

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.05.004

长兴县与水相关的生态环境承载力评价

崔晨韵,朱永华,吕海深,苟琪琪

(河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:从与水相关的生态环境承载力的概念及内涵出发,构建包含水(土)资源系统、与水相关的生态环境系统、社会经济系统的指标体系框架。依据指标的精选原则,采用层次分析法,结合长兴县实际的水资源情况、与水相关的生态环境问题及社会经济发展特点,构建包括2个水资源指标、10个与水相关的生态环境指标、7个社会经济指标的长兴县与水相关的生态环境承载力评价指标体系。基于构建的指标体系,采用承载状态综合测度模型法评价得出长兴县2014年水资源余缺水测度值为0.7119、与水相关的生态环境质量测度值为0.8808、社会经济水平测度值为0.8506、综合测度值为0.8207,说明长兴县2014年与水相关的生态环境承载状态总体上处于良好承载状态,结果与实际情况较为符合,验证了该评价体系的有效性。

关键词:与水相关的生态环境;承载力;承载状态;评价指标体系;层次分析法;熵权法;长兴县
中图分类号:TV213 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2020)05-0406-07

Water-related eco-environmental carrying capacity evaluation index system in Changxing County

CUI Chenyun, ZHU Yonghua, LYU Haishen, GOU Qiqi

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the concept and connotation of water-related eco-environmental carrying capacity, in this study the index system framework was constructed, which included the water (soil) resource subsystem, the water-related eco-environmental subsystem and the socioeconomic subsystem. According to the indicator selection principle, the analytic hierarchy process combining with the actual water resources situation, water-related eco-environmental problems and socioeconomic development characteristics of Changxing County, the water-related eco-environmental carrying capacity evaluation index system was constructed, which included two water resource indicators, ten water-related eco-environmental indicators and seven socio-economic indicators. Based on the built index system, the evaluation results show that the water resources surplus and deficiency level estimating index was 0.7119, the water-related eco-environmental quality estimating index was 0.8808, socioeconomic level estimating index was 0.8506 and the comprehensive estimating index was 0.8207 by using the carrying status comprehensive evaluation model for the Changxing County in 2014. These results indicate that the water-related eco-environmental carrying status in Changxing County in 2014 was generally in a good carrying status, in line with the actual situation.

Key words: water-related eco-environment; carrying capacity; carrying status; evaluation index system; analytic hierarchy process; entropy weight method; Changxing County

随着社会经济的快速发展、人口的迅猛增长与环境的剧烈变化,流域水资源短缺、水环境破坏、水生态退化等问题日益突出,这些问题严重制约着我国社会经济和生态环境的可持续发展^[1-3]。浙江省湖州市长兴县

基金项目:江苏省研究生科研与实践创新计划(SJKY19_0476);中央高校基本科研业务费专项(2019B72114);国家自然科学基金(41571015);“十三五”国家重点研发计划(2016YFA0601504)

作者简介:崔晨韵(1994—),女,硕士研究生,主要从事生态水文与水环境保护研究。E-mail:1412437705@qq.com

通信作者:朱永华,教授。E-mail:zhuyonghua@hhu.edu.cn

引用本文:崔晨韵,朱永华,吕海深,等.长兴县与水相关的生态环境承载力评价[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):406-412.

CUI Chenyun, ZHU Yonghua, LYU Haishen, et al. Water-related eco-environmental carrying capacity evaluation index system in Changxing County[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(5): 406-412.

(东经 119°33′~120°06′,北纬 30°43′~31°11′)属于太湖流域,总面积为 1 431 km²。长兴县降水量多但水资源总量不多,多年平均降水量为 19.25 亿 m³,而水资源总量只有 8.84 亿 m³,水资源开发利用程度较高,农业用水总量偏大。由于长兴县较快的城市化进程和经济发展速度,当地可用水资源已不足以同时满足快速的社会经济发展与良好的生态环境需求,其由水质型缺水引起的生态环境问题比较严重,阻碍了长兴县的可持续发展。为了解决长兴县水资源、生态环境及社会经济发展之间的矛盾,指导水资源合理配置,并使其社会经济可持续发展,最根本的办法是开展与水相关的生态环境承载力研究,确定研究区现状承载状态和未来若干年内研究区在不同生态环境建设和社会经济发展情景下的生态环境承载力。

我国对于水资源承载力研究较为广泛^[4-9],在研究中构建的指标体系侧重于水资源及社会经济方面,而对于生态环境方面考虑较少^[10-11]。我国对于与水相关的生态环境承载力的研究开展较晚且较为贫乏^[12-16],缺乏统一、公认的概念,评价指标体系不完善。与水相关的生态环境承载力系统是水资源、生态环境、社会经济相耦合形成的复杂系统,涉及的内容广泛,不宜采用单一指标对其进行定量描述,所以构建一套相对完善、切合研究区域实际特点的计量指标体系对于评价区域与水相关生态环境承载力具有现实意义。

笔者在相关研究基础上,从与水相关的生态环境承载力的概念及内涵出发,针对长兴县实际的水资源情况、与水相关的生态环境问题及社会经济发展特点,从水资源、社会经济和生态环境方面构建长兴县与水相关的生态环境承载力计量指标体系,为促进长兴县生态环境及社会经济协调可持续发展提供理论依据。

1 与水相关的生态环境承载力内涵及其发展

1.1 内涵

与水相关的生态环境承载力起源于水资源承载力,是对水资源承载力的补充与完善。水资源承载力侧重于水资源对某区域社会经济发展的支持能力,而与水相关的生态环境承载力是以水资源为纽带,以与水相关的生态环境问题为出发点和落脚点,将社会经济与生态环境联系起来,它是水土资源、与水相关的生态环境构成的生态环境支持系统对社会经济压力系统在一定约束条件下的支持能力,这种约束指的是一定的经济技术水平、社会福利水平及环境质量标准^[7,9]。与水相关的生态环境承载状态用来描述某一具体时段的与水相关的生态环境承载力。对于长兴县这种典型的丰水水质型缺水地区,在研究中要突出其严重的与水相关的生态环境问题(图 1)。

1.2 发展过程

与水相关的生态环境承载力起源于水资源承载力,其研究经历了萌芽阶段、大发展阶段及融合发展阶段。萌芽阶段始于 20 世纪 80 年代后期,以新疆水资源软科学课题研究组对新疆水资源承载力的研究^[17]为代表,与此同时,土地承载力研究开始在国内兴起,其中最有影响的是《中国土地资源生产能力及人口承载力研究项目》^[18]。20 世纪 90 年代后期至 2003 年水资源承载力得到广泛研究,水环境承载力的概念也得以提出,研究进入大发展阶段。2003 年后,随着土地承载力、水资源承载力、水环境承载力的研究趋于成熟,研究进入融合发展阶段,开始对综合因素承载力的研究,强调可持续发展,研究突破水资源承载力的传统定义,赋予其新的含义,即将水资源、水环境及水生态综合而成的与水相关的生态环境对社会经济系统的支撑能力,与水相关的生态环境承载力出现,以朱永华等^[12-15]开展的缺水地区与水相关的生态环境承载力理论及应用研究为典型代表。

2 承载力评价指标体系的构建

与水相关的生态环境承载力评价对象是由水土资源、生态环境、社会经济多个组成要素构成的复杂系统,所以需要构建一个由多指标组成的计量指标体系^[19]。但由于计量指标众多,会有很多重复的指标相互干扰,影响评价结果,因此需要遵循代表性、全面综合性、简明性、方便性、适用性及不可重复性等原则正确地筛选指标。

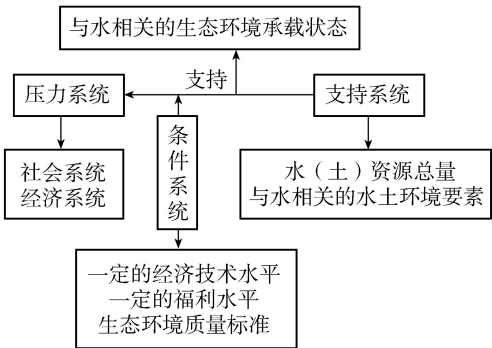


图 1 与水相关的生态环境承载力概念示意图

Fig.1 Conceptual diagram of water-related eco-environmental carrying capacity

基于与水相关的生态环境承载力概念及内涵,与水相关的生态环境承载力主要涉及水(土)资源、与水相关的生态环境质量及社会经济水平3个方面,因此,建立的评价指标体系应包括水(土)资源系统指标、与水相关的生态环境系统指标、社会经济系统指标。水(土)资源指标度量水资源余缺水平(水资源丰沛或短缺的水平),与水相关的生态环境指标度量与水相关的生态环境质量,社会经济指标度量社会经济水平。

2.1 指标的初选

为选出适于长兴县的全面、系统的生态环境承载状态计量指标,本文采用专家咨询法及理论分析法相结合的方法,初步选取了48个计量指标。

对于水资源系统指标,主要考虑与水资源短缺有关的量,用达到水质标准的水资源总量及人均水资源量表示,也考虑到了供水量及用水量。具体的指标有总水资源量、人均水资源量、水资源利用率、工业用水量、农业用水量、生活用水量、人均可供水量、总用水量、农业用水比例、工业用水比例、生活用水比例、农田灌溉水有效利用系数。

对于土地资源系统指标,主要考虑与粮食生产有关的量,也考虑到与生态用地有关的量。具体的指标有总土地面积、人均土地面积、有效灌溉面积、生态用地面积。

对于社会经济系统指标,主要考虑到反映社会经济发展水平和社会经济规模的量。具体的指标有人口、人均GDP、GDP增长率、工业用水定额、灌溉用水定额、人均生活用水定额、人均粮食占有量、亩均粮食产量、第三产业比重、生活用水定额、污水治理率、排污率、城镇化率、单方水农业GDP。

选取与水相关的生态环境系统指标时,主要考虑能反映太湖流域与水相关的生态环境问题的各个量。具体的指标有污水排放量、COD排放量、氨氮排放量、总氮排放量、总磷排放量、纳污能力、水质、河道纵向联通度、Ⅲ类水质及以上河长比、渗滤性河岸长度比、河岸弯曲度、城市水面率、生物丰度指数、植被覆盖率、河湖汛期水位、河湖非汛期水位、河湖生态需水保证率、水土流失面积比。

2.2 指标的精选

为科学、合理地反映研究区与水相关的生态环境承载状态,采用层次分析法^[4,20]并结合长兴县实际的水资源情况、与水相关的生态环境问题、社会经济发展特点及其三者的内在关联性,进一步精选核心指标。

2.2.1 水资源系统指标

首先遵循指标筛选原则剔除冗余指标,选取人均水资源量、水资源利用率、工业用水量、农业用水量、生活用水量、人均可供水量、农田灌溉水有效利用系数这7个指标,然后采用层次分析法,邀请多位相关研究领域的专家确定两两指标间的相对重要性,相对重要程度用自然数1、2、…、9以及倒数表示,经过3轮征询,专家组的意见趋向于集中,最后对评价数据进行统计归纳分析,构造判断矩阵,计算判断矩阵,并检验判断矩阵的一致性,得出这7个指标的重要性由强到弱的顺序:农田灌溉水有效利用系数、水资源利用率、人均水资源量、人均可供水量、工业用水量、农业用水量、生活用水量。结合长兴县实际水资源特点,并考虑到数据的可得性进一步精选核心指标。长兴县水资源特点表现为水资源开发利用程度较高,已超过国际公认水资源开发利用40%的警戒线,用水结构不太合理,农业用水总量偏大,其中农田灌溉用水量占农业用水总量的比重大。最终精选出的水资源指标为农田灌溉水有效利用系数、水资源利用率。

2.2.2 与水相关的生态环境系统指标

与精选水资源系统指标同样的方法,在初选指标中选取了13个指标,其重要性由强到弱的顺序:生物丰度指数、河湖生态需水保证率、植被覆盖率、Ⅲ类水质及以上河长比、河流纵向联通度、城市水面率、COD排放量、河岸弯曲度、水土流失面积比、总磷排放量、氨氮排放量、纳污能力、渗滤性河岸长度比。

结合长兴县主要的与水相关的生态环境问题:(a)水体污染:长兴县的水功能区有21个,水质达到Ⅲ类及以上的水功能区有17个,水环境存在一定的污染。长兴县废污水排放量大,COD、氨氮、总氮、总磷入河量大,引发了严重的河流污染问题,且随着排污量加大而超过河湖水纳污量,使得长兴县地表水污染严重,当然这也与河流纵向联通性不好、河岸弯曲度降低、河岸硬化、河岸带变窄、河岸植被覆盖率降低以及生物多样性锐减造成的水生生态系统自组织和自我调节能力降低等原因有密切关系,且过境客水的水环境差也是水体污染的原因。(b)水生生物多样性降低:由于通航、挖沙、开矿等人类活动,造成河道形态改变、水体含沙量大、水流速度不稳定、水体热污染、水体透明度低等问题,致使水中水生生物多样性锐减,浮游植物动物、底栖动物、沉水植物、鱼类等水生生物大幅度减少,完全不能发挥水生生物对环境的修复功能。(c)水面率较低:

水域对于提供可利用的水源、调蓄区域水资源、降解污染物和吸纳营养物质、保护生物多样性、调节气候等方面具有重要意义,而长兴县的水域面积还达不到基本实现区域河网水体有序流动,河湖生态水量得到基本保证,生物多样性逐步恢复的要求。(d)河道淤塞,纵向联通性较差:主要是由航运、采砂、开矿、水利设施建设及垃圾堆积等造成,长兴水系原有 37 条淤港排入太湖,由于受淤积影响和修建环湖大堤封堵小淤港等原因,目前只剩 9 条入湖河道。(e)城市洪涝:由于山区天然植被已经被生物多样性锐减、覆盖率不高的人工植被代替,结果造成洪水洪峰集中、洪量大,且由于河道、水库的淤塞,排洪能力、有效库容的减少,对于洪水的消纳能力的减弱,加大城市防洪压力。长兴县面源污染严重,洪水期径流中携带的大量污染物,影响长兴河道及太湖。(f)水土流失:一是因为生物多样性丰富的灌木山坡被不断扩大的茶树所代替,使植物单一化且植被覆盖度降低,水土流失面积加大;二是因为长兴县河网密集,河道底部淤积严重,致使河道行洪排涝较差频繁诱发水土流失;三是因为部分开发建设项目未按水土保持方案设计的防护措施进行水土流失防治工作,造成了严重的水土流失。

最终精选出 10 个与水相关的生态环境指标,即 COD 排放量、氨氮排放量、河道纵向联通度、Ⅲ类水质及以上河长比、河岸弯曲度、城市水面率、生物丰度指数、植被覆盖率、河湖生态需水保证率、水土流失面积比。

2.2.3 社会经济系统指标

同上方法,在初选的指标中选取了 9 个指标,并得出重要性由强到弱顺序:人均 GDP、第三产业比重、人口、工业用水定额、城镇化率、人均粮食占有量、单方水农业 GDP、污水治理率、生活用水定额。考虑到长兴县人口增长速度较快,GDP 在 2000 年后也迎来了高速增长期,工业发展较快,工业用水量也随之增大,城市化速度发展很快,城镇化率于 2014 年达到 58.5%,已超过我国平均城镇化率 56.1%^[21],从事农业生产的人口在大大降低的社会经济发展状况,最终精选出 7 个社会经济指标,即人口、人均 GDP、工业用水定额、人均粮食占有量、第三产业比重、城镇化率、农业用水定额单方水农业 GDP。

2.3 指标体系构成

基于与水相关的生态环境承载力的概念及内涵,经过指标的初选及精选,构建了共计 19 个核心指标的长兴县与水相关的生态环境承载力计量指标体系,包括 2 个度量水资源余缺水平的水资源指标,10 个度量与水相关的生态环境质量的生态环境指标,7 个度量社会经济水平的社会经济指标(表 1)。土地资源指标在计量指标体系中沒有直接表达,而是间接反映,如与水相关的生态环境指标中植被覆盖率、水土流失面积比。

表 1 长兴县与水相关的生态环境承载力评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of water-related eco-environmental carrying capacity in Changxing county		
系统	指标名称	指标含义
与水相关的生态环境承载力评价指标体系	水资源系统	水资源利用率
		流域用水量与水资源总量之比
	与水相关的生态环境系统	农田灌溉水有效利用系数
		作物灌溉水利用量与灌区渠首引进的水量之比
		COD 入河量
		年 COD 入河量
		氨氮入河量
		年氨氮入河量
		河流纵向联通度
		河道淤塞河长与总河长之比
		河流生态需水保证率
		河流生态补水量与河流生态需水量之比
		Ⅲ类水质及以上河长比
		Ⅲ类水质及以上河长与总河长之比
		河岸弯曲度
		河道长度与河道起止点直线距离之比
		植被覆盖率
		植被面积与总区域面积之比
		生物丰度指数
		区域内生物多样性的丰富程度
	社会经济系统	水面率
		城市河湖库面积与总城市市区面积之比
		水土流失面积比
		区域水土流失面积与总区域面积之比
		人均 GDP
		GDP 与总人口之比
		可承载人口
		实际人口
		工业用水定额
		工业用水量与工业产值之比
		第三产业比重
		第三产业的产值与总产值之比
		人均粮食占有量
		粮食总产量与总人口之比
		城镇化率
		城市人口与总人口之比
		单方水农业 GDP
		农业用水量与农业产值之比

3 长兴县与水相关的生态环境承载状态评价

采用承载状态综合测度模型法^[13]对承载状态进行评价。承载状态的优劣用生态环境承载指数表示,若生态环境承载指数小于0.8,说明生态环境系统对社会经济系统的承载状态还未达到临界可承载;若等于0.8,说明达到临界可承载;若大于0.8,说明已达到良好可承载,若等于1说明达到完全可承载。

3.1 评价模型

承载状态综合测度模型用式(1)表示。

$$I_{WES,T} = I_{W1,T}^{\beta_1} I_{L1,T}^{\beta_2} I_{EG,T}^{\beta_3} \tag{1}$$

其中
$$I_{W1,T} = \prod_{i=1}^l U_{i,T}^{a_i} \quad I_{L1,T} = \prod_{j=1}^m V_{j,T}^{b_j} \quad I_{EG,T} = \prod_{k=1}^n H_{k,T}^{c_k}$$

式中: $I_{WES,T}$ —— T 时段与水相关的生态环境系统对社会经济系统承载状态的综合测度值; $I_{W1,T}$ 、 $I_{L1,T}$ 、 $I_{EG,T}$ —— T 时段水资源余缺水平的测度值、与水相关的生态环境质量的测度值、社会经济水平的测度值; β_1 、 β_2 、 β_3 ——水资源余缺水平、与水相关的生态环境质量、社会经济水平在综合测度中的权重,采用层次分析法确定,分别为1/4、1/4、1/2; $U_{i,T}$ 、 $V_{j,T}$ 、 $H_{k,T}$ ——第*i*个水资源指标、第*j*个与水相关的生态环境指标、第*k*个社会经济指标在*T*时段的隶属度值; l ——水资源指标个数; m ——与水相关的生态环境指标个数; n ——社会经济指标个数; a_i ——第*i*个水资源指标在水资源余缺水平测度中占的权重; b_j ——第*j*个与水相关的生态环境指标在与水相关的生态环境质量测度中占的权重; c_k ——第*k*个社会经济指标在社会经济水平测度中占的权重,各指标权重的确定采用熵权法^[22]。

各指标的标量化通过各指标的临界承载状态值、完全承载状态值的确定及隶属度函数的构建来实现。

3.2 数据来源与输入

水资源指标的承载特征值依据《河流健康评估指南》^[23]《水生态文明城市建设评价导则》^[24]确定;与水相关的生态环境指标的承载特征值依据《河流健康评估指南》^[23]《湖州统计年鉴》^[25]并结合长兴县的实际情况确定;社会经济水平指标的承载特征值依据已有的相关研究并结合长兴县实际情况确定的。19个核心指标的实际值除了生物丰度指数采用2000年国家环境保护总局的生态环境遥感调查数据^[26],其余均来源于《湖州统计年鉴》^[25]。

对长兴县2014年与水相关的生态环境承载状态进行评价,19个核心指标的实际值为:水资源利用率49.43%、农田灌溉水有效利用系数0.6、COD入河量3988t、氨氮入河量309t、河流纵向联通度0.4、河流生态需水保证率95%、Ⅲ类水质及以上河长比0.9322、河岸弯曲度2.04、植被覆盖率51.3%、生物丰度指数41.67、水面率6.14%、水土流失面积比5.81%、人均GDP69611元、可承载人口63.05万人、工业用水定额31.6m³/万元、第三产业的比重40.3%、人均粮食占有量397.63kg、城镇化率58.5%、单方水农业GDP10.48元/m³。

3.3 评价结果

通过计算,可以得出长兴县2014年水资源余缺水平测度值 I_{W1} 为0.7119,未达到临界可承载状态值0.8,说明水资源存在一定缺口。2014年长兴县实际水资源情况表现为相对短缺。长兴县2014年水资源总量较少,而用水总量较多,造成了水资源利用率较高,未达到临界可承载状态,且由于长兴县采用农业上传统的漫灌和喷灌方式,造成了水资源的浪费,农田灌溉水有效利用系数较低,也未达到临界可承载状态,所以为了缩小水资源缺口,需要降低现状的水资源利用率,稳步提高农田灌溉水有效利用系数。

与水相关的生态环境质量测度值 I_{L1} 为0.8808,超过临界可承载状态值0.8,说明2014年长兴县与水相关的生态环境总体处于良好状态,但还达不到优,主要是因为当前长兴县氨氮入河量较大、水土流失状况较严重,氨氮入河量和水土流失面积比达不到临界可承载值;COD入河量、河流纵向联通度、河岸弯曲度、植被覆盖率、生物丰度指数、水面率处于临界可承载与完全可承载之间,未达到完全可承载。2014年长兴县实际的生态环境总体上较为良好,存在的主要问题是:部分水体存在污染问题,有5个水功能区尚未达到Ⅲ类水质;灌木山坡被不断扩大的茶树代替,使植被单一化、植被覆盖度降低,加大了水土流失面积。为了促使长兴县生态环境质量达到优,应加大城市河湖水污染治理及水土保持力度。李平等^[27]对太湖流域生态脆弱性进行了评价,得出长兴县2010年生态脆弱性介于一般脆弱与不脆弱之间。随着生态建设与环境保护的加

强,生态环境压力得以缓解,基于李平星等^[27]得出的结论,从 2010—2014 年,长兴县生态脆弱性逐步达到不脆弱。汪嘉杨等^[28]得出 2014 年太湖流域水环境承载力评价指数为Ⅱ级,承载能力较强。以上研究结果与文章得出的 2014 年长兴县与水相关的生态环境总体处于良好状态的结论相互印证。

社会经济水平测度值 I_{EG} 为 0.8506,说明长兴县社会经济系统总体处于良好状态,但还达不到优,主要是因为单方水农业 GDP 远低于临界可承载值。长兴县农业灌溉方式造成了水资源的浪费,说明农业发展水平不高,还有大大提升的空间,所以为了促使长兴县社会经济逐步达到优的水平,应重视提高农业用水效益。

与水相关的生态环境系统对社会经济系统的承载状态的综合测度值 I_{WES} 为 0.8207,说明长兴县当前与水相关的生态环境系统对社会经济系统的承载状态处于良好承载状态,但还达不到优。以上得出的结论与长兴县 2014 年实际情况较为符合,且与陈晨^[29]所得出的 2014 年长兴县由水资源、社会、经济、生态组成的综合承载力处于适载水平的结论相一致,说明构建的计量指标体系及采用的承载状态评价法能较为客观、准确地评价评价研究区的与水相关的生态环境承载状态。

4 结 语

以与水相关的生态环境承载力的概念及其内涵为出发点,结合长兴县的实际特点,构建了一套包括 2 个度量水资源余缺水平的水资源指标,10 个度量与水相关的生态环境质量的生态环境指标及 7 个度量社会经济水平的社会经济指标共计 19 个核心指标的长兴县与水相关的生态环境承载状态计量指标体系,并基于计量指标体系采用承载状态综合测度模型法对长兴县 2014 年与水相关的生态环境承载状态进行了定量评价。结果表明,本文建立的指标体系具有较强的客观性、准确性及适用性。但由于此方面的研究还较为贫乏,指标的选取及权重系数的确定受主观因素影响较大,如何提高指标的独立性和代表性有待于进一步研究完善。

参考文献:

[1] 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))

[2] XUE Qian, SONG Wei, ZHANG Yili, et al. Research progress in ecological carrying capacity: implications, assessment methods and current focus [J]. Journal of Resources and Ecology, 2017,8(5):76-87.

[3] 文扬,周楷,蒋姝睿,等. 陆水流域水环境与水资源承载力研究[J]. 干旱区资源与环境, 2018,32(3):126-132. (WEN Yang, ZHOU Kai, JIANG Shurui, et al. Water environment and water resource carrying capacity in Lushui Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018,32(3):126-132. (in Chinese))

[4] 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. (LIU Yaling, LUO Yaqian, ZHANG Wenjing, et al. Research on the construction of evaluation index system of urban water resources carrying capacity based on pressure-status-response model[J]. Environmental Pollution & Control, 2016, 38(5):100-104. (in Chinese))

[5] 王建华,翟正丽,桑学锋,等. 水资源承载力指标体系及评判准则研究[J]. 水利学报, 2017, 48(9):1023-1029. (WANG Jianhua, ZHAI Zhengli, SANG Xuefeng, et al. Study on index system and judgment criterion of water resources carrying capacity[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(9):1023-1029. (in Chinese))

[6] 任黎,杨金艳,相欣奕. 江苏沿海地区水资源承载力研究:以盐城市为例[J]. 水利经济, 2015, 33(5):1-3. (REN Li, YANG Jinyan, XIANG Xinyi. Study on water resources carrying capacity in coastal areas of Jiangsu Province: a case study of Yan Cheng City[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2015,33(5):1-3. (in Chinese))

[7] 金菊良,董涛,郦建强,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))

[8] 金菊良,陈鹏飞,陈梦璐,等. 基于知识图谱的水资源承载力研究的文献计量分析[J]. 水资源保护,2019,35(6):14-24. (JIN Juliang, CHEN Pengfei, CHEN Menglu, et al. Bibliometric analysis of research progress on water resources carrying capacity based on knowledge map[J]. Water Resources Protection,2019,35(6):14-24. (in Chinese))

[9] 左其享. 水资源承载力研究方法总结与再思考[J]. 水利水电科技进展,2017,37(3):1-6. (ZUO Qiting. Review of research methods of water resources carrying capacity[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017,37(3):1-6.

(in Chinese))

- [10] 苏贤保,李勋贵,赵军峰. 水资源-水环境阈值耦合下的水资源系统承载力研究[J]. 资源科学, 2018, 40(5):1016-1025. (SU Xianbao, LI Xungui, ZHAO Junfeng. Carrying capacity of water resources system coupling water resources with water environment thresholds[J]. Resources Science, 2018, 40(5):1016-1025. (in Chinese))
- [11] 赵少军. 塔里木河流域生态环境承载力评价研究[J]. 水利科技与经济, 2017, 23(8):1-7. (ZHAO Shaojun. Evaluation of ecological environmental carrying capacity of the Tarim River Basin [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2017, 23(8):1-7. (in Chinese))
- [12] ZHU Yonghua, DRAKE S, LYU Haishen, et al. Analysis of temporal and spatial differences in eco-environmental carrying capacity related to water in the Haihe River Basins, China[J]. Water Resource Manage, 2010, 24(6):1089-1105.
- [13] 朱永华,任立良,夏军,等. 海河流域与水相关的生态环境承载力的研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2005, 41(4): 11-15. (ZHU Yonghua, REN Liliang, XIA Jun, et al. Study on the water-related eco-environmental carrying capacity of the Haihe River Basin[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2005, 41(4): 11-15. (in Chinese))
- [14] 朱永华,任立良,夏军,等. 缺水流域生态环境承载力的研究进展[J]. 干旱区研究, 2011, 28(6):990-997. (ZHU Yonghua, REN Liliang, XIA Jun, et al. Advances in study on eco-environmental carrying capacity in the drainage basins with shortage of water resources[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(6): 990-997. (in Chinese))
- [15] 朱永华. 流域生态环境承载力分析的理论与方法及在海河流域的应用[R]. 北京:中国科学院地理科学与资源研究所, 2004.
- [16] WANG Zhonggen, LUO Yuzhou, ZHANG Minghua, 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.
- [17] 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(6):2-9. (Xinjiang Water Resources Soft Science Research Group. Xinjiang water resources and its carrying capacity and development strategy[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1989(6):2-9. (in Chinese))
- [18] 封志明. 土地承载力研究的过去、现在和未来[J]. 中国土地科学, 1994, 8(3):1-9. (FENG Zhiming. The past, present and future of land carrying capacity research[J]. China Land Sciences, 1994, 8(3):1-9. (in Chinese))
- [19] 唱彤,酆建强,金菊良,等. 面向水流系统功能的多维度水资源承载力评价指标体系[J]. 水资源保护, 2020, 36(1):44-51. (CHANG Tong, LI Jianqiang, JIN Juliang, et al. Multi-dimensional water resources carrying capacity evaluation index system for water flow system function[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1):44-51. (in Chinese))
- [20] 薛联青,王晶,魏光辉. 基于PSR模型的塔里木河流域生态脆弱性评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(1):13-19. (XUE Lianqing, WANG Jing, WEI Guanghui. Dynamic evaluation of the ecological vulnerability based on PSR modeling for the Tarim River Basin in Xinjiang[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(1):13-19. (in Chinese))
- [21] 白中科. 资源型城市城镇化进程及生态整治路径研究[J]. 中国土地, 2017(7):17-19. (BAI Zhongke. Research on urbanization process and ecological improvement path of resource-based cities[J]. China Land, 2017(7):17-19. (in Chinese))
- [22] 马宇翔,彭立,苏春江,等. 成都市水资源承载力评价及差异分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6):159-166. (MA Yuxiang, PENG Li, SU Chunjiang, et al. Evaluation and regional differences of water resources carrying capacity of Chengdu [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(6):159-166. (in Chinese))
- [23] 南京水利科学研究院. 河流健康评估指南[M]. 南京:南京水利科学研究院, 2017.
- [24] 中华人民共和国水利部. 水生态文明城市建设评价导则:SL/Z 738—2016[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2016.
- [25] 国家统计局. 湖州统计年鉴(2015)[M]. 北京:中国统计出版社, 2015.
- [26] 万本太,张建辉. 中国生态环境质量评价研究[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2004.
- [27] 李平星,陈诚. 基于VSD模型的经济发达地区生态脆弱性评价:以太湖流域为例[J]. 生态环境学报, 2014(2):237-243. (LI Pingxing, CHEN Cheng. Ecological vulnerability assessment of economic developed region based on VSD model: the case of Taihu Basin[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014(2):237-243. (in Chinese))
- [28] 汪嘉杨,翟庆伟,郭倩,等. 太湖流域水环境承载力评价研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(5):1979-1987. (WANG Jiayang, ZHAI Qingwei, GUO Qian, et al. Study on water environmental carrying capacity evaluation in Taihu Lake Basin[J]. China Environmental Science, 2017, 37(5):1979-1987. (in Chinese))
- [29] 陈晨. 长兴县水资源承载力预警方法研究[D]. 扬州:扬州大学, 2018.

(收稿日期:2019-07-08 编辑:刘晓艳)