



Economical analysis and study on a solar desalination unit

Chen, Ziqian; He, Xiaorong; Wang, Tiezhu; Chen, Zhunling; Zheng, Hongfei

Publication date:
2010

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):

Chen, Z. (null), He, X. (null), Wang, T. (null), Chen, Z. (null), & Zheng, H. (null). (2010). Economical analysis and study on a solar desalination unit.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

太阳能海水淡化系统经济性分析与研究

陈子乾^{1,2} 何小荣¹ 王铁柱¹ 陈俊岭³ 郑宏飞⁴

1. 广西大学物理科学与工程技术学院, 广西, 南宁, 530004

Tel: 0771-3237386, E-mail: czq8676@hotmail.com

2. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, 2800 Copenhagen, Denmark

3. 同济大学建筑工程系, 上海, 200092

4. 北京理工大学机械与车辆工程学院, 北京, 100081

摘要: 利用单因素分析方法, 计算三效塔式太阳能海水淡化系统各个参数对太阳能海水淡化系统淡水生产成本的单因素影响值, 分别给出太阳能集热系统成本、储热水箱成本、海水淡化装置成本、装置运行年消耗动力费用、设备使用年限和淡水年生产总量等参数对淡水生产成本影响的程度, 明确降低淡水生产成本的方向, 有助于太阳能海水淡化装置的深入研究。

关键词: 太阳能海水淡化; 单因素分析; 单因素影响值; 三效塔式

Abstract: Based on the calculation of the single-factor impact values of the parameters of a triple tower-type solar desalination unit on the cost of fresh water production by utilizing a single-factor analyzing method, the influences of the cost of solar heating system, the cost of hot water tank, the costs of desalination unit and electrical power, the life time of solar desalination unit and the yearly yield of fresh water, on the cost of the fresh water production of the solar desalination unit are studied. It is helpful for the further investigation of solar desalination and for reducing the cost of fresh water production for solar desalination units.

0 引言

随着人口的增长和经济的发展, 淡水资源和常规能源出现短缺, 太阳能海水淡化的研究越来越引起人们的关注, 并研究出更多新颖的太阳能海水淡化装置^[1-3], 与此同时, 太阳能海水淡化装置的经济性分析^[4-7]在太阳能海水淡化装置研究中是很重要的环节。以往的经济性分析和研究, 主要是分析和计算各种太阳能海水淡化装置的淡水生产成本, 没有对太阳能海水淡化装置各个参数对淡水生产成本影响程度进行深入的研究。本文使用单因素分析方法^[8], 在三效塔式太阳能海水淡化系统^[3]进行最优化计算分析的基础上, 计算三效塔式太阳能海水淡化系统各个参数对其淡水生产成本的单因素影响值, 根据对淡水生产成本影响的程度, 将参数明确分为主参数和次参数。通过对主参数的讨论和研究, 充分分析主参数对淡水生产成本的影响, 明确降低太阳能海水淡化系统淡水生产成本的可能与方向。

1 单因素分析数学模型

根据文献[8]提出的单因素分析方法知, 太阳能海水淡化的研究过程中, 分别可使用由影响海水淡化装置淡水生产成本的所有因素(或参数)构成的集合 H 和淡水生产成本集合 P 表示。如果使用用数组 (x_1, x_2, \dots, x_n) 和 (y_1, y_2, \dots, y_n) 分别表示集合 H 和 P 的一组参数, 其中 x_1, x_2, \dots, x_n 和 y_1, y_2, \dots, y_n 分别为集合 H 和 P 的元素; 则集合 H 和 P 和之间的映射关系则可用矩阵的形式来表示。如下式:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

可化为

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n \\ y_2 &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n \\ &\vdots \\ y_n &= a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots + a_{nn}x_n \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由于上式中系数也是 x_1, x_2, \dots, x_n 的函数, 因此, 对式(2)求微分, 有

$$\left. \begin{aligned} dy_1 &= \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{1i}}{\partial x_1} x_i + a_{11} \right) dx_1 + \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{1i}}{\partial x_2} x_i + a_{12} \right) dx_2 + \cdots + \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{1i}}{\partial x_n} x_i + a_{1n} \right) dx_n \\ dy_2 &= \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{2i}}{\partial x_1} x_i + a_{21} \right) dx_1 + \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{2i}}{\partial x_2} x_i + a_{22} \right) dx_2 + \cdots + \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{2i}}{\partial x_n} x_i + a_{2n} \right) dx_n \\ &\vdots \\ dy_n &= \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{ni}}{\partial x_1} x_i + a_{n1} \right) dx_1 + \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{ni}}{\partial x_2} x_i + a_{n2} \right) dx_2 + \cdots + \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{ni}}{\partial x_n} x_i + a_{nn} \right) dx_n \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

定义 $E_{x1}=|dx_1/x_1|$, $E_{x2}=|dx_2/x_2|$, ..., $E_{xn}=|dx_n/x_n|$ 分别表示元素 x_1, x_2, \dots, x_n 的相对变化量; 类似定义 $E_{y1}, E_{y2}, \dots, E_{yn}$ 。由式(3)得:

$$\left. \begin{aligned} E_{y1} &= \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{1i}}{\partial x_1} x_i + a_{11} \right| \frac{x_1 E_{x1}}{y_1} + \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{1i}}{\partial x_2} x_i + a_{12} \right| \frac{x_2 E_{x2}}{y_1} + \cdots + \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{1i}}{\partial x_n} x_i + a_{1n} \right| \frac{x_n E_{xn}}{y_1} \\ E_{y2} &= \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{2i}}{\partial x_1} x_i + a_{21} \right| \frac{x_1 E_{x1}}{y_2} + \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{2i}}{\partial x_2} x_i + a_{22} \right| \frac{x_2 E_{x2}}{y_2} + \cdots + \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{2i}}{\partial x_n} x_i + a_{2n} \right| \frac{x_n E_{xn}}{y_2} \\ &\vdots \\ E_{yn} &= \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{ni}}{\partial x_1} x_i + a_{n1} \right| \frac{x_1 E_{x1}}{y_n} + \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{ni}}{\partial x_2} x_i + a_{n2} \right| \frac{x_2 E_{x2}}{y_n} + \cdots + \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{ni}}{\partial x_n} x_i + a_{nn} \right| \frac{x_n E_{xn}}{y_n} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

从式(4)看,集合 P 中每个元素的相对变化量同时受到集合 H 中所有元素 x_1, x_2, \dots, x_n 的影响,相互间的关系比较复杂。为简化计算与分析,研究中采用如下方法研究:即在研究一个变量的相对变化量时,如果这个变量的相对变化量同时受到多个参数的影响,可假定其他参数不变,逐个研究单个参数对该变量的影响,这种方法称为**单因素分析**。

将式(4)可改写为:

$$\begin{pmatrix} E_{y_1} \\ E_{y_2} \\ \vdots \\ E_{y_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11}b_{12}\cdots b_{1n} \\ b_{21}b_{22}\cdots b_{2n} \\ \vdots \\ b_{n1}b_{n2}\cdots b_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{x_1} \\ E_{x_2} \\ \vdots \\ E_{x_n} \end{pmatrix} \quad (5a)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} b_{11} &= \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{1i}}{\partial x_1} x_i + a_{11} \right| \frac{x_1}{y_1}, b_{12} = \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{1i}}{\partial x_2} x_i + a_{12} \right| \frac{x_2}{y_1}, \dots, b_{1n} = \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{1i}}{\partial x_n} x_i + a_{1n} \right| \frac{x_n}{y_1} \\ b_{21} &= \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{2i}}{\partial x_1} x_i + a_{21} \right| \frac{x_1}{y_2}, b_{22} = \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{2i}}{\partial x_2} x_i + a_{22} \right| \frac{x_2}{y_2}, \dots, b_{2n} = \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{2i}}{\partial x_n} x_i + a_{2n} \right| \frac{x_n}{y_2} \\ &\vdots \\ b_{n1} &= \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{ni}}{\partial x_1} x_i + a_{n1} \right| \frac{x_1}{y_n}, b_{n2} = \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{ni}}{\partial x_2} x_i + a_{n2} \right| \frac{x_2}{y_n}, \dots, b_{nn} = \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{ni}}{\partial x_n} x_i + a_{nn} \right| \frac{x_n}{y_n} \end{aligned} \right\} \quad (5b)$$

根据单因素分析,定义 $E_{y_1-x_1}, E_{y_1-x_2}, \dots, E_{y_1-x_n}$ 为 x_1, x_2, \dots, x_n 对 y_1 相对变化量的单因素影响值,类似定义 $E_{y_2-x_1}, E_{y_2-x_2}, \dots, E_{y_2-x_n}$ 和 $E_{y_n-x_1}, E_{y_n-x_2}, \dots, E_{y_n-x_n}$, 可以得下式:

$$\left. \begin{aligned} E_{y_1-x_1} &= \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{1i}}{\partial x_1} x_i + a_{11} \right| \frac{x_1 E_{x_1}}{y_1}, E_{y_1-x_2} = \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{1i}}{\partial x_2} x_i + a_{12} \right| \frac{x_2 E_{x_2}}{y_1}, \dots, E_{y_1-x_n} = \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{1i}}{\partial x_n} x_i + a_{1n} \right| \frac{x_n E_{x_n}}{y_1} \\ E_{y_2-x_1} &= \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{2i}}{\partial x_1} x_i + a_{21} \right| \frac{x_1 E_{x_1}}{y_2}, E_{y_2-x_2} = \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{2i}}{\partial x_2} x_i + a_{22} \right| \frac{x_2 E_{x_2}}{y_2}, \dots, E_{y_2-x_n} = \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{2i}}{\partial x_n} x_i + a_{2n} \right| \frac{x_n E_{x_n}}{y_2} \\ &\vdots \\ E_{y_n-x_1} &= \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{ni}}{\partial x_1} x_i + a_{n1} \right| \frac{x_1 E_{x_1}}{y_n}, E_{y_n-x_2} = \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{ni}}{\partial x_2} x_i + a_{n2} \right| \frac{x_2 E_{x_2}}{y_n}, \dots, E_{y_n-x_n} = \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_{ni}}{\partial x_n} x_i + a_{nn} \right| \frac{x_n E_{x_n}}{y_n} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由式(5b)和(6)得:

$$\left. \begin{aligned} E_{y1-x1} &= b_{11}E_{x1}, E_{y1-x2} = b_{12}E_{x2}, \dots, E_{y1-xn} = b_{1n}E_{xn} \\ E_{y2-x1} &= b_{21}E_{x1}, E_{y2-x2} = b_{22}E_{x2}, \dots, E_{y2-xn} = b_{2n}E_{xn} \\ &\vdots \\ E_{ym-x1} &= b_{m1}E_{x1}, E_{ym-x2} = b_{m2}E_{x2}, \dots, E_{ym-xn} = b_{mn}E_{xn} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

因此，式 (5a) 可化为：

$$\left. \begin{aligned} E_{y1} &= E_{y1-x1} + E_{y1-x2} + \dots + E_{y1-xn} = \sum_{i=1}^n E_{y1-xi} \\ E_{y2} &= E_{y2-x1} + E_{y2-x2} + \dots + E_{y2-xn} = \sum_{i=1}^n E_{y2-xi} \\ &\vdots \\ E_{ym} &= E_{ym-x1} + E_{ym-x2} + \dots + E_{ym-xn} = \sum_{i=1}^n E_{ym-xi} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

从式 (8) 可看出，任一元素 y_i 的相对变化量等于元素 x_1, x_2, \dots, x_n 对 y_i 相对变化量的单因素影响值的总和。即太阳能海水淡化系统淡水生产成本的相对变化量等于影响淡水生产成本所有参数的单因素影响值总和。

2 三效塔式太阳能海水淡化装置的经济性分析

2.1 单因素经济分析

对文献[3]的三效塔式太阳能海水淡化装置进行经济性分析时，设 F_{sc} 为太阳能集热系统成本， F_{sd} 为海水淡化装置成本， F_{st} 为储热水箱成本， F_e 为装置运行年消耗的电力费用， y 为设备使用年限， M_{et} 为淡水年生产总量 (m^3)，年利率为 i ， P_m 为生产 $1m^3$ 淡水年平均成本，利用式 (1) 计算分析 P_m 时，设： $x_1=F_{sc}$ ， $x_2=F_{st}$ ， $x_3=F_{sd}$ ， $x_4=F_e$ ， $x_5=y$ ， $x_6=M_{et}$ 。有：

$$a_{11} = a_{12} = a_{13} = \frac{i(1+i)^y}{[(1+i)^y - 1]M_{et}}, \quad a_{14} = \frac{1}{M_{et}}, \quad a_{15} = a_{16} = 0 \quad (9)$$

再设 F_s 为太阳能海水淡化装置总成本，则： $F_s=F_{sc}+F_{st}+F_{sd}$ 。根据式 (6)、(7)、(8) 和 (9) 得：

$$\begin{aligned} E_{P_m} &= \frac{i(1+i)^y F_{sc}}{i(1+i)^y F_s + F_e[i(1+i)^y - 1]} E_{x1} + \frac{i(1+i)^y F_{st}}{i(1+i)^y F_s + F_e[i(1+i)^y - 1]} E_{x2} \\ &+ \frac{i(1+i)^y F_{sd}}{i(1+i)^y F_s + F_e[i(1+i)^y - 1]} E_{x3} + \frac{[i(1+i)^y - 1]F_e}{i(1+i)^y F_s + F_e[i(1+i)^y - 1]} E_{x4} \\ &+ \frac{i(1+i)^y \ln(1+i)}{i(1+i)^y F_s + F_e[i(1+i)^y - 1]} \times \frac{yF_s}{[i(1+i)^y - 1]} E_{x5} + E_{x6} \end{aligned} \quad (10)$$

当使用价格为 1100 (元/ m^2) 桑达热管的太阳能集热系统时，假设银行年利率 $i=5\%$ ，通过最优化计算分析^[8]，集热器面积为 $302m^2$ ，储热水箱容量为 $16.0m^3$ ，系统启动运行温度为 $69.5^\circ C$ ，暂停运行温度为 $66.5^\circ C$ 时，装置的淡水生产成本 P_m 为 61.87 元/ m^3 。此

时太阳能集热器、储热水箱和海水淡化系统价格、装置年运行动力费用以及利用式 (6) 和 (10) 对装置进行的单因素经济性分析见表 1。

表 1 单因素经济性分析

	F_{sc} (万元)	F_{st} (万元)	F_{sd} (万元)	F_e (万元)	y (年)	M_{et} (m^3)	P_m (元/ m^3)
参数值	33.220	2.695	5.800	0.185	15	679.53	61.87
相对变化量 $E_{xi}(\%)$	10	10	10	10	10	10	—
单因素影响值 $E_{yi-xi}(\%)$	7.61	0.62	1.33	0.44	6.48	10	—

注：表中“—”表示没有该项数值。

从表 1 可看出，对淡水生产成本 P_m 影响最明显的是淡水年产量 M_{et} 、太阳能集热器的成本 F_{sc} 和设备使用年限 y 这三个参数。当这三个参数相对变化量分别为 10%，对 P_m 的单因素影响值分别为 10%、7.61% 和 6.48%。如果所讨论的六个参数都同时改变 10%，对 P_m 的单因素影响值的总和为 26.48%，其中 M_{et} 、 y 和 F_{sc} 三个参数单因素影响值的和为 24.09%，占 P_m 总变化量的 90.97%。因此， M_{et} 、 y 和 F_{sc} 称为主参数；其他三个参数 (F_{st} 、 F_{sd} 和 F_e) 的变化对 P_m 的影响程度比较小，分别是 0.62%、1.33% 和 0.44%，称为次参数。通过单因素分析计算表明，三效塔式太阳能海水淡化系统的经济性具备以下几个特点：

- (1) 在其他因素不变的情况下，太阳能集热系统单位面积的价格降低 10%，淡水生产成本将减少 7.61%；
- (2) 在其他因素和太阳能集热器单位面积价格均不变的情况下，提高太阳能集热器的性能或气候变化原因，使得装置的年淡水生产总量提高 10%，装置淡水成本将减少 10%；
- (3) 设备的使用年限是一个重要的因素。在其他因素不变的情况下，设备的使用寿命延长 10%，淡水生产成本将减少 6.48%；
- (4) 海水淡化装置的价格对淡水生产成本的单因素影响值只有 1.33%，说明降膜蒸发三效塔式太阳能海水淡化系统还有很大的发展空间，通过增加设备的投入以提高装置的年淡水产水量，可以达到进一步减低淡水生产成本的目的。
- (5) 其他两个因素，即储热水箱价格和年运行动力费用，对淡水生产成本的单因素影响值都很小，只有 0.62% 和 0.44%。说明只要能够增加太阳能海水淡化装置的年淡水生产总量，对这两个方面的投入都是值得考虑的。

通过以上的讨论知道，对于降膜蒸发三效塔式太阳能海水淡化装置，淡水年生产总量 M_{et} 、设备使用年限 y 和太阳能集热系统成本 F_{sc} 三个参数是决定淡水生产成本 P_m 大小的关键因素。在这三个主参数中，设备使用年限 y 主要与设备材料和设计的合理性有关；淡水年生产总量 M_{et} 与太阳能加热系统的集热性能，尤其与太阳能集热器的热性能和海水淡化装置的淡水生产能力有关；因此，讨论太阳能集热器热性能和价格、海水淡

化装置的淡水生产能力以及设备使用年限对 P_m 的经济性影响具有一定的意义。

2.2 太阳能集热系统价格对 P_m 的影响

在太阳能集热器热性能不改变和最优化计算分析^[8]的情况下，单位面积太阳能集热系统价格分别为 300 元、900 元和 1500 元，年利率 i 为 5%，分别计算各个参数的单因素影响值，讨论太阳能集热系统成本 F_{sc} 对淡水生产成本 P_m 的影响，计算结果见表 2。

表 2 太阳能集热系统价格的经济性分析

集热系统价格 (元/m ²)	变化量	F_{sc} (万元)	F_{st} (万元)	F_{sd} (万元)	F_e (万元)	y (年)	M_{et} (m ³)	P_m (元/m ³)
300	参数值	10.680	2.551	5.800	0.203	15	761.71	26.74
	相对变化量 E_{xi} (%)	10	10	10	10	10	10	—
	单因素影响值 E_{yi-xi} (%)	5.05	1.21	2.74	1.00	6.11	10	—
900	参数值	27.900	2.435	5.800	0.195	15	689.36	53.33
	相对变化量 E_{xi} (%)	10	10	10	10	10	10	—
	单因素影响值 E_{yi-xi} (%)	7.31	0.64	1.52	0.53	6.42	10	—
1500	参数值	44.400	1.977	5.800	0.181	15	658.37	79.10
	相对变化量 E_{xi} (%)	10	10	10	10	10	10	—
	单因素影响值 E_{yi-xi} (%)	8.21	0.37	1.07	0.35	6.55	10	—

注：表中“—”表示没有该项数值。

通过单因素分析计算表明，太阳能集热系统价格变化对淡水生产成本 P_m 的经济性影响具备以下几个特点：

- (1) 太阳能集热系统成本 F_{sc} 对淡水生产成本 P_m 的单因素影响值随着太阳能集热系统单位面积价格的降低而明显减少，同时淡水生产成本 P_m 也明显下降。如表 2 示，太阳能集热系统单位面积价格分别为 1500 元、900 元和 300 元时， F_{sc} 的单因素影响值由 8.21% 降至 7.31% 和 5.05%。说明在太阳能集热器性能不变的情况下，随着价格的下降，太阳能集热系统成本 F_{sc} 对淡水生产成本 P_m 的影响逐步减弱；
- (2) 当太阳能集热系统成本 F_{sc} 减少时，设备使用年限 y 对淡水生产成本 P_m 的单因素影响值也略有减少，淡水年产量 M_{et} 对淡水生产成本 P_m 的单因素影响值始终不变，其他参数对 P_m 的单因素影响值随太阳能集热器价格的降低而增加，但其对淡水生产成本 P_m 的单因素影响值仍然比较小；太阳能集热系统单位面积价格

为 300 元时，尽管储热水箱成本 F_{st} 、海水淡化装置成本 F_{sd} 和装置运行年消耗的动力费用 F_e 对淡水生产成本 P_m 单因素影响值的总和较大，但仅占有所有参数淡水生产成本 P_m 单因素影响值总和的 18.96%；

- (3) 淡水年产量 M_{et} 随着太阳能集热系统成本 F_{sc} 的减少而增加，分别由 658.37m^3 增加到 761.71m^3 。

2.3 太阳能集热器热性能对 P_m 的影响

太阳能集热系统单位平方面积的价格不变，为 $1100\text{元}/\text{m}^2$ ，选取三种性能不同的太阳能集热器，分别称为热管 A、热管 B 和平板 C，详细性能指标见文献[8]，年利率 i 为 5%。在最优化分析情况下，分别计算各个参数的单因素影响值，讨论太阳能集热器性能对淡水生产成本 P_m 的影响，使用热管 A 时，各个参数及其单因素影响值的计算结果如表 1 所示，使用热管 B 和平板 C 时，各个参数及其单因素影响值的计算结果见表 3。

表 3 太阳能集热器热性能的经济性分析

集热系统价格 (元/ m^2)	变化量	F_{sc} (万元)	F_{st} (万元)	F_{sd} (万元)	F_e (万元)	y (年)	M_{et} (m^3)	P_m (元/ m^3)
热管 B	参数值	32.780	2.417	5.800	0.186	15	658.81	62.78
	相对变化量 $E_{xi}(\%)$	10	10	10	10	10	10	—
	单因素影响值 $E_{yi-xi}(\%)$	7.64	0.56	1.35	0.45	6.48	10	—
	参数值	43.340	3.093	5.800	0.185	15	541.75	96.31
平板 C	相对变化量 $E_{xi}(\%)$	10	10	10	10	10	10	—
	单因素影响值 $E_{yi-xi}(\%)$	8.00	0.57	1.07	0.35	6.54	10	—

注：表中“—”表示没有该项数值。

通过单因素分析计算表明，太阳能集热器性能的变化对淡水生产成本 P_m 的经济性影响具备以下几个特点：

- (1) 三种集热器热性能以热管 A 最佳，热管 B 其次，最后是平板 C^[8]。从表 3 可看出，在太阳能集热系统单位面积价格相同的情况下，热性能好的集热器能够以较少的集热面积获得更多淡水产量，从而减低淡水的生产成本。集热器热性能不同对各个参数的单因素影响值有影响，但变化不显著。在各个因素相对变化量相同情况，淡水年产量 M_{et} 、太阳能集热器的成本 F_{sc} 和设备使用年限 y 三个参数单因素影响值的和仍然占有所有因素对淡水生产成本 P_m 单因素影响值总和的 90% 以上。
- (2) 使用集热器性能较好的太阳能集热系统，其成本对淡水生产成本 P_m 单因素影响值低，使用集热器性能较差的太阳能集热系统，其成本对淡水生产成本 P_m 单因

素影响值高。

2.4 设备使用年限对 P_m 的影响

使用价格为 1100 (元/m²) 桑达热管的太阳能集热系统, 银行年利率为 5%, 除设备使用年限 y 外, 其他参数不变, 如表 1 所示。将设备使用年限 y 分别改变为 10 年和 20 年, 在各个参数的相对变化量均为 10% 的情况下, 分别计算各个参数的单因素影响值, 讨论设备使用年限 y 对淡水生产成本 P_m 的影响, 计算结果见表 4。

从表 4 可看出, 对淡水生产成本 P_m 影响最大的三个参数, 即淡水年产量 M_{et} 、太阳能集热器成本 F_{sc} 和设备使用年限 y , 在改变设备使用年限 y 的情况下, 只有使用年限 y 对淡水生产成本 P_m 单因素影响值有相对明显的变化, 太阳能集热器的成本 F_{sc} 对淡水生产成本 P_m 单因素影响值的变化很小, 淡水年产量 M_{et} 对淡水生产成本 P_m 单因素影响值不变, 始终为 10%。通过计算发现, 增加设备使用年限 y 可明显降低淡水生产成本 P_m 。当设备使用年限 y 由 10 年增加到 20 年时, 低淡水生产成本 P_m 由 82.22 元/m³ 降至 51.98 元/m³。

表 4 设备使用年限的经济性分析

设备使用年限 (年)	$E_{P_m-F_{sc}}(\%)$	$E_{P_m-F_{st}}(\%)$	$E_{P_m-F_{sd}}(\%)$	$E_{P_m-F_e}(\%)$	$E_{P_m-y}(\%)$	$E_{P_m-M_{et}}(\%)$
10	7.70	0.62	1.34	0.33	7.50	10
20	7.55	0.61	1.32	0.52	5.59	10

3 结论

通过以上对降膜蒸发三效塔式太阳能海水淡化装置的经济性讨论可得如下结论:

- (1) 使用单因素分析方法计算各个参数对太阳能海水淡化系统淡水生产成本 P_m 单因素影响值的计算, 可清晰各个参数对降低淡水生产成本 P_m 影响的程度, 指明降低出淡水生产成本 P_m 的方向。说明使用单因素分析方法对太阳能海水淡化系统经济性进行研究是可行的。
- (2) 对降膜蒸发三效塔式太阳能海水淡化系统, 淡水年产量 M_{et} 、太阳能集热系统成本 F_{sc} 和设备使用年限 y 是影响海水淡化生产成本 P_m 的主要参数。一般情况下, 在影响 P_m 的所有参数相对变化量相同时, 则这三个参数的单因素影响值之和占所有参数单因素影响值总和的 90% 以上。因此, 说明通过降低太阳能集热系统成本 F_{sc} 和延长设备的使用年限 y 以及通过提高太阳能集热系统热性能和海水淡化装置的淡水生产能力达到增加淡水年产量 M_{et} 的目的均可明显减低海水淡化生产成本 P_m 。说明单因素分析研究, 可明确太阳能海水淡化系统进一步研究的方向。

参考文献

- [1] Diego-Cesar Alarcon-Padilla, Lourdes Garcia-Rodriguez. Application of absorption heat pumps to multi-effect distillation: a case study of solar desalination. Desalination, 212(1-3): 294-302

- [2] Adel M. Abdel Dayem. Experimental and numerical performance of a multi-effect condensation-evaporation solar water distillation system. *Energy*, 31(14): 2374-2391
- [3] H. Zheng, K. He, Y. Yang, Z. Chen, H. Li . Study on a multi-effect regeneration and integral-type solar desalination unit with falling film evaporation and condensation processes. *Solar Energy*, 2006, 80(9): 1189-1198
- [4] Ali M. El-nashar, M. Samad. The Solar Desalination Plant in Abu Dhabi: 13 Years of Performance and Operation History. *Renewable Energy*, 14(1-4): 263-274
- [5] L. García-Rodríguez, C. Gómez-Camacho. Thermo-economic analysis of a solar multi-effect distillation plant installed at the Plataforma Solar de Almeria (Spain). *Desalination*, 122(2-3): 205-214
- [6] Mattheus F. A. Goosen, Shyam S. Sablani, Walid H. Shayya, Charles Paton, Hilal Al-Hinai. Thermodynamic and economic considerations in solar desalination. *Desalination*, 129(1): 63-89
- [7] Fawzi Banat, Nesreen Jwaied. Economic evaluation of desalination by small-scale autonomous solar-powered membrane distillation units. . *Desalination*, 220(1-3): 566-573
- [8] 陈子乾. 多级激淋降膜蒸发太阳能海水淡化系统的研究. 北京理工大学 博士学位论文, 2007