



BIOLOGICAL SYMBIOTICS

# 生物共生学

刘润进 王琳 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 生物共生学

BIOLOGICAL SYMBIOTICS

刘润进 王 琳 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

生物共生学是一门崭新的学科。本书内容不仅包含生物共生学的基础知识,同时力求反映当前该研究领域的最新进展,突出新理论、新技术和有关生产实践上的问题。全书共分10章,包括生物共生学概述、人类与其他生物的共生、动物与其他生物的共生、植物与真菌的共生、植物与细菌的共生、真菌与细菌的共生、生物复合共生体系、生物共生生态学、生物共生学技术的应用与发展和生物共生学研究方法。

本书可作为生物学、农林牧渔专业科技工作者的研究参考资料,又可作为高等院校生物及其相关专业研究生和本科生的学习参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

生物共生学/刘润进,王琳著. —北京:科学出版社,2018.7

ISBN 978-7-03-058050-4

I. ①生… II. ①刘… ②王… III. ①生物-共生-研究 IV. ①Q143

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第132905号

责任编辑:李悦 刘晶/责任校对:郑金红

责任印制:张伟/封面设计:刘新新

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018年7月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018年7月第一次印刷 印张:24 3/4

字数:584 000

定价:180.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



# 序 言

共生 (symbiosis) 是指不同生物之间的共同生活, 属于生态系统范畴。在共同生活的生态系统中, 要么各方从中受益, 即互惠共生 (mutualism); 要么一方从中受益, 另一方从中并不受害, 即偏惠共生 (commensalism); 要么一方从中受益, 另一方从中受害, 即相克共生 (antagonism), 亦即寄生 (parasitism)。然而, 拟寄生 (parasitoidism) 中寄生物的生命活动是以消耗寄主体导致其死亡的生物学现象, 如冬虫夏草 *Ophiocordyceps sinensis*, 因而并不属于共 (同) 生 (活) 范畴。

基因离开了生物体是没有生存价值的。生物体是生物物种的组成部分。因此, 生物多样性就是生命有机体及其借以生存的生态复合体的多样性和变异性, 包括所有的植物、动物、菌物、微生物物种, 以及所有的生态系统及其形成的生态过程, 即地球上所有的生物物种及其环境形成的生态复合体及与此相关的各种生态过程和物种变异性的多样化。作为生态系统组成部分的共生生态系统, 其多样性及广泛性是地球生物圈内普遍存在的生物学现象。

菌根菌与植物根系的共生、地衣型真菌与相应藻类或蓝细菌的共生均属于互惠共生范畴, 是生物演化历程中的生命自我支撑系统, 也是对非生物环境适应的结果。在寒冷的南极乔治王岛, 维管束植物仅有禾本科的南极发草 *Deschampsia antarctica* 和石竹科的南极漆姑 *Colobanthus quitensis* 两种, 而菌藻共生的地衣却为绝对优势种; 在温带干旱半干旱荒漠中, 覆盖度为 15%~25% 的人工植被 40 年后则会衰减至 6%~9%, 而以菌藻共生的地衣为主的荒漠微型生物结皮层的覆盖度则由 0 逐年生长发育达 90%。荒漠地衣石果衣 *Endocarpon pusillum* 真菌在干旱、饥饿双胁迫下能存活 7 个月。

与动物和人类共同生活的肠道菌群, 在人类和动物健康与疾病方面发挥着重要作用, 肠道菌群与人类健康的关系日益受到重视。

由于共生生物在生物演化中的作用, 以及在物种水平和基因水平上对极端环境的适应与对人类健康的影响具有巨大的资源潜力, 因而对共生生物学进行系统而深入的研究势在必行。

本书作者刘润进从事真菌与植物共生生物学研究 30 余年, 对共生真菌和共生细菌的多样性及其形态特征、分离培养、生理生态与资源生物学进行了比较全面、系统的研究。王琳对人体、动物, 特别是昆虫等与微生物的共生生物学具有丰富的科研成果。他

们联合完成的这部专著，全面、系统地介绍了近 30 年来国内外共生生物学研究概况和进展，以及存在的问题与发展方向，为共生生物学的深入研究提供了重要的参考。

该专著的出版对该领域的科研工作者具有重要的参考价值，有利于推动共生生物学的发展。特此作序，与读者共勉。



中国科学院院士 魏江春

中国科学院大学 中国科学院微生物研究所

2018 年 1 月 6 日于北京

# 前 言

自然界中,无论是单细胞生物还是多细胞生物、低等生物还是高等生物,包括我们人类在内的所有生物都广泛存在着与其他生物的共生关系(symbiosis)。早在1879年德国人Heinrich Anton de Bary就提出了广义的不同生物“共生”的概念。事实上,共生是自然界所有生物群体包括人类在内的密切联合、需求互补、共同发展、协同进化的能力;共生理论不仅是生命科学领域的基本理论,涉及许多应用问题,也是一种生物哲学。不同生物种群之间所建立的共生关系及其形成的共生体,连同其生态环境,共同构成地球共生体,属于自然界的命运共同体。随着共生科学研究的深入,生物共生学这一崭新的边缘学科已经建立。

进入21世纪以来,人们已认识到生物共生的普遍性和重要性。2005年Nowak将生物共生列为生命界最重大的十项顶级创造之一。2012年在波兰召开的第7届国际共生大会(ISS)以“地球是一个巨大的共生圈”为主题,2015年在葡萄牙召开的第8届国际共生大会以“共生的生活方式”为主题,共生在地球上发挥着重大作用。随着科学技术的发展,生物共生研究取得了令人瞩目的成果。总结和评价该领域所取得的成果,以期为生物学发展、人才培养及生产实践方面提供新思想和新途径是十分必要的。国外已有生物共生方面的专著,而国内尚未见“生物共生学”类图书。2000年,作者就开始着手积累有关资料、准备书稿;2004~2005年在青岛农业大学开设了“共生学”全校选修课程。经过10余年的努力,本书得以完成。在撰写本书时,关于内容的取舍,一方面尽量包括生物共生学的基础知识;另一方面力求反映当前该研究领域的最新进展,突出新理论、新技术和有关生产实践上的问题。全书共分10章,包括生物共生学概述、人类与其他生物的共生、动物与其他生物的共生、植物与真菌的共生、植物与细菌的共生、真菌与细菌的共生、生物复合共生体系、生物共生生态学、生物共生学技术的应用与发展 and 生物共生学研究方法。

作为一门崭新的学科,生物共生学的很多研究领域尚待深入研究和探索,有关该领域的内容、知识、理论、方法和技术等必将得到进一步的补充和完善。由于作者水平有限,疏漏在所难免,请广大读者批评指正。

本书得到国家科学技术学术著作出版基金的资助。在本书编写过程中,作者得到青岛农业大学和中国农业科学院蜜蜂研究所领导的大力支持与鼓励,同时还得到中国科学院微生物研究所真菌学国家重点实验室主任刘杏忠研究员、中国科学院农业虫害鼠害综

合治理研究国家重点实验室主任戈锋研究员、北京林业大学戴玉成教授和山东师范大学生命科学学院院长王宝山教授等国内外同行的大力支持和帮助。作者特别感谢中国科学院魏江春院士在百忙之中为本书作序，感谢澳大利亚西澳大学陈应龙博士和上海市绿化管理指导站王本耀工程师提供部分封面照片，感谢宁楚涵同学为本书绘图，并对在编写本书的过程中胡玉金、高春梅、刘东岳、李文彬、刘贵猛、杜慧民、刘浩、于小娟和秦瑞华等同志的大力协助表示感谢。书中所涉及的部分科研成果由国家自然科学基金项目（31470101 和 31272210）、山东省重点研究计划项目（2016GNC110021）、山东省科技发展计划（2012GNC11010）、青岛市科技计划基础研究项目 [12-1-4-5-(14)-jch] 和青岛市民生科技计划项目 [17-3-3-57-nsh] 等资助。科学出版社的编辑为本书的出版付出了辛勤的劳动，在此表示诚挚的感谢。

刘润进 王琳

2017年9月1日



# 目 录

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第一章 生物共生学概述             | 1  |
| 第一节 生物共生学的概念和理论         | 1  |
| 一、生物共生的基本概念和理论          | 1  |
| 二、生物共生学的基本属性            | 3  |
| 第二节 生物共生体系的类型           | 4  |
| 一、按生物物种区分的共生体系          | 4  |
| 二、按构建共生体系的生物物种数量区分的共生体系 | 11 |
| 三、按共生体系的能量流动关系区分的共生体系   | 13 |
| 四、按生物共生关系的性质区分的共生体系     | 14 |
| 五、按共生部位或共生体结构区分的共生体系    | 15 |
| 第三节 生物共生学的发展历史          | 16 |
| 一、国际生物共生学研究发展历程         | 17 |
| 二、中国生物共生学研究发展历程         | 20 |
| 第四节 生物共生学研究主要进展         | 22 |
| 一、生物的共生机制               | 22 |
| 二、生物的共生效应               | 24 |
| 三、生物共生效应的作用机制           | 26 |
| 第五节 生物共生学的研究意义与发展前景     | 27 |
| 一、生物共生学的研究意义            | 28 |
| 二、生物共生学的发展前景            | 31 |
| 第二章 人类与其他生物的共生          | 33 |
| 第一节 人类与动植物的共生           | 33 |
| 一、人体与动植物的共生体系           | 33 |
| 二、人体与动植物的共生机制           | 34 |
| 三、人体与动植物的共生效应           | 35 |
| 第二节 人类与微生物的共生           | 37 |
| 一、人体与微生物的共生体系           | 37 |
| 二、人体与微生物的共生机制           | 41 |
| 三、人体与微生物的共生效应           | 45 |



|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| <b>第三章 动物与其他生物的共生</b>       | 49  |
| <b>第一节 动物与动物的共生</b>         | 49  |
| 一、动物与动物的共生体系                | 49  |
| 二、动物与动物的共生机制                | 55  |
| 三、动物与动物的共生效应                | 57  |
| <b>第二节 动物与植物的共生</b>         | 58  |
| 一、动物与植物的共生体系                | 58  |
| 二、动物与植物的共生机制                | 63  |
| 三、动物与植物的共生效应                | 65  |
| <b>第三节 动物与真菌的共生</b>         | 66  |
| 一、动物与真菌的共生体系                | 67  |
| 二、动物与真菌的共生机制                | 70  |
| 三、动物与真菌的共生效应                | 72  |
| <b>第四节 动物与细菌的共生</b>         | 73  |
| 一、动物与细菌的共生体系                | 73  |
| 二、动物与细菌的共生机制                | 78  |
| 三、动物与细菌的共生效应                | 80  |
| <b>第五节 动物与其他生物共生效应的作用机制</b> | 81  |
| 一、改善共生生物的营养                 | 81  |
| 二、合成次生代谢物质                  | 81  |
| 三、调控基因表达                    | 82  |
| <b>第四章 植物与真菌的共生</b>         | 83  |
| <b>第一节 植物与真菌的共生体</b>        | 83  |
| 一、植物与真菌的共生部位                | 84  |
| 二、植物与真菌的共生类型                | 89  |
| 三、植物与真菌的共生结构                | 90  |
| <b>第二节 植物共生真菌</b>           | 98  |
| 一、植物共生真菌的种类                 | 99  |
| 二、植物共生真菌的分离培养               | 116 |
| 三、植物共生真菌的生长发育               | 119 |
| <b>第三节 植物与真菌的共生体发育</b>      | 124 |
| 一、菌根真菌定殖特征                  | 125 |
| 二、深色有隔内生真菌(DSE)定殖特征         | 131 |
| 三、印度梨形孢定殖特征                 | 133 |
| 四、禾草共生真菌定殖特征                | 135 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 第四节 植物与真菌的共生机制 .....          | 137 |
| 一、植物与真菌共生的生物化学机制 .....        | 137 |
| 二、植物与真菌共生的生理学机制 .....         | 139 |
| 三、植物与真菌共生的生态学机制 .....         | 143 |
| 四、植物与真菌共生的遗传学机制 .....         | 144 |
| 第五节 植物与真菌共生的生理生态功能 .....      | 145 |
| 一、促进农、林、牧业生产 .....            | 146 |
| 二、增强环境与食品安全性 .....            | 157 |
| 三、增加生物多样性 .....               | 158 |
| 四、保持生态系统的稳定性 .....            | 158 |
| 第六节 植物与真菌共生的作用机制 .....        | 159 |
| 一、植物与真菌共生体改善营养的作用机制 .....     | 159 |
| 二、提高抗逆性的作用机制 .....            | 160 |
| 三、促进植物生长、增加产量和改善品质的作用机制 ..... | 165 |
| 第五章 植物与细菌的共生 .....            | 167 |
| 第一节 植物与细菌的共生体系 .....          | 167 |
| 一、植物与细菌的共生部位 .....            | 168 |
| 二、植物与细菌的共生类型 .....            | 177 |
| 三、植物与细菌的共生结构 .....            | 180 |
| 第二节 植物共生细菌 .....              | 182 |
| 一、植物共生细菌的种类 .....             | 183 |
| 二、植物共生细菌的分离与培养 .....          | 194 |
| 第三节 植物与细菌的共生体发育 .....         | 195 |
| 一、豆科植物与根瘤菌构建的根瘤共生体 .....      | 195 |
| 二、植物与弗兰克氏菌构建的根瘤共生体 .....      | 196 |
| 三、植物与其他细菌的共生体 .....           | 198 |
| 第四节 植物与细菌的共生机制 .....          | 199 |
| 一、植物与细菌共生的生物化学机制 .....        | 199 |
| 二、植物与细菌共生的生理学机制 .....         | 200 |
| 三、植物与细菌共生的生态学机制 .....         | 202 |
| 四、植物与细菌共生的遗传学机制 .....         | 203 |
| 第五节 植物与细菌共生的生理生态功能 .....      | 203 |
| 一、植物与细菌共生改善植物营养的效应 .....      | 203 |
| 二、植物与细菌共生增强植物抗逆的效应 .....      | 204 |
| 三、植物与细菌共生改善土壤肥力的效应 .....      | 206 |
| 四、植物与细菌共生促进植物生长、增加产量的效应 ..... | 206 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 第六节 植物与细菌共生效应的作用机制 .....        | 207 |
| 一、植物与细菌共生改善植物营养的作用机制 .....      | 208 |
| 二、植物与细菌共生增强植物抗逆性的作用机制 .....     | 208 |
| 三、植物与细菌共生改善土壤肥力的作用机制 .....      | 210 |
| 四、植物与细菌共生促进植物生长、增加产量的作用机制 ..... | 211 |
| 第六章 真菌与细菌的共生 .....              | 214 |
| 第一节 真菌与细菌的共生类型 .....            | 214 |
| 一、地衣型真菌与蓝细菌的共生 .....            | 214 |
| 二、菌根真菌与细菌的共生 .....              | 216 |
| 三、其他真菌与细菌的共生 .....              | 217 |
| 第二节 真菌与细菌共生体的形态结构 .....         | 217 |
| 一、地衣型真菌与蓝细菌的共生体 .....           | 217 |
| 二、菌根真菌与细菌的共生体 .....             | 219 |
| 三、其他真菌与细菌的共生体 .....             | 219 |
| 第三节 真菌与细菌共生体的发育 .....           | 219 |
| 一、地衣型真菌与蓝细菌共生体的发育 .....         | 219 |
| 二、菌根真菌与细菌共生体发育 .....            | 220 |
| 第四节 真菌与细菌的共生机制 .....            | 220 |
| 一、真菌与细菌共生的生物化学机制 .....          | 220 |
| 二、真菌与细菌共生的生理学机制 .....           | 220 |
| 三、真菌与细菌共生的生态学机制 .....           | 221 |
| 四、真菌与细菌共生的遗传学机制 .....           | 221 |
| 第五节 真菌与细菌共生的生理生态功能和机制 .....     | 222 |
| 一、真菌与细菌共生的生理生态效应 .....          | 223 |
| 二、真菌与细菌共生效应的作用机制 .....          | 227 |
| 第七章 生物复合共生体系 .....              | 229 |
| 第一节 生物复合共生体系的类型 .....           | 229 |
| 一、以动物为主体的复合共生体类型 .....          | 229 |
| 二、以植物为主体的复合共生体类型 .....          | 231 |
| 三、以真菌为主体的复合共生体类型 .....          | 234 |
| 第二节 复合共生体的形态特征 .....            | 235 |
| 第三节 生物复合共生体系的共生机制与发育特点 .....    | 235 |
| 一、昆虫+植物+真菌共生体系的构建过程 .....       | 235 |
| 二、植物+ECM真菌+AM真菌复合共生体的发育 .....   | 236 |
| 三、豆科植物+AM真菌+根瘤菌共生机制 .....       | 237 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第四节 生物复合共生体系的生理生态功能 .....   | 239 |
| 一、改善植物营养 .....              | 239 |
| 二、增强植物抗逆性 .....             | 240 |
| 三、促进植物生长 .....              | 241 |
| 四、修复污染与退化土壤 .....           | 242 |
| 第五节 生物复合共生体系的作用机制 .....     | 243 |
| 一、调控激素水平 .....              | 244 |
| 二、促进生理代谢 .....              | 244 |
| 三、调控相关基因 .....              | 245 |
| 四、实现功能互补 .....              | 245 |
| <br>第八章 生物共生生态学 .....       | 248 |
| 第一节 生物共生生态系统多样性 .....       | 248 |
| 一、森林生态系统 .....              | 248 |
| 二、草原生态系统 .....              | 249 |
| 三、荒漠生态系统 .....              | 249 |
| 四、海洋生态系统 .....              | 250 |
| 五、江河、湖泊、沼泽、湿地生态系统 .....     | 252 |
| 六、农业生态系统 .....              | 253 |
| 七、城市生态系统 .....              | 254 |
| 第二节 生物共生的微生态 .....          | 254 |
| 第三节 影响生物共生体系的因子与调控 .....    | 255 |
| 一、生物因素 .....                | 255 |
| 二、地理因素 .....                | 261 |
| 三、气象因素 .....                | 263 |
| 四、土壤肥力 .....                | 266 |
| 五、水域条件 .....                | 270 |
| 六、农业技术 .....                | 272 |
| 七、其他因素 .....                | 277 |
| <br>第九章 生物共生学技术的应用与发展 ..... | 281 |
| 第一节 生物共生学技术的类型 .....        | 281 |
| 一、动物与动物的共生技术 .....          | 281 |
| 二、动物与植物的共生技术 .....          | 282 |
| 三、植物与植物的共生技术 .....          | 283 |
| 四、植物与真菌的共生技术 .....          | 283 |
| 五、植物与细菌的共生技术 .....          | 283 |
| 六、真菌与细菌的共生技术 .....          | 284 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 第二节 生物共生学技术的应用领域 .....        | 284 |
| 一、人与动物医学领域 .....              | 284 |
| 二、动物、植物和食用菌产业 .....           | 287 |
| 三、环境保护领域 .....                | 294 |
| 第三节 生物共生学技术的发展前景 .....        | 295 |
| <br>第十章 生物共生学研究方法 .....       | 300 |
| 第一节 共生真菌研究方法与技术 .....         | 300 |
| 一、动物共生真菌 .....                | 300 |
| 二、植物共生真菌 .....                | 305 |
| 三、地衣型真菌 .....                 | 320 |
| 第二节 共生细菌研究方法与技术 .....         | 324 |
| 一、动物共生细菌 .....                | 324 |
| 二、植物共生细菌 .....                | 328 |
| 第三节 分子生物学技术在生物共生学研究中的应用 ..... | 331 |
| 一、现代分子生物学技术简介 .....           | 331 |
| 二、共生细菌和共生真菌的分子鉴定 .....        | 336 |
| 三、共生细菌和共生真菌群落结构特征 .....       | 337 |
| 四、共生细菌和共生真菌的组学研究 .....        | 340 |
| <br>参考文献 .....                | 344 |

# CONTENTS

- 1 Overview of Biological Symbiotics / 1
  - 1.1 Conceptions and Theories of Biological Symbiotics / 1
    - 1.1.1 Basic Conceptions and Theories of Biological Symbiotics / 1
    - 1.1.2 Basic Characteristics of Biological Symbiotics / 3
  - 1.2 Types of Biological Symbiotic Systems / 4
    - 1.2.1 Symbiotic Systems Classified with Species of Symbiotic Partners / 4
    - 1.2.2 Symbiotic Systems Classified with Numbers of Species of Symbionts / 11
    - 1.2.3 Symbiotic Systems Classified with the Energy Flow Relationships / 13
    - 1.2.4 Symbiotic Systems Classified with Symbiosis Relationships / 14
    - 1.2.5 Symbiotic Systems Classified with Symbiotic Sites and Structures / 15
  - 1.3 Development History of Biological Symbiotics / 16
    - 1.3.1 The International Development Course of Biological Symbiotics / 17
    - 1.3.2 The Development Course of Biological Symbiotics in China / 20
  - 1.4 Main Advances in the Study of Biological Symbiotics / 22
    - 1.4.1 Symbiotic Mechanisms in Biology / 22
    - 1.4.2 Symbiotic Effects of Biology / 24
    - 1.4.3 Functioning Mechanisms of Biological Symbiosis / 26
  - 1.5 Significance and Prospects in the Study of Biological Symbiotics / 27
    - 1.5.1 Significance of Researches on Biological Symbiotics / 28
    - 1.5.2 Prospects of Biological Symbiotics / 31
- 2 Symbiosis between Human and the Other Living Things / 33
  - 2.1 Symbiosis between Human and Animals/Plants / 33
    - 2.1.1 Symbiotic Systems between Human and Animals/Plants / 33
    - 2.1.2 Mechanisms of Symbiosis between Human and Animals/Plants / 34
    - 2.1.3 Effects of Symbiosis between Human and Animals/Plants / 35
  - 2.2 Symbiosis Between Human and Microbes / 37
    - 2.2.1 Systems of Symbiosis between Human and Animals/Plants / 37
    - 2.2.2 Mechanisms of Symbiosis between Human and Microbes / 41
    - 2.2.3 Effects of Symbiosis between Human and Microbes / 45
- 3 Symbiosis between Animals and the Other Living Things / 49

- 3.1 Symbiosis between Animals and Animals / 49
  - 3.1.1 Systems of Symbiosis between Animals and Animals / 49
  - 3.1.2 Mechanisms of Symbiosis between Animals and Animals / 55
  - 3.1.3 Effects of Symbiosis between Animals and Animals / 57
- 3.2 Symbiosis between Animals and Plants / 58
  - 3.2.1 Systems of Symbiosis between Animals and Plants / 58
  - 3.2.2 Mechanisms of Symbiosis between Animals and Plants / 63
  - 3.2.3 Effects of Symbiosis between Animals and Plants / 65
- 3.3 Symbiosis between Animals and Fungi / 66
  - 3.3.1 Systems of Symbiosis between Animals and Fungi / 67
  - 3.3.2 Mechanisms of Symbiosis between Animals and Fungi / 70
  - 3.3.3 Effects of Symbiosis between Animals and Fungi / 72
- 3.4 Symbiosis between Animals and Bacteria / 73
  - 3.4.1 Systems of Symbiosis between Animals and Bacteria / 73
  - 3.4.2 Mechanisms of Symbiosis between Animals and Bacteria / 78
  - 3.4.3 Effects of Symbiosis between Animals and Bacteria / 80
- 3.5 Functioning Mechanisms of Symbiosis between Animals and the Other Livings / 81
  - 3.5.1 Improving Nutrition of Symbionts / 81
  - 3.5.2 Synthesizing Secondary Metabolism Substances / 81
  - 3.5.3 Regulating Gene Expression / 82
- 4 Symbiosis between Plants and Fungi / 83
  - 4.1 Systems of Symbiosis between Plants and Fungi / 83
    - 4.1.1 Sites of Symbiosis between Plants and Fungi / 84
    - 4.1.2 Types of Symbiosis between Plants and Fungi / 89
    - 4.1.3 Structures of Symbiosis between Plants and Fungi / 90
  - 4.2 Plant Symbiotic Fungi / 98
    - 4.2.1 Species of Plant Symbiotic Fungi / 99
    - 4.2.2 Isolation and Culture of Plant Symbiotic Fungi / 116
    - 4.2.3 Growth and Development of Plant Symbiotic Fungi / 119
  - 4.3 Symbiont Development of Symbiosis between Plants and Fungi / 124
    - 4.3.1 Colonization Features of Mycorrhizal Fungi / 125
    - 4.3.2 Colonization Features of Dark Septate Endophytic Fungi / 131
    - 4.3.3 Colonization Features of *Piriformospora indica* / 133
    - 4.3.4 Colonization Features of the Gramineous Herb Symbiotic Fungi / 135
  - 4.4 Mechanisms of Symbiosis Between Plants and Fungi / 137
    - 4.4.1 Biochemical Mechanisms of Symbiosis Between Plants and Fungi / 137
    - 4.4.2 Physiological Mechanisms of Symbiosis Between Plants and Fungi / 139
    - 4.4.3 Ecological Mechanisms of Symbiosis Between Plants and Fungi / 143



|       |                                                                                        |       |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 4.4.4 | Genetic Mechanisms of Symbiosis Between Plants and Fungi                               | / 144 |
| 4.5   | Physiological and Ecological Functions of Symbiosis Between Plants and Fungi           | / 145 |
| 4.5.1 | Improving Production of Agriculture, Forestry, Animal Husbandry and Fishery            | / 146 |
| 4.5.2 | Enhancing Safety of Environments and Food                                              | / 157 |
| 4.5.3 | Increasing Biodiversity                                                                | / 158 |
| 4.5.4 | Maintaining Ecosystem Stabilization                                                    | / 158 |
| 4.6   | Functioning Mechanisms of Symbiosis between Plants and Fungi                           | / 159 |
| 4.6.1 | Mechanisms of Improving Nutrition of Plants                                            | / 159 |
| 4.6.2 | Mechanisms of Increasing Stress Tolerances of Plants                                   | / 160 |
| 4.6.3 | Mechanisms of Promoting Growth, Yield and Quality of Plants                            | / 165 |
| 5     | Symbiosis between Plants and Bacteria                                                  | / 167 |
| 5.1   | Systems of Symbiosis between Plants and Bacteria                                       | / 167 |
| 5.1.1 | Sites of Symbiosis between Plants and Bacteria                                         | / 168 |
| 5.1.2 | Types of Symbiosis between Plants and Bacteria                                         | / 177 |
| 5.1.3 | Structures of Symbiosis between Plants and Bacteria                                    | / 180 |
| 5.2   | Plant Symbiotic Bacteria                                                               | / 182 |
| 5.2.1 | Species of Plant Symbiotic Bacteria                                                    | / 183 |
| 5.2.2 | Isolation and Culture of Plant Symbiotic Bacteria                                      | / 194 |
| 5.3   | Symbiont Development of Symbiosis between Plants and Bacteria                          | / 195 |
| 5.3.1 | Nodule Symbionts Formed with Legume and <i>Rhizobium</i>                               | / 195 |
| 5.3.2 | Symbiotic Systems between Plants and Actinomycetes                                     | / 196 |
| 5.3.3 | Symbiotic Systems between Plants and the Other Bacteria                                | / 198 |
| 5.4   | Mechanisms of Symbiosis Between Plants and Bacteria                                    | / 199 |
| 5.4.1 | Biochemical Mechanisms of Symbiosis Between Plants and Bacteria                        | / 199 |
| 5.4.2 | Physiological Mechanisms of Symbiosis Between Plants and Bacteria                      | / 200 |
| 5.4.3 | Ecological Mechanisms of Symbiosis Between Plants and Bacteria                         | / 202 |
| 5.4.4 | Genetic Mechanisms of Symbiosis Between Plants and Bacteria                            | / 203 |
| 5.5   | Physiological and Ecological Functions of Symbiosis Between Plants and Bacteria        | / 203 |
| 5.5.1 | Improving Plant Nutrition by Symbiosis between Plants and Bacteria                     | / 203 |
| 5.5.2 | Enhancing Stress Tolerances of plants by Symbiosis between Plants and Bacteria         | / 204 |
| 5.5.3 | Increasing Soil Fertilities by Symbiosis between Plants and Bacteria                   | / 206 |
| 5.5.4 | Promoting Growth, Yield and Quality of Plants by Symbiosis between Plants and Bacteria | / 206 |
| 5.6   | Functioning Mechanisms of Symbiosis between Plants and Bacteria                        | / 207 |
| 5.6.1 | Mechanisms of Improving Nutrition of Plants                                            | / 208 |
| 5.6.2 | Mechanisms of Increasing Stress Tolerances of Plants                                   | / 208 |
| 5.6.3 | Mechanisms of Adding Soil Fertilities by Symbiosis between Plants and Bacteria         | / 210 |
| 5.6.4 | Mechanisms of Promoting Growth, Yield and Quality of Plants                            | / 211 |

- 6 Symbiosis between Fungi and Bacteria / 214
  - 6.1 Types of Symbiosis between Fungi and Bacteria / 214
    - 6.1.1 Symbiosis between Lichen-forming Fungi and Cyanobacteria / 214
    - 6.1.2 Symbiosis between Mycorrhizal Fungi and Bacteria / 216
    - 6.1.3 Symbiosis between the Other Fungi and Bacteria / 217
  - 6.2 Morphological Structures of Symbionts Formed Fungi and Bacteria / 217
    - 6.2.1 Symbionts Formed with Lichenized Fungi and Bacteria / 217
    - 6.2.2 Symbionts Formed with mycorrhizal fungi and Bacteria / 219
    - 6.2.3 Symbionts Formed with the Other Fungi and Bacteria / 219
  - 6.3 Growth and Development of Symbionts Formed with Fungi and Bacteria / 219
    - 6.3.1 Development of Symbionts Formed with Lichenized Fungi and Bacteria / 219
    - 6.3.2 Development of Symbionts Formed with Mycorrhizal Fungi and Bacteria / 220
  - 6.4 Mechanisms of Symbiosis Between Fungi and Bacteria / 220
    - 6.4.1 Biochemical Mechanisms of Symbiosis Between Fungi and Bacteria / 220
    - 6.4.2 Physiological Mechanisms of Symbiosis Between Fungi and Bacteria / 220
    - 6.4.3 Ecological Mechanisms of Symbiosis Between Fungi and Bacteria / 221
    - 6.4.4 Genetic Mechanisms of Symbiosis Between Fungi and Bacteria / 221
  - 6.5 Physiological and Ecological Functions and its Functioning Mechanisms of Symbiosis between Fungi and Bacteria / 222
    - 6.5.1 Physiological and Ecological Effects of Symbiosis between Fungi and Bacteria / 223
    - 6.5.2 Functioning Mechanisms of Symbiosis between Fungi and Bacteria / 227
- 7 Multiple Symbiosis Systems / 229
  - 7.1 Types of Multiple Symbiosis Systems / 229
    - 7.1.1 Types of Multiple Symbiosis Systems Formed with Animals as the Main Body / 229
    - 7.1.2 Types of Multiple Symbiosis Systems Formed with Plants as the Main Body / 231
    - 7.1.3 Types of Multiple Symbiosis Systems Formed with Fungi as the Main Body / 234
  - 7.2 Morphological Features of Multiple Symbiosis Systems / 235
  - 7.3 Development Characteristics and Symbiotic Mechanisms of Multiple Symbiosis Systems / 235
    - 7.3.1 Establishment Processes of Multiple Symbionts Insects+Plants+Fungi / 235
    - 7.3.2 Development of Multiple Symbionts Plants+ECM fungi+AM fungi / 236
    - 7.3.3 Symbiotic Mechanisms of Multiple Symbionts Legume+AM fungi+*Rhizobium* / 237
  - 7.4 Physiological and Ecological Functions of Multiple Symbionts / 239
    - 7.4.1 Improving Plant Nutrition / 239
    - 7.4.2 Enhancing Plant Stress Resistance / 240
    - 7.4.3 Increasing Plant Growth / 241
    - 7.4.4 Rehabilitating Polluted and Degraded Soils / 242
  - 7.5 Functioning Mechanisms of Multiple Symbionts / 243