



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



普通高等教育“十三五”规划教材



面向 21 世纪 课程 教材

Textbook Series for 21st Century

The Principle of Food

食品工程原理

第 4 版

李云飞 葛克山 © 主编

Engineering



中国农业大学出版社

China Agricultural University Press





“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



普通高等教育“十三五”规划教材



面向 21 世纪课程教材

Textbook Series for 21st Century

食品工程原理

第 4 版

李云飞 葛克山 主编

中国农业大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

根据食品加工中的操作单元和所涉及的基础理论,本教材共分 12 章。其中前半部分重点论述了流体力学、传热学和热力学等基础理论,介绍了与之相关的食品加工工程原理;后半部分在论述传质学理论上,重点介绍了食品加工中的吸收、分离等与质量传递有关的工程原理。书中设置了大量的例题、思考题和习题等环节,并辅以二维码信息,有利于读者对各单元操作原理的理解和掌握。

本书除可作为食品科学与工程专业的教学教材或参考书外,也适于相关企业的工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

食品工程原理/李云飞,葛克山主编.—4 版.—北京:中国农业大学出版社,2018.8
ISBN 978-7-5655-2028-0

I. ①食… II. ①李…②葛… III. 食品工程学-教材 IV. TS201.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 104570 号

书 名 食品工程原理 第 4 版

作 者 李云飞 葛克山 主编

策划编辑 宋俊果 刘 军

责任编辑 郑万萍

封面设计 郑 川

出版发行 中国农业大学出版社

社 址 北京市海淀区圆明园西路 2 号

邮政编码 100193

电 话 发行部 010-62818525,8625

读者服务部 010-62732336

编辑部 010-62732617,2618

出 版 部 010-62733440

网 址 <http://www.caupress.cn>

E-mail cbsszs@cau.edu.cn

经 销 新华书店

印 刷 北京时代华都印刷有限公司

版 次 2018 年 8 月第 4 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

规 格 787×1 092 16 开本 25 印张 620 千字

定 价 59.00 元

本书中二维码 10-2,10-3,10-4,10-5,10-6,10-7 由北京东方仿真软件技术有限公司提供。

图书如有质量问题本社发行部负责调换

全国高等学校食品类专业系列教材 编审指导委员会委员

(按姓氏拼音排序)

- | | | | |
|-----|--------|-----|--------------|
| 毕 阳 | 甘肃农业大学 | 孟素荷 | 中国食品科学技术学会 |
| 陈 卫 | 江南大学 | 南庆贤 | 中国农业大学 |
| 陈复生 | 河南农业大学 | 蒲 彪 | 四川农业大学 |
| 陈绍军 | 福建农林大学 | 钱建亚 | 扬州大学 |
| 陈宗道 | 西南大学 | 石阶平 | 国家食品药品监督管理总局 |
| 董海洲 | 山东农业大学 | 史贤明 | 上海交通大学 |
| 郝利平 | 山西农业大学 | 孙宝国 | 北京工商大学 |
| 何国庆 | 浙江大学 | 孙远明 | 华南农业大学 |
| 贾英民 | 河北科技大学 | 田洪涛 | 河北农业大学 |
| 江连洲 | 东北农业大学 | 王 硕 | 天津科技大学 |
| 李洪军 | 西南大学 | 夏延斌 | 湖南农业大学 |
| 李新华 | 沈阳农业大学 | 谢笔钧 | 华中农业大学 |
| 李云飞 | 上海交通大学 | 谢明勇 | 南昌大学 |
| 林家栋 | 中国农业大学 | 薛长湖 | 中国海洋大学 |
| 刘金福 | 天津农学院 | 严卫星 | 国家食品安全风险评估中心 |
| 刘景圣 | 吉林农业大学 | 岳田利 | 西北农林科技大学 |
| 刘静波 | 吉林大学 | 赵丽芹 | 内蒙古农业大学 |
| 罗云波 | 中国农业大学 | 赵谋明 | 华南理工大学 |
| 马 涛 | 渤海大学 | 周光宏 | 南京农业大学 |

第4版编审人员

主 编 李云飞(上海交通大学)

葛克山(中国农业大学)

副主编 张 青(上海交通大学)

伍 军(北京农学院)

黄阿根(扬州大学)

编写者 (按姓氏拼音排序)

葛克山(中国农业大学)

黄阿根(扬州大学)

蒋玉梅(甘肃农业大学)

李 雁(华南农业大学)

李云飞(上海交通大学)

林德荣(四川农业大学)

刘天一(东北农业大学)

齐治国(甘肃农业大学)

宋立华(上海交通大学)

伍 军(北京农学院)

于殿宇(东北农业大学)

张 青(上海交通大学)

张佰清(沈阳农业大学)

周颖越(上海海洋大学)

主 审 徐文达(上海海洋大学)

第3版编审人员

主 编 李云飞(上海交通大学)

葛克山(中国农业大学)

副主编 张 青(上海交通大学)

伍 军(北京农学院)

黄阿根(扬州大学)

参编者 (按姓氏拼音排序)

蒋玉梅(甘肃农业大学)

李 雁(华南农业大学)

齐治国(甘肃农业大学)

宋立华(上海交通大学)

于殿宇(东北农业大学)

张佰清(沈阳农业大学)

周颖越(上海海洋大学)

主 审 徐文达(上海海洋大学)

第2版编审人员

- 主 编** 李云飞(上海交通大学)
葛克山(中国农业大学)
- 副主编** 张 青(上海交通大学)
伍 军(北京农学院)
黄阿根(扬州大学)
- 参编者** (按姓氏拼音排序)
蒋玉梅(甘肃农业大学)
李 雁(华南农业大学)
齐治国(甘肃农业大学)
宋立华(上海交通大学)
于殿宇(东北农业大学)
张佰清(沈阳农业大学)
周颖越(上海海洋大学)
- 主 审** 徐文达(上海海洋大学)

第1版编审人员

- 主 编** 李云飞 上海交通大学
葛克山 中国农业大学
- 副主编** 张 青 上海交通大学
伍 军 北京农学院
黄阿根 扬州大学
- 参编者** (按姓氏拼音排序)
- 胡 萍 天津商学院
蒋玉梅 甘肃农业大学
李喜载 福建农林大学
李 雁 华南农业大学
宋立华 上海交通大学
张佰清 沈阳农业大学
周颖越 上海水产大学
- 主 审** 徐文达

出版说明

(代总序)

时光荏苒,食品科学与工程系列教材第1版发行距今,已有14年。总计120余万册的发行量,已经表明了这套教材受欢迎的程度,应该说它是全国食品类专业教育使用最多的系列教材。

这套教材已成为经典,作为总策划的我,在再再版的今天,重新翻阅这套教材的每一科目、每一章节,在感慨流年如水的同时,更有许多思考和感激。这里,借写出版说明(代总序)的机会,再一次总结本套教材的编撰理念和特点特色,也和我挚爱的同行们分享我的感悟和喜乐。

第一,优秀的教材一定是心血凝成的精品,杜绝任何形式的粗制滥造。

14年前,全国40余所大专院校、科研院所,300多位一线专家教授,涵盖生物、工程、医学、农学等领域,齐心协力组建出一支代表国内食品科学最高水平的教材撰写队伍。著作者们呕心沥血,在教材中倾注平生所学,那字里行间,既有学术思想的精粹凝结,也不乏治学精神的光华闪现,诚所谓学问人生,经年积成,食品世界,大家风范。这精心的创作,和彼敷衍的粘贴,其间距离,岂止云泥!

第二,优秀的教材必以学生为本,不是居高临下的自说自话。

注重以学生为本,就是彻底摒弃传统填鸭式的教学方法。著作者们谨记“授人以鱼不如授人以渔”,在传授食品科学知识的同时,更启发食品科学人才获取知识和创造知识的思维与灵感。润物细无声中,尽显自由思想,彰耀独立精神。在写作风格上,也注重学生的参与性与互动性,接地气,说实话,深入浅出,有料有趣。

第三,优秀教材与时俱进、推陈出新,绝不墨守成规、原地不动。

首版再版再再版,均是在充分收集和尊重一线任课教师和学生意见的基础上,对新增教材进行科学论证和整体策划。每一次工作量都不小,几乎覆盖食品学科专业的所有骨干课程和主要选修课程,但每一次都不敢有丝毫懈怠,内容的新颖性,教学的有效性,齐头并进,一样都不能少。具体而言,此次再再版,不仅增

添了食品科学与工程最新理论发展,又以相当篇幅强调了食品工艺的具体实践。每本教材,既相对独立又相互衔接互为补充,构建起系统、完整、实用的课程体系。

第四,优秀教材离不开出版社编辑人员的心血倾注。

同为他人作嫁衣裳,教材的作者和编辑,都一样的忙忙碌碌,飞针走线。这套系列教材的编辑们站在出版前沿,以其炉火纯青的专业技能,辅以最新最好的出版传播方式,保证了这套教材的出版质量和形式上的生动活泼。编辑们的高超水准和辛勤努力,赋予了此套教材蓬勃旺盛的生命力。

这里,我也想和同行们分享以下数字,以表达我发自内心的喜悦:

第1版食品科学与工程系列教材出版于2002年,涵盖食品学科15个科目,全部入选“面向21世纪课程教材”。

第2版(再版)食品科学与工程系列教材出版于2009年,涵盖食品学科29个科目。

第3版(再再版)食品科学与工程系列教材将于2016年暑期出版(其中《食品工程原理》为第4版),涵盖食品学科36个科目,增加了《食品工厂设计》《食品分析》《食品感官评价》《葡萄酒工艺学》《生物技术安全与检测》等9个科目,调整或更名了部分科目。

需要特别指出的是,这其中,《食品生物技术导论》《食品安全导论》《食品营养学》《食品工程原理》4个科目为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材;《食品化学》《食品化学综合实验》《食品工艺学导论》《粮油加工学》《粮油加工学实验技术》《食品酶学与工程》6个科目为普通高等教育农业部“十二五”规划教材;《食品生物技术导论》《食品营养学》《食品工程原理》《粮油加工学》《食品试验设计与统计分析》为“十五”或“十一五”国家级规划教材。

本套食品科学与工程系列教材出版至今已累计发行超过126万册,使用教材的院校140余所。

第3版有500余人次参与编写,参与编写的院所近80家。

本次出版在纸质基础上引入了数字化元素,增加了二维码,内容涉及推荐阅读文字,直观的图片展示,以及生动形象的短小视频等,使教材的内容更加丰富、信息量更大,形式更加活泼,使用更加便捷,与学生的阅读和学习习惯更加贴近。

虽然我的确有敝帚自珍的天性,但我也深深地知道,世上的事没有百分百的完美。我还要真心地感谢在此套教材中肯定存在的那些不完美,因为正是她们给了我们继续向前的动力。这里,我真诚地期待大家提出宝贵意见,让我们与这套教材一起共同成长,更加进步。

罗云波

2016年5月5日 于马连洼

第4版前言

本教材《食品工程原理》从第1版(2002年)出版至今已面向读者近20年,在这个过程中编写组得到了广大使用单位的教师和学生的反馈意见,也得到了中国农业大学出版社的大力支持,在此编写组向广大读者和出版社表示诚挚的谢意。根据国家高等教育发展方向和人才培养模式的调整,编写组在第3版(2014年)基础上,重点细化了各章节内容的表述,增加了部分二维码信息,使全书内容在文字、图表、公式符号等方面更趋完善,单元结构更趋合理。

本教材共12章,由李云飞、葛克山主编,负责组织与全书修正工作。张青、伍军和黄阿根为副主编,协助修正工作。上海海洋大学徐文达教授担任主审。编写分工如下:

第1章 流体力学基础、绪论和附录等	李云飞	上海交通大学
第2章 传热	葛克山	中国农业大学
第3章 制冷与食品冷冻	宋立华	上海交通大学
第4章 颗粒与流体之间的相对流动	李雁	华南农业大学
第5章 液体搅拌	张佰清	沈阳农业大学
第6章 粉碎与筛分	齐治国	甘肃农业大学
第7章 吸收与蒸馏	黄阿根	扬州大学
第8章 液体吸附与离子交换	蒋玉梅	甘肃农业大学
第9章 浸出与萃取	周颖越	上海海洋大学
第10章 膜分离	伍军	北京农学院
第11章 溶液浓缩	于殿宇,刘天一	东北农业大学
第12章 食品干燥	张青	上海交通大学
	林德荣	四川农业大学

由于编者水平有限,书中仍难免有许多不足之处,望读者提出宝贵意见和建议,以便编写组及时补充与修正。

编者

2018年1月

第3版前言

本教材《食品工程原理》从第1版(2002年)出版至今已面向读者10余年,在这个过程中编写组得到了广大使用单位的教师和学生的反馈意见,也得到了中国农业大学出版社的大力支持,在此编写组向广大读者和出版社表示诚挚的谢意。根据国家高等教育发展方向和人才培养模式的调整,编写组在第2版(2009年)基础上,重点细化了各章节内容的表述,使全书内容在文字、图表、公式符号等方面更趋完善,单元结构更趋合理。

本教材共12章,由李云飞、葛克山主编,负责组织与全书修正工作。张青、伍军和黄阿根为副主编,协助修正工作。上海海洋大学徐文达教授担任主审。编写分工如下:

第1章	流体力学基础、绪论和附录等	李云飞	上海交通大学
第2章	传热	葛克山	中国农业大学
第3章	制冷与食品冷冻	宋立华	上海交通大学
第4章	颗粒与流体之间的相对流动	李雁	华南农业大学
第5章	液体搅拌	张佰清	沈阳农业大学
第6章	粉碎与筛分	齐治国	甘肃农业大学
第7章	吸收与蒸馏	黄阿根	扬州大学
第8章	液体吸附与离子交换	蒋玉梅	甘肃农业大学
第9章	浸出与萃取	周颖越	上海海洋大学
第10章	膜分离	伍军	北京农学院
第11章	溶液浓缩	于殿宇	东北农业大学
第12章	食品干燥	张青	上海交通大学

由于编者水平有限,书中仍难免有许多不足之处,望读者提出宝贵意见和建议,以便编写组及时补充与修正。

编者

2014年6月

第2版前言

为进一步适应各高校“食品工程原理”课程的开课情况,根据原教材(中国农业大学出版社,2002年版)使用单位教师和学生的反馈意见,《食品工程原理》教材编写组在保留原框架基础上进行了较大的改动。其中重点压缩或者删减了部分公式推导和单元操作装置等内容,突出基本原理和新型技术原理。

本教材共12章,由李云飞、葛克山主编,负责组织编写与全书统稿工作。张青、伍军和黄阿根为副主编,协助统稿工作。上海海洋大学徐文达教授担任主审。编写分工如下:

第1章	流体力学基础、绪论和附录	李云飞	上海交通大学
第2章	传热	葛克山	中国农业大学
第3章	制冷与食品冷冻	宋立华	上海交通大学
第4章	颗粒与流体之间的相对流动	李雁	华南农业大学
第5章	液体搅拌	张佰清	沈阳农业大学
第6章	粉碎与筛分	齐治国	甘肃农业大学
第7章	吸收与蒸馏	黄阿根	扬州大学
第8章	液体吸附与离子交换	蒋玉梅	甘肃农业大学
第9章	浸出与萃取	周颖越	上海海洋大学
第10章	膜分离	伍军	北京农学院
第11章	溶液浓缩	于殿宇	东北农业大学
第12章	食品干燥	张青	上海交通大学

由于主讲课程变动等原因,福建农林大学李喜载老师和天津商学院胡萍老师未能继续参加本次编写。他们在原教材(中国农业大学出版社,2002年版)编写中做了大量的工作,对本次编写有很大的帮助,对此,编写组深表谢意。

由于编者水平有限,书中难免有许多不足之处,望读者提出宝贵意见,以便再版时补充修正。

编者

2009年1月

第1版前言

为进一步具体落实教育部的教改精神,全面、系统地更新食品专业的教材内容,2001年2月,在中国农业大学出版社的组织下,“全国高等农业院校食品专业系列教材研讨会”在北京召开。全国近30所农业院校的近100名教师参加了此次研讨会,并确定了16种涵盖食品科学与工程专业的教材编写任务,《食品工程原理》即是其中一种。本书是高等教育面向21世纪教学内容和课程体系改革项目(04-18)研究成果。

本教材共12章,由李云飞、葛克山任主编,张青、伍军和黄阿根任副主编,上海水产大学徐文达教授担任主审。编写分工如下:

第1章	流体力学基础、绪论和附录	李云飞	上海交通大学
第2章	传热	葛克山	中国农业大学
第3章	食品冷冻技术	宋立华	上海交通大学
第4章	颗粒与流体之间的相对流动	李雁	华南农业大学
第5章	液体搅拌与气液混合	张佰清	沈阳农业大学
第6章	粉碎与筛分	李喜载	福建农林大学
第7章	吸收与蒸馏	黄阿根	扬州大学
第8章	液体吸附与离子交换	蒋玉梅	甘肃农业大学
第9章	浸出和萃取	周颖越	上海水产大学
第10章	膜分离	伍军	北京农学院
第11章	溶液浓缩	胡萍	天津商学院
第12章	食品干燥原理	张青	上海交通大学

在编写过程中,我们侧重论述食品工程中的基础理论和基本原理,尽可能编入近年来在食品工程中应用的新技术。希望学生通过大量的例题、思考题和习题等内容的学习,能加深对教材内容的理解和便于课后自学。

由于本教材涉及的领域很广,编者水平有限,书中难免有许多不足之处,望读者提出宝贵意见,以便再版时补充修正。

编者

2002年4月

目 录

绪论	1
第 1 章 流体力学基础	3
1.1 牛顿流体及其黏度	4
1.1.1 牛顿内摩擦定律	4
1.1.2 流体黏度的定义及单位	5
1.1.3 理想流体	5
1.2 流体流动能量平衡	6
1.2.1 稳定流动热力体系的概念	6
1.2.2 稳定流动体系的能量平衡	6
1.2.3 不可压缩理想流体的稳定流动与柏努利(Bernoulli)方程	8
1.2.4 不可压缩实际流体的稳定流动	10
1.3 管中流动	10
1.3.1 管中稳定流动连续性方程	10
1.3.2 雷诺实验与雷诺数	11
1.3.3 水力直径	12
1.3.4 圆管中的滞流	12
1.3.5 圆管中的湍流	15
1.3.6 管路中的沿程阻力	17
1.3.7 管路中的局部阻力	21
1.4 液体输送设备	23
1.4.1 泵的类型	23
1.4.2 叶片泵的主要性能和特性	24
1.4.3 泵的安装高度	28
1.4.4 管路特性	29
1.4.5 泵的工作点	30
1.5 简单管路计算	31
习题	35
思考题	36
第 2 章 传热	37
2.1 热传导	38
2.1.1 傅立叶导热定律与热导率	38
2.1.2 通过单层壁的稳定热传导	39

2.1.3	通过多层壁的稳定热传导	40
2.2	对流传热	42
2.2.1	牛顿冷却定律与对流传热系数	42
2.2.2	对流传热系数关联式的建立方法	43
2.2.3	流体在管内作强制对流	44
2.2.4	流体外绕壁面强制对流	46
2.2.5	流体在搅拌槽内强制对流	47
2.2.6	大空间自然对流传热	48
2.2.7	蒸气冷凝放热	48
2.2.8	沸腾传热	51
2.3	辐射传热	53
2.3.1	基本概念	53
2.3.2	物体的辐射能力	54
2.3.3	两固体表面间的辐射传热	55
2.3.4	对流与辐射的综合传热	58
2.4	稳定传热过程计算	59
2.4.1	热量衡算	59
2.4.2	总传热速率方程	60
2.4.3	总传热系数	60
2.4.4	传热的平均温度差	63
2.4.5	传热面积的计算	67
2.4.6	传热过程的强化	68
2.5	不稳定传热	70
2.5.1	集总参数分析法	71
2.5.2	不稳定导热的图解法	72
2.6	换热器简介	78
2.6.1	管式换热器	78
2.6.2	其他形式的换热器	80
	习题	80
	思考题	82
第3章	制冷与食品冷冻	83
3.1	制冷技术原理	84
3.1.1	制冷基本概念、原理与方法	84
3.1.2	一般制冷方法	86
3.1.3	低温制冷方法	89
3.1.4	食品冷冻常用的蒸气压缩式制冷循环	90
3.2	制冷剂和载冷剂	97
3.2.1	对制冷剂的要求和选用制冷剂的原则	98
3.2.2	常用的制冷剂	99

3.2.3	制冷剂的发展趋势	100
3.2.4	载冷剂	101
3.3	食品的冻结	102
3.3.1	水的冻结曲线	102
3.3.2	食品的冻结曲线	103
3.3.3	水分结冰率与最大冰晶生成区	104
3.3.4	冻结对食品的影响	104
3.3.5	食品冻结的速度与时间	106
	习题	111
	思考题	112
第4章	颗粒与流体之间的相对流动	113
4.1	流体绕过颗粒及颗粒床层的流动	114
4.1.1	颗粒床层的特性	114
4.1.2	流体绕球形颗粒的流动阻力(曳力)	116
4.1.3	流体通过颗粒床层的压降	117
4.2	颗粒在流体中的运动	118
4.2.1	固体颗粒沉降过程的作用力	118
4.2.2	固体颗粒的沉降速度	119
4.3	固体流态化与气力输送简介	122
4.3.1	固体流态化	122
4.3.2	气力输送	129
4.4	非均相混合物的分离	130
4.4.1	沉降	131
4.4.2	过滤	138
	习题	149
	思考题	150
第5章	液体搅拌	152
5.1	液体搅拌混合的基本理论	153
5.1.1	混合物的混合程度	153
5.1.2	过程对混合程度的要求	156
5.1.3	混合的原理	157
5.1.4	混合物的稳定性	157
5.1.5	混合速率	158
5.2	搅拌器的性能	158
5.2.1	常用的机械搅拌装置	159
5.2.2	搅拌器的分类	159
5.2.3	搅拌设备的其他结构问题	160
5.2.4	搅拌器的液体循环量与压头	161
5.2.5	搅拌器的选型	161