

基于生态工程理论的北方电厂温排水余热综合利用

刘永叶¹, 刘森林², 陈晓秋¹

1. 环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100082
2. 中国原子能科学研究院, 北京 102413

摘要 基于国内温排水余热利用形式单一、总体利用效率不高的现状, 对中国核电站温排水余热的综合利用进行了初步研究。阐述了生态工程及生态设计的概念、相关原理及温排水余热综合利用工程与生态设计的结合点, 得出温排水余热利用生态设计的最终成果形式是一种以利用温排水余热为主要目的的静脉产业类生态(工业)园, 同时也是以核电厂及“优选利用途径”为核心的行业类生态(工业)园的结论。结合生态工程理论及生态设计的理念, 根据中国北方某典型电厂的厂址环境特征及其所在区域的环境条件、环境规划和工业企业现状及发展规划, 初步选定相应的“优选利用途径”为“海水淡化(RO(反渗透膜)法)”, 在此基础上, 完成了典型厂址余热综合利用方案的生态设计及方案评价。

关键词 温排水; 余热综合利用; 生态设计

中图分类号 X57

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.13.003

Comprehensive utilization of waste heat from thermal discharge based on ecological engineering theory

LIU Yongye¹, LIU Senlin², CHEN Xiaoqi¹

1. Nuclear and Radiation Safety Center of Ministry of Environmental Protection, Beijing 100082, China
2. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China

Abstract The nuclear power plants of today have a thermal efficiency of about 33%, so the balance of this energy must be discharged to the environment, and therefore the management of this waste heat to provide the minimum impairment to environmental quality is of great importance. With the rapid development of China's nuclear power industry, the negative thermal effect (i.e. thermal pollution) of waste heat emissions of thermal discharge from nuclear power plants has drawn increasing attention of the public. The best way to solve this problem is the beneficial use of waste heat. This paper investigates the comprehensive utilization of waste heat in the background that the approach to waste heat utilization is single and inefficient. The concept of eco-design, relevant principles and integration of waste heat utilization projects and eco-design are elaborated. It is concluded that the final form of eco-design of waste heat utilization is "Venous Industry Based Eco-industrial Parks", with the utilization of waste heat from thermal discharge as the main objective, and "Sector-specific Eco-industrial Parks", with the nuclear power plant and the "optimal utilization approach" as the core and foundation. According to the environmental characteristics, environmental planning, industry status and development planning of a typical nuclear power plant in northern China, the "Seawater Desalination (RO, reverse osmosis membrane)" was selected as the "optimal utilization approach", and combined with the concept of eco-design, the conceptual design of waste heat utilization scheme was completed, and the energy saving potential was estimated for the typical site (the first phase of the project) when taking full advantage of thermal discharge waste heat.

Keywords thermal discharge; comprehensive utilization of waste heat; eco-design

收稿日期: 2015-03-11; 修回日期: 2015-05-09

基金项目: 国家科技重大专项(2013ZX06002001)

作者简介: 刘永叶, 高级工程师, 研究方向为辐射防护与环境保护, 电子邮箱: liuyongye@chinansc.cn

引用格式: 刘永叶, 刘森林, 陈晓秋. 基于生态工程理论的北方电厂温排水余热综合利用[J]. 科技导报, 2015, 33(13): 22-26.

在当前的科技水平下,核电厂仅有 1/3 的热量转化成电能,剩余 2/3 的热量将以各种形式散失于环境中。随着核电厂址向“一址多堆”以及核电机组向大容量发展,核电厂循环冷却水(温排水)的直流排放,势必会有大量余热释放到自然水体,造成能源的浪费和可能的水体热污染,并将导致局部水体的水生态系统平衡失调,水生生物的生存受到威胁,水资源受到破坏。一般情况下,在局部海区,如果有比该海区正常水温高 4℃ 以上的温排水常年注入时,就会产生热污染的问题。滨海核电厂温排水的温度一般高于环境接纳水体温度 6~11℃。大量的温排水入海,局部海区就可能产生热污染。火电厂的热量转换效率虽然略高于核电厂(40%左右),但其余热排放总量非常巨大。电力工业冷却水(温排水)是目前水体热污染的主要来源。因此,亟需开展电厂温排水热污染控制的深入研究,借鉴各国余热利用的经验,找出适合中国国情的余热综合利用途径,这也是目前解决电厂温排水余热这个电力建设及环境保护中棘手问题的根本方法。

电厂温排水(循环冷却水)余热的综合利用可以从源头上减量排放废热^[1]。在温排水排至自然水体前尽可能取出部分或大部分余热,使温排水降低温度后再排入水域,将极大地降低电厂温排水对水域环境的热影响。中国电厂循环冷却水余热利用问题早有提出,但多属个例,其中多集中于北方地区利用废温水进行水产养殖、农作物栽培;还有用于港口、工业取水口融冰缓冰的个案。利用形式比较单一、利用率低下,属于低水平利用^[2]。为此,要较为全面地考察电厂温排水余热利用的国内、外现状,系统地、多学科地探索余热利用的途径。本文基于这一现状,结合生态工程理论,以中国北方某典型电厂的厂址环境特征及其所在区域的环境条件、环境规划和工业企业现状及发展规划,进行温排水余热综合利用方案的生态设计的初步尝试。

1 生态工程与温排水余热的综合利用

1.1 生态工程理论与生态设计

自 1962 年美国著名生态学家 Odum 提出生态工程概念,20 世纪 80 年代马世骏明确其研究对象、原理和初步方法以来,生态工程已成为国际可持续发展领域以及产业革命的一门新兴学科。生态工程就是应用生态系统的物种共生与物质循环再生等功能原理,结合系统工程方法所设计的多层利用的工艺系统。简单地说,生态工程就是运用生态学中的物种共生及物质循环再生等原理和系统优化方法,实现物质多层利用的一种工程体系^[3-5]。更概括地说,模拟生态系统原理的系统工程体系就是生态工程。无论哪种定义,实际上生态工程的基本思想就是在不增加或少增加系统外部物质和能量输入的前提下,充分挖掘系统内部的生态潜力,获得尽可能大的和持久的经济效益或生态效益。

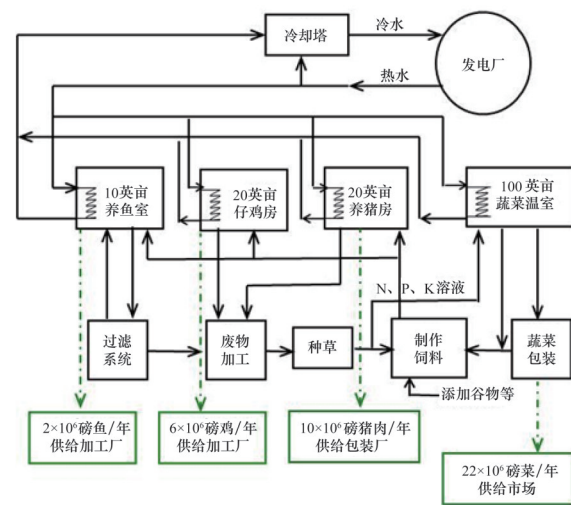
生态设计是伴随生态工程理论的发展而出现的,一系列生态工程的付诸实施使生态设计的概念日趋清晰。关于生

态设计的定义,Ryn 和 Cown 界定为:任何与生态过程相协调,尽量使其对环境的破坏影响达到最小的设计形式都称为生态设计^[6]。生态工程与传统工程的区别在于:传统工程是人为的结构和过程来取代自然,而生态工程则是利用自然的结构和过程的认识规律来设计的。生态设计提供了一个自然与人类文明相连接的平台,在立足现有成果的基础上,需要将生态设计的理念和思想注入到更多的领域,如资源回收与利用、清洁能源利用模式的设计、产业链设计等领域,在这些领域探索和实践如何采用当代科技强大的技术手段将自然系统和人工系统设计为相互融合的复合体。

1.2 温排水余热利用的生态设计

根据生态工程理论,电厂温排水余热利用的生态设计过程是结合具体厂址区域的经济、社会和环境特征,以及温排水的物理化学性质,在现有利用实践的基础上进行设计,并根据技术可达性,进行不断修改和完善的过程^[7]。

美国学者 Bread 提出的综合利用大型发电厂温排水余热的方法(图 1)^[8],就是根据生态工程原理设计的温排水余热综合利用的方案,它是一种值得借鉴的利用模式。国内、外(火电厂或核电厂)温排水余热利用的实践表明,建温室、大棚等农业利用方式以及水产品(海产品)养殖确实有良好的经济效益。从热污染控制的角度看,这种偏生态农业类型的余热利用工程,其效用并不高,排放大量温排水的核电厂仍然需要配套建设冷却塔或采取其他闭式循环冷却方式。因此,应该优先考虑余热利用量较大的工业途径作为“优选利用途径”。必要时,利用热泵技术提升余热品位,拓展应用领域,提升其使用价值。



1 英亩=0.405 hm², 1 磅=0.454 kg

图 1 电厂余热综合利用的生态工程体系

Fig. 1 Ecological engineering system of the utilization of power plant waste heat

参考国家环境保护总局 2007 年发布的《HJ/T 409—2007 生态工业园区建设规划编制指南》(以下简称《指南》),温排水余热利用生态设计的最终成果形式就是建立一个以电厂

及其最终选定的“优选利用途径”为核心,以利用温排水余热、保护环境为目的,运用先进的技术,通过物质和能量的集成,在更多同类的热用户和相关热用户间建立共生关系,在有限的空间内实现温排水余热的最大利用率,同时实现各个热用户产生的二次废物的再利用和资源化的生态(工业)园。按《指南》中对各类生态工业园的定义,它应该是一种以利用温排水余热为主要目的的静脉产业类生态(工业)园,同时也是以核电厂及“优选利用途径”为核心的行业类生态(工业)园。

2 余热综合利用方案的生态设计研究

以中国北方某典型核电厂(以下称NPP)一期工程为例,进行温排水余热综合利用的方案设计及初步评价研究。

2.1 与余热利用方案设计相关的厂址概况

NPP是一座滨海核电站,厂址北、西、南3面临海,东侧与陆地接壤。目前,NPP厂址半径5 km范围内没有工矿企业。厂址半径15 km范围内仅有少量工矿企业,主要从事海产品、食品、海盐等生产和加工,此外还有红砖生产企业、液化气站和加油站等。距厂址直线距离约3.6 km处有一个盐田。厂址区域总体上以农业为基础,重点发展养殖业和瓜果蔬菜种植及农副产品加工业等。厂址半径15 km范围海域内的养殖作业方式主要有围塘养殖、底播养殖和闸式养殖,养殖品种主要是贝类和海参、海蜇。

NPP一期工程4台机组运行时,夏季取排水流量为220 m³/s,冬季取排水流量为176 m³/s,电厂循环冷却水排放口的温升约为8.2℃,循环冷却水温度的多年平均值为19.1℃。按冬、夏季10%累积频率的最高表层水温(分别为1.0℃和25.2℃)计,则电厂循环冷却水的温度范围为9.2~33.4℃。

2.2 余热综合利用的初步方案

根据NPP的厂址环境特征及其所在区域的环境条件、环境规划和工业企业现状及发展规划,以及电厂设计阶段计划的余热利用途径,初步选定“海水淡化(膜法)”工艺过程为余热综合利用的“优选利用途径”,结合生态设计的理念,在此基础上设计完成余热综合利用初步方案,详见图2。

图2所示方案具体如下。

编号(1):根据海水淡化工艺对取水水质的具体要求及其与温排水排放口的相对位置,可以选择将温排水直接引入海水淡化系统或仅利用其中赋存的热量。

编号(2):鉴于该核电厂址设计阶段根据取水海域的水质特点,拟选用膜法海水淡化工艺,而反渗透膜工艺对进水温度有一定的要求,取水水温过低时,海水淡化系统的效率将明显降低,因此可回用温排水余热用来提高海水淡化效率,节约成本。该工艺过程的原设计水温为8~28℃,由于NPP循环冷却水温度的多年平均值为19.1℃,温度范围为9.2~33.4℃。因此,在直接以温排水作为该海水淡化系统的取水水源或仅利用其中赋存的热量时,基本不需要采取温度提升措施。

编号(3):由于距厂址直线距离约3.6 km处有一个盐田,故可将海水淡化过程的副产物——浓盐水就近用于制盐,这样不仅可以避免浓盐水排放对周围海洋生物的不利影响,而且由于进入盐田的海水含盐浓度高,可以实现工业化制盐,使制盐成本得以大幅度降低。

编号(4):此处的“化工产品生产”主要指利用制盐母液或浓盐水生产溴素、氯化钾、氯化镁、硫酸镁等产品。据报道,天津的一些企业在淡化海水的同时,会提取来自海洋的溴、镁、钾等矿物质,并进一步生产氯化钾、氯化镁、硫酸镁等化工产品^[9]。

编号(5):当温排水需要提升热品位才能满足各种利用途径对水温的需求时,可利用热泵技术,通过消耗1份的驱动能(电能),最终获取3~5倍于驱动能的热量输出。

编号(6):由于该厂址位于中国北方地区,因此冷季有迫切的供暖需求。此时温排水余热可作为厂址区域室内采暖的热源,可用80℃左右的热水通过散热片供热,也可用45℃左右的水通过地板或暖风机散热供暖。这2种温度水平的采暖用水均可通过温排水水源热泵对冷却水水温略加提升获得。采暖用水可以用海水淡化处理后得到的淡水作为热量输送的介质。

另外,还可用冷却水余热制取生活热水,以用于该厂址工作区及生活区的洗浴(20~40℃),餐具、炊具、水果、蔬菜及其他食物的清洗(一般20~40℃,餐具消毒用热水温度约100℃),衣物洗涤(30~40℃)及地板、家具、玻璃擦洗等室内卫生用水(20~40℃)。

编号(7):由于NPP将建设污水处理站,主要处理厂区办公室、食堂、值班室等场所的非放射性的废水、洗涤水和淋浴水,设计处理量为360 m³/d,采用周期循环活性污泥法中水处理工艺处理生活污水,而活性污泥法对厂区生活污水进行生物处理时,必须要保证原污水的水温在适当的范围内,尤其是在冷季,需要通过适当增温以保持污泥的活性,保证出水水质不受影响。

编号(8):海产品养殖是目前温排水余热利用实践中的主流利用方式之一,国内外都有大量相关利用的报道。海产品养殖的最适水温范围因养殖品种及其生长阶段而异。

编号(9):热泵干燥是利用热泵从低温热源中吸收热量,将其在较高温度下释放从而对物料进行干燥的方法。相较于传统干燥方法(如日光干燥、热风干燥、冷冻升华干燥等),热泵干燥具有诸多优点,可应用于木材干燥、食品干燥、农副产品加工等领域,一些药材、陶瓷坯料及一些化工、轻工产品也可以采用低温的热泵干燥法进行干燥^[10]。

编号(10):鉴于NPP厂址半径15 km范围海域内有若干海产养殖点,各种海洋鱼类、贝类等海产品的含水率一般为75%~80%,为了实现海产品的长期贮藏及方便运输的目的,必须对其进行干燥。因此,结合热泵干燥技术的海产品干燥及加工过程可作为该厂址温排水余热利用途径之一。

编号(11):此处的农副产品及外来产品的干燥、加工对

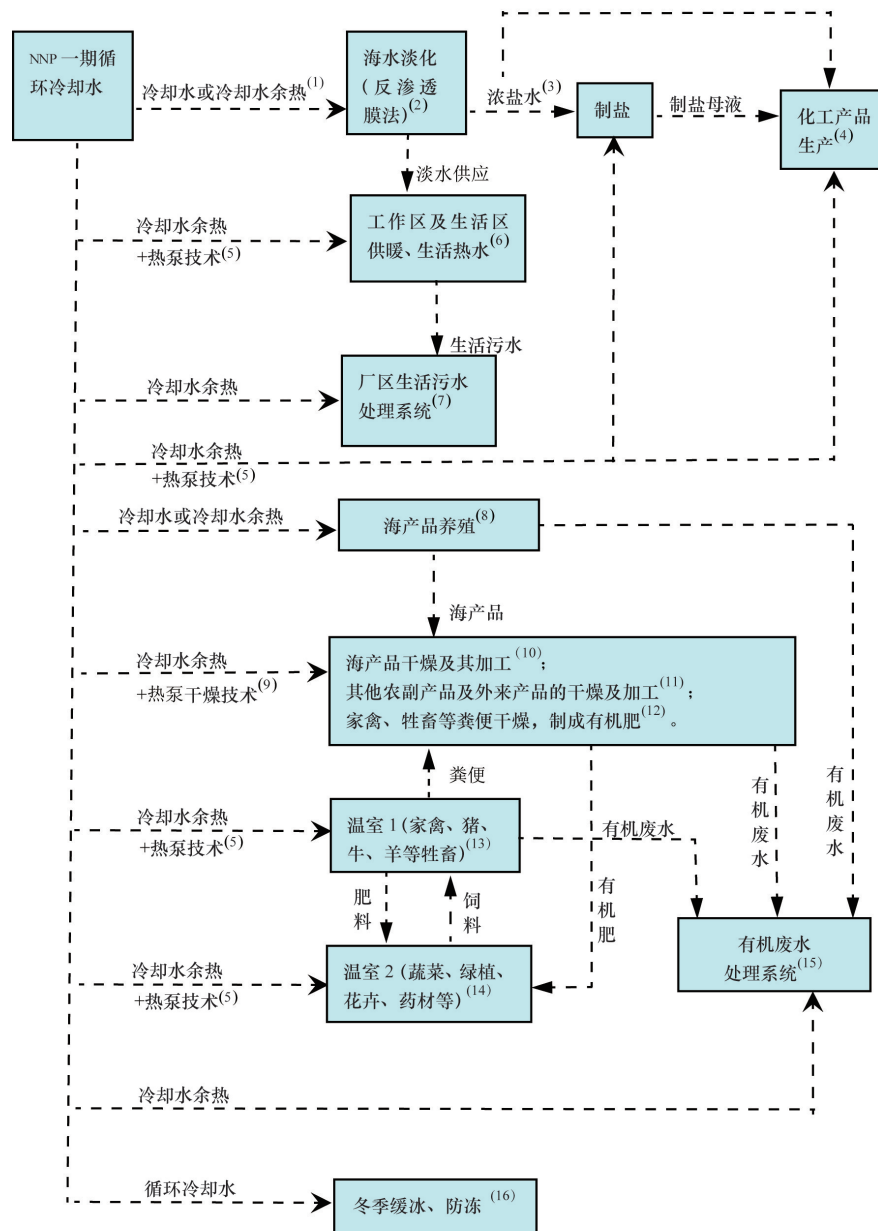


图2 NNP温排水余热综合利用方案示意

Fig. 2 Schematic diagram of waste heat utilization of thermal discharge from NNP

象包括农作物、药材、木材、茶叶等。热泵干燥工艺的控制温度因被干燥对象及干燥的不同阶段而异。

编号(12):通过利用热泵技术和温排水余热,对温室1中的家禽、牲畜等粪便干燥及加工处理,可制成有机肥料,回用于温室2中的蔬菜种植,或者直接出售有机肥料。

编号(13):鉴于NNP厂址区域总体以农业为基础,且厂址区内地势平坦开阔,起伏不大,可考虑在厂区(高压输电线下)的空地上或厂址附近建大规模温室。设温室1主要用于养殖家禽和牲畜,温室2主要用于种植蔬菜、绿植、花卉及名贵药材。冷季时,可利用温排水余热和热泵技术对家禽及各种牲畜所在的温室(温室1)进行供暖加热。家禽及牲畜粪便可直接用作肥料施于温室2(蔬菜等有机食品),或经干燥、加

工处理制成有机肥料再施用于温室2(蔬菜等有机食品),或直接出售有机肥料。

编号(14):温室蔬菜等的种植也是目前温排水余热利用实践中的主流利用方式之一,国内外都有大量相关利用的报道,其适宜的温度因种植品种及其生长阶段而异,一般在20~30℃左右。

编号(15):有机废水处理系统主要处理来自温室1(家禽、牲畜等)、海产品养殖(封闭式)及海产品、农副产品加工过程的有机废水。该系统产生的有机污泥也可经处理后制成有机肥。

编号(16):由于NNP厂址附近海域每年冬季都有海冰出现,因此冰冻期必要时可引一部分温排水化冰防冻。

3 余热综合利用方案评价

鉴于本余热综合利用方案是基于生态工程理论的初步尝试,其中涉及的各项余热利用途径的具体设备选型、生产工艺的特征参数等尚无法确定,目前还无法按照文献[7]中建立的“温排水余热利用方案的评价指标”进行评价。以下仅对本方案中“反渗透膜法海水淡化”这一利用途径的节能减排潜力进行初步估算。

NNP一期工程配套的海水淡化原设计规模为15000 m³/d,可以满足电厂正常运行的生产和生活用水。该海水淡化系统的取水量为40000 m³/d。由于采取的反渗透膜法海水淡化技术,电站温排水的出水温度基本在反渗透膜法的适宜温度范围内,无需经热泵技术等提升热品位。因此,若按取水量40000 m³/d,循环水温差8.2℃计,则回收利用的热量为5×10¹¹ kJ/a。

假设这部分热量由燃烧标煤取得,据环保部门估算,减少1 t标准煤的燃烧,便可少排放CO₂ 2620 kg、SO₂ 20 kg、烟尘15 kg、灰渣260 kg。按标准煤燃烧值2.9×10⁴ kJ/kg计,该部分回收的热量相应的节能减排量为:节约标煤量为1.7万t/a;减少CO₂排放量4.454万t/a;减少SO₂排放量340 t/a;减少烟尘255 t/a;减少灰渣4420 t/a。

15000 m³/d的海水淡化规模主要是满足本电厂一期工程正常运行的生产和生活用淡水量,未考虑淡化海水的外售和其他用途。由于产水规模较小,以及反渗透膜(RO)法海水淡化工艺特点,其余热利用量不高,仅占温排水余热总量的0.23%。如上述温排水余热被全部利用(按全年平均取排水流量200 m³/s计),则可节约标煤约739万t/a,减少CO₂排放量约1936万t/a,减少SO₂排放量约15万t/a,减少烟尘约11万t/a,减少灰渣约1269万t/a。

另外,该厂址温排水余热的综合利用可进一步缩小3℃温升包络区的面积,减小厂址海域生态系统受扰动的范围。

4 结论

1) 电厂温排水的余热排放对受纳水体造成的负面热影响已日益引起社会关注。温排水余热综合利用可以从源头上减少废热排放,对电厂水域生态环境保护具有重要意义;同时余热回用又使电厂节能提效,实践了废热能“减量化、再利用、资源化”和“资源再利用”的循环经济理念。

2) 基于生态工程理论,以中国北方某典型核电厂(NNP)一期工程为例,进行温排水余热综合利用方案的概念设计及初步评价。南、北方核电厂址由于其环境特性,形成了温排水余热利用明显的地域性特点。北方核电厂址由于气候寒冷,冬季较长,对热能资源利用的要求较为迫切,因此,通常会出于自身的需要,自发地进行温排水余热利用的实践。相比之下,南方厂址余热利用的主动性不高,因此需要管理部门和相关部门大力支持及相关优惠政策刺激。

3) 电厂温排水余热利用主要具有以下特点:要求热用户比较集中,需要合理规划各用热设施或工艺厂房等的布局;

电厂与热用户相关设施的建设必须有计划地衔接起来;热用户的基建投资(包括输水管道及温度提升设备——热泵等)费用较高等。这些问题由于跨行业、跨部门,难以单独解决,需要在能源管理体制上采取切实有力的措施,以早日实现电厂温排水的余热综合利用系统作为实实在在的热污染控制措施,与电厂主体工程实现“同时设计、同时施工、同时投入使用”。

4) 建议开展国内温排水余热潜在利用途径的广泛、深入的调研工作,建立各种利用途径的水温(或热品位)、水质要求,单位产出余热利用量,副产品、污染物等相关信息的数据库,在此基础上进行余热综合利用方案的优化设计研究。

参考文献(References)

- [1] 刘永叶, 刘森林, 陈晓秋. 核电站温排水的热污染控制对策[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(增1): 191-196.
Liu Yongye, Liu Senlin, Chen Xiaoqiu. Control countermeasures about thermal pollution of thermal discharge from nuclear power plants[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(Suppl 1): 191-196.
- [2] 贺益英, 赵懿珺. 电厂循环冷却水余热高效利用的关键问题[J]. 能源与环境, 2007(6): 27-29.
He Yiyang, Zhao Yijun. The key issue of efficient utilization of cooling water waste heat of power plant[J]. Energy and Environment, 2007(6): 27-29.
- [3] 马世骏. 生态工程——生态系统原理的应用[J]. 农业新技术, 1984(1): 20-22.
Ma Shijun. Ecological engineering: Application of the ecosystems principle[J]. New Rural Technology, 1984(1): 20-22.
- [4] Mitsch W J, Lefevre J C, Bouchard V. Ecological engineering applied to river and wetland restoration[J]. Ecological Engineering, 2002, 18: 529-541.
- [5] Bergen S D, Bolton S M, Fridley J L. Design principles for ecological engineering[J]. Ecological Engineering, 2001, 18(2): 201-210.
- [6] 汪毅. 生态设计理论与实践[D]. 上海: 同济大学, 2006.
Wang Yi. Theory and practice of ecological design[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [7] 刘永叶, 刘森林, 陈晓秋. 核电厂温排水余热综合利用方案设计的初步研究[J]. 电力科技与环保, 2012, 28(2): 48-51.
Liu Yongye, Liu Senlin, Chen Xiaoqiu. Preliminary study on the design of comprehensive utilization scheme of waste heat in thermal discharge of nuclear power plant[J]. Electric Power Environmental Protection, 2012, 28(2): 48-51.
- [8] 金岚, 李平衡, 刘伟, 等. 水域热影响概论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993: 196.
Jin Lan, Li Pingheng, Liu Wei, et al. Introduction of the heat influences to the waters[M]. Beijing: Higher Education Press, 1993: 196.
- [9] 张宁, 苏营营, 苏华, 等. 海水淡化中浓海水的综合利用研究[J]. 海洋科学, 2008, 32(6): 85-88.
Zhang Ning, Su Yingying, Su Hua, et al. Review on the comprehensive utilization of concentrated seawater in desalination industry[J]. Marine Sciences, 2008, 32(6): 85-88.
- [10] 刘贵珊, 何建国, 韩小珍, 等. 热泵干燥技术的应用现状与发展展望[J]. 农业科学研究, 2006, 27(1): 46-49.
Liu Guishan, He Jianguo, Han Xiaozhen, et al. Application situation and development prospect of drying by heat pump[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2006, 27(1): 46-49.

(责任编辑 王媛媛)