

苏慧超, 邵天宝, 薛喜东, 等. 海水淡化反渗透系统设计方式技术经济性对比[J]. 净水技术, 2025, 44(11): 126–132, 147.

SU H C, SHAO T B, XUE X D, et al. Technical and economical comparison of design schemes for RO system of seawater desalination[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(11): 126–132, 147.

## 海水淡化反渗透系统设计方式技术经济性对比

苏慧超\*, 邵天宝, 薛喜东, 尹立辉, 徐国荣

(自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所, 天津 300192)

**摘 要** 【目的】降本节能是反渗透海水淡化技术发展的必然趋势, 反渗透系统的设计方式是影响成本和能耗的重要因素。

【方法】文章以天津某海水淡化厂的设计条件为例, 以单级海水反渗透(seawater reverse osmosis, SWRO)为基准, 采用软件模拟的方法, 对双端产水局部二级反渗透(second-pass reverse osmosis, SPSP)、双端产水局部单级反渗透(split partial single-pass reverse osmosis, SSP)、局部二级反渗透(partial second-pass reverse osmosis, PSP)3种设计方式的技术经济性进行对比。【结果】

研究了不同进水水质和运营时间对临界温度和单位比能耗(specific energy consumption, SEC)的影响, 表明 SPSP 对水质的温度调控范围和节能效果最优; 在产水水质、水量、系统回收率不变的条件下, SPSP 的温度调控值为 0~10℃, SSP 和 PSP 的温度调控值是 0~3℃, 与进水水质和运营时间变化无关; 在相同的水质条件和运营时间下, SPSP 的 SEC 值在 4 种设计方式中永远最低。进一步以 SPSP 为研究对象, 探讨产水水质和分流比例对温度调控范围的影响因素, 结果表明, 分流比例的影响要明显高于产水水质; 分流比例每增加约 5%, 临界温度增加 3℃, 而产水水质中  $\text{Cl}^-$  质量浓度要求由 160 mg/L 提高到 60 mg/L 时, 临界温度仅降低 3℃。从投资成本和运营成本 2 个方面进行经济性对比, 结果表明, SPSP 在增加投资和降低能耗间达到平衡, 比 SSP 和 PSP 更具有经济性优势。【结论】总之, SPSP 是技术经济性最好的反渗透系统设计方式。

**关键词** 海水淡化 反渗透 单级海水反渗透(seawater reverse osmosis, SWRO) 双端产水局部单级反渗透(split partial single-pass reverse osmosis, SSP) 局部二级反渗透(partial second-pass reverse osmosis, PSP) 双端产水局部二级反渗透(second-pass reverse osmosis, SPSP)

中图分类号: P747 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)11-0126-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.11.014

## Technical and Economical Comparison of Design Schemes for RO System of Seawater Desalination

SU Huichao\*, SHAO Tianbao, XUE Xidong, YIN Lihui, XU Guorong

(The Institute of Seawater Desalination and Multipurpose Utilization, Tianjin 300192, China)

**Abstract** [Objective] Reducing cost and saving energy are the inevitable trends of reverse osmosis desalination technology, the reverse osmosis system design is an important factor affecting cost and energy consumption. [Methods] In this paper, taking the design conditions of a seawater desalination plant in Tianjin as an example, technology and economy efficiency for split partial second-pass reverse osmosis (SPSP), split partial single-pass reverse osmosis (SSP) and partial second-pass reverse osmosis (PSP) was compared based on single seawater reverse osmosis (SWRO) by using software simulation. [Results] Factors influencing critical temperature and specific energy consumption (SEC) including raw water quality and operation time were discussed. The result indicated that SPSP had the best temperature control range and energy saving effect. With constant water quality, quantity and system

[收稿日期] 2024-02-23

[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项目(K-JBYWF-2023-T06, K-JBYWF-2025-J02); 国家重点研发计划项目(2023YFE0101000)

[通信作者] 苏慧超(1987—), 女, 高级工程师, 研究方向为海水淡化及水处理技术, E-mail: suhuichaodhs@163.com。

recovery, the temperature control range of SPSP was 0–10 °C, while that of SSP and PSP was 0–3 °C, which were indispensable of raw water quality and operation time; Under the same water quality conditions and operation time, the SEC of SPSP was consistently the lowest among the four design method. Taking SPSP as the research object, the factors of product water quality and split ratio associated with temperature control range were further discussed, the result showed that the influence of the split ratio was more significant than the product water quality; With a 5% increase in the split ratio, the critical temperature displayed 3 °C increase, which the requirement for the mass concentration of  $\text{Cl}^-$  in product water quality was increased from 160 mg/L to 60 mg/L, the critical temperature decreases by only 3 °C. Taking capital expenditure and operating expenditure for economic comparison, SPSP achieved a balance between increasing expenditure and reducing energy consumption, exhibiting more economic advantages than SSP and PSP.

[ **Conclusion** ] Overall, SPSP is the best technology and economy-efficient method for reverse osmosis system design.

**Keywords** seawater desalination reverse osmosis single seawater reverse osmosis (SWRO) split partial single-pass reverse osmosis (SSP) partial second-pass reverse osmosis (PSP) split partial second-pass reverse osmosis (SPSP)

经过几十年的发展,反渗透已成为海水淡化领域主流技术,在全球海水淡化市场占比超过 60%,但其高压驱动这一先决条件使其能耗依然偏高。随着碳达峰、碳中和等概念的提出,进一步节能降耗,降低制水成本成为反渗透海水淡化发展的必然要求。

反渗透海水淡化工程单位比能耗(specific energy consumption, SEC)从 25 年前的  $5.0 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$  左右降至现在的  $3.0 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$  左右,能耗最低的淡化厂甚至达到  $2.9 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,而其中反渗透系统能耗仅为  $2.0 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,海水淡化制水成本降低至 0.365 美元/ $\text{m}^3$ (来源于 DesalData 数据库)。研究<sup>[1]</sup>表明,当海水含盐量为 35 000 mg/L,回收率为 50%时,反渗透脱盐的热力学最小极限能耗是  $1.06 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。这说明反渗透节能降耗仍有很大的空间。

除了提高高压泵等能耗设备本身的性能之外,另一种降低反渗透系统能耗的重要方法是优化膜系统配置和工艺设计,如反渗透混合膜设计<sup>[2]</sup>、反渗透双端产水工艺<sup>[3]</sup>、16 英寸反渗透膜配置、“三中心”高压系统设计等。

局部二级反渗透(partial second-pass reverse osmosis, PSP)设计是一种传统的设计方式,单级海水反渗透(seawater reverse osmosis, SWRO)不做分端设计,根据不同的产品水质要求,SWRO 的部分产水进入二级咸水反渗透(brackish water reverse osmosis, BWRO)进行进一步脱盐,BWRO 的产水与 SWRO 的产水进行混合,提高最终的产品水质。这种设计方式非常适合于分质产水。

在 PSP 设计方式的基础上,出现了双端产水局部二级反渗透(split partial second-pass reverse osmosis, SPSP)设计,这种设计方式是指从压力容

器内部分成两段,分别从前后两端收集淡化水<sup>[4]</sup>。海水进入压力容器过滤时渗透水侧存在一个盐度梯度,越靠近原水进水端(前端)的渗透水盐度越低,越靠近浓水排出端(后端)的渗透水盐度越高;基于这种盐度梯度的特点,将 SWRO 前端水质较好的产水直接收集,后端盐度较高的产水收集后再进入 BWRO<sup>[5]</sup>。这种设计方式可实现高效脱盐,有效降低 BWRO 设计规模,从而降低工程造价,尤其随着海水淡化产水规模的增加,经济效益愈加明显<sup>[3]</sup>。这种设计方式是由 Bray<sup>[6]</sup>在 1977 年首次申请专利,之后逐渐应用在国外大型海水淡化厂中。国外采用 SPSP 设计方式的一些海水淡化厂如表 1 所示。

表 1 国外采用 SPSP 设计方式的海水淡化厂<sup>[7]</sup>  
Tab. 1 International Seawater Desalination Plants Using SPSP Design Method<sup>[8]</sup>

国家	淡化厂	建设时间	规模/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$
以色列	Soreq	2013 年	540 000
	Hadera	2010 年	350 000
	Ashkelon	2005 年	330 000
	Palmachim I	2007 年	110 000
	Palmachim II	2010 年	150 000
	Palmachim III	2013 年	300 000
西班牙	Aguilas-Guadaleatin	2013 年	181 000
美国	Carlsbad	2015 年	190 000
韩国	Gijiang	2014 年	45 000
澳大利亚	Adelaide	2012 年	300 000
	Gold Coast	2009 年	133 000
	Perth II	2013 年	306 000

国内采用 SPSP 设计的淡化厂包括:青岛百发淡化厂(二期 50 000  $\text{m}^3/\text{d}$ ,2022 年)、青岛董家口淡

化厂(50 000 m<sup>3</sup>/d, 2022 年)、山东东营港淡化厂(一期 50 000 m<sup>3</sup>/d, 2023 年)、天津先达淡化厂(一期 150 000 m<sup>3</sup>/d, 2023 年)等。

随后,在 SPSP 设计方式的基础上, Kim 等<sup>[8]</sup>提出了一种反渗透双端产水末端回流(split partial single-pass reverse osmosis, SSP)设计方式,其原理是将 SWRO 后端产水的一部分回流至进水,通过稀释前端进水,达到提高产水水质,降低系统能耗,省略 BWRO 的目的。该研究认为,回流比是决定能耗和产水水质的关键条件,对比了 SSP 4(从第四支膜元件前分流)~SSP 7(从第七支膜元件前分流)几种回流比发现,回流比越高,对进水的稀释作用越强;压力容器内膜元件的配流越平衡,不仅能有效减轻前端膜元件的污染风险,还能有效降低后端膜元件的结垢倾向。从能耗来看,在进水总溶解性固体(TDS)为 35 000 mg/L、温度为 25 ℃、回收率为 40% 的条件下,单级 SWRO 能耗为 2.11 kW·h/m<sup>3</sup>, SPSP 设计方式的能耗为 2.22~2.71 kW·h/m<sup>3</sup>,而 SSP 7 设计方式的能耗为 2.17 kW·h/m<sup>3</sup>,介于二者之间, SSP 7 设计方式相对 SPSP 设计方式更具有节能优势。目前, SSP 7 设计方式尚无应用案例。

SSP 设计方式的主要优势在于,不增加 BWRO 的条件下,产出更好的水质,在一些特殊应用场景中即便牺牲一些能耗也是值得的。但 Kim 的研究是从节约能耗的角度出发,在损失部分产水,改变系统整体回收率的前提下得出的结论。实际工程中往往要求保障产水水量、水质和回收率不变,在这种前提下, SSP 设计方式的技术优越性还有待进一步探讨。

本文基于天津某海水淡化厂工业用水水质要求,在相同的产水量和回收率条件下,对 SWRO、SSP、SPSP、PSP 4 种设计方式进行技术经济性对比,以期工程设计人员提供参考。

## 1 对比方案

### 1.1 设计条件

天津某大型海水淡化厂原水取自渤海湾海域,海水 TDS 为 28 000~32 000 mg/L;产水主要供给周边工业企业,对产水水质的要求为 Cl<sup>-</sup> ≤ 120 mg/L;产水量为 1 000 m<sup>3</sup>/h,反渗透系统整体回收率为 44.64%;以 Toray 膜为例进行分析,采用 Toray DS2 v217166 模拟软件;SWRO 透盐率增加值为 7%/a, BWRO 透盐率增加值 5%/a。

不同运营年限的污堵因子:0 年, SWRO 为 0.956, BWRO 为 0.977;3 年, SWRO 为 0.886, BWRO 为 0.955;5 年, SWRO 为 0.840, BWRO 为 0.942。

SWRO 采用 2 100 支 TM820M-440 膜元件, 300 支 7 芯压力容器;

BWRO: SPSP 和 PSP 均采用 126 支 TM720D-440 膜元件, 18 支 7 芯压力容器。

### 1.2 方案设计

#### (1) SWRO

以单级 SWRO 作为比较基准,回收率为 44.6%。流量平衡如图 1(a)所示。

#### (2) SPSP

当达到一定温度时, SWRO 后端产水进入 BWRO,通过 BWRO 产水与 SWRO 前端产水进行掺混,从而提高整体产品水质。为了与 SSP 设计方案保持基本一致,进入 BWRO 的水量也大约为 145 m<sup>3</sup>/h, SWRO 回收率为 45%, BWRO 回收率为 90%。流量平衡如图 1(b)所示。

#### (3) SSP

当达到一定温度时,将末端部分产水回流,由于增加了内循环流量, SWRO 膜组自身的回收率会提高。一般情况下, SWRO 膜组回收率小于 50%,受到回收率的限制, SSP 回流量设为 145 m<sup>3</sup>/h,约为末端 2 支膜元件的产水量,此时 SWRO 膜组回收率为 48%,而系统回收率仍然保持为 44.64%不变。受到软件自身功能的限制,为体现末端产水回流,在软件模拟中,将 7 芯压力容器改为三段式设计,比例为 3:2:2,一段 300 支 3 芯压力容器,二段 300 支 2 芯压力容器,三段 300 支 2 芯压力容器,第三段的产水进行回流。流量平衡如图 1(c)所示。

#### (4) PSP

SWRO 不做分端产水,当达到一定温度时,部分产水进入 BWRO 进行脱盐后与 SWRO 产品水进行掺混。为保持设计方案基本一致,在回收率及流量分配比例上,参数取值与 SPSP 相同,流量平衡如图 1(d)所示。

## 2 结果与讨论

### 2.1 进水水质的影响

图 2 显示在 28 000、32 000、35 000 mg/L 3 种不同进水 TDS(对应 Cl<sup>-</sup> 质量浓度分别为 16 990、

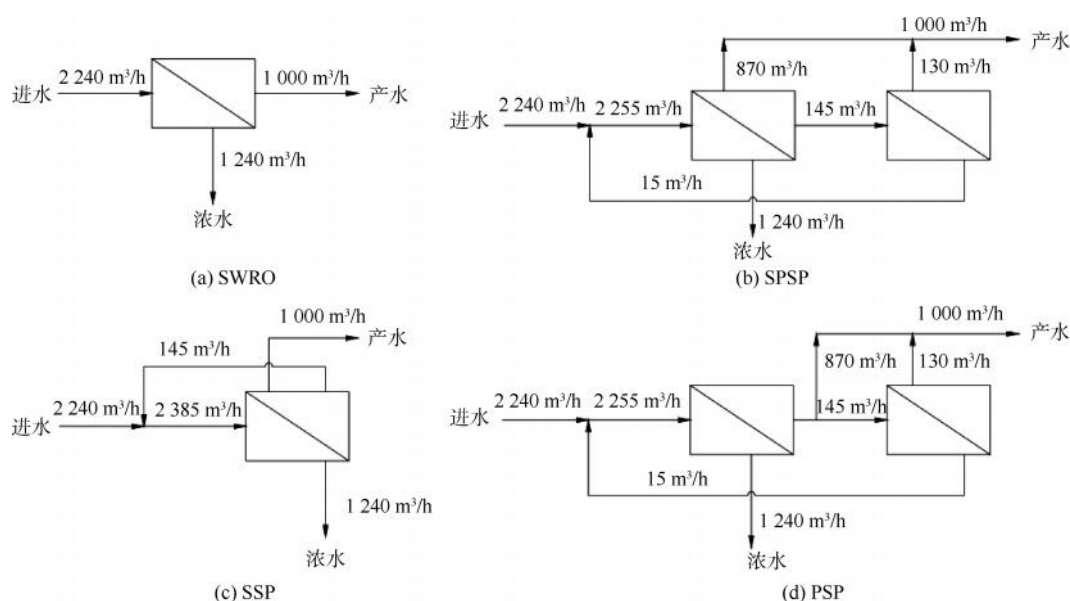


图1 4种设计方式流量平衡

Fig. 1 Flow Balance for Four Design Methods

19 410、21 230 mg/L) 条件下,在初始运营期(0年),SWRO、SSP、SPSP、PSP 4种设计方式达到临界水质(即  $\text{Cl}^-$  质量浓度最高为 120 mg/L)时的临界温度值。这里的临界温度是指系统达到某一设定条件(临界水质)时所对应的温度值,超过这一温度值就会突破设定条件。例如,本研究的设定条件为  $\text{Cl}^-$  质量浓度最高为 120 mg/L,当超过某一温度时,产水中  $\text{Cl}^-$  质量浓度会高于 120 mg/L,这一温度即为临界温度。

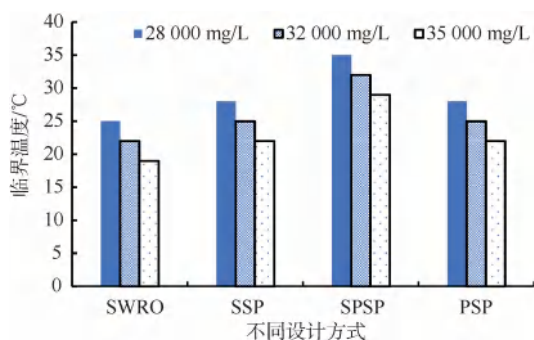


图2 进水 TDS 变化对不同设计方式临界温度的影响

Fig. 2 Influence of Inflow TDS Variability on Critical Temperatures for Different Design Configuration

无论是哪种设计方式,随着进水 TDS 的增加,达到临界水质的临界温度都在降低。这完全符合反渗透膜的脱盐特性,随着温度降低,反渗透膜的离子透过率变差,从而脱盐率升高。当进水 TDS 增加时,想要达到相同的产水水质,必然要提高脱盐率,

只有在更低的温度下才能实现这一目标。

在相同的进水 TDS 条件下,不同的反渗透设计方式达到临界水质时的临界温度由高到低排序是  $\text{SPSP} > \text{SSP} = \text{PSP} > \text{SWRO}$ 。以进水 TDS 为 28 000 mg/L 为例,SWRO 的临界温度是 25 °C,SPSP 的临界温度是 35 °C,而 SSP 和 PSP 的临界温度均为 28 °C。这说明,当单级 SWRO 的产水水质不达标时,SSP、PSP 和 SPSP 设计方式对于调控产水水质均能产生有益效果,但 SSP 和 PSP 仅有 0~3 °C 的温度调控值(温度调控范围是指该设计方式相对于单级 SWRO,在产水不达标时的临界温度的差值),而 SPSP 有 0~10 °C 的温度调控值,SPSP 对水质的温度调控范围明显优于其他 2 种设计方式。

而对于 3 种不同的进水 TDS,SSP 和 PSP 的调控最大值始终为 3 °C,SPSP 的调控最大值始终为 10 °C,这说明不同的反渗透设计方式对于水质所能适应的温度调控值与进水 TDS 无关。

图 3 显示在 3 种不同进水 TDS 条件下,SWRO、SSP、SPSP、PSP 4 种设计方式在达到临界水质时的 SEC。

无论是哪种设计方式,随着进水 TDS 的增加,达到临界水质时的 SEC 不断增加。低温条件下,反渗透膜的渗透压增加,必须提高驱动力才能保证产水量,从而增加了 SEC。

对于相同的进水 TDS,不同的反渗透设计方式



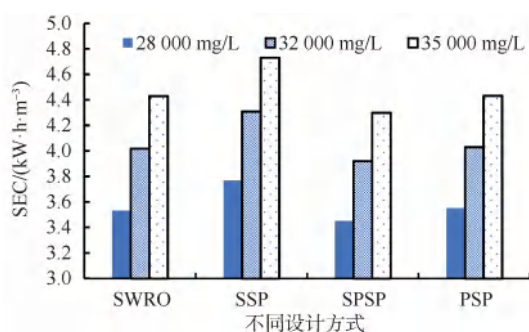


图3 进水 TDS 变化对不同设计方式 SEC 的影响  
Fig. 3 Influence of Inflow TDS Variability on SEC for Different Design Configuration

达到临界水质时的 SEC 由高到低的排序方式是 SSP>PSP>SWRO>SPSP。以进水 TDS 为 28 000 mg/L 为例,4 种设计方式的 SEC 值(本文仅讨论反渗透系统的 SEC)分别为 3.768、3.548、3.533、3.452 kW·h/m<sup>3</sup>。

SSP 的能耗高于 SWRO,主要原因在于增加了末端产水回流,相当于反渗透膜堆增加了内循环,间接提高了反渗透膜堆自身的回收率和产水量,当反渗透系统回收率为 44.64%时,反渗透膜堆的回收率约为 48%。PSP 的能耗高于 SWRO,主要原因在于增加了部分 BWRO。

SSP 与 PSP 相比,虽然温度调控范围相同,但能耗却明显偏高,主要原因在于图 1(c)中有 145 m<sup>3</sup>/h 的水量回流至 SWRO 前端,而图 1(d)中 145 m<sup>3</sup>/h 的水量则是进入 BWRO,SWRO 高压泵和 BWRO 高压泵需分别对此部分流量做功,但由于进水盐度相差极大,SWRO 所需的操作压力明显高于 BWRO。

而 SWRO 的能耗高于 SPSP,主要在于达到临界水质时的调控温度范围跨度较大。在相同温度下,SPSP 由于增加了部分 BWRO,能耗必然高于单级 SWRO。如前述分析,但随着温度的提高,SEC 值会不断下降,当调控水质的温度跨度达到 10 ℃时,SEC 值会明显降低,甚至低于 SWRO 的能耗。

综合上述分析,在不同进水 TDS 条件下,SPSP 设计方式在水质调控和节约能耗 2 个方面均有明显优势。

## 2.2 运营时间的影响

图 4 显示在 0、3、5 年 3 个不同运营时间,在进水 TDS 为 32 000 mg/L(Cl<sup>-</sup>质量浓度为 19 410 mg/L)条

件下,SWRO、SSP、SPSP、PSP 4 种设计方式达到临界水质时的临界温度值。

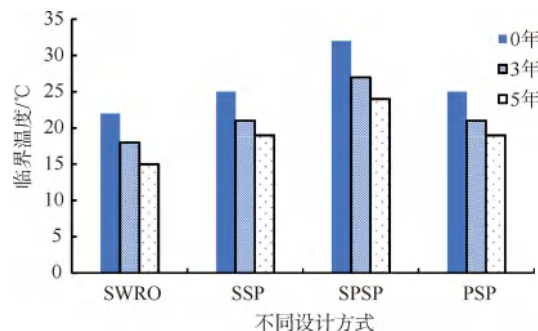


图4 运营时间变化对不同设计方式临界温度的影响  
Fig. 4 Influence of Operation Time Variability on Critical Temperatures for Different Design Configuration

无论是哪种设计方式,随着运营年限的增加,达到临界水质的临界温度都在降低,这是由于反渗透膜透盐率随着运营时间的增加而逐年增加。本研究中预设的 SWRO 透盐率增加值为 7%/a,BWRO 透盐率增加值为 5%/a。随着透盐率增加,反渗透膜脱盐率下降,想得到相同的水质,就需要在更低的温度条件下产出淡水。

在相同的运营年限条件下,不同的反渗透设计方式达到临界水质时的临界温度由高到低排序是 SPSP>SSP=PSP>SWRO。以运营时间 3 年为例,SWRO 的临界温度是 18 ℃,SPSP 的临界温度是 27 ℃,而 SSP 和 PSP 的临界温度均为 21 ℃。并且,SSP 和 PSP 对水质的温度调控值是 0~3 ℃,SPSP 对水质的温度调控值是 0~10 ℃,SPSP 的调控能力明显优于 SSP 和 PSP 设计方式。并且,对于不同的运营年限,每种设计方式对水质的温度调控范围始终相同,说明温度调控范围也与运营年限无关。

图 5 显示在 3 个不同运营时间,进水 TDS 为 32 000 mg/L 条件下,SWRO、SSP、SPSP、PSP 4 种设计方式达到临界水质时的 SEC。

无论是哪种设计方式,随着运营年限的增加,达到临界水质的 SEC 都在增加,这是由于反渗透膜透盐率随着污堵系数增加而逐年增加引起的。污堵系数代表着反渗透膜的可用透水面积,污堵系数增加,反渗透膜的可用透水面积减小,必然要产生更多的能耗才能产出相同的水量。

对于相同的运营年限,当运营年限低于 3 年时,不同的反渗透设计方式达到临界水质时的 SEC 由高到低的排序方式是 SSP>PSP>SWRO>SPSP;当运

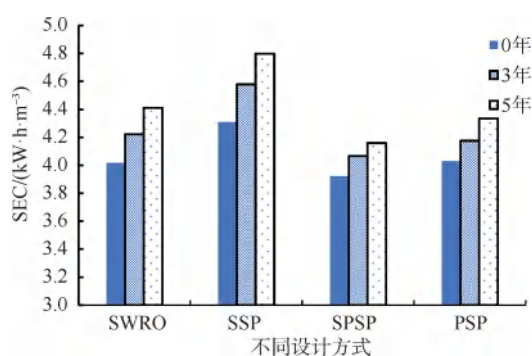


图5 不同运营时间对不同设计方式 SEC 的影响

Fig. 5 Influence of Operation Time Variability on SEC for Different Design Configuration

营年限达到 3 年时, SEC 由高到低的排序方式是  $SSP > SWRO > PSP > SPSP$ , PSP 在能耗方面渐渐比 SWRO 更有优势。以运营年限 3 年为例, 4 种设计方式的 SEC 值分别为 4.579、4.223、4.176、4.067  $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。此结果的产生原因与 2.1 节相同。

综合上述分析, 对于不同的运营时间, 也是 SPSP 设计方式在水质调控和节约能耗方面有明显优势。

### 2.3 温度调控范围的影响因素分析

在 2.1 节和 2.2 节的分析中, 无论是进水水质还是运营年限都对不同设计方式的温度调控范围没有影响, 温度调控范围的影响因素究竟有哪些还有待进一步探讨。由于 SPSP 方式的温度调控范围较广, 以 SPSP 为研究对象进一步深入探讨, 同样以 SWRO 作为比较基准。

### (1) 产水水质

如图 6 所示, 保持系统回收率和产水量不变, 进水 TDS 为 32 000  $\text{mg}/\text{L}$ 、运营时间为 0 年条件下,  $\text{Cl}^-$  浓度变化对临界温度会产生影响。随着对产品水质  $\text{Cl}^-$  浓度要求的不断提高, SPSP 设计方式所能达到水质要求的临界温度越来越低, 同样印证了好的水质需要在更低温度下实现。此外, 当  $\text{Cl}^-$  质量浓度要求为 60  $\text{mg}/\text{L}$  时, SPSP 相比于 SWRO 对水质的温度调控值是 0~8  $^{\circ}\text{C}$ ; 当  $\text{Cl}^-$  质量浓度要求为 160  $\text{mg}/\text{L}$  时, 温度调控值是 0~11  $^{\circ}\text{C}$ 。水质要求越高, 温度调控范围变窄, 但并无明显差距。

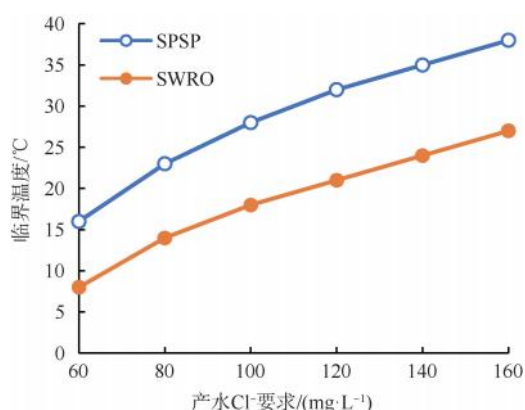


图6 不同  $\text{Cl}^-$  浓度水质要求下的临界温度对比

Fig. 6 Critical Temperatures Comparison for Water Quality Requirements at Different  $\text{Cl}^-$  Concentrations

### (2) 分流比例

图 7 表示的是 SPSP 方式在 4 种分流比例的水

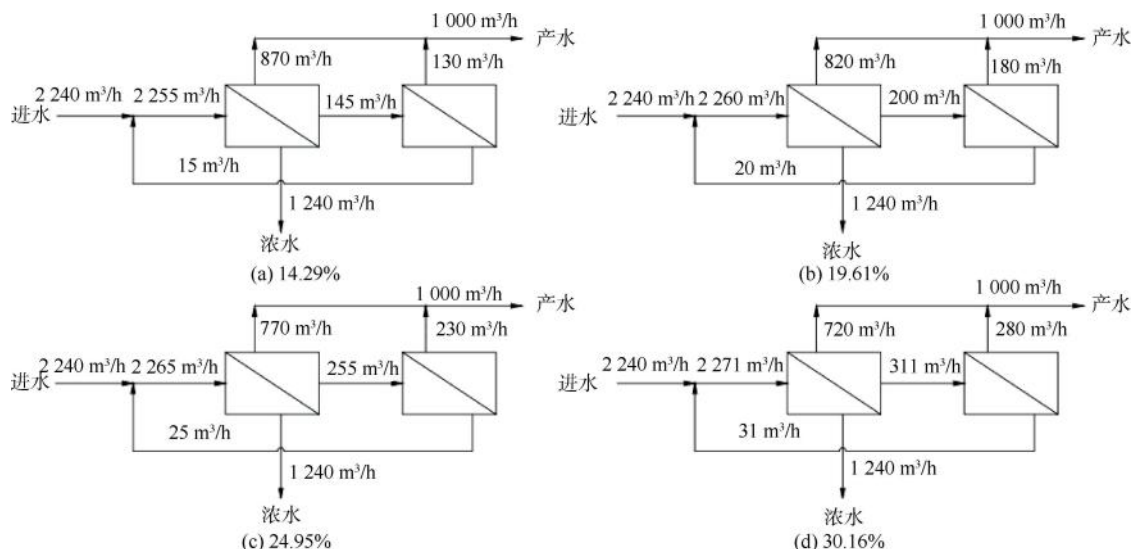


图7 4种分流比例的水量平衡

Fig. 7 Flow Balance of Four Diversion Ratios

量平衡图,分流比例指后端产水量在总产水量中所占的比例。在保持进水 TDS 为 32 000 mg/L、运营时间为 5 年、产水  $\text{Cl}^-$  质量浓度为 120 mg/L 的条件下,保持反渗透系统整体回收率为 44.46% 和产水量为 1 000  $\text{m}^3/\text{h}$  不变,改变 SWRO 前后端产水分流比例形成 4 种设计方案。

由表 2 可知,4 种设计方案的产水分流比例每增加约 5%,临界温度增加 3  $^{\circ}\text{C}$ ,SWRO 回收率增加约 0.13%。但是 SEC 的变化并无明显规律,基本保持不变。这说明,产水分流比例的变化对临界温度的变化影响较大,对 SWRO 回收率的影响较小,同时又不会引起 SEC 的较大变化。在实际工程应用中往往是最期待的结果。

表 2 SPSP 4 种分流比例操作参数对比  
Tab. 2 Operation Factors Comparison of SPSP Four  
Diversion Ratios

项目	14.29%	19.61%	24.95%	30.16%
临界温度/ $^{\circ}\text{C}$	24	27	30	33
SEC/( $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ )	4.16	4.137	4.141	4.188
SWRO 回收率	45.00%	45.13%	45.27%	45.40%

综上所述,SWRO 产水分流比例是影响温度调控范围的最关键因素。

### 3 经济性分析

经济性指标有差异的部分主要是投资成本和运营成本 2 个方面,其中运营成本主要是药耗和能耗。

#### 3.1 投资成本

本研究的比较前提是保障反渗透系统的产水量、回收率不变,因此对整个海水淡化厂而言,取水、输水、预处理、后处理等其他部分的投资不变。PSP 和 SPSP 设计方式由于增加了部分 BWRO,相比于单级 SWRO 投资成本有所增加,主要包括 BWRO 供水泵 1 台,苦咸水膜 126 支,7 芯压力容器 18 支,以及管道、阀门、仪表等配套设施。投资增加约 150 万,折合到成本中,约为 62.5 元  $\text{m}^3/\text{d}$ 。根据 DesalData 数据库 2023 年的统计数据,国际上海水淡化厂的投资成本中工程费用约为 4 666.48 元/ $\text{m}^3$  (650 美元/ $\text{m}^3$ ,按 1 美元 $\approx$ 7.179 2 元折算)。增加的 BWRO 在工程费用中的占比仅为 1.3%,对投资影响非常小。

#### 3.2 药耗成本

药剂成本主要与投药量和进水量有关。SWRO

进水通常投加阻垢剂、还原剂,由于 3 种设计方式在 SWRO 部分的进水量相同,投药量也相同,因此,SWRO 部分的药耗成本没有差别。

PSP 和 SPSP 设计方式由于增加了部分 BWRO,需要对 BWRO 进水投加氢氧化钠进行调质。PSP 和 SPSP 的进水量相同,氢氧化钠(100%)投药量一般为 1  $\text{g}/\text{m}^3$ ,液体氢氧化钠(40%)市场售价约为 3 000 元/t,核算每吨水药耗成本约增加 0.007 5 元,对药剂费的影响非常小。

#### 3.3 能耗成本

根据 2.1 节和 2.2 节的研究结果,SSP、PSP 和 SPSP 相较于 SWRO 的 SEC 增加与运营年限和进水水质有关。SSP 增加 0.2~0.4  $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ,PSP 与 SWRO 相比时高时低,此处认为基本持平,而 SPSP 减少 0.1~0.3  $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 。按照一般工业用电价格为 0.7 元/( $\text{kW}\cdot\text{h}$ )折算,SSP 和 SPSP 的运营成本分别增加 0.21 元/ $\text{m}^3$ ,减少 0.14 元/ $\text{m}^3$ 。

由表 3 可知,与 SWRO 相比,SSP 不增加投资成本但需额外增加能耗成本,PSP 不增加能耗成本但需额外增加投资成本,而 SPSP 虽然增加了投资成本但能耗成本降低。药耗成本由于增加极少,可忽略不计。相对而言,3 种方式中,SPSP 更具有经济性优势。

表 3 经济性指标对比  
Tab. 3 Comparison of Economical Indexes

项目	SSP	PSP	SPSP	备注
投资成本/(元 $\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ )	0	+62.5	+62.5	与 SWRO 相比
药耗成本/(元 $\cdot\text{m}^{-3}$ )	0	+0.007 5	+0.007 5	
能耗成本/(元 $\cdot\text{m}^{-3}$ )	+0.21	0	-0.14	

### 4 结论

本文以 SWRO 作为比较基准,对 SSP、PSP、SPSP 3 种设计方式的技术经济性进行对比,得出如下结论。

(1)通过软件模拟的方式,研究了在相同产水水质、水量及系统回收率条件下,不同进水 TDS 和不同运营时间对临界温度和能耗的影响,SPSP 对水质的温度调控范围和节能效果都为最优,SSP 和 PSP 的温度调控范围相同,但 PSP 和节能效果优于 SSP;此外,相同设计条件下,温度调控最大值为固定值,与进水水质和运营时间的变化无关。

(下转第 147 页)

- ZHAO D L, XU Z H, BIAN Z, et al. An analysis of the variation characteristics of rainfall runoff water quality in different underlying surfaces in Jinan [J]. *China Rural Water Resources and Hydropower*, 2020(9): 177-181.
- [18] 马慧雅. 北京城区降雨径流污染特征分析[D]. 郑州: 河南大学, 2016.
- MA H Y. Analysis of pollution characteristics of rainfall runoff in Beijing urban area [D]. Zhengzhou: Henan University, 2016.
- [19] 郭心仪, 张守红, 王国庆. 城市不同下垫面降雨径流水质监测及特征研究[J]. *中国农村水利水电*, 2024(3): 128-136.
- GUO X Y, ZHANG S H, WANG G Q. Monitoring experiment and characteristics analysis of rainfall-runoff-water quality of different urban underlying surfaces [J]. *China Rural Water Resources and Hydropower*, 2024(3): 128-136.
- [20] 李春荣, 刘坤, 林积泉, 等. 海口市城区不同下垫面降雨径流污染特征[J]. *中国环境监测*, 2013, 29(5): 80-83.
- LI C R, LIU K, LIN J Q, et al. Analysis on water-runoff pollutions of different underlying urban surfaces in Haikou City [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, 29(5): 80-83.
- [21] 张仪, 姜应和, 程静, 等. 基于水质水量监测的武汉市雨水径流污染特征分析[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(1): 52-55.
- ZHANG Y, JIANG Y H, CHENG J, et al. Analysis of pollution characteristics of rainwater runoff in Wuhan City based on water quality and quantity monitoring [J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(1): 52-55.
- [22] 陈莹, 赵剑强, 胡博. 西安市城市主干道路面径流污染特征研究[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(5): 781-788.
- CHEN Y, ZHAO J Q, HU B. Research on the characteristics of runoff pollution on urban main roads in Xi'an City [J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(5): 781-788.

(上接第 132 页)

(2) 进一步以 SPSP 为研究对象, 探讨产水水质、分流比例对温度调控范围的影响, 结果表明, 产水水质的影响较小, 分流比例的影响最为明显; 分流比例每增加约 5%, 临界温度增加 3℃, 同时对 SWRO 回收率和 SEC 影响不大, 可以作为实际工程应用中最有利最直接的调控参数。

(3) 从投资成本和运营成本 2 个方面进行经济性对比, 结果表明, SPSP 在增加投资和降低能耗之间达到一定平衡, 与 SSP 和 PSP 相比, 更具有经济性优势。

(4) 综合对比技术性和经济性, SPSP 设计方式在调控产水水质和降低投资成本方面最具有工程应用优势。

### 参考文献

- [1] ELIMELECH M, PHILLIP W A. The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment [J]. *Science*, 2011, 333: 712-717. DOI: 10.1126/science.1200488.
- [2] 苏慧超, 李逢时, 徐国荣, 等. 反渗透海水淡化系统混合膜设计[J]. *净水技术*, 2024, 43(1): 132-139.
- SU H C, LI F S, XU G R, et al. Hybrid membrane inter-stage design for RO seawater desalination system [J]. *Water Purification Technology*, 2024, 43(1): 132-139.
- [3] 薛喜东, 潘春佑, 冯涛, 等. 反渗透海水淡化系统双端产水脱盐工艺探讨[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(21): 111-116.
- XUE X D, PAN C Y, FENG T, et al. Discussion on double-end water production process of reverse osmosis seawater desalination system [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(21): 111-116.
- [4] CHU K H, LIM J, KIM S J, et al. Determination of optimal design factors and operating conditions in a large-scale seawater reverse osmosis desalination plant [J]. *Desalination*, 2020, 244: 101-107. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118918.
- [5] RYBAR S, BODA R, BARTALS C. Split partial second pass design for SWRO plants [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2010, 13(1/2/3): 186-194. DOI: 10.5004/dwt.2010.989.
- [6] BRAY D T. Simultaneous production of multiple grades of purified water by reverse osmosis; 4,046,685 [P]. 1976-03-17.
- [7] KIMA J, PARKA K, YANG D. R, et al. A comprehensive review of energy consumption of seawater reverse osmosis desalination plants [J]. *Applied Energy*, 2019, 254: 1-16. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113652.
- [8] KIM J B, HONG S K. A novel single-pass reverse osmosis configuration for high-purity water production and low energy consumption in seawater desalination [J]. *Desalination*, 2018, 429: 142-154. DOI: 10.1016/j.desal.2017.12.026.