



# 污泥太阳能干化技术研究进展

张振涛<sup>1</sup>, 杨鲁伟<sup>1</sup>, 周远<sup>1</sup>, 吕君<sup>1,2</sup>, 王传奇<sup>1,2</sup>, 董艳华<sup>3</sup>

1. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049
3. 中国海洋大学食品科学与工程学院, 山东青岛 266003

**摘要** 随着中国污水处理率的提高, 污泥产量以每年 10%~15% 的速度增长。大量的污泥对环境造成了巨大压力, 并引起了二次污染。脱水污泥的有机物含量高, 含水率也高达 80%, 使得污泥处置困难。污泥干化是实现污泥稳定化、减量化、资源化的重要前提, 是污泥处理处置的重要方法之一。污泥干化是一个耗能过程。热泵辅助太阳能污泥干化可以降低干化能耗。本文总结了国内外污泥太阳能干化技术的研究进展, 提出了基于太阳能蓄热和热泵辅助的污泥太阳能干化技术, 并认为这是今后太阳能干化技术的重要发展方向。

**关键词** 污泥干化; 太阳能干化; 蓄热; 热泵

**中图分类号** X705

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-7857(2010)22-0039-04

## Recent Developments in Wastewater Sludge Solar Drying Technology

ZHANG Zhentao<sup>1</sup>, YANG Luwei<sup>1</sup>, ZHOU Yuan<sup>2</sup>, LU Jun<sup>1,2</sup>, WANG Chuanqi<sup>1,2</sup>, DONG Yanhua<sup>3</sup>

1. *Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*
3. *College of Food Science and Engineering, The Ocean University of China, Qingdao 266003, Shandong Province, China*

**Abstract** With the increase of the practice of sewage treatment in China, the annual growth rate of the sludge production reaches 10%~15%. The production of a large amount of sewage sludge creates tremendous pressure and secondary pollution in environment. The high content of organic substance and water, normally over 80%(wet basis), makes the treatment of dewatering sewage sludge rather difficult. Thermal drying of the sludge is an important treatment and process and is an important prerequisite for the stabilization of sludge, the reduction of sludge volumes and the utilization of sludge, but a quite large amount of energy is required for drying sludge. Heatpump assistant solar drying of the sewage sludge may reduce the energy requirement. In this paper, the recent development in the wastewater sludge solar drying technology in China and other countries is reviewed, and it is suggested that the key development in the sludge solar drying technology in the future is the heat storage and heatpump assisted wastewater sludge solar drying technology.

**Keywords** sludge drying; solar drying; heat storage; heatpump

世界银行估计, 2020 年中国由于空气污染造成的环境和健康损失将达到 GDP 总量的 13%。为此, 中国政府积极努力, 承诺到 2020 年单位国内生产总值 CO<sub>2</sub> 排放比 2005 年下降 40%~45%。根据中国可再生能源中长期发展规划提供的数据可以看出, 中国未来的能源和电力来源将是太阳能<sup>[1]</sup>。干燥技术是传热技术和传质技术的组合应用, 所消耗的能源占发达

国家能源消耗的 15%~25%<sup>[2-4]</sup>。由于 60% 的工业领域需要干燥作业<sup>[4]</sup>, 随着中国发展成为全球第二制造大国<sup>[5]</sup>, 干燥作业的能源消耗必然越来越大。因此, 干燥领域的太阳能应用问题, 与中国的 CO<sub>2</sub> 减排目标息息相关。根据有关规定, 至 2010 年, 中国城市污水处理率不低于 70%。“十一五”末, 中国城镇污水处理能力将达 1.0×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>/d, 全年的污水处理量达 3.0×

收稿日期: 2010-10-28; 修回日期: 2010-11-09

基金项目: 中国科学院院士咨询项目

作者简介: 张振涛, 博士后, 研究方向为太阳能与热泵干燥技术, 电子信箱: zzth1@163.com

$10^{10}\text{m}^3$ , 污泥产量将达  $3.0 \times 10^7\text{t}$  (80% 含水率)。随着污水处理率和处理深度的增加, 污泥排放量在以每年 10%~15% 以上的速度增长<sup>[6]</sup>。污泥的处理处置已经成为城市发展的环境瓶颈问题, 而污泥的资源化利用也成为污泥处理处置重要手段。干化 (也称干燥) 是污泥实现无害化、减量化、资源化处理处置的关键环节, 对于实现污泥的稳定化、减量化, 减少储存和运输的体积, 对污泥的资源化利用起到越来越重要的作用。太阳能污泥干化是指利用太阳能为主要能源对污泥进行干燥处理的作业<sup>[7]</sup>。充分利用中国的太阳能资源发展节能污泥干燥技术, 研发高效的污泥太阳能干化技术与装备, 对于中国的环保和节能减排目标的实现具有重大意义。

## 1 国内外污泥处理处置概况

进入 21 世纪以来, 中国步入工业化、城市化加速推进的阶段, 资源需求快速增长, 大规模基础设施建设不可避免, 以牺牲环境指标的“高污染”和“高碳”为特征的“发展排放”, 成为中国发展建设清洁低碳城市, 实现可持续发展的最大障碍。由于中国城市化速度的加快, 城市化人口的增加, 污泥排放量越来越大<sup>[6]</sup>。由于技术、政策等原因, 中国大部分城市污水污泥都是利用填埋处置方式, 没有进行无害化处理, 污泥的二次污染问题极为严重。高含水率污泥的大量填埋导致占用宝贵的土地资源, 以致许多城市找不到填埋场。污泥渗滤液在许多地区成为地下水的污染源, 填埋场成了蚊虫滋生地, 填埋气则成为大气的污染源。因此, 污泥处理处置问题已成为中国无法回避、亟待解决的城市环境问题。北美、欧洲近年出台的政策都是鼓励污泥资源化利用, 通过税收立法等政策进行调节, 鼓励污泥干化为基础的污泥资源化利用, 如美国、欧洲都建有大型污泥干化厂。在北美, 污泥土地利用已经代替填埋成为最主要的污泥处置方式。据美国环保署估计, 今后几十年美国 6500 个填埋场将有 5000 个被关闭。随着污泥焚烧项目的停建, 污泥焚烧比例也将下降至 20%。在加拿大多伦多, 污泥随着土地利用计划的顺利实施, 自 2001 年起污泥 100% 土地利用<sup>[7]</sup>。总体上看, 欧洲和北美等发达国家污泥处理处置逐步转向资源化循环利用为主, 焚烧逐步减少, 污泥填埋的比例正逐渐下降, 甚至禁止污泥土地填埋<sup>[7-11]</sup>。

由于城市污水污泥中含有 60% 左右的有机物, 干基热值在 8372~12558kJ/kg, 最高可达 14651kJ/kg, 还含有一定的 N、P 等元素, 可以作为燃料、肥料、土壤改良剂等。但未经处理的污泥的无限制农用, 将对食品安全造成危害。因此, 以污泥无害化为基础, 在不产生二次污染的情况下实现污泥的资源化利用, 就成为污泥处理处置技术的重要选择, 可达到废物循环利用和治理环境污染的双重目标。污泥干化是污泥实现无害化、减量化、资源化处理处置的关键环节。

所谓污泥干化是采用一定的热物理手段排除污泥中水分, 使污泥干燥的过程。污泥干化是一个能量净支出的过程, 干燥工艺的能量消耗是衡量干燥工艺优劣的关键因素之一。常规污泥干燥系统的单位热耗量 (STR) 为蒸发 1kg 水需要耗

热 3200~3500kJ/kg, 并消耗电能 45~90kW/t 水<sup>[12-13]</sup>。污泥干化对实现污泥的稳定化、减量化, 减少储存和运输的体积, 起到越来越重要的作用, 是污泥资源化利用的根本前提。充分利用太阳能, 发展节能低碳污泥干化技术, 实现污泥的资源化利用, 在改善环境的同时, 对于减少二次污染, 降低碳排放强度具有重要的现实意义。

## 2 国内外研究现状

### 2.1 国内污泥太阳能处理处置技术

根据结构型式及运行方式, 太阳能干燥装置可以分为 3 类: 温室型太阳能干燥器装置、集热型太阳能干燥器装置和两者结合或其他能源方式联合应用太阳能干燥器装置, 如集热器-温室型太阳能干燥装置, 集热-常规能源联合太阳能干燥器装置、集热-储热太阳能干燥器装置、集热-热泵等各种组合式的太阳能干燥器装置。

污泥太阳能干化技术研究和推广, 已经在世界上许多国家展开, 并在欧美、中东的土耳其等国家和地区获得一定的应用。

#### 2.1.1 温室型污泥太阳能干化装置研究

中国在太阳能污泥干化方面的研究工作比较少<sup>[14-16]</sup>。于忠民<sup>[17]</sup>于 1993 年对太阳能加热污泥的研究发现, 污泥是较好的吸热体, 集热效率比水高。雷海燕<sup>[18]</sup>在 2002 年利用太阳能进行污泥干燥的研究中, 得到不同形状不同重量污泥的干燥特性方程; 并研究了污泥形变、干燥介质的温度、风速、相对湿度、太阳辐射强度及污泥形状等对干燥过程的不同影响。2003 年, 郑宗和等<sup>[19]</sup>研究了热空气的温度、含水量、流动速度、空气与物料的接触情况等因素对污泥干燥速率的影响; 冬季可以把污泥干燥至 60% 以下含水率, 夏季可以干燥至 10% 含水率, 但太阳能干燥时间比常规干燥器长。2004 年, 雷海燕等<sup>[20]</sup>进行了把污泥从 80% 含水率干燥至 60% 含水率太阳能干化实验, 认为污泥形变、空气参数和太阳辐射强度是污泥干燥过程的主要因素, 并得到了污泥太阳能干化的数学模型。2007 年, 张云月等<sup>[21]</sup>研究认为污泥厚度薄, 通风好, 干燥速度快。2009 年, 赵磊等<sup>[22]</sup>研究了污泥太阳能温室干燥过程中表面积、孔隙率、形变率和干燥速率随水分变化的规律, 结果表明, 单纯污泥利用太阳能干燥无辅助热源时, 干燥速率不超过  $0.63\text{kg 水}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 表面积、孔隙率和形变率只与污泥水分相关, 与干燥速率没有明显相关性。董汉军<sup>[23]</sup>研究认为太阳能热干燥城市污泥粪渣既节能, 又能降低运行成本。

#### 2.1.2 热泵和蓄热等其他形式污泥太阳能干化研究

2007 年王明根等<sup>[24]</sup>进行了太阳能和高温热泵干化污泥的研究, 认为这种组合干燥方法比普通热泵效率高 70%, 节能显著。2008 年朱晓琬<sup>[25]</sup>进行了太阳能辅助桨叶式干燥机干燥污泥的研究, 主要采用太阳能加热导热油为桨叶干燥机提供能量。研究表明, 冬季和夏季工况导热油都能够升温至 60~80℃ 的温度区间, 能够保证稳定地进行 60~80℃ 区段的中温应用; 结合太阳能辅助后干燥机单位干基蒸发水量明显高于

无太阳能辅助的桨叶式干燥机以及太阳能温室干燥工况。

## 2.2 国外污泥太阳能处理处置技术

### 2.2.1 温室型污泥干化技术

Luboschik<sup>[26]</sup>从1994年开始研究污泥太阳能干化问题,使用 Anlagenbau GmbH 公司的太阳能干化设备在德国南部可以达到  $700\sim 800\text{kg}/\text{m}^2$  地表面积/a 的水分蒸发量。研究结果认为,如果循环使用废热,性能系数可以提高 2~3 倍。尽管占地面积大,但运行费用非常低。Celma 等<sup>[27]</sup>于 1999 年对橄榄加工厂污泥太阳能间接对流干化进行研究,结果表明,橄榄污泥可以在  $34^\circ\text{C}$  和  $52^\circ\text{C}$  下得到充分干燥。在空气的相对湿度不超过 58%,空气流量为  $0.036\sim 0.042\text{kg}/\text{s}$  的条件下,污泥含水率两天内可从  $3.153\text{g 水}/\text{g 干物质}$  下降至  $1.000\text{g 水}/\text{g 干物质}$ ,下降到原来含水率的 1/3。对污泥干化过程进行热力学能量和火用分析发现,火用效率随空气入口温度上升而下降,第 1 天为  $53.24\%\sim 100\%$ ,第 2 天即下降为  $34.4\%\sim 100\%$ 。Salihoglu 等<sup>[28]</sup>于 2007 对固定床太阳能干化石灰稳定污泥的研究发现,机械脱水污泥可从含固率 20%DS(溶解性固体)提高到 35%DS,微生物病原体冬季可以在 20d,夏季可以在 20d 内达到 EPA(美国环保署)的 A 级标准,污泥体积减少 40%。封闭温室型污泥干化床比敞开式太阳能干化床效率高。

### 2.2.2 集热-储热太阳能污泥干化技术

荷兰从 1995 开始建两个大的太阳能热利用系统( $1200\text{、}2400\text{m}^2$ )<sup>[29]</sup>。1995—1996 年  $1200\text{m}^2$  太阳能温室包括  $1000\text{m}^3$  储水箱建成,并用于农产品干燥。1996—1997 年  $2400\text{m}^2$  系统在一个食品加工厂建成,用于食品脱水。研究结果表明,系统的地下储水箱是有价值的,并强调太阳能系统成本(投资和运行成本)、效率、安全性都很好,缺点是体积大。2009 年 Mathioudakis 等<sup>[30]</sup>在希腊进行了污泥温室太阳能干化的研究。结果表明,在夏季需要 7~12d 把污泥从 85%含水率降至 6%,秋季则需要 9~33d 把污泥降至 10%含水率,体积则减少 80%~85%,大肠杆菌总数量在夏季条件下下降两个数量级。如果在干化床地部增加太阳能热水循环,即使在冬季污泥干化速度也可以加快到 1~9d。

### 2.2.3 热泵辅助太阳能污泥干化技术

法国的 Slim 等<sup>[31]</sup>对热泵辅助太阳能温室干化污泥(S&HPSDS, Solar&Heatpump Sludge Drying System)进行研究,并且建立了 S&HPSDS 的稳态数学模型。该数学模型反映了质量、能量、时间和状态平衡与热量传递的藕合关系。利用该模型进行了基于加热温度的干化能耗热经济学评价,结果表明在辅助热泵干化床地板加热温度一定条件下,提高温室加热空气温度,可以提高水分蒸发速度,但同时也增加了系统能耗,降低了污泥干化系统性能系数。

## 3 污泥太阳能干化技术展望

污泥处理处置的关键环节之一是污泥的干化问题。污泥太阳能干化技术是实现污泥干化过程清洁化、节能化的重要手段。中国的太阳能丰富,而能源短缺问题又十分突出;众多

中小型的污水处理厂遍布全国,适合使用太阳能污泥干化装置。但由于太阳能本身具有热流密度低、非连续性和非稳定的弱点,导致太阳能污泥干化技术运行的连续性差,初投资高,应用受限,实施困难,限制了污泥太阳能干化系统的推广应用,所以大型污泥太阳能干化项目的实施并不多。要实现污泥太阳能干化技术的规模应用,还需做以下进一步研究。

1) 提高太阳能干燥器的集热效率,优化太阳能集热系统。高效太阳能集热系统可以提高太阳能光热利用效率,降低集热系统占地面积,降低使用成本。

2) 主被动结合的混合型污泥干化装置研究。由于太阳的热流密度小,主被动结合的太阳能干燥器可以增加集热量,提高干燥器的干燥温度,有利于提高污泥干化速度。

3) 加强太阳能的蓄热装置的研究。通过太阳能蓄热装置的研究,解决太阳能干燥的不连续、不稳定问题,保证太阳能干化作业的连续进行,实现污泥太阳能干化装置的实用化、产业化应用。蓄热形式、材料、换热器结构形式的研究,是蓄热系统的研究重点。

4) 热泵技术的研究。热泵也是进行能量回收,保证太阳能干化系统持续运行的措施之一。对于条件合适的污水处理系统,热泵可以回收污水的能量,用于污泥干化。但污泥干化过程排除的气体具有腐蚀性,如何保证换热器的寿命和提高热泵干燥系统的除湿效率是污泥干化过程中热泵研究的重要课题。

5) 光热光电、风热电的互补应用。随着光伏技术的发展,在污泥干化装置中采用太阳能风机实现光热电互补也是降低污泥太阳能干化能耗的重要措施。利用光伏发电的冷却需求产生热水供应污泥干化的部分热量需求,既可以提高光伏发电的效率,又直接实现了光热电的互补应用。有条件的地方还可以增加小型风力发电机,作为光伏发电的补充,保证干化风机的用电。

污泥太阳能干化技术的发展,已经从单一的太阳能热利用向太阳能综合利用发展。主被动加热干燥结合,光热光电结合,蓄热蓄电结合以及与热泵节能技术的组合应用,正日益发展成为污泥太阳能干化研究的重要目标。

## 参考文献 (References)

- [1] 王斯成. 我国光伏发电有关问题研究[J]. 中国能源, 2007, 29(2): 7-11. Wang Sicheng. *Energy of China*, 2007, 29(2): 7-11.
- [2] Mujumdar A S. Recent developments in the drying technologies for the production of particulate materials [J]. *Handbook of Powder Technology*, 2001, 10(2): 533-545.
- [3] Chen Guohua, Yue P L, Mujumdar A S. Sludge dewatering and drying[J]. *Drying Technology*, 2002, 20(4-5): 883-916.
- [4] 潘永康, 王喜忠, 刘相东. 现代干燥技术[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2007. Pan Yongkang, Wang Xizhong, Liu Xiangdong. *Modern drying technology [M]*. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [5] 阮煜琳. 中国取代日本成为全球第二大工业制造国[EB/OL]. 中国新闻网, 2010-03-27.

Ruan Yulin. China replaced japan as the second largest manufacturer in the world[EB/OL]. 2010-03-27. <http://www.chinanews.com.cn/cj/cj-gncj/news/2010/03-27/2193673.shtml>.

[6] 翁焕新. 污泥无害化、减量化、资源化处理新技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

Weng Huanxin. The new sludge treatment technology of harmless, volume reduction and recycle[M]. Beijing: Science Press, 2009.

[7] 唐小辉, 赵力. 污泥处置国内外进展[J]. 环境科学与管理, 2005, 30(3): 68-70.

Tang Xiaoli, Zhao Li. *Environmental Science and Management*, 2005, 30(3): 68-70.

[8] 王静, 卢宗文, 田顺, 等. 国内外污泥研究现状及进展 [J]. 市政技术, 2006, 24(3): 140-142.

Wang Jing, Lu Zongwen, Tian Shun, et al. *Municipal Engineering Technology*, 2006, 24(3): 140-142.

[9] 马娜, 陈玲, 何培松, 等. 城市污泥资源化利用研究 [J]. 生态学杂志, 2004, 23(1): 86-89.

Ma Na, Chen Ling, He Peisong, et al. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(1): 86-89.

[10] 王钊. 北京市污水厂污泥处理干化工艺选择的探讨 [J]. 市政技术, 2004, 22(6): 374-378.

Wang Zhao. *Municipal Engineering Technology*, 2004, 22(6): 374-378.

[11] 王昭君, 闫洪坤. 我国城市污水处理厂污泥处理工艺及现状[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2009, 28(增刊): 119-121.

Wang Zhaojun, YAN Hongkun. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition*, 2009, 28(Suppl): 119-121.

[12] 尹军, 谭学军. 污水污泥处理处置与资源化利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

Yin Jun, Tan Xuejun. Disposal and resource utilization of sewage sludge [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.

[13] 王兴润, 金宜英, 聂永丰. 国内外污泥干化工艺的应用进展及技术要点[J]. 中国给水排水, 2007, 23(8): 5-8.

Wang Xingrun, Jin Yiyang, Nie Yongfeng. *China Water and Waste water*, 2007, 23(8): 5-8.

[14] 顾忠民, 杨殿海. 太阳能污泥干化在欧洲的应用 [J]. 四川环境, 2008, 12(27): 93-96.

Gu Zhongmin, Yang Dianhai. *Sichuan Environment*, 2008, 27(6): 93-96.

[15] 王宝和, 王喜忠. 太阳能干燥[J]. 南京林业大学学报, 1995, 21(增刊): 221-224.

Wang Baohe, Wang Xizhong. *Journal of Nanjing Forest University*, 1995, 21(Suppl): 221-224.

[16] 丘锦荣, 吴启堂, 卫泽斌, 等. 利用塑料棚和日光干燥废弃植物体和污泥的初步试验[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 211-214.

Qiu Jinrong, Wu Qitang, Wei Zebin, et al. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(5): 211-214.

[17] 于忠民. 太阳能作污泥厌氧消化加热热源试验研究 [J]. 城市环境与城市生态, 1993, 6(1): 10-15.

Yu Zhongmin. *Urban Environment & Urban Ecology*, 1993, 6(1): 10-15.

[18] 雷海燕. 太阳能干燥污泥的研究[D]. 天津: 天津大学, 2002.

Lei Haiyan. Study on solar sludge drying[D]. Tianjin: Tianjin University, 2002.

[19] 郑宗和, 牛宝联, 雷海燕. 利用太阳能进行污泥脱水干燥的试验[J]. 中国给水排水, 2003(Z1): 111-113.

Zheng Zonghe, Niu Baolian, Lei Haiyan. *China Water & Wastewater*, 2003(Z1): 111-113.

[20] 雷海燕, 李惟毅, 郑宗和. 污泥的太阳能干燥实验研究 [J]. 太阳能学报, 2004, 25(4): 479-482.

Lei Haiyan, Li Weiyi, Zheng Zonghe. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2004, 25(4): 479-482.

[21] 张云月, 赵磊, 陈德珍. 污泥太阳能干燥试验研究 [J]. 太阳能, 2007 (11): 24-26.

Zhang Yunyue, Zhao Lei, Chen Dezhen. *Solar Energy*, 2007(11): 24-26.

[22] 赵磊, 陈德珍, 王中慧. 太阳能温室污泥主要干燥参数的变化[J]. 太阳能学报, 2009, 30(9): 1264-1270.

Zhao Lei, Chen Dezhen, Wang Zhonghui. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2009, 30(9): 1264-1270.

[23] 董汉军. 太阳能热利用在城市污泥粪渣干燥中的应用 [J]. 太阳能, 2009(11): 18-21.

Dong Hanjun. *Solar Energy*, 2009(11): 18-21.

[24] 王明根, 方跃飞, 袁福平, 等. 用太阳能和高温热泵的城市污泥热干化系统技术研究[J]. 干燥技术与设备, 2007, 5(6): 311-314.

Wang Minggen, Fang Yuefei, Yuan Fuping, et al. *Dry Technology & Equipment*, 2007, 5(6): 311-314.

[25] 朱晓琬. 太阳能辅助桨叶式干燥机干燥污泥的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.

Zhu Xiaowan. Study on sewage sludge drying in paddle dryer with solar assisted[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.

[26] Luboschik U. Solar sludge drying—Based on the IST process[J]. *Renewable Energy*, 1999, 16(1-4): 785-788.

[27] Celma A R, Cuadros F. Energy and exergy analyses of OMW solar drying process[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(3): 660-666.

[28] Salihoglu N K, Pinarli V, Salihoglu G. Solar drying in sludge management in Turkey[J]. *Renewable Energy*, 2007, 32(10): 1661-1675.

[29] Bokhoven T P, Van Dam J, Kratz P. Recent experience with large solar thermal systems in the Netherlands[J]. *Solar Energy*, 2001, 71(5): 347-352.

[30] Mathioudakis V L, Kapagiannidis A G, Athanasoulia E, et al. Extended dewatering of sewage sludge in solar drying plants [J]. *Desalination*, 2009, 248(1-3): 733-739.

[31] Slim R, Zoughaib A, Clodic D. Modeling of a solar and heat pump sludge drying system[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2008, 31(7): 1156-1168.

(责任编辑 吴晓丽)

本期完词填空答案

	玉			望	月	怀	远
菲	律	宾			桃	叶	渡
尔	金			洗			重
普	科		伤	心	太	平	洋
斯				革		平	
	红	光	满	面		安	
陆	海	潘	江		王	安	石
毅		青	红	皂	白		佛