



“十三五”国家重点图书重大出版工程规划项目

中国农业科学院科技创新工程资助出版

# 面向未来的海水农业

Future-oriented Seawater Agriculture

张成省 李义强 尤祥伟◎编著



**淡**水资源短缺是21世纪全球作物生产面临的主要制约因素。发展海水农业潜力巨大、意义深远。本书较为系统、全面的综述了国内外海水农业研究与发展现状，对当前海水农业存在的问题进行了分析与讨论，最终目的是寻找海水农业未来发展方向和可行途径。本书适合生命科学、海洋科学、农业科学、环境保护等学科的科研人员以及大专院校师生阅读和参考，尤其适合从事盐碱地治理、滩涂生态修复和滨海城市绿化等工作的人员参考。

S  
226



中国农业科学技术出版社  
官方微信公众平台



责任编辑 姚欢  
书籍设计 孙宝林 高崑

ISBN 978-7-5116-3681-2



9 787511 636812 >

定价：198.00元



“十三五”国家重点图书重大出版工程规划项目

中国农业科学院科技创新工程资助出版

# 面向未来的海水农业

Future-oriented Seawater Agriculture

张成省 李义强 尤祥伟◎编著

中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

面向未来的海水农业 / 张成省, 李义强, 尤祥伟编著. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2018. 11

ISBN 978-7-5116-3681-2

I. ①面… II. ①张…②李…③尤… III. ①海水资源-应用-农业生产-研究  
IV. ①S

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 095674 号

责任编辑 姚欢

责任校对 贾海霞

出版者 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电话 (010) 82106638 (编辑室) (010) 82109702 (发行部)

(010) 82109709 (读者服务部)

传真 (010) 82106650

网址 <http://www.castp.cn>

经销者 各地新华书店

印刷者 北京建宏印刷有限公司

开本 787 mm×1 092 mm 1/16

印张 21.5

字数 500 千字

版次 2018 年 11 月第 1 版 2019 年 1 月第 2 次印刷

定价 198.00 元

版权所有·翻印必究

# 《现代农业科学精品文库》

## 编 委 会

主 任：唐华俊

副主任：张合成 陈萌山 李金祥 李杰人

吴孔明 王汉中 万建民 梅旭荣

刘大群 贾广东

委 员：(以姓氏笔画为序)

王加启 王述民 文 学 方智远

印遇龙 任天志 刘 旭 孙九林

孙 坦 孙宝国 李 玉 李付广

李立会 步志高 沈建忠 张改平

张洪程 张新友 陆建中 陈巧敏

罗锡文 金宁一 南志标 骆建忠

秦玉昌 钱旭红 康 乐 康绍忠

喻树迅 谢华安 熊明民 戴小枫

# 《现代农业科学精品文库》

## 编委会办公室

主 任：任天志

副主任：张应禄 文 学 熊明民 林克剑

# 《面向未来的海水农业》

## 编著委员会

主 编 著：张成省 李义强 尤祥伟

编著成员：（按姓氏笔画排列）

马斯琦	王向誉	王 璐	尤祥伟
宁 凯	朱英芝	刘赤兵	刘志鑫
刘 美	孙超岷	李义强	吴继法
邹 平	张成省	孟 晨	赵栋霖
荆常亮	姜明国	袁 源	贾 曦
顾寅钰	徐华凌	徐宗昌	徐建华
徐海成	郭洪恩	梁 军	解志红

# 前 言

人口增加、耕地退化、气候变化以及淡水资源缺乏，使全球粮食生产面临着巨大挑战。为了寻找替代作物及生产方式，人们开始把目光转向占全球总水量 97% 的海水。自 20 世纪 40 年代末，Hugo Boyko 和 Elisabeth Boyko 首次报道高浓度盐水灌溉促进盐生作物生长以来，海水农业的概念逐渐被人们所接受，并逐渐发展成为现代农业的一个新的学科分支。经过几十年的发展，海水农业在理论与实践方面取得一定进展，选育出了部分适合海水灌溉的耐盐植物，评估了海水灌溉可能造成的生态风险，部分研究成果在一些近海沙漠地区得到了推广应用。我国海水农业虽然起步较晚，但通过技术引进与自主创新相结合，在耐海水作物选育、种植及产业化开发方面也取得了丰硕成果。

本书以海水农业为主题，回顾与综述了海水农业历史起源与发展现状，并从海水农业概念、研究对象以及产业特征等视角，对海水农业领域相关理论和技术进行全方位分析。将当前海水农业的研究现状和主要成果呈现在读者眼前。本书撰写过程中，不期望覆盖该领域所有的研究成果或文献，重点在于探讨未来海水农业发展方向与途径。本书适合从事生命科学、海洋科学、农业科学、环境保护等学科的科研人员以及大专院校师生阅读和参考，尤其适合从事盐碱地治理、滩涂生态修复和滨海城市绿化等工作的人员参考。

本书第一章概述了海水农业的发展历史与现状；第二章介绍了盐生植物的类型与资源利用；第三章介绍了海水作物的种类与栽培现状；第四章介绍了海洋微生物的种类与农药应用现状；第五章介绍了海水灌溉理论和技术研究进展与实践；第六章综述了海洋滩涂污染物的种类与治理现状；第七章介绍了海水农业产品的加工与利用技术；第八章对海水农业存在的问题与发展策略进行了分析与展望。

海水农业属于新的学科、新的产业和新的技术，是对传统淡水农业的革新，在理论、技术和实践方面还远未成功。本书在前人研究基础上，尝试对其进行理论梳理，对其概念、特征和相关技术作出分析，提出未来发展的意见和建议，笔者真诚地希望本书的一些观点和建议能够促进海水农业实践。



与本书有关的研究工作，得到了中国农业科学院科技创新工程的资助，编撰工作得到中国农业科学技术出版社的大力支持和帮助，在此表示诚挚的谢意。本书的撰写参考了大量中外文献，在此对所有参考文献作者一并感谢。

限于作者水平和能力，本书存在的缺点与不足在所难免，恳请广大读者批评指正。

# 目 录

第一章 海水农业的发展历史与现状 .....	(1)
第一节 海水农业的概念和特征 .....	(1)
一、海水农业的概念 .....	(1)
二、海水农业的分类地位 .....	(2)
三、海水农业的生产区域 .....	(3)
四、海水农业的栽培对象 .....	(6)
五、海水农业的产品用途 .....	(6)
第二节 海水农业研究简史 .....	(8)
一、萌芽时期 .....	(8)
二、诞生时期 .....	(9)
三、早期发展时期 .....	(9)
四、快速发展时期 .....	(10)
第三节 海水农业的重要意义和发展路径 .....	(11)
一、海水农业的重要意义 .....	(11)
二、海水农业解决的关键问题 .....	(15)
三、海水农业发展路径 .....	(18)
参考文献 .....	(22)
第二章 盐生植物的类型与资源利用 .....	(29)
第一节 盐生植物与盐害 .....	(29)
一、盐害的概念 .....	(29)
二、盐胁迫与盐生植物的抗盐性 .....	(30)
三、盐生植物的耐盐性和避盐性 .....	(33)
第二节 盐生植物的类型 .....	(34)



一、盐生植物的生理类型	(34)
二、盐生植物的生态类型	(36)
第三节 盐生植物的耐盐机理	(37)
一、稀盐盐生植物的耐盐性	(37)
二、泌盐盐生植物的泌盐机理	(44)
三、拒盐盐生植物的拒盐机理	(50)
四、盐生植物抗盐的分子作用机制	(51)
第四节 中国盐生植被的特点及应用	(61)
一、植物群落的分类原则	(61)
二、中国盐生植物植被类型	(62)
三、盐生植物资源的特点	(70)
四、盐生植物资源的用途	(71)
五、盐生植物的引种驯化	(76)
六、植物资源的合理开发利用	(78)
参考文献	(78)
第三章 海水作物的种类与栽培现状	(91)
第一节 粮食作物	(91)
一、盐草	(92)
二、藜麦	(92)
三、大麦	(94)
四、海水稻	(95)
五、野大豆	(96)
六、月见草	(97)
七、盐生粮食作物发展前景及面临挑战	(98)
第二节 蔬菜	(98)
一、海蓬子	(99)
二、碱蓬	(101)
三、蒲公英	(103)
四、番杏	(104)
五、三角叶滨藜	(105)
六、其他海水蔬菜	(106)

七、我国海水蔬菜发展前景及面临挑战 .....	(107)
<b>第三节 饲料作物 .....</b>	<b>(108)</b>
一、北美海蓬子 .....	(109)
二、碱蓬 .....	(111)
三、大米草 .....	(112)
四、苜蓿 .....	(113)
五、草木樨 .....	(115)
六、甜高粱 .....	(116)
七、盐生饲料作物发展前景及面临挑战 .....	(117)
<b>第四节 能源作物 .....</b>	<b>(118)</b>
一、甜高粱 .....	(119)
二、菊芋 .....	(122)
三、油葵 .....	(124)
四、海滨锦葵 .....	(126)
五、含油微藻 .....	(127)
六、其他耐盐能源作物 .....	(129)
七、我国滩涂耐盐能源作物发展前景及面临挑战 .....	(130)
<b>参考文献 .....</b>	<b>(132)</b>
<b>第四章 海洋微生物的种类与农业应用现状 .....</b>	<b>(139)</b>
<b>第一节 海洋微生物概述 .....</b>	<b>(139)</b>
一、海洋微生物及其特点 .....	(139)
二、海洋微生物多样性 .....	(142)
三、海洋农业微生物 .....	(156)
<b>第二节 海洋微生物农药 .....</b>	<b>(157)</b>
一、微生物农药 .....	(157)
二、活体微生物农药 .....	(158)
三、农用抗生素(微生物次级代谢产物) .....	(160)
四、海洋微生物农药 .....	(164)
<b>第三节 海洋微生物肥料 .....</b>	<b>(175)</b>
一、微生物肥料 .....	(175)
二、海洋生物和微生物肥料 .....	(179)

三、海洋微生物肥料的发展前景 .....	(184)
第四节 其他海洋微生物农业制品 .....	(185)
一、海洋渔用疫苗 .....	(185)
二、海洋生物微生态制剂 .....	(186)
参考文献 .....	(187)
第五章 海水灌溉理论和技术研究进展与实践 .....	(196)
第一节 灌溉用水质量要求与海水灌溉的主要问题 .....	(196)
一、灌溉用水适宜性划分 .....	(196)
二、盐分淋洗对排灌措施的要求 .....	(198)
三、海水的化学成分 .....	(198)
四、海水灌溉的主要问题 .....	(199)
第二节 海水灌溉对作物的影响 .....	(199)
一、海水灌溉对作物生长和产量的影响 .....	(199)
二、海水灌溉对植物形态特征的影响 .....	(202)
三、海水灌溉对植物生理进程的影响 .....	(202)
四、海水灌溉对作物水分和养分吸收的影响 .....	(203)
五、海水灌溉对植物生理生化指标的影响 .....	(204)
六、海水灌溉对农产品质量的影响 .....	(205)
第三节 海水灌溉对土壤的影响 .....	(208)
一、海水灌溉对土壤水盐运动影响 .....	(208)
二、海水灌溉对土壤盐含量影响 .....	(209)
三、海水灌溉对土壤盐碱化的影响 .....	(210)
四、海水灌溉对土壤微生物的影响 .....	(211)
第四节 海水灌溉技术与水盐调控 .....	(212)
一、海水灌溉水盐调控影响因素 .....	(212)
二、海水灌溉方式 .....	(216)
三、海水无土栽培 .....	(217)
四、海水灌溉下水肥耦合技术 .....	(218)
第五节 海水灌溉农业实践 .....	(219)
一、果树的海水灌溉农业实践 .....	(219)
二、蔬菜的海水灌溉农业实践 .....	(220)

三、饲料作物的海水灌溉农业实践 .....	(223)
四、粮食作物的海水灌溉农业实践 .....	(223)
参考文献 .....	(224)

## 第六章 海洋滩涂污染物的种类与治理现状 .....

第一节 重金属污染 .....	(235)
一、滩涂中重金属的来源及分布 .....	(236)
二、重金属污染的修复技术 .....	(240)
第二节 海水富营养化 .....	(247)
一、滩涂富营养化现状及原因 .....	(247)
二、富营养化生物修复研究进展 .....	(248)
第三节 持久性有机污染物 .....	(253)
一、多氯联苯 .....	(254)
二、多环芳烃 .....	(255)
三、有机氯农药 .....	(256)
参考文献 .....	(261)

## 第七章 海水农产品的加工与利用技术 .....

第一节 海水农产品加工利用技术分类和原理 .....	(277)
一、分离提取技术 .....	(277)
二、蒸馏浓缩技术 .....	(279)
三、干燥技术 .....	(280)
第二节 几种典型海水和滩涂植物产品加工利用技术 .....	(281)
一、海藻的综合加工利用技术 .....	(281)
二、海蓬子的综合加工利用技术 .....	(293)
三、甜高粱的综合利用加工技术 .....	(296)
四、其他滩涂耐盐植物的综合利用加工技术 .....	(299)
第三节 海洋农用微生物产品加工利用技术 .....	(303)
一、海洋微生物肥料加工利用技术 .....	(303)
二、海洋微生物农药加工利用技术 .....	(303)
三、海洋微生物酶发酵技术 .....	(304)



参考文献 .....	(306)
<b>第八章 海水农业存在的问题与发展策略 .....</b>	<b>(314)</b>
<b>第一节 海水农业发展现状分析 .....</b>	<b>(314)</b>
一、良好的海岸自然条件和海生生物种类资源 .....	(314)
二、海水养殖业的创新发展 .....	(315)
三、海洋药物资源开发利用现状 .....	(316)
四、海水种植业和能源植物发展现状 .....	(318)
<b>第二节 海水农业开发的支撑理论 .....</b>	<b>(320)</b>
一、农业多功能理论 .....	(320)
二、农业可持续发展理论 .....	(321)
三、农业区位理论 .....	(323)
<b>第三节 海水农业发展策略 .....</b>	<b>(324)</b>
一、盐碱土改良 .....	(324)
二、盐碱土的综合利用 .....	(326)
三、优化海水农业区域组织形式 .....	(327)
四、走可持续发展海水农业产业道路 .....	(327)
五、“互联网+海水农业”发展展望 .....	(328)
参考文献 .....	(328)

# 第一章 海水农业的发展历史与现状

联合国粮食及农业组织（FAO）预计到2050年世界人口将达到91亿，全球粮食生产需求将增加70%（FAO，2011）。这也意味着未来每年粮食需要增加4400万t的产量（Tester等，2010）。然而，城市化土壤退化导致耕地面积和生产力明显下降。此外，由于全球气候变化导致的干旱胁迫等自然灾害日益频繁。寻找新的粮食生产模式变得尤为迫切。相对于淡水资源的短缺，地球上水资源总量的97%是海水，可谓取之不尽、用之不竭。长期以来，海水不仅被认为无助于农作物的需要，还使大面积的沿海滩涂长期荒芜。为了解决上述矛盾，人们曾经有过种种幻想与探索，尝试利用海水进行作物栽培，海水农业应运而生，其理念也逐渐被人们接受、重视和发展。与传统农业相比，海水农业打破了传统依赖淡水灌溉的生产方式，是一种革命性的技术创新。了解海水农业的概念、发展历史、重要意义以及研究内容和方向，对建立海水农业理论和技术体系具有重要意义。

## 第一节 海水农业的概念和特征

### 一、海水农业的概念

海水农业（Seawater agriculture）概念最早起源于1949年以色列生态学家Hugo Boyko和Elizabeth Boyko提出的盐水农业（Salt-water Agriculture）。20世纪70年代该领域研究受到广泛重视，并提出了“生物盐化农业设想（Biosaline Concept）”。美国国家科学基金会的专家Lewis Mayfield、James Aller和Oskar Zaborsky将生物盐化农业定义为“在干旱地区普遍存在的土壤贫瘠、强光照以及高盐水可通过不同于传统农业的方式，用于食品、燃料和化学品的生产”（Hollaender，1979）。1985年Pasternak等提出海水农业，内容主要涉及农作物的海水灌溉。此后，国外专家学者一般将海水农业视同为海水灌溉农业（Sea Water Irrigating Agriculture）。最初海水灌溉农业是指直接用海水浇灌或漫灌的种植活动，后来泛指植物耐盐的一切试验和种植活动，除直接



用海水浇灌或漫灌外，还包括作物在沿海盐碱滩地的种植和在淡水灌溉的基础上间或灌溉海水或用低浓度海水喷灌。

如何界定“海水农业”，国内学术界迄今尚未达成共识。1978年，我国海洋经济学家徐质斌先生在将农业分为两大类型——陆地农业和海洋农业。其中，海洋农业即海水农业，指人类通过海洋生物技术，利用生物将海洋中的物质和能量转化为具有使用价值产品的社会生产活动，包括海洋渔业和海水灌溉农业。徐质斌等（2002）认为，海水灌溉农业是以海水资源、沿海滩涂资源和耐盐植物劳动对象的特殊农业。王霞等（2003）认为，海水灌溉农业是指在沿海盐碱荒滩地和盐碱地上，种植能用海水浇灌的耐盐作物的农业。林栖凤等（2005）则定义为“在沿海盐碱荒滩上，种植能用海水灌溉的野生驯化的和转基因的耐盐作物，以及对其产品进行加工的农业”。韩立民和张振（2014）认为，海水灌溉农业是指以沿海滩涂资源为载体，以生物技术为依托，对先天具有较强耐盐能力以及后天选育驯化的耐盐植物进行全海水灌溉或者海水与淡水混合灌溉的农业生产经济活动，是一项集水、土、植物资源综合开发的系统生态工程和特殊产业。李乃胜在21世纪初进一步丰富了“海水农业”概念和内涵，将海水农业定义为“利用盐碱地、滩涂、滨海湿地、海面水域和海底洋盆等空间资源，以海水为媒介进行的陆地和海洋动植物增养殖的农牧化生产活动”，并提出了“发展海水农业、实现耕海种洋”的发展战略。从内容上主要包括海水养殖业、海底渔牧业和海水种植业。其中海水种植业与传统海水灌溉农业类似，指以盐生植物或海生植物为生产对象，以土地和海水为载体进行生产的新兴农业领域，包括海面漂浮种植、天然海底种植和滩涂混合种植。

综上所述，对于“海水农业”的定义还缺乏严格一致的界定。为了区别于传统淡水农业和海水养殖业，本书综合徐质斌等（2002）海水灌溉农业概念及李乃胜关于海水种植业的论述，将海水农业界定为：受海水影响环境下，以滨海盐碱地、滩涂、湿地为重要生产资料，以耐盐植物为栽培对象，进行粮食、副食品、饲料和工业原料生产和加工的农业活动。需要说明的是，本书的最终目的是寻找海水农业未来发展方向和可行途径，并不寻求海水农业的准确定义或概念。

## 二、海水农业的分类地位

农业是指人类有意识地利用生物机体的生命力，将外界环境中的物质和能量转化为生物产品，以满足社会需要的一种生产经济活动。大约是在一万年前的旧石器时代末期或新石器时代初期，人们在长期的采集野生植物的过程中，逐渐掌握一些可食植物的生长规律，经过无数次的实践，终于将它们栽培、驯化为农作物，从而发明了农业。从原始农业到传统农业，再到现代农业，经过几千年的发展，目前农业主要包括



种植业、林业、牧业、渔业和副业。海水农业是近代随着社会发展后的产物，美国著名的未来学家尔温·托夫勒曾指出：21世纪是世界农业迎来大变革的时代，全球范围内将出现“第三次浪潮农业”。大趋势是通过高科技，使工业经济下的农业变成一种崭新的科技知识农业，其中令人神往的海水农业就是极具前景的新型农业。

根据徐质斌等对海水农业的定义以及对农业类型的划分，海水农业属于海洋农业的一个分支。基于本书对海水农业概念的界定，作者对农业系统进行了重新分类（图1），需要说明的是该分类不代表任何学术观点，仅仅为了便于本书的理解。如图1所示，作者将农业划分为淡水农业、海水（盐水）农业以及二者之间的海水农业。在改分类系统下，淡水农业主要是指依赖淡水的传统农业，海洋农业主要包括海洋渔业以及以海藻生产为主的海洋种植业。与传统淡水农业相比，海水农业涵盖了除渔业之外的种植业、林业、牧业和副业。



图1 海水农业是农业的一个分支

可见，海水农业是农业的重要组成部分，是现代农业的新分支，其劳动对象是海水资源、沿海滩涂资源以及耐盐碱类植物，在种植区域、栽培对象、灌溉方式以及产品定位方面有别于淡水农业和海洋农业。传统淡水农业依赖于淡水灌溉，栽培对象主要为甜土植物（Glycophyte）。海洋种植业栽培对象主要为海洋藻类，栽培介质为海水。

### 三、海水农业的生产区域

海水农业生产区域主要定位于滨海盐碱地、滩涂和荒漠等难以进行传统农业生产的区域，该区域的特点是土壤含盐量高、淡水资源缺乏。李乃胜认为依托盐渍陆地和近海滩涂为种植区域，是海水农业的区域特征。

#### 1. 盐渍土

盐渍土是盐土和碱土以及各种盐化、碱化土壤的总称。盐土是指土壤中可溶性盐含量达到对作物生长有显著危害的土类。盐分含量指标因不同盐分组成而异。碱土是指土壤中含有危害植物生长和改变土壤性质的多量交换性钠。盐渍土主要分布在内陆干旱、半干旱地区，滨海地区也有分布。全世界盐渍土面积计约 897.0 万 km<sup>2</sup>，约占