

设施种植区 面源污染过程模拟与 优化调控

孙怀卫 陈林 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

设施种植区 面源污染过程模拟与 优化调控

孙怀卫 陈林 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

设施种植区面源污染过程优化调控/孙怀卫,陈林著. —武汉:武汉大学出版社,2017.1

ISBN 978-7-307-17795-6

I. 设… II. ①孙… ②陈… III. 设施农业—种植业—农业污染源—面源污染—过程模拟—研究 IV. X501

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 087698 号

责任编辑:胡 艳

责任校对:李孟潇

版式设计:马 佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:虎彩印艺股份有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:12.75 字数:301千字 插页:1

版次:2017年1月第1版 2017年1月第1次印刷

ISBN 978-7-307-17795-6 定价:29.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

近年来,由于全球粮食危机和食品安全挑战,农业的可持续发展及所面临的环境问题受到了广泛的重视。随着人口增加、农业开发和资源利用的进一步扩大,由农业生产及资源不合理开发引起的农业面源污染引发了极大的关注。与点源污染相比,农业面源污染的发生具有更大的不确定性和随机性,污染的时空范围更广,涉及的因素包括区域地形地貌、土地利用、水文特征、区域气候以及人类活动等各方面因素,从而使得农业面源污染形成的过程、污染成分更加复杂,给环境污染研究、治理和控制带来了更大难度。农业面源污染所导致的威胁已受到世界各国的高度重视,控制面源污染已经成为改善水环境的首要任务,深入了解农业区水流及面源污染物的运移过程是国际土壤水文学界最热门的研究领域之一。

设施种植利用人工建造设施在局部范围内改善了环境气象,为作物生长提供了良好的小气候条件,使其达到了现代农业所必需的快速、高产、高效的基本要求,因此在我国得到了快速的发展。目前,我国的设施种植面积和设施地的作物产量稳居世界第一,且已经在解决农产品需求和加快农业经济发展方面发挥了不可替代的作用。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》中也将高产高效设施种植列为农业优先发展方向。与此同时,不当的田间管理和过量施肥等因素也导致设施种植区的可持续发展遇到了实际的难题。设施种植区的土壤酸化、养分聚集、盐分累积、氮素损失大和面源污染日趋严重,已成为我国重要的农业和环境问题,制约了现代农业的可持续发展。为此,迫切需要在设施种植引起土壤和水环境变化的严峻形势下,开展设施种植区的面源污染过程研究,为现代农业可持续发展提供基础理论和科技支撑。

纵观国内外设施种植区的相关研究成果,目前尚未有系统的针对其面源污染过程的论著,在此基础上,笔者开始筹划和撰写,先后几易其稿,最终将研究成果集结成本书。本书针对设施种植区中面源污染过程精细模拟的需求,通过对设施种植区面源污染趋势的分析,结合田间水氮平衡的计算提出了基于物理过程的设施种植区面源污染过程模拟方法,探索性采用多种模型,实现了设施种植区养分、盐分的精细化模拟,取得了较好效果。在此基础上,以典型设施种植区为例,进一步开展了区域内灌溉和排水需求的集成研究分析,并从分析人类活动影响条件下水氮运移转化过程的角度出发,提出了开展设施种植区面源污染调控的新思路,研究成果为保障设施种植区健康可持续发展提供一定的科技支撑。

本书研究工作得到了国家“863计划”项目“水盐调控精量灌溉技术”(2006AA100207)、“十二五”国家科技支撑计划(2015BAB07B00)、国家自然科学基金重点项目“灌溉排水条件下农田氮磷转化、运移规律与控制措施”(50639040)、国家自然科

学基金项目“基于贝叶斯模型平均方法的设施田间土壤氮素运移转化过程研究”(51309106)、湖北省科技支撑计划项目“基于低影响开发的城市湖泊面源污染治理技术与应用示范”(2015BCA291)、武汉市关键技术攻关计划“现代农业高效节水增产关键技术与集成示范”(2015020202010127)、土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放课题“精量灌溉和控制排水对设施土壤水肥盐影响机理研究”、流域水循环模拟与调控国家重点实验室“基于空间 Copulas 的极端径流影响模拟研究”以及长江水利委员会长江科学院开放研究基金“基于空间 Copula 的区域涝渍灾害监测预报与风险评估”等课题的资助。经过近十年的研究工作,在设施种植区田间水氮分析理论方法、面源污染过程模拟、节水灌溉和控制排水集成调控等方面取得了一些进展。

全书由孙怀卫、陈林共同完成。华中科技大学水电与数字化工程学院张勇传院士、周建中教授和廖想、严冬等其他中青年骨干教师多年来为项目的延续研究工作提供了很多必要的基础条件,武汉大学杨金忠教授、王修贵教授等师生为研究工作的开展提供了很多指导意见和帮助。在书稿整理过程中,刘国栋、张腾、张伊然等研究生做了很多校对工作,此外,武汉大学出版社给予了大力支持,并提出了宝贵意见。在此,一并表示衷心的感谢!

由于设施农业种植是一种特殊的农业种植模式,其在我国的发展经历了由引进国外技术到以我国为主导的特色之路。尤其是结合现实国情和地域特点,我国绝大多数的设施种植都以塑料大棚为主,其种植模式和管理方式都与国外有很多不同。为此,设施种植区面源污染的研究过程实际是面向我国重大现实需求,不断摸索,理论突破和技术创新相结合的探寻之路。设施种植区面源污染研究涉及面广,综合性强。由于时间和条件的限制,本书中仅取得了初步的研究结果,难免存在偏颇、纰漏和错误,真诚地希望得到广大读者的指正。

作者

2016年12月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 设施种植条件下的水土环境	2
1.1.1 设施种植条件下的水土环境现状	2
1.1.2 设施种植的平衡施肥研究	6
1.1.3 排水及设施地的洗盐技术	10
1.1.4 设施种植条件下水土环境的研究需求	13
1.2 设施地作物需水量的研究现状	13
1.2.1 设施地作物需水规律及其影响因素	14
1.2.2 设施地温室小气候研究	14
1.2.3 设施地作物需水计算通用方法的研究	15
1.2.4 设施地作物需水量的研究需求	15
1.3 田间作物生长条件下水土环境数学模拟	15
1.3.1 田间模型	16
1.3.2 设施种植条件下的水土环境数值模拟	17
1.4 本章讨论	18
第2章 设施种植区面源污染趋势	20
2.1 调查范围与内容	20
2.2 调查成果分析	22
2.2.1 盐分离子组成	23
2.2.2 土壤养分状况	26
2.2.3 土壤退化年限	28
2.2.4 土壤退化机理	30
2.3 主要结论	31
第3章 基于智能算法的面源污染物模拟	33
3.1 研究数据与方法	34
3.1.1 支持向量机	34
3.1.2 多目标优化算法	35
3.1.3 多目标优化框架	35
3.1.4 实例研究数据	36

3.2 结果与分析	36
3.2.1 实测数据分析	36
3.2.2 预测氮素结果分析	37
3.2.3 模型参数影响分析	38
3.2.4 模型输入影响分析	39
3.3 本章讨论	41
第4章 设施种植区田间水氮平衡计算	42
4.1 氮素平衡	42
4.1.1 田间氮素输入分析	42
4.1.2 田间氮素输出分析	43
4.1.3 设施地氮素平衡表	45
4.1.4 提高保护地氮素利用的潜力分析	46
4.2 田间土壤参数确定	46
4.2.1 农田土壤中水分模拟的田间参数确定	46
4.2.2 BEST 试验计算参数	53
4.2.3 一种推求田间土壤颗粒数据的方法	54
4.2.4 数值模拟法确定田间持水量	58
4.2.5 讨论	66
4.3 设施农业小气候及作物需水量计算	67
4.3.1 作物需水量试验研究介绍	67
4.3.2 作物需水量影响因素分析	67
4.3.3 基于 CFD 计算的普通温室作物需水量的计算	69
4.3.4 讨论	76
4.4 基于物理过程的田间水量平衡模型	76
4.4.1 水量平衡模型的建立	77
4.4.2 模型验证	80
4.4.3 模拟结果分析	82
4.4.4 讨论	84
第5章 基于物理过程的田间面源污染过程分析	85
5.1 设施种植区面源污染物迁移过程分析	85
5.1.1 盐分动态	85
5.1.2 养分迁移与转化	98
5.2 RZWQM 平衡模型计算	106
5.2.1 模型介绍	106
5.2.2 参数确定及模型校正方法	106
5.2.3 模型校正结果	108

5.2.4 模型验证	110
5.2.5 模型应用	114
5.2.6 讨论	116
5.3 改进 RZWQM 模型对田间水肥盐过程的模拟	117
5.3.1 对大棚条件下 RZWQM 模型的改进处理	117
5.3.2 改进 RZWQM 模型的校正	120
5.3.3 改进 RZWQM 模型的验证	122
5.3.4 改进 RZWQM 模型应用	124
5.3.5 讨论	127
5.4 本章小结	127
第 6 章 设施种植区面源污染输出机理及多维模拟方法	129
6.1 Hydrus 计算结果分析	129
6.1.1 数学模型	129
6.1.2 利用 BEST 试验参数的数值模拟及比较	131
6.1.3 利用田间反演参数的数值模拟及比较	132
6.1.4 模型模拟与验证	136
6.1.5 设施地水盐运动的模型应用	138
6.1.6 讨论	141
6.2 设施种植区水盐调控模拟	141
6.2.1 DRAINMOD 模型原理	141
6.2.2 模型参数的确定	146
6.2.3 研究方案	148
6.2.4 结果及讨论	149
6.3 设施种植区节水灌溉和控制排水集成设计研究	154
6.3.1 节水灌溉与控制排水相结合的工程布置形式	154
6.3.2 温室大棚排水设计初探	155
6.3.3 防治大棚土壤盐碱化的灌溉制度的确定	157
6.3.4 微喷灌系统的设计	160
6.4 本章小结	163
第 7 章 设施种植区面源污染调控思路	165
7.1 生物反应器应用的思考	165
7.1.1 生物反应器在农业排水中的研究进展	165
7.1.2 农业排水特性对生物反应器运行的影响	167
7.1.3 生物反应器在田间运行的不利影响	170
7.1.4 小结	171
7.2 设施农业氮素过程的思考	171

7.2.1 国内外研究现状及发展动态 171

7.2.2 有待探讨的科学问题和应用前景 173

第8章 结论与展望..... 175

8.1 总结 175

8.2 存在的问题和研究展望 176

参考文献..... 177

第1章 绪 论

设施种植是指利用人工建造设施在局部范围内改善或创造环境气象因素，为农业生产提供良好的环境条件，以期将作物潜力变为现实生产力，达到快速、高产、优质和高效的现代化农业。由于设施种植具有以上优点，在我国得到了快速的发展，且上升趋势迅猛。农业部及各省市自治区都在近年来提出了加快发展设施农业的意见及规划，如辽宁、宁夏、陕西等都提出了发展数十万亩设施农业面积的具体目标。

我国的设施农业面积约占世界的 90%，产量稳居世界第一，设施农业吸纳从业人数近 1 亿人(中广网，2009)。据统计，我国 2008 年的蔬菜和瓜果种植面积分别达到 1787.6 万公顷和 225.66 万公顷，占全国耕地面积的 11.4% 和 1.4%；蔬菜和瓜果产量达到 59240.3 万吨和 7881.3 万吨；居民的人均蔬菜的消耗量也由 1954 年的 70.7kg/人上升到 2008 年的 99.7kg/人。蔬菜的农产品生产价格也不断攀升，2005—2008 年平均价格年增长比例为 7.02%，蔬菜产值也不断攀升，由此蔬菜类农业在很多地区成为支柱产业。

随着蔬菜和瓜果的播种面积不断扩大和复种指数的提高，产业化发展逐渐呈现区域化聚集的特点，形成了一批很有知名度和品牌效应的“蔬菜村”和“瓜果之乡”，其中比较著名的有山东寿光的蔬菜生产基地、河北蔬菜生产集中优势产区、上海白鹤草莓标准化示范基地和湖北鄂州特色生产园区。有关资料表明，2003 年我国蔬菜生产规模最大的 6 个省份的播种面积和产量几乎占全国总量的一半，蔬菜瓜果的集约化、专业化、区域化发展既保证了农业领域的效益，对于产业发展也具有推动作用(张晓晨，2005)。

设施种植的应用在蔬菜瓜果的生产中发挥了巨大作用。设施种植在充分利用自然环境条件的基础上，通过建立设施大棚、覆盖薄膜等结构性设施来创造利于作物生长发育的条件，延长了生长季节，使土地的复种指数增加，实现农业的高产高效和高收益。由于设施种植与传统作物栽培相比具有劳动附加值高、生产效益好，有利于农业产业结构调整 and 适应市场经济发展等优点，因此发展迅速。据统计，陕西省 2005 年设施蔬菜产值超过 57 亿元，占总蔬菜产值的 60% 以上；北京市 2007 年设施种植蔬菜的播种面积超过 2.4 万公顷，占全市蔬菜播种面积的 34.4%，其中温室面积为 8347.1 公顷，大棚面积为 9407.7 公顷，中小棚面积为 6390.6 公顷。表 1-1 给出了河北、上海、湖北和全国的蔬菜、瓜果类作物在 2007 年和 2008 年的种植面积(相关数据来源于统计年鉴)。

我国的设施种植面积发展速度很快，20 世纪 80 年代初全国设施种植总面积不足 0.72 万公顷，总产量为 20 多万吨，而到了 2003 年，各类设施种植面积达到 250 万公顷，增长倍数超过 300 倍。按照设施地结构性设施的不同，我国的设施种植类型可以分为塑料棚、日光温室和加温温室。据统计，2003 年，我国塑料棚面积达到 191 万公顷，日光温室约 50 万公顷，加温温室约 1 万公顷。

表 1-1 2007 年和 2008 年蔬菜瓜果类作物种植面积(单位: 万公顷)

地区	蔬菜		瓜果类	
	2007 年	2008 年	2007 年	2008 年
全国	1732. 86	1787. 59	225. 15	225. 66
河北	107. 5	110. 14	10. 48	10. 25
上海	13. 39	13. 36	2. 06	1. 96
湖北	91. 81	101. 6	9. 51	9. 03

一般认为, 设施种植相对于传统种植改变了地面的覆盖条件, 可能引起一系列的水分和溶质在土壤中运动过程的改变(石峰等, 2005), 更有研究指出, 农业区的面源污染的控制重点已转移到高投入的设施种植区内(袁晓燕等, 2010)。在设施地出现的污染物也可以通过地表径流、异域水体交换或者作物种植等方式而扩散到其他领域, 因此, 在对设施农业进行一系列的规划时, 需要对设施种植可能引起的水土环境的改变做相应的研究。

1.1 设施种植条件下的水土环境

1.1.1 设施种植条件下的水土环境现状

1. 设施种植土壤盐分累积的危害

国内学者童有为等较早观察到, 在玻璃温室和常年覆盖的大棚内, 土壤终年处于积盐过程; 在季节性覆盖的大棚内, 耕层土壤及其下土体内盐分也可以观察到明显的积累趋势(童有为等, 1989)。因此, 认为经过多年的设施种植以后, 温室土壤容易形成一定的次生盐渍化。

在很多地区都可以观察到设施种植所导致的盐分积累, 且一些地区的情况十分严重, 这些结果在一些国内外的研究中均有阐述。在山东的 3 种主要的土壤上开展的研究也表明, 采用大棚种植以后, 土壤内的可溶性盐分明显增加, 存在很大的盐害威胁(李文庆等, 1995); 在设施保护地和露地上开展的对比试验则发现, 土壤的盐分增长伴随着氮、磷、钾等养分的增长而快速增加。对昆明地区不同年限的大棚土壤管理现状调查分析则表明, 大棚耕层的土壤盐分随着年限增长而增加(李刚等, 2004)。在江苏省两个市进行的采样调查发现, 大棚的有机质、全氮含量分别高出露地 42.6%和 48.5%, 壤耕作表层速效磷含量、速效钾含量及盐分总量比耕作底层分别高出 6.6%、28.3%和 65.4%(张振华等, 2003); 江苏宜兴大棚蔬菜盐分分析表明, 10 个点土壤盐分已经达到了中等盐渍化土壤的水平, 盐分接近 3.0g/kg 的土壤比例达到 40%(陈光亚等, 2009)。根据对上海市郊的大棚内土壤的盐渍化调查, 超过 10%的土壤出现了盐渍化问题, 不同种植方式 0~20cm 耕层土壤中盐分从高到低依次为: 大棚菜地、大棚瓜地、大棚瓜-菜轮作地和露天菜地(姚春霞等, 2007)。以上调查说明南方地区的大棚盐渍化问题也比较严重。在土耳其安塔利亚(Antalya)地区进行的调查分析也发现, 所调查的 3 种植物温室中, 超过 66.6%

的温室存在盐渍化的问题,而且超过 50% 的种植青椒的温室内土壤盐分达到了重度盐渍化(Kaplan 等, 2002)。黎巴嫩北部干旱地区的农业为在露地和小拱棚内的高密度种植,因管理不善的作物轮作、施肥和灌溉措施,已经造成一定的土壤退化。对土壤和地下水中的长期观测发现,大棚内的土壤含盐量相比露地土壤增加了 6 倍,34% 的土壤的盐分上升是由于地下水中的盐分上升造成的(Darwish 等, 2005)。

设施土壤在次生盐渍化的影响下,土壤养分、微量元素和重金属等物质也表现出不同于露地土壤的特征和变化。石灰性褐土本底的大棚中养分、盐分、微量元素与重金属含量等均显著高于对照区,提高的倍数可以高达 20 余倍,且有效态的铜、锌、铁含量均高于临界值(杜慧玲等, 2005);沈阳市郊蔬菜土壤总有机碳、非腐殖质碳、腐殖质碳数量的平均值分别是温室外露地的 1.76~3.06 倍、3.41~5.23 倍、1.57~2.99 倍(樊德祥等, 2008);上海地区的设施保护地不仅盐分含量高,而且硝态氮、重金属、有机杀虫剂等含量均高于限定值(Shi 等, 2009);江苏宜兴的典型大棚内的有机质、全氮、土壤有效硫、有效锌、有效硼等都处于较高水平(陈光亚等, 2009)。在一些涉及土壤微生物的化验中,也有同样的发现。在上海南汇区和崇明区的设施栽培大棚内取样发现,大棚土壤的次生盐渍化对土壤脲酶、磷酸酶和呼吸强度的抑制明显,EC 值、总盐、硝态氮与放线菌、细菌数量都呈极显著负相关,与真菌数量呈显著负相关,最高相关系数达到-0.957(时唯伟等, 2009)。

设施种植的养分、盐分大量积累,可能是潜在的污染源。研究发现,大棚菜田的土壤养分、盐分大量积累且含量超过大田的数倍,由此造成的淋溶现象严重,地下水中硝酸盐含量超标。设施地的高养分含量下土壤具有很高的渗漏量和溶质渗漏浓度,且渗漏物质以氮素为主;降雨期间的氮磷径流流失的浓度也比较高,造成了很大的水环境污染威胁。

设施种植所引起的次生盐渍化问题,已经造成了影响作物生长、减产和土壤环境恶化的诸多现象;与次生盐渍化问题相伴的养分、重金属等积累增加的问题,也威胁到设施温室的可持续发展。因此,了解设施种植下的水土环境变化规律,寻找恰当的调控措施来避免和缓解温室土壤盐分的集聚累积,对改善设施种植区的水土环境可以起到关键作用。

2. 设施种植土壤盐分的累积规律

研究设施种植土壤盐分的累积规律,可以帮助了解设施盐渍化的成因和危害。很多研究指出,设施种植的土壤盐分易于在表层积累。如在田间试验中发现,0~10cm 位置的土壤盐分与下层盐分区别很大,表层的盐分更加易于积累;也有土壤盐分养分的调查发现,大多数的养分盐分都在表层积累。但有研究在分析中认为多年种植的设施温室中,表层 20cm 内的土壤盐分含量差异不大,0~20cm 的土壤盐分可以代表表层盐分的变化趋势(Kaplan 等, 2002);若对大棚内养分、盐分在 20cm 深度内按照耕作表层(0~5cm)和耕作底层(5~20cm)的比较则发现,有机质和全氮含量的差异不大,但表层速效磷、速效钾及盐分含量则相对于底层分别高出 6.6%、28.3% 和 65.4%(张振华等, 2003)。从以上的试验观测中可以发现,设施土壤盐分在土层积累的深度可能受到种植作物、施肥习惯和田间管理等的影响,难以通过试验分析得到盐分富集主要深度的确切值。

设施土壤环境变化的另一个特点就是随着设施种植年限的增长,盐分、养分也具有逐年增加的趋势。对多种不同棚龄的大棚进行的土样调查研究认为,设施种植土壤的盐分在

剖面的分布,随着年限的增长而不断地向表层聚集,0~60cm 土层的盐分剖面由露地的直筒形向倒锥形发展(李刚等,2004);土壤的养分状况也在设施种植中有所积累,速效磷含量呈明显的上高下低型垂直分布,速效钾含量垂直分布则比较平稳(胡明芳等,2010);有效铁、有效锌、有效硼、有效锰等元素含量则随着棚龄增加而增大或保持稳定(刘长庆等,2001)。由此可见,土壤盐分、养分和重金属含量等环境不同指标具有很不一样的逐年增长速率。对1~9年的蔬菜地的调查发现,土壤的养分、盐分的年增长率为有机质<氨态氮<全盐量<速效钾<硝态氮<速效磷,部分养分聚集的速度要高于盐分积累速度(杜慧玲等,2005)。设施种植土壤环境的改变不仅体现在养分、盐分的变化上,而且不同种植年限的设施土壤 pH 值随着棚龄而呈现下降趋势,相关系数 r 达到-0.991,为极显著的负相关关系(吕福堂等,2004),这说明肥料的大量施用和残留,导致了土壤的酸化(Guo 等,2010)。寿光地区的研究则表明,随着大棚连作年限增加,土壤酸化主要发生在0~20cm 表层,土层在20~40cm 和40~60cm 的 pH 值变化不大(曾路生等,2010)。

逐年累积的盐分会在很短的时间内达到并超过土壤的盐分上限,从而造成土壤的次生盐渍化。姚春霞等通过在上海地区开展的调查试验发现,一般持续3年种植的设施栽培,就会发生次生盐渍化的问题(姚春霞等,2007),吕福堂等在山东开展的调查研究也表明,种植2~3年的温室蔬菜地,土壤盐分出现了明显的累积,并且已对作物生长造成明显抑制作用;种植年限较长的温室内,由于所种植作物出现明显的枯萎现象而导致菜农弃棚(吕福堂等,2004)。值得注意的是,上海地区的降雨量比较大,年均超过1000mm,而在山东地区的降雨量约为700mm,但设施栽培发生盐渍化的时间基本相同。

在不同地区观察到的设施盐分变化也出现了周期性的起伏变化规律。薛继澄等发现,设施土壤盐分在春季达到最大值,而经过夏季的淋洗,在秋季达到最小值(薛继澄等,1994);对不同设施种植类型的土壤盐分进行分析后也发现,在一年中土壤 EC 变化的幅度介于1.0ms/cm 和0.1ms/cm 之间,其中在9月份的盐分下降到最低值(Shi 等,2009);有研究认为,由于在施肥和灌溉期间的盐分累积明显,因此盐分变化主要同施肥和灌溉有关(姚春霞等,2007)。

综上所述,设施土壤盐分的变化不仅在长期的种植中有累积的趋势,在一年的不同季节中也存在较大的变化,由此需要对设施种植的作物类型、种植季节和相应的田间管理措施对设施土壤盐分的影响和作用进行分析。

3. 设施种植下土壤盐分的离子变化

设施种植土壤盐分离子的变化也一直受到研究者的重视。童有为等发现,上海市郊的温室次生盐渍化所积聚的盐离子中以 NO_3^- 为主(童有为等,1991);李文庆等发现,虽然盐分含量在不同土壤上都有所增加,但主要离子的增加量存在一定的差异,在棕壤中主要为 HCO_3^- 、 Cl^- 和 Ca^{2+} ,在褐土中主要为 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 和 Ca^{2+} ,而潮土中则主要为 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 HCO_3^- ,且潮土中的一价离子的含量较其他两种土壤更高(李文庆等,1995);吕福堂等通过调查分析发现,日光温室土壤盐分离子含量的阴离子是 NO_3^- ,其次是 SO_4^{2-} 和 Cl^- ,阳离子中以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子最多,其中 NO_3^- 的质量比例占阴离子总量的43.4%~51.5%;各种主要离子中以 NO_3^- 和 K^+ 离子的增加幅度最大,且分析认为虽然这些离子大部分为化学肥料的副成分,但增加的 Mg^{2+} 很可能是从土壤胶体上交换下来的(吕

福堂等, 2004)。

不同的土壤条件和施肥结构下, 这些离子和主要离子组成比例不同, 如若重视对钾肥的施用会造成 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等离子的积累而改变盐分主要离子的组成。在湖北调查的土壤阴离子大多以 NO_3^- 为主, 其次是 Cl^- , 但盐离子以 Na^+ 为主(艾天成等, 2006)。姚春霞等的分析认为, 市郊设施栽培土壤盐渍化的盐分组成中阴离子以 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 为主, 阳离子以 Ca^{2+} 、 Na^+ 为主, 这些离子除了土壤的原始沉积量不同外, 大多为化肥的副成分或转化物, 因此设施栽培中存现的土壤次生盐渍化现象与化肥的不当施用有密切关系(姚春霞等, 2007)。余海英等对设施温室土壤盐分离子的调查则发现, 除 HCO_3^- 外, NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 等主要离子的累积都明显高于对照的露地, 盐分的这种大量累积以及这些离子的相对富集, 对于土壤-植物的养分供需平衡会造成不利影响(余海英等, 2006)。

设施种植的盐离子变化与肥料施用、作物管理等之间关系密切。研究发现, 在鸡粪、猪粪和鸽粪等有机肥的施用下, 土壤的 Cl^- 离子和 Mg^{2+} 离子增加, 而 Ca^{2+} 离子减少, 由此造成土壤盐分的离子组成发生了很大的变化(Li 等, 2007)。也有研究认为, 设施温室栽培中的蔬菜偏好于硝态氮, 若按照平衡施肥的施肥制度, 施入氮肥中饱含硝态氮、亚硝态氮和铵态氮, 会引起土壤的硝化和反硝化过程受到抑制, 造成原土壤溶液内或土壤即时溶解的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子集聚(宁运旺等, 2001)。在土壤内的盐分不同离子影响下, 作物的反应存在很大的差异, 也影响了作物的养分吸收, 如 Na^+ 离子占主导地位的土壤内, Ca^{2+} 离子的可利用性就减少, 并会影响作物的 Ca^{2+} 、 K^+ 吸收, 而 Cl^- 离子偏多, 则会导致 NO_3^- 吸收下降, 进一步造成土壤内的硝酸盐集聚; 土壤盐分的胁迫更是会影响植物的新陈代谢中的复杂过程(Grattan 等, 1999)。

4. 土壤盐分累积的机理分析

关于设施土壤环境变化和土壤盐分累积的机理, 有很多研究者进行了分析和探讨, 并有部分学者依据这些原因提出了相应的应对措施。

来自以色列的次生盐渍化防治的经验指出, 灌溉地区内次生盐渍化的发生表明了水资源的不足, 对长期灌溉过程中的水资源和盐分的平衡进行分析, 加强水资源管理, 可以改善现状(Banin 等, 1995)。Darwish 等也认为, 强化田间水分和养分的管理, 提高利用率, 是应对土壤次生盐渍化的手段(Darwish 等, 2005)。

孙松发等通过比较两年的田间资料发现, 温室土壤中表层盐分含量与大气积温之间有很好的相关关系, 影响盐渍化成因的主要原因应该是作物蒸腾导致地下水中的盐分上升而土壤得不到雨水淋洗(孙松发等, 1992)。童有为等则由揭棚的大棚内土壤盐分出现消减和累积的过程认为, 隔绝降雨淋洗是大棚盐分上升的主因(童有为等, 1989)。Zhou 等在陕西地区的研究则发现, 在降雨量较为匮乏的 2006 年, 盖棚期始末盐分含量没有很大差别; 但在降雨量充沛的 2007 年, 盖棚期始末的盐分有显著差异; 由此也说明了棚内土壤盐分与降雨水文气象变化之间有很大关系(Zhou 等, 2010)。对于灌溉水带入的盐分含量约的分析发现, 氯离子含量约占灌溉水中的盐分比重的 12%, 但发生盐渍化土壤中的氯离子含量却达到了 34%, 由此说明田间土壤的氯离子不仅来源于灌溉, 更可能来自地下水的上升(Darwish 等, 2005)。

肥料一直是保护地土壤问题的主要成因之一。薛继澄等发现, 土壤硝酸盐积累是保护

地次生盐渍化的主导因子,因此提出要根据硝态氮数量来控制氮肥的施用,以控制土壤的次生盐渍化和硝酸盐对环境的污染(薛继澄等,1994)。在陕西杨凌地区的设施蔬菜土壤调查发现,土壤硝态氮、有效磷和速效钾与土壤盐分之间有密切关系,由此说明过量施用肥料可能是引起土壤盐分累积的主要原因(周建斌等,2004)。

有研究则认为,增加有机肥在植物根部的施用能够减少由于次生盐渍化带来的植物生理障碍的发生。增加有机肥的施用量的作用机理可以参考一些田间试验中的发现。在南通市开展的稻草、豆秸等的田间增施试验发现,增施秸秆增进了土壤中各类生物活性,从而有效减弱了土壤次生盐渍化作用(殷永娴等,1996)。对有机肥施用后的土壤环境调查发现,由于有机肥中含有的过多的离子,即使在降雨后对土壤的淋洗量比较大的情况下,土壤次生盐渍化发生的威胁依然非常大(Li等,2007);对不同尿素、羊粪肥配比下的大棚栽培试验中发现,羊粪肥的施用会提高土壤水溶性盐分含量(夏立忠等,2003),同时有研究发现,田间有机氮残留过多,会造成氮的矿化作用比较大,由此引起田间硝酸盐集聚现象比较严重(Shi等,2009);刘建玲等也发现,相比于已腐熟有机肥而言,化肥和不腐熟的有机肥配施能显著降低土壤的盐分和硝酸盐含量(刘建玲等,2005)。在不同的有机肥施用下作物的产量有所增加,但土壤的盐分也伴随着增加,因此在土壤中施入有机肥需要根据土壤的盐渍化程度来确定施用量。

目前,研究者不仅尝试了改善肥料投入的方法来治理设施土壤问题,而且灌水洗盐、客土修复和其他技术也经常被用来减轻大棚土壤的盐渍化情况。试验结果表明,灌水洗盐能够降低表层土壤盐分53%~64%(沈根祥等,2005)。对于次生盐渍化土壤的治理中,还有一种客土修复的方法,也受到研究者的关注。对温室盐渍化控制的治理中,还有一些尝试将电分离技术应用到盐渍化土壤中的实验,并且发现,硝酸盐的离子移动性最强,且这种技术非常有效。

总结设施土壤次生盐渍化的发生机理,可以发现,环境气象因素、地下水位及地下水水质、作物植被和作物类型等都会造成土壤的次生盐渍化;一些具体防治土壤盐渍化的措施则包括减少肥料投入、避免地下水位过高、强调雨季淋洗、土壤置换、改变种植作物种类等。

1.1.2 设施种植的平衡施肥研究

由前述分析可以发现,设施种植中的肥料问题不仅受到农户的关注,而且也会造成一系列的水土环境问题。设施种植中的养分管理是提高大棚收益和保护大棚水土环境的关键技术之一。

1. 设施种植中肥料的大量投入带来许多问题

农田土壤氮素的转化与循环是组成生物圈氮素化学循环的重要组成部分,也是影响农田生态系统的重要过程,氮的循环受到了众多研究者的重视,也有些研究者对氮循环的过程和损失途径进行了综述(Zhou等,2010)。中国的农业管理较注重肥料施用及循环利用,强调高密度的种植来达到高的田间产量;良好的田间管理结合水肥耦合操作的悠久历史赢得了极高的粮食自给率。但肥料的大量施用,已经造成了一系列的问题。从1981年到2007年,全国作物的产量和氮肥的施用量分别增加了54%和191%,过高的氮肥施用并没

有引起相应的作物产量增长,反而造成了土壤酸化严重,引起土壤 pH 值下降了 0.3~0.8 (Guo 等, 2010)。张福锁等通过总结在全国进行的田间试验结果表明,氮肥的利用率为 26.1%~28.3%,远低于国际水平,且与 20 世纪 80 年代相比呈下降趋势,造成肥料利用率低的主要原因包括高产农田过量施肥、忽视了田间土壤和作物的实际养分需求、一些养分损失未能得到有效阻控等(张福锁等, 2008)。

设施种植下土壤受人类活动的强烈影响,且复种指数高,施水施氮量比较大,其内的养分状况和氮素循环最近也受到了研究者的特别关注。相比较田间作物的施肥量,设施种植作物的施肥量要高得多。在对中国北方的不同种植体系的调查中发现,大棚蔬菜年度施用有机肥、无机化肥氮、灌水带入的氮量分别为 1881kg/ha、135.8kg/ha、36.56kg/ha,分别为小麦-玉米田的 37.5、25、83.8 倍(寇长林等, 2005; Ju 等, 2006)。在北京地区的调查发现,超过 35%的大棚当季施用氮肥超过了 1000kg/ha(Chen 等, 2004)。

设施种植条件下过多的施肥量造成了土壤的养分含量过高,硝酸盐累积严重。夏立忠等通过开展有机肥、无机肥施用配比的试验发现,大棚覆盖条件下肥料的施用下土壤养分水平和盐分状况会迅速改变(夏立忠等, 2003)。在西安市郊区对 100 余个设施栽培番茄的施肥现状调查发现,当地氮、磷、钾化肥的平均施用量分别为 600kg/ha、623kg/ha、497kg/ha,造成了土层有机质、有效磷、速效钾含量均明显高于棚外露地,其中硝态氮含量较露地增加幅度为 127%~433%(周建斌等, 2006)。在 3 年棚龄的大棚进行的试验表明,施用 1kg 尿素氮或 1t 羊圈厩肥引起土壤电导率发生较大的增加,且增加过程中不仅有离子含量的直接增加,还存在化学交换作用导致的溶解离子增加(夏立忠等, 2005)。

过量施肥下的肥料利用率一般都比较低,同时也存在未能平衡施肥的问题。如复合肥中 N、P 养分的当季利用率不足 10%,而 K 素的当季利用率也不超出 25%(李俊良等, 2001)。在山东寿光的 18 个温室大棚内的调查结果发现,设施每年氮、磷、钾养分的平均投入量为 4088kg/ha、3656kg/ha、3438kg/ha,氮、磷、钾养分的利用率分别为 24%、8%、46%,且施用比例与作物的需求比例严重失衡(余海英等, 2010)。对江苏的水稻-大棚草莓轮作农田生态系统的调查表明,系统养分投入结构以有机养分为主,氮、磷、钾投入比例中磷的投入比例过高,氮、磷、钾盈余率分别为 34.27%、264.47%和 33.12%。一般而言,氮肥的形式和施用效率影响到钾肥的固定和吸收,对氮肥和钾肥的比例进行优化可以获得较高的产量,但过高的施肥量不能保证高产量甚至可能有所减产;作物对钾肥的吸收还依赖于土壤中氮的形式,当硝态氮含量过高时,可能存在一定的副作用,在氨氮较多时,钾离子具有较大的移动性(Zhang 等, 2010)。由此可见,在设施种植中提高肥料利用率的同时,也需要注意平衡施肥。

影响肥料利用率提高的主要问题是过量施肥,在实际的田间操作中,一些农户担心肥料的减施可能影响作物的产量。但一些相关的研究指出,减少施肥不会造成产量的明显减少。在夏玉米、冬小麦、夏玉米等 3 季作物累计施入优化制度后的氮肥 225kg/ha,比常规施氮(900kg/ha)少施 675kg/ha,但作物产量并没有降低(巨晓棠等, 2002)。通过优化施肥,减少氮肥用量至 62%、78%和 80%,没有对作物的产量造成影响,同时 0~0.9m 剖面内的土壤硝酸盐含量出现了明显的降低(He 等, 2007)。还有田间试验中观察到的作物产量与作物吸氮量密切相关,均随施肥水平的提高而提高,但肥水过剩的条件下,作物产

量与作物吸氮量会出现下降(董洁等, 2010)。在氮肥钾肥的联合施用试验中发现, 长期增施氮肥没有明显作用, 长期过量施氮却会导致减产(Liu 等, 2008)。在不同的施磷水平下, 田间有效磷含量出现了中等水平(50~90mg/kg)和较高水平(>90mg/kg), 番茄的产量没有受到较大的影响, 因此说明, 对于磷肥在田间的施用量可以相对少施, 可以减少环境威胁(Zhang 等, 2007)。由于大多数的有机肥的用量都是按照有机肥中的氮含量为标准进行计算的, 如果考虑到有机肥中的氮磷比较小的情况, 在基于氮的有机肥施用制度中, 可能存在磷的过施情况。在按照磷的含量计算的有机肥施用制度中发现表层 5cm 内的土壤磷含量减少了 47%, 但是对作物吸氮量没有显著性的影响(Toth 等, 2006)。

2. 氮肥损失是环境的一个重大威胁

肥料的大量施用可能增加了对环境的潜在威胁。如大量施用氮肥显著增加了菜地土壤硝态氮的淋失风险, 被认为是引起地下水氮素污染的主因之一。年施氮量(黄棕壤)在 395.89kg/ha 和 646.78kg/ha 时, 就会达到国家对饮用水和地下水源的硝酸盐(氮含量)控制限值 10mg/L 和 20mg/L(赵长盛等, 2009)。多年的肥料施用试验结果表明, 单季作物生长后会有 20.9%~48.4% 肥料氮残留在 100cm 内土层中, 但残留氮在后茬的利用率不足 8%; 低的施氮量会造成肥料氮以硝态氮形式残留的量很低, 高施氮量时, 残留氮以有机氮和硝酸盐形式存在的比例很高, 由此造成了氮素的淋洗损失非常高(巨晓棠等, 2003)。为了分析中国北方的塑料大棚的硝态氮淋洗风险, Song 等(2009)实地布置了 9 个排水渗漏计调查田间硝酸盐渗漏, 结果表明, 传统的田间管理造成了较大的硝酸盐的渗漏(17~457mg/L)和 1m 土体内较大的氮损失(152~347kg/ha); 高的施氮量情况下, 氮的利用效率比较低, 仅 33% 左右被植物吸收(Song 等, 2009)。在滇池地区开展的调查结果表明, 设施种植区地下水、地表水的硝酸盐含量与土壤硝酸盐含量均呈正相关关系, 因此种植区土壤的硝酸盐累积将加重滇池面源污染的负荷(张乃明等, 2006)。中国北方 3 种重要的集约化种植体系小麦-玉米轮作、大棚蔬菜和果园 3 种体系均表现出明显的硝酸盐淋洗, 大棚区内 99% 的浅井地下水硝态氮含量超过了 10mg/L, 而大棚深井和果园浅井超标率均为 5%, 小麦-玉米深井则仅为 1%(寇长林等, 2005)。在上海青浦农田水利试验站利用渗漏池进行青紫泥土壤氮素的淋溶模拟试验表明, 铵态氮下渗对地下水环境形成的威胁不如硝态氮, 硝态氮淋洗的峰值相比铵态氮要超前且变幅较大, 氮素淋失的主要季节在 6—8 月, 与降雨高频期的重叠加剧了对水环境的污染(王少平等, 2002)。这些结果都表明, 设施地的高施肥量, 已经造成了地下水环境的污染。

降雨量和氮肥施用对土壤硝态氮淋失有显著性影响, 施肥后的淋溶浓度普遍较高, 硝态氮随降雨不断向下淋溶, 在接近地下水位的 120cm 剖面处产生渗漏液的硝态氮浓度值已经超过限量标准(20mg/L)(侯晶等, 2006)。传统的大水漫灌条件下, 蔬菜保护地土壤硝酸盐的淋洗状况相当严重, 并有可能造成地下水的硝酸盐污染(李俊良等, 2001)。Zhou 等的研究还表明, 硝酸盐的淋洗也与年度降雨特性有关, 在湿润年的 100cm 内硝酸盐损失可以达到 158kg/ha, 但在干旱年内的累积硝酸盐损失比较小(Zhou 等, 2010)。

设施种植体系中, 养分的主要问题还包括潜在的磷输出的问题。大量的具有砂性土壤、高有机质、高含磷量的田间存在农业排水中磷过多或者向环境输出过多磷的问题, Sims J. T 等对这个问题进行了综述(Sims 等, 1998)。在华北平原的研究发现, 设施种植