太阳能在污水处理厂中的运行模式

根据中华人民共和国环境保护部2014年提出的《污染防治行动计划》，我国部分地区出水执行标准已由污染物排放标准的1级A标准提升到地表水IV类标准，然而目前仅30%左右的污水厂出水达到了1级A排放标准，这意味着污水厂的提标扩建、升级改造势在必行。

而污水处理属能耗密集型行业，据统计分析，污水处理厂单位耗氧污染物削减电耗分布在0.58~3.05kW·h/m3。我国城市污水产生量巨大，相应处理量也在不断增加，污水处理的能耗不容忽视(其中污水、污泥的处理能耗占整个污水厂直接能耗的60%以上)太阳能作为可再生能源，拥有蕴藏量大、分布广、环境友好等优点，而且太阳能技术的引进不仅可以充分发挥污水厂容积率较小的优势，也有效解决了太阳能占地面积较大的问题。因此，将太阳能技术与城镇污水处理项目相结合具有潜在的发展前景。当前，如何因地制宜地使用太阳能已经成为未来概念性污水厂的发展方向之一。

1太阳能污水处理技术

1.1污水处理厂光伏发电

城镇污水处理厂大多采用A2/O、氧化沟及序批式活性污泥法(sequencingbateactor,SBR)等处理工艺。将光伏电池板安装于建筑物的屋顶、构筑物的池面及各类闲置空间，可在一定程度上实现空间的二次利用。

自美国西部第一座以太阳能为主要能源的污水处理厂建成起，这种污水处理系统备受关注。国内目前已经有了实际的案列，如扬州市六圩污水处理厂、汤汪污水处理厂、自来水公司第一水厂合计约9.8×104m2池面，并建设光伏电站，其总装机容量达9.7MW。按照日均发电量计，可满足两处污水处理厂30%~40%的用电量，自来水厂则完全可以自给自足。

目前，全国不同处理规模污水厂的投运情况总体上均呈现出增长趋势，尤其是小型污水处理厂(5万m3/d以下)的投运数量增长最为迅速。若将光伏发电应用于中小型二级污水处理厂中，在节约能耗、降低成本上有更显著的效果。以一座小型污水处理厂为例，该厂用电负荷主要集中在曝气系统、泵房及污泥处置等方面，见表1。

表1　某小型污水厂主要机电设备能耗一览表

Table 1　List of major electromechanical equipment in energy consumption of a small sewage treatment plant

项目	构筑物	设备类型	配用电机功率/kW	装机容量	
				数量/台	容量/kW
预处理	粗格栅	回转式粗格栅	1.0	1	1.0
	污水泵站	潜污泵	5.5	2	5.5
	细格栅井	清污机	0.8	2	1.6
	沉砂池	鼓风机	4.0	2	8.0
二级处理	CASS 反应池	潜水推进器	5.5	4	22.0
		回流污泥泵	2.2	5	8.8
污泥处理和处置	污泥脱水间	带式浓缩脱水一体机	2.7	1	2.7
	鼓风机房	三叶罗茨鼓风机	22.0	3	44.0
合计					93.6

污水厂设计用电总负荷为100kW。以光伏发电作为主要能源，在不考虑安装面积限制及日照较好情况下进行系统设计。选用的太阳能电池板性能参数和设计结果详见表2与表3。

表 2　太阳能电池板性能参数
Table 2　Performance of solar panels

参数/单位	数值
峰值功率/W	260.00
开路电压/V	38.08
短路电流/A	8.92
工作电压/V	30.81
峰值电流/A	8.44

注：组件尺寸为 1 650 mm × 991 mm × 40 mm。

表 3　设计结果主要参数
Table 3　The main parameters of the design results

参数/单位	数值
组件串联数 N_s/个	8
组件并联数 N_{sh}/个	70
组件数/个	560
安装面积/m^2	916

根据污水处理厂实际情况来进行安装。经计算得知，太阳能日均发电量为896.9kW・h，而污水处理厂实际电耗为1320kW・h，即可满足约70%以上的用电量。由此可见，太阳能光伏发电更适用于中小型污水处理厂及能耗相对较低的净水厂。日照强度和天气情况等的变化对太阳能组件的功率有较大的影响，系统发电量随太阳辐射强度呈线性变化，因此，太阳能运用于中小型污水处理厂和净水厂时，通常采用并网方式且遵循“自发自用、余电上网”的原则。

然而，光伏项目的实施受阻于原池体结构的承载力限制范围。对于原池体单元的改造，需要考虑的结构设计因素较多，因而给施工带来了较大的阻力，如六圩污水处理厂结构改造等。因此，新污水处理设施及净水厂在设计建造时，应该统一规划其光伏发电项目，避免池体改造结构上的困难。同时，阴雨天太阳能发电效率较低时的应对措施也是亟待解决的问题之一。

1.2太阳能人工湿地

近年来，人工湿地技术因其基建投资小、处理效果好、布置灵活和运行维护管理方便等优点，渐受到人们的重视，尤其适用于污水量较小并分散的农村。农村地区太阳能资源丰富，利用太阳能技术耦合人工湿地系统，不仅解决了能源供给问题，还降低了管理成本，特别适用于地势偏远或电网不发达地区。

太阳能湿地技术主要有两种应用形式：一种是采用太阳能集热器收集辐射，并在湿地系统内敷设加热盘管等热传导设施，以温度控制器调控湿地系统水温，确保湿地正常运行，并增设储热设备与反馈系统来调节温度，其工艺流程见图1。

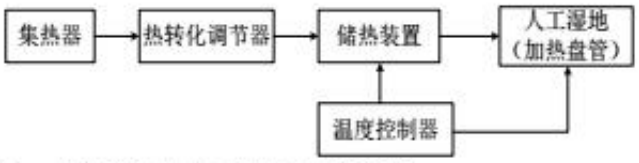

图 1　太阳能加热人工湿地工艺流程图
Fig. 1　Solar energy heating artificial wetland process flow chart

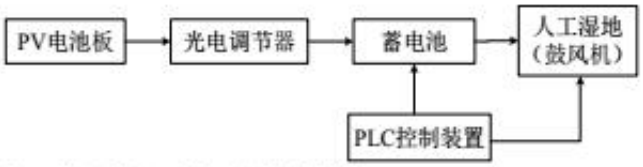

图 2　太阳能驱动人工湿地流程图
Fig. 2　Solar energy flow chart for constructed wetlands

该技术适用于因温度降低、水结冰而导致运行效果下降的环境。相比湿地系统覆盖物隔离保温技术来说，利用太阳能提高温度技术具有绿色环保、管理方便、启动时间快等优势。另一种是利用太阳能作为驱动能源，其系统流程见图2。利用太阳能驱动鼓风机曝气，可提高湿地溶解氧利用率，氧化降解有机物，并有效解决及预防因有机物积累导致的堵塞问题。

新型的太阳能湿地技术在实际中的应用还较少，仅在西藏及西北地区有相关的报道。为了推动该技术的发展，今后还需进一步提高太阳能光热、光电效率及储能技术、降低太阳能装置成本，提高其经济效益。

1.3太阳能反渗透水处理

反渗透作为一项先进的水处理技术，目前广泛应用于污水的深度处理、锅炉补给水、海水淡化等方面。反渗透装置的核心部件在于其反渗透膜，影响膜运行的因素大致可划分为三大类，详见图3。

整个装置的主要操作参数是运行压力和进水温度。进水温度通常作为保护反渗透膜的限制条件，响膜运行的因素大致可划分为三大类，详见图3。

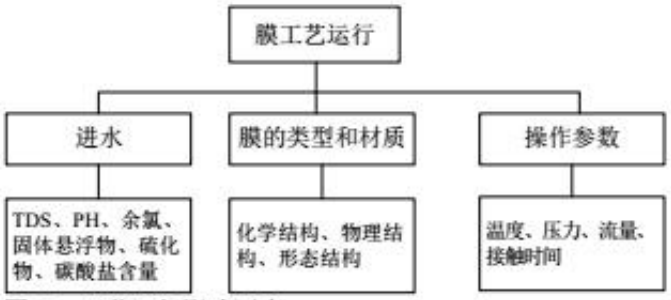

图 3　工艺运行影响因素
Fig. 3　Factors affecting the operation of the process

整个装置的主要操作参数是运行压力和进水温度。进水温度通常作为保护反渗透膜的限制条件，即规定不超过45°C。因此，在工业上通常控制进水温度在20°C左右。

太阳能作为一种环境友好的绿色能源，与反渗透技术相结合，开辟了太阳能应用的新方向。早在20世纪90年代，就有将太阳能与反渗透技术结合的相关研究，即首先将太阳能转换成电能再利用电能驱动反渗透装置。

这是一项非常有前景的技术，其发展却受制于太阳能低利用率与高投资。为了解决这些问题，不少学者进行了相关的研究并发现，当操作压力一定时，升高水温，产水量增加，电导率仅略微下降。

NISAN等利用ROSA模型分析了运行参数与进水的函数关系，从理论上证实了升高进水温度可降低制水成本。当控

制压力保持0.90Mpa时，进水温度从18°C提高到38°C，产水量从6.5L/min增加到8.8L/min，提高了35.5%;、若保证产水量为8.0L/min，提升相同的温度，可将反渗透运行压力从1.18Mpa降至0.80Mpa，能耗可降低32.2%。因此，在工业上可利用太阳能将反渗透装置进水温度提升，来降低能源成本。

1.4太阳能杀菌消毒技术

光催化氧化技术是近年出现的一种水处理新技术，也逐渐发展为污水深度处理的一项重要技术。

自1972年日本学者FUJISHIMA等的研究在《Nature》上发表后，从此揭开了光催化氧化技术的序幕。此后，随着研究进一步深入，光催化氧化技术在降解水中污染物应用方面取得了突破性进展。相比于传统的物化方法，光催化氧化技术在常温常压下就可将有机物完全分解和矿化，其操作简易、能耗低，所使用的催化剂TiO2无毒无害，稳定性好，目前已经成为国内外的研究热点。

光催化氧化技术的反应机理大致为：催化剂TiO2受光源激发产生光电子和空穴，经过一系列化学反应过程，与水生成强氧化性和高活性的羟基自由基，大多数有机物和无机物能够直接或间接被其氧化还原。

因此，光催化氧化技术亦可用于除藻和消毒。如自由基HO·具有很强的氧化性，可氧化藻类叶绿素，使叶绿素新陈代谢停止，迫使蛋白质合成中断，最终导致藻类死亡。赵海霞等进行了太阳能-TiO2光催化氧化的杀藻实验，研究结果表明，太阳能中的紫外光可激发纳米TiO2产生HO·，光催化8h后，杀藻率达最大。

而同时产生的强氧化性物质可与细胞壁、细胞膜或细胞内的组分反应，破坏有机物中的C—H、N—H、C=O键等，从而杀死病原体，达到杀菌消毒的效果。有研究表明，TiO2在紫外光照射下可杀灭酵母菌、大肠杆菌、脓杆菌及金黄色葡萄球菌等。相比传统的消毒方式，太阳能光催化技术具有杀菌速度快、效率高，且不产生有害的消毒副产物的优点，同时也解决紫外线消毒后出水存在的微生物光复活问题。

2太阳能污泥处置

随着大量污水处理厂投入运行，所产生的污泥处置问题迫在眉睫，已成为水处理研究的一大热点。在污泥的减量化处置中，首先需要进行污泥脱水，而机械脱水的极限是50%~60%，则需要进一步污泥干化。相比于传统热能污泥干化，太阳能干化有低温干化、运行费用低廉、操作简单、运行安全稳定、干化后污泥仍保留原有农用价值等优点。

2.1太阳能温室干化

对于日照时间长、太阳辐射强的地区，可直接采用纯太阳能干化。然而对于地理条件不理想的地区，直接利用会导致占地面积过大且存在处理时间过长的问题。因此，一般需要增加额外的能源，比如利用污水热泵从污水厂的出水中抽提热能，并通过热水向干化装置提供能源。

太阳能干化是借助太阳暖房实现的，其核心部件是污泥翻滚机。经过机械脱水后的污泥放料于储存仓中，由翻泥机平铺于暖房内的网孔地板上，通过太阳能加热暖房内的空气和污泥，并由鼓风机将干燥空气吹射到污泥层上，带走污泥中的水分。

在冬季，为防止出现污泥堆积以及干化效果降低的问题，可安装高效加热地板，利用污水厂出水的热量，通过热泵技术加热地板，使得干化的效率大大提高。工程案例(HuberSRT)证实机械脱水之后的污泥(含水率为75%)，经过该干化系统(SHP系统)后，含水率下降至约40%甚至更低。因此，在干化效果上，与普通的热干化设备是相同的。

相对于传统的热干化法，污泥单纯利用太阳能干燥无辅助热源时，干燥速率不超过0.63kg/m2·h，而污泥在小型桨叶式污泥干化机内的干化速率最高达到0.6kg/(m2·min)，速率约为太阳能干化的60倍。目前为了解决太阳能无辅助热源干化速率较低的问题，通常增加热泵作为辅助热源、提高太阳能集热系统、主被动结合干化等方式来提高干化速率。并增加风力及光伏发电来满足干化风机等用电，进一步降低成本。

2.2厌氧消化

城镇污泥的厌氧处置技术发展已经十分成熟，而且应用越来越广泛。该项技术尤其适用于温暖地区。相比传统的好氧处置，该技术具有投资与运营成本较低、产泥量少等优点。但由于厌氧处置的去除率受温度影响较大，如果将该技术运用到温度较低的寒冷地区，为保证其使用效果，需加大能源的消耗，并增加相应的管理成本。因此，为了降低能

耗和管理成本，将太阳能应用于厌氧消化就具有可观的发展前景。

国外相关学者设计了用于污水生物处理的太阳能保温厌氧反应器，该反应器主要是利用平板集热器加热储热罐中的循环水，通过热交换器维持双层隔离厌氧生物池的内部温度。该反应器在一年中绝大部分时间都能够维持35°C的理想温度，COD去除率达到80%以上。近年来，国内研究人员也对厌氧消化过程中的太阳能应用技术进行了探索，并取得了较大的成果。因该项技术受气候、地域和时间的影响较大，如何提高太阳能利用率成了亟待研究的问题。

3能耗与经济效益

3.1污水厂能耗分析

表 4　不同规模污水处理厂能耗情况[17]

Table 4　Energy consumption of different scale sewage treatment plants

规模/($\times10^4$ m^3/d)	单位电耗/(kW·h/m^3)
<1	0.371
1～3	0.290
3～5	0.304
5～10	0.289
10～20	0.226
20～30	0.203
>30	0.225
总平均	0.273

表 5　污泥干化能耗比较情况[18-19]

Table 5　Comparison of sludge drying energy consumption

干化技术	能耗/(kW·h/t 水蒸气)
普通热干化处理	800～1 200
太阳能污泥干化	20～30
热泵干化技术	167～200
太阳能热泵结合干化技术	60～80

在国内，各区域城镇污水处理单位能耗总体上随规模的增加而减少，污水处理的深度不同，能耗差异较大，国内不同规模的污水处理厂能耗的比较结果如表4所示。中国污水处理发展位于初步阶段，大部分仍为中小型水厂，处理率较低。因此，随着污水处理厂提标改造工程的落实及排放标准的严格执行，污水厂的电能消耗将进一步增大。将太阳能运用于城镇污水处理厂中，对降低能耗有着重要的意义。比如光伏发电可满足大型污水厂用电量的30%~40%，中小型可达70%以上。对于城镇污水处理厂中能耗占比较大的污泥来说，太阳能干化可节约相当大一部分电能。具体电能消耗情况详见表5。

相比于传统的热干化设备来说，利用太阳能干化污泥消耗的电能仅为其四十分之一，即使是在天气情况较差或者冬季时，增加热泵作为辅助热源，其电耗也是较低的。

3.2经济效益

图 4　污水处理厂整体费用分配[20-21]
Fig. 4　Sewage treatment plant overall cost allocation

与国外相比，污水处理厂基建费与人工费大于能源费用，但随着自动化程度的增加，能源的比重将增加，将太阳能应用于污水处理项目中，不仅可以使其电耗降低，满足污水厂大部分用电量，通过余电上网更能获得一定的经济效益。由国家发改委价格司和国家能源局审核，确定2016年光伏发电上网标杆电价如表6所示。

表 6　光伏发电上网标杆电价
Table 6　Photovoltaic power grid benchmark price

资源区类型	资源区	上网标杆电价/(元/kW·h)
I	宁夏、青海省海西州、甘肃嘉峪关、武威、张掖、酒泉、敦煌、金昌、新疆哈密、塔城、阿勒泰、克拉玛依内蒙古（除赤峰、通辽、兴安盟、呼伦贝尔以外）	0.80
II	北京、天津、黑龙江、吉林、辽宁、四川、云南、河北承德、张家口、唐山、秦皇岛等	0.88
III	I、II 类之外的其他地区	0.98

注：数据来源于部分污水处理厂的平均值，费用会随其规模波动，但整体波动较小。

根据相关补助政策，国家实行按照发电量进行电价补贴的政策，电价贴标准为0.42元/kW・h。对于污水处理厂项目而言，其特点是投资大、回收期长。国家补贴以及上网电价回报可有效降低投资回收期，获得较佳的经济收益。

4结论

本文通过对实际污水厂光伏发电进行模拟分析，并且参照正在运行中相关示范项目的发电量与用电量均衡详情，阐明了太阳能应用于城镇污水处理厂是一种值得尝试的新方法，且已逐渐获得较大的经济与生态效益。此外，光伏发电在自来水厂中的应用可基本实现能源供给与消耗的平衡，为未来自来水厂建设能源供给方面提供宝贵的案例经验。与此同时，对于污水处理厂中其它环节如污泥处置和杀菌消毒等方面，太阳能技术的引进能大大降低污水处理的能源消耗及污泥处置的成本。在未来的发展中，建议将光伏发电项目并入污水处理厂建设项目一起统筹规划，避免污水厂后期改造存在的结构设计问题。总而言之，太阳能在污水处理厂中的运行模式是一种可同步实现清洁生产、低碳排放与经济收益的有效模式。

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/125492.html