

文章编号:0559-9350(2017)12-1399-11

## 水资源承载力理论基础探析：定义内涵与科学问题

王建华, 姜大川, 肖伟华, 陈 琰, 胡 鹏

(流域水循环模拟与调控国家重点实验室 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 水资源承载力是评判水资源与经济社会及生态环境之间是否协同发展的一项综合指标, 研究水资源承载力对实现人水和谐具有重要的意义。在综述水资源承载力研究进展基础上, 以现阶段人类活动对水资源要素利用和水资源系统扰动的主要方式为出发点, 从水量、水质、水域空间和水流状态4个维度赋予了水资源承载力新的内涵, 并基于新内涵构建了水资源承载力评价指标体系。认为在水量上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; 在水质上应满足水功能区划水质目标及生物多样性的需求, 确定保障鱼类等正常生长的浓度阈值; 在水域空间上应统筹考虑防洪、生态、景观等需求, 确定不同降水条件下的适宜水域面积阈值; 在水流状态上应侧重水系连通对水生态的影响, 确定不同水系连通指标的阈值。最后, 指出水资源承载力“量-质-域-流”四维演变机制、“水资源-经济社会-生态环境”系统的承载弹性阈值、经济社会发展与生态环境保护之间的“平衡点”以及水资源承载力调控机制是水资源承载力研究的四大关键科学问题。

**关键词:** 水资源承载力; 水域空间; 水流状态; 定义内涵; 科学问题

**中图分类号:** TV213

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.20170651

### 1 研究背景

随着我国水事活动范围和程度的增加, 水资源数量、水环境容量及水生态空间约束日益显现。2015年, 我国用水总量超过6 000亿 $m^3$ <sup>[1]</sup>, 大规模的取用水导致河道干涸、地下水超采; 我国废水排放量超过700亿 $t$ <sup>[2]</sup>, 大量的废污水排放导致部分水体功能丧失; 快速城市化建设导致水域空间不断缩小, 由于围湖造田等原因造成的湖泊萎缩面积占萎缩总面积的 $2/3$ <sup>[3]</sup>; 我国有超过98 000座水库<sup>[4]</sup>, 水能资源的开发阻隔了河流连通性, 生物多样性面临严重的威胁。究其根源是由于人类经济社会活动对水资源系统的过度干扰和影响, 造成了“水资源-经济社会-生态环境”三大系统之间发展演化的失衡。

“水资源-经济社会-生态环境”系统之间是相互影响的: 水资源系统为经济社会发展提供所必须的水量, 涉水经济社会活动又改变水循环过程; 生态系统为经济社会系统提供生存与发展空间, 并容纳经济社会系统的代谢废物; 生态系统是水资源演变的主要载体, 同时, 水资源又是生态环境的控制性要素。在水资源开发利用过程中, 生态环境系统与经济社会系统在分配水资源上往往存在着此消彼长的矛盾对立关系, 为了协调两者用水冲突, 实现人水和谐, 必须考虑水资源系统的承载能力。

目前, 受传统水资源概念的约束, 对水资源承载力研究多集中于水量、水质两个维度, 但现阶段人类活动对水资源要素利用和水资源系统扰动的方式远不止如此。因此, 亟需赋予水资源承载力新的内涵, 对建立水资源承载力基础理论体系具有重要的意义。

收稿日期: 2017-07-04; 网络出版日期: 2017-12-26

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20171226.0927.001.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401300); 国家杰出青年科学基金项目(51625904)

作者简介: 王建华(1972-), 男, 江苏海安人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水资源领域研究。E-mail: wjh@iwhr.com

通讯作者: 肖伟华(1981-), 男, 湖南永兴人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水资源领域研究。E-mail: xwsen998@163.com

## 2 水资源承载力研究进展

**2.1 水资源承载力概念** 承载力是一个物理概念,指物体在不产生任何破坏时所能承受的最大负荷<sup>[5]</sup>。1921年, Park等<sup>[6]</sup>首先将承载力概念引入到人类生态学领域,认为可以根据食物资源确定一个区域承载的人口。20世纪70年代,环境恶化、人口膨胀等问题的出现,产生了土地承载力等概念<sup>[7]</sup>,其中,以 Meadows等<sup>[8]</sup>所著的《增长的极限》最为代表。1985年,联合国教科文组织(UNESCO)提出了资源承载力的定义<sup>[9]</sup>。随后,可持续发展概念提出,承载力成为探讨可持续发展问题的主体内容之一。1995年, Arrow等<sup>[10]</sup>发表的《经济增长、承载力和环境》,引起了巨大反响。水资源承载力(water resources carrying capacity)是承载力概念在水资源领域的具体应用,国外往往以“水资源供需比(ratio of water supply to water demand)”<sup>[11]</sup>、“可利用水量(water availability)”<sup>[12]</sup>等概念出现。如1998年, Falkenmark等<sup>[12]</sup>从政策定位和人类的适应性角度来研究如何应对水安全问题时,采用了“可利用水量(water availability)”这一概念来表达水资源承载力涵义;2004年, Ngana等<sup>[13]</sup>在坦桑尼亚东北部水资源综合管理战略研究中,认为当地的水资源已不能满足用水需求,并分析了其没有得到可持续发展的原因;2011年, Liu等<sup>[14]</sup>通过计算宁波市水资源可利用量、适宜建设土地资源量、大气环境容量(SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>)、水环境容量(COD、氨氮)、综合叶面积指数与森林面积、人均GDP与环境保护投资占GDP比例等11项指标,确定了宁波市环境承载力,为水资源承载力综合评价提供了经验借鉴;2013年, Milano等<sup>[11]</sup>采用“水资源供需比”,评估了埃布罗河流域水资源满足现状与未来需求的能力;2016年, Ait-Aoudia等<sup>[15]</sup>基于需水因素和供水因素的考虑,确定了阿尔及尔水资源可以支撑的最大人口数。

在国内,施雅风院士于20世纪90年代初明确提出水资源承载力概念<sup>[16]</sup>,迄今,我国已取得了一定的研究成果<sup>[17-29]</sup>,其历程大致可分为5个阶段(图1)。

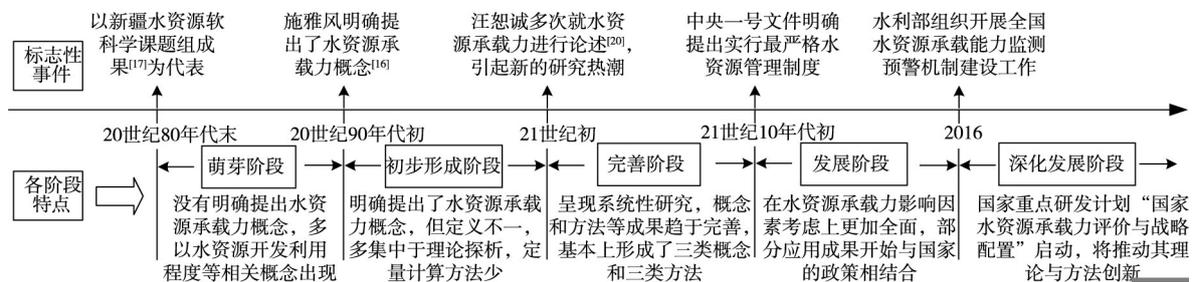


图1 国内水资源承载力研究历程

目前,对水资源承载力概念可归纳为3种观点:第一种观点是水资源开发规模论,认为水资源承载力是在一定的生产力和科技水平下,通过水资源配置使经济社会与生态环境协调发展的水资源开发利用的最大规模<sup>[19]</sup>;第二种观点是水资源支持持续发展能力论,认为水资源承载力是在维系生态环境良性循环的前提下,以一定的科技水平为依据,水资源支撑经济社会可持续发展的最大能力<sup>[22]</sup>。第三种观点是水资源承载最大人口论,认为水资源承载力是在某一具体的发展阶段下,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条件下,区域经济社会发展的最大人口容量<sup>[23]</sup>。

**2.2 水资源承载力评价指标** 评价指标一般可分为压力指标、状态指标和响应指标3类<sup>[30]</sup>,其中,压力指标反映的是经济社会发展对水资源要素的利用和对水资源系统的扰动情况;状态指标反映的是一定时间阶段内水资源系统在压力作用下所处的状态及变化情况;响应指标反映的是人类通过调控措施来减轻和预防人类活动对生态环境造成的负面影响。详细评价指标如图2所示。

**2.3 水资源承载力研究方法** 水资源承载力研究方法日趋多样化,大致可归纳为三大类:经验公式法、指标体系评价法和系统分析法。(1)经验公式法。经验估算法是研究人员依据专业知识和经验对

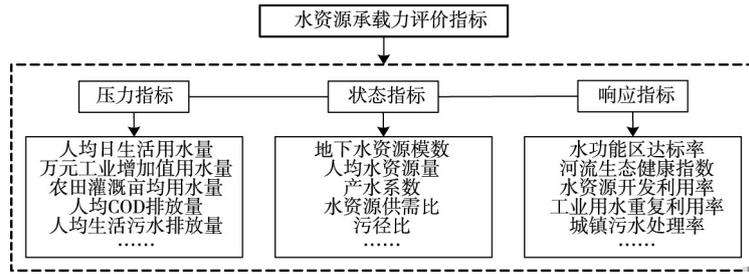


图2 水资源承载力评价指标

区域的水资源承载力进行估算，主要包括类比分析法、趋势分析法和定额分析法等。该类方法对水资源承载力影响因素考虑不足，更多考虑的是单项影响因子的发展趋势，无法体现“水资源-经济社会-生态环境”系统间的相互作用与联系。评价指标多以可承载人口、适宜绿洲面积<sup>[31]</sup>等出现，方法简单、便于推广，但具有一定的主观性，对环境发生变化的动态承载很难计算或把握，对水资源承载力调控方案的技术支撑不足，调控方案很难量化；(2)指标体系评价法。指标体系评价法通过建立指标体系，对水资源承载力进行综合评价，主要有模糊综合评价法、投影寻踪法和主成分分析法等。该类方法对数学理论应用比较深入，充分考虑了水资源承载力影响因素，如水资源可利用量、水环境状况、生产力水平、产业结构、科学技术水平等，并且考虑了水资源承载力主体与客体间的耦合作用，如水资源系统的供水保证程度、用水分配比例。但指标选择难以统一，对水资源承载力只能作出定性评价。在调控方面，依据建立的指标体系和评价结果，可以从优化区域水资源配置、多种水源统筹调配等方面提出提升区域水资源承载力措施，从提高用水效率、调整产业结构、控制人口增长、加强用水管理等方面来确定水资源承载负荷的调控方案；(3)系统分析法。系统分析法通过建立一个复杂的系统，采用不同方法或模型进行水资源承载力分析，主要有目标决策分析法、系统动力学法和“压力-状态-响应(PSR)”模型等。该类方法从水资源系统整体性、动态性和多目标性出发，能够定量分析“水资源-经济社会-生态环境”三大系统的内在联系，不是简单地给出流域/区域水资源所能承载人口或经济规模的上限，而是反映出经济社会发展与资源环境之间的联系。在评价分析上融入了决策者的思想，可以考虑经济社会发展的不同目标。在调控方面，一般采取“卸荷”和“强载”双向调控措施，通过系统内各组成部分的相互关系来检验决策者提出的各种调控方案是否具有可持续性。

### 3 水资源承载力内涵认知及评价指标体系构建

自然变化和人类活动不断影响着“水资源-经济社会-生态环境”三大系统的互馈关系，从而影响水资源承载力(图3)。就现阶段来看，人类活动对水资源要素的利用主要体现在水资源数量、水环境容量、水域空间和水能资源等方面，因此，对水资源系统的扰动也相应地体现在数量的消耗、质量的污染、空间的挤占和流场的改变等方面。未来，随着人类活动对水资源要素利用方式的进一步拓展，对水资源系统的扰动方式可能也会相应地增加。从水资源承载力主体来说，水资源承载力直接与水资源可利用量有本质的联系，而水资源可利用量又受到水量、水质和水域空间的限制。从水资源承载力客体来说，水资源承载力是建立在生态系统完整的基础上，而生态系统又受到生态需水、水质、水域空间和水流状态的影响，基于经济社会发展的水资源配置也对水资源承载力有着重要的影响。不少学者已经对水资源承载力经济社会内涵和生态内涵进行了解析<sup>[21, 32]</sup>，限于篇幅，不作详细描述，主要以现阶段人类活动对水资源要素利用和水资源系统扰动的主要方式为出发点，从水量、水质、水域空间和水流状态4个维度来解析水资源承载力内涵。

**3.1 维度一：水量** 水资源承载力在水量上具有极限的涵义，即当一个流域/区域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。在水量维度，应侧重水资源的开发利

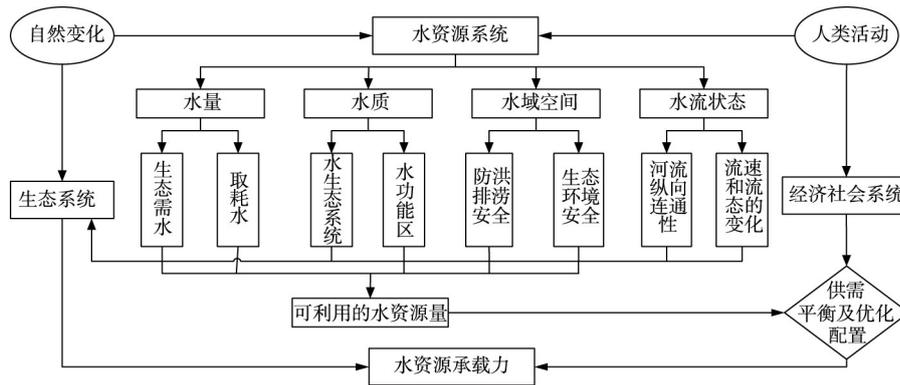


图3 水资源承载力各系统关系示意

用，确定地表水可利用量和地下水可开采量阈值。包含两层涵义：

其一，水资源开发利用接近水资源的可更新能力。水资源是循环的、可更新的和不可替代的，如果人类取耗水(包括跨流域调水)超出了可更新的水资源量，流域/区域就会由承载状态转为超载状态，继而引发河流断流、地下水漏斗等一系列问题。应根据河流枯水期基流、产卵期脉冲流量、汛期洪水过程占多年平均径流量的比例，加权得到河流总体生态需水比例，确定地表水可利用量。根据典型植被的生长耗水需求和物候情况，分析维持植被生长的地下水水位阈值，建立降水量、地下水埋深阈值和最大可开采量之间的定量关系，确定地下水可开采量阈值。当然，取耗水越大，并不意味着水资源承载力就越大，用水效率、产业结构及水资源配置的变化，也会导致水资源承载力发生变化。因此，只有在一定的技术经济水平和水资源合理配置下来谈水资源承载力，才更有实际价值。

其二，水资源开发利用应以维护生态环境良性发展为条件，最大程度地支撑经济社会发展的同时需兼顾生态用水需求。对一流域/区域而言，在产业结构、用水效率等不变的情况下，可用于经济社会的水越多，其水资源承载力就越大。但是，如果经济社会用水挤占生态用水，虽然可增大经济社会的发展规模，但会对生态系统造成不可恢复的破坏，这种发展模式是不可持续的，因此认为这种情形下的经济社会发展规模超出了水资源承载力。由于不同流域/区域生态需水会有所不同，因此需要分析不同地区河流、湖泊水位与面积、水量之间的相关关系和鱼类、候鸟等关键生态要素的生物过程对河湖水文过程变化的响应关系，明确不同时期不同生态目标下河湖的生态水位需求。

**3.2 维度二：水质** 水量维度针对的是水资源开发利用，但人类用水之后产生的污水经处理后又排放到水体中，污染物入河量一旦超出水体所能承受的范围，就可能对水体功能部分丧失、水生生态系统破坏。因此，在水质维度，需要开展水功能区纳污能力的核算，确定不同类型区域保障鱼类等水生生物正常生长的浓度阈值。包含两层涵义：

其一，水环境质量应满足设定的水功能区划水质目标的要求。如果一个地区的污染物浓度值劣于规定的标准值，水体功能就会遭到破坏，尽管其水资源总量丰富，但往往是水质型缺水，可供人类生活、生产活动的水少，真实的水资源承载力并不大。需要说明的是，有的水功能区不满足自身水质目标，但被用于其它用途，比如，饮用水源区的水质标准是不劣于Ⅲ类，如果其实际水质是Ⅳ类水，虽然可以用来服务工业用水和农业用水，但是失去了水功能区划的意义，不具备可持续发展的原则，因此认为超出了其水资源承载力。

其二，水质状况应满足水生生态系统安全性和生物多样性的需求。首先，鱼类等水生生物的正常生长依赖于持续提供生存资源的健康水生生态系统，而良好的水质是水生生态系统安全的保障。水质浓度始终存在着一个界限，超过这一浓度界限时水生生态系统就会退化并可能面临突然崩溃的风险，这个界限反映了水资源维持生态系统平衡而不被破坏的最大水平，是保障鱼类等水生生物正常生长的浓度阈值。其次，随着人类社会的发展，水污染对生物多样性也产生了影响。水污染改变了生物原有的生存方式，可能导致生物多样性向着污染这个主导因子进化发展，部分种群消失，物种丰富度

减少，从而降低水资源承载力。

**3.3 维度三：水域空间** 水资源开发利用以及城镇化、工农业发展等经济社会活动不可避免地河湖湿地等水域空间形成侵占，同时也形成水库、沟渠、景观湖等新增水域。水资源承载力在水域空间维度的内涵就体现在给河湖湿地保留适当的空间，将对水域空间的侵占和其影响限制在合理范围内。包含两层涵义：

其一，从防洪排涝安全的角度，适宜的水域空间是河流、湖泊等正常发挥洪水通道和调蓄作用的保障。天然条件下，河流及其漫滩地为汛期洪水提供了通道，湖泊湿地起到调蓄洪水、降低洪峰流量的作用。但随着人类经济社会的发展，基于取水、排水、航运便捷性以及水景观需求等多方面的诱导，逐渐形成沿河而居、沿湖而居的生产生活方式，在衍生出灿烂的大河文明、大湖文明的同时，侵占河道、围垦湖泊等现象也愈发剧烈，“人水争地”的矛盾不断突出。而由此带来的直接后果就是暴发流域性洪水后，洪水得不到有效疏解和缓冲，给经济社会系统带来巨大损失和灾害。虽然通过堤防、水库等工程手段能一定程度上予以防护，但河滩湖沼系统自然的水文节律被破坏，带来大量次生问题。同时，河湖水域也是城市内部最高效的“海绵体”，其空间的侵占也将直接影响城市防涝安全。

其二，从生态环境安全的角度，适宜的水域空间是河湖湿地净化水质，并为水生生物、候鸟等提供足够栖息地的必然要求。河湖漫滩湿地是水生和滨水植物的重要生存空间，也是拦截入河污染物的天然屏障，对于改善水质、增强污染降解能力具有重要作用。与此同时，广泛的水域空间及其深浅变化为不同水生及伴水生活的生物，如鱼类、鸟类、两栖类等提供了必要的生境条件，对于水域空间的挤占将导致这些生物生存空间萎缩，直接影响生物多样性的保护。以我国扎龙湿地的丹顶鹤为例，其适宜的水深条件是0.1~0.6 m，同时每对丹顶鹤产卵育幼期的领地需求大约2 km<sup>2</sup>，以目前每年大约400只野生丹顶鹤栖息繁殖计算，需要扎龙湿地至少保持400 km<sup>2</sup>的丹顶鹤适宜栖息地。如果在湿地栖息繁殖的丹顶鹤数量进一步增加，并考虑其他候鸟和生物的栖息需求，相应的水域空间要求也需要进一步增加，并对湿地周围的农业种植、生活居住等人类活动提出限制条件。

总体来说，适宜的水域空间对城市防洪排涝和维持生物多样性至关重要，具有巨大的生态环境效益，但同时也应注意到，增大水域空间面积，将造成水资源蒸散发消耗大幅增加，这对于水资源短缺地区尤其重要。因此，需要统筹考虑防洪、生态、景观等对水域空间的需求，综合确定不同降水条件下的适宜水域面积。

**3.4 维度四：水流状态** 水资源承载力在水流状态维度的内涵更侧重于水生态系统方面，主要是水流阻隔及流速、流态变化对水生态系统产生的压力，需要确定不同水系连通指标的阈值。包含两层涵义：

其一，河流阻隔建筑物通过阻隔河流纵向连通性对生物的生境构成威胁，水力发电对河道内生态用水造成压力。一方面，河流的连通性对物质运动和能量交换至关重要，但水库的建设，阻隔了河流纵向连通性，使得闸坝上下游之间的各种营养物质传输通道不复存在，导致那些需要独特生存环境的生物不得不迁徙甚至消亡。可以采用水系环度反映每个节点(河流的起源和交汇点)物质运动和能量交换的能力，其值与河段个数和节点数有关<sup>[33]</sup>。另一方面，水能资源的开发，有利于减少煤炭等不可再生资源的消耗，符合可持续发展战略的要求，因此认为水能资源也是水资源承载力的一部分。目前，水电需求量急剧增加，水库蓄放水时间更多地服从电网需求<sup>[34]</sup>，从而影响上游灌溉供水和城市供水，下游的生态流量也会得不到满足，对河道内生态用水造成压力，降低水资源承载力。可以采用发电用水率(发电用水量/河道内生态用水量)来反映水能资源的承载力。

其二，水资源承载力应考虑流速及流态变化带来的水生态系统压力。一方面，流速是运送营养物质的重要方式，但也会使生物在河流的生存能力受到限制。水库建设等活动改变了水流流速，一些生物会对流速的变化做出响应，可能会打破它们之间原有的相互联系，甚至会导致物种死亡率的增加。此外，流速减缓也会导致水质下降。可采用生态径流指标(生态剩余和生态赤字)<sup>[35]</sup>来评价河道流量需求总的缺失和盈余，以25%和75%分位数的年流量历时曲线作为河流生态系统的保护

范围<sup>[36]</sup>。另一方面,有的生物喜欢急流,有的生物喜欢缓流,流态变化会导致生物栖息地的改变,从而对物种分布和丰度产生影响,甚至会导致生物多样性的丧失,同时也为外来物种的入侵提供了条件。大坝建设及极端洪涝、干旱事件改变了水流流态,时时刻刻影响着水生生态系统。可利用IHA (Indicators of Hydrological Alteration)32个指标<sup>[37]</sup>量化河流流态变化特征,计算 $D_n$ (Degree of hydrologic alternation)指标<sup>[38]</sup>,来评价流态变化对河道生态系统产生的压力。

### 3.5 水资源承载力评价指标体系构建

3.5.1 指标体系架构 在水资源承载力新内涵认知的基础上,基于“量-质-域-流”4个维度构建水资源承载力评价指标体系。此外,人均日生活用水量、农田灌溉亩均用水量等经济社会指标易受“量-质-域-流”维度变化的影响,故也将其纳入到评价指标体系中(图4)。

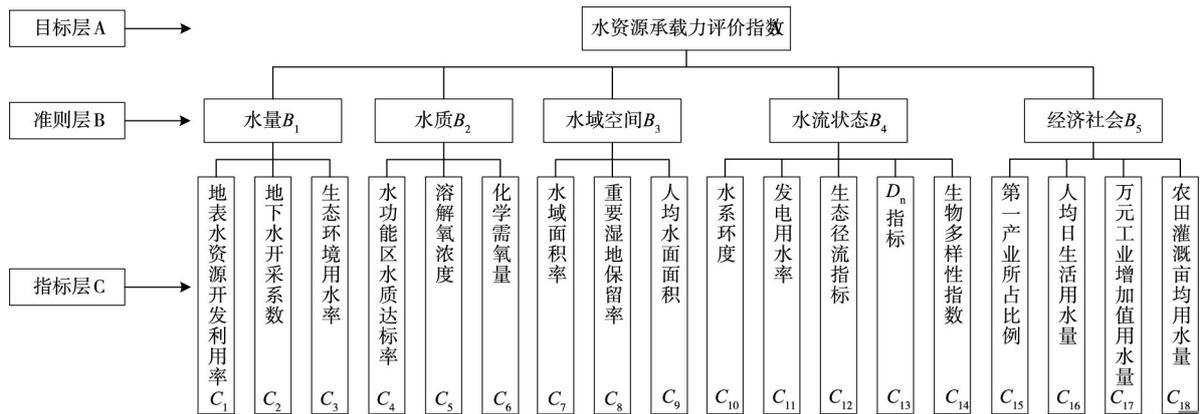


图4 基于“量-质-域-流”维度的水资源承载力评价指标体系

其中： $C_1$ 为地表水资源开发利用率，地表水供水量/地表水资源量，反映地表水资源开发现状和潜力； $C_2$ 为地下水开采系数，地下水实际开采量/地下水允许开采量，反映地下水资源开采现状和潜力； $C_3$ 为生态环境用水率，反映生态环境的保护程度； $C_4$ 为水功能区水质达标率，反映水环境质量状况； $C_5$ 为溶解氧浓度(DO)，反映水体自净的能力； $C_6$ 为化学需氧量(COD)，反映水中受还原性物质污染的程度； $C_7$ 为水域面积率，水域面积/总面积，反映维持水生生物多样性、满足防洪排涝需求的能力； $C_8$ 为重要湿地保留率，规划区域内重要湿地在不同水平年的总面积与20世纪80年代前代表年份水体总面积的比值<sup>[39]</sup>，反映城市建设过程中重要湿地的保留情况； $C_9$ 为人均水面面积，反映水域空间面积与人口数量之间的关系； $C_{10}$ 为水系环度，通过相关公式计算得到<sup>[33]</sup>，反映河流中物质能量的交换能力； $C_{11}$ 为发电用水率，发电用水量/河道内生态用水量，反映水能资源的承载能力； $C_{12}$ 为生态径流指标，包括生态剩余和生态赤字，通过相关公式计算得到<sup>[35]</sup>，反映河道流量需求总的缺失和盈余； $C_{13}$ 为 $D_n$ 指标，通过相关公式计算得到<sup>[38]</sup>，反映水库对河流流态总体改变程度以及造成的河道生态系统的风险性大小； $C_{14}$ 为生物多样性指数(Shannon Index)，通过相关公式计算得到<sup>[40]</sup>，反映水库建立后对河道生物多样性的影响程度； $C_{15}$ 为第一产业所占比例，反映第一产业对水资源的需求配置； $C_{16}$ 为人均日生活用水量，生活用水量/(用水人数·天数)，反映居民生活的用水水平； $C_{17}$ 为万元工业增加值用水量，反映工业对水资源的索取程度； $C_{18}$ 为农田灌溉亩均用水量，反映农业发展水平和水资源利用效率。

3.5.2 指标分级标准确定 参照《城市水系规划导则》(SL 431-2008)、《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)等国家或行业颁布的水利、生态等领域的标准规范及相关文献[19, 33, 40-42]，确定各指标分级标准，将各指标对水资源承载力的影响程度分为3个等级(表1)。其中， $V_1$ 表示人类活动对水资源系统的扰动程度不大，水资源状况比较乐观； $V_2$ 表示水资源开发利用已有相当规模，但仍有开发利用的潜力； $V_3$ 表示人类活动对水资源系统过度干扰，需要采取适当措施来缓解水资源的承载压力。

表1 基于“量-质-域-流”4个维度的水资源承载力评价指标分级标准

| 指标             | 单位                 | V <sub>1</sub> | V <sub>2</sub> | V <sub>3</sub> | 指标              | 单位                 | V <sub>1</sub> | V <sub>2</sub> | V <sub>3</sub> |
|----------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|
| C <sub>1</sub> | %                  | <20            | 20~40          | >40            | C <sub>10</sub> | 无量纲                | >0.5           | 0.3~0.5        | <0.3           |
| C <sub>2</sub> | 无量纲                | <0.7           | 0.7~1.0        | >1.0           | C <sub>11</sub> | %                  | *              | *              | *              |
| C <sub>3</sub> | %                  | >25            | 15~25          | <15            | C <sub>12</sub> | 无量纲                | *              | *              | *              |
| C <sub>4</sub> | %                  | >80            | 60~80          | <60            | C <sub>13</sub> | %                  | *              | *              | *              |
| C <sub>5</sub> | mg/L               | >5             | 2~5            | <2             | C <sub>14</sub> | 无量纲                | >0.8           | 0.7~0.8        | <0.7           |
| C <sub>6</sub> | mg/L               | <20            | 20~40          | >40            | C <sub>15</sub> | %                  | <12            | 12~15          | >15            |
| C <sub>7</sub> | %                  | *              | *              | *              | C <sub>16</sub> | L/人·d              | <120           | 120~180        | >180           |
| C <sub>8</sub> | %                  | >90            | 50~90          | <50            | C <sub>17</sub> | m <sup>3</sup> /万元 | <60            | 60~80          | >80            |
| C <sub>9</sub> | km <sup>2</sup> /人 | *              | *              | *              | C <sub>18</sub> | m <sup>3</sup> /亩  | <300           | 300~400        | >400           |

注：\*表示指标分级标准依据评价区域的具体情况而定。

#### 4 水资源承载力研究的基础性科学问题

水资源承载力研究从萌芽到初步形成、再到发展经历了约30年的时间，但对于水资源承载力的基本定义、评价指标还未完全统一，亟需建立和完善水资源承载力基础理论体系。面向水资源承载力调控和管理的实践需求，水资源承载力研究面临四大关键科学问题，即：(1)水资源承载力“量-质-域-流”四维演变机制；(2)“水资源-经济社会-生态环境”系统的承载弹性阈值；(3)经济社会发展与生态环境保护之间的“平衡点”；(4)水资源承载力调控机制。

**4.1 水资源承载力“量-质-域-流”四维演变机制** 水资源承载力是水量、水质、水域、水流4个维度在“水资源-经济社会-生态环境”三大系统中的集成体现，每一个维度都具有其特有的演变机制，这些机制如何演变，将影响水资源承载力的变化。以往研究多集中于水量、水质两个维度，将经济社会系统作为一个整体“灰箱”进行描述，缺乏对水量水质演变过程细致深入的认知。此外，人类经济社会活动对水资源系统的干扰远不止于此，在空间的挤占、流场的改变等方面同样有所体现，生态系统同样需要水资源在空间和流场方面的支撑。分析各个维度的关键影响因子，明晰水量、水质、水域、水流4个维度的演变过程，是揭示水资源承载力演变机理的重要基础，有利于明晰水资源承载力调控与管理的基本过程和重点环节。

在水量维度，可通过收集整理流域/区域主要气象站、水文站和地下水监测井信息，分析降水、径流、蒸发和地下水位等自然水循环要素的演变规律；在水质维度，可通过收集整理流域/区域人口、GDP等经济社会信息，以及分部门、分行业的供用水量信息，统计分析排污量，解析水资源综合利用效率和水质演变特征，并采用水量平衡和遥感解译等方法复核不同来源的水文水资源信息；在水域空间维度，可利用遥感和实测数据分析不同时期下流域/区域水域空间面积的变化趋势，采用统计学分析方法寻求水域面积与水土资源条件的关系；在水流状态维度，可结合历史资料，分析水能开发利用程度的变化趋势，并结合“斑块-廊道-基质”理论，研究不同类型水生态空间的连通性表征方法。

**4.2 “水资源-经济社会-生态环境”系统的承载弹性阈值** “水资源-经济社会-生态环境”系统之间围绕着水这一重要介质发生着十分复杂的交互作用，就现阶段来看，人类经济社会活动对水资源系统的扰动主要体现在数量的消耗、质量的污染、空间的挤占和流场的改变，而生态环境系统同样需要水资源在数量、质量、空间、流场等方面的支撑。由于生态环境系统的自我修复与调节能力，当这种干扰和影响在一定的弹性区间内时，生态环境系统能够与经济社会系统维持相互“胁迫”的再平衡状态。在“自然-社会”二元水循环的驱动下，“水资源-经济社会-生态环境”系统的耦合作用不断加强。探析“水资源-经济社会-生态环境”系统间的互馈机制，寻求并解析生态环境系统所能承受的最大压力阈值，是开展水资源承载力研究的基础性科学问题，可为水资源承载力调控奠定客观基础。

在水量维度，可通过构建多参数、多尺度生态需水过程模拟模型，从河湖生态需水过程推求地

表水量的阈值。通过开展不同地下水埋深条件下植被生长情况的观测，从支撑植被生长的地下水埋深推求地下水量的阈值；在水质维度，可利用分布式水文模型、各用水行业投入产出模型和CGE模型，建立“取用水量-纳污能力-污染负荷”之间的互动关系，结合二次平衡推求污染物排放阈值，从保障鱼类生长的溶解氧浓度等关键指标推求水质阈值；在水域空间维度，可利用遥感和实测数据开展水域空间面积率(河湖、水库、湿地、塘洼等水体护堤之内或者最高水位线以下的面积占区域总面积的比例)的解析和计算，从适宜水域面积推求空间挤占和平衡阈值；在水流状态维度，可根据河流水动力特征和鱼类洄游习性，剖析不同类型的河流阻隔建筑物对水生态系统的影响机理，结合现状水能开发利用程度，提出不同河流纵向连通性参考阈值。

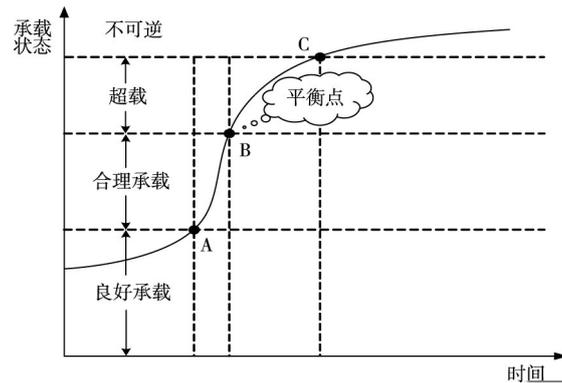


图5 经济社会发展与生态环境保护之间的“平衡点”

**4.3 经济社会发展与生态环境保护之间的“平衡点”** 在一定的技术水平和社会生产条件下，水资源承载力是有限的，它的发展是一个包含量变累积和质变跃迁的过程，此过程存在一个“平衡点”(图5)。在发展初期，水资源开发利用程度不大，经济社会发展规模较小，流域/区域处于一种良好承载的状态。随着经济社会发展规模的扩大，水事活动范围和程度也相应地增加，水资源系统压力会越来越大，在水资源开发利用过程中会对生态环境造成一定的破坏，但是由于自然生态系统的自我修复与调节能力，以及水资源范围的拓宽和用水方式的改变(如非常规水源利用、灌溉技术更新等)，人为的或自然因素的这种干扰和影响是在一定的弹性区间内，也就是说，在自然生态系统自我调节及人类适当措施下，水资源生态系统依然能够得到修复。在这个范围内，流域/区域依然处于一种合理承载的状态，所能承载的最大值就是经济社会发展与生态环境保护之间的“平衡点”。而当经济社会发展规模超出了这个“平衡点”，流域/区域就处于一种超载的状态，当超载达到一定程度时，水资源生态系统很难恢复到原来的状态，该过程成为一个不可逆的过程。因此，寻求经济社会发展与生态环境保护之间的“平衡点”，是开展水资源承载力研究最为重要的科学问题。可通过建立多目标函数及构建“量-质-域-流”4个维度的约束方程，求得最优解来确定经济社会发展与生态环境保护之间的“平衡点”，为水资源承载力调控提供依据。

**4.4 水资源承载力调控机制** 由于经济社会用水和生态环境用水之间往往存在此消彼长的动态依存关系，经济社会用耗水量和排污量的增加必然会影响到天然生态与环境功能的实现，从而导致生态环境系统退化和环境质量下降，降低水资源承载力。水资源承载力调控就是要将人类水资源过度开发利用造成的对水资源系统的干扰和影响在经济社会系统内消化，以维系经济社会系统与生态环境系统的平衡，即：维持生态环境用水与经济社会用水的平衡、水环境容量与经济社会排污量的平衡、水域面积与陆地面积占有率的平衡、流场属性(如流速、流态等)与物种分布和丰度之间的平衡。对经济社会系统而言，水资源承载力调控的基本目标就是提升其安全性，促进经济社会系统正向演进，最终实现水资源荷载平衡。揭示水资源承载力调控机制，可以为水资源承载力调控和管理途径的选取提供科学依据。

可通过分析水资源承载力各要素特征，进行水资源承载力驱动因子的甄别，筛选出独立性强、

关联度低、驱动效用明显的关键驱动因子，建立水资源承载力诊断指标，确定水资源承载力诊断准则，采用综合诊断评价方法，构建水资源承载力诊断体系。在此基础上，充分结合流域/区域经济社会发展、人口增长和水中长期供求相关预测成果，采用非线性时间序列分析方法、系统动力学等智能建模方法，构建在不同发展时期、不同发展情景下考虑经济社会、水量、水质、水域和水流等各要素的水资源承载力诊断指标预测模型。在水资源承载动态预测与调控方案研究基础上，从优化区域水资源配置、多种水源统筹调配等方面提出提升区域水资源承载力措施建议，从提高用水效率、调整产业结构和发展规模、控制人口增长、加强用水管理等方面提出水资源承载负荷调控方案。

## 5 结论

以现阶段人类活动对水资源要素利用和水资源系统扰动的主要方式为出发点，从水量、水质、水域空间和水流状态4个维度赋予了水资源承载力新的内涵，基于新内涵构建了水资源承载力评价指标体系，并明确了水资源承载力面临的四大关键科学问题，主要结论如下：(1)在水量上，水资源开发利用应接近水资源的可更新能力，在最大支撑经济社会发展的同时需兼顾生态用水需求；(2)在水质上，水环境质量应满足水功能区划水质目标的要求，以及水生态系统安全性和生物多样性的需求；(3)在水域空间上，应保障河流、湖泊等正常发挥洪水通道和调蓄作用，为河湖湿地净化水质，并为水生生物、候鸟等提供足够栖息地；(4)在水流状态上，更侧重水流阻隔及流速、流态变化对水生态系统产生的压力，明确不同水系连通指标的阈值；(5)水资源承载力“量-质-域-流”四维演变机制、“水资源-经济社会-生态环境”系统的承载弹性阈值、经济社会发展与生态环境保护之间的“平衡点”以及水资源承载力调控机制是水资源承载力研究的四大关键科学问题。

但是必须指出，水资源承载力涉及多个学科，学科交叉特点明显，存在很多不确定性。本文的出发点是基于人类活动对水资源要素的利用和水资源系统的扰动，今后的研究应深入分析社会水循环各个环节、水权交易、水处理技术水平等对水资源承载力的影响。

## 参 考 文 献：

- [ 1 ] 王浩,刘家宏.国家水资源与经济社会系统协同配置探讨[J].中国水利,2016(17):7-9.
- [ 2 ] 中华人民共和国环境保护部.全国环境统计公报[R].2015.
- [ 3 ] 章轲.人与自然争水:一场双输的战争[N].第一财经日报,2010-11-24(C03).
- [ 4 ] 孙振刚,张岚,段中德.我国水库工程数量及分布[J].中国水利,2013(7):10-11.
- [ 5 ] 张宏亮,何波.从承载力的属性分析承载力研究的理论基础[J].中国国土资源经济,2013(8):57-60.
- [ 6 ] PARK R E, BURGESS E W. Introduction to the science of sociology[M]. Chicago:University of Chicago Press, 1921.
- [ 7 ] MILLINGTON R, GIFFORD R. Energy and how we live[R]. Australian UNESCO Seminar, Committee to Man and Biosphere, 1973: 12-15.
- [ 8 ] MEADOWS D H, RANDERS J, et al. The limits to growth[M]. New York, 1972.
- [ 9 ] UNESCO & FAO. Carrying capacity assessment with a pilot study of Kenya: A resource accounting methodology for sustainable development[M]. Paris and Rome, 1985.
- [ 10 ] ARROW K, BOLIN B, COSTANZA R, et al. Economic growth, carrying capacity, and the environment[J]. Science, 1995(268): 520-521.
- [ 11 ] MILANO M, RUELLAND D, DEZETTER A, et al. Modeling the current and future capacity of water resources to meet water demands in the Ebro basin[J]. Journal of Hydrology, 2013, 500(11): 114-126.
- [ 12 ] FALKENMARK M, LUNDQVIST J. Towards water security: political determination and human adaptation crucial [J]. Natural Resources Forum, 1998, 21(1): 37-51.
- [ 13 ] NGANA J O, MWALYOSI R B B, YANDA P, et al. Strategic development plan for integrated water resources

- management in Lake Manyara sub-basin, North-Eastern Tanzania[J]. *Physics & Chemistry of the Earth*, 2004, 29(15/18): 1219-1224.
- [ 14 ] LIU R Z, BORTHWICK A G . Measurement and assessment of carrying capacity of the environment in Ningbo, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(8): 2047 .
- [ 15 ] AIT-AOUDIA M N, BEREZOWSKA-AZZAG E . Water resources carrying capacity assessment: The case of Algeria's capital city[J]. *Habitat International*, 2016, 58: 51-58 .
- [ 16 ] 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 .
- [ 17 ] 新疆水资源软科学课题研究组 . 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(6): 2-9 .
- [ 18 ] 曲耀光, 刘风景 . 乌鲁木齐流域的水资源及其转化模型[J]. *水科学进展*, 1991, 2(4): 244-250 .
- [ 19 ] 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 .
- [ 20 ] 汪恕诚 . 水权管理与节水社会[J]. *华北水利水电大学学报: 自然科学版*, 2001, 22(3): 6-8 .
- [ 21 ] 姚治君, 王建华, 江东, 等 . 区域水资源承载力的研究进展及其理论探析[J]. *水科学进展*, 2002, 13(1): 111-115 .
- [ 22 ] 张丽, 董增川, 张伟 . 水资源可持续承载能力概念及研究思路探讨[J]. *水利学报*, 2003(10): 108-112 .
- [ 23 ] 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 .
- [ 24 ] 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 .
- [ 25 ] 夏军, 张永勇, 王中根, 等 . 城市化地区水资源承载力研究[J]. *水利学报*, 2006, 37(12): 1482-1488 .
- [ 26 ] 赵建世, 王忠静, 秦韬, 等 . 海河流域水资源承载能力演变分析[J]. *水利学报*, 2008, 39(6): 647-651 .
- [ 27 ] 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 .
- [ 28 ] 王建华, 姜大川, 肖伟华, 等 . 基于动态试算反馈的水资源承载力评价方法研究——以沂河流域(临沂段)为例[J]. *水利学报*, 2016, 47(6): 724-732 .
- [ 29 ] 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 .
- [ 30 ] 刘雅玲, 罗雅谦, 张文静, 等 . 基于压力—状态—响应模型的城市水资源承载力评价指标体系构建研究[J]. *环境污染与防治*, 2016, 38(5): 100-104 .
- [ 31 ] 王忠静 . 干旱内陆河区水资源承载能力与可持续利用研究[D]. 北京: 清华大学, 1998 .
- [ 32 ] 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 .
- [ 33 ] 窦明, 靳梦, 张彦, 等 . 基于城市水功能需求的水系连通指标阈值研究[J]. *水利学报*, 2015, 46(9): 1089-1096 .
- [ 34 ] 邹进, 张友权, 潘锋 . 基于二元水循环理论的水资源承载力质量能综合评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(1): 117-123 .
- [ 35 ] VOGEL R M, SIEBER J, ARCHFIELD S A, et al . Relations among storage, yield, and instream flow[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(5): 909-918 .
- [ 36 ] 顾西辉, 张强, 孔冬冬, 等 . 基于多水文改变指标评价东江流域河流流态变化及其对生物多样性的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(19): 6079-6090 .
- [ 37 ] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, POWELL J, et al . A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems[J]. *Conservation Biology*, 1996, 10(4): 1163-1174 .
- [ 38 ] SHIAU J, WU F . Pareto-optimal solutions for environmental flow schemes incorporating the intra-annual and interannual variability of the natural flow regime[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(43): 813-816 .
- [ 39 ] 张萍, 高丽娜, 孙翀, 等 . 中国主要河湖水生态综合评价[J]. *水利学报*, 2016, 47(1): 94-100 .
- [ 40 ] KUO S R, LIN H J, SHAO K T . Seasonal changes in abundance and composition of the fish assemblage in Chiku Lagoon, southwestern Taiwan[J]. *Bulletin of Marine Science*, 2001, 68(1): 85-99 .
- [ 41 ] 靳梦, 窦明 . 城市化对水系连通功能影响评价研究——以郑州市为例[J]. *中国农村水利水电*, 2013(12): 41-44 .
- [ 42 ] 窦明, 张远东, 张亚洲, 等 . 淮河流域水系连通状况评估[J]. *中国水利*, 2013(9): 21-23 .

**Study on theoretical analysis of water resources carrying capacity:  
Definition and scientific topics**

WANG Jianhua, JIANG Dachuan, XIAO Weihua, CHEN Yan, HU Peng

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,  
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Water resources carrying capacity (WRCC) is a comprehensive index to evaluate the coordinated development of water resources, economic society and ecological environment, thus, it is significant to study WRCC to realize the harmony of water and human beings. Based on the research progress of WRCC, and take the main interference and influence of human activities on water system as a starting point, a new meaning of WRCC is defined from water quantity, water quality, water space and streamflow, and the evaluation index system of WRCC is constructed. The surface water resources availability and groundwater should be determined on the prerequisite of ensuring ecological water use; water quality should meet the water function regionalization target and the demand of the biodiversity to determine the concentration that ensure the normal growth of fish; it is necessary to take into account flood control, ecology, landscape and other requirements in the water space, and determine the appropriate water space area under different precipitation conditions; it should focus on the impact of connected water system on water ecosystem in streamflow, and the threshold of different water system connecting index should be obtained. It is considered that evolution mechanism of WRCC “quantity - quality - domain - flow”, the elastic threshold of “water resources-economic and social-ecological environment” systems, the balance point between socio-economic development and ecological environment protection, and regulation mechanism of WRCC are four key scientific topics in this research field.

**Keywords:** water resources carrying capacity; water space; streamflow; definition and connotation; scientific topics

(责任编辑: 韩 昆)

---

## 2016年度《水利学报》优秀论文公告

为了更好鼓励学风严谨的作者, 促进水利科技的创新发展, 提高《水利学报》的学术影响力, 本刊今年继续举行优秀论文评选活动。经《水利学报》编委会推荐、审定, 以下10篇论文为2016年度《水利学报》优秀论文, 名单如下:

2016年度《水利学报》优秀论文

| 第一作者<br>姓名 | 第一作者单位      | 论文题目                          | 所在<br>刊期 |
|------------|-------------|-------------------------------|----------|
| 纪昌明        | 华北电力大学      | 基于泛函分析思想的动态规划算法及其在水库调度中的应用研究  | 第1期      |
| 刘晓燕        | 黄河水利委员会     | 黄河主要产沙区近年降水变化的空间格局            | 第4期      |
| 钟登华        | 天津大学        | 基于改进重抽样法的高拱坝施工进度仿真研究          | 第4期      |
| 张光辉        | 中国地质科学院     | 灌溉农业的地下水保障能力评价方法研究——黄淮海平原为例   | 第5期      |
| 王卫光        | 河海大学        | 多模式集合模拟未来气候变化对水稻需水量及水分利用效率的影响 | 第6期      |
| 孔宪京        | 大连理工大学      | 钢纤维混凝土面板堆石坝的抗震性能数值分析          | 第7期      |
| 石振明        | 同济大学        | 考虑多层非饱和土降雨入渗的边坡稳定性分析          | 第8期      |
| 孙世坤        | 西北农林科技大学    | 中国主要粮食作物的生产水足迹量化及评价           | 第9期      |
| 王 浩        | 中国水利水电科学研究院 | 变化中的流域“自然-社会”二元水循环理论与研究方法     | 第10期     |
| 吕立群        | 清华大学        | 怒江泥石流扇地貌特征与扇体堵江机理研究           | 第11期     |

《水利学报》编辑部