

海冰水在滨海台田-浅池系统中的应用

史培军 张 化 顾 卫 王静爱 著
张 国 明 许映军 张 峰



科学出版社

海冰水在滨海台田-浅池系统中的应用

史培军 张 化 顾 卫 王静爱 著
张 国 明 许映军 张 峰

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是在完成“十一五”国家高技术研究发展计划(863 计划)项目“海冰资源淡化与利用技术”(2006AA10206)部分工作基础上撰写而成,是以河北省黄骅市为例,关于海冰水农业灌溉利用及台田-浅池系统农业综合生产模式的研究成果。本书采用台田-浅池土地利用方式进行了水土资源空间配置与调节土壤水盐运动,建成了相对安全、高效的微域生态农业环境;利用田间实验和数值模拟相结合的方式,分析了海冰水利用下台田土壤水盐运移动态与海冰水农业综合利用效果,提出了海冰水作为淡水利用的台田种植以及浅池养殖滨海盐碱地综合生产模式。

本书可为滨海重盐碱地水土资源开发、农业生态环境改善、社会主义新农村建设提供借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

海冰水在滨海台田-浅池系统中的应用 / 史培军等著. —北京:科学出版社, 2014. 4

ISBN 978-7-03-040205-9

I. ①海… II. ①史… III. ①海冰-水资源利用-农业利用-研究
IV. ①P746. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 049035 号

责任编辑:彭胜潮 王淑云 / 责任校对:郑金红

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:铭轩堂

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>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 4 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2014 年 4 月第一次印刷 印张: 16 1/2 插页: 8

字数: 380 000

定价: 109.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

水土资源是农业存在和发展的基础，也是人类生存最基本的条件。中国是农业大国，水土资源对农业生产的稳定和经济的可持续发展更具有至关重要的意义。因此，以可持续性理论为指导，研究水土资源的合理利用，解决水土资源利用之间的矛盾具有非常重要的意义。然而分布不均、供需紧张等农业淡水资源问题，严重影响到土地质量、农业生产和粮食安全。为解决食物安全问题，世界上许多水资源相对缺乏，但地下咸水或海水资源极其丰富的国家和地区对滨湖或海盐渍化土壤的开发利用极为重视，并通过盐生经济植物的开发发展咸水(海水)灌溉农业。与发达国家相比，我国农业用水问题尤其突出。我国农业用水量约占全国用水总量的 70%~80%，现状已成为制约农业可持续发展的重要因素。因此，在提高农业节水、作物高 eff 用水、发展节水灌溉的同时，寻找新的水源已成为缓解我国水资源紧缺的战略性对策。

我国海水及滨海滩涂资源丰富，但作为农业水土资源利用，则遇到盐碱程度高的限制。位于渤海海域的海冰资源储量丰富，经一定的脱盐处理，可成为符合盐碱地区农田灌溉水质标准的海冰(淡化)水，在滨海盐碱地和滨海滩涂农业利用具有广阔前景，潜力巨大。海冰水作为一种新型水资源的农业利用尝试，可能会对土壤或作物产生不良影响，如土壤板结、结构破坏、作物产量降低、品质下降等。因此，如何建立一套适应海冰水利用、水土环境稳定的滨海土地(盐碱地、滩涂)利用方式及水(海冰水)土资源开发模式是实现我国滨海农业可持续发展的重要组成部分。

我国是世界上唯一开展海冰资源化研究和实际开发利用的国家。1995 年，北京师范大学史培军等提出了渤海海冰资源利用的研究设想；1995~1999 年，史培军等自行组织开展了海冰资源淡化的基础研究。2000 年，科技部农社司首次将渤海海冰资源开发利用列入“十五”科技攻关专项。2001 年，教育部将渤海海冰资源开发与农业应用研究列入重点基金资助(02010)，并对研究成果进行了鉴定；同期，科技部对渤海海冰作为淡水资源的可行性进行了预研资助。2004 年，科技部农社司将海冰资源开发和农业应用课题纳入 863 计划滚动项目(2004AA24020)，2005 年通过了项目验收和成果鉴定。1995~2005 年对海冰资源开发利用的基础性研究，为深入开展海冰水农业应用研究奠定了良好基础。

2006 年启动了“十一五”国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目——海冰资源淡化与利用技术(2006AA10206)，对海冰水农业灌溉技术及盐碱地利用模式等方面展开了一系列研发工作。经过近 5 年的海冰水农业利用实验，申报发明专利 8 项，实用新型专利 6 项，发表论文 37 篇，取得了一批具有自主知识产权的研究成果和应用技术；共完

成台田-浅池建设 100 亩¹⁾, 示范田 500 亩, 基本形成海冰淡化农业高效、安全应用示范田体系; 形成了多单位跨学科协作的海冰水农业利用研究团队, 吸引和培养了一批海冰资源开发技术与工程专业人才, 创建了海冰资源开发与综合利用实验基地, 该项目于 2010 年通过了科技部组织的项目验收。

《海冰水在滨海台田-浅池系统中的应用》一书就是在完成上述项目基础上撰写而成。本书以新型水资源农业利用为出发点, 通过调整滨海盐碱地土地利用方式, 利用台田-浅池土地利用模式打破滨海盐碱地的旱-盐碱、涝-盐碱的灾害串发规律, 建立结构稳定、土壤安全的海冰水农业利用环境。在此基础上, 分析海冰水利用下台田-浅池系统土壤水盐运移规律, 并利用模型模拟的方法, 精确衡量台田-浅池系统土壤盐分安全风险, 并以此建立适宜海冰水利用的台田-浅池系统生态农业种植与养殖模式及台田-浅池系统农业循环生产模式。全书共分为 7 章。第 1 章阐述滨海盐碱地水土资源农业利用现状及紧迫趋势, 明确海冰水作为环渤海滨海地区农业水资源利用的战略意义; 第 2 章对研究区土地资源与环境进行详细分析, 阐述滨海盐碱地的开发潜力与问题, 强调建立滨海盐碱地台田-浅池系统土地利用模式的重要性及潜力; 第 3 章建立滨海盐碱地台田-浅池工程技术, 实验分析台田-浅池系统改土技术和改土效果; 第 4 章详细分析海冰水利用下的滨海盐碱地台田-浅池系统种植、养殖实验与示范; 第 5 章阐述滨海盐碱地台田-浅池系统结构与功能, 为系统监测水盐迁移和精细化管理奠定了基础; 第 6 章建立滨海盐碱地台田-浅池系统水盐迁移模式, 通过精度检验, 为精细化管理和深入分析海冰水利用下的台田-浅池系统提供了工具, 通过模型工具, 对滨海盐碱地台田-浅池系统海冰水农业利用进行了数值模拟与情景分析, 为海冰水农业安全、高效利用奠定了基础; 第 7 章分析海冰水利用下滨海盐碱地台田-浅池系统中台田高效安全种植模式与浅池高效安全养殖模式, 建立了滨海盐碱地台田-浅池农业生态-生产范式。

本书是师生与同事合作研究的成果。史培军负责本书撰写章节的设计, 研究思路、理论构建、创新内容的提炼、全书的修改与审定, 以及第 1 章、第 5 章、第 7 章撰写; 王静爱负责全书撰写工作的统筹、整体结构优化、全书的修改与审定, 以及第 2 章、第 5 章、第 7 章撰写; 顾卫负责创新内容的提炼、全书的修改与审定, 以及第 4 章撰写; 许映军负责第 4 章撰写; 张化负责全书统稿, 以及第 3 章、第 4 章、第 6 章、第 7 章撰写; 张国明负责第 3 章撰写; 张峰负责第 2 章、第 5 章撰写。

在完成本书撰写和项目实施过程中, 北京师范大学岳耀杰博士、陶军博士等协助完成野外实验或资料分析, 同样付出了辛勤的劳动, 在此表示衷心感谢!

1) 1 亩 $\approx 666.7 \text{ m}^2$, 下同

北京师范大学的学生尹圆圆、盛中尧、尹卫霞、曲盼盼、赵金涛、贾慧聪、潘东华、张建松、高路、尹衍雨、李睿、高廷、徐品泓、白媛、林叶彬、吴之正、于长水、林叶彬、卜丹阳、林要、盛中尧、李雅、张粤、汪超子、蔡纪烜、赵婷、林伟等参加了相关资料的收集、整理、图表校对，以及野外调查和实验等工作，在此作者也深表感谢！

本书是在北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室、北京师范大学区域地理研究实验室、北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室、北京师范大学地理学与遥感科学学院、北京师范大学民政部/教育部减灾与应急管理研究院、北京师范大学资源学院的支持下完成的，作者在此一并致谢。

目 录

前言

第1章 绪论	(1)
1.1 研究背景和意义	(1)
1.1.1 研究背景	(1)
1.1.2 研究意义	(2)
1.2 微咸水与海水资源农业利用	(2)
1.2.1 微咸水资源农业利用	(2)
1.2.2 海水资源农业利用	(4)
1.3 滨海土地利用模式	(5)
1.3.1 区域土地利用/覆盖变化	(5)
1.3.2 基-塘模式	(6)
1.3.3 台田-沟塘模式	(8)
1.4 滨海盐碱地与海冰水利用	(10)
1.4.1 滨海盐碱地	(10)
1.4.2 滨海盐碱地综合治理与海冰水利用	(10)
1.5 水盐运动数值模拟	(13)
1.5.1 水盐运动模型	(13)
1.5.2 HYDRUS 模型	(15)
1.6 滨海循环农业与海冰水资源利用	(17)
1.6.1 循环农业	(17)
1.6.2 海冰水利用下的循环农业	(18)
1.6.3 海冰水资源利用存在的问题	(20)
参考文献	(21)
第2章 黄骅市资源环境与土地利用	(26)
2.1 资源环境	(26)
2.1.1 地理位置	(26)
2.1.2 地质地貌	(28)
2.1.3 气候水文	(29)
2.1.4 生物土壤	(35)
2.1.5 社会经济	(37)
2.2 土地利用变化	(39)
2.2.1 数据来源与研究方法	(39)
2.2.2 一级土地利用类型变化	(40)
2.2.3 二级土地利用类型变化	(43)
2.3 盐碱地变化	(47)
2.3.1 土地盐碱化	(47)

2.3.2 盐碱地土地利用变化	(50)
2.4 盐碱地土地利用优化	(57)
2.4.1 优化理念和模式——“台田-浅池”系统	(57)
2.4.2 区域生态安全条件下的土地利用优化方法	(58)
2.4.3 区域生态安全条件下的土地利用优化方案	(61)
2.4.4 “台田-浅池”系统实验区选择	(61)
参考文献	(63)
第3章 台田-浅池系统特征及排盐改土效果	(64)
3.1 台田-浅池系统工程	(64)
3.1.1 台田-浅池系统工程原理	(64)
3.1.2 台田-浅池系统工程设计及实施	(67)
3.2 台田-浅池系统实验	(76)
3.2.1 实验方案与设计	(76)
3.2.2 台田-浅池系统工程实验实施	(82)
3.3 台田-浅池系统排盐改土效果	(86)
3.3.1 台田对不同土质土壤盐分的影响	(86)
3.3.2 台田不同高度对土壤水分与盐分的影响	(93)
3.3.3 台田不同隔断对土壤水盐运动的影响	(96)
3.3.4 台田不同作物对盐分运移的影响	(99)
参考文献	(108)
第4章 海冰水灌溉下的台田-浅池系统种植实验与示范	(109)
4.1 台田海冰水灌溉实验	(109)
4.1.1 实验设计	(109)
4.1.2 结果与分析	(109)
4.2 滨海盐碱地甜高粱海冰水种植试验与示范	(114)
4.2.1 海冰水造墒	(114)
4.2.2 海冰水造墒播种及配套栽培技术示范	(116)
4.2.3 滨海盐碱地甜高粱海冰水造墒播种生产技术规程	(125)
4.3 台田作物生长效果的实验	(126)
4.3.1 试验材料和方法	(126)
4.3.2 试验结果与分析	(128)
参考文献	(130)
第5章 台田-浅池系统功能与驱动力分析	(131)
5.1 台田-浅池系统	(131)
5.1.1 台田-浅池系统	(131)
5.1.2 台田-浅池系统的基本结构	(132)
5.2 利用海冰水条件下的台田-浅池系统结构	(134)
5.2.1 景观结构	(134)
5.2.2 地貌结构	(135)
5.2.3 生物结构	(137)

5.2.4 土壤结构	(138)
5.2.5 水盐结构	(139)
5.3 利用海冰水条件下的台田-浅池系统功能	(140)
5.3.1 台田-浅池系统功能	(140)
5.3.2 循环功能	(142)
5.3.3 生产与储水功能	(143)
5.3.4 生态调节与景观美学功能	(144)
5.3.5 减灾避害功能	(145)
5.4 利用海冰水条件下的台田-浅池系统过程与驱动力	(145)
5.4.1 能量流动与物质循环过程	(145)
5.4.2 水盐运移过程及其驱动力	(147)
5.4.3 生态-生产过程及其驱动力	(149)
5.5 利用海冰水条件下的台田-浅池系统的管理与优化	(151)
5.5.1 台田-浅池系统管理与优化模式	(151)
5.5.2 台田-浅池系统管理	(151)
5.5.3 台田-浅池系统优化	(154)
参考文献	(155)
第6章 海冰水利用条件下的台田-浅池系统模型与模拟	(157)
6.1 模型构建	(157)
6.1.1 总体设计	(157)
6.1.2 界面参数	(158)
6.1.3 SPAC 与 HYDRUS 模型(S-H 模型)	(163)
6.2 参数率定	(164)
6.2.1 参数率定	(164)
6.2.2 水流区域参数	(165)
6.2.3 土壤水力特征参数	(168)
6.3 模型模拟	(169)
6.3.1 系统界面水分通量	(169)
6.3.2 模型模拟示意图	(174)
6.4 精度检验	(176)
6.4.1 土壤含水量随时间变化模型模拟验证	(176)
6.4.2 土壤含盐量随时间变化模型模拟验证	(178)
6.4.3 土壤含盐量随深度变化模型模拟验证	(179)
6.5 海冰水不同灌溉期情景模拟	(181)
6.5.1 情景假设	(181)
6.5.2 无降水匹配条件下模拟分析	(181)
6.5.3 有降水匹配条件下模拟分析	(184)
6.5.4 海冰水灌溉期情景下土壤含盐量变化综合分析	(187)
6.6 海冰水不同灌溉频次情景模拟	(189)
6.6.1 情景假设	(189)

6.6.2 模拟分析	(189)
6.6.3 海冰水灌溉频次情景下土壤水盐变化	(191)
6.7 海冰水不同灌溉量情景模拟	(193)
6.7.1 情景假设	(193)
6.7.2 模拟分析	(193)
6.7.3 海冰水不同灌溉量情景下土壤水盐变化	(195)
参考文献	(197)
第7章 海冰水利用条件下的台田-浅池系统农业生态-生产范式	(199)
7.1 农业生态-生产系统	(199)
7.1.1 总体理念	(199)
7.1.2 基本原则	(203)
7.1.3 整体构架	(207)
7.2 台田生态系统高效、安全种植模式	(208)
7.2.1 海冰水利用条件下的台田作物生产效益	(208)
7.2.2 海冰水利用条件下的台田双季油葵高效、安全生产模式	(210)
7.3 浅池生态系统高效、安全养殖模式	(222)
7.3.1 海冰水养殖罗非鱼技术	(222)
7.3.2 海冰水养殖罗非鱼流程	(224)
7.3.3 海冰水养殖罗非鱼生产效益分析	(226)
7.4 台田-浅池系统循环农业模式	(228)
7.4.1 台田-浅池系统循环农业模式	(228)
7.4.2 台田油葵转化浅池饵料	(228)
7.4.3 浅池塘泥培肥台田土壤	(230)
7.4.4 “双季油葵-罗非鱼”型台田-浅池模式	(231)
7.5 台田-浅池系统农业生态-生产效益的区域比较	(233)
7.5.1 台田-浅池系统农业生态-生产模式	(233)
7.5.2 生产效益与生态效益分析	(233)
7.6 台田-浅池系统农业生态-生产模式与防灾减灾	(235)
7.6.1 黄骅地区旱涝灾害	(235)
7.6.2 海冰水作为淡水利用的气候风险及适应措施	(237)
参考文献	(239)
附录	(240)
附录1 不同土壤类型的土壤水典型特征(FAO-56)	(240)
附录2 作物最大有效根深(Z_r)及临界土壤水分系数(FAO-56)	(240)
附录3 基础作物系数 K_c 参考表(FAO-56)	(243)
附录4 中华人民共和国国家标准 GB/T20481—2006 气象干旱等级	(246)
附录5 田间实验与室内实验图片集	(247)

第1章 绪 论

1.1 研究背景和意义

1.1.1 研究背景

海水成冰后,其盐度明显下降,远低于海水盐度,经简单处理,可以以较低的成本转化为淡水资源(袁艺,1993)。据此,北京师范大学提出了渤海海冰资源利用的研究设想,并开展了相关研究。1995~1999年,史培军等自行组织开展了海冰资源淡化的基础研究;2000年,国家科学技术部(下称科技部)农社司首次将渤海海冰资源开发利用列入“十五”科技攻关专项;2001年,教育部将渤海海冰资源开发与农业应用研究列入重点基金资助(项目编号:02010),并对研究成果进行了鉴定;同期,科技部对渤海海冰作为淡水资源的可行性进行了预研资助;2004年,科技部农社司将海冰资源开发和农业应用课题纳入“863”计划滚动项目(项目编号:2004AA24020),2005年通过了项目验收和成果鉴定。2005年7月,科技部和国家发展和改革委员会联合就海冰资源开发利用进展状况向国务院和全国人大进行了专题汇报,有关领导批示应予以重视和支持;2005年8月,教育部向科技部提出了开展海冰研究的建议,并开展了项目论证工作,科技部明确同意将海冰资源淡化研究优先列入“十一五”规划;2006年正式启动了“863”计划重点项目课题“海冰资源淡化与利用技术”(2006~2010年;课题编号:2006AA10206),并于2010年通过验收顺利结题。

在上述课题支撑下,由北京师范大学牵头,组织了国家海洋环境监测中心、天津大学化工学院、中国农业科学院农业资源与农业区划研究所和中国科学院遗传与发育生物学研究所等单位先后对渤海海冰资源的自然储量(史培军等,2002,2003;顾卫等,2003;Gu et al.,2005;谢锋等,2003;Xie et al.,2006;国巧珍等,2006;许映军等,2008)、海冰生成过程和再生周期(顾卫等,2003;李宁,2005)、海冰资源的时间保证率和空间分布(顾卫等,2002)、海冰开采利用对周边环境的影响(王静爱等,2003;雷飏等,2007;李宁等,2008;赵骞等,2008)、海冰脱盐机理和脱盐技术(史培军等,2002;徐学仁等,2003;陈伟斌等,2004;李凭力等,2005)等问题进行了较系统的基础性研究和技术开发,并就海冰水利用对生物和土壤的影响(肖建国等,2003;张国明等,2006)等进行了深入的探讨。随着国家对于粮食安全重视程度的不断加强,海冰水作为农业生产所需的淡水替代资源的战略地位越来越重要。为此,北京师范大学等单位对海冰水在滨海盐碱地农业利用等方面展开了一系列的研究工作。海冰水农业综合利用与沿海地区盐碱化土壤改良的综合集成技术体属于咸水(海水)农业的范畴,因此利用海冰水作为农业新水源的安全灌溉与节水灌溉还是一个较新的研究课题。海冰水作为一种新型水源,在滨海盐碱地的应用需要考虑滨海盐碱地的改良、作物安全、寻求区域土壤和作物的新型水源适应性利用模式等问题。海冰水作物种植及高效安全利用面临着许多相关理论和技术难题,如海冰水灌溉条件下土壤水盐运动规律与盐碱调控机理,海冰水农业利用中的高效

安全灌溉技术,海冰水高效安全灌溉利用指标体系,海冰水农业高效安全利用灌溉制度和技术标准等众多内容。由于研究内容涉及众多学科门类和研究方向,因此本书仅对北京师范大学研究团队开展的海冰水资源滨海盐碱地农业综合利用研究成果进行总结与归纳,期望能为海冰水这一新型水资源的农业综合利用及滨海盐碱地生态农业模式推广和生态-生产范式的建立提供科学支撑。

1.1.2 研究意义

我国淡水资源总量为 $2.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$,居世界第6位,但人均水量只相当于世界人均占有的量的1/4,居世界第110位。随着区域社会经济发展对淡水需求量的不断增长,在许多干旱和半干旱地区,淡水已成为影响经济发展的重要限制因素,部门之间、地区之间和国家之间争夺淡水资源的矛盾越来越突出。即使在水资源相对丰富的滨海地区,不同利用功能的水资源分配矛盾和冲突也越来越显著^①。水资源短缺引发的危机正一步一步侵蚀着我国经济可持续发展与社会稳定的根基。淡水是农业生产的战略资源和基本保障,但在人口聚集、经济发达的滨海地区,农用淡水份额往往被挤占或挪用,使正常农业生产和粮食安全受到威胁。同时,对于人地关系异常紧张的滨海地区来说,滨海盐碱地的开发有利于减轻城市化进程中耕地减少的压力,以确保耕地占补平衡和粮食产量稳步增加。但是,滨海盐碱地农业开发与日益加剧的淡水资源匮乏是一对突出矛盾。国家虽已实施“南水北调”工程来弥补环渤海地区淡水资源短缺问题,但尚不足以满足该区域工农业发展对淡水与日俱增的需求。

因此,在提高农业节水、作物高效用水、发展节水灌溉的同时,寻找新的水源已成为缓解我国水资源紧缺的战略性对策。我国城市化快速发展,占用大量农田,农业用地,特别是耕地紧缺,也已成为制约我国农业可持续发展的重要因素。我国海水及滨海滩涂资源丰富,但作为农业水土资源利用,遇到盐碱程度高的限制,使农业生产水平低下。然而,位于渤海海域的海冰资源储量丰富,经一定的脱盐处理,成为海冰(淡化)水,在滨海盐碱地和滨海滩涂农业利用方面具有广阔前景,且潜力巨大。海冰水作为一种新型水资源的农业利用,可能会对土壤或作物产生不良影响,如土壤板结、结构破坏,作物产量降低、品质下降等。海冰水农业利用可以归属于咸水(海水)农业利用的范畴。因此,如何建立一套适应海冰水利用、水土环境稳定的滨海土地(盐碱地、滩涂)利用方式及水(海冰水)土资源开发模式对我国农业可持续发展具有重要意义。

1.2 微咸水与海水资源农业利用

1.2.1 微咸水资源农业利用

研究、开发和利用微咸水资源是解决水资源短缺的一条有效途径(徐质斌,2002)。国外利用咸水和微咸水进行农田灌溉已经有近100年的历史,就咸水灌溉水质、适宜灌

^① 淡水资源: <http://baike.baidu.com/view/1050019.htm>

溉土壤质地和作物、田间管理等方面进行了大量的实践。已有研究表明,矿化度 $4\sim 6\text{g/L}$ 的水,如果冲洗、排水条件好,可用于灌溉棉花等作物。意大利利用 $2\sim 5\text{g/L}$ 的微咸水灌溉已有20多年,其他中亚、阿拉伯等国家利用矿化度为 $3\sim 8\text{g/L}$ 的水进行农田灌溉,都有成功的事例。在何种质地的土壤适合咸水灌溉方面,已有研究表明,沙质土壤较黏质土壤更适于咸水灌溉(吴忠东等,2005)。利用咸水、微咸水灌溉的作物主要为棉花、甜菜、苜蓿、向日葵、土豆等(Dutt et al., 1984)。在咸水与微咸水灌溉方式方面,主要有漫灌、沟灌、喷灌和滴灌。漫灌和沟灌耗水量大,而喷灌和滴灌属于节水型灌溉方式,从节水角度讲,喷滴灌具有明显优势。但喷灌过程中咸水易烧死湿润的叶面,并导致作物减产,而滴灌方式则可以避免叶面烧死现象。因此,滴灌在咸水灌溉中具有绝对优势(Joseph, 1994)。在表层滴灌、浅层滴灌和深层滴灌三种不同的滴灌方式中,浅层滴灌较其余二者更有利于作物生长(Gideon et al., 2002; Blaine and Warren, 1995)。

国内对微咸水的利用也进行了大量的研究。在砂土和砾石土层上使用海水直接灌溉12种经济作物、树木和园艺作物种植获得成功(刘亚传和常厚春,1992)。中国科学院西北水土保持研究所对宁南微咸水灌溉区的实验研究认为,用不同水质的微咸水灌溉农田,土壤盐渍化程度不同,生产中可以根据微咸水的矿化度高低来决定其利用方式。轻度咸水区在地下水位较深的地区,配合采用增施有机肥、合理密植、减少土壤蒸发量等农业措施,可灌溉一般作物,灌水数年后冲洗1次;中度咸水区在地下水位深、排水良好、透水性强的壤土地,种植一般耐盐作物,在作物生长期再适时灌水压盐,每年冲洗1次;重度咸水区在地下水位深、排水好、脱盐易的砂质地,应增大灌水定额和灌水次数,引洪漫地压盐,选用耐盐极强的作物和牧草,实行草田轮作或轮歇均可达到较好的效果^①。

利用咸水、微咸水灌溉具有供水和增盐利弊共存的双重性:一方面是咸水、微咸水灌溉土壤和作物带来经济效益;但另一方面过度利用会引起土壤及水分条件的变化,甚至导致一系列的环境问题。适宜作物生长的土壤应该具有良好的传导水分和空气的能力,同时耕作层应适宜作物根系生长发育。研究表明,渗透性减小和耕作层适宜作物根系生长发育程度的降低是灌溉土壤存在的主要问题。特别是钠离子的增加会引起土壤颗粒收缩、胶体颗粒的分散和膨胀,导致土壤孔隙的减少,影响土壤的渗透性和作物根系的发育生长。同时过量盐分会引起土壤结皮,导致土壤渗透性的降低(韩志勇等,2007;韩志勇,2008;陈继红,2008)。Khilar等(1983)指出灌溉水中的盐分对土壤的影响主要在于交换性钠和电导率。乔冬梅等(2009)研究了地下水作用下微咸水灌溉对土壤的影响,结果表明,在地下水水位大于3m的地区进行微咸水灌溉,0~100cm的土层内不会形成严重的积盐现象;当灌水矿化度为 4g/L 时,灌水水质对土壤盐分环境的影响大于地下水埋深对其的影响。

作物抗盐能力对微咸水利用也十分重要,Mass和Hoffman(1977)给出了部分栽培作物抗盐能力的相关数据作为参考,指出土壤含盐量不超过作物耐盐度的临界值,作物正常生长,不影响产量。当土壤含盐量超过作物盐度临界值时,作物受盐害生长不良,产

^① 微咸水:资源化的利用途径. <http://watsagri.nstl.gov.cn/agriculture/MirrorResources/4589/news.asp?id=2799>.html

量随盐度增加而呈直线下降关系。咸水灌溉条件下的作物水分生产函数是进行咸水安全灌溉和经济分析的重要依据(王卫光等, 2003)。同种作物不同生长阶段对盐分的敏感性也不同, 一般来说, 幼苗期抗盐能力最小(Joseph, 1994)。Maas 和 Hoffman(1977)通过实验分析了轮灌法对作物产量的影响, 指出避开作物对盐分最为敏感期, 可以降低盐分对作物产量影响。从现有资料看, 在一定的咸度范围内, 咸水灌溉对作物的品质影响是有利的。Shalhevet 的资料表明, 花生的籽粒体积随咸水电导率 EC 的增加而减小, 但其出油率随 EC 的增加而增加; Shalhevet 等对番茄的研究也有类似结论。国内研究表明, 以 3g/L 微咸水灌溉的棉花, 其下部果枝结实率提高, 铃重增加, 棉花籽棉产量增加(李维江, 1998)。有研究表明, 利用小于 3g/L 的微咸水灌溉小麦、棉花、玉米等主要作物, 产量与用淡水灌溉的相近; 利用 2~4g/L 的微咸水灌溉冬小麦单产为 3 630kg/hm², 夏玉米为 4 725kg/hm²; 用 4~6g/L 的微咸水灌溉冬小麦单产 2 925kg/hm², 夏玉米 4 037kg/hm², 减产明显(吴凯和黄荣金, 2001)。在利用微咸水灌溉时, 配合增施有机肥、地膜覆盖、麦秸还田等管理措施, 能起到增产作用(李志杰等, 2001)。在特别干旱的情况下, 用微咸水灌溉比不灌溉可获得更大的经济效益。所以只要掌握灌溉时间和灌溉次数, 控制灌溉水量, 就可以确保在作物不减产或增产的同时, 防止土地次生盐渍化(刘友兆和付光辉, 2004)。

微咸水利用技术涉及土壤、作物、气候、咸水成分等诸多要素, 需要运用系统的观点综合分析, 以更安全有效的技术利用微咸水, 从而防止土壤次生盐渍化(刘昌明和王会肖, 1999)。总之, 不恰当的咸水灌溉, 会导致土壤的次生盐碱化, 并对环境带来严重的影响, 而合理控制灌溉时期、灌溉频次、灌溉量可以确保农作物及土壤环境的安全。保障农作物安全的基本要求是使土壤盐分的累积不超过作物的耐盐限度。由咸水灌溉而增加的盐分经降雨或河水灌溉后淋洗排出, 达到土壤盐分年内或多年保持平衡, 不发生作物根层的盐分积累, 是咸水灌溉管理技术的关键(王卫光等, 2003)。

1.2.2 海水资源农业利用

有研究表明, 比例为 25% 和 50% 的混合海水灌溉耐盐作物菊芋, 能够保证土壤安全和作物高产高效(赵耕毛等, 2005), 但也有研究表明, 在黄河三角洲地区运用海水灌溉可能会对土壤资源安全产生影响, 海水灌溉必须防治次生盐渍化和土壤碱化的发生(陈效民等, 2004)。

从矿化度来讲, 含有微量盐分的海冰水可称为咸水或微咸水, 但与咸水和微咸水不同, 淡化后的海冰仍具有海水的特点和性质, 如含有微生物、大量微量元素, 甚至包括植物所需的全部营养元素等。研究表明, 海水灌溉实验所能达到的生物学效果, 是用氯化钠溶液甚至是合成海水也不能与其相比的(刘亚传和常厚春, 1992)。因此, 海冰水作为一种淡化后可用于农业生产的微咸水, 其利用技术更为复杂, 不能简单等同于其他氯化物兑而成的微咸水, 需要进行更深入的研究。

海冰水综合利用, 特别是海冰水的农业利用, 是海冰作为淡水资源开发利用的最终目标。只要控制脱盐工艺过程, 海冰(淡化)水可以用于不同领域, 具有良好的市场前景。对长兴岛北岸平整冰、堆积冰和搁浅冰水质分析结果表明: 参照中国国家生活饮用

水标准(GB5749—85)、地表水环境质量标准(GHGB1—1999)以及农田灌溉水质标准(GB5084—92)三种行业标准,在所选的26项水质分析指标中,只有全盐量、氯化物和硫酸盐指标不合格(徐学仁等,2003)。经过海冰脱盐处理后,出水盐分含量达到2g/L以下,最好水质达到国家城市生活用水和农业灌溉用水标准,表明海冰水资源可以广泛地应用于工业、农业以及城市居民生活饮用与生态用水等领域(王静爱等,2003)。

农业是中国各产业部门中的用水大户。据统计,2006年全国农业用水量为3 662.44亿 m^3 ,占总用水量的63.2%(中国水资源公报,2006)。所以,目前海冰水的利用研究主要集中在农业方面。早期的研究开始于海冰融水盆栽小麦试验(肖建国等,2003)。试验内容包括不同盐度海冰融水对小麦生长发育的影响和盆栽小麦土壤盐分的积累效应。根据试验结果,对海冰融水在农业灌溉上的应用前景进行了初步讨论与评估。进一步,通过对玉米、小麦和棉花在不同盐度渤海海冰水进行的种子萌发实验,证明当海冰水盐度为9g/L时,3种作物种子的发芽率均可达到50%以上,因此海冰水可以作为作物的造墒水使用(张国明等,2003)。大田灌溉实验表明,3g/L海冰水灌溉条件下,大田农作物能够正常生长或增产(肖建国等,2003)。运用适当的灌溉技术和标准,淡化的海冰水可用于农业灌溉,并可以保障区域粮食生产安全和土地安全。胡育骄等(2009)研究认为海冰水灌溉能够使得棉花正常生长和收获,并能提高水分利用效率。

总而言之,经过多年实验与研究,在海冰水利用技术方面逐步积累了一些经验和成果,结果证明海冰水资源农业综合利用是可行的。

1.3 滨海土地利用模式

1.3.1 区域土地利用/覆盖变化

土地利用/覆盖变化(LUCC)是全球环境变化研究的核心议题之一(Turner et al., 1995)。随着IGBP第二阶段(IGBP II)的工作将研究对象扩展到陆地、人类与环境系统(T-H-E)(Ojima et al., 2002),人们逐步认识到LUCC与生态环境安全水平密切相关(史培军等,2002),也是可持续发展领域的重要议题(刘彦随和陈百明,2002)。因此,从土地可持续利用的角度出发,谋求LUCC与土地优化配置的联合成为新的发展趋势(胡业翠等,2004)。史培军等(2002)提出应加强LUCC对生态环境安全影响的研究,给出了我国生态环境安全条件下土地利用/覆盖空间格局厘定的基本原则及宏观格局。刘彦随和陈百明(2002)指出LUCC研究的一个重要目标,就是提出在食物、资源和生态安全及经济持续增长等国家可持续发展目标约束下的土地利用科学决策与综合调控体系。

1. 滨海盐碱地的利用

我国海岸线长逾 $3.2 \times 10^4 \text{ km}$,15m等深线以内的滨海盐土、海涂和浅海有 $1.4 \times 10^7 \text{ hm}^2$,占我国盐渍土总面积($3.47 \times 10^7 \text{ hm}^2$)的40.38%,是我国五大盐渍土区之一,开发利用潜力巨大(俞仁培和陈德明,1999)。其中,渤海湾西岸的滨海平原北起河北省唐海县,南至黄骅市,天津滨海新区居中,属华北平原的东部,面积约 $1.5 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (柴寿喜,2006)。它地处环渤海经济圈的中心地带,属东部沿海经济发达地区,天津滨海新区

的建立使之成为中国经济发展新增长极^①。因此,该区域内土地利用变化剧烈,耕地被占用而减少的情况相当严重,且随着区域经济发展和人口聚集,土地利用必将发生更加剧烈的变化,耕地资源短缺与粮食安全之间的矛盾更加突出。渤海湾西岸滨海平原滨海盐土具有盐分重、盐分组成以氯化物为主的特点,加之地势较低,排水不畅,土壤脱盐困难,造成耕地生产力十分低下。所以,研究滨海盐碱地土地利用变化规律,找出因地制宜的土地利用优化对策与农业生态模式,特别是针对区域旱、涝、盐碱灾害并串发现象,探索研究具有根治效果的农业模式,如“上粮下渔”模式、“台田-沟塘”模式,并对这些模式加以改良和推广,将对缓解滨海盐碱地人地矛盾、改善生态环境和促进可持续发展具有非常重要的意义,也利于充实 LUCC 与土地利用优化综合研究的实践。

2. 滨海地区土地利用优化

区域土地利用变化与优化配置的综合研究是土地科学和可持续性发展的重要议题。当前,我国正处于城镇化中期阶段,2009 年我国城镇人口比例达 46.59% (国家统计局,2010)。城镇化水平快速提升,不仅导致人口、资本、物质与信息向城镇的快速集散,同时也引起了资源利用数量、结构与方式的改变,其中最直接的表现是土地资源利用方式的转变。因此土地利用变化与优化配置不仅是我国建设“资源节约型、环境友好型”社会的迫切要求,同时也是实现社会系统-经济系统-生态环境系统三者相互协调的前提和基础之一(季小妹,2012)。滨海地区在城镇化的快速发展之下,逐渐形成了几个大的城市群,大量优质耕地被占用,区域农业生产受到制约。滨海盐碱地是重要的后备土地资源,因此研究滨海盐碱地的利用变化与优化对于缓解我国人地矛盾、改善生态环境和促进可持续发展具有战略意义。

1.3.2 基-塘模式

滨海地区独特的土壤、水文环境特点决定着不同的土地利用模式。一般在低纬度滨海地区,降水较多,水系发达,但水患频发,在水利设施不完善情况下,常常由于疏导不利而导致洪涝灾害发生。为消除或减缓水患,逐渐形成筑堤、修坝等工事,一定时期内满足了该区域生产、生活的需要,其中,珠江三角洲地区的基-塘系统就是成功的农业土地利用模式之一。

1. 概念

基-塘系统是珠江三角洲人民在长期的生产实践活动中,利用地势低洼的地貌类型,创造出的一种独特的人工生态系统,也是可持续农业的一种类型。基-塘系统由陆生子系统和水生子系统构成。在整个系统中,陆生子系统和水生子系统相互作用,形成一个可重复利用、流失率低、产品率高、有机物和养分归还量极低的封闭的物质能量循环系统。由于基-塘系统的层次多、食物链复杂,所以系统的稳定性和生产力高(钟功甫等,1987)。

^① 人民网-天津智库. <http://www.022net.com/2009/11-27/496237373263941-2.html>

2. 结构类型

基-塘系统从明中清初出现以来发展出了多种类型,其中最为主要的有四种类型:桑基鱼塘、蔗基鱼塘、果基鱼塘和花基鱼塘。

桑基鱼塘是基-塘农业的典型代表。桑基鱼塘即基上种桑、塘中养鱼。桑基鱼塘基上的桑树是生产者;蚕以桑叶为食,是第一级消费者,生产丝、茧、蛹,排出蚕沙;塘里的鱼是第二级消费者,为充分利用各种饲料和立体空间,实行不同鱼种分层放养,上层鱼吃剩的残余物及其粪便成为下层鱼的饲料;鱼类的排泄物和其他动植物的残骸又被微生物分解为含氮、磷、钾的简单物质,混入塘泥;这种塘泥肥力高、肥效长,又有抗旱和防止杂草滋生的作用,是施用于桑基的好肥料,从而进入新的循环。这样就构成了一个水陆相互联系、动植物相互作用、物质和能量层层利用的农业生态系统,形成“桑茂、蚕壮、鱼肥大,鱼肥、泥好、桑茂盛”的有机联系(王苇,2008)。

3. 功能与效益

基-塘系统是一种种养结合、水陆互促的具有多种生态经济功能的低洼地区的复合生态农业系统。基-塘系统节约了饲料、农药、化肥的使用,从源头上节约了成本,取得了良好的经济效益,提高了市场竞争力,同时还取得了很好的生态效益(赵玉环,2005),具体功能特点包括:可提高农作物产量和农业产值,可提高农田土地利用率,可发展多种经营方式,可提供丰富的农产品,可防洪减灾、消除洪涝灾害,可调节田间小气候;同时鱼塘自净能力较强,基面的农牧废弃物投入鱼塘后,废物循环利用,避免污染,既充分利用了资源,又形成资源的良性循环。基-塘系统属于循环农业和生态农业,能有效提高物质的利用率。在基-塘系统中,特别是在桑基鱼塘和蔗基鱼塘中实现了物质的循环利用,减少了农业废物的排放,削弱了对环境的影响,不造成污染。

4. 系统过程与驱动

在基-塘系统内,基地上种桑,桑叶喂蚕,蚕沙下塘,塘泥上基,构成了桑、蚕、鱼的不断输出。桑利用太阳能、二氧化碳和水,通过光和作用,把无机物合成为有机物,把太阳能转化为化学能,储藏于有机体内,促进桑的生长繁殖,所以桑是生产者。桑叶喂蚕,就将桑的营养物质和能量,沿着食物链转移到蚕,维持蚕的生命活动和生长,所以蚕是第一级消费者。蚕食桑叶后排出的蚕沙和剩下的蚕蛹等投放鱼塘,供塘鱼作为饲料,因此在食物链上,鱼是第二级消费者。塘里的饲料碎屑、鱼类与水生生物的代谢产物及其死亡后的残体等有机物,一部分在微生物的作用下,分解成无机养分,供浮游植物生长需要;另一部分沉积成塘泥,又可以回到基面上去。所以微生物是分解者。这样桑、蚕、鱼就构成了一个完整的桑基鱼塘人工生态系统。为了更好地利用空间结构,实现效益最大化,在桑基鱼塘的基础上,珠江三角洲(下称珠三角)地区进一步形成了基-塘立体种养体系,它是农、牧、渔结合在一起的复合体系,因此种群间的互补关系更为复杂。

5. 经营管理

随着农业生产部门的多样化和商品农业的发展,基-塘农业的“基”和“塘”都发生了