“水资源管理”。在前期研究中,流域方面侧重水资源管理模式的研究,同时注重考虑流域生态需水问题,如文献[15]将区域水资源承载力评价的风险矩阵方法应用于安徽省淮河流域,为该流域水资源优化配置提供参考;城市方面更注重水资源利用的研究,地理信息系统技术在城市数字化过程中也得到了较广泛的应用^[16],如潘兴瑶等^[17]利用GIS技术建立了研究区水资源承载力指标数据库及水资源承载力评价数据库,实现了区域内水资源承载力的空间差异分析;陶洁等^[18]在中原城市群水资源承载力计算及制约因素分析的基础上,从工程措施和非工程措施两方面提出对策措施。

2.1.2 水资源承载力评价

图4(a)中绿色部分是主题2“水资源承载力评价”。王建华等^[19]提出当一个地区经济社会发展规模达到水资源承载力时,意味着其经济社会需水量达到了极限,同时从水量要素的角度应以保障生态用水为前提,确定地表水可利用量和地下水可开采量阈值。为此,学者们提出了一系列水资源承载力评价方法。金菊良等^[1]把现有的水资源承载力评价方法归为两类:一是从水资源承载力系统中的现象分析入手构建指标体系,以现象为主,忽略水资源承载力系统中各因素间的相互关系,受主观能动性较大,多用于宏观定性判断,如模糊综合评判法^[20]、主成分分析法^[21]、投影寻踪方法^[22]、集对分析法^[23]和层次分析法^[24]等;二是从水资源承载力系统中各因素间的相互作用关系入手,关注现象间的因素联系,如背景分析

法、常规趋势法、多目标决策分析法^[25]、简单定额估算法等。如何合理地建立模拟、评价水资源-经济社会-生态环境复合系统的数学模型是该领域最大难点,目前尚缺乏坚实的基础理论支撑,有待深入探究^[13, 26-27]。

2.1.3 可持续发展

图4(a)中深蓝色部分是主题3“可持续发展”。水资源的开发利用满足当前水资源的承载力要求是初级目标,实现长久的可持续发展才是终期目标。以可持续发展为前提,通过合理配置包括调整水资源在时空及质量上的分布,乃至调整经济社会发展格局,将水资源在生态系统和社会经济系统之间进行平衡分析和优化配置,以便水资源承载力研究成果对社会实践具有更明确的指导作用^[28]。张丽等^[29]针对当前水资源承载力研究存在的问题,提出在可持续发展框架下水资源承载力的研究思路,选用人口及其生活质量作为水资源可持续承载能力指标。基于前人所做的研究,可知以可持续发展为原则的水资源承载力研究是21世纪水资源科学发展的一个重要发展方向,建立一套完善的水资源承载力理论体系,对解决我国经济社会可持续发展中受水制约的重大问题具有长远意义^[30]。

2.1.4 水环境承载力评价

图4(a)中黄色部分是主题4“水环境承载力评价”。2001年10月汪恕诚部长在水利学会成立70周年大会上作了“水环境承载能力分析与调控”学术报告,明确了其概念,辩证地分析了水资源承载力与水环境承载力的关系^[31-33]。水环境承载力是用经济社会的尺度来表征水环境与社会经济活动的关系,实质上它与水资源承载力是辩证统一的,二者都是衡量区域可持续发展的一项重要指标,但水环境承载力较水资源承载力内涵更为广泛,对经济社会发展具有更直接有效的指导意义。同水资源承载力评价一样主要有向量模法^[34]、主成分分析法^[21]、模糊综合评价法^[20]、多目标决策分析法^[25]、指标体系法^[35-37]、系统动力学法^[26]、人工神经网络法^[38]等方法。其中指标体系法易受个人经验影响,评价结果易受人为因素影响,具有较大的主观性,系统动力学法使用较多,但两种方法都处于探索阶段。进行水环境承载力研究需要综合考虑区域系统的特殊性,选择一套可操作、实用的研究方法。

2.1.5 水安全

图4(a)中紫色部分是主题5“水安全”。水安全是支撑社会经济可持续发展的重要基础,水安全问题是当前世界面临的最重要的安全问题之一^[31, 39]。李海辰等^[40]提出国家水资源承载力监测

预警机制是国家水安全保障体系的重要环节,为保障国家水安全提供了重要的理论支撑;史正涛等^[39]针对水安全研究的复杂性、地域差异性,以及目前存在的主要问题,提出应进一步从概念与内涵、评价指标体系、模型和方法等方面对水安全及城市水安全进行研究;李景保等^[41]通过分析主汛期产水量与河湖库容的关系以及水资源量的供需关系,评价了湖南省水安全状态,对于科学建立水安全保障体系具有重要意义;刘颖秋^[42]分析了华北地区水资源对经济社会发展的支撑能力,提出全面推进节水型社会建设,提高水资源的利用效率和效益是解决华北地区供水安全问题的关键举措。

2.1.6 水资源可持续利用

图4(a)中浅蓝色部分是主题6“水资源可持续利用”。水资源具备可持续利用的天然条件,在可持续发展的观念下,水资源开发利用和管理还需要一些自然及社会协调关系、支撑能力及合理的系统结构,水资源能否被合理利用关系到区域经济社会可持续发展的大局,因此水资源可持续利用进行研究十分重要^[43]。

上述6个水资源承载力研究主题中:从水资源管理领域宏观、宽泛地讨论水资源承载力,聚焦到面向可持续发展、深入探讨水资源承载力是主要的发展趋势;水安全是沟通水资源管理和可持续发展的关键桥梁;水资源承载力评价、水环境承载力评价是从质和量两方面度量水安全的重要途径;水资源可持续利用是保障水安全的必要条件。换言之,主题水资源管理可为研究水资源承载力提供丰富的承载评价时空信息,可持续发展可为研究水资源承载力提供承载评价原则信息,水安全可为研究水资源承载力提供承载评价标准信息,水资源承载力评价、水环境承载力评价可为研究水资源承载力提供承载评

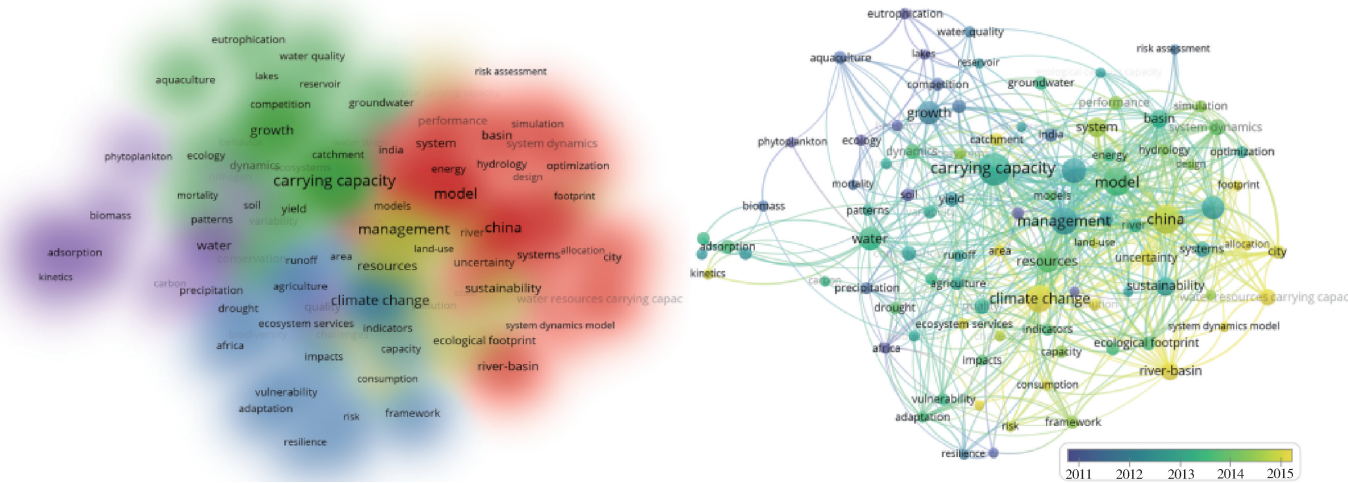
价状态信息,水资源可持续利用可为研究水资源承载力提供承载评价条件信息。基于这些信息,可识别、构建区域水资源承载力评价的主要要素^[43]。

2.2 国外研究热点

运用 VOSviewer 工具取阈值 6 绘制图 5。图 5 显示水资源承载力研究中水资源可持续发展、承载力、气候变化、水资源管理、水质管理、风险评估 6 大 WOS 研究热点类簇,由此可看出国外水资源承载力的研究进展。但由于该研究领域已发表的国际论文与国内相比较少,这些热点趋势正在形成中,所以其聚类程度(图5(a))不如 CNKI 数据库研究热点关键词(图4(a))明显。由图5(b)的颜色变化可知,主题1“水资源可持续发展”与主题3“气候变化”是目前最新的研究热点,而承载力是早期且延续至今的研究热点。

2.2.1 水资源可持续发展

图5(a)中红色部分是主题1“水资源可持续发展”。水是一个区域或国家社会经济发展和环境可持续发展不可缺少的基本资源,在干旱和半干旱地区尤显重要^[44-45]。由于快速的人口增长和经济发展,地表水资源枯竭和地下水超采给许多地区造成了严重的环境问题和有限的经济发展,因此定量评估发展可持续性对区域或国家的管理和规划是一个严峻的挑战^[9-11,46]。Wang 等^[10]以水生态环境承载力(EECC)为核心测度,建立了基于水资源可持续发展的定量评价框架,并应用该方法对海河流域进行数据分析,同时提出新开发的量化生态环境承载力的方法,这有助于促进缺水地区面向可持续发展的资源管理;Ren 等^[47]将生物代谢概念引入区域水资源承载力,提出了区域水资源的代谢理论,基于此建立了综合考虑区域可持续发展原则、社会经济系统特征和水资源特征的评价指标体系,对于水资源



(a) WOS 数据库共现关键词聚类密度

(b) WOS 数据库共现关键词年代标签

图5 WOS 数据库共现关键词聚类密度和 WOS 数据库共现关键词年代标签

的可持续发展具有重要意义。由于研究区域多集中在中国,所以 China 一词权重较大。

2.2.2 承载力

图 5(a) 中绿色部分是主题 2“承载力”。现有研究中出现了水生态承载力、水环境承载力、水质承载力和水资源承载力这 4 种承载力。水生态承载力是一种理想的分析模型和方法,来源于水资源承载力和水环境承载力,包括水资源承载力和水质承载力。在以往的研究中,学者们更多地关注水资源承载力^[12]。水资源承载力概念是 20 世纪 80 年代中后期由中国新疆水资源软科学研究委员会首先提出的,目前国内外对它的定义尚未统一^[48]。有些学者认为它是维持一个良好的可持续社会系统的能力,而有些学者认为它是支撑人类活动用水的阈值^[49-50]。实际上,水资源承载力概念具有自然与社会的双重特征,自然系统与社会系统之间有着显著的协调性^[51]。水资源承载力是一个涉及资源、人口、社会经济、生态环境等多方面因素的典型复杂系统,人类若不能根据水资源承载力许可安排社会经济活动,社会经济的可持续发展就很难实现^[52]。因此,为了合理利用水资源、实现社会经济可持续发展,国外研究中也出现了水资源承载力的多种评价方法,如常见的趋势预测法、主成分分析模型法、系统动力学模型法^[53]、生态足迹法^[54]、多目标评价模型^[55]、模糊综合评价模型^[56]、压力-状态-响应框架法^[57]。

2.2.3 气候变化

图 5(a) 中深蓝色部分是主题 3“气候变化”。目前,气候变化中的全球气候变暖特征被认为是全球最重要的环境问题之一,研究认为未来的气候变化可能会进一步加剧水资源供需矛盾,使得气候变化下的供需水冲突管理已成为水资源可持续管理不可或缺的组成部分。IPCC 第四次和第五次评估报告重新理解了气候变化可能对人类社会和自然系统产生的影响,清楚地表明“水是气候管理的焦点”^[58]。在过去的 20 年中,地球表面温度上升了大约 0.5℃,而当全球平均气温上升大约 2℃ 时,全世界将会有约 59% 的人口面临灌溉用水短缺^[58-59]。气候变化下的系统脆弱性一般理解为一系列生物物理和社会经济因素的函数,IPCC 将其定义为一个系统易受不利因素影响并且无法应对的程度,其中脆弱性指标可用于制定气候变化背景下的水资源管理政策^[58,60]。Jung 等^[60]提出 Delphi 方法是一种将加权函数应用于脆弱性指标的交互式方法,该脆弱性指标包括暴露性、敏感性和气候变化适应能力 3 个部分,其研究结果表明,通过 Delphi 方法确定最终权重因子,可以为政府制定应对气候变化政策提供有力支持。

2.2.4 水资源管理

图 5(a) 中黄色部分是主题 4“水资源管理”。对水资源进行合理科学的管理极为重要^[4,61],在国外研究中水资源承载力是近期提出的一种管理理念,其目的是支持区域社会经济可持续发展。Feng 等^[62]采用系统动力学建模,提出以环境为代价追求经济快速发展和以抑制经济发展促进环境保护的做法都是不可取的,只有需要采取最佳水资源管理方案,有效提高该区域的水资源承载力,同时促进经济发展和环境保护才能产生更好的整体效果。后期研究中 Jin 等^[4]认为区域水资源承载能力预警是水资源管理特别是水安全管理的一个重要调控措施。水环境系统中存在许多不确定性,这些不确定性给水资源管理带来挑战,因此,在复杂的不确定条件下进行有效的水资源管理方案优化十分必要。

2.2.5 水质管理

图 5(a) 中紫色部分是主题 5“水质”。水质管理是水资源管理中的一项,水质承载力与水资源承载力相辅相成,它们一起参与构成水生态承载力,共同决定了水生态系统的可持续发展和社会经济发展。国外研究中不少学者着重于水质管理的研究^[10,63]。Ding 等^[12]指出水质承载力包括社会经济指标和水质可承载的污染物指标,在此基础上建立了城市湖泊水生态承载力的综合概念模型,得出控制污染源是提高城市湖泊水质承载力的关键,为水资源-环境管理提供了参考。Chen 等^[64]引入化学有效能的热力学概念进行水质评价,与传统的主观性指标相比,该方法制定了统一的客观性指标,以全球 72 条河流和 24 个湖泊的水质评价作为详细的案例研究,说明了基于化学计量的指标对水质评价的适应性。Wang 等^[65]结合水质数据,应用一维水质模型模拟铁岭市的水污染物-化学需氧量,应用多目标模型探索水生态承载力,对支持社会经济可持续发展的调整和规划具有重要意义。

2.2.6 风险评估

图 5(a) 中浅蓝色部分是主题 6“风险评估”。水资源系统风险评估研究是保障水资源安全的基础和关键,对水资源系统进行风险评估不仅可减少灾害造成的风险及损失,而且可提高水资源优化配置的效率,可对评价体系中存在的已知和未知风险进行量化,从而采取有效的技术措施,实现水资源系统的可持续发展^[4,66]。对水资源系统的风险进行定性和定量的研究需要选择适当的评价方法,研究多采用组合加权法^[67]、层次分析法^[67]、蒙特卡罗法^[68]和多目标决策法^[69]及一些外围系统观测控制方法。Feng 等^[53]基于信息扩散理论,运用风险分析方法,

建立了水资源短缺风险评价模型,结果表明,与传统模型相比,基于小样本的分析模型更加稳定、有效,并把风险评价结果引入系统动力学,从生态学的角度对水资源承载力进行了分析,具有较高的风险评估可靠性;金菊良等^[68]基于对水文地质和人类活动因素的综合考虑,利用随机模拟和三角模糊数建立了地下水环境系统的综合风险评估方法,该方法以置信区间表示,提供了比现有传统方法更可靠的评估结果信息,可全面反映受各种不确定因素影响的地下水环境系统综合风险评估的实际情况,为水资源系统风险评价提供了新思路。

上述6个水资源承载力研究主题中,水资源管理、水质管理可为研究水资源承载力提供承载评价时空、数量、质量信息,水资源可持续发展可为研究水资源承载力提供承载评价原则信息,承载力可为研究水资源承载力提供承载力概念界定、外延拓展、承载评价状态等信息,气候变化、风险评估可为研究水资源承载力提供承载评价的不确定性条件信息。这些信息有助于识别、构建区域水资源承载力评价的主要要素^[43]。可见,水资源承载力的国内研究热点更关注水资源承载力评价要素的全面性^[70-72],而国外研究热点则更关注水资源承载力评价要素的发展、变化、不确定性。

3 结 语

虽然国内外在水资源承载力研究领域成果丰硕,但目前全球还没有获得较为公认的基础理论体系,水资源承载力研究还需不断深化、拓展。本研究利用VOSviewer文献计量可视化分析方法,通过对水资源承载力研究领域的知识图谱分析,揭示了国内外该研究领域的演变特点与研究热点,且不管是国内还是国外,水资源承载力领域中的各研究热点主题具有关联、重叠、交叉等特点。对此,提出今后的研究重点应该在于:①加强基础理论研究,建立完善的水资源承载力基础理论体系;②加强与生态承载力的结合研究,生态承载力包括水资源承载力、水环境承载力和水质承载力;③加强基于水资源承载力监测评价的水资源动态管理研究,以水资源的可持续利用为中心,达到社会经济的可持续性发展;④加强国内外合作研究,在现有研究方法的基础上进行创新,利用现代大数据技术、空间分析技术、智能科学技术等为水资源承载力的研究提出新思路。

参考文献:

[1] 金菊良,陈梦璐,郦建强,等. 水资源承载力预警研究进展[J]. 水科学进展, 2018, 29(4): 583-596. (JIN

Juliang, CHEN Menglu, LI Jianqiang, et al. Advance in early warning of water resources carrying capacity [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(4): 583-596. (in Chinese))

- [2] 张斌武,康鸿博,关秀翠. 基于虚拟水及营养学的水资源优化配置[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 30-35. (ZHANG Binwu, KANG Hongbo, GUAN Xiucui. Optimized allocation of water resources based on virtual water and nutrition [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(1): 30-35. (in Chinese))
- [3] 李如意,束龙仓,鲁程鹏,等. 济宁市水资源承载能力评价方法的应用与对比[J]. 水资源保护, 2018, 34(6): 65-70. (LI Ruyi, SHU Longcang, LU Chengpeng, et al. Application and comparison of water resources carrying capacity evaluation methods in Jining City [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(6): 65-70. (in Chinese))
- [4] JIN J L, WEI Y M, ZOU L L, et al. Forewarning of sustainable utilization of regional water resources: a model based on BP neural network and set pair analysis [J]. Natural Hazards, 2012, 62(1): 115-127.
- [5] 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. (WANG Hao, QIN Dayong, WANG Jianhua, et al. Study on carrying of water resources in inland arid zone of Northwest China [J]. Journal of Natural Resources, 2004, 19(2): 151-159. (in Chinese))
- [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. (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))
- [7] 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. (LI Lingyue, GAN Hong. On the relationship between rational allocation and the concept of carrying capacity of water resources and sustainable development [J]. Advances in Water Science, 2000, 11(3): 307-313. (in Chinese))
- [8] 赵军凯,赵秉栋. 水资源承载力的研究现状与展望[J]. 河南科技大学学报(社会科学版), 2006, 24(4): 86-89. (ZHAO Junkai, ZHAO Bingdong. Present situation and perspective of study on water resources carrying capacity [J]. Journal of Henan University of Science & Technology(Social Science), 2006, 24(4): 86-89. (in Chinese))
- [9] LIU C, XIA J. Water problems and hydrological research in the Yellow River and the Huai and Hai River basins of China[J]. Hydrological Processes, 2004, 18(12): 2197-2210.
- [10] WANG Z, LUO Y, ZHANG M, et al. 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.
- [11] GUNASEKARA N K, KAZAMA S, YAMAZAKI D, et al. Water conflict risk due to water resource availability and unequal distribution [J]. Water Resources Management, 2014, 28(1):169-184.
- [12] DING L, CHEN K L, CHENG S G, et al. Water ecological carrying capacity of urban lakes in the context of rapid urbanization:a case study of East Lake in Wuhan [J]. Physics & Chemistry of the Earth Parts A/b/c, 2015, 89/90:104-113.
- [13] 张丽敏,王佳敏. 基于文献计量的国内水资源承载力研究进展与评价[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(4):56-60. (ZHANG Limin, WANG Jiamin. Research progress and evaluation for the water resources carrying capacity based on the bibliography method[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2012, 23(4):56-60. (in Chinese))
- [14] VAN ECK N J, WALTMAN L. VOSviewer: a computer program for bibliometric mapping [J]. Scientometrics, 2010, 84(2):523-538.
- [15] 金菊良,董涛,郦建强,等. 区域水资源承载力评价的风险矩阵方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(2):46-50. (JIN Juliang, DONG Tao, LI Jianqiang, et al. Risk matrix method for evaluating regional water resources carrying capacity [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(2):46-50. (in Chinese))
- [16] 韩宇平,袁皖华,肖恒. 水科学研究的关键词共词聚类分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2015, 36(4):20-25. (HAN Yuping, YUAN Wanhua, XIAO Heng. Research review on water science based on co-word cluster analysis of keywords [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2015, 36(4):20-25. (in Chinese))
- [17] 潘兴瑶,夏军,李法虎,等. 基于 GIS 的北方典型区水资源承载力研究:以北京市通州区为例[J]. 自然资源学报, 2007, 22(4):664-671. (PAN Xingyao, XIA Jun, LI Fahu, et al. Applied study on evaluation method for water resources carrying capacity based on GIS techniques in typical north district [J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(4):664-671. (in Chinese))
- [18] 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))
- [19] 王建华,姜大川,肖伟华,等. 水资源承载力理论基础探析:定义内涵与科学问题[J]. 水利学报, 2017, 48(12):1399-1409. (WANG Jianhua, JIANG Dachuan, XIAO Weihua, et al. Study on theoretical analysis of water resources capacity: Definition and scientific topics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12):1399-1409. (in Chinese))
- [20] 王学全,卢琦,李保国. 应用模糊综合评判方法对青海省水资源承载力评价研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6):944-949. (WANG Xuequan, LU Qi, LI Baoguo. Applying fuzzy comprehensive evaluation method to evaluate water resources carrying capacity in Qinghai province [J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(6):944-949. (in Chinese))
- [21] 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. (FU Xiang, JI Changming. A comprehensive evaluation of the regional water resource carrying capacity: application of main component analysis method [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 1999, 8(2):168-173. (in Chinese))
- [22] 马峰,王千,蔺文静,等. 基于指标体系投影寻踪模型的水资源承载力评价:以石家庄为例[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(3):62-66. (MA Feng, WANG Qian, LIN Wenjing, et al. Evaluation of water resources carrying capacity based on index system with parameter projection pursuit model: a case study in Shijiazhuang [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(3):62-66. (in Chinese))
- [23] 胡启玲,董增川,杨雁飞,等. 基于联系数的水资源承载力状态评价模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(5):425-432. (HU Qiling, DONG Zengchuan, YANG Yanfei, et al. State evaluation model of water resources carrying capacity based on connection number [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(5):425-432. (in Chinese))
- [24] 金菊良,魏一鸣. 复杂系统广义智能评价方法与应用[M]. 北京:科学出版社, 2007.
- [25] 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. Multi-objective analysis and evaluation model of regional water resources carrying capacity and its application [J]. Water Resources Protection, 2006, 22(6):9-13. (in Chinese))
- [26] 王丽,毕佳成,向龙,等. 基于“五水共治”规划的水资源承载力评估[J]. 水资源保护, 2016, 32(2):21-25. (WANG Li, BI Jiacheng, XIANG Long, et al. Evaluation of water resources carrying capacity based on plan of co-governance on five water categories [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2):21-25. (in Chinese))
- [27] 袁艳梅,沙晓军,刘煜晴,等. 改进的模糊综合评价法在水资源承载力评价中的应用[J]. 水资源保护, 2017, 33(1):52-56. (YUAN Yanmei, SHA Xiaojun, LIU Yuqing, et al. Application of improved fuzzy comprehensive evaluation method to water resources carrying capacity

- evaluation[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 52-56. (in Chinese))
- [28] 孟珍珠,唐德善,魏宇航,等. 和谐论在水资源承载力综合评价中的应用[J]. 水资源保护, 2016, 32(3): 54-58. (MENG Zhenzhu, TANG Deshan, WEI Yuhang, et al. Application of harmony theory to evaluation of water resources carrying capacity [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 54-58. (in Chinese))
- [29] 张丽,董增川,张伟. 水资源可持续承载力概念及研究思路探讨[J]. 水利学报, 2003(10): 108-112. (ZHANG Li, DONG Zengchuan, ZHANG Wei. Discussion on the concept and Rresearch ideas of sustainable bearing capacity of water resources [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(10): 108-112. (in Chinese))
- [30] 李娟,王丽萍,纪昌明. 可持续发展观念下的水资源承载力理论研究与展望[J]. 科技进步与对策, 2004, 21(11): 165-167. (LI Juan, WANG Liping, JI Changming. Study on the theory and perspective of the carrying capacity of water resources based sustainable development view [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2004, 21(11): 165-167. (in Chinese))
- [31] 王文圣,丁晶,李跃清,等. 大尺度下的水安全问题探索[J]. 高原山地气象研究, 2008, 28(3): 54-58. (WANG Wensheng, DING Jing, LI Yueqing, et al. The exploration on the issue of water security in large scale [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2008, 28(3): 54-58. (in Chinese))
- [32] 侯丽敏,岳强,王彤. 我国水环境承载力研究进展与展望[J]. 环境保护科学, 2015, 41(4): 104-108. (HOU Limin, YUE Qiang, WANG Tong. Research and prospect of the theoretical framework of water environmental carrying capacity in China [J]. Environmental Protection Science, 2015, 41(4): 104-108. (in Chinese))
- [33] 姜大川,肖伟华,范晨媛,等. 武汉城市圈水资源及水环境承载力分析[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(5): 761-768. (JIANG Dachuan, XIAO Weihua, FAN Chenyuan, et al. Research on water resources and water environment carrying capacities of Wuhan city circle [J]. Resources and Environment in Yangtze Basin, 2016, 25(5): 761-768. (in Chinese))
- [34] 沈珍瑶,祝莹欣,贾超,等. 基于动态模拟递推算法和向量模法的水环境承载力计算方法[J]. 水资源保护, 2015, 31(6): 32-39. (SHEN Zhenyao, ZHU Yingxin, JIA Chao, et al. Calculation method of water environment carrying capacity based on dynamic simulation - recursion algorithm and vector norm method [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(6): 32-39. (in Chinese))
- [35] 贾振邦,赵智杰,李继超,等. 本溪市水环境承载力及指标体系[J]. 环境保护科学, 1995, 73(3): 8-11. (JIA Zhenbang, ZHAO Zhijie, LI Jichao, et al. The carrying capacity of water environment and the standard system Benxi [J]. Environmental Protection Science, 1995, 73(3): 8-11. (in Chinese))
- [36] 聂相田. 水资源管理系统模糊与随机分析方法及应用研究[D]. 大连:大连理工大学, 1999.
- [37] 余进祥,刘娅菲,钟小兰. 鄱阳湖水环境承载力及主要污染源研究[J]. 江西农业学报, 2009, 21(3): 90-93. (YU Jinxiang, LIU Yafei, ZHONG Xiaolan. Study on water environment carrying capacity and main pollution sources of Poyang Lake [J]. Journal of Jiangxi Agriculture, 2009, 21(3): 90-93. (in Chinese))
- [38] 胡荣祥,徐海波,任小松,等. BP神经网络在城市水环境承载力预测中的应用[J]. 人民黄河, 2012, 34(8): 79-81. (HU Rongxiang, XU Haibo, REN Xiaosong, et al. Application of BP neural network to water environment carrying capacity of city river [J]. Yellow River, 2012, 34(8): 79-81. (in Chinese))
- [39] 史正涛,黄英,刘新有. 水安全及城市水安全研究进展与趋势[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(4): 20-27. (SHI Zhengtao, HUANG Ying, LIU Xinyou. Research progress and tendency in water security and city water security [J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(4): 20-27. (in Chinese))
- [40] 李海辰,王志强,廖卫红,等. 中国水资源承载能力监测预警机制设计[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(S1): 316-319. (LI Haichen, WANG Zhiqiang, LIAO Weihong, et al. Design and decision of monitoring warning mechanisms for carrying capacity of the national water resources [J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(S1): 316-319. (in Chinese))
- [41] 李景保,卢承志,梁成军. 湖南省水安全问题研究[J]. 水利学报, 2003, 34(7): 52-57. (LI Jingbao, LU Chengzhi, LIANG Chengjun. Study on water security in Hunan province [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(7): 52-57. (in Chinese))
- [42] 刘颖秋. 华北地区经济社会发展的水安全问题[J]. 中国水利, 2004, 55(8): 22-23. (LIU Yingqiu. Relationship of water safety with social and economic development in north China [J]. China Water Resources, 2004, 55(8): 22-23. (in Chinese))
- [43] 金菊良,董涛,酆建强,等. 不同承载标准下水资源承载力评价[J]. 水科学进展, 2018, 29(1): 31-39. (JIN Juliang, DONG Tao, LI Jianqiang, et al. Water resources carrying capacity evaluation method under different carrying standards [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(1): 31-39. (in Chinese))
- [44] OBOT J U. The spatial perspective of water resource management and economic development in Nigeria [J]. Geojournal, 1984, 9(4): 369-376.
- [45] MENG L, CHEN Y, LI W, et al. Fuzzy comprehensive evaluation model for water resources carrying capacity in Tarim River Basin, Xinjiang, China [J]. Chinese Geographical Science, 2009, 19(1): 89-95.
- [46] YANG Q, ZHANG F, JIANG Z, et al. Assessment of water resource carrying capacity inkarst area of Southwest China [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(1): 1-8.
- [47] REN C, GUO P, LI M, et al. An innovative method for water resources carrying capacity research: metabolic

- theory of regional water resources [J]. Journal of Environmental Management, 2016, 167: 139-146.
- [48] 金菊良, 沈时兴, 郦建强, 等. 基于联系数的区域水资源承载力评价与诊断分析方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(1): 1-9. (JIN Juliang, SHEN Shixing, LI Jianqiang, et al. Assessment and diagnosis analysis method for regional water resources carrying capacity based on connection number[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(1): 1-9. (in Chinese))
- [49] HARRIS J M, KENNEDY S. Carrying capacity in agriculture: global and regional issues [J]. Ecological Economics, 1999, 29(3): 443-461.
- [50] KUYLENTIERNER J L, BJORKLUND G, NAJLIS P. Sustainable water future with global implications; everyone's responsibility [J]. Natural Resources Forum, 2010, 21(3): 181-190.
- [51] GIUPPONI C, MYSIAK J, FASSION A, et al. MULINO-DSS: a computer tool for sustainable use of water resources at the catchment scale [J]. Mathematics & Computers in Simulation, 2004, 64(1): 13-24.
- [52] GONG L, JIN C. Fuzzy comprehensive evaluation for carrying capacity of regional water resources [J]. Water Resources Management, 2009, 23(12): 2505-2513.
- [53] FENG L H, HUANG C F. A Risk Assessment model of water shortage based on information diffusion technology and its application in analyzing carrying capacity of water resources [J]. Water Resources Management, 2008, 22(5): 621-633.
- [54] WACKERNAGEL M, MONFREDA C, DEUMLING D. Ecological footprint of nations, 2002 update [J]. Quellen Und Forschungen Aus Italienischen Archiven Und Bibliotheken, 2002, 91(1): 1-29.
- [55] HUA F G, GUI H Y, YAO X U. Research on the multi-objective evaluation model of regional water resources carrying capacity and its application [J]. Water Resources Protection, 2006.
- [56] 郝光玲, 王烜, 罗阳, 等. 基于改进的综合评价模型的北京市水资源短缺风险评价[J]. 水资源保护, 2017, 33(6): 27-31. (HAO Guangling, WANG Xuan, LUO Yang, et al. Assessment of water shortage risk in Beijing based on improved comprehensive evaluation model [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(6): 27-31. (in Chinese))
- [57] WANG T, XU S. Dynamic successive assessment method of water environment carrying capacity and its application [J]. Ecological Indicators, 2015, 52: 134-146.
- [58] AL-KALBANI M S, PRICE M F, O' HIGGINS T, et al. Integrated environmental assessment to explore water resources management in Al Jabal Al Akhdar, Sultanate of Oman [J]. Regional Environmental Change, 2016, 16(5): 1345-1361.
- [59] ROCKSTROM J, KARLBERG L, HOFF H, et al. Future water availability for global food production: the potential of green water for increasing resilience to global change [J]. Water Resources Research, 2009, 45(7): 142-143.
- [60] JUNG Y, CHOI M. Survey-based approach for hydrological vulnerability indicators due to climate change: a case study of small-scale rivers [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2012, 48(2): 10.
- [61] SONG X M, KONG F Z, ZHAN C S. Assessment of water resources carrying capacity in Tianjin City of China [J]. Water Resources Management, 2011, 25(3): 857-873.
- [62] FENG L H, ZHANG X, LUO G. Research on the risk of water shortages and the carrying capacity of water resources in Yiwu, China [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2009, 15(4): 13.
- [63] MAQSOOD I, HUANG G H, YEOMANS J S. An interval-parameter fuzzy two-stage stochastic program for water resources management under uncertainty [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 167(1): 208-225.
- [64] CHEN G Q, JI X. Chemical exergy based evaluation of water quality [J]. Ecological Modelling, 2007, 200(1/2): 259-268.
- [65] WANG S, XU L, YANG F, et al. Assessment of water ecological carrying capacity under the two policies in Tieling City on the basis of the integrated system dynamics model [J]. Science of the Total Environment, 2014, 472: 1070-1081.
- [66] FU Q, GONG F, JIANG Q, et al. Risk assessment of the city water resources system based on Pansystems Observation-Control Model of Periphery [J]. Natural Hazards, 2014, 71(3): 1899-1912.
- [67] ZHAO J, JIN J, ZHU J, et al. Water resources risk assessment model based on the subjective and objective combination weighting methods [J]. Water Resources Management, 2016, 30(9): 3027-3042.
- [68] 金菊良, 刘丽, 汪明武, 等. 基于三角模糊数随机模拟的地下水环境系统综合风险评价模型 [J]. 地理科学, 2011, 31(2): 143-147. (JIN Juliang, LIU Li, WANG Mingwu, et al. Comprehensive risk assessment method for groundwater environment system based on stochastic simulation and triangular fuzzy numbers [J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(2): 143-147. (in Chinese))
- [69] 韩宇平, 阮本清, 汪党献. 区域水资源短缺的多目标风险决策模型研究 [J]. 水利学报, 2008, 39(6): 667-673. (HAN Yuping, RUAN Benqing, WANG Dangxian. Multi-objective risk decision-making model for regional water shortage [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(6): 667-673. (in Chinese))
- [70] 叶海焯, 董增川, 杭庆丰, 等. 盐城市水资源承载状态预警研究 [J]. 水利经济, 2018, 36(5): 31-35. (YE Haichao, DONG Zengchuan, HANG Qingfeng, et al. Early warning of carrying status of water resources in Yancheng City [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(5): 31-35. (in Chinese))

(下转第 57 页)

- [10] 谢平,雷红富,陈广才,等. 基于 Hurst 系数的流域降雨时空变异分析方法[J]. 水文,2008,28(5):6-10. (XIE Ping, LEI Hongfu, CHEN Guangcai, et al. A Spatial and temporal variation analysis method of watershed rainfall based on Hurst Coefficient [J]. Journal of China hydrology, 2008, 28(5):6-10. (in Chinese))
- [11] 谢平,刘媛,杨桂莲,等. 乌力吉木仁河三级区水资源变异及归因分析[J]. 水文,2012,32(2):40-43. (XIE Ping, LIU Yuan, YANG Guilian, et al. Attribution analysis of water resources alteration in the third grade Wulijimurenhe[J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(2):40-43. (in Chinese))
- [12] 刘奎建,丁志宏. 基于 EMD 的北洛河天然年径流量变化特征分析[J]. 中国农村水利水电,2008,10:36-38. (LIU Kuijian, DING Zhihuang. Fluctuation characteristic analysis of natural annual runoff time series in the beiluhe river based on EMD[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008, 10:36-38. (in Chinese))
- [13] 黄强,孔波,樊晶晶. 水文要素变异综合诊断[J]. 人民黄河,2016,10(38):18-22. (HUANG Qiang, KONG Bo, FAN Jingjing. Comprehensive diagnosis of variation of hydrological elements [J]. Yellow River, 2016, 10(38):18-22. (in Chinese))
- [14] 郭巧玲,韩振英,丁斌,等. 窟野河流域径流变化及其影响因素研究[J]. 水资源保护,2017,33(5):75-80. (GUO Qiaoling, HAN Zhenying, DING Bin, et al. Study of runoff variation characteristics and influence factors in Kuye River [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5):75-80. (in Chinese))
- [15] 谢平,张波,李彬彬,等. 基于极值同频率法的非一致性年径流过程设计方法:以跳跃变异为例[J]. 水利学报,2015,46(7):828-835. (XIE Ping, ZHANG Bo, LI Binbin, et al. Inconsistent annual runoff process design method based on extreme value with common frequency: a case study in jump variation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(7):828-835. (in Chinese))
- [16] 樊晶晶,黄强,刘登峰,等. 人类活动和气候变化对北洛河径流变化的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(1):221-234. (FAN Jingjing, HUANG Qiang, LIU Dengfeng, et al. Impact of climate change and human activity on the variation of runoff in Beiluhe River [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2016, 44(1):221-234. (in Chinese))
- [17] YUE S, PILON P, PHINNEY B, et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series [J]. Hydrological Processes, 2002, 16(9):1807-1829.
- [18] HAMED K H, RAMACHANDRA R A. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data [J]. Journal of Hydrology, 1998, 204(1):182-196.
- [19] 张建业,王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [20] 吴丽,张爱静. 气候变化和人类活动对大凌河上游流域径流的影响[J]. 水利水电科技进展,2016,36(2):10-15. (WU Li, ZHANG Aijing. Effects of climate change and human activities on runoff in upper Daling River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(2):10-15. (in Chinese))
- [21] 樊晶晶. 变化环境下水文要素变异研究[D]. 西安:西安理工大学,2016.
- [22] 刘斌,李欣. 人类活动对北洛河流域水土流失治理的影响[J]. 人民黄河,2001,23(2):15-17. (LIU Bin, LI Xin. Influence of human activities on control of soil and water loss in Beiluo River Basin [J]. Yellow River, 2001, 23(2):15-17. (in Chinese))
- [23] 秦伟,朱清科,刘广全,等. 北洛河上游生态建设的水沙调控效应[J]. 水利学报,2010,41(11):1325-1332. (QIN Wei, ZHU Qinke, LIU Guangquan, et al. Regulation effects of runoff and sediment of ecological conservation in the upper reaches of Beiluo River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(11):1325-1332. (in Chinese))
- [24] 栗晓玲,梁箴. 关中地区气象水文综合干旱指数及干旱时空特征[J]. 水资源保护,2019,35(4):17-23. (SU Xiaoling, LIANG Zheng. Meteorology-hydrology drought index and spatial and temporal characteristics of drought in Guanzhong area [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4):17-23. (in Chinese))
- [25] 徐宗学,顾晓昀,刘麟菲. 渭河流域河流健康调查与评价[J]. 水资源保护,2018,34(1):1-7. (XU Zongxue, GU Xiaoyun, LIU Linfei. Investigation and assessment on river health of Weihe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(1):1-7. (in Chinese))

(收稿日期:2019-06-29 编辑:彭桃英)

(上接第24页)

- [71] 胡林凯,崔东文. 基于 SBO-PP 模型的水资源可持续发展能力评价模型及应用[J]. 水利经济,2017,35(5):7-11. (HU Linkai, CUI Dongwen. Evaluation model for sustainable development capacity of water resources based on SBO-PP model and its application [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2017, 35(5):7-11. (in Chinese))

- [72] 王晗,余文学,贾亦真. 郑州市水资源承载力综合评价[J]. 水利经济,2018,36(6):57-61. (WANG Han, YU Wenxue, JIA Yizhen. Comprehensive evaluation of carrying capacity of water resources in Zhengzhou City [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(6):57-61. (in Chinese))

(收稿日期:2019-01-26 编辑:彭桃英)