

基于因子分析的沿海可再生能源开发结构优化模型

周鹏飞*, 耿 璘

(大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对沿海可再生能源特点与开发技术和安全要求,系统地分析并选取开发结构优良性指标,在此基础上应用因子分析法从相关性指标中提取综合因子,包括经济因子、技术因子、环境因子和安全因子,作为能源开发结构优化的综合性能度量.以经济成本、碳排放量、能源开发比例组合效用最大为目标函数,从能源、经济、技术、环境和安全五方面构建约束,提出了沿海可再生能源开发结构优化多目标规划模型.以大连为例,得到该地区目标年的最优能源开发结构.研究成果可为可再生能源开发结构规划与政策制定提供参考.

关键词: 沿海可再生能源;结构优化;因子分析;多目标规划

中图分类号: TK01

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201605008

0 引言

我国沿海地区能源需求量大、传统能源稀缺、环境承载力弱,但这些地区具有丰富的可再生能源,合理开发利用这些能源不仅能优化能源结构,还能减轻环境压力.

目前各国学者对能源开发结构评价与优化问题开展了多方面研究.针对一次常规能源李霞^[1]建立了针对一次常规能源与水资源的评价体系,并运用因子分析法和数据包络分析法对我国30个省区能源利用效率进行了综合评价.范德成等^[2]针对我国一次常规能源的发展问题,基于能源经济学理论提出了社会经济效益、能源规划效益和环境效益维度的评价指标体系,并用层次分析法和粗糙集理论对一次常规能源结构进行了评价.周胜等^[3]结合我国一次常规能源的开发利用实际情况,考虑市场、经济、技术、社会等方面,讨论建立了能源综合评价体系.Mar等^[4]基于能源与经济的关系建立模型,应用控制论思想分析了一次常规能源结构的变化.Symons等^[5]以碳税和消费者需求为输入条件,得出不同情境下的二氧化碳排放,进一步得到不同的能源消费组合.Gabriel等^[6]利用高斯-赛德尔法求解美国能源部

NEMS模型,较精确地得出美国的一次常规能源结构.Tol^[7]建立了用于预测二氧化碳排放量的宏观模型,讨论了IPCC各种情况下美国的碳排放以及相应的能源结构.湛紫娟^[8]分析了江西省一次常规能源结构现状,利用回归模型预测了江西省能源结构比例.Zhang等^[9]提出了综合影响因子的概念,并建立了基于核函数的发电能源结构优化模型.针对可再生能源, Lee等^[10]通过数据分析,提出调整能源结构应该改变能源开发利用形式.文献[11]从定量角度考虑了能源、环境与经济的关系以及产业化前景,构建了韩国未来10年能源科技路线图.江泽民^[12]分析了世界能源基本状况和发展趋势,指出能源消费体系应该具有利用效率高、技术水平先进、污染排放低、生态环境影响小、供给稳定安全等特点.李京京等^[13]针对可再生能源资源特性,建立了考虑储量、开采量和生产率的评价指标体系,并以秸秆资源再利用为例进行了综合评价研究.孟洁等^[14]针对海洋能开发利用对海洋环境影响问题构建了评价指标体系,包括工程和沉积物对水质、水生物的影响等方面.Fan等^[15]以优化碳排放为首要目标建立了能源结构优化模型,提出大力开发可再生能源以提高能源结构的环境友好性.李虹等^[16]针对我国可

收稿日期: 2016-01-09; 修回日期: 2016-05-22.

基金项目: 国家海洋局海洋可再生能源专项资金资助项目(GHME2011CL01);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT13JN01);教育部留学回国人员科研启动基金资助项目([2015]1098).

作者简介: 周鹏飞*(1977-),男,博士,副教授, E-mail: pfzhou@dlut.edu.cn.

再生能源进行了综合评价和结构优化研究,得到了在成本、技术、资源和碳排放约束下,能源结构的最优开发比例,该研究没有考虑能源构成互补关系和安全因素。陈栋^[17]建立了以综合评价为基础的海洋可再生能源结构优化模型,得到了综合评价分值最大情况下的海洋可再生能源开发配比。

现有研究大多针对能源结构分析与预测,且主要针对一次常规能源形式。沿海可再生能源与一次常规能源相比在资源禀赋、技术条件和安全要求等方面不同,对沿海可再生能源开发评估与结构优化时须有针对性地考虑这些要求和条件。本文针对沿海可再生能源特点,选取有针对性的评价指标,并应用因子分析法提取出经济、技术、环境和安全四个综合因子,以此为基础构建多目标规划模型,以实现经济、环境、能源最佳目标的逼近;并以大连为例进行研究。

1 能源结构影响指标选取与分析

1.1 影响因素分析与指标选取

本文遵循兼顾全局、突出重点、便于求解、直观反映现实、考虑主观判断的原则,在3E理念与传统能源结构优化指标^[1-3,11,13]分析的基础上,考虑沿海可再生能源结构评价优选的特点,分别从经济、能源、环境、技术 and 安全5个方面构建沿海可再生能源结构评价优化指标体系,拓展了持续供给指数、研究机构个数、稳定开发指数等指标。具体解释如下:

能源方面。(1)开发量:某种能源的年开发利用量,反映能源开发情况,开发量应满足能源需求。(2)可开发量:资源与技术等条件下,某种能源的年最大可开发利用量,反映能源形式的可开发空间并从侧面反映可再生能源开发技术成熟度。(3)持续供给指数:反映某种能源持续供给性能,用能源的年有效时数比计算得到。考虑沿海可再生能源开发主要供给附近沿海地区,不将与负荷中心距离作为本文主要指标。

经济方面。(1)开发成本:开发某种能源消耗的单位成本。可再生能源的开发利用成本普遍较高,是制约其发展的主要因素之一。通过该指标来控制可再生能源开发结构成本。(2)行业平均工资:各种能源开发利用的劳动用工核算工资。该指标可以从经济管理和调控角度反映与各种能源市场竞争力比较。(3)入网电价:发电企业接入电网的计量价格,是发电企业最直接的经济来源,反映

发电企业收入以及政府对可再生能源政策鼓励与支持。考虑装机容量与能源开发量的相关性,不将其作为本文主要指标。

技术方面。(1)能源转换效率:某种能源转化为可利用形式的转化比率,该指标选取有利于提高能源开发利用效率。(2)研究机构个数:地区内从事可再生能源开发利用研究的机构数量,反映该地区某种可再生能源开发利用的技术发展水平。(3)能源公司个数:地区内从事可再生能源设备制造与施工以及运营管理的公司总数,反映地区可再生能源开发利用实施能力与技术水平。技术成熟度较难量化,本文用可再生能源研究机构个数与能源公司个数作为某种可再生能源开发技术研发水平与实施水平的度量,替代技术成熟度指标。

环境方面。(1)碳排放量:可再生能源开发对环境的影响较小,选取易于量化的碳排放量作为污染气体排放指标。(2)生态环境影响指数:沿海可再生能源开发会对附近生物及生态环境造成一定影响,用各能源造成影响的总项数衡量。(3)废弃物排放量:能源开发利用产生废物与油污等会造成附近海域污染,用建设和运营过程中开发单位能源产生的废弃物量衡量。

安全方面。(1)开发危险指数:某种可再生能源开发引发的人员与事故危险水平,可近似用可再生能源开发利用的年事故率与设备设施的平均检修周期来计算。(2)供给中断指数:沿海可再生能源开发利用易受沿海自然灾害影响,发生供给中断与危险,选用灾害频率作为供给安全指标。(3)稳定开发指数:沿海可再生能源本身具有不平衡和不稳定性,易对电网造成影响和冲击,需考虑可再生能源开发的稳定性能,适时控制开发,适应电网需求。可用各能源开发波动幅度比近似替代。

1.2 能源形式主要指标分析

我国沿海可再生能源开发利用水平较低,开发成本较高。国家数据网2013年统计数据表明:风能的开发成本最低,约为0.533元/kW,接近火电成本,而潮汐能发电成本为2.30元/kW,大大高于火电成本。

沿海可再生能源转换效率,2011年10月华锐风电的SL6000系列风力发电机能源转换效率为42%左右。我国潮汐能发电机组主要为单库双向,能源转换效率理论值为20%。据IEA Solar Concentration Power Roadmap 2010研究,沿海光伏发电转换效率为19%。

我国当前风能的开发利用相对成熟,但由于该能源形式的自身活跃性强,其可控性较差.潮汐能和潮流能的开发利用设备长期处于水下,从损耗和维修的角度来讲,安全性较差.生物质能是可以持续供给、受自然环境影响较小的能源形式,其稳定开发指数相对较高.生物质能在能源转化等环节存在碳排放,通常较太阳能等其他可再生能源形式碳排放量高.

2 沿海可再生能源开发结构优化综合因子分析

本文选取的指标间存在互补和交叉部分,为减小对优化模型的影响,利用因子分析法从关联重叠指标中提取综合因子,作为能源结构优化建

模的基础.

2.1 指标采集与处理

根据指标内涵,调研收集大连地区可再生能源开发相关文献、报告及资料,包括《海上可再生能源开发的综合评价与结构优化研究》《大连市发电行业市场研究及企业深度报告》,国家数据网、中国能源网等,并结合实地调研得到大连地区2010、2014 和 2020 年各指标值,对其进行标准化,结果如表 1 所示.

采用标准化方法:对于越小越好指标用公式 $f(x)=x/x_{\min}$,对于越大越好指标采取公式 $f(x)=x/x_{\max}$,其中 x 为指标的观测值, $x_{\min}$ 为该指标观测值中的最小值, $x_{\max}$ 为该指标观测值中的最大值.

表 1 能源结构优化的标准化指标值

Tab.1 The normalizing index values of energy structure optimization

能源形式	技术方面									经济方面								
	(1)能源转换效率			(2)研究机构个数			(3)能源公司个数			(4)开发成本			(5)行业平均工资			(6)入网电价		
	2010	2014	2020	2010	2014	2020	2010	2014	2020	2010	2014	2020	2010	2014	2020	2010	2014	2020
风能	0.888	0.932	1.000	0.588	0.764	1.000	0.750	0.750	1.000	0.679	0.941	1.000	0.856	0.926	1.000	0.596	0.828	1.000
潮汐能	0.444	0.466	0.555	0.294	0.412	0.588	0.333	0.417	0.583	0.165	0.176	0.198	0.736	0.813	0.901	0.159	0.170	0.191
太阳能	0.377	0.422	0.511	0.470	0.647	0.706	0.500	0.583	0.750	0.494	0.588	0.689	0.758	0.832	0.917	0.409	0.507	0.626
生物质能	0.222	0.333	0.355	0.353	0.470	0.529	0.167	0.333	0.583	0.570	0.653	0.772	0.754	0.835	0.925	0.539	0.642	0.792
潮流能	0.444	0.466	0.555	0.059	0.059	0.176	0	0	0.167	0.159	0.176	0.190	0.742	0.813	0.904	0.161	0.169	0.188

能源形式	环境方面									安全方面								
	(7)碳排放量			(8)生态环境影响指数			(9)废弃物排放量			(10)开发危险指数			(11)供给中断指数			(12)稳定开发指数		
	2010	2014	2020	2010	2014	2020	2010	2014	2020	2010	2014	2020	2010	2014	2020	2010	2014	2020
风能	0.703	0.800	1.000	0.750	1.000	1.000	0.769	0.833	1.000	0.667	0.800	1.000	0.344	0.344	0.344	0.167	0.333	0.500
潮汐能	0.290	0.310	0.366	0.500	0.600	0.750	0.588	0.667	0.833	0.333	0.400	0.533	0.228	0.228	0.228	0.670	0.833	1.000
太阳能	0.155	0.167	0.186	1.500	1.500	1.500	0.714	0.769	0.909	0.267	0.267	0.400	1.000	1.000	1.000	0.333	0.500	0.667
生物质能	0.056	0.059	0.062	0.375	0.375	0.375	0.455	0.526	0.625	0.267	0.267	0.400	0.072	0.072	0.072	0.500	0.667	0.833
潮流能	0.290	0.314	0.363	0.600	0.750	0.750	0.625	0.714	0.909	0.200	0.267	0.533	0.228	0.228	0.228	0.667	0.833	1.000

注:指标(1)依据文献[17]和《2011 中国新能源发电分析报告》取值;(2)、(3)依据中国能源网(www.china5e.com)及《大连市发电行业市场研究及企业深度报告》取值;(4)依据《2011—2015 年辽宁风电产业运行市场动态及发展前景预测分析报告》《2015—2019 年辽宁风力发电行业发展报告》《中国生物质能发电行业产业成本与效益预测报告》取值;(5)、(6)源于国家数据网(data.stats.gov.cn/index)统计数据;(7)根据文献[17]和大连鑫宝生物质能有限公司官网(www.dlswzn.cn)数据确定;(8)依据国家海洋技术中心研究报告即文献[18]确定;(9)依据《大连市海上风电厂工程规划》《大连市建设潮汐电站可行性分析》,北极星光伏网(guangfu.bjx.com.cn)等确定;(10)依据《风力发电机组检修办法》《浅谈水轮发电机组的检修特点及检修周期》《考虑大规模光伏电源接入系统的发电机组检修计划》《大连鑫宝生物质能发电有限公司检修管理规定(试行)》选定;(11)、(12)根据文献[19]确定.

2.2 综合因子分析

利用因子分析法对指标进行分析,提取技术、经济、环境和安全综合因子.数据采用大连地区标准化数据,分析工具为 SPSS 软件.下面以技术综合因子提取为例进行介绍.

首先,对技术因素变量进行检验,得到相关系

数矩阵如表 2 所示.可以看出:(1)相关系数大于 0.3,指标相关性满足因子分析要求;(2)Sig 显著性检验值小于 0.05,变量差异性显著.KMO 和 Bartlett 检验显示:KMO 检验值为 0.749,根据 KMO 度量标准判定(0.9 以上表示非常适合;0.8 表示适合;0.7 表示一般;0.6 表示不太适合;0.5

以下表示极不适合),满足因子分析要求.

表 2 相关矩阵
Tab.2 Correlation matrix

	相关系数		
	能源转换效率	研究机构个数	能源公司个数
能源转换效率	1.000	0.532	0.636
研究机构个数	0.532	1.000	0.959
能源公司个数	0.636	0.959	1.000

	Sig(单侧)		
	能源转换效率	研究机构个数	能源公司个数
能源转换效率	—	0.021	0.004
研究机构个数	0.021	—	0
能源公司个数	0.004	0	—

其次,应用因子分析法提取因子,得到因子解释程度和碎石图,如图 1 所示.依据因子选取原则(取特征值大于 1 的因子作为综合因子,小于 1 的舍去;碎石图中取曲线下降迅速的因子为综合因子,趋于平缓阶段舍去)和图表结果,选取一个综合因子.

再次,该综合因子是由能源转换效率、研究机构个数和能源公司个数指标提取得到,将其命名为技术综合因子.应用回归法求得各指标得分系数,其中能源转换效率为 0.321,研究机构个数为 0.382,能源公司个数为 0.399.

最后,根据公式:

$$f_j^k(x) = \sum_{i=1}^3 a_i x_i^{jk}$$

计算各能源在不同年份的技术因子得分.公式中,

$f_j^k(x)$ 为第 j 种能源在第 k 年中的技术因子得分;
 a_i 为综合因子中指标 i 的得分系数; x_i^{jk} 为第 k 年中第 j 种能源的第 i 个指标的数据标准化的值.

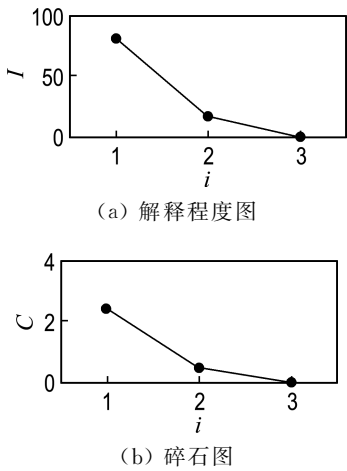


图 1 因子解释程度和碎石图
Fig.1 Factor interpretation degree and scree plot

采用同样的方法可提取得到经济、环境、安全综合因子指标得分,如表 3 所示.可以看出:(1)综合评价分值符合大连地区沿海可再生能源特点,3 年中风能评价分值最高,反映大连风能丰富,开发成本较低,技术较成熟.大连近年潮流能开发仍处于研发阶段,其评价分值低.(2)通过因子分析发现指标间的内在关联联系(如:研究机构个数和能源转换效率间的相互促进关系),并从复杂关联指标中提取具有实际含义的综合因子指标,便于建立结构优化模型时处理技术、经济、环境和安全因素.

表 3 各能源形式的综合因子指标得分
Tab.3 Comprehensive factor indexes score of various energy resources

能源形式	2010					2014					2020				
	经济	技术	环境	安全	总分	经济	技术	环境	安全	总分	经济	技术	环境	安全	总分
风能	0.779	0.809	0.803	0.590	2.981	1.003	0.891	0.951	0.628	3.473	1.120	1.102	1.083	0.758	4.063
潮汐能	0.352	0.388	0.499	0.552	1.791	0.383	0.473	0.572	0.617	2.045	0.427	0.636	0.707	0.747	2.517
太阳能	0.596	0.500	0.861	0.738	2.695	0.698	0.615	0.885	0.830	3.028	0.813	0.733	0.943	0.950	3.439
生物质能	0.680	0.273	0.322	0.623	1.898	0.780	0.420	0.350	0.699	2.249	0.918	0.549	0.387	0.829	2.683
潮流能	0.352	0.165	0.549	0.522	1.588	0.383	0.172	0.645	0.565	1.765	0.423	0.312	0.733	0.717	2.185

3 沿海可再生能源开发结构优化模型

能源结构优化需考虑经济、环境与可持续发展等多方面的条件和目标,这些目标间存在重叠,甚至冲突关系,本文建立多目标组合优化目标函

数,利用最佳状态逼近来构建目标函数.利用经济、技术、环境和安全综合因子,以及关键指标构建约束条件,体现目标与柔性约束.构建的多目标沿海可再生能源结构优化模型如下:

(1)目标函数

目标函数

$$\min h=\omega^{f^1}\cdot\frac{(f_{\max}^1(x)-f^1(x))}{(f_{\max}^1(x)-f_{\min}^1(x))}+\\ \omega^{f^2}\cdot\frac{(f^2(x)-f_{\min}^2(x))}{(f_{\max}^2(x)-f_{\min}^2(x))}+\\ \omega^{f^3}\cdot\frac{(f_{\max}^3(x)-f^3(x))}{(f_{\max}^3(x)-f_{\min}^3(x))}$$

式中： $f^1(x)=\sum_{i=1}^n x_i g_i$ ，为成本函数， x_i （决策变量）为沿海可再生能源 i 的年开发量， g_i 为能源形式 i 的单位成本； $f^2(x)=\sum_{i=1}^n x_i c_i$ ，为碳排放量函数， c_i 为开发单位能源 i 的碳排放量； $f^3(x)=\sum_{i=1}^n x_i/e_i$ ，为能源开发比例函数， e_i 为能源 i 的年可开发量。 ω^{f^1} 、 ω^{f^2} 和 ω^{f^3} 分别为成本函数、碳排放量函数、能源开发比例函数的权重，决策者可以根据能源结构要求柔性选定。模型目标函数由系统成本、碳排放量以及开发比例 3 个目标最优逼近函数组合构成，其中第 3 个目标优化能源均衡开发利用，避免开发结构失衡。目标函数中 $f_{\max}^1(x)$ 和 $f_{\min}^1(x)$ 是满足约束的最大和最小值，分别利用约束条件与 $\max h=f^1(x)$ 或 $\min h=f^1(x)$ 构成模型求解得到。

(2)能源开发量约束

能源开发量约束表示为

$$x_i\leqslant X_i; X_{\min}^e\leqslant\sum_{i=1}^n x_i\leqslant X_{\max}^e$$

式中： X_i 为能源 i 最大可开发利用量； $X_{\min}^e$ 和 $X_{\max}^e$ 为根据需求选定的最小和最大能源总量。

(3)综合因子约束

综合因子约束表示为

$$\sum_{i=1}^n\left(x_i q_{ij}\bigg/\sum_{i=1}^n x_i\right)\geqslant\omega_j^q\sum_{i=1}^n\left(x'_i q'_{ij}\bigg/\sum_{i=1}^n x'_i\right)$$

式中： q_{ij} 和 q'_{ij} 分别为目标年和基准年各能源的技术、经济、环境与安全综合因子指标得分； ω_j^q 分别为技术、经济、环境与安全约束系数，目标年综合因子指标得分通常要求大于基准年得分，系数要求大于等于 1。

(4)能源转换效率约束

能源转换效率约束表示为

$$\sum_{i=1}^n\left(x_i\alpha_i\bigg/\sum_{i=1}^n x_i\right)\geqslant\omega^a\sum_{i=1}^n\left(x'_i\alpha'_i\bigg/\sum_{i=1}^n x'_i\right)$$

式中： α_i 和 α'_i 分别为目标年和基准年各能源形式

的能源转换效率指标值， ω^a 为能源转换效率约束系数。目标年能源转换效率的加权值通常要求大于基准年值，系数要求大于 1，可再生能源科研与工业发展使得能源效率提高。

(5)单位能源开发成本约束

单位能源开发成本约束表示为

$$\sum_{i=1}^n\left(x_i\epsilon_i\bigg/\sum_{i=1}^n x_i\right)\leqslant\omega^\epsilon\sum_{i=1}^n\left(x'_i\epsilon'_i\bigg/\sum_{i=1}^n x'_i\right)$$

式中： ϵ_i 和 ϵ'_i 分别为目标年和基准年各能源形式开发的单位成本， ω^ϵ 为能源形式开发成本约束系数，能源开发成本需控制在基准年一定比例范围内。

(6)碳排放量和废弃物排放量约束

碳排放量和废弃物排放量约束表示为

$$\sum_{i=1}^n\left(x_i\eta_{ij}\bigg/\sum_{i=1}^n x_i\right)\leqslant\omega_j^\eta\sum_{i=1}^n\left(x'_i\eta'_{ij}\bigg/\sum_{i=1}^n x'_i\right)$$

式中： η_{ij} 和 η'_{ij} 分别为目标年和基准年各能源形式开发的单位碳排放量和废弃物排放量， ω_j^η 为碳排放量和废弃物排放量约束系数，碳排放量和废弃物排放量需控制在基准年一定比例范围内。

(7)稳定开发指数约束

稳定开发指数约束表示为

$$\sum_{i=1}^n\left(x_i\mu_i\bigg/\sum_{i=1}^n x_i\right)\geqslant\omega^\mu\sum_{i=1}^n\left(x'_i\mu'_i\bigg/\sum_{i=1}^n x'_i\right)$$

式中： μ_i 和 μ'_i 分别为目标年和基准年各能源形式的稳定开发指数， ω^μ 为稳定开发指数约束系数，考虑新能源开发对电网的冲击，稳定开发指数加权组合应控制在基准年一定比例范围内。

4 案例研究

大连地区海洋资源十分丰富，据统计，大连风速有效时数在 6 500 h/a，年平均风力密度为 129.6 W/m²。该地区潮差 3~4 m，为规则半日潮汐，理论蕴藏潮汐能 193.6×10⁴ kW。另外，大连的太阳能可以利用时间为 4 000 h/a，理论可开发太阳能 3.68 GW。

根据《大连地区风能资源评估及分布》《大连市建设潮汐电站可行性分析》《大连市太阳能资源评估分析》《潮流能资源调查与评估标准的研究》，以及中国能源网的数据，得到大连地区能源数据见表 4。

(1)模型有效性分析

将大连地区基础数据与因子分析数据代入沿海可再生能源结构优化模型，取模型中各弹性系数为 1，利用 CPLEX 求解得到 2020 年大连沿海

可再生能源结构配比,并与文献[17]模型所得结果进行对比,结果如表 5 所示.

表 4 能源属性指标值

Tab. 4 Index values of energy resources

能源形式	开发量 (2010 年)/ (10 ⁴ kW · h)	可开发量 (2020 年)/ (10 ⁴ kW · h)	需求量 (2020 年)/ (10 ⁴ kW · h)
风能	450	8 000	
潮汐能	51	1 608	
太阳能	44	923	4 200
生物质能	11	1 291	
潮流能	0	1 718	

表 5 大连可再生能源开发结构

Tab. 5 The structure of renewable energy development in Dalian

能源形式	本文模型优化结果		文献[17]模型优化结果	
	能源结 构配比	开发利用量/ (10 ⁴ kW · h)	能源结 构配比	开发利用量/ (10 ⁴ kW · h)
风能	0.719	3 018.8	0.411	1 726.2
潮汐能	0.012	51.0	0.185	777.0
太阳能	0.219	923.0	0.294	1 234.8
生物质能	0.003	11.0	0.110	468.0
潮流能	0.047	196.2	0	0

注:文献[17]模型优化结果为能源结构配比,开发利用量为根据沿海可再生能源总需求量计算得到.

从表 5 可以看出:①优化后的能源结构中各种能源都得到开发,相对基准年增加了潮流能配比,虽然风能仍占主导地位,但其配比较基准年有所降低,太阳能所占比例和开发量都有提高,能源结构具有良好的可持续性,更趋合理.②对比文献[17],本文模型综合考虑了经济、环境和配比可持续性目标,经济效益和碳排放量指标分别改进了 10%和 20%以上,潮流能得到发展,改善了能源结构的合理性;综合因子约束反映了因素总体水

平条件,能源转换效率和碳排放量等关键指标约束突出了重点条件,使优化结果更贴近实际.

(2)参数敏感性分析

本文分别以经济效益、环境友好、综合效益为首要目标优化大连 2020 年能源开发结构.

情景Ⅰ:以经济效益为首要目标.成本函数权重最大,取 $\omega^{f^1}=1.25, \omega^{f^2}=1, \omega^{f^3}=1$,关键经济约束中 $\omega^e=0.8$,其余各约束的系数取 1.

情景Ⅱ:以环境友好为首要目标.碳排放量函数权重最大,取 $\omega^{f^1}=1, \omega^{f^2}=1.25, \omega^{f^3}=1$,关键环境约束中碳排放量和废弃物排放量的 $\omega_j^e=0.8$,其余各约束的系数取 1.

情景Ⅲ:以综合效益为首要目标.各综合因子约束目标年系数取较大值,各综合因子 $\omega_j^g=1.2$,目标函数权重 $\omega^{f^1}=1, \omega^{f^2}=1, \omega^{f^3}=1$.

利用 CPLEX 求解得 3 个情景下 2020 年大连可再生能源开发结构配比与开发量,如表 6 所示.

可以看出:由于风能的综合评价分值较高,在以经济效益(情景Ⅰ)、环境友好(情景Ⅱ)为主要目标时,在能源优化结构中开发配比最高.太阳能的安全因子得分最高,其他因子得分也较高,其(情景Ⅰ和Ⅱ)能源结构配比也较高,情景Ⅲ的开发配比最高,说明应优先开发太阳能.潮汐能的评价得分较低,且主要约束指标开发成本和碳排放量较高,在以经济效益和环境友好为目标的作用下维持在基准年水平.开发比例优化目标有利于保持能源开发结构的均衡可持续性,避免过度开发某种能源造成能源依赖与发展失衡,情景Ⅱ和Ⅲ的潮流能开发量都有所增加,提高了能源开发结构的均衡可持续性.上述分析表明本文模型反映了决策情景要求和模型适用性,决策者可根据决策需求调整情景参数.

表 6 不同情景下的可再生能源开发结构

Tab. 6 The structure of renewable energy development under different scenarios

能源形式	情景Ⅰ		情景Ⅱ		情景Ⅲ	
	能源结 构配比	开发利用量/ (10 ⁴ kW · h)	能源结 构配比	开发利用量/ (10 ⁴ kW · h)	能源结 构配比	开发利用量/ (10 ⁴ kW · h)
风能	0.970	4 074.4	0.762	3 200.5	0.719	3 018.8
潮汐能	0.012	51.0	0.012	51.0	0.012	51.0
太阳能	0.015	63.6	0.185	775.1	0.219	923.0
生物质能	0.003	11.0	0.003	11.0	0.003	11.0
潮流能	0	0	0.038	162.5	0.047	196.2

5 结 论

(1)应用因子分析法可从复杂关联的沿海可再生能源开发优良性指标中提取具有实际含义的技术、经济、环境和安全综合因子用于能源开发结构优化建模。

(2)提出的多目标优化模型可有效改进沿海可再生能源开发结构的经济合理性、环境友好性和可持续发展性能指标,并具有良好的适用性,可根据决策需求调整情景参数。

(3)大连地区不同决策情景下沿海可再生能源结构优化研究成果对可再生能源开发结构优化深入研究和大连能源开发规划有参考价值。

参考文献:

- [1] 李霞. 我国省域节能减排综合评价指标体系与实证研究[J]. 理论月刊, 2013(4):117-122.
LI Xia. China's comprehensive evaluation index system and empirical research on energy saving and emission reduction [J]. **Theory Monthly**, 2013(4): 117-122. (in Chinese)
- [2] 范德成,王韶华,张伟,等. 低碳经济范式下能源结构优化程度评价研究[J]. 运筹与管理, 2013, 22(6):168-176.
FAN De-cheng, WANG Shao-hua, ZHANG Wei, et al. Research on optimization degree evaluation of energy structure under low-carbon economy paradigm [J]. **Operations Research and Management Science**, 2013, 22(6):168-176. (in Chinese)
- [3] 周胜,张希良. 可再生能源综合评价体系探讨[J]. 环境保护, 2004(10):48-51.
ZHOU Sheng, ZHANG Xi-liang. Integrated renewable energy assessment approach [J]. **Environmental Protection**, 2004(10): 48-51. (in Chinese)
- [4] Mar B, Bakken O. Applying classical control theory to energy-economics modeling — A tool to explain model behavior in response to varied policy decisions and changing inputs [J]. **Management Science**, 1981, 27(1):81-92.
- [5] Symons E, Proops J, Gay P. Carbon taxes, consumer demand and carbon dioxide emissions: a simulation analysis for the UK [J]. **Fiscal Studies**, 1994, 15(2):19-43.
- [6] Gabriel S A, Kydes A S, Whitman P. The national

energy modeling system: a large-scale energy-economic equilibrium model [J]. **Operations Research**, 2001, 49(1):14-25.

- [7] Tol R S J. Carbon dioxide emission scenarios for the USA [J]. **Energy Policy**, 2007, 35(11):5310-5326.
- [8] 湛紫娟. 江西省能源结构优化调整研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2012.
SHEN Zi-juan. Research on the optimization and adjustment of energy structure in Jiangxi province [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2012. (in Chinese)
- [9] ZHANG Cai-qing, LU Yan-chao. Study on the generating energy structure optimization based on the hybrid intelligence algorithm and the comprehensive influence factor [J]. **Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems - Series B — Applications & Algorithms**, 2006, 13:765-769.
- [10] Lee Hoe-sung,周大地, Jung Yong-hun,等. 亚太国家温室气体排放清单及其缓解策略:会议报告和工作组讨论纪要[R]. 北京:中国科学院地理科学与资源研究所, 1996:220-225.
Lee Hoe-sung, ZHOU Da-di, Jung Yong-hun, et al. Asia pacific countries greenhouse gas emissions inventory and mitigation strategies: report of the meeting and working group discussions summary [R]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, 1996:220-225. (in Chinese)
- [11] Lee Seong-kon, Mogi G, Kim Jong-woon. Energy technology roadmap for the next 10 years: the case of Korea [J]. **Energy Policy**, 2009, 37(2):588-596.
- [12] 江泽民. 对中国能源问题的思考[J]. 中国石油企业, 2008, 42(4):14-16.
JIANG Ze-min. Reflections on energy issues in China [J]. **China Petroleum Enterprise**, 2008, 42(4):14-16. (in Chinese)
- [13] 李京京,任东明,庄幸. 可再生能源资源的系统评价方法及实例[J]. 自然资源学报, 2001, 16(4): 373-380.
LI Jing-jing, REN Dong-ming, ZHUANG Xing. Systemic evaluation method of renewable energy resources and its practical application [J]. **Journal of Natural Resources**, 2001, 16(4): 373-380. (in Chinese)
- [14] 孟洁,张榕,孙华峰,等. 浅谈海洋能开发利用环境影响评价指标体系[J]. 海洋技术, 2013, 32(3):129-132, 142.

MENG Jie, ZHANG Rong, SUN Hua-feng, *et al.*. Discussion on the index system of environmental impact assessment for ocean energy resource utilization [J]. *Ocean Technology*, 2013, **32** (3): 129-132,142. (in Chinese)

[15] FAN De-cheng, WANG Shao-hua. Analysis on the character of CO₂ emissions per outputs of final energy consumption in manufacturing in China [C] // **2011 International Conference on Management Science and Engineering - 18th Annual Conference Proceedings, Vols I and II**. Piscataway: IEEE, 2011:1040-1045.

[16] 李 虹,董 亮,段红霞. 中国可再生能源发展综合评价与结构优化研究[J]. 资源科学, 2011, **33**(3): 431-440.

LI Hong, DONG Liang, DUAN Hong-xia. On comprehensive evaluation and optimization of renewable energy development in China [J]. *Resources Science*, 2011, **33** (3): 431-440. (in Chinese)

[17] 陈 栋. 海上可再生能源开发的综合评价与结构优化研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2012.

CHEN Dong. Study on comprehensive evaluation and structure optimization of marine renewable energy development [D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)

[18] 刘富铀,王传崑,赵世明,等. 海洋可再生能源电站的潜在环境影响评价和潜在社会经济效益分析研究报告[R]. 天津:国家海洋技术中心, 2010.

LIU Fu-you, WANG Chuan-kun, ZHAO Shi-ming, *et al.*. Potential environmental impact assessment and potential social economic benefit analysis of marine renewable exploiture [R]. Tianjin:National Marine Technology Center, 2010. (in Chinese)

[19] 冯有良. 海洋灾害影响我国近海海洋资源开发的测度与管理研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2013.

FENG You-liang. Research on measuring of marine disaster which affected coastal waters marine resources exploitation of China and disaster management [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013. (in Chinese)

Structural optimization model of coastal renewable energy development based on factor analysis

ZHOU Peng-fei* , GENG Jin

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Considering the characteristics of coastal renewable energy and its development technology and safety requirements, the development structure evaluation indexes are proposed and analyzed systematically. Using factor analysis method, common factors are extracted from the indexes for energy development structure optimization as follows:economy factor, technique factor, environment factor and safety factor. A coastal renewable energy development structure multi-objective programming model is suggested so as to improve the combined utility of economic costs, carbon emission and development proportion index with the constraints of five aspects:energy, economy, technology, environment and safety. A case of Dalian is studied with its optimal energy development structure in target years. The findings can provide a reference for the renewable energy planning and policy-making.

Key words: coastal renewable energy; structural optimization; factor analysis; multi-objective programming