海水冷却工程科学用海评价研究

李运平，尹建华，张 琦
（国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所 天津 300192）

摘 要：面对沿海地区海水冷却工程建设蓬勃发展的形势，合理开发利用海洋，保证工程用海的科学性成为业界关注的热点。文章通过系统分析，构建了海水冷却工程科学用海评价指标体系，采用层次分析法对海水冷却工程科学用海进行综合评价，为海水冷却工程项目规划、监管和用海评价提供有力的技术支撑，以促进沿海地区海洋资源、环境和社会经济的协调可持续发展。

关 键 词：海水冷却；科学用海；综合评价

1 引言

21 世纪是海洋的世纪，海洋是生命的摇篮和资源的宝库，是全球生命支持系统的一个重要组成部分。随着沿海社会经济的快速发展和淡水资源危机的不断加剧，海水冷却技术已成为缓解沿海地区淡水资源紧缺局面的有效途径之一[1-3]。海水冷却技术按工艺可分为海水直流冷却和海水循环冷却两种。海水直流冷却历史悠久、技术成熟，已广泛应用于沿海电力、石化等高耗水行业。近年来，海水循环冷却作为一种环保型节水新技术逐渐受到重视并迅速发展，目前我国已基本掌握海水循环冷却防腐、阻垢、防生物附着和海水冷却塔关键技术，成功实施了千吨级、万吨级和十万吨级工程示范，产业化推广不断深入。

随着沿海地区海水冷却工程的兴建，海水冷却工程科学用海问题日益引起业界的高度关注，而国内外相关研究大多集中在海水冷却温排水和余氯对海洋环境影响方面[4-6]，尚无对海水冷却工程科学用海评价的系统研究。为此，全面开展海水冷却工程科学用海研究，建立评价指标体系和评价方法，为海水冷却工程项目用海评价提供理论依据和技术支撑，对于合理开发利用海洋，保障沿海地区海洋资源、环境与社会经济的协调可持续发展具有重要意义。

2 海水冷却工程科学用海内涵

海水冷却工程科学用海是指在符合海域自然属性、有效节约淡水资源、满足冷却用户正常生产需求的前提下，确保冷却工程用海与海洋环境、海洋资源以及社会经济协调、可持续发展。

3 海水冷却工程科学用海指标体系设置原则

3.1 全面性与代表性原则

海水冷却工程科学用海指标体系是一个多种因素综合作用的有机整体，应从不同角度全面反映科学用海的主要特征和状况。同时，应结合海水冷却工程科学用海的重要环节和过程，在指标选取上注重代表性和典型性，避免指标的重叠或交叉，使指标体系简洁、易用。

3.2 系统性与层次性原则

海水冷却工程科学用海评价是一个复杂的系统工程，涉及自然条件、海洋环境与资源、社会经济、用海效益等众多方面和不同因素，因此指标体系的设计应根据影响因素之间的特性和相互关系，构建系统完整、层次分明的评价指标体系。

3.3 科学性与实用性原则

评价指标的设置应客观反映海水冷却工程科学用海的实际状况，既要科学规范、内涵明

确，又要实用、可靠，使指标数据具有良好的可获性和准确性，便于量化处理，确保评价方法科学合理、计算模型易于掌握。

4　海水冷却工程科学用海指标体系与系统分析

4.1　海水冷却工程科学用海指标体系构建

本研究通过深入分析海水冷却工程科学用海的特性和关键影响因素，提出并建立海水冷却工程科学用海指标体系，包括自然条件适宜性、海洋环境影响度、社会发展协调性和工程用海效益 4 个子系统（表 1），旨在实现海水冷却工程用海与自然条件、海洋环境、社会发展以及自身效益的和谐统一与可持续发展。

表 1　海水冷却工程科学用海指标体系

目标层	准则层	因素层	因子层
海水冷却工程科学用海评价指标体系 A1	自然条件适宜性 B1	海洋水文条件 C1	水温 D1
			海水交换能力 D2
		取水水质条件 C2	浊度 D3
			异养菌总数 D4
		工程地质条件 C3	场地类别 D5
			地震烈度 D6
	海洋环境影响度 B2	海水水质影响 C4	4℃温升影响 D7
			药剂影响 D8
			盐度影响 D9
		海洋沉积物影响 C5	有机碳 D10
			硫化物 D11
		海洋生态影响 C6	浮游植物 D12
			浮游动物 D13
			底栖生物 D14
	社会发展协调性 B3	法规政策符合性 C7	海洋功能区划符合性 D15
			区域涉海规划符合性 D16
		周边用海活动协调性 C8	海洋权属协调性 D17
			生产作业协调性 D18
	工程用海效益 B4	海水利用效率 C9	海水浓缩倍数 D19
			排放水再利用 D20
		节水效益 C10	工程冷却水量 D21
			淡水稀缺程度 D22

4.2　海水冷却工程科学用海系统分析

4.2.1　自然条件适宜性

自然条件是海水冷却工程用海的基础，良好适宜的自然条件是保证海水冷却工程安全、经济、稳定运行的基本前提，因此海水冷却工程选址论证须充分考察海域自然条件对工程用海的适宜性，包括海洋水文、取水水质和工程地质 3 个指标。海水冷却工程用海适宜的自然条件是海水温度低、海水交换能力强、取水水质好和无不良海洋地质灾害。

（1）海洋水文条件：表征工程海域水文动力条件对海水冷却工程的适宜性和影响程度，包括水温和海水交换能力。水温低则冷却效果好，对海水冷却工程有利。海水交换能力强，有利于海水冷却工程温排水、残余药剂等污染物的稀释和扩散。

（2）取水水质条件：表征工程海域取水水质条件对海水冷却工程的适宜性和影响程度，取水水质越好，则海水冷却水处理难度越小，越有利于海水冷却工程的正常稳定运行。海水冷却工程关键的取水水质指标为浊度和异养菌总数。

（3）工程地质条件：表征区域地质环境对海水冷却工程建设的适宜性和影响程度，包括场地类别和地震烈度两个指标。场地类别是根据工程场地覆盖层厚度和场地土刚度等因素，按有关规定对建设场地所作的分类，用以反映不同场地条件对地震的综合放大效应，通常分为 4 类。地震烈度是指地震引起的地面震动及其影响的强弱程度，分为十二级。

4.2.2 *海洋环境影响度*

海洋环境与人类的生产和生活息息相关，与海水冷却工程用海相互影响、相互制约。海水冷却工程在满足正常生产需求的前提下，应尽量消除或降低对海洋环境的污染和破坏。本研究提出用海洋环境影响度表征海水冷却工程对海洋环境的影响程度，包括海水水质影响、海洋沉积物影响和海洋生态环境影响 3 个指标。

（1）海水水质影响：表征海水冷却工程排放水对海水水质环境的污染程度，包括 4℃温升影响、药剂影响和盐度影响 3 个指标。海水冷却工程排水的特征污染物主要是温升、残余药剂和浓盐水（循环冷却），这些污染物对海水水质会造成不良影响，并进而影响海洋生态环境。

（2）海洋沉积物影响：表征海水冷却工程排放水对海水沉积物环境的污染程度，包括有机碳和硫化物两个指标，分别表征海水冷却工程排放的有机药剂以及含硫化合物对海洋沉积物的影响程度。

（3）海洋生态环境影响：表征海水冷却工程对海洋生态环境的影响程度，包括浮游植物、浮游动物和底栖生物 3 个指标。浮游植物是海洋生态系统中最主要的初级生产者，不仅为浮游动物、甲壳动物、软体动物和仔稚鱼提供食物和必需的营养成分，还可指示海洋水质的好坏及全球气候的变化。浮游动物在海洋生态系统中扮演着重要角色，既是消费者（掠食者），又是生产者，并对物质循环和垂直流动起重要作用，其种类组成、分布与海洋环境密切相关。底栖生物是海洋生态系统的重要组成部分，底栖生物的栖息地相对稳定，活动空间范围较小，对海域环境变化反应敏感度较高，其种类组成、数量分布及其生态群落多样性等将直接反映该海域生态环境状况，常被作为评价海洋环境影响的重要指标之一。

4.2.3 *社会发展协调性*

社会发展是海水冷却工程用海的内在动力和归宿，海水冷却工程用海应与社会发展和谐统一。社会发展协调性表征海水冷却工程用海与当地社会发展的协调程度，包括法规政策符合性和周边用海活动协调性两个指标。

（1）法规政策符合性。法规政策符合性是指海水冷却工程用海与国家涉海法律法规、政策规划的符合程度，包括海洋功能区划符合性和涉海规划符合性两个指标。我国《海域使用管理法》明确规定国家实行海洋功能区划制度，海洋功能区划是指导科学用海的规范性文件。海水冷却工程用海首先必须符合国家和地方海洋功能区划要求，不得影响海洋功能区划主导功能的发挥。同时，也要符合区域涉海规划的要求，促进区域海洋经济和社会发展。

（2）周边用海活动协调性。周边用海活动协调性是指海水冷却工程用海应与周边其他用海活动相协调，尽量减少或避免相关利益冲突，实现区域用海活动的和谐有序，包括海洋权属协调性和生产作业协调性两个指标。海洋权属协调性是指海水利用工程用海与周边其他用海活动在宗海图、用海类型、用海面积、用海期限等海洋权属方面不存在冲突。生产作业协调性是指海水冷却工程用海不得妨碍周边其他用海活动正常的生产作业，如海水冷却温排水不得对周边海水养殖区或生态保护区产生不良的影响。

4.2.4 *工程用海效益*

海水冷却工程以海水替代淡水作为工业冷却水，从而节约淡水资源、缓解沿海地区日益严重的水资源危机，其用海效益突出表现在海水利用效率和节水效益两个指标。

（1）海水利用效率。海水利用效率是指产生相同的用海效益所耗费海水量的多少，包括

海水浓缩倍数和排放水再利用两个指标。海水浓缩倍数反映了在冷却系统中海水循环利用的程度，即海水利用效率的高低。在海水循环冷却系统中，海水经换热设备完成一次冷却后，再经冷却塔冷却并循环使用。海水在循环利用的过程中由于蒸发而产生浓缩，海水浓缩倍数越大，则海水利用效率越高，海水循环冷却的浓缩倍数一般控制在 1.5～2.0 之间。在海水直流冷却系统中，海水经换热设备完成一次性冷却后即直接排海，其浓缩倍数可视为 1（即不浓缩）。由此可见，海水循环冷却的海水利用效率高于海水直流冷却。排放水再利用是指遵循循环经济的发展理念，将海水冷却工程排放水回收再利用，以减少污染物排放，提高资源利用效率。目前，排放水再利用主要包括利用海水直流冷却温排水作为反渗透海水淡化装置进水、发展海水养殖等，以及利用海水循环冷却排放的浓盐水发展盐化工等综合利用技术。

（2）节水效益。节水效益是指海水冷却工程节约的淡水资源量及其价值，包括工程冷却水量和淡水资源稀缺程度两个指标。工程冷却水量表征节约淡水资源量的多少，工程冷却水量越大，则相应替代的淡水资源量越多。淡水资源稀缺程度反映了海水冷却工程节水效益的相对多少，淡水资源越缺乏的地区，则海水冷却工程产生的节水效益相对越大。国际上通常采用人均水资源量来表征一个地区淡水资源稀缺程度，可分为不缺水、轻度缺水、中度缺水、重度缺水和极度缺水五级。

5　海水冷却工程科学用海评价方法

所谓评价是指人们参照一定标准对评价客体的价值高低或优劣进行评判比较的一种认知过程，同时也是一种决策过程。海水冷却工程科学用海评价是一个复杂的系统，涉及多个指标、多种因素，因此本研究运用层次分析法对海水冷却工程科学用海进行综合评价。

层次分析法[7-8]是由美国著名数学家、运筹学家萨迪于 20 世纪 70 年代中期提出，具有实用、简洁的特点，是一种定性与定量相结合的多目标综合决策方法，适于海水冷却工程科学用海评价。层次分析法的基本原理是将待评价的复杂问题分解成若干组成因素，并将各因素按支配关系分组，形成递阶层次结构模型；再由专家或决策者对所列指标通过重要程度的两两比较逐层进行判断评分，利用计算判断矩阵的特征向量确定下层指标对上层指标的贡献程度或权重，从而得到最基层指标对于总体目标的重要性权重排序。

5.1　建立层次结构模型

通过系统分析海水冷却工程科学用海关键影响因素，明确因素的内在逻辑关系，建立递阶层次结构模型。

5.2　构建判断矩阵

根据层次结构模型，构造判断矩阵 $\boldsymbol{A}$。判断矩阵 $\boldsymbol{A}$ 表示同一层次中各个因素对于上一层某个因素的重要程度，由专家按照 1～9 标度法对同一层元素重要性程度进行两两比较并赋值（表 2）。

表 2　标度含义

标度	含　义
1	表示两元素相比具有同等重要性
3	表示两元素相比前者比后者稍重要
5	表示两元素相比前者比后者明显重要
7	表示两元素相比前者比后者强烈重要
9	表示两元素相比前者比后者极端重要

注：2，4，6，8 表示上述相邻判断的中间值，如果重要性颠倒则用标度的倒数表示 .

5.3　计算最大特征根和特征向量

计算判断矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的最大特征值对应的特征向量，将特征向量归一化，然后利用方根法计算特征向量，即权重。

方根法求解特征向量：

将判断矩阵每一行相乘并开 n 次方根得：

$$\boldsymbol{\alpha}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^{n} b_{ij}}$$

式中：b_{ij} 为判断矩阵 $\boldsymbol{A}$ 中元素的值，对任意的 i，$j=1$，2，…，n；$\boldsymbol{\alpha}_i$ 为特征矩阵的横向量。

对 $\boldsymbol{\alpha}=(\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_n)^{\mathrm{T}}$ 向量进行归一化处理，即

$$w_i = \frac{\boldsymbol{\alpha}_i}{\sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{\alpha}_i}, (i = 1,2,\cdots,n)$$

则向量 $\boldsymbol{W}=(w_1, w_2, \cdots, w_n)^{\mathrm{T}}$，即为所求得的特征向量。

计算判断矩阵的最大特征值：

$$\lambda_{\max}=\sum_{i=1}^{n}\frac{(\boldsymbol{AW})_i}{nw_i}$$

式中：$\boldsymbol{A}$ 为判断矩阵；$(\boldsymbol{AW})_i$ 为矩阵 $\boldsymbol{AW}$ 的第 i 个分量，对任意的 $i=1, 2, \cdots, n$。

5.4 一致性检验

由于客观事物的复杂性以及专家认识的局限性，专家所作的比较判断矩阵与客观事实可能不相符，因此需要对矩阵 $\boldsymbol{A}$ 进行一致性检验。

一致性检验的指标为：

一致性指标：

$$C_{\mathrm{I}}=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1}$$

一致性比率：

$$C_R=\frac{C_{\mathrm{I}}}{R_I}$$

式中：R_I 为随机一致性指标均值（表 3）。

表 3 随机一致性指标 R_I 值

n	R_I
1	0.00
2	0.00
3	0.51
4	0.89
5	1.12
6	1.25
7	1.35
8	1.42
9	1.46

通常以 C_R 作为检验一致性的判别式，若 $C_R<0.1$，则认为判断矩阵 $\boldsymbol{A}$ 具有满意的一致性，所得特征向量即为指标权重。

6 结束语

为适应海水冷却工程用海日益增长的形势和科学用海评价的需要，本研究通过系统分析关键影响因素，建立了海水冷却工程科学用海评价指标体系和评价方法，对海水冷却工程科学用海评价进行了有益探索，这将有利于保护海洋资源和生态环境，促进沿海地区社会经济的可持续发展。但应该看到，鉴于认识水平和技术手段的限制，该指标体系和评价方法还有待完善，需要在实践中进一步检验并不断丰富和发展。

参考文献

[1] 侯纯扬．海水冷却技术[J]．海洋技术，2002，21(4)：33－40.

[2] 侯纯扬，武杰，赵楠，等．海水直流冷却水系统金属腐蚀、污损生物附着及其对策[J]．海洋技术，2002，21(4)：41－45.

[3] 侯纯扬，武杰，赵楠，等．海水循环冷却系统腐蚀、污垢和菌藻控制技术研究[J]．海洋技术，2002，21(4)：47－50.

[4] MATTEUCCI G，MAGAGNINI M，ARMENI M，et al. Ecological assessment of a marine coastal area affected by a power plant water discharge (Brindisi，Adriatic Sea)[J]. The Open Environmental & Biological Monitoring Journal，2011(4)：45－56.

[5] 林昭进，詹海刚．大亚湾核电站温排水对邻近水域鱼卵、仔鱼的影响[J]．热带海洋，2000，19(1)：44－50.

[6] 曾江宁．电厂温排水对亚热带海域生态影响的研究[D]．杭州：浙江大学，2008.

[7] 王莲芬，许树柏．层次分析法引论[M]．北京：中国人民大学出版社，1990.

[8] 周德群．系统工程概论[M]．北京：清华大学出版社，2006.