

基于能值理论的海水淡化系统对比分析

邹川玲,刘淑静,张拂坤

(国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所,天津 300192)

摘要:为全面分析和比较不同技术海水淡化系统的投入产出,应用能值分析方法,开展反渗透、低温多效、多级闪蒸海水淡化系统的能流分析及能值计算,并进行可持续发展评价。研究结果显示,能源消耗是海水淡化系统最主要的能流输入,反渗透海水淡化系统产品水的太阳能值转换率最低,能值产出率(ϵ_{EYR})最高,环境负载率(ϵ_{ELR})最低,能值可持续性指标(ϵ_{ESI})最高,因此从能值分析和可持续发展角度,建议新建海水淡化项目优先采用反渗透海水淡化技术。

关键词:海水淡化系统;能值分析;可持续发展

中图分类号:P747

文献标识码:A

文章编号:1003-9511(2018)02-0024-04

我国海水淡化产业发展迅速,根据《2015年全国海水利用报告》,截至2015年底,全国已建成海水淡化工程121个,总装机容量100.88万t/d。目前商业化应用的海水淡化技术主要是反渗透、低温多效和多级闪蒸,每一种技术都有各自优缺点及适用范围,不同技术的对比研究一直是海水淡化领域研究方向之一,已有学者从技术原理及特点、能耗、经济成本等多个角度对不同海水淡化技术进行了对比研究^[1-6]。其中技术原理及特点的对比多为定性分析;能耗分析通常只比较系统消耗的电力、蒸汽热能,而海水、设备材料、化学药剂等所包含的能量一般不予考虑;经济成本分析中的输入输出只包含了材料、能源等的社会属性,即以资金形式体现的部分。实际上,海水、设备材料、化学药剂等物资,电力和蒸汽能源以及资金都是海水淡化系统的投入,并且其自然属性部分在生产过程中也做出了贡献。因此若要很好地衡量系统投入和产出的真实价值,必须在考虑资金投入的同时,计入海水、材料、能源的自然属性产生的价值。但由于物质、资金、能源、劳动力等性质不同,表达、计量方式也不同,其长期处于不可比较的状态。

能值分析^[7]方法是一种新的环境-经济系统分析方法,以太阳能为基准,把不同类型的能量、物质、信息等转换成统一标准,能够全面分析系统中不同来源与性质的自然环境资源与经济活动价值投入,

从而定量评价经济价值、生态价值和可持续发展水平。笔者运用能值分析方法,开展海水淡化系统的投入产出分析及可持续发展评价,并对比反渗透、低温多效、多级闪蒸3种技术海水淡化系统。

1 研究方法

能值分析的理论方法由美国著名生态学家Odum创立。能值是某种产品或服务在其生产过程中所消耗的另一种能量的总和,体现了产品或服务在生产过程中所消耗能量的历史积累^[7]。通常以太阳能作为基准,用太阳能焦耳为单位度量不同类型能量、物质、信息等的能值。单位物质或能量所具有的能值称为能值转换率,其能够体现能量的能质等级和系统的生产效率,单位 sej/g 或 sej/J 。数量乘以相应能值转换率就可以得到某一确定数量物质或能量的能值。

能值分析为评价环境、资源、人类劳务、信息提供了一种统一的衡量标准,使不同类别的能量具有了可比性。同时,能值分析在计量自然资源的价值时考虑了免费的自然环境的贡献,反映了其真正的价值。因其能够正确地分析自然与人类、环境资源与经济社会的价值和相互关系,在生态环境影响及可持续发展研究中有广泛应用。能值分析方法的应用领域,在空间尺度上大到国家、流域,小到城市、乡村、企业;在生态系统类型上,既可以是自然生态系

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(K-JBYWF-2015-G25,K-JBYWF-2016-T13)

作者简介:邹川玲(1987—),女,工程师,硕士,主要从事海水淡化产业发展战略研究。E-mail:chuanchuan0326@126.com

统或农业生产系统,也可以是工业生产系统,甚至是信息或服务系统^[8]。

能值分析基本方法通常包括5个步骤^[9]:收集资料,分析研究对象的输入输出种类;绘制系统能流图;编制能值分析表,计算各能流能值;建立能值评价指标,计算能值指标;系统发展评价。系统能流输入种类确定后一般将能流按来源类型进行分类,对于海水淡化系统,主要为3个方面的输入:本地可更新资源输入(R),即海水;购买的不可更新资源输入(P),即设备材料、化学药剂等;资金输入(S)。由于没有煤、金属矿物等直接使用的不可更新资源输入,因此系统本地不可更新资源输入(N)为零。笔者采用能值分析常用的评价指标包括:净能值产出率、环境负载率、能值可持续性指标。

1.1 净能值产出率(ϵ_{EYR})

系统产出能值 Y 与经济反馈能值 F 之比。反馈能值 F 来自人类社会经济,包括燃料和各种生产资料及人类劳务。即

$$\epsilon_{EYR} = \frac{Y}{F} = \frac{Y}{P+S} \quad (1)$$

净能值产出率是表征系统产出对经济贡献大小的指标,与经济分析中“产投比”(产出/投入)相似,是衡量系统生产效率的一种标准。 ϵ_{EYR} 越高,表明系统投入一定经济能值产出的产品能值越高,即系统的生产效率越高。

1.2 环境负载率(ϵ_{ELR})

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。对于海水淡化系统,无本地不可更新资源能值输入,因此

$$\epsilon_{ELR} = \frac{N+P+S}{R} = \frac{P+S}{R} \quad (2)$$

ϵ_{ELR} 描述了系统在自身生产运行过程中对本地环境生态系统的影响,可用于评价系统对周围生态系统的环境压力, ϵ_{ELR} 越高,表明系统对环境的压力越大。

1.3 能值可持续性指标(ϵ_{ESI})

能值指标体系中, ϵ_{EYR} 用以评价系统的产出效率, ϵ_{ELR} 用以评价系统的环境压力。两者分别评价系统可持续发展性能的2个方面。为填补原有指标体系中评价系统可持续发展性能的综合指标空缺,美国生态学家Brown等^[10]于1998年提出了能值可持续指标 ϵ_{ESI} ,并定义为系统能值产出率与环境负载率之比,即

$$\epsilon_{ESI} = \frac{\epsilon_{EYR}}{\epsilon_{ELR}} \quad (3)$$

ϵ_{ESI} 反映了系统在一定环境负荷下的能值产出

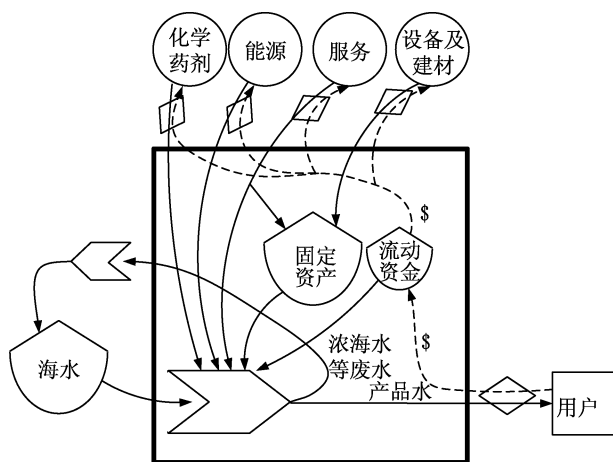
效率,其值越高意味着单位环境压力下的社会经济效益越高,系统可持续性越好。

2 研究对象

以我国南方某拟建的5.1万t/d反渗透海水淡化工程、5.1万t/d低温多效海水淡化工程以及已建的0.6万t/d多级闪蒸海水淡化工程为例,开展海水淡化系统能值分析研究。反渗透海水淡化系统采用超滤预处理,两级反渗透设计,产品水TDS为10ppm左右,反渗透膜采用芳香聚酰胺膜,压力容器材质为玻璃钢,能量回收装置外壳为玻璃钢、转子为陶瓷材质。低温多效海水淡化系统为3套装置,每套产水量1.7万t/d,7效蒸发器设计,造水比为10,传热管采用铝黄铜管和钛管。多级闪蒸海水淡化系统为大港电厂海水淡化工程,2套装置,每套产水量0.3万t/d,1992年投运,39级蒸发器设计,造水比为10,传热管采用铝黄铜管和钛管。

3 海水淡化系统能流分析

海水淡化系统的输入主要包括:①海水。②设备及建材。其材质类型有钢铁、树脂/塑料、玻璃钢、混凝土、陶瓷等。③化学药剂,包括混凝剂、杀菌剂、阻垢剂、消泡剂、清洗剂等。④能源。反渗透海水淡化系统能源为电力,低温多效和多级闪蒸海水淡化系统的能源除电力外还需蒸汽热能。⑤资金投入。用于购买设备、生产材料、能源,以及建设、运行期间支付劳动力工资等^[11]。海水淡化系统产品是淡化水,同时还产生浓海水排放到环境或用于综合利用。应用能值语言,绘制海水淡化系统的能流图,如图1所示。



○ 能量源 ○ 储存库 ◇ 交流键 < 作用键
→ 能量流 \$ 货币流 □ 系统边界

图1 海水淡化系统能流示意图

按来源类型对海水淡化系统的输入输出进行分类

类。其中可更新资源为海水,无本地不可更新资源,购买的不可更新资源为设备材料及建材、化学药剂、能源等,此外还有建设投资、运行费用等资金投入。产出仅为产品水,本研究假定浓盐水直接排放,不产生新的价值。

表1、表2、表3为反渗透、低温多效、多级闪蒸海水淡化系统能值分析计算表,其定量描述了各种能流输入输出的能值具体数据。

对比分析3种海水淡化系统的能流。从能流种类角度分析,海水、钢铁、树脂/塑料、化学药剂、电力以及资金是各系统均有的能值投入。根据各自的技术原理特点,反渗透增加了陶瓷的输入,其是能量回收装置中转子的材料;作为蒸馏法海水淡化技术,低温多效和多级闪蒸海水淡化系统中有铜、钛的传热管材料输入以及作为热源的蒸汽输入。从能值总输

表1 反渗透海水淡化系统能值分析^[8,12-14]

条目	基础数据	能值转换率/ (sej · unit ⁻¹)	能值/ (sej · a ⁻¹)	能值 (sej · m ⁻³)
海水	1.34 × 10 ¹³ J/a	4.80 × 10 ⁴	6.43 × 10 ¹⁷	3.46 × 10 ¹⁰
钢铁	4.93 × 10 ⁶ g/a	1.80 × 10 ⁹	8.87 × 10 ¹⁵	4.77 × 10 ⁸
树脂/塑料	2.56 × 10 ⁷ g/a	3.80 × 10 ⁸	9.73 × 10 ¹⁵	5.23 × 10 ⁸
玻璃钢	4.22 × 10 ⁶ g/a	7.60 × 10 ⁸	3.21 × 10 ¹⁵	1.72 × 10 ⁸
混凝土	5.07 × 10 ⁷ g/a	1.23 × 10 ⁹	6.24 × 10 ¹⁶	3.35 × 10 ⁹
陶瓷	8.00 × 10 ⁴ g/a	1.85 × 10 ⁹	1.48 × 10 ¹⁴	7.96 × 10 ⁶
化学药剂	2.14 × 10 ⁸ g/a	1.00 × 10 ⁹	2.14 × 10 ¹⁷	1.15 × 10 ¹⁰
电力	2.72 × 10 ¹⁴ J/a	1.60 × 10 ⁵	4.35 × 10 ¹⁹	2.34 × 10 ¹²
年固定资产投入	1.01 × 10 ⁷ 元	2.44 × 10 ¹¹	2.46 × 10 ¹⁸	1.32 × 10 ¹¹
年运行支出	6.06 × 10 ⁷ 元	2.44 × 10 ¹¹	1.48 × 10 ¹⁹	7.95 × 10 ¹¹
输入总能值			6.17 × 10 ¹⁹	
产品水体积	1.86 × 10 ⁷ m ³	3.32 × 10 ¹²	6.17 × 10 ¹⁹	
产品水能量	8.98 × 10 ¹³ J	6.87 × 10 ⁵	6.17 × 10 ¹⁹	

注:1. 假定系统生命周期为30年;2. 反渗透膜元件及超滤膜元件更换周期为5年。

表2 低温多效海水淡化系统能值分析^[8,12-15]

条目	基础数据	能值转换率/ (sej · unit ⁻¹)	能值/ (sej · a ⁻¹)	能值 (sej · m ⁻³)
海水	3.71 × 10 ¹³ J/a	4.80 × 10 ⁴	1.78 × 10 ¹⁸	9.57 × 10 ¹⁰
钢铁	1.05 × 10 ⁸ g/a	1.80 × 10 ⁹	1.89 × 10 ¹⁷	1.02 × 10 ¹⁰
铜	6.23 × 10 ⁷ g/a	6.80 × 10 ¹⁰	4.24 × 10 ¹⁸	2.28 × 10 ¹¹
钛	6.80 × 10 ⁵ g/a	6.42 × 10 ¹⁰	4.37 × 10 ¹⁶	2.35 × 10 ⁹
树脂/塑料	4.70 × 10 ⁴ g/a	3.80 × 10 ⁸	1.79 × 10 ¹³	9.60 × 10 ⁵
玻璃钢	1.40 × 10 ⁶ g/a	7.60 × 10 ⁸	1.06 × 10 ¹⁵	9.72 × 10 ⁸
混凝土	1.47 × 10 ⁷ g/a	1.23 × 10 ⁹	1.81 × 10 ¹⁶	9.72 × 10 ⁸
涂料	8.00 × 10 ⁴ g/a	3.80 × 10 ⁸	3.04 × 10 ¹³	1.63 × 10 ⁶
化学药剂	1.59 × 10 ⁸ g/a	1.00 × 10 ⁹	1.59 × 10 ¹⁷	8.55 × 10 ⁹
蒸汽	4.91 × 10 ¹⁵ J/a	6.59 × 10 ⁴	3.24 × 10 ²⁰	1.74 × 10 ¹³
电力	1.53 × 10 ¹⁴ J/a	1.60 × 10 ⁵	2.45 × 10 ¹⁹	1.32 × 10 ¹²
年固定资产投入	1.14 × 10 ⁷ 元	2.44 × 10 ¹¹	2.79 × 10 ¹⁸	1.50 × 10 ¹¹
年运行支出	1.03 × 10 ⁸ 元	2.44 × 10 ¹¹	2.50 × 10 ¹⁹	1.35 × 10 ¹²
输入总能值			3.82 × 10 ²⁰	
产品水体积	1.86 × 10 ⁷ m ³	2.06 × 10 ¹³	3.82 × 10 ²⁰	
产品水能量	9.71 × 10 ¹³ J	3.94 × 10 ⁶	3.82 × 10 ²⁰	

注:假定系统生命周期为30年。

表3 多级闪蒸海水淡化系统能值分析^[8,12-13,15-17]

条目	基础数据	能值转换率/ (sej · unit ⁻¹)	能值/ (sej · a ⁻¹)	能值 (sej · m ⁻³)
海水	4.90 × 10 ¹² J/a	4.80 × 10 ⁴	2.35 × 10 ¹⁷	1.07 × 10 ¹¹
钢铁	1.61 × 10 ⁸ g/a	1.80 × 10 ⁹	2.90 × 10 ¹⁷	1.32 × 10 ¹¹
铜	3.15 × 10 ⁶ g/a	6.80 × 10 ¹⁰	2.14 × 10 ¹⁷	9.78 × 10 ¹⁰
钛	1.27 × 10 ⁵ g/a	6.42 × 10 ¹⁰	8.15 × 10 ¹⁵	3.72 × 10 ⁹
树脂/塑料	1.23 × 10 ⁵ g/a	3.80 × 10 ⁸	4.66 × 10 ¹³	2.13 × 10 ⁷
涂料	1.35 × 10 ⁶ g/a	3.80 × 10 ⁸	5.14 × 10 ¹⁴	2.35 × 10 ⁸
化学药剂	2.28 × 10 ⁹ g/a	1.00 × 10 ⁹	2.28 × 10 ¹⁸	1.04 × 10 ¹²
蒸汽	5.92 × 10 ¹⁴ J/a	6.59 × 10 ⁴	3.90 × 10 ¹⁹	1.78 × 10 ¹³
电力	3.78 × 10 ¹³ J/a	1.60 × 10 ⁵	6.05 × 10 ¹⁸	2.76 × 10 ¹²
年固定资产投入	2.38 × 10 ⁵ 美元	5.83 × 10 ¹²	1.39 × 10 ¹⁸	6.34 × 10 ¹¹
年运行支出	5.34 × 10 ⁵ 美元	5.83 × 10 ¹²	3.11 × 10 ¹⁸	1.42 × 10 ¹²
输入总能值			5.26 × 10 ¹⁹	
产品水体积	2.19 × 10 ⁶ m ³	2.40 × 10 ¹³	5.26 × 10 ¹⁹	
产品水能量	1.06 × 10 ¹³ J	4.96 × 10 ⁶	5.26 × 10 ¹⁹	

注:1. 假定系统生命周期为30年;2. 年固定资产投入和年运行支出以1996年测算值为基准。

入角度分析,生产相同产量的海水淡化水,低温多效海水淡化系统的能值总输入明显高于反渗透海水淡化系统;本研究中多级闪蒸海水淡化系统产水量仅为0.6万t/d,若按比例扩大至反渗透、低温多效海水淡化系统相同的规模,能值总输入将达到4.47 × 10²⁰ sej,高于低温多效海水淡化系统的能值总输入。

将系统的输入分为海水、设备及建材、化学药剂、能源以及资金五类,计算单位产品水中包含的各类输入能值以及总能值,如图2所示。结果显示,3个系统产品水中包含的能值,能源均为最主要的能值来源,占比超过了70%,其次为资金投入。低温多效和多级闪蒸海水淡化技术由于有相转变,能源消耗远高于反渗透海水淡化技术,导致单位产品水的总能值也明显较高。因此从能值角度,低温多效和多级闪蒸海水淡化系统能源消耗远高于反渗透海水淡化系统。同时,对比能流分析表(表2、表3)中数据,2种蒸馏法海水淡化系统,即低温多效和多级闪蒸海水淡化系统,蒸汽能值均远高于电力能值,其在输入总能值中占比分别达到了84.64%和74.20%,是热法海水淡化系统最主要的能值投入。

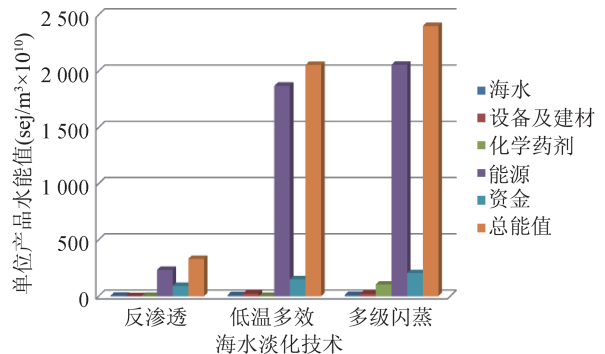


图2 海水淡化系统单位产品水能值分析

输入总能值与产水量的比值为单位产品水的能值,也即产品水的太阳能值转换率。太阳能值转换率反映了商品在能量等级中的位置以及生产该商品的效率,其值越低,生产过程的效率越高。不同海水淡化系统产品水的太阳能值转换率,反渗透系统最低,为 3.32×10^{12} sej/m³,低温多效系统其次,为 2.06×10^{13} sej/m³,多级闪蒸系统最高,为 2.40×10^{13} sej/m³。由此表明从能值分析角度,不同技术海水淡化系统的生产效率由高到低依次为反渗透、低温多效、多级闪蒸。

4 海水淡化系统能值评价指标分析

各海水淡化系统能值评价指标的计算结果如表4所示。

a. $\varepsilon_{EYR} : \varepsilon_{EYR}$ 反映了系统的生产效率,其值越大表示系统单位经济能值投入得到的能值产出越大,由此系统生产效率越高,竞争力越强。相比于低温多效和多级闪蒸海水淡化系统,反渗透海水淡化系统设备及建材少,不需要蒸汽热源,经济能值投入较低,因此能值产出率最高。

表4 不同技术海水淡化系统的能值评价指标

海水淡化系统	ε_{EYR}	ε_{ELR}	ε_{ESI}
反渗透	1.010	94.90	0.0106
低温多效	1.003	214.00	0.0047
多级闪蒸	1.006	223.00	0.0045

b. $\varepsilon_{ELR} : \varepsilon_{ELR}$ 描述了系统对本地生态环境带来的影响,用于评价系统的环境压力。 ε_{ELR} 大表示系统对环境的压力较大, ε_{ELR} 小则对周围环境的压力较小。笔者研究的3种海水淡化系统,可更新资源均只有海水,其余为资金投入及购买的不可更新资源,均没有本地不可更新资源输入。因此,系统海水能值输入越多,资金及购买资源能值输入越少,则系统 ε_{ELR} 越低。反渗透海水淡化系统由于购买的不可更新资源能值投入相对较低,因此其 ε_{ELR} 低于低温多效和多级闪蒸海水淡化系统,为94.90,其对周围环境的压力较小。与低温多效海水淡化系统相比,多级闪蒸海水淡化系统级数多导致设备及建材投入多,动力消耗大,化学药剂消耗多,即系统购买的不可更新资源能值输入多,因而其 ε_{ELR} 高于低温多效海水淡化系统。

c. $\varepsilon_{ESI} : \varepsilon_{ESI}$ 是一个复合指标,用于评价系统的可持续发展性能,其值越高,可持续性能越好。与普通化学处理生产饮用水系统^[18]和污水处理系统^[19]相比,笔者研究的3个海水淡化系统的 ε_{ESI} 均较低,其中反渗透海水淡化系统最高,多级闪蒸海水淡化系统最低,即反渗透海水淡化系统的可持续性最高,

多级闪蒸海水淡化系统的可持续性最低。根据能值分析的结果,从可持续发展角度,相比于低温多效和多级闪蒸海水淡化技术,反渗透海水淡化系统能值产出率高,环境负载率低,能值可持续性指标,因此建议新建海水淡化项目优先采用反渗透海水淡化技术。

5 结论

应用能值分析理论开展了反渗透、低温多效、多级闪蒸海水淡化系统的能值分析及可持续发展评价。与传统的经济分析或能耗分析不同,能值分析不仅涉及经济投资所产生的价值,还考虑了海水、设备材料、能源等的自然属性在海水淡化水生产过程中所做的贡献。能值分析计算结果显示,能源是海水淡化系统最主要的输入能流,其中反渗透海水淡化系统能源输入仅为电力能值,低温多效和多级闪蒸海水淡化系统能源输入中蒸汽能值远高于电力能值。对比3种海水淡化系统,反渗透海水淡化系统单位产品水的太阳能值转换率最高,表明该系统生产效率最高;多级闪蒸海水淡化系统产品水太阳能值转换率最低,生产效率最低;由于反渗透海水淡化系统设备投入相对较少,无蒸汽热能输入,其 ε_{EYR} 最高,而 ε_{ELR} 最低,由此 ε_{ESI} 最高。因此从能值分析和可持续发展角度,新建海水淡化项目可优先采用反渗透海水淡化技术。

参考文献:

- [1] JACQUES A, FELIX A. Thermal and membrane process economics: optimized selection for seawater desalination [J]. Desalination, 2002, 23: 305-311.
- [2] AKILI D K, IBRAHIM K K, JONG M W. Advances in seawater desalination technologies [J]. Desalination, 2008, 21: 47-69.
- [3] NOREDDINE G, THOMAS M M, GARY L A. Technical review and evaluation of the economics of water desalination: current and future challenges for better water supply sustainability [J]. Desalination, 2013, 309: 197-207.
- [4] 周赤忠, 李焱. 当前海水淡化主流技术的分析与比较 [J]. 电站辅机, 2008, 29(4): 1-5.
- [5] 李雪民. 主要海水淡化方法技术经济分析与比较 [J]. 企业管理, 2010(2): 63-70.
- [6] 刘炳伟, 刘伟杰, 胡文培. 火电厂海水淡化工艺的技术经济分析及选择 [J]. 工业安全与环保, 2010, 36(2): 24-26.
- [7] ODUM H T. Environmental accounting: emergy and environmental decision making [M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.

(下转第35页)

- 据[J]. 水利经济, 2017, 35(2): 22-25.
- [3] 吴炳华, 周庆胜, 潘小青, 等. 宁波市蛇蟠岛应急水源地建设与环境效应[J]. 水资源保护, 2017, 33(3): 38-41.
- [4] 华坚, 李晶晶. 基于系统动力学的重大水利工程项目决策社会稳定风险评估有效性分析[J]. 水利经济, 2017, 35(2): 11-15.
- [5] 张月珍, 董平国. 2013年武威市集中式饮用水源地水质综合评价[J]. 水资源保护, 2016, 32(1): 91-96.
- [6] 王浩. 流域初始水权分配理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [7] 石玉波. 关于水权与水市场的几点认识[J]. 中国水利, 2001(2): 31-32.
- [8] SHERALI H D, DESAI J, GLICKMAN T S. Allocating emergency response resources to minimize risk with equity considerations[J]. American Journal of Mathematical & Management Sciences, 2004, 24(3-4): 367-410.
- [9] 曹振宇. 松花江流域水资源使用权初始分配政府预留水量研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2015.
- [10] 周晔, 吴凤平, 陈艳萍. 政府预留水量的内涵、动因及实践探究[J]. 资源开发与市场, 2012, 28(5): 438-442.
- [11] 周晔, 吴凤平, 陈艳萍. 水源地突发水污染公共安全事件应急预留水量需求估测[J]. 自然资源学报, 2013, 28(8): 1426-1437.
- [12] ZHOU S J, TANG F Y, AUTHORITY S W. Construction practice of emergency reserve water source project in Suining City[J]. China Water & Wastewater, 2016.
- [13] WANG Z, WANG Z L, JING Z Q. Study of urban emergency reserve water source and channel construction: a case of Nanjing[J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(4): 49-52.
- [14] 阎官法, 贾涛. 郑州市城市应急供水与应急生活供水定额研究[J]. 河南工业大学学报(社会科学版), 2005, 1(3): 21-23.
- [15] 王志璋, 谢新民, 王教河, 等. 流域初始水权分配政府预留水量双侧耦合分析方法及应用[C]. // 中国水利学会. 2005学术年会论文集: 节水型社会建设的理论与实践. 青岛: 2005: 117-122.
- [16] 沈大军, 王教河, 谢新民, 等. 政府预留水量动用原则与管理模式研究[J]. 中国水利, 2006(1): 34-37.
- [17] 谢新民, 王教河, 王志璋, 等. 松辽流域初始水权分配政府预留水量研究[J]. 中国水利, 2006(1): 31-33.
- [18] 胡伟, 李巍. 太湖东部地区利用太湖建设应急备用水库思考[J]. 中国农村水利水电, 2012(8): 89-91.
- [19] 刘伟. 黔西地区地下水开发利用对策: 基于西南大旱应急水源勘察的思考[J]. 中国防汛抗旱, 2010(5): 61-63.
- [20] 张海涛, 谢新民, 侯俊山. 突发水污染事件防治与城市安全供水研究[J]. 水利水电技术, 2011(7): 32-39.
- [21] 叶勇, 谢新民, 柴福鑫, 等. 城市地下水应急供水水源地研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28(1): 47-49.
- [22] 汪泽焱, 顾红芳, 益晓新, 等. 一种基于熵的线性组合赋权法[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23(3): 112-116.
- [23] 吴登生, 李建平, 孙晓蕾. 基于加权案例推理模型族的软件成本 SVR 组合估算[J]. 管理工程学报, 2015, 29(2): 210-216.
- [24] 张士锋, 贾绍凤. 北京市水资源安全与工业用水管理方法探讨[J]. 地理科学进展, 2002, 21(6): 625-631.
- [25] 张勇, 王东宇, 杨凯. 1985—2005年中国城市水源地突发水污染事件不完全统计分析[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(2): 79-84.
- [26] 陈飞, 王罗春, 武文燕, 等. 2006—2012年中国城市水源地突发性水污染事件的统计分析[J]. 上海电力学院学报, 2014, 30(1): 62-70.
- [27] 王东宇, 张勇. 2006年中国城市饮用水源地突发污染事件统计及分析[J]. 安全与环境学报, 2007, 7(6): 150-155.

(收稿日期: 2017-10-18 编辑: 陈玉国)

(上接第 27 页)

- [8] LIIS P A, NELSON M, JOAQUIM B G. A review of emergy theory, its application and latest development [J]. Renewable and sustainable energy review, 2016, 54, 882-888.
- [9] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [10] BROWN M T, ULGIATI S. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economics and technology toward environmentally sound innovation[J]. Ecological Engineering, 1997, 9: 51-69.
- [11] 邢淑颖, 刘淑静, 李磊, 等. 海水淡化进入城市供水的定价策略研究[J]. 水利经济, 2015, 33(5): 62-65.
- [12] 徐虹霓, 盛华夏, 张路平. 海洋生态系统内在价值评估方法初探: 以厦门湾为例[J]. 应用海洋学学报, 2014, 33(4): 585-593.
- [13] BROWN M T, GREEN P, GONZALEZ A. Emergy analysis perspectives, public policy options, and development guidelines for the coastal zone of Nayarit, Mexico, Volume 2: emergy analysis and public policy options [R]. Gainesville: Center for Wetlands and Water Resources, University of Florida, 1992.
- [14] 周林飞, 武伟, 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(9): 19-23.
- [15] YONG G, LIU Z X, XUE B. Emergy-based assessment on industrial symbiosis: a case of Shenyang economic and technological development zone [J]. Environ Sci Pollut Res, 2014, 21: 13572-13587.
- [16] NAWA R B, DAVID M W, JAY F. Sustainability assessment of cellulosic biorefinery stillage utilization methods using emergy analysis[J]. Energy, 2016, 109: 13-28.
- [17] 隋春花, 蓝盛芳. 广州城市生态系统能值分析研究[J]. 重庆环境科学, 2001, 23(5): 4-6, 23.
- [18] DAMIEN A, BENEDETTO R, LIGIA T. Emergy evaluation of water treatment processes [J]. Ecological Engineering, 2013, 60: 172-182.
- [19] 李敏, 张小洪, 李远伟, 等. 两个污水处理系统的能值与经济综合分析[J]. 生态学报, 2012, 32(22): 6936-6945.

(收稿日期: 2017-06-06 编辑: 方宇彤)