

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.019

基于能值水生态足迹模型的黄河流域水资源利用评价

王慧亮^{1,2}, 李卓成¹

(1. 郑州大学水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 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)

摘要:为辨析黄河流域突出的水资源问题,科学分析流域水资源利用状况,将能值理论和水生态足迹法相结合,构建能值水生态足迹模型,计算和分析了黄河流域2011—2018年的能值水生态足迹、能值水生态承载力和水生态盈亏状况。结果表明:2011—2018年黄河流域能值水生态足迹呈平稳上升趋势,能值水生态承载力呈先下降后上升趋势,但历年能值水生态承载力均小于能值水生态足迹,流域水生态赤字没有改变;农业用水生态足迹在流域总能值水生态足迹中占比最大,而生态环境用水生态足迹占比最低;流域不同省(区)能值水生态足迹与承载力差异显著,除青海、四川和甘肃水生态盈余较大外,其余省(区)水资源利用呈不可持续状态。黄河流域水资源安全形势不乐观,应合理调度水资源和提升用水效率,促进流域社会、经济、环境的协调发展。

关键词:水生态足迹;能值;水资源利用;黄河流域

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)01-0147-06

Evaluation of water resources utilization in the Yellow River Basin based on emergy water ecological footprint model // WANG Huiliang^{1,2}, LI Zhuocheng¹ (1. College of Water Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Postdoctoral Research Station, Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: To identify the prominent water resources problems in the Yellow River Basin and analyze the utilization of water resources in the basin scientifically, the emergy water ecological footprint model, which is the combination of emergy theory and water ecological footprint method, was constructed. The emergy water ecological footprint, emergy water ecological carrying capacity and water ecological profit of the Yellow River Basin from 2011 to 2018 were calculated and analyzed. The results indicated that during this period, the emergy water ecological footprint in the Yellow River Basin increased steadily, while the emergy water ecological carrying capacity decreased and then increased. Despite of that, the emergy water ecological carrying capacity has always been less than the emergy water ecological footprint, and the water ecological deficit did not turn around. Agricultural water ecological footprint accounted for the largest proportion of total water ecological footprint, while environmental ecological water footprint accounted for the lowest proportion. There were significant differences in emergy water ecological footprint and carrying capacity among different provinces (regions) in the basin. Except for that in Qinghai, Sichuan and Gansu provinces where the water ecological surplus was large, the water resources utilization in many provinces (regions) was unsustainable. The water resources security in the Yellow River Basin is not so promising. It is necessary to regulate water resources rationally and improve water efficiency, to promote the coordinated development of society, economy and environment in the basin.

Key words: water ecological footprint; emergy; water resources utilization; the Yellow River Basin

水是人类生存、社会经济发展中不可或缺的资源^[1],但黄河流域水资源时空分布不均衡、水环境恶化、水资源短缺等水问题突出^[2]。探讨流域水资源利用状况以及水资源可承载能力,对流域水资源

安全与健康持续发展具有重要意义。

生态足迹概念于1922年提出^[3-4],旨在通过生物生产性土地面积来测算和定量评价一个地区或区域的资源利用程度以及可持续发展状态,能够较好

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,主要从事水文水资源研究。E-mail: wanghuiliang@zhu.edu.cn

地测量和比较人类经济系统对自然生态系统服务的需求和自然生态系统的承载力之间的差距。徐中民等^[5]于2000年将生态足迹概念引入我国,并对甘肃省1998年的生态足迹进行了实证计算和分析。传统的生态足迹方法仅分析了水域的生物生产能力,忽略了地表或地下水资源的其他功能,黄林楠等^[6]在传统生态足迹的基础上提出了水资源生态足迹模型,测算和分析了江苏省1998—2003年水资源生态足迹变化趋势;郭利丹等^[7]将水资源生态足迹一级账户细分为12个三级账户,计算分析了江苏省2008—2017年水资源生态足迹和生态承载力的变动趋势;路瑞等^[8]引入Tapio弹性分析法,分析了黄河流域水资源生态足迹与经济发展协调关系。优化后的水资源生态足迹模型仍存在不足,其模型参数多采用的是全球性数据,不利于各地区之间的水资源生态足迹横向比较,为此曾晓霞^[9]提出了水资源的能值生态足迹评价模型,改进后的模型避免了人为的参数设置,便于不同地区的实时对比分析;在此基础上,汪定盼等^[10]和刘珂伶等^[11]应用水资源能值生态足迹模型分别对我国西北某调水工程区和北京市的水资源可持续利用状况进行了探讨,进一步验证了水资源能值生态足迹模型的可行性。在已有的水资源能值生态足迹研究中,生态足迹账户往往忽略了水产品消费量或是水体污染对生态足迹的影响,而且基于能值水资源生态足迹法对黄河流域水资源利用研究尚不多见。

本文将能值分析定理和水生态足迹法相结合,建立能值水生态足迹模型,利用该模型测算黄河流域2011—2018年能值水生态足迹和承载力等参数,并通过水生态盈亏和水生态压力指数对黄河流域水资源利用状况进行科学评价分析,以期为黄河流域水资源的开发利用和科学管控提供参考。

1 研究区概况

黄河流域地处我国北中部,地势西高东低,地形起伏较大,自西向东形成三级阶地,构成我国重要的生态屏障。黄河干流全长5464 km,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南和山东等9省(区),最终注入渤海。

黄河流域水文现象主要表现为水少沙多、水沙异源,流域多年平均径流量580亿m³,仅占全国河川径流总量的2.2%,人均水资源量仅为408 m³,不足全国人均水资源量的1/5^[12]。据统计,从1980—2016年黄河流域用水总量由343亿m³增长至411亿m³,流域行业用水结构发生了显著变化,其中农业用水下降了15.3%,而工业、生活用水分别增长了

5.4%和6.4%;各省(区)用水量占流域总用水量的比例也存在差异,宁夏、山东、河南和青海等省(区)分别减小了5.0%、1.8%、0.5%和0.4%,而内蒙古、山西、甘肃、陕西等省(区)分别增大了3.9%、2.1%、1.6%和0.1%。黄河流域水资源开发利用已接近80%^[13],远超一般流域40%的生态警戒临界值,位居我国十大流域首位。

2 研究方法

2.1 能值理论与方法

能值分析理论^[14]认为地球上所有事物的能量均得益于太阳能的贡献,可将太阳能值作为衡量事物能量的基准。在实际研究中,通过能值转换率建立能量与能值之间的联系,可把地球系统内不同形式、不可直接相加减的能量转化成同一标准的能值来衡量和分析^[15]。能值表达式为

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

式中: E 为能值,sej; B 为能量或物质的质量,J或g; τ 为能值转换率,sej/J或sej/g。

2.2 能值水生态足迹

水生态足迹是指某一特定的地理区域内,经济规模和人口发展到一定程度时,区域发展所消费的水资源量和吸纳生活、生产废弃物需要的水资源量,据此核算得到的生物生产性土地面积,即虚拟的水资源用地^[16]。根据黄河流域水资源用水特性,将能值水生态足迹一级账户划分为淡水生态足迹、水污染生态足迹和水产品生态足迹3个二级账户。其中,淡水生态足迹分为农业用水、工业用水、生活用水(城镇公共、居民生活用水)和生态环境用水4个三级账户。能值水生态足迹表达式为

$$W_{ef} = W_{eff} + W_{efp} + W_{efa} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} W_{eff} &= \sum_{i=1}^n \frac{E_{fi}}{P} = \sum_{i=1}^n \frac{C_{fi}\tau_{fi}}{P} \\ W_{efp} &= \frac{E_p}{P} = \frac{Q_p\tau_p}{P} \\ W_{efa} &= \frac{E_a}{P} = \frac{M_a\tau_a}{P} \end{aligned}$$

式中: W_{ef} 、 W_{eff} 、 W_{efp} 、 W_{efa} 分别为区域能值水生态足迹、淡水生态足迹、水污染生态足迹和水产品生态足迹, hm²; E_{fi} 为第*i*个三级账户的能值, sej; E_p 、 E_a 分别为水污染和水产品的能值, sej; C_{fi} 为第*i*个三级账户的用水量, m³; Q_p 为污水排放量, t; M_a 为水产品产量, t; τ_{fi} 为第*i*个三级账户的能值转换率, sej/m³; τ_p 为污染水体的能值转换率, sej/t; τ_a 为水产品的能值转换率, sej/t; P 为区域能值密度, sej/hm²; n 为三级账户个数。

2.3 能值水生态承载力

基于能值理论的水资源生态承载力是指区域在一定的社会发展阶段和技术管理条件下,其拥有的水资源量能够最大限度支持区域的经济、环境以及社会良好发展的能力。根据黄河流域的水资源来源情况,计算流域水资源生态承载力时选取地表水化学能、地下水化学能和雨水势能作为区域的可更新资源^[10];此外,为了保证一个地区的水生态环境能够正常运行,至少需要扣除 60% 的水量来维持水生态环境的健康^[16]。能值水生态承载力表达式^[11]为

$$W_{ec} = \frac{0.4(E_g + E_u + E_r)}{P_w} \quad (3)$$

式中: W_{ec} 为能值水生态承载力, hm^2 ; E_g 、 E_u 、 E_r 分别为地表水化学能、地下水化学能和雨水势能, sej ; P_w 为区域水资源平均能值密度, sej/hm^2 。

2.4 能值水生态足迹评价指标

a. 水生态盈亏指数。能值水生态足迹反映了特定区域对水资源的需求和实际占用情况,而能值水生态承载力则表征水生态系统对社会经济发展的承受和支撑能力,通过比较两者大小关系可判断区域内水资源可持续利用情况^[17]。水生态盈亏指数表达式为

$$W_{ed} = W_{ef} - W_{ec} \quad (4)$$

式中 W_{ed} 为区域水生态盈亏指数。当 $W_{ed} = 0$ 时,水资源处于生态平衡状态,表明区域水资源供需平衡;当 $W_{ed} > 0$ 时为水生态赤字,表明区域水资源需求大于供给,水资源短缺;当 $W_{ed} < 0$ 时为水生态盈余,表明区域水资源充足,有利于社会经济的发展。

b. 水生态压力指数。水生态压力指数是指区域内能值水生态足迹和承载力的比值,其大小用来判断区域内水资源开发利用安全状态^[18]。水生态压力指数表达式为

$$I_p = W_{ef}/W_{ec} \quad (5)$$

式中 I_p 为水生态压力指数。当 $I_p = 1$ 时,表明区域水资源消耗与供给平衡,即区域水生态安全处于临界状态;当 $0 < I_p < 1$ 时,表明区域水资源供给还可以支撑其消费现状和水平,即区域水资源利用处于安全状态;当 $I_p > 1$ 时,表明区域水资源利用不可持续,即区域水资源处于危险状态,且 I_p 值越大,区域水资源利用强度越大,水资源环境越危险。

2.5 数据来源

用水量、年降水量、水资源总量等水资源数据来自 2011—2018 年《黄河流域水资源公报》以及流域内各省(区)水资源公报;废污水排放量和水产品产量等社会统计数据来自 2011—2018 年流域内各省(区)统计年鉴。

2.6 模型相关参数确定

区域能值密度 P 、区域水资源平均能值密度 P_w 分别为区域可更新资源的总能值、区域水资源总能值与区域面积的比值,参考 Chen 等^[19]的研究成果,黄河流域能值密度取值为 $4.57 \times 10^{15} \text{ sej}/\text{hm}^2$;据 2011—2018 年《黄河流域水资源公报》统计结果,黄河流域多年平均降水量和流域面积分别为 485 mm 和 79.5 万 km^2 ,经核算黄河流域水资源平均能值密度为 $4.36 \times 10^{14} \text{ sej}/\text{hm}^2$ 。本文能值量化所涉及的其他参数及其转换关系可参见文献[20-22]。

3 结果与分析

3.1 时间维度动态分析

3.1.1 能值水生态足迹与承载力

2011—2018 年黄河流域能值水生态足迹变化趋势如图 1 所示,总体上保持上升趋势,年际差异不大,变化范围在 1520 万 ~ 1630 万 hm^2 ,多年平均值为 1590 万 hm^2 ,流域能值水生态足迹由 2011 年最低值 1520 万 hm^2 增长到 2018 年最高值 1630 万 hm^2 ,多年平均增长率为 1.3%。由此可知,随着经济社会的发展以及在快速工业化和城镇化背景之下,黄河流域各行业耗水和用水需求不断增加,流域水资源面临着严峻的挑战。

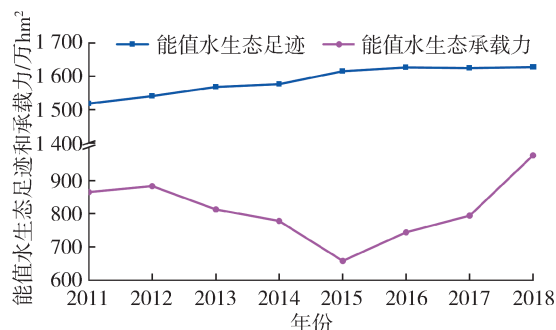


图1 黄河流域 2011—2018 年能值水生态足迹与承载力
Fig.1 Energy water ecological footprint and carrying capacity in the Yellow River Basin from 2011 to 2018

2011—2018 年黄河流域能值水生态承载力总体呈先下降后上升的趋势(图 1),变化幅度相对较大,多年能值水生态承载力平均值为 810 万 hm^2 。从 2011—2015 年流域能值水生态承载力呈现明显的下降趋势,从 860 万 hm^2 下降到 660 万 hm^2 ;而 2015—2018 年流域能值水生态承载力呈急剧上升趋势,2018 年达到研究周期内的最大值 970 万 hm^2 。流域能值水生态承载力 2015 年最小,与黄河流域近 10 年来降水、径流特征基本吻合,表明流域能值水生态承载力主要与流域来水情况相关,丰水年份水生态承载力相对较高,而枯水年份则相反。

3.1.2 能值水生态足迹构成

黄河流域能值水生态足迹构成如图 2 所示,其中农业用水、水污染、工业用水、生活用水和水产品生态足迹的占比分别为 33%、27%、13%、11% 和 10%,生态环境用水生态足迹占比最小,仅为 2%。可见,农业和工业用水仍是黄河流域水资源利用过程中的用水大户,近年来,黄河流域工业和农业用水呈缓慢下降趋势,可能是因为流域用水由粗放型转向高效集约利用,用水效率得到了提高;2015 年《水污染防治行动计划》出台,流域的水环境状况得到改善,水污染足迹呈下降趋势;随着流域人口不断增加,城镇化和城市化不断加快,生活用水、水产品用水相继提高,导致其生态足迹也升高,但总体变化幅度不大,基本维持稳定状况;生态环境用水生态足迹呈增长的趋势,但其占比最低,应增加生态环境用水量,以利于推动流域的环境优化和改善。

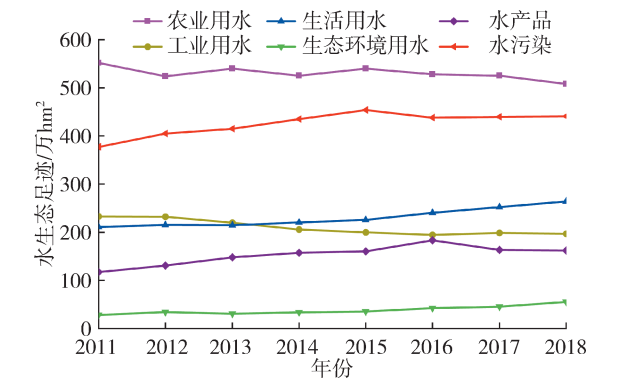


图 2 黄河流域能值水生态足迹构成
Fig. 2 Composition of emergy water ecological footprint in the Yellow River Basin

3.1.3 水生态盈亏与压力指数

黄河流域 2011—2018 年水生态盈亏变化过程与能值水生态承载力变化过程相反(图 3),由于研究周期内流域能值水生态足迹远大于能值水生态承载力,因此黄河流域呈现水生态赤字状态。2011—2018 年流域水生态赤字介于 650 万~960 万 hm^2 之间,2018 年为最小值 650 万 hm^2 ,2015 年达到最大值 960 万 hm^2 ,多年水生态赤字均值为 770 万 hm^2 。2015 年之后,在流域能值水生态足迹保持平稳增长的形势下,黄河流域降水和来水量大幅度增加,导致水生态赤字持续减小,表明流域经济社会发展对水资源的需求远大于水资源的供给,流域水资源可持续利用面临着严峻的问题。

2011—2018 年流域水生态压力指数变化趋势与水生态赤字基本保持一致,均呈先上升后下降趋势(图 3),年际变化在 1.67~2.45 之间。2012—2015 年水生态压力指数快速增长(2012 年比 2011

年下降 0.02),多年平均增长率为 12.3%;2015 年以后水生态压力指数迅猛下降,多年平均下降率为 12%。总体来看,水生态压力指数始终大于 1,说明流域水资源供给量远小于消费量,水资源开发利用空间不足,水资源可持续利用受到威胁,不利于流域社会经济可持续发展和生态良性发展,这与水生态赤字的结论基本一致。

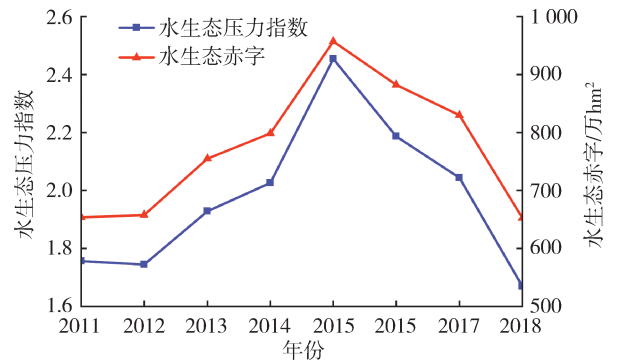


图 3 黄河流域 2011—2018 年水生态赤字与压力指数
Fig. 3 Water ecological deficit and pressure index of the Yellow River Basin from 2011 to 2018

3.2 空间分布格局

根据能值水生态足迹与承载力模型,计算得到 2011—2018 年黄河流域 9 省(区)能值水生态足迹、能值水生态承载力和水生态压力指数多年平均值,结果如表 1 所示。

a. 能值水生态足迹与承载力分布。黄河流域不同省(区)的能值水生态足迹与承载力存在地区差异性,能值水生态足迹整体呈现流域中部高四周低的趋势,具体表现为宁夏、陕西、山西、内蒙古、河南能值水生态足迹较大,平均值为 252 万 hm^2 ,而青海、四川、山东能值水生态足迹较小,平均值为 63 万 hm^2 ;能值水生态承载力青海最高,为 224.1 万 hm^2 ,而山东最低,为 20.8 万 hm^2 ,两者相差近 10 倍。

b. 水生态盈亏与压力指数。流域上游青海、四川、甘肃水生态盈亏指数小于 0,其水生态压力指数分别为 0.2、0.4 和 1,表明其能值水生态足迹小于能值水生态承载力,可能是因为上游地区水资源相对丰沛,有较大的水资源利用空间,特别是甘肃省水生态盈亏指数接近于 0,表明该地区水资源供需关系达到相对平衡状态;而中下游地区的省份水生态盈亏指数介于 0.06~0.28 之间(水生态赤字),且相应的水生态压力指数均大于 1,表明所在地区水资源消耗量远大于供给量,水资源供需矛盾突出,特别是宁夏水生态压力指数高达 9.7,水资源环境处于极其危险的状态。

c. 能值水生态足迹构成。因黄河流域不同省(区)社会经济发展方式不同,相应的能值水生态足

表1 黄河流域9省(区)能值水生态足迹与承载力空间差异

Table 1 Spatial differences of emergy water ecological footprint and carrying capacity among nine provinces of the Yellow River Basin

省(区)	能值水生态足迹/万 hm ²							能值水生态 承载力/万 hm ²	水生态盈亏 指数/万 hm ²	水生态 压力指数
	农业用水	工业用水	生活用水	生态环境用水	水产品	水污染	总量			
青海	20.8	5.2	10.9	1.01	0.5	5.5	44.0	224.1	-180.1	0.2
四川	0.5	0.1	0.7	0.01	11.3	12.4	25.0	70.1	-45.1	0.4
甘肃	50.4	27.7	30.1	3.05	1.2	23.3	135.7	137.6	-1.9	1.0
宁夏	116.4	16.2	11.7	5.27	28.8	29.1	207.6	21.4	186.2	9.7
内蒙古	139.9	33.0	21.4	7.59	4.3	14.6	220.8	62.3	158.5	3.5
陕西	71.7	40.1	63.3	7.03	21.2	107.3	310.6	135.8	174.9	2.3
山西	57.2	31.4	43.3	5.47	7.1	90.8	235.1	92.2	143.0	2.6
河南	55.9	46.7	34.4	6.41	47.7	95.8	286.9	49.6	237.3	5.8
山东	17.6	9.6	14.7	2.24	30.8	46.6	121.5	20.8	100.7	5.8

迹构成也不尽相同。流域上游青海、甘肃、宁夏、内蒙古农业用水生态足迹在流域总能值水生态足迹中占比较大,分别为47%、37%、56%和63%,其余省份均低于25%,表明上游地区以农业用水为主,大量的水资源用于农业灌溉,节约用水以及提高用水效率显得尤为重要;流域中下游地区陕西、山西、河南、山东的水污染生态足迹占比较大,平均值为36%,这可能是随着城市化的快速推进,工业废水、生活污水排放增多,水体污染愈发严重;流域九省(区)的生态环境用水生态足迹在各省(区)的总能值水生态足迹中占比最低,仅维持在0.05%~3.44%之间,但生态环境用水生态足迹增长对于流域生态环境优化与改善具有积极的作用,在今后的水资源配置上应继续提高生态环境用水比例。

4 结 论

a. 2011—2018年黄河流域能值水生态足迹总体上保持稳步增长趋势,年际差异不大,多年平均值为1590万hm²,而流域能值水生态承载力主要受当地水资源量影响,变化幅度相对较大,总体呈先下降后上升的趋势,2015年为拐点。总体来看,流域能值水生态足迹远大于能值水生态承载力,流域水生态赤字没有改变;流域水生态压力指数始终大于1,水资源开发利用处于不安全状态,水资源可持续利用受到威胁。

b. 黄河流域各类能值水生态足迹占比差异显著,农业用水、水污染和工业用水生态足迹的贡献较大,但农业用水和工业用水生态足迹总体呈下降趋势,而水污染生态足迹处于逐年增长状态;生活用水生态足迹和水产品生态足迹占比相对较小,两者总体变化幅度不大,基本维持稳定状况;生态环境用水生态足迹占比最小,但保持稳定增长趋势。

c. 黄河流域不同省(区)的能值水生态足迹和承载力存在地区差异性,中游地区能值水生态足迹

明显比上下游地区的高,总体呈现出中间高两侧低的趋势;而能值水生态承载力则波动变化,表现为青海最高,山东最低。除了流域上游青海、四川、甘肃水资源表现为生态盈余,水资源供给基本满足需求,其余省(区)水资源呈现不同程度的水生态赤字状态。

d. 流域上游地区农业用水生态足迹贡献较大,其中内蒙古最为突出,上游地区应提倡节约用水和提高农业用水效率;而流域中下游地区水污染生态足迹占比较大,平均值为36%,应当降低污染物排放,减少水体污染;生态环境用水生态足迹在整个能值水生态足迹中占比最低,应合理增加生态环境用水量,保证水环境处于健康状态。

参考文献:

- [1] 王浩,王建华. 中国水资源与可持续发展[J]. 中国科学院院刊,2012,27(3):352-358. (WANG Hao, WANG Jianhua. Sustainable utilization of China's water resources [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(3):352-358. (in Chinese))
- [2] 王煜,彭少明,武见,等. 黄河“八七”分水方案实施30a回顾与展望[J]. 人民黄河,2019,41(9):6-13. (WANG Yu, PENG Shaoming, WU Jian, et al. Review of the implementation of the Yellow River water allocation scheme for thirty years[J]. Yellow River, 2019, 41(9):6-13. (in Chinese))
- [3] WACKERNAGEL M, REES W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: economics from an ecological footprint perspective [J]. Ecological Economics, 1997, 20(1):3-24.
- [4] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out [J]. Environment and Urbanization, 1992, 4(2):121-130.
- [5] 徐中民,张志强,程国栋. 甘肃省1998年生态足迹计算与分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5):607-616. (XU

- Zhongmin, ZHANG Zhiqiang, CHENG Guodong. The calculation and analysis of ecological footprints of Gansu Province[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(5): 607-616. (in Chinese))
- [6] 黄林楠, 张伟新, 姜翠玲, 等. 水资源生态足迹计算方法[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1279-1286. (HUANG Linnan, ZHANG Weixin, JIANG Cuiling, et al. Ecological footprint method in water resources assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 1279-1286. (in Chinese))
- [7] 郭利丹, 井沛然. 基于生态足迹法的江苏省水资源可持续利用评价[J]. 水利经济, 2020, 38(3): 19-25. (GUO Lidang, JING Peiran. Evaluation of sustainable utilization of water resources in Jiangsu Province based on ecological footprint theory[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38(3): 19-25. (in Chinese))
- [8] 路瑞, 赵琰鑫. 基于水资源生态足迹的黄河流域水资源利用评价[J]. 人民黄河, 2020, 42(11): 48-52. (LU Rui, ZHAO Yanxin. Analysis of the water resources utilization in the Yellow River Basin based on water resources ecological footprint model[J]. Yellow River, 2020, 42(11): 48-52. (in Chinese))
- [9] 曾晓霞. 基于能值生态足迹优化模型的湘江城市群生态安全研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [10] 汪定盼, 李继清, 谢开杰. 基于能值生态足迹的调水工程供水区可持续性评价[J]. 中国农村水利水电, 2016(5): 37-40. (WANG Dingpan, LI Jiqing, XIE Kaijie. An assessment of sustainability based on emergy theory and ecological footprint for the water supply district of water diversion project[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(5): 37-40. (in Chinese))
- [11] 刘珂伶, 杨柳. 基于能值理论的水资源生态足迹变化特征: 以北京市为例[J]. 水土保持研究, 2020, 28(3): 1-9. (LIU Keling, YANG Liu. Characteristics of water resources ecological footprint based on emergy theory: taking Beijing as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 28(3): 1-9. (in Chinese))
- [12] 王慧亮, 申言霞, 李卓成, 等. 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[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 12-17. (WANG Huiliang, SHEN Yanxia, LI Zhuocheng, et al. Sustainability assessment of water resources ecological-economic system in the Yellow River Basin based on emergy theory[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 12-17. (in Chinese))
- [13] 王浩, 赵勇. 新时期治黄方略初探[J]. 水利学报, 2019, 50(11): 1291-1298. (WANG Hao, ZHAO Yong. Preliminary study on harnessing strategies for Yellow River in the new period[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(11): 1291-1298. (in Chinese))
- [14] ODUM H T. Environmental accounting: emergy and environmental decision making[M]. New York: Wiley, 1996.
- [15] 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.
- [16] 张义, 张合平. 基于生态系统服务的广西水生态足迹分析[J]. 生态学报, 2013, 33(13): 4111-4124. (ZHANG Yi, ZHANG Heping. Analysis of water ecological footprint in Guangxi based on ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(13): 4111-4124. (in Chinese))
- [17] 范晓秋. 水资源生态足迹研究与应用[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [18] 段锦, 康慕谊, 江源. 基于淡水资源账户和污染账户的生态足迹改进模型[J]. 自然资源学报, 2012, 27(6): 953-963. (DUAN Jin, KANG Muiyi, JIANG Yuan. Improvement of ecological footprint model based on freshwater resource account and pollution accounts[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(6): 953-963. (in Chinese))
- [19] CHEN B, CHEN G Q. Emery-based energy and material metabolism of the Yellow River basin[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2009, 14(3): 923-934.
- [20] DI D, WU Z, GUO X, et al. Value stream analysis and emergy evaluation of the water resource eco-economic system in the Yellow River Basin[J]. Water, 2019, 11(4): 710-729.
- [21] 连颖. 闽江流域改进能值生态足迹及其社会经济影响因素研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
- [22] 陈丹, 陈菁, 罗朝晖. 天然水资源价值评估的能值方法及应用[J]. 水利学报, 2006, 37(10): 1188-1192. (CHEN Dan, CHEN Jing, LUO Zhaohui. Evaluation method of natural water resources based on emergy theory and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(10): 1188-1192. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-03-07 编辑: 熊水斌)

