

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.06.003

# 基于能值理论的黄河流域水资源生态经济系统 可持续性评价

王慧亮<sup>1,2</sup>, 申言霞<sup>2</sup>, 李卓成<sup>2</sup>, 王煜<sup>3</sup>

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司博士后科研工作站, 河南 郑州 450003; 2. 郑州大学水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 3. 黄河勘测规划设计研究院有限公司规划研究院, 河南 郑州 450003)

**摘要:**以生态经济学的能值理论为基础, 视水资源生态经济系统为有机整体, 从系统能值流、经济发展能值、水资源能值和流域可持续发展能值4个方面, 构建了包含13个指标的黄河流域水资源生态经济可持续发展评价指标体系, 评价了黄河流域沿岸各省区的水资源开发利用状况、经济发展状况及水资源生态经济系统的可持续发展状况。结果表明: 黄河流域属于资源消耗型生态经济模式, 黄河上游的社会经济发展和现代化程度较黄河下游低; 黄河流域水资源能值利用强度与经济发展水平相匹配, 但是与水资源对社会经济系统的贡献率不匹配, 需要进一步优化水资源配置; 黄河流域地区环境压力巨大, 可持续发展水平较低, 应加大可更新资源的投入, 以实现系统的可持续发展。

**关键词:**能值理论; 水资源生态经济系统; 可持续发展; 黄河流域

中图分类号: TV213.4; F407.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2020)06-0012-06

**Sustainability assessment of water resources ecological-economic system in the Yellow River Basin based on emergy theory** // WANG Huiliang<sup>1,2</sup>, SHEN Yanxia<sup>2</sup>, LI Zhuocheng<sup>2</sup>, WANG Yu<sup>3</sup> (1. Postdoctoral Research Station, Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 2. College of Water Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Planning Institute, Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** An evaluation index system of water resources ecological-economic sustainable development in the Yellow River Basin including 13 indexes was established based on Emergy theory in ecological economics with water resources ecological-economic system being seen as an organic whole from four aspects of the system energy flow, economic development energy, water resources energy and sustainable development energy of river basin. The development and utilization of water resources, economic development and sustainable development of water resources ecological-economic system in every province along the Yellow River Basin were evaluated. The results show that the Yellow River Basin belongs to the consumptive ecological-economic model. The socio-economic development and modernization degree of the upper reaches of the Yellow River are lower than those of the lower reaches of the Yellow River. The energy use intensity of water resources in the Yellow River Basin matches the level of economic development while doesn't match the contribution rate of water resources to the social and economic system, which implies that the allocation of water resources should be further optimized. The environmental pressure in the Yellow River Basin is huge and the level of sustainable development is low. It is necessary to increase the investment of renewable resources to realize the sustainable development of the system.

**Key words:** emergy theory; water resources ecological-economic system; sustainable development; Yellow River Basin

水资源生态经济系统是指在一定的区域范围内, 以水资源开发利用和保护活动为主体的水资源生态系统和社会经济系统相互作用、相互结合而成

的具有一定结构和功能的有机整体<sup>[1]</sup>。近年来随着社会经济的快速发展, 水资源供需矛盾日益突出, 水资源短缺问题已经越来越严重。由于水资源系统

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2017YFC04044404); 黄河勘测设计规划研究院有限公司博士后基金(2019BSHZL02)

作者简介: 王慧亮(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: wanghuiliang@zzu.edu.cn

通信作者: 王煜, 教授级高级工程师。E-mail: happytime@yahoo.com.cn

可持续性受生态、社会、经济等的影响,因此一般将水资源生态系统和社会经济系统有机结合以综合评估水资源可持续发展状态<sup>[2-3]</sup>。研究水资源系统可持续发展状态的方法主要包括层次分析法、熵权法、模糊数学法、灰色聚类评价法、系统动力学模型等。如 Pandey 等<sup>[4]</sup>从社会、生态、经济等方面出发,评估了尼泊尔流域水资源系统适应性能力;Chen 等<sup>[5]</sup>应用模糊综合评价法对区域水资源系统可持续发展状态进行了评价;Zhang 等<sup>[6]</sup>建立了水资源、水环境和水生态特征等动态评价指标体系,评估了湘江流域岳塘区的水资源系统可持续状态在时间上的变化趋势;潘萃等<sup>[7]</sup>基于能值分析的方法,构建了成都市水资源生态经济系统可持续发展指标体系;陶倩君等<sup>[8]</sup>采用时空分析和相关分析等方法,提出了水资源生态足迹定量评价方法;杨光明等<sup>[9]</sup>将模糊数学隶属度与系统动力学相结合对重庆市的水资源可持续发展状态进行了综合评估;周文哲<sup>[10]</sup>结合黄河流域实际情况,从水量、水质、水域和水流 4 个维度,选择 18 个指标并采用熵权法确定指标的权重对黄河流域水资源进行了量化评价;崔冬梅等<sup>[11]</sup>采用环境压力控制模型构建指标体系对江苏水生态系统可持续性进行了研究。目前的相关研究均以水资源系统为研究对象,对水资源系统和社会经济系统的相互作用考虑不足,且在指标量化过程中,面临着系统内不同量纲的值不能相互比较的问题,导致无法衡量资源投入对社会经济发展的贡献,限制了水资源生态经济系统可持续发展能力评价的有效性。

随着国家西部大开发、中部崛起、“一带一路”等倡议的推进,黄河流域各省区产业布局加快,水资源需求强烈,用水增长迅速。黄河流域中游黄土高原地区水土流失严重导致水环境恶化,严重影响到水资源的开发利用,黄河流域水资源可持续发展状态已成为当下研究的热点和难点问题<sup>[12]</sup>。黄河流域各省区经济发展水平、现代化程度不一致,传统的评价方法无法对各省区的水资源可持续发展状态进行统一比较,且无法量化省区内各种资源对水资源可持续发展状态的贡献,因此无法有效地评估黄河流域水资源生态经济系统可持续发展状况。本文针对传统评价方法存在的不足,采用能值理论与分析方法评价黄河流域水资源生态经济系统的可持续发展状态,以期为黄河流域各省区及其他地区的水资源生态经济系统可持续发展状态评估提供参考。

## 1 研究区概况与数据来源

黄河流域地处我国中北部,位于东经 95°53' ~

119°05'、北纬 32°10' ~ 41°50' 之间,面积 79.5 万 km<sup>2</sup>。黄河从西向东,依次流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和山东 9 省区,各省区流域面积分别为 152 250 km<sup>2</sup>、16 960 km<sup>2</sup>、143 240 km<sup>2</sup>、51 393 km<sup>2</sup>、150 962 km<sup>2</sup>、133 300 km<sup>2</sup>、97 138 km<sup>2</sup>、36 164 km<sup>2</sup> 和 13 633 km<sup>2</sup>,分别占各省区面积的 21.08%、3.49%、33.64%、77.40%、12.76%、64.85%、61.99%、21.66% 和 8.63%。受大气环流和季风环流的影响,流域降水分布不均,多数地区年降水量 200 ~ 650 mm,多年平均径流量约 580 亿 m<sup>3</sup>,仅占全国河川径流总量的 2.2%,流域内人均水资源量不足全国人均总量的 30%。黄河流域承担着对全国 12% 的人口、15% 的耕地和沿河 50 多座大中城市的供水任务,水资源开发利用接近 70%,远超 40% 这一国际公认的合理限度。黄河多年平均输沙量约 16 亿 t,平均含沙量 35 kg/m<sup>3</sup>,水质污染严重,仅 60% 的水功能区水质达标。

选取 2015 年作为评价年,对黄河流域 9 省区进行水资源生态系统可持续发展状态评价。研究所用的水资源总量、用水总量等水资源相关数据来自《中国水利统计年鉴 2016》《黄河流域水资源公报 2015》以及黄河流域沿岸各地 2015 年水资源公报,其他能值计算需要的数据,即可更新资源、不可更新资源以及外部系统反馈输入能值及产品的原始数据均通过查阅各省区的 2015 年统计年鉴、国民经济和社会发展统计公报获得,并根据文献[12-14]中相关指标的能值转换率和能值转换公式进行计算。

由于黄河流域边界与各省区行政边界不完全匹配,本文采用黄河勘测规划设计研究院有限公司提出的黄河流域地市套水资源三级区的概念(即根据流域内的地市面积对地市内的能值计算所需物理量进行等比例折算),得到不同行政区在黄河流域内的各能值计算量。

## 2 评价方法

### 2.1 能值理论

20 世纪 80 年代,美国著名生态学家 Odum<sup>[15]</sup>提出了能值理论与方法,为生态经济系统的定量分析开辟了新的研究方向。能值指一种流动或储存的能量中所含另一种类别能量的数量,不同品质的能量之间存在一个转换关系——能值转换率,即形成每单位物质或能量所含有的另一种能量的量<sup>[16]</sup>。由于各种能量均直接或间接来自太阳能,因此能值分析以太阳能为基准,将系统中不同类别、不可比较的能量经太阳能转换率转换成同一标准的太阳能值,转换公式<sup>[14]</sup>为

$$E = \tau B \quad (1)$$

式中:  $E$  为能值,  $sej$ ;  $\tau$  为能值转换率,  $sej/J$  (或  $sej/g$ );  $B$  为能量,  $J$  (或为物质的质量,  $g$ )。

## 2.2 评价指标体系

水资源生态经济系统可持续发展的能值指标是在能值分析表的基础上,结合区域水资源生态经济系统的结构和功能,计算出的一系列反映系统开发水平和可持续发展状况的能值指标,从而全面分析区域水资源开发利用程度,为水资源可持续利用提供科学依据和决策支持<sup>[1]</sup>。常用的能值指标有系统能值流指标、经济发展能值指标、水资源能值指标和可持续能值评价指标。参考国内外水资源生态经济系统可持续发展评价的指标体系,根据黄河流域水资源生态经济系统的特点,利用能值分析方法,构建黄河流域水资源生态经济系统可持续发展评价指标体系。

**a.** 在系统的能值流指标中,系统的能值投入比例可以反映区域经济发展主要驱动力,同时系统总能值的输入和产出代表了区域的经济水平。系统能值流指标选取可更新资源能值、不可更新资源能值、反馈输入能值、系统总投入能值和系统总产出能值 5 个具体指标。

**b.** 在经济发展能值评价指标中,能值投资率是社会经济反馈输入能值与自然环境投入能值(可更新资源能值和不可更新资源能值之和)之比,是衡量经济发展程度和环境负载程度的指标,其值越大,表明系统的经济发展程度越高<sup>[17]</sup>。净能值产出率是衡量系统产出对经济贡献大小的指标,净能值的产出率越大,表明系统的能值利用效率越高<sup>[18]</sup>。能值货币比率是指系统内年投入总能值与当年的 GDP 的比值,用来反映一个区域的现代化水平。通常情况下,能值货币比率越低,表示每单位货币所能购买的能值越少,说明该区域对自然资源的依赖较小,区域的现代化水平越高<sup>[19]</sup>。因此,本文经济发展能值评价指标选取了能值投资率、能值货币比率和净能值产出率 3 个指标。

**c.** 水资源能值评价指标中,年用水能值反映当地水资源的投入量,而水资源能值贡献率指系统用水资源能值与系统总投入能值的比值,用来反映区域水资源对经济系统发展的贡献程度。水资源能值贡献率越高,表明水资源对经济发展的贡献程度越大<sup>[20]</sup>。水资源能值利用强度指单位面积上消耗的水资源的能值,主要用来评价一个区域的经济过程中对资源的利用效率,水资源能值利用强度越高的地区,区域的水资源利用效率越高<sup>[17]</sup>。因此,水资源能值评价指标选取了年用水能值、水资源能

值贡献率,水资源能值利用强度 3 个指标。

**d.** 环境负载率是系统不可更新资源投入能值总量与可更新资源投入能值总量之比,可以反映经济系统的环境压力的指数,环境负载率越小表明系统承受的环境压力就越小<sup>[21]</sup>。可持续发展指数(ESI)是考察系统可持续性的能值指标,可持续发展指数小于 1 表示系统长期不可持续,在  $[1, 10]$  之间表示系统富有活力和发展潜力,大于或等于 10 表示系统经济不发达<sup>[22]</sup>。因此,可持续发展能值评价指标选取环境负载率和可持续发展指数 2 个指标。

根据以上分析,建立由 13 个指标构成的能全面反映黄河流域水资源生态经济系统可持续发展的指标体系(图 1),基于这些指标评价黄河流域水资源生态经济系统的可持续发展状况。

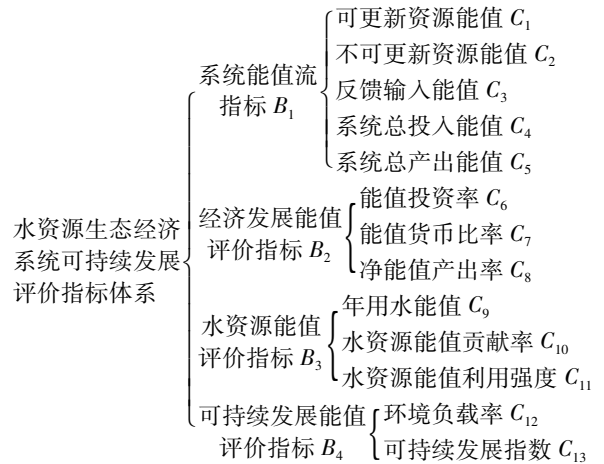


图 1 水资源生态经济系统可持续发展评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system of water resources ecological-economic sustainable development

## 3 结果与分析

根据 2015 年黄河流域水资源生态经济系统的主要资源流及货币流的相关原始数据,计算不同投入的能值转换率<sup>[12-14]</sup>,基于建立的水资源生态经济系统可持续发展的评价指标体系(图 1),计算黄河流域水资源生态经济系统的主要能值流及其评价指标,结果如表 1 所示。

### 3.1 系统能值流分析

黄河流域能值投入占比与单位面积总能值如表 2 所示。可以看出,黄河流域各省区的能值投入以不可更新资源能值为主,说明黄河流域的各省区的经济发展主要依赖于不可更新能源的消耗,在黄河流域,尤其是上游地区对不可更新资源的依赖性更强,黄河流域整体属于资源消耗型生态经济模式,还应加大风能和太阳能等可更新资源的利用。同时黄河流域下游的河南和山东两省的反馈输入能值比例分别达到 30.10% 和 32.43%,说明这两省的外商投

表1 黄河流域水资源生态经济系统主要能值指标计算结果

Table 1 Calculation results of main energy indexes of water resources ecological-economic system in every province in the Yellow River Basin

行政区	$C_1/$ $10^{21}$ sej	$C_2/$ $10^{21}$ sej	$C_3/$ $10^{21}$ sej	$C_4/$ $10^{21}$ sej	$C_5/$ $10^{21}$ sej	$C_6/\%$	$C_7/$ ( $10^{11}$ sej · 元 <sup>-1</sup> )	$C_8$	$C_9/$ $10^{19}$ sej	$C_{10}/$ %	$C_{11}/$ ( $10^{16}$ sej · m <sup>-2</sup> )	$C_{12}$	$C_{13}$
青海	22.30	100.37	6.85	129.52	409.83	5.58	11.66	4.08	291.85	2.25	1.92	4.81	1.06
甘肃	38.57	244.61	54.36	337.53	1037.41	19.20	10.82	4.24	974.35	2.89	6.80	7.75	0.67
宁夏	62.08	223.60	35.82	321.51	909.81	12.54	11.21	4.07	1505.72	4.68	29.30	4.18	1.13
内蒙古	23.07	163.17	47.86	234.10	799.42	25.70	8.47	4.90	1149.44	4.91	7.61	9.15	0.69
陕西	103.49	698.15	223.48	1025.12	3332.87	27.88	6.79	4.77	4394.34	4.29	32.97	8.91	0.71
山西	93.98	674.80	366.50	1135.28	3557.74	47.67	9.67	5.27	4181.63	3.68	43.05	11.08	0.73
河南	61.91	459.50	224.50	745.90	3038.99	43.06	6.50	6.61	2961.21	3.97	81.88	11.05	0.89
山东	37.34	286.20	155.26	478.80	1690.12	47.99	5.88	5.91	1388.51	2.90	101.85	11.82	0.77

注:因黄河流域内四川面积较小,本文没有分析流域内四川的指标;本表数据为各省区在黄河流域内区域的指标数据,不代表行政区域。

资和进口等能值输入对区域经济发展贡献比较明显,但是黄河上游青海对反馈输入能值的依赖性仅有5.29%,还需要增加外部资源的开发利用力度。

表2 黄河流域能值投入占比与单位面积总能值

Table 2 The ratio of energy input and total energy per unit area in the Yellow River Basin

行政区	能值投入占比/%			单位面积总能值/ ( $10^{18}$ sej · km <sup>-2</sup> )	
	$C_1$	$C_2$	$C_3$	投入	产出
青海	17.21	77.50	5.29	0.85	2.69
甘肃	11.43	72.47	16.10	2.36	7.24
宁夏	19.31	69.55	11.14	6.26	17.70
内蒙古	9.86	69.70	20.44	1.55	5.30
陕西	10.10	68.10	21.80	7.69	25.00
山西	8.28	59.44	32.28	11.69	36.63
河南	8.30	61.60	30.10	20.63	84.03
山东	7.80	59.77	32.43	35.12	123.97

由表2 单位面积总能值投入和产出可以看出,总体来说黄河流域从上游到下游单位面积总能值投入逐渐变大,其中由于面积的影响,内蒙古的单位面积总能值投入要低于甘肃和宁夏,说明黄河上游经济发展水平偏低,而黄河下游尤其是山东和河南的经济发展水平较高,这与各省区的GDP基本一致,也说明能值流分析方法在社会经济系统中的有效性。

### 3.2 经济发展能值评价指标分析

由表1 可知,黄河流域能值投资率山东、山西和河南较高,均超过了40%,说明这3省的经济发展程度更高,其次是陕西和内蒙古,最后是甘肃、宁夏和青海。结合不同形式能值投入比例可以看出,甘肃、宁夏和青海3省区的社会经济系统主要依靠不可更新资源的投入,其能值投资率都较低,因此,还需要利用有利资源,加大可更新资源或反馈输入能值的投入,促进经济发展。净能值产出率河南最高,说明河南对能值利用的效率最高,系统对经济的贡献最大;净能值产出率宁夏最低,说明宁夏资源产生

的效益较低,这主要与其产业结构有关,还需要优化产业结构,进一步提高资源利用的效率。对于能值货币比率来说,青海最高,宁夏次之,表明青海和宁夏每单位货币所能购买的能值较多,对自然资源的依赖相对较大,结果与系统能值流结果分析一致。能值货币比率山东最低,说明山东的经济系统发达程度较高,需要投入高能值的科技来提高资源的综合效益。

### 3.3 水资源能值评价指标分析

水资源能值评价3个指标中,年用水能值与流域综合管理和分水有关,本文主要讨论黄河流域各省的水资源能值贡献率和水资源能值利用强度两个指标。

由表1 可知,内蒙古的水资源能值贡献率最大,为4.91%,其次是宁夏,表明水资源对内蒙古和宁夏的经济发展贡献较大,主要原因为宁蒙灌区中,农业生产对水资源的依赖性较强,水资源对经济贡献较大。水资源能值贡献率青海和甘肃较低,说明水资源对经济贡献较小,可以适当节水。水资源能值贡献率的大小对黄河流域水量动态调整和生态补偿也可提供参考。水资源能值利用强度山东和河南较高,说明经济发展比较好的地区对水资源的利用效率也较高,青海和甘肃则需要提高水资源利用效率,或者在水资源配置中,可以考虑减少供水量。需要指出的是,宁夏的水资源能值利用强度为 $29.30 \times 10^{16}$  sej/m<sup>2</sup>,较内蒙古和甘肃都高,说明宁夏对水资源的利用效率也较高。

### 3.4 可持续发展能值评价指标分析

由表1 可以看出,对于环境负载率来说,山东、山西和河南3省较大,分别为11.82、11.08和11.05,这表明3省较其他省区环境系统压力更大,这与3省的能值投资率较大一致,最主要原因是3省的发展水平较高,未来需要加大可更新资源的投入,促进生态经济系统可持续发展;环境负载率最

低的是宁夏,表明宁夏环境系统压力相对较小。由各省区的可持续发展指数可以看出,宁夏和青海不可持续状态较好,均超过1,生态经济系统具有一定的活力;其他省区的可持续指数均低于1,说明其区域生态经济系统处于不可持续状态。

通过系统能值流分析可知,宁夏和青海的可更新资源能值较高,分别占到系统总能值投入的19.31%和17.21%(表2),这两省区的可持续发展指数较高,环境负载率较低,整体处于良性发展状态。而可持续发展指数较低的山东、河南等省区的可更新资源能值占系统总能值投入的8%左右,环境负载率处于较高水平。这也说明区域的生态经济系统可持续发展能力受环境负载率的影响,与可更新资源的投入密切相关,因此要想保证一个区域具有较强的可持续发展能力,需要利用更多的可更新资源,大力发展太阳能、风能、水电和核能等清洁能源,使低能值的可更新资源与高能值的不可更新资源匹配,同时可适当加大反馈能源的投入,减轻不可更新资源的投入,以实现区域的生态经济系统可持续发展。另外河南、山东等省区的水资源利用强度较大,也加大了环境压力,提高了环境负载率,在发展过程中,还需要注重提高水资源在社会经济系统中的贡献率,通过水资源优化配置、调整产业结构等措施提高水资源在社会经济系统中的贡献率。

## 4 结 论

a. 黄河流域生态经济发展主要依存于不可更新资源的投入,属于资源消耗型生态经济模式;整体上黄河流域下游的社会经济发展较黄河上游好。

b. 黄河流域的现代化程度最好的是山东、陕西和河南,其次为山西和内蒙古,最后是甘肃、宁夏和青海。

c. 黄河上游水资源利用强度最低,下游水资源利用强度较高,在水资源优化配置中,可适当增加下游分水。

d. 黄河流域除青海和宁夏外,其他省区均具有较高的环境负载率,社会经济系统处于不可持续状态,需要进一步加大可更新资源的投入并提高水资源在社会经济系统中的贡献率,以实现区域的可持续发展。

### 参考文献:

[1] 吴泽宁,吕翠美,胡彩虹,等. 水资源生态经济价值能值分析理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2013.  
[2] 姚娜. 区域水资源可持续利用评价方法研究:以太湖流域湖州市为例[D]. 郑州:郑州大学,2017.

[3] 张乐勤,方宇媛. 基于空间自相关分析的安徽省水资源生态压力空间格局探析[J]. 水资源保护,2017,33(1):24-29. (ZHANG Leqin, FANG Yuyuan. Study of spatial pattern of water resources ecological pressure in Anhui Province based on spatial autocorrelation analysis [J]. Water Resources Protection,2017,33(1):24-29. (in Chinese))  
[4] PANDEY V P, BABEL M S, SHRESTHA S, et al. A framework to assess adaptive capacity of the water resources system in Nepalese River Basins[J]. Ecological Indicators,2011,11(2):480-488.  
[5] CHEN H W, CHANG N B. Using fuzzy operators to address the complexity in decision making of water resources redistribution in two neighboring river basins[J]. Advances in Water Resources,2010,33(6):652-666.  
[6] ZHANG J, ZHANG C L, SHI W L, et al. Quantitative evaluation and optimized utilization of water resources-water environment carrying capacity based on nature-based solutions[J]. Journal of Hydrology,2019,568:96-107.  
[7] 潘苹,黄晓荣,魏晓玥,等. 基于能值的成都市水资源生态经济系统可持续性研究[J]. 水力发电,2019,45(9):12-16. (PAN Luo, HUANG Xiaorong, WEI Xiaoyue, et al. Research on the sustainability of water eco-economic system in chengdu based on emergy analysis [J]. Water Power,2019,45(9):12-16. (in Chinese))  
[8] 陶倩君,郭程轩. 广东省水资源生态足迹的定量评价及其影响因素[J]. 水资源保护,2018,34(2):28-33. (TAO Qianjun, GUO Chengxuan. Quantitative evaluation and influential factor of water resources ecological footprint in Guangdong Province [J]. Water Resources Protection, 2018,34(2):28-33. (in Chinese))  
[9] 杨光明,时岩钧,杨航,等. 基于系统动力学的水资源承载力可持续发展评估:以重庆市为例[J]. 人民长江,2019,50(8):6-13. (YANG Guangming, SHI Yanjun, YANG Hang, et al. Assessment of sustainable development of water resources carrying capacity based on system dynamics [J]. Yangtze River, 2019, 50(8):6-13. (in Chinese))  
[10] 周云哲. 基于“量质域流”的水资源荷载均衡评价:以黄河流域为例[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.  
[11] 崔冬梅,朱翊宇. 江苏水生态系统可持续发展分析[J]. 水资源保护,2016,32(增刊1):137-140. (CUI Dongmei, ZHU Hongyu. Analysis of sustainable development of water ecosystems in Jiangsu [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(Sup1):137-140. (in Chinese))  
[12] 韩艳利,娄广艳,葛雷,等. 黄河流域与水有关生态补偿框架的探讨[J]. 水资源保护,2016,32(6):142-150. (HAN Yanli, LOU Guangyan, GE Lei, et al. Discussion of water-related ecological compensation framework for Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection,

- 2016,32(6):142-150. (in Chinese))
- [12] 田桂桂. 基于物质循环的生态用水价值能值评估方法研究[D]. 郑州:郑州大学,2016.
- [13] 吕翠美. 区域水资源生态经济价值的能值研究[D]. 郑州:郑州大学,2009.
- [14] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳, 等. 生态经济系统能值分析[M]. 北京:化学工业出版社,2002.
- [15] ODUM H T. Environmental accounting emergy and environmental decision making [M]. New York: John Wiley & Sons,1996.
- [16] HUANG Shuli, CHANG Lifang, YEH C T. How vulnerability is the land scape when the typhoon comes? an emergy approach[J]. Landscape and Urban Planning, 2011,100(4):415-417.
- [17] 吕翠美, 吴泽宁. 区域水资源生态经济系统可持续发展评价的能值分析方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7): 144-149. (LYU Cuimei, WU Zening. Emergy analysis for sustainable development assessment regional water ecological-economics system [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2010, 30(7): 144-149. (in Chinese))
- [18] 陈伟, 耿涌, 黄斌斌, 等. 西部欠发达地区生态经济系统的能值分析: 以青海省海西蒙古族藏族自治州为例[J]. 生态学报, 2019, 39(21): 7904-7913. (CHEN Wei, GENG Yong, HUANG Binbin, et al. Emergy accounting of a western underdeveloped eco-economic system: a case study of Haixi in Qinghai [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): 7904-7913. (in Chinese))
- [19] 吴婧慈. 基于能值分析的海岛生态系统服务价值研究[D]. 舟山:浙江海洋大学,2018.
- [20] 贾小乐, 周源, 延建林, 等. 基于能值分析的环太湖城市群生态经济系统可持续发展研究[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6487-6499. (JIA Xiaole, ZHOU Yuan, YAN Jianlin, et al. Sustainable development of an ecological-economic system in the Taihu Lake city cluster based on emergy analysis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): 6487-6499. (in Chinese))
- [21] 靖娟, 宋华力, 蒋桂芹. 基于能值的鄂尔多斯市水资源生态经济系统可持续发展动态分析[J]. 节水灌溉, 2015(1): 48-51. (JING Juan, SONG Huai, JIANG Guiqin. Dynamic assessment of sustainable development of Ordos water ecological economic system based on emergy analysis[J]. Water Saving Irrigation, 2015(1): 48-51. (in Chinese))
- [22] 王慧亮, 吴泽宁, 郭溪, 等. 基于生态环境损失的农业生态系统能值分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(6): 92-97. (WANG Huiliang, WU Zening, GUO Xi, et al. Emergy analysis of agricultural ecosystem based on ecological environment loss [J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science), 2016, 37(6): 92-97. (in Chinese))

(收稿日期:2020-03-02 编辑:熊水斌)

(上接第6页)

- [18] 杜康宁, 梁忠民, 王军, 等. 城市洪涝灾害风险区划研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(1): 61-64. (DU Kangning, LIANG Zhongmin, WANG Jun, et al. Study on risk zoning of urban flood disaster [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(1): 61-64. (in Chinese))
- [19] 李远平, 杨太保, 包训成. 大别山北坡典型区域暴雨洪涝风险评价研究: 以安徽省六安市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(4): 582-587. (LI Yuanping, YANG Taibao, BAO Xuncheng. Assessment of rainstorm flood risk in Lu'an city on the north slope of dabi mountain [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(4): 582-587. (in Chinese))
- [20] 周成虎, 万庆, 黄诗峰, 等. 基于 GIS 的洪水灾害风险区划研究[J]. 地理学报, 2000, 55(1): 15-24. (ZHOU Chenghu, WAN Qing, HUANG Shifeng, et al. A GIS-based approach to flood risk zonation [J]. ACTA Geographica Sinica, 2000, 55(1): 15-24. (in Chinese))
- [21] 李碧琦, 罗海婉, 陈文杰, 等. 基于数值模拟的深圳民治片区暴雨内涝风险评估[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(5): 20-28. (LI Biqi, LUO Haiwan, CHEN Wenjie, et al. Risk assessment of rainstorm waterlogging based on numerical simulation in Shenzhen Minzhi district [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5): 20-28. (in Chinese))
- [22] 张倩玉, 许有鹏, 雷超桂, 等. 东南沿海水库下游地区基于动态模拟的洪涝风险评估[J]. 湖泊科学, 2016, 28(4): 868-874. (ZHANG Qianyu, XU Youpeng, LEI Chaogui, et al. Riskassessment of flood based on dynamic simulation in downstream of reservoirs in coastal area of southeast China [J]. Journal of Lake Science, 2016, 28(4): 868-874. (in Chinese))
- [23] 陈军飞, 陈梦晨, 高士佩, 等. 基于云物元模型的南京市雨洪灾害风险评估[J]. 水利经济, 2019, 37(2): 67-72. (CHEN Junfei, CHEN Mengchen, GAO Shipai, et al. Risk assessment of rainstorm disasters in Nanjing based on cloud matter-element model [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(2): 67-72. (in Chinese))
- [24] 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))

(收稿日期:2020-06-17 编辑:彭桃英)