

典型玉米深加工企业物能消耗与环境排放分析

高磊¹, 任南琪¹, 陈兆波², 王爱杰¹, 张露思¹

(1. 哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境重点实验室, 150090 哈尔滨, ctmg10810@yahoo.com.cn;

2. 哈尔滨工程大学 材料科学与化学工程学院, 150090 哈尔滨)

摘要:为减少环境压力、实现玉米深加工行业可持续发展,选取能够代表中国玉米深加工行业平均水平的某企业作为研究对象,利用物质流分析法对生产过程的3个工段物质代谢情况进行分析,构建出各工段生产代谢模型.根据物质流分析指标计算公式,计算该企业的资源能源利用指标、污染物产生指标和物质平衡指标,具体数据如下:单位产品耗水量为 $5.4 \text{ m}^3/\text{t}$ 、单位产品蒸汽消耗量为 $3.94 \text{ m}^3/\text{t}$ 、单位产品耗电量为 $388 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{t}$ 、综合废水产生量为 $11\,139.7 \text{ m}^3/\text{d}$ 、单位产品废水产生量为 $14.78 \text{ t}/\text{t}$ 、单位产品废气产生量为 $0.005 \text{ t}/\text{t}$ 、单位产品固体废弃物产生量为 $0.123 \text{ t}/\text{t}$ 、冷却水循环率为 98.9% 、资源利用效率为 15.3% .据此提出企业节能减排的改进方案,促进企业提高生产系统的物能利用率.

关键词:玉米深加工;物质流分析法;物质能量代谢分析;环境排放分析

中图分类号: X322 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)02-0061-05

Energy consumption and environment emissions analysis of a typical corn deep processing enterprise

GAO Lei¹, REN Nan-qi¹, CHEN Zhao-bo², WANG Ai-jie¹, ZHANG Lu-si¹

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, ctmg10810@yahoo.com.cn; 2. College of Material Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, 150090 Harbin, China)

Abstract: To reduce environmental pressure and realize sustainable development of corn deep processing industry, a corn deep processing enterprise with average scale in China was selected to study in this paper. The metabolic models for the production of the corn deep processing enterprise were established using Material Flow Analysis Method. The material and energy consumption indicators, waste and emission indicators and material balance indicators were calculated according to the formula of MFA index, and the results were shown as follows: water consumption per unit of product is $5.4 \text{ m}^3/\text{t}$, steam consumption per unit of product is $3.94 \text{ m}^3/\text{t}$, electricity consumption per unit of product is $388 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{t}$, wastewater generation is $11\,139.7 \text{ m}^3/\text{d}$, wastewater generation per unit of product is $14.78 \text{ t}/\text{t}$, air emission per unit of product is $0.005 \text{ t}/\text{t}$, solid waste generation per unit of product is $0.123 \text{ t}/\text{t}$, recirculating cooling water efficiency is 98.9% , and resource utilization rate is 15.3% . Based on the results, the strategy of enhancing material and energy utilization efficiency and reducing the environment pressure could be proposed.

Key words: corn deep processing; Material Flow Analysis; material and energy consumption; environment emissions

收稿日期: 2010-10-19.

基金项目: 国家创新研究群体基金资助项目(50821002); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07207-005-003); 国家自然科学基金资助项目(50908062); 哈尔滨市青年创新人才基金资助项目(2008RFQXS023).

作者简介: 高磊(1981—),女,博士研究生;
任南琪(1959—),男,博士生导师,中国工程院院士;
王爱杰(1972—),女,教授,博士生导师.

玉米深加工企业^[1-2]大部分分布在东北和华北,二者均属于较缺水地区.2007年,玉米深加工主要产品年耗水量达 $69\,630 \text{ 万 m}^3$ ^[1],用水量大导致废水排放量也大.同时,由于玉米深加工产品是在水中通过微生物发酵提取精制而成,废水中有机物质量浓度很高.因此,大部分玉米深加工企业不仅消耗大量的玉米和水,还会产生数量巨大的

废弃干物质和高浓有机废水。

物质流分析法 (Material Flow Analysis) 是在 20 世纪 90 年代末, 以工业代谢理论为基础, 由德国 Wuppertal 研究所、日本国立环境研究所共同开发的。是在经济系统中, 对物质 (包括能源和资源) 的流动方向和数量进行定量分析的一种方法。是以工业代谢理论为基础, 对进入、通过和流出一个系统的物质和能量进行定量分析, 并分析一个生产系统内, 原材料获取、产品生产、消费、循环利用和处理处置过程中所产生的特定环境影响大小的方法^[2-6]。目前对玉米深加工企业的研究主要集中在清洁生产审核和生态工业产业链的构建等方向^[7], 利用物质流分析方法对玉米深加工企业的生产系统进行分析并从中找出关键技术点的研究很少。

为此, 选取了一个能够代表全国平均水平的玉米加工能力为 30 万 t/a 的典型企业作为研究对象, 将玉米深加工生产过程当作一个系统, 生产过程所需的玉米、水、辅料等原材料及能源属于输入项, 输出项包括产品、污染物等流出生产系统之外的所有物质。利用物质流分析法构建工段基础的物质代谢模型, 分析该玉米深加工企业各工段的物质代谢情况, 初步得到物质利用、污染物产生和物质平衡 3 部分共 9 个指标的计算结果, 力图找到该企业实现生产“低能、低耗、高产、减排”的有效途径, 推动行业可持续发展。

1 研究目标、数据采集与研究方法

1.1 研究目标与范围确定

玉米深加工是以玉米和水为主要原料, 通过浸泡、破碎分离等技术获得胚芽、玉米皮和蛋白粉等原料, 经洗涤获得玉米淀粉浆, 再进一步糖化制成淀粉糖或者发酵制取氨基酸等产品的过程^[1]。本研究的系统边界范围限制在玉米深加工企业生产阶段, 即只考虑生产过程各工艺段的资源与能源消耗和废弃物排放, 其他诸如原材料获取加工、运输销售等阶段暂不列入考虑范围。

该企业的生产工艺过程主要分为 3 个工艺段, 即玉米淀粉工段、葡萄糖浆工段和麦芽糊精工段。生产消耗的能源和资源包括: 能源消耗, 主要为电力消耗; 资源消耗, 主要是玉米、水、盐酸、液化酶和辅料等。研究这 3 个工段的输入、输出和转化特征, 对于分析该企业的资源能源浪费和环境污染的根源具有重要意义。

1.2 数据采集

采用的基础数据来自所选企业的生产统计和

环境监测数据。数据的覆盖范围包括生产时消耗的各种原料 (玉米、水、辅料等) 及生产过程中产生的产品和各种废弃物。

1.3 研究方法

物质流分析指标可以表述一个系统的资源投入、回收、废弃物生成及废弃物循环利用的情况。从研究循环经济的角度, 量化地描述资源消耗、废弃物产生及再利用和资源化, 以及同人类经济活动之间的关系。本研究在参照欧盟经典的物质流分析指标基础上, 结合《中华人民共和国清洁生产标准》中的指标和玉米深加工企业的实际情况, 采用了 3 大类指标, 即资 (能) 源利用指标、污染物产生指标和物质平衡指标^[8-14]。

1) 资 (能) 源利用指标。包括单位产品耗电量、单位产品耗水量、单位产品蒸汽消耗量。

单位产品耗电量是指每生产 1 t 产品所耗用的电量, 公式如下:

$$E_d = \frac{E_i}{Q}$$

式中: E_d 表示单位产品耗电量, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{t}$; E_i 表示一定的计量时间内生产过程中耗电量总和, $\text{kW} \cdot \text{h}$; Q 表示一定计量时间内企业产品的总产量, t。

单位产品耗水量是指每生产 1 t 产品所耗用的水量, 公式如下:

$$V_{wi} = \frac{V_i}{Q}$$

式中: V_{wi} 为单位产品耗水量, m^3/t ; V_i 表示一定计量时间内生产过程的用水量, m^3 。

单位产品蒸汽消耗量是指每生产 1 t 产品所消耗的蒸汽量。公式如下:

$$S_d = \frac{S_i}{Q}$$

式中: S_d 为单位产品蒸汽消耗量, t/t ; S_i 表示一定计量时间内生产过程耗用的蒸汽量, t。

2) 污染物产生指标。包括综合废水产生量、单位产品废水产生量、单位产品废气产生量、单位产品固体废弃物产生量。

综合废水产生量是指一定时间内, 玉米深加工生产各部分 (包括综合利用、废水治理等) 废水之和 (扣去循环用水量), 即

$$V_w = V_1 + V_2 + \dots + V_i - V_i'$$

式中: V_w 表示一定计量时间内综合废水产生量, t; V_1, V_2, \dots, V_i 表示一定计量时间内各工段废水产生量, t; V_i' 表示一定计量时间内重复用水量, t。

单位产品废水产生量是指每生产 1 t 产品所产生的废水量。

单位产品废气产生量是指每生产 1 t 产品产生的废气量。

单位产品固废产生量是指每生产 1 t 产品生成的固体废弃物的量。

3) 物质平衡指标. 主要包括冷却水循环利用率和资源利用效率。

冷却水循环利用率是指一定时间内冷却水循环利用量与用水总量之比。

资源利用效率是一定时间内产品的量与投入物质总量之比。

2 生产过程中各工段物质代谢模型构建

2.1 淀粉工艺段物料投入产出

淀粉工艺段即制取玉米淀粉的阶段,就是将玉米用温水浸泡,经过粗细研磨,分离出胚芽、纤

维和蛋白质,获得高纯度淀粉产品的过程^[15]。

由图 1 可知,淀粉阶段投入物质为 255 513.2 t/a,经过转化,输出中间产物淀粉乳 127 458 t/a,玉米浆 2 064 t/a,产品 123 265.4 t/a(包括蛋白粉、饲料、淀粉和粗玉米油)。中间产物与产品占输入物质的 79.2%,其余为流失物质。流失物质一部分是气相和液相损失物质,另外一部分是废弃物,包括淀粉生产过程中产生的废水,主要是蒸发冷凝水和地面冲洗水。固体废弃物主要是玉米处理过程产生的杂质。废气主要为 SO₂ 5.18 t/a、粉尘 43.71 t/a、正己烷 3.74 t/a。由于生产能力和工艺的原因,虽然有 32 778 t/a 的淀粉乳作为生产葡萄糖浆和麦芽糊精的原料被利用,仍有 94 680 t/a 的淀粉乳没能得到有效利用,玉米浆也没能实现有效利用,即有 74.6% 的中间产物没能获得有效利用。

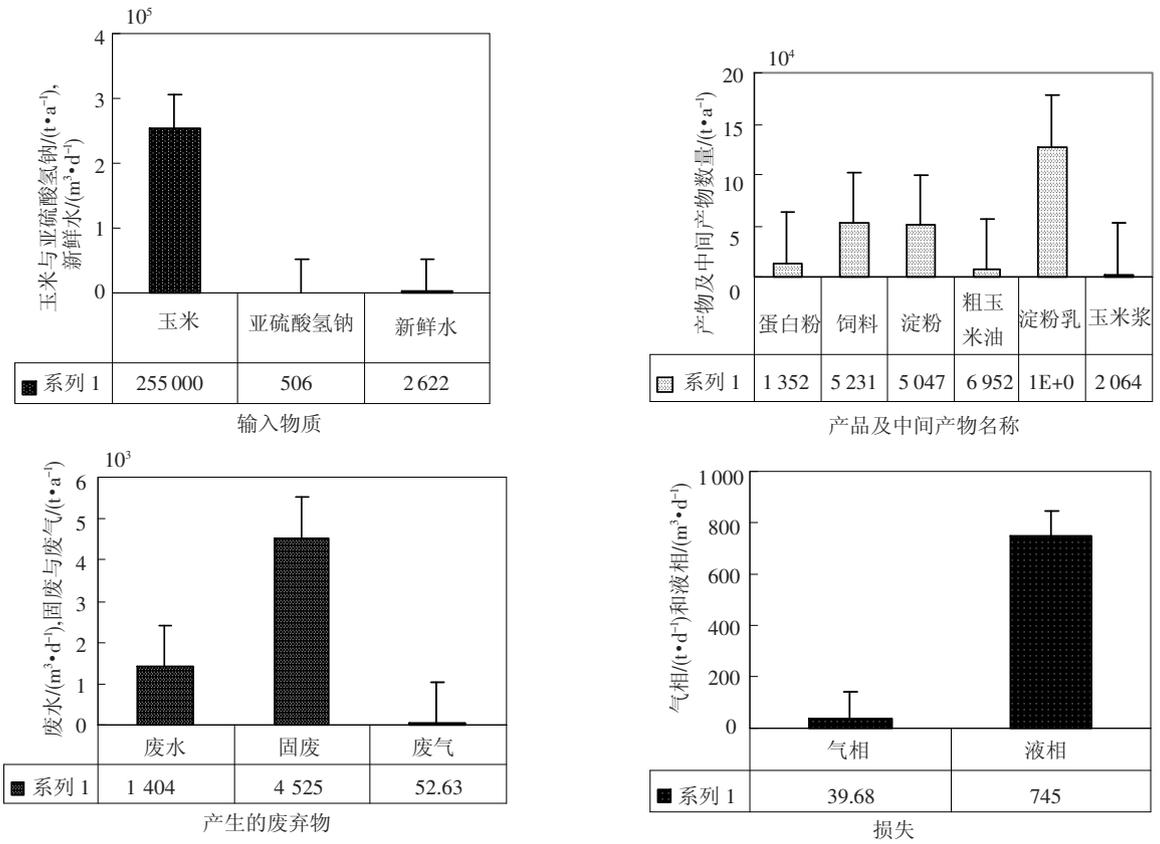


图 1 淀粉工段物质代谢模型

2.2 葡萄糖浆工艺段物料投入产出

葡萄糖浆工段是淀粉完全水解并经过结晶过程获得结晶葡萄糖的过程^[15]。

该工艺段的输入项物质有淀粉工段的中间产物淀粉乳、盐酸、氯化钙、碳酸钠、液化酶、糖化酶、活性炭和助滤剂等,得到的输出项为产品葡萄糖浆。同时输出的还有流失物质,包括生产过程中的废弃物和物质损失。在葡萄糖浆工段,物料利用率较高,废弃物排放量相对也较少(见图 2)。

2.3 麦芽糊精工段物料投入产出

麦芽糊精工段是以玉米淀粉为原料,经过酶法控制部分水解、脱色提纯、真空浓缩、喷雾干燥的生产过程^[15]。

该工艺段的输入项物质有淀粉工段的中间产物淀粉乳、盐酸、氯化钙、碳酸钠、糊化酶、活性炭、助滤剂等化学品,得到的输出项为产品麦芽糊精。同时输出的还有流失物质,包括生产过程中的废弃物和物质损失(见图 3)。

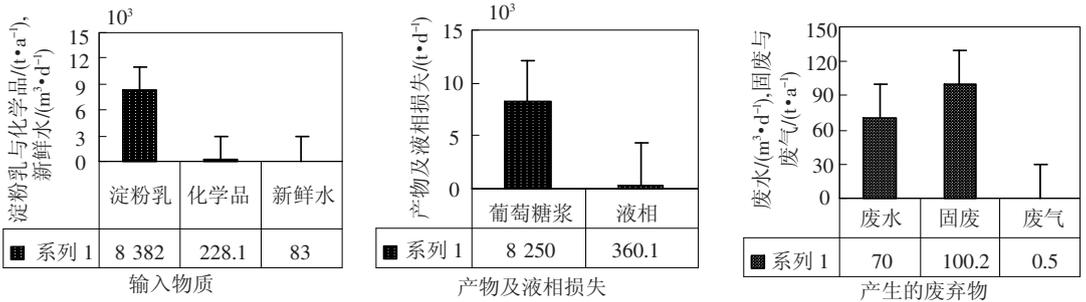


图 2 葡萄糖浆工段物质代谢模型

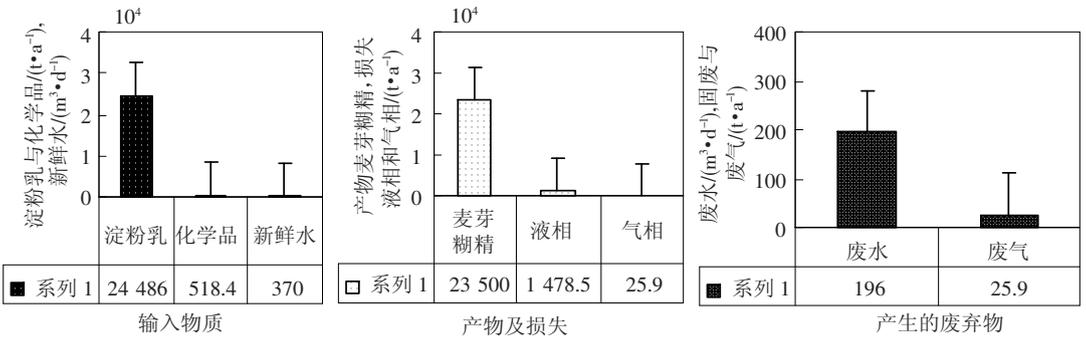


图 3 麦芽糊精工段物质代谢模型

3 物质能量利用与环境排放分析

根据 1.3 中的公式,可以得到表 1 的结果.表 2 列出了该企业固体废弃物的产生和处理状况.

将表 1 某典型企业单位产品物能消耗与环境排放的计算结果,与同类行业清洁生产标准进行比较可知:在资源与能源利用指标方面,单位产品耗电量为 $388 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{t}$,与三级清洁生产指标 $\leq 250 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{t}$ 相比还有很大差距;单位产品耗水量达到了三级清洁生产指标范围;单位产品蒸汽消耗量与国内领先企业的 $3.0 \text{ m}^3/\text{t}$ 产品相比仍有微小差距.说明该企业的资源能源利用指标在实施清洁生产、实现节能降耗方面还有很大的发展空间.

表 1 物质流分析指标计算结果

指标	数值
资源能源利用指标	
单位产品耗水量 $V_{\text{水}}/(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	5.4
单位产品蒸汽消耗量 $S_{\text{汽}}/(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	3.94
单位产品耗电量 $E_{\text{电}}/(\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{t}^{-1})$	388
污染物产生指标	
综合废水产生量 $V_{\text{w}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	11 139.7
单位产品废水产生量 $/(t \cdot t^{-1})$	14.78
单位产品废气产生量 $/(t \cdot t^{-1})$	0.005
单位产品固废产生量 $/(t \cdot t^{-1})$	0.123
物质平衡指标/%	
冷却水循环指标	98.9
资源利用效率	15.3

从表 2 可以看出,在环境影响方面该企业的固体废弃物利用率基本达到 100%,但是有相当

一部分的应用方式仅仅是初级利用,并没有达到深度利用的水平.

表 2 企业固体废弃物发生与处理情况

种类	数量/ $(t \cdot a^{-1})$	来源	处理方式
预净化杂质	9 000	玉米处理部门	运至城市垃圾场
煤渣	24 000	锅炉部门	运至建材厂
废污泥	100	污水处理部门	运至复合肥厂
废树脂	100.2	糖浆与麦芽糊精生产部门	厂家回收
废活性炭	500	糖浆与麦芽糊精生产部门	厂家回收

废水排放量达到国家废水排放的二级标准,但单位产品废水的 COD 质量浓度远远超过标准质量浓度,有机污染物过多,对环境危害依然很大.废气排放有 3 部分,一部分是锅炉烟气,主要组成是 SO_2 和烟尘,通过静电加高效脱硫除尘器处理,烟尘的去除率达 99%, SO_2 去除率超过 50%.第二部分是工艺废气,包括粉尘、 SO_2 和正己烷,这部分的废气排放符合大气污染物综合标准中的二级标准.最后一部分是异味气体和沼气.异味气体是所有同类企业都很难处理的一个问题,主要是淀粉干燥工序产生的玉米糊气味.沼气排放量大,达 $2 480 \text{ m}^3/\text{d}$,目前的处理方式是通过集气塔吸收后燃烧,没有实现有效利用.

由于该企业在年产量、生产规模、生产工艺和设备方面在全国处于较领先水平,清洁生产的技术方面也是国内领先,不难看出该行业国内大部分企业的资源消耗和环境排放均处于清洁生产三

级水平或者以下,几乎没有环境友好型企业。

4 讨 论

通过分析该企业生产过程3个工段的物质代谢情况及该企业物质能量代谢指标计算,可以提出如下几个方案:

1)在淀粉工段生成的中间产物利用率很低,玉米浆几乎没有得到利用。玉米浆既可以用于直接浓缩,然后掺入玉米纤维生产纤维饲料蛋白,也可以从其中提取饲料蛋白和菲汀。如果能够增产能开发谷氨酸等产品的生产工艺,可将淀粉工段产生的玉米浆和剩余的淀粉乳用做新工艺原料。

2)生产中产生的主要废弃物就是废水,废气和固体废弃物相对较少。因此,从生产源头减少废水产生量,控制废水水质是玉米深加工企业减少环境压力的重要任务。目前,该企业基本实现闭环工艺,但是在量化可控性上还没有提高,异常情况下也无法平衡补给,需要设定一个可量化、可自控并能逆流循环的稳定闭环工艺。

系统中的液相损耗很多,一些水随着产品带水损失,也有部分被烘干蒸发。对于浓缩蒸发产生的冷凝水经过冷却后仍然能够找到合适的地方进行利用,可以回流蒸汽,也可以经过冷却净化补充到工艺水中进行利用。

同时,应该实行严格的废水分流制度。将COD较高的废水排往厌氧处理系统中,而COD稍低的废水直接排往好氧处理系统,这样可以降低污水处理设施负荷与成本,保证处理设施的正常运行和出水效果。

3)为了在提高资源利用效率的同时减少恶臭气体的排放,对污水处理生成的沼气要进行有效利用。可以通过集气塔收集净化,然后送到职工食堂当作燃料,可以利用沼气进行发电。这样既避免了浪费大量清洁能源,又可以获得可观的经济效益。

4)生产玉米淀粉及各种副产品的烘干工段会产生大量的蒸汽,如果不加利用会导致大量水和热量的流失。如果采用蒸汽回收塔回收干燥机排放的蒸汽和热量,对玉米浸泡液进行加温,能够回收大量蒸汽和热能。该措施既节约能源,又减少了对大气的间接污染,起到了变废为宝、综合利用的作用。

5 结 论

本研究利用物质流分析法分析了某典型玉米深加工企业的生产过程工段水平的物质代谢情

况,构建出各工段生产代谢模型。根据物质流分析指标计算公式,计算出该企业的资源能源利用指标、污染物产生指标和物质平衡指标3部分9个指标。根据分析和计算结果,提出了企业节能减排的改进方案,从而促进企业提高生产系统的物能利用率,减少环境压力,实现可持续发展。

参 考 文 献:

- [1] 尤新. 玉米深加工发展主要成就、存在问题及今后发展方针[J]. 粮食加工, 2009, 34(4): 12-16.
- [2] 李娜. 啤酒生产过程物质能量代谢与环境影响评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [3] ADRIAANSE A, BRINGEZU S, HAMMOND A, *et al.* Resource flow—the material basis of industrial economies [R]. Washington, D C: World Resources Institute, 1997.
- [4] Environment Agency Japan. Quality of the environment in Japan 1992 [R]. Tokyo: Environment Agency Japan, 1992.
- [5] KLEIJN R. In = out; the trivial central paradigm of MFA [J]. Journal of Industrial Ecology, 2000, 3(2/3): 8-10.
- [6] 崔兆杰, 张凯. 循环经济理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [7] 王红. 吉林省玉米深加工产业循环经济模式研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [8] XIA C Y. Review on studies of economy-wide material flow analysis [J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(3): 415-421.
- [9] LIU J Z, WANG Q, GU X W, *et al.* Direct material input and dematerialization analysis of Chinese economy [J]. Resources Science, 2005, 27(1): 46-51.
- [10] XU M, ZHANG T Z. Material input analysis of China economic system [J]. China Environmental Science, 2005, 5(3): 324-328.
- [11] ZHOU G M, FENG D F, REN Y. Key instruments for circular economy: material flow analysis and material flow management [C] // Senior Workshop on Circular Economy and Materials Flow Analysis. Sino-Japan Cooperation Project, PRCEE/JICA/SJC, 2005.
- [12] GAO G K, ZHANG N J. Energy demand forecast for China and supply countermeasure [J]. Electric Power Technologic Economics, 2005, 17(3): 9-14.
- [13] 环境保护部. HJ 444—2008, 中华人民共和国清洁生产味精工业标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [14] 环境保护部. HJ 445—2008, 中华人民共和国清洁生产淀粉工业标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [15] 尤新. 玉米深加工技术[M]. 2版. 北京: 中国轻工业出版社, 2009. (编辑 刘 彤)