



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



教育部普通高等教育精品教材

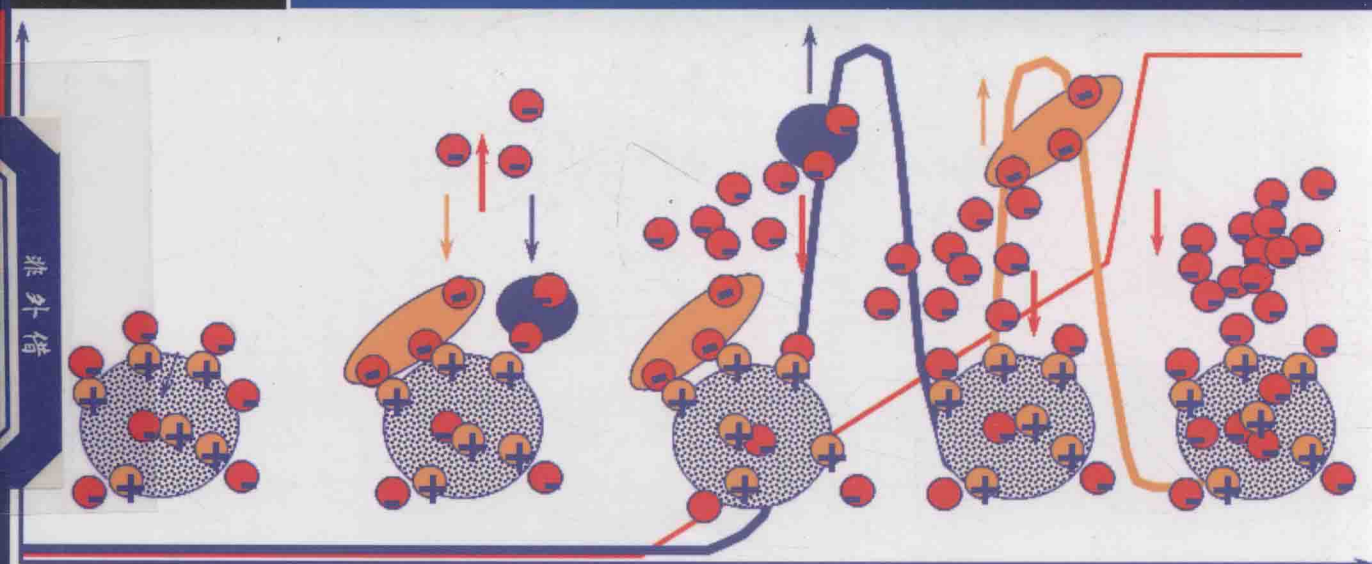


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 生物分离原理 及技术

## 第三版

欧阳平凯 胡永红 姚忠 编著



化学工业出版社



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



教育部普通高等教育精品教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



“十三五”江苏省高等学校重点教材

# 生物分离原理 及技术

第三版

欧阳平凯 胡永红 姚 忠 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

## 图书在版编目 (CIP) 数据

生物分离原理及技术/欧阳平凯, 胡永红, 姚忠编著. —3 版. —北京: 化学工业出版社, 2018.12

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材 教育部普通高等教育精品教材 普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-122-33644-6

I. ①生… II. ①欧…②胡…③姚… III. ①生物工程-分离-高等学校-教材 IV. ①Q81

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 297283 号

---

责任编辑: 赵玉清 魏 巍 周 侗  
责任校对: 宋 玮

装帧设计: 刘丽华

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 北京市白帆印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 19½ 字数 478 千字 2019 年 8 月北京第 3 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究

## 第三版前言

---

进入 21 世纪以来, 生命科学与生物工程技术的快速发展为人类社会解决资源与环境问题并实现可持续发展提供了技术支持与有力保障, 世界各主要经济强国均把生物制造作为保障经济发展、能源安全和环境友好的国家战略, 促进形成与环境协调的战略产业体系, 抢占未来生物经济的竞争制高点。近十年来, 我国工业生物技术产业迅速壮大, 在“十二五”期间, 我国生物产业产值的年平均增长率保持在 20% 以上, 年总产值已达到 6000 亿元, 生物发酵产品的产能与产量均已居于世界首位。但是应该看到, 我国生物产业发展存在巨大机遇的同时也面临诸多挑战, 例如产品结构还不够完善, 技术水平和经济性还有待提高, 环保节能亟待加强。

要解决以上问题, 需要从生物加工过程的全环节着手, 而生物分离工程属于生物加工的下游过程, 是工业生物技术最终获得产品的必要环节, 直接关系到生物产品的技术经济性。众所周知, 生物反应体系极其复杂, 而诸多生物产品在构象、稳定性和特定杂质含量方面具有很高的要求, 这对分离技术提出了很高的要求, 高附加值生物产品的分离成本甚至达到 90% 以上。因此, 新型生物分离技术、介质材料、工艺设备的研发与应用一直是工业生物技术领域内的热点, 已取得大量重要成果并逐步应用于实际生产中, 将相关进展引入教材极有必要。

新版教材保留了前一版教材的基本构架和主要内容, 按照生物分离的一般过程顺序将主要的分离技术单元分为四大步骤: 不溶物的去除、产物粗分离、产物纯化及产品精制, 在全面介绍各种分离过程原理和方法的同时, 注重工程化应用能力的培养, 并增加了对新型分离技术的介绍。1~11 章列出的思维导图以便于学生对本章知识构架的梳理。同时本教材配套实验技术, 同步出版。本书可作为高等院校生物、制药、食品、轻化及其他相关专业本科生和研究生的专业课程教材, 也可作为相关科研与工程技术人员的参考书。

本书稿编写过程中得到了长期从事生物分离工程领域科研与实践工作的专家的指导, 在此向他们致以崇高的敬意! 此外, 吴昊、吕浩、吴菁岚等老师参加了本书的编写、整理和校对, 对他们的辛勤工作表示衷心感谢!

由于作者专业知识水平有限, 书中难免存在不足和疏漏之处, 恳请广大读者批评指正。

作者  
南京工业大学  
2018 年 11 月

## 前言

---

目前，人们已经从天然生物物质或人工生物细胞中发现了大量的化学物质，其中有些因为不能进行有效的工业分离而被白白浪费掉。由此可以预见，今后十年内，化工技术在生物学领域中的重点应用将是生物物质的分离和提纯。生物分离工程的重要性不仅因为生物分离过程是工业生物技术中最后获得产品的必要环节，而且还因为生物分离过程的成本、效益在整个生物工厂的技术经济分析中占有很大的比重。此外，生物分离过程本身可以产生独立的成品，譬如用天然生物物质分离制取淀粉、糖、蛋白质、香精及其他各种化学品。生物分离技术已经具有了上百年的发展历史，形成了一些传统的轻化工产业体系。

鉴于生物分离技术应用的广泛性，本书以单元操作的方式介绍现代生物分离技术的基本理论与实践，并列举了大量实例，希望从事生化工艺技术的读者在阅读本书后能有所收益。

中国科学院院士时钧教授对本书的编写给予了热情的关心和鼓励，肖人卓教授审阅了全稿，同时许诚洁同志对本书的出版给予了大力支持。在此，谨表示诚挚的谢意。

欧阳平凯 胡永红

1997年2月

## 第二版前言

---

工业生物技术是 20 世纪末以及 21 世纪发展国民经济的关键技术之一，工业生物技术的发展为解决人类所面临的能源、资源、环境及健康问题提供了可能的途径。随着现代生物技术的突飞猛进，目前人们已经可以利用动、植物或人工生物细胞生产大量的有用化学品，其中有些因为不能进行有效的工业分离而被白白浪费。

生物分离工程的重要性不仅因为生物分离过程是工业生物技术中最后获得产品的必要环节，而且还因为生物分离过程的成本、效益在整个生物工厂的技术经济分析中占有很大的比重。“难度大、成本高”，这是包括美国麻省理工学院（MIT）著名教授 Daniel I. C. Wang 在内的，活跃在生物工程领域里的专家对生物分离技术现状的评价。由于生物体系具有多组分、非均相、非牛顿型流体等特征，以及生物产品自身的易变性和复杂性，对生物产品的分离除了要达到化学物质分离的纯度和经济性指标外，还要满足构象、异质性和稳定性等要求，这对于产品纯度及杂质含量方面提出了很高的要求。对于现代生物技术产品，分离成本往往占产品总成本的 70% 以上。因此，生物分离原理及技术的基础、应用研究，以及新型单元技术的开发一直是生物、化工、医药、食品和环境等领域的热点，并取得了大量重要的成果。

再版教材保留了第一版教材的基本构架和主要内容，兼顾了应用技术的广泛性、新颖性、前沿性和实用性，除了对各种分离过程基本原理和方法进行全面介绍外，还注重基本概念的阐述、数学工具的应用及放大过程分析，这有助于引导读者进一步系统、深入地学习和思考生物分离技术所涉及的科学问题。为了便于读者阅读，本书仍然将生物分离的一般过程分为 4 个步骤，即不溶物的去除、产物粗分离、产物纯化及产品精制，将已有的和新近发展起来的新型分离技术进行了分类，以单元操作的方式逐一介绍，并列举了大量实例。

本书可作为高等院校相关专业本科生和研究生的专业课教材，也可作为教师和相关产业工程技术人员的参考书。

书稿编写过程中得到了长期从事生物分离工程领域科研和实践工作的前辈专家的指导，在此向他们致以崇高的敬意。本研究室研究生肖彦羚、刘步云、余维娜和宋希文等参与了书稿的编写、整理和校对，对他们的辛苦工作一并表示感谢！

由于作者专业知识水平有限，书中难免存在不足和疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

编者

2009 年 11 月于南京工业大学

# 目录

---

## 1 绪论/ 001

---

1.1 生物分离工程的历史及应用 .....	002
1.2 生物分离与纯化技术的研究内容及工艺特点 .....	003
1.2.1 生物分离与纯化技术的研究内容 .....	003
1.2.2 生物分离与纯化技术的工艺特点 .....	004

## 2 过滤/ 005

---

2.1 过滤的基本概念 .....	006
2.2 关于过滤的一般情况 .....	012
2.2.1 不可压缩滤饼 .....	012
2.2.2 可压缩滤饼 .....	013
2.3 连续旋转式真空抽滤机的操作原理 .....	015
2.3.1 滤饼的形成 .....	015
2.3.2 滤饼的洗涤 .....	015
2.4 过滤的设备及其结构 .....	017
2.4.1 过滤设备的分类 .....	017
2.4.2 过滤设备的选择 .....	018
2.4.3 过滤介质 .....	018
2.4.4 典型过滤设备的种类和结构 .....	019
习题 .....	023

## 3 离心与沉降/ 025

---

3.1 颗粒的沉降 .....	026
3.2 重力沉降式固液分离设备 .....	028
3.2.1 矩形水平流动池 .....	028
3.2.2 圆形水平流动池 .....	029
3.2.3 垂直流动式沉降池 .....	029
3.2.4 斜板式沉降池 .....	030
3.3 离心式沉降分离设备及其原理 .....	030
3.3.1 管式离心机 .....	032

3.3.2 碟片式离心机 .....	033
3.4 离心分离过程的放大 .....	035
3.5 离心过滤分离过程分析及其设备 .....	037
3.5.1 离心过滤分离过程分析 .....	037
3.5.2 离心过滤设备 .....	039
习题 .....	041
<hr/>	
4 细胞破碎/ 042	
4.1 细胞壁 .....	043
4.2 化学破碎法 .....	044
4.2.1 渗透冲击法 .....	045
4.2.2 增溶法 .....	045
4.2.3 脂溶法 .....	046
4.3 机械破碎 .....	047
4.4 其他破碎方法 .....	049
习题 .....	050
<hr/>	
5 萃取/ 051	
5.1 萃取分离原理 .....	052
5.2 单级萃取 .....	056
5.3 多级逆流萃取过程 .....	058
5.4 微分萃取操作 .....	060
5.4.1 微分萃取设备简介 .....	060
5.4.2 微分萃取过程的解析算法 .....	061
5.5 液-液萃取设备与流程 .....	063
5.6 固体浸取 .....	065
5.6.1 固体浸取的原理与计算 .....	065
5.6.2 浸取设备 .....	067
5.7 超临界流体萃取 .....	069
5.7.1 超临界流体的性质 .....	070
5.7.2 超临界流体萃取过程 .....	072
5.7.3 超临界流体萃取的应用 .....	073
5.8 双水相萃取 .....	077
5.8.1 双水相萃取法概述 .....	077
5.8.2 影响双水相萃取的因素 .....	080
5.8.3 双水相萃取的应用 .....	083
5.9 反胶团萃取 .....	086
5.10 络合萃取 .....	087
习题 .....	088

## 6 吸附与离子交换/ 089

6.1 吸附类型 .....	090
6.1.1 物理吸附 .....	090
6.1.2 化学吸附 .....	090
6.1.3 交换吸附 .....	090
6.2 常用吸附剂 .....	091
6.2.1 活性炭 .....	091
6.2.2 活性炭纤维 .....	092
6.2.3 球形炭化树脂 .....	092
6.2.4 大孔网状聚合物吸附剂 .....	092
6.3 吸附等温线 .....	095
6.4 影响吸附的因素 .....	096
6.4.1 吸附剂的性质 .....	096
6.4.2 吸附质的性质 .....	096
6.4.3 温度 .....	097
6.4.4 溶液 pH 值 .....	097
6.4.5 盐的浓度 .....	097
6.4.6 吸附物浓度与吸附剂用量 .....	097
6.5 亲和吸附 .....	098
6.5.1 亲和吸附原理 .....	098
6.5.2 亲和吸附的特点 .....	098
6.5.3 亲和吸附载体 .....	099
6.5.4 影响吸附剂亲和力的因素 .....	104
6.6 间歇吸附 .....	106
6.7 连续搅拌吸附 .....	107
6.8 固定床吸附过程分析 .....	108
6.9 离子交换 .....	112
6.9.1 离子交换的基本概念 .....	112
6.9.2 离子交换树脂的分类 .....	113
6.9.3 离子交换树脂的命名 .....	123
6.9.4 离子交换树脂的制备 .....	124
6.9.5 离子交换树脂的理化性能 .....	128
6.9.6 离子交换过程理论 .....	131
6.9.7 离子交换的选择性 .....	138
6.9.8 偶极离子吸附 .....	143
6.9.9 离子交换操作方法 .....	144
6.9.10 软水与无盐水的制备 .....	147
6.9.11 离子交换提取蛋白质 .....	149
习题 .....	152

## 7 膜分离/ 154

---

7.1 概述 .....	155
7.2 基本的膜分离过程 .....	156
7.3 膜通量 .....	156
7.4 渗透压的计算 .....	157
7.5 影响膜通量的主要因素 .....	160
7.6 超滤 .....	162
7.6.1 超滤膜 .....	163
7.6.2 超滤装置 .....	167
7.6.3 超滤过程分析 .....	171
7.6.4 超滤的应用 .....	173
7.7 反渗透 .....	174
7.7.1 反渗透膜及其分离原理 .....	174
7.7.2 影响反渗透膜分离性能的因素 .....	175
7.7.3 反渗透的应用 .....	176
7.8 纳滤 .....	176
7.8.1 纳滤膜及其分离原理 .....	176
7.8.2 影响纳滤膜分离性能的因素 .....	177
7.8.3 纳滤的应用 .....	178
习题 .....	179

## 8 沉析/ 180

---

8.1 盐析 .....	181
8.1.1 盐析原理 .....	181
8.1.2 盐析用盐的选择 .....	182
8.1.3 影响盐析的因素 .....	184
8.1.4 盐析操作 .....	185
8.2 有机溶剂沉析 .....	186
8.2.1 有机溶剂沉析原理 .....	186
8.2.2 沉析溶剂的选择 .....	187
8.2.3 影响有机溶剂沉析的因素 .....	188
8.3 等电点沉析法 .....	189
8.3.1 等电点沉析原理 .....	189
8.3.2 等电点沉析操作 .....	190
8.4 其他沉析法 .....	190
8.4.1 水溶性非离子型多聚物沉析剂 .....	190
8.4.2 生成盐类复合物的沉析剂 .....	191
8.4.3 离子型表面活性剂 .....	192
8.4.4 离子型多聚物沉析剂 .....	192
8.4.5 氨基酸类沉析剂 .....	192
8.4.6 分离核酸用沉析剂 .....	192

8.4.7	分离黏多糖的沉析剂	193
8.4.8	选择变性沉析法	193
8.5	大规模沉析	193
8.5.1	初步混合	194
8.5.2	起晶	194
8.5.3	扩散控制晶体生长阶段	194
8.5.4	对流沉析	195
8.5.5	絮凝阶段	196
	习题	198

## 9 色谱分离法/ 199

9.1	色谱分离法分类	200
9.2	色谱分离基本概念	200
9.2.1	分配系数	201
9.2.2	阻滞因子 $R_f$	202
9.2.3	洗脱容积 $V_e$	202
9.2.4	色谱法的塔板理论	203
9.2.5	色谱分离回收率和纯度	203
9.3	吸附色谱法	206
9.3.1	吸附色谱法的基本原理	206
9.3.2	吸附剂	207
9.3.3	展开剂	210
9.3.4	应用举例	213
9.4	分配色谱法	213
9.4.1	载体	213
9.4.2	分配色谱的展开剂选择	214
9.4.3	应用举例	214
9.5	离子交换色谱法	214
9.5.1	离子交换色谱法对树脂的要求	215
9.5.2	应用举例	215
9.6	凝胶色谱法	216
9.6.1	基本原理	216
9.6.2	凝胶色谱的特点	216
9.6.3	凝胶的结构和性质	217
9.6.4	应用举例	223
9.7	纸色谱法	224
9.7.1	滤纸	224
9.7.2	展开剂	224
9.7.3	纸色谱操作方法	225
9.8	薄层色谱法	226
9.8.1	薄层色谱法的特点	227

9.8.2 薄层色谱法的操作 .....	228
9.9 高压液相色谱 .....	230
9.9.1 高压液相色谱分离方法的原理 .....	230
9.9.2 制备性高压液相色谱 .....	231
9.10 蛋白质分离常用的色谱法 .....	232
9.10.1 免疫亲和色谱法 .....	232
9.10.2 疏水作用色谱法 .....	233
9.10.3 金属螯合色谱法 .....	234
9.10.4 共价作用色谱法 .....	235
9.11 柱色谱的工业放大 .....	236
9.11.1 利用放大准则确定色谱柱的初始规格 .....	237
9.11.2 凝胶排阻色谱的放大 .....	237
习题 .....	242

## 10 结晶/ 243

---

10.1 结晶过程的分析 .....	244
10.2 过饱和溶液的形成 .....	245
10.2.1 热饱和溶液冷却 .....	245
10.2.2 部分溶剂蒸发 .....	246
10.2.3 真空蒸发冷却法 .....	246
10.2.4 化学反应结晶方法 .....	246
10.2.5 盐析法 .....	246
10.3 晶核的形成 .....	246
10.3.1 临界半径及形核功 .....	247
10.3.2 临界半径与过冷度 .....	248
10.3.3 成核速率 .....	248
10.3.4 工业起晶法 .....	249
10.3.5 晶种控制 .....	250
10.4 晶体的生长 .....	251
10.4.1 晶体生长的扩散学说及速度 .....	251
10.4.2 影响晶体生长速率的因素 .....	252
10.5 晶体纯度的计算 .....	253
10.6 晶体大小分布 .....	253
10.6.1 晶体群体密度 .....	253
10.6.2 连续结晶过程的晶群密度分布 .....	254
10.6.3 晶体大小 .....	255
10.7 间歇结晶过程分析 .....	259
10.8 提高晶体质量的方法 .....	261
10.8.1 晶体大小 .....	261
10.8.2 晶体形状 .....	262
10.8.3 晶体纯度 .....	263

10.8.4	晶体结块	263
10.8.5	重结晶	264
习题		265

## 11 干燥/ 266

---

11.1	干燥的基本概念	267
11.1.1	干燥操作的流程	267
11.1.2	物料内所含水分的种类	267
11.2	干燥过程分析	269
11.2.1	干燥曲线	269
11.2.2	干燥速率曲线	269
11.2.3	恒速干燥阶段	270
11.2.4	降速干燥阶段	270
11.3	干燥过程基本计算	270
11.3.1	水分蒸发量	271
11.3.2	干燥空气用量的计算	272
11.4	干燥的副作用	274
11.5	干燥设备的分类与选择原则	275
11.5.1	干燥设备分类的目的	275
11.5.2	干燥装置的不同分类法	275
11.5.3	干燥设备选择的原则	276
11.6	干燥设备	278
11.6.1	箱式干燥设备	278
11.6.2	气流干燥设备	279
11.6.3	喷雾干燥设备	281
11.6.4	流化床干燥设备	282
11.6.5	红外线干燥	283
11.6.6	微波干燥	283
11.6.7	喷动床干燥设备	284
11.6.8	冷冻干燥器	285
11.6.9	适用于膏糊状物料干燥的设备	287

## 12 辅助操作/ 290

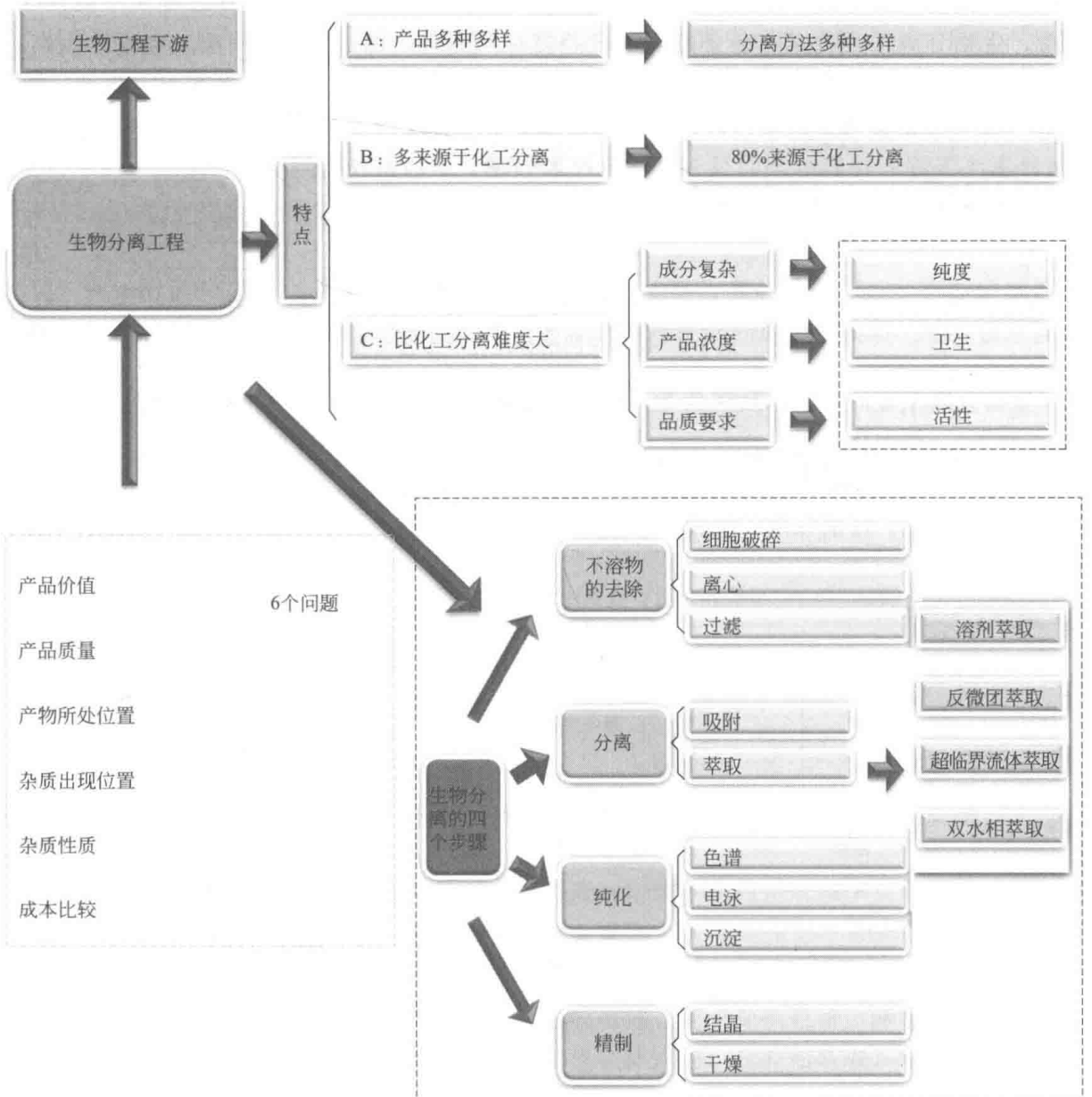
---

12.1	水质及热原的去除	290
12.1.1	水质与供水	290
12.1.2	热原及其去除方法	292
12.2	溶剂回收	294
12.3	废物处理	294
12.4	生物安全性	295
参考文献		296

# 1

## 绪论

思维导图：



## 1.1 生物分离工程的历史及应用

生物分离工程是从微生物、动植物细胞及其生物化学产品中提取有用物质的技术。就利用与培养动植物细胞及微生物的一般意义而言,生物分离工程的发展已经有几百年的历史了,最早的分离技术有蒸馏、过滤等原始方法。按上述定义,早在16世纪,人们就发明了用水蒸气蒸馏从鲜花与香草中提取天然香料的方法;而从牛奶中提取奶酪的历史则更早。近代生物分离技术是在欧洲工业革命以后逐渐发展形成的,最早的开发是由于发酵制酒精以及有机酸分离提取的需要,从产物含量较高的发酵液制备成品;到20世纪40年代初,大规模深层发酵生产抗生素,反应粗产物的纯度较低,而最终产品要求的纯度却极高。近年来发展的新型生物技术包括利用基因工程菌生产人造胰岛素、人用及动物用疫苗等产品,某些粗产物的含量极低,而对分离所得最终产品的要求却更高了。因而,生物分离工程技术与装备的发展日趋复杂与完善。图1-1是利用酶工程方法生产L-苹果酸的分离提取工艺流程。

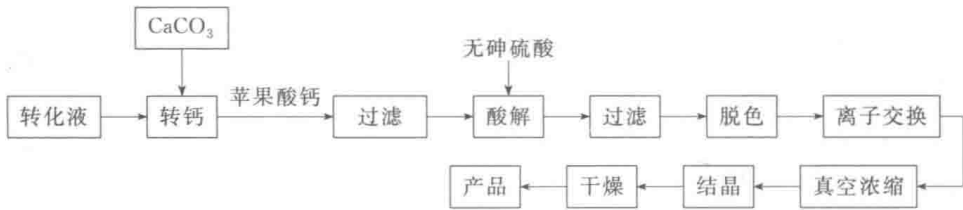


图 1-1 L-苹果酸的分离提取工艺流程

生物分离工程的应用包括医药类（抗生素、激素、维生素）、食品类（如乳酪）、化工类（氨基酸等）、精细化工类（化妆品、香料）、农业类（手性农药）、生物类（酶）。另外,环境工程中污水的净化与有效成分的回收,也常采用生物分离技术。一般而言,工业生物技术可分为三个过程,即前处理、生物反应过程、生物分离过程。图1-2为生物分离过程的一般流程。

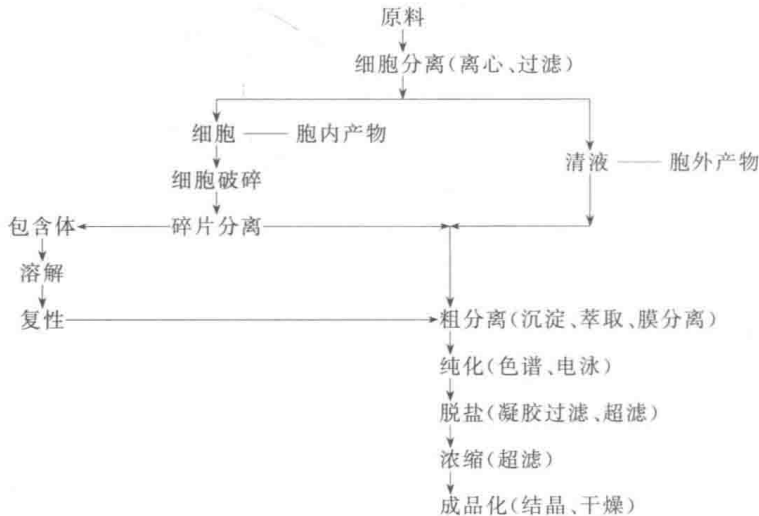


图 1-2 生物分离过程的一般流程

综上所述,生物分离工程是生物工程中必不可少的也是极为重要的过程环节之一。

## 1.2 生物分离与纯化技术的研究内容及工艺特点

### 1.2.1 生物分离与纯化技术的研究内容

生物分离与纯化技术是以多组分、低浓度的生物材料为研究对象,以分离单元操作为主线构建其理论体系的。将发酵、食品、轻工、医药、环保等各类工艺过程的单元操作进行归纳分类,可将绝大多数生物分离过程分为以下四个步骤。

① 不溶物的去除 (removal of insolubles) 目的是去除生物(反应)体系中的不溶物,以利于后续的分和精制。过滤和离心操作是该阶段常用的单元技术。同时,该阶段还可起到一定的产品浓缩及质量改进的作用。

② 产物粗分离 (separation) 目的是去除体系中的大部分杂质,同时提高目标产物的浓度。由于生物体系中可溶性组分复杂,难以通过简单的一步操作获得高的分离效率和选择性,通过该步骤可在分离初期尽可能去除主要的杂质和干扰物,如在分离蛋白质(酶)等生物大分子时,要尽可能快地去除蛋白质(酶)等杂质,防止目标产物降解。鉴于上述目的,对该阶段中所用单元技术(如吸附、离子交换、萃取等)的处理能力和分离速度有较高要求。

③ 产物纯化 (purification) 该阶段要求在保证产物回收率的前提下,尽可能地提高产品纯度。该阶段中所采用的单元技术需去除与目标产物化学性质相近的杂质,处理技术要求有高度的选择性,通常利用色谱法。

④ 产品精制 (polishing) 该阶段的主要目的是在进一步提高产物纯度的同时,形成最终的产品形态。该阶段经常采用的单元技术为色谱分离和结晶技术。

以上四个步骤的合理组织需视产品的浓度与纯度在分离过程中的变化而定。抗生素分离过程中浓度与纯度的变化如表 1-1 所示。

表 1-1 抗生素分离过程中浓度与纯度的变化

步骤	典型过程	产品浓度/(g/L)	纯度/%
最终发酵液	发酵	0.1~5	0.1~1
固形物分离	过滤	1.0~5	0.2~2
分离	萃取	5~50	1~10
纯化	色谱	50~200	50~80
产品精制	结晶	50~200	90~100

注:表中纯度泛指化学纯度或相对活性。

产品浓度的增加主要在杂质分离阶段,而纯度的增加则在纯化阶段。某些新的处理技术则将第一、第二步骤合并在一起。如扩张床吸附分离技术 (expand bed adsorption)。

目前出现的各种生物分离技术和生物分离过程,除了传统的沉淀、吸附与离子交换、萃取和结晶之外,还有超滤、反渗透、电渗析、凝胶电泳、离子交换色谱、亲和色谱、疏水色谱、等电聚焦、区带离心分离、凝胶萃取、超临界流体萃取、反胶团萃取、双水相分配技术等。图 1-3 为生物制品分离的一般工艺流程。

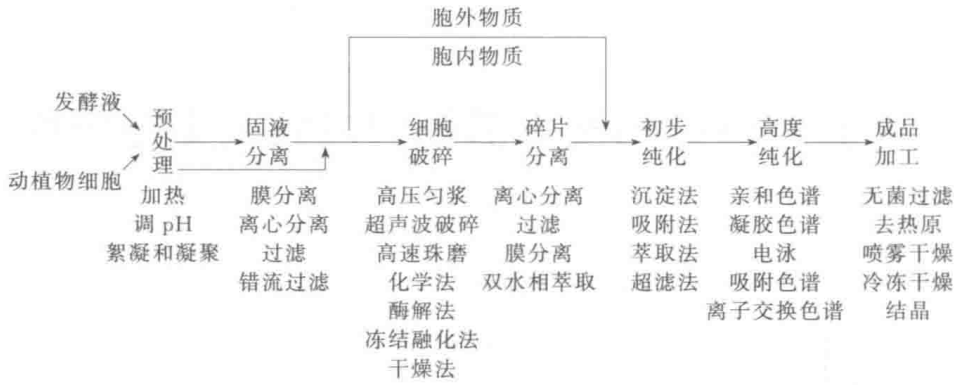


图 1-3 生物制品分离的一般工艺流程

### 1.2.2 生物分离与纯化技术的工艺特点

生物技术的特点之一就是产品的品种很多，典型的石化产品大约有 100 种，典型的制药工业产品至少有 200 种，其中很多需要用生物化学方法来转化。

表 1-2 列出了某些成熟的发酵工业制造的化学产品品种数，该表尚未包括近 10 年来许多新开发出来的诸如基因工程菌生产的人造胰岛素、人用及动物用疫苗、激素以及干扰素等新产品。分离手段多种多样，与化学工业常用的方法相比较（见表 1-3），可以看出化工传统分离方法在生物分离工程中 80% 以上是有效的。生物分离技术的工业化只有经过小规模试验、中间试验以及技术经济的可行性分析，才能放大到工业规模进行生产。

表 1-2 发酵工业制造的化学产品品种数

类型	品种数	类型	品种数
抗生素	85	维生素、生长激素等	6
氨基酸	18	葡聚糖、类固醇等	8
酶	15	合计	143
有机酸与溶剂	11		

表 1-3 生物分离方法与化学工业分离方法的比较

分离方法	用于化学工业	用于生物分离	分离方法	用于化学工业	用于生物分离
物理分离	7	7	速度控制分离	13	10
平衡控制分离	22	18	合计	42	35

特点之二是生物物质分离的难度比一般化工产品大。首先，在粗产物中，被提取物浓度通常很低；其次，需处理的物料往往是成分复杂的黏稠的多相体系，因此，在热力学特性、流变学特性以及流动、传热、传质等方面，生物体系与一般化工体系相比都要复杂得多。而对生物制品，往往是要求纯度高、无色、结晶以及能长期保存等。

由于上述种种原因，使得生物分离过程往往成本很高，回收与提纯的操作很复杂，需要更多的设备，所以分离过程常占很大的投资比重。必须仔细分析设计生物分离过程，提高产品的质量，提高收率，降低成本。需要认真考虑的问题有：①产品的价格，产品质量标准；②产品与主要杂质有何特殊的物化性质或有何显著的性质差别；③流程中，产品与杂质流经的途径是否合理；④不同分离方案的技术经济指标的比较。