

# 基于能值分析的跨流域引调水工程生态效益计算

宋子奇, 方国华, 闻昕, 陈学义  
(河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 跨流域引调水工程是解决水资源时空分布不均、社会水需求不平衡的最有效的措施。根据跨流域引调水工程涉及不同流域、功能综合、结构复杂、相互交叉的特点,采用生态与经济并重的能值分析法对跨流域引调水工程的生态效益进行量化分析,并以浙东引水工程为例,具体计算分析了2017年浙东引水工程给工程沿线地区生态环境等方面带来的效益。计算结果表明:该量化方法能够较好地应用于实际引调水工程生态效益计算,且结果较以往常用的等效替代方法更为合理,贴近实际。

**关键词:** 跨流域引调水; 能值分析; 生态效益; 分摊系数

中图分类号: TV68

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)05-0056-06

## Ecological benefit calculation of inter-basin water diversion projects based on energy analysis

SONG Ziqi, FANG Guohua, WEN Xin, CHEN Xueyi

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The construction of inter-basin water diversion projects is one of the most effective measures targeting the uneven spatial and temporal distribution of water resources and the imbalance of social water demands. An inter-basin water diversion project involves in multiple different basins, it has complicated structures with multi-functional purposes, and always intersects with local reservoirs, lakes, channels or other water transport systems. Based on these characteristics, we adopted the energy analysis method, which considers the ecological value as vital as economic value, to quantitatively analyze the ecological benefits of East Zhejiang Water Diversion Project for the ecological environment of the areas along the route. The results show that this quantification method can be applied to the calculation of ecological benefits of actual diversion projects, and its results are more accurate and closer to the actual situation than those of the commonly used equivalent substitution method in the past.

**Key words:** inter-basin water diversion; energy analysis; ecological benefits; sharing coefficient

## 1 研究背景

水是生命之源,水资源维系着生态系统功能、支撑着社会经济系统发展,是一个国家至关重要的基础性战略资源。随着经济的快速发展,人们的物质生活水平不断提高,人类对水资源需求量急剧上升,区域水资源量与需水量愈发难以平衡,水资源的短缺已成为制约经济社会发展的主要因素。为解决水资源供需矛盾问题,跨流域引调水的规划应运而生。经过多年的研究与建设,我国成功修建了南水北调中线和东线、引滦入津、引黄济青、引大入秦、

引江济太、引汉济渭等多个大型跨流域引调水工程<sup>[1]</sup>,跨流域引调水工程已成为解决水资源时空分布不均的最科学、最有效的途径之一<sup>[2]</sup>。为了更好地发挥跨流域引调水工程在解决水资源分布不均、优化地区水资源配置上的巨大优势,必须对跨流域引调水工程产生的效益进行研究分析、合理量化,为跨流域引调水工程的建设管理、合理规划提供参考依据。

而跨流域引调水工程特点突出,与普通引水工程、水电工程的效益计算不尽相同,特别需要侧重对工程生态效益的分析量化<sup>[3]</sup>。跨流域引调水工程

收稿日期:2019-11-24; 修回日期:2020-02-12

作者简介:宋子奇(1996-),女,新疆乌鲁木齐人,硕士研究生,主要从事水资源规划及利用、水利经济方面的研究。

通讯作者:方国华(1964-),女,安徽定远人,博士,教授,博士生导师,主要从事水资源规划及利用、水利经济方面研究。

涉及两个或两个以上流域及地区,由于各地水资源情况、自然环境条件、社会经济发展形势都不相同,因而工程的不确定性、风险性更大<sup>[4]</sup>;跨流域引调水工程功能综合,输水距离长,引水渠道与各流域地区的蓄水水库、湖泊、天然河道及当地输配水设施存在多种串、并联及混联的关系,规划设计和运行管理难度较大,具有高度的复杂性<sup>[5]</sup>;跨流域引调水工程较一般水利工程影响范围更大,会造成更程度的生态环境变化,因此在规划设计、运行管理过程中都需不断研究工程对沿线地区生态环境的影响以对工程运行调度管理进行及时地调整与修正<sup>[6]</sup>。

但目前水利工程供水效益计算主要是针对生活、“三产”供水效益的计算,对生态效益的量化较少,多为定性评价。由于生态系统中的诸物质要素并非市场商品,很难以价格对生态效益做出评价,只能采取间接的方法进行量化<sup>[7]</sup>。常用的水利工程生态效益间接量化方法主要以市场价值法<sup>[8]</sup>、机会成本法<sup>[9]</sup>、影子价格法<sup>[10]</sup>、替代价值法<sup>[11]</sup>、恢复费用法<sup>[12]</sup>、补偿价值法<sup>[13]</sup>、碳税法<sup>[8]</sup>为主。这些方法普遍引入偏好、效用等主观性标准进行评价,评价标准片面化,缺乏综合性;亦或是以满足某一标准的替代方案来计算效益,而替代方案设计的合理性与最优性往往存在争议,难以明确,且替代方案的费用与所求效益并无必然联系。以上方法均无法全面分析自然资源的生态价值,得到的结果大都存在较大偏差,难以客观真实地反映系统中的生态效益<sup>[14-15]</sup>。因此,应考虑使用能够综合分析自然生态与经济相互作用的方法对水资源价值进行核算,对生态效益进行量化,如利用能值理论分析方法<sup>[16]</sup>、生态经济学相关方法等<sup>[17]</sup>。其中能值分析的理论及方法经过多年的发展已相对成熟,应用范围广泛,但鲜见有在水利工程生态效益方面的应用研究。

综上所述,本文考虑针对跨流域引调水工程功能综合、涉及不同流域、水系交叉、实际情况复杂、生态影响范围大的特性,将自然生态与经济有机综合为一个整体,结合跨流域引调水工程实际运行情况,应用能值分析法全面综合分析跨流域引调水工程产生的生态效益并对其进行量化。

## 2 能值分析理论及方法

能值分析法以自然价值论为基础,将生态系统中形式各异、无法比较的各类能量统一转换为太阳能值进行分析评价,是一种由传统能量分析发展出的新的生态经济系统研究方法。基于一致的衡量标

准,能值分析可实现对系统内部能量流、物质流、货币流的综合的全面分析,定量描述各能量组分的大小,并如实反映系统的能量利用效率、生态环境的经济贡献及系统所在区域的可持续发展能力。

能值分析理论及方法由美国著名生态学家 Odum 于上世纪 80 年代末发展创立,该方法源于对生态系统内部能量流动的研究。最初 Odum 尝试以有机质干重或化石燃料质量为准对生态系统中自然资源的能量进行度量,并创造性地提出了能量转换率的概念,后来随着能量领域研究的突破、全球能量等级逐渐明确及体系的日益完整,他由能量发展延伸出“能值”的概念,建立了基于能值的能量分析理论体系。能值即内含能,与经济学中常用的度量单位——资金不同,资金只能体现人的劳动价值,而内含能可以反映人和自然界对一个区域或国家的经济社会贡献。由于太阳能是地球上一切生命活动的物质基础,所以在能值分析法应用实践中均以太阳能值来衡量其他能量的大小以便综合分析,且生态系统中的能量流活动遵循热力学第一(能量守恒)、第二(熵增)定律。

作为生态经济系统的研究理论和方法,能值分析法以生态为中心对自然资源进行科学全面的分析评价,弥补了无法用货币衡量自然对人类经济社会发展贡献的缺陷,为经济与生态系统的沟通提供了连接的桥梁。能值分析法自发展创立以来,已广泛应用于农业生态系统评估<sup>[18]</sup>、城市及流域的生态系统服务价值评价<sup>[19-20]</sup>、可持续发展评价<sup>[21-22]</sup>等与生态经济相关的各个方面。

但目前能值分析理论在水利工程领域的应用研究很少,只在工程经济效益成本比研究及水资源对经济生产的贡献分析等方面进行了部分尝试。而关于生态效益定量评价的研究更是处于初步探索阶段,仅见有文献[23]尝试将其应用于南水北调东线工程京津冀段应急生态供水效益的量化上。

## 3 跨流域引调水工程生态效益计算

### 3.1 跨流域引调水工程生态效益

跨流域引调水工程在满足生活生产的需要而产生客观经济效益的同时,也对工程沿线流域、地区的生态环境造成了很大的影响,实现了工程的生态价值。跨流域引调水工程生态效益主要包括以下几方面内容:

(1)改善生态环境。跨流域引调水工程向受水区输送大量水资源,对沿线地区河网进行水量补充,

改变了河湖水动力条件,提高了水体自净能力,能够有效地缓解沿线水域污染压力,改善地区水生态环境,维护生态系统平衡。

(2)保护地下水资源。引调水提高了沿线地区的供水保障能力,优化了地区水资源配置格局,进而使受水区减少地下水的开采,有利于保证地下水安全,减小地下水埋深。

(3)改善水土保持,提升防洪能力。保证河道水量充足,为两岸的植物生长提供了有利条件,有助于提高自然植被覆盖率,涵养水源,减少水土流失,保持土壤养分,缓冲洪水压力,有效降低河岸冲刷、侵蚀作用带来的破坏。

(4)调节气候。引水后受水区水文条件发生变化,水气资源愈发丰富,进而影响区域大气活动,对局部地区气候进行微调节,从而可改善气候条件、调节局部流域水文过程。

(5)减少碳排放。河道水位上升,通航等级提高,沿岸地区货运物流转向水上运输而减少陆路运输,可显著降低陆运带来的碳硫和粉尘的排放量,从而减少空气污染,改善当地空气质量。

(6)促进旅游发展。通过生态供水,原本荒芜、污染的水域的生机得以恢复,成为各类水生生物的聚集地,从而吸引大量游客前往参观、游玩,有利于实现人水和谐、建立绿色经济模式、推动生态与经济的可持续发展。

利用能值分析法可针对跨流域引调水工程的生态效益组成,建立包含水、太阳光、风、土壤等自然资源,及与水土保持、环境改善、生态平衡相关的经济要素(农林牧渔业产值、旅游收入等)的跨流域引调水工程生态-经济系统,全面分析引调水在整个跨流域引调水工程生态经济系统中的作用,合理量化其对系统效益的贡献,切实反映生态效益与系统总效益的相互关系,对跨流域引调水工程的生态效益进行科学的定量评价。

### 3.2 能值分析法生态效益计算步骤

(1)绘制生态经济系统能量图。利用能值分析方法,对跨流域引调水工程生态经济系统进行分析研究,划定生态经济系统研究边界,确定生态经济系统的主要能源组分,明确各组分之间的关系及能量流动方向,绘制生态经济系统能量图。

(2)建立生态经济系统投入产出表。在生态经济系统能量图的基础上汇总生态经济系统的能值投入和产出,并根据各数据流的能值转换率将各种不同数据流统一转换为太阳能值单位——太阳能焦耳

(sej)进行衡量比较,建立生态经济系统投入产出表。能值转换计算公式如下:

$$E_i = D_i \cdot \tau \quad (1)$$

式中:  $E_i$  为第  $i$  个数据流的太阳能值, sej;  $D_i$  为第  $i$  个数据流在系统中的含量, 单位为  $J \cdot m^3$ 、元等;  $\tau$  为能值转换率, sej/单位。

其中跨流域引调水工程生态经济系统投入包括生产所需的风能、雨水势能、雨水化学能、太阳能、地球旋转能、固有水体以及生态供水等环境资源;生态经济系统产出则由农林牧渔业的全部产品及旅游业收入构成。具体应用时可根据实际情况适当增减投入和产出能量组分。本文参考农业生产系统的能值分析<sup>[24]</sup>提出,宜在生态系统投入中加入表层土有机质损耗能和土壤流失能,以更全面完整地分析跨流域引调水工程生态经济系统在农业生产上的自然资源投入。

另外,关于生态经济系统产出中农林牧渔业产出的计量表达方式,目前在已有的大多数流域、城市的能值分析中多采用各产业产品价值或产量对其进行描述,而实际上这些各类产品的产值(产量乘以商品价格)最终共同构成了农、林、牧、渔业产值,直接以产值换算比较可简化产品价格的中间计算。且产业产值数据可直接参考当地《统计年鉴》或《国民经济与社会发展公报》,数据公信力更强、可靠度更高。因此本文认为可以用农林牧渔业的产值来代替农林牧渔业的各类产品价值或产量进行产出描述。

(3)对系统能值进行分析,确定生态效益分摊系数,计算生态效益。综合考虑引调水工程实际运行情况及沿线地区生态环境现状,将工程年引调水总能值与系统投入总能值之比作为生态效益分摊系数计算生态效益,具体计算公式如下:

$$f_s = E_{sg} / E_t \quad (2)$$

$$B_s = f_s E_c \quad (3)$$

式中:  $f_s$  为生态效益分摊系数;  $E_{sg}$  为工程年引调水的总能值, sej;  $B_s$  为生态经济系统投入的总能值, sej;  $B_s$  为生态效益, sej;  $E_t$  为生态经济系统产出的总能值, sej。

## 4 实例分析

浙东引水工程是浙江省有史以来跨流域最多、跨区域最广、引调水线路最长和投资最大的水资源战略配置重大工程。其沿线主要控制工程包括萧山枢纽、曹娥江大闸枢纽、曹娥江至慈溪引水、曹娥江至宁波引水、舟山大陆引水二期和新昌钦村水库等

6 项工程,总投资超  $100 \times 10^8$  元。浙东引水工程跨越钱塘江流域、曹娥江流域、甬江流域和舟山本岛,引富春江水,经萧绍平原的杭州市萧山区、绍兴市区,姚江平原内的绍兴市上虞区、宁波市余姚市,北线至宁波市慈溪市,南线至宁波市区、舟山市,共涉及 4 个地市及 19 个县(市、区),引水线路总长 294 km。自 2014 年 6 月浙东引水工程北线萧山枢纽至慈溪段实现常态化引水以来,至 2017 年的 3 年间累计引水  $14.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,大幅度提升了沿线地区的供水保障能力,显著改善了浙东地区平原河网的水生态环境,为浙东地区的经济发展、社会进步及生态环境保护做出了重要贡献。

本文在进行生态效益量化时,整体考虑浙东引水工程沿线区域,以沿线地区行政区域为边界,对浙东引水工程生态经济系统进行分析研究,绘制生态经济系统能量图,如图 1 所示。生态经济系统主要能值分为可更新环境资源、不可更新环境资源以及系统总能值产出 3 类。可更新环境资源包括风能、雨水势能、雨水化学能、太阳能、地球旋转能、固有水体。不可更新环境资源包括表层土有机质损耗能、

土壤流失能和生态供水。系统总能值产出可分为社会环境产出(粮食蔬菜、林产品、牛羊猪肉、禽蛋、乳制产品、水产品)和生态产出(旅游收入)两大类。

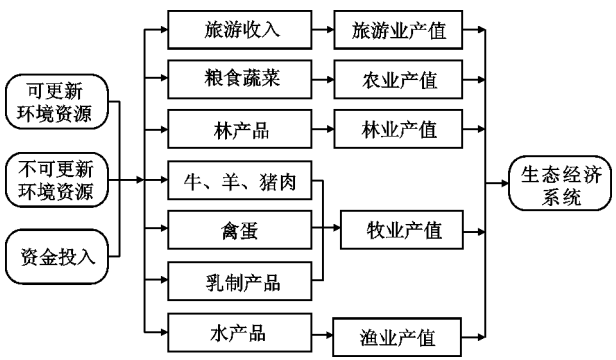


图 1 浙东引水工程生态经济系统能量图

在上述基础上,以能值为量纲,汇总生态经济系统的能值投入和产出,将各项能量流、物质流和货币流转换为太阳能值单位,建立 2017 年浙东引水工程生态经济系统投入产出表,如表 1 所示。表 1 中将浙东引水工程 2017 年萧山枢纽过流量作为工程年引调水量计算。

表 1 2017 年浙东引水工程生态经济系统投入产出表

| 项目       | 指标                   | 合计                    | 能值转换率/( sej · 单位 <sup>-1</sup> ) | 能值/sej                |
|----------|----------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|
| 可更新环境资源  | 风能/J                 | $3.74 \times 10^{19}$ | 623                              | $2.33 \times 10^{22}$ |
|          | 雨水势能/J               | $5.46 \times 10^{16}$ | 8890                             | $4.85 \times 10^{20}$ |
|          | 雨水化学能/J              | $3.82 \times 10^{16}$ | 15400                            | $5.88 \times 10^{20}$ |
|          | 太阳能/J                | $3.04 \times 10^{19}$ | 1                                | $3.04 \times 10^{19}$ |
|          | 地球旋转能/J              | $2.10 \times 10^{16}$ | 34000                            | $7.13 \times 10^{20}$ |
|          | 固有水体/ $\text{m}^3$   | $2.47 \times 10^{16}$ | 48000                            | $1.18 \times 10^{21}$ |
| 不可更新环境资源 | 表层土有机质损耗能/J          | $3.85 \times 10^{14}$ | 4420                             | $1.70 \times 10^{18}$ |
|          | 土壤流失能/J              | $1.26 \times 10^{10}$ | $1.70 \times 10^9$               | $2.14 \times 10^{19}$ |
|          | 工程年引调水/ $\text{m}^3$ | $5.09 \times 10^8$    | $2.55 \times 10^{11}$            | $1.30 \times 10^{20}$ |
| 资金投入     | 工程年费用/元              | $1.70 \times 10^8$    | $6.98 \times 10^{11}$            | $1.19 \times 10^{20}$ |
| 系统总能值产出  | 旅游收入/元               | $1.08 \times 10^{11}$ | $6.98 \times 10^{11}$            | $7.54 \times 10^{22}$ |
|          | 农业产值/元               | $3.04 \times 10^{10}$ | $6.98 \times 10^{11}$            | $2.12 \times 10^{22}$ |
|          | 林业产值/元               | $2.18 \times 10^9$    | $6.98 \times 10^{11}$            | $1.52 \times 10^{21}$ |
|          | 牧业产值/元               | $6.37 \times 10^9$    | $6.98 \times 10^{11}$            | $4.44 \times 10^{21}$ |
|          | 渔业产值/元               | $7.46 \times 10^9$    | $6.98 \times 10^{11}$            | $5.20 \times 10^{21}$ |

注:(1)表格中数据来源于浙江省统计年鉴、各地区水资源公报、国民经济与社会发展公报;(2)能值转换率参考文献[ 25-28 ];(3)能值货币比率参照 2015 年比率  $6.98 \times 10^{11}$  sej/元。

根据基于能值分析法的生态效益分摊计算公式,可得 2017 年浙东引水工程生态效益分摊系数为 0.489%,生态效益为  $7.56 \times 10^8$  元,见表 2。

之后,再分别应用替代工程法和能值分析法对 2016 年浙东引水工程生态效益进行量化,并使用替

代工程法计算 2017 年浙东引水工程生态效益,计算结果如表 3 所示。

对表 3 中两种方法的计算结果进行对比分析如下:替代工程法以地区过流量为计算水量,将达到相同水质改善效果的情况下污水治理工程的费用作为

工程的生态效益,然而,由于替代工程并非实际存在,是否达到“等效”尚有疑问,计算结果的合理性易受质疑、难以令人信服。从计算方法本身来看,替代工程法忽略了生态系统循环、人与自然以及生态与经济的相互作用等重要因素,只计算了生态效益中的水质改善作用,使得该方法计算结果偏小。相比较而言,本文中使用的能值分析法能够全面综合地分析生态-经济系统,考虑水质改善、水土保持、环境变化、平衡水资源配置等多种生态效益,更适用于浙东引水工程的实际运行情况,计算结果更为合理有效、更具说服力。

表3 2016、2017年浙东引水工程生态效益计算对比表

| 年份   | 年引调水量/ $10^4 \text{ m}^3$ | 计算方法  | 计算内容                | 生态效益/ $10^8$ 元 | 单方水价值/元 |
|------|---------------------------|-------|---------------------|----------------|---------|
| 2016 | 41000                     | 替代工程法 | 水质改善                | 0.82           | 0.20    |
|      |                           | 能值分析法 | 水质改善、环境变化、水土保持等综合作用 | 4.71           | 1.15    |
| 2017 | 50930                     | 替代工程法 | 水质改善                | 1.12           | 0.22    |
|      |                           | 能值分析法 | 水质改善、环境变化、水土保持等综合作用 | 7.56           | 1.48    |

由表3的计算结果还可看出,随着引调水量的增加,跨流域引调水工程的生态效益也不断增加,在同样的水质条件下,引调水量是衡量跨流域引调水工程生态效益大小的决定性因素。而生态效益的单方水价值由2016年的1.15元/ $\text{m}^3$ 提高到2017年的1.48元/ $\text{m}^3$ ,则说明在经济社会高速发展的今天,人们对于水的需求不断增长,将有限的水资源尽可能地用来保证生活生产的需求,而忽略生态环境的需要,导致生态环境对水的依赖愈发强烈,水资源环境价值日益提升。

## 5 结 论

(1)本文基于能值分析的理论对跨流域引调水工程生态效益进行分析量化,建立了跨流域引调水工程生态-经济体系,提出了跨流域引调水工程生态效益定量评价的方法,并对2017年浙东引水工程生态效益进行了量化,计算结果表明,本文提出的跨流域引调水工程的生态效益计算方法能够较好地应用于实际,可对工程的生态效益做出基本合理的量化计算。此方法打破了传统间接效益计算方法在考虑生态环境与经济发展相互作用上的局限,可将自然生态与社会经济有机结合起来对工程所产生的生态效益进行全面评价,客观真实地反映工程建设带来的水环境改善效果,为今后工程的建设管理提供决策依据。

表2 2017年浙东引水工程生态效益计算表

| 计算项目           | 结果                    |
|----------------|-----------------------|
| 可更新环境资源/sej    | $2.63 \times 10^{22}$ |
| 不可更新环境资源/sej   | $2.72 \times 10^{20}$ |
| 系统总能值投入/sej    | $2.66 \times 10^{22}$ |
| 系统总能值产出/sej    | $1.08 \times 10^{23}$ |
| 生态效益分摊系数       | 0.00489               |
| 生态效益/sej       | $5.27 \times 10^{20}$ |
| 生态效益/ $10^8$ 元 | 7.56                  |
| 单方水价值/元        | 1.48                  |

(2)本文的计算结果总体是合理的,但在本次生态效益能值分析中未考虑相关产业劳务等资本投入的资金流,且未能在系统的投入产出中体现出供水后航运条件变化节能减排对大气环境的改善作用。在后续的生态生产系统能值分析中,可考虑结合其他生态经济学理论方法(如生态经济系统投入产出分析)及生态环境系统评价概念(如DPSIR概念框架)等,进一步完善系统内部组分及各组分之间的逻辑关系,以便能够更好更全面地绘制生态经济系统能量图,使能值分析法能在水利工程综合评价中得到更广泛的应用。

## 参考文献:

- [1] 刘强,殷大聪. 国外跨流域调水管理对我国水资源配置的启示[J]. 人民长江, 2011, 42(18): 111-116+121.
- [2] 李浩,黄薇,刘陶,等. 跨流域调水生态补偿机制探讨[J]. 自然资源学报, 2011, 26(9): 1506-1512.
- [3] 李娜. 河流引水工程的生态环境影响及减缓措施研究[D]. 西安: 西北大学, 2015.
- [4] 高晨. 引汉济渭调水工程水库群调度和水资源配置方案评价研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [5] 孙金华,陈静,朱乾德. 我国重大调水工程水资源调度管理现状研究[J]. 人民长江, 2016, 47(5): 29-33+37.
- [6] 罗昊,周雪欣. 跨流域调水工程的生态影响识别及评价指标体系研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(6): 190-194.
- [7] 王浩,游进军. 中国水资源配置30年[J]. 水利学报,

- 2016, 47(3): 265 – 271 + 282.
- [8] 解文静,茅 樵,曹升乐. 济南市河库连通工程水生态系统服务价值评估[J]. 人民黄河, 2015, 37(10): 66 – 69.
- [9] 范育鹏,陈卫平. 北京市再生水利用生态环境效益评估[J]. 环境科学, 2014, 35(10): 4003 – 4008.
- [10] 唐 见,曹慧群,陈 进. 南水北调中线水源地生态服务价值核算[J]. 人民长江, 2018, 49(11): 29 – 34 + 42.
- [11] 胡新锁. 邯郸市生态水网河湖湖泊水面生态效益分析[J]. 水利科技与经济, 2015, 21(3): 19 – 21 + 28.
- [12] 方国华,钟淋涓,毛春梅. 水污染经济损失计算方法述评[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(3): 54 – 56.
- [13] 赵雷刚. 基于环境重置成本法的流域生态补偿价值计量方法研究——以黄河流域(兰州段)为例[D]. 兰州: 兰州商学院, 2014.
- [14] 方国华. 水利工程经济学(第二版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- [15] 杨桐鹤,禹雪中,骆辉煌. 基于水污染损失模型的引水调控工程环境效益评估[J]. 水利水电技术, 2010, 41(9): 20 – 23 + 27.
- [16] 李丹丹,陈南祥,李耀辉,等. 基于能值理论与方法的区域可利用水资源价值研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(3): 22 – 24 + 28.
- [17] 吕翠美,吴泽宁,胡彩虹. 水资源价值理论研究进展与展望[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(6): 545 – 549.
- [18] 杨卓翔,高 阳,赵志强,等. 基于能值分析的深圳市三个小型农业生态经济系统研究[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3635 – 3644.
- [19] 贾军梅,罗 维,杜婷婷,等. 近十年太湖生态系统服务功能价值变化评估[J]. 生态学报, 2015, 35(7): 2255 – 2264.
- [20] ZHAN Jinyan, ZHANG Fan, CHU Xi, et al. Ecosystem services assessment based on emergy accounting in Chongming Island, Eastern China[J]. Ecological Indicators, 2019, 105: 464 – 473.
- [21] 王 鹏,刘小鹏,姚晓艳,等. 基于能值分析的宁夏生态经济系统可持续发展评价[J]. 生态经济, 2018, 34(1): 70 – 73.
- [22] VEGA-AZAMAR R E, GLAUS M, HAUSLER R, et al. An emergy analysis for urban environmental sustainability assessment, the Island of Montreal, Canada[J]. Landscape and Urban Planning, 2013, 118: 18 – 28.
- [23] 黄显峰,周 玮,阎 玮,等. 基于能值分析的生态供水效益量化方法[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2): 12 – 15 + 36.
- [24] 郑纯辉,赵 杰. 基于能值理论的农业复合生态系统分析与评价[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2006.
- [25] 蓝盛芳,钦 佩. 生态系统的能值分析[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 129 – 131.
- [26] 姚文平,李翠梅. 太湖流域水资源能值转换率计算与研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(7): 29 – 34 + 39.
- [27] 韩增林,胡 伟,钟敬秋,等. 基于能值分析的中国海洋生态经济可持续发展评价[J]. 生态学报, 2017, 37(8): 2563 – 2574.
- [28] 周林飞,武 玮,马降龙,等. 基于能值理论的石佛寺人工湿地资源能值 – 货币价值评价与分析[J]. 水利水电技术, 2014, 45(9): 19 – 23.

(上接第55页)

- [12] BAIG S A, ZHU Jin, MUHAMMAD N, et al. Effect of synthesis methods on magnetic Kans grass biochar for enhanced As(V, III) adsorption from aqueous solution[J]. Biomass and Bioenergy, 2014, 71: 299 – 310.
- [13] TIAN Ye, WU Min, LIN Xiaobo, et al. Synthesis of magnetic wheat straw for arsenic adsorption[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 193: 10 – 16.
- [14] KNICKER H, TOTSCHKE K U, ALMENDROS G, et al. Condensation degree of burnt peat and plant residues and the reliability of solid-state VACP MAS <sup>13</sup>C NMR spectra obtained from pyrogenic humic material[J]. Organic Geochemistry, 2005, 36(10): 1359 – 1377.
- [15] 徐东昱,金 洁,颜 钰,等. X射线光电子能谱与 <sup>13</sup>C 核磁共振在生物质碳表征中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(12): 3415 – 3428.
- [16] SUN Ke, KANG Mingjie, ZHANG Zheyun, et al. Impact of deashing treatment on biochar structural properties and potential sorption mechanisms of phenanthrene[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(20): 11473 – 11481.
- [17] CHENG Hefa, HU Yuanan, LUO Jian, et al. Geochemical processes controlling fate and transport of arsenic in acid mine drainage (AMD) and natural systems[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 165(1–3): 13 – 26.
- [18] MA Mengdan, WU Hao, DENG Zhenyan, et al. Arsenic removal from water by nanometer iron oxide coated single-wall carbon nanotubes[J]. Journal of Molecular Liquids, 2018, 259: 369 – 375.
- [19] VELIČKOVIĆ Z, VUKOVIĆ G D, MARINKOVIĆ A D, et al. Adsorption of arsenate on iron (III) oxide coated ethylenediamine functionalized multiwall carbon nanotubes[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 181 – 182: 174 – 181.