

ZUOWU SHUIYAN
LIANHE XIEPO XIAOYING YU
SHUIFEN GAOXIAO LIYONG YANJIU

作物水盐联合胁迫效应与 水分高效利用研究

史海滨 杨树青 李瑞平等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

要 點 容 內

作物水盐联合胁迫效应与 水分高效利用研究

史海滨 杨树青 李瑞平等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本专著系作者在多年野外试验的基础上,采用多学科交叉的方法对盐渍化地区 SPAC、作物水盐响应关系以及作物根系的动态发展规律等进行的系统研究。主要内容包括:盐渍化地区节水灌溉的研究现状及研究的试验方案、作物对水盐联合胁迫响应关系的试验研究、盐渍化地区 SPAC 能态的试验研究、SPAC 动态模拟、作物-水-盐响应模型、盐渍化地区作物根系吸水模型、盐渍化土壤节水灌溉原理的应用、土壤水盐与作物信息空间结构性及其协同关系及盐渍化地区节水灌溉原理的研究方向与展望等。

本书内容以盐渍化土壤节水灌溉为主线,探讨了水分亏缺时水分与盐分对作物的胁迫影响、不同生育阶段的土壤适宜水分下限、作物缺水性信号与缺水状况的定量诊断方法,研究了生育期间作物耐盐缺水滞后关联度,揭示了盐渍化地区作物水盐响应的规律,建立了作物水盐胁迫响应模型和盐渍化地区根系吸水模型,确定了节水防盐双重目标管理模式。

本书可供水利、农学、土壤专业的研究生、本科生及从事相应专业的科研、教学和工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

作物水盐联合胁迫效应与水分高效利用研究/史海滨

等著. —北京:中国水利水电出版社, 2009

ISBN 978-7-5084-6358-2

I. 作… II. 史… III. ①作物-水盐体系-研究②作物-灌溉水-用水量-研究 IV. S156.4 S274

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 040530 号

书 名	作物水盐联合胁迫效应与水分高效利用研究
作 者	史海滨 杨树青 李瑞平等 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 17 印张 403 千字
版 次	2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	48.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

内蒙古农业大学史海滨等撰写的《作物水盐联合胁迫效应与水分高效利用研究》专著，是他们研究团队多年从事盐渍化地区节水灌溉理论与应用研究成果的系统归纳与总结。

盐渍化地区水盐联合胁迫效应研究目前在国际上尚属难点，属于农业水土工程学科的前沿领域。该书以干旱寒冷并存在土壤盐渍化威胁的内蒙古河套灌区为背景，针对水盐联合胁迫对作物生长性态和产量的影响，对盐渍化地区 SPAC 水分通量的计算方法、盐渍化对作物根系吸水的影响、土壤盐渍化对作物生育过程及最终产量的影响及其相互关系进行了全面系统的分析研究。在此基础上，探索了土壤水盐与作物信息空间关系，建立了作物水盐响应模型，制定了盐渍化地区节水灌溉最优灌溉制度，取得了许多创新性研究成果。

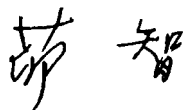
该书的特色是：在长期大量野外试验的基础上，采用植物生理、作物栽培、土壤改良、灌溉和灌溉管理以及人工智能等多种学科交叉的理论与方法开展分析研究。其中，研究了盐渍化地区 SPAC 水分传输规律、作物水盐响应关系以及作物根系的动态发展机理，开展了含盐土壤节水灌溉原理与应用研究，探讨了水分亏缺时水分与盐分对作物不同生育期的胁迫影响、不同生育阶段的土壤适宜水分下限、作物缺水性信号与缺水状况的定量诊断方法、生育期间作物耐盐缺水滞后关联度，揭示了盐渍化地区作物水盐响应的规律，建立了作物水盐胁迫响应模型和盐渍化地区根系吸水模型，确定了节水防盐双重目标管理模式。综上所述，该研究为盐渍化地区节水灌溉提供了理论依据及实践技术。

该书的作者均为内蒙古农业大学中青年教学、科研骨干，他们具有科学的思维方法、严谨的工作作风、扎实的科研基本知识和刻苦钻研、开拓创新的精神。多年来，他们取得了大量翔实可靠的第一手资料，并进行了深入的理论分析，从而完成这本高水平专著。

现代科学技术向着高度分化、高度综合两个方向发展，学科之间的交叉、渗透往往成为新的学科增长点。盐渍化地区节水灌溉原理的研究涉及土壤、农业、水利、气象等多学科理论和相关知识，是多学科间交叉和渗透研究的

产物。我对他们所取得的成果感到由衷高兴，并深信在有关学术界的共同努力下，该学科的内容、理论、方法将日臻完善，对干旱、半干旱并存在盐渍化威胁地区国民经济的可持续发展将起到愈来愈大的推动作用。

中国工程院院士
武汉大学教授

The image shows a handwritten signature in black ink. The characters are '邓' (Deng) and '智' (Zhi), which together read '邓智' (Deng Zhong). The signature is written in a cursive, flowing style.

2008 年 10 月

前言

我国是一个水资源相对短缺的国家，建立节水型社会是实现经济的可持续发展和水资源持续利用的必由之路；我国又是一个农业大国，农业用水占国民经济总用水量的70%以上，走节水农业的道路是未来农业发展的必然趋势。

近年来国内外学者普遍对非盐渍化地区的节水灌溉理论与应用比较关注，并已成为研究的热点之一。灌溉制度的研究已由传统的丰水高产型转向节水优产型。但对于盐渍化地区，在土壤含盐条件下的节水灌溉原理与应用研究较少。对于盐渍化土壤，作物对土壤盐分和水分的反应很难割裂开来。在区域农业灌溉管理中，作物对水、盐关系的数学表达式——作物水盐响应模型具有极为重要的作用，广泛用于节水防盐、灌溉水优化管理和咸水灌溉等方面。我国北方特别是西北干旱、寒冷荒漠地区，存在着严重的土壤次生盐渍化潜在威胁。水资源紧缺又是制约本地区农业发展最主要的因素，实施节水灌溉势在必行。研究土壤水分与盐分对作物的联合胁迫影响，对于在盐渍化地区开展节水灌溉显然是至关重要的。在盐分胁迫下，水盐胁迫机制更加复杂，研究难度增大。除了基质势的作用外，又加上渗透势的影响，强烈减少了土壤有效水分含量，直接影响作物的根系吸水性能和正常生长，与非盐渍化地区有显著不同。

含盐土壤的传统灌溉方法，一直局限在较大灌溉定额的冲洗脱盐或加大灌溉定额的淋洗理论，任务比较单一，很少从提高灌溉生产效率的角度出发来全面研究多目标的灌溉原理。而含盐土壤的节水灌溉具有许多不同于传统灌溉工程学的独特之处，具有较强的学科交叉和学科综合特点，涉及植物生理、作物栽培、土壤改良、灌溉理论和灌溉管理体制等方面。这一领域过去较多地停留在单项研究上，很少从多学科综合的角度进行联合研究，至今有许多方面还缺乏深入了解，如作物的耐盐性与缺水抗逆性、含盐土壤的水盐耦合生产函数、如何提高水分利用率等。干旱盐渍化土壤地区节水灌溉和高效用水及防治盐害新原理的研究仍是空白。这也是北方灌区和其他类似地区节水改造工程与水资源优化利用中迫切需要解决的关键技术之一。实行盐渍化土壤节水灌溉科学的理论依据和机制仍有待进一步揭示，并使之与盐渍化

土壤节水灌溉紧密结合。这一问题的探索将有助于缓解西北干旱半干旱地区水资源紧缺的矛盾,并对在节水的前提下改造西北地区大面积盐渍化土地具有直接的指导意义。

本书是作者在连续6年(2000~2005年)大量野外试验(大田试验、盆栽试验)的基础上,进行系统研究的成果。采用多学科交叉的方法对盐渍化地区SPAC、作物水盐响应关系以及作物根系的动态发展规律等进行了系统的研究;开展了含盐土壤节水灌溉原理与应用研究,探讨了水分亏缺时水分与盐分对作物不同生育期的胁迫影响,不同生育阶段的土壤适宜水分下限,作物缺水信号与缺水状况的定量诊断方法;研究了生育期间作物耐盐缺水滞后关联度,揭示了盐渍化地区作物水盐响应的规律,建立了作物水盐胁迫响应模型和盐渍化地区根系吸水模型,确定了节水防盐双重目标管理模式。

全书共分10章,第1、第2章介绍了盐渍化地区节水灌溉的研究现状及研究的试验方案;第3章介绍了作物对水盐联合胁迫响应关系的试验研究成果;第4章介绍了盐渍化地区SPAC能态的试验研究成果;第5章介绍了SPAC动态模拟研究成果;第6章介绍了作物—水—盐响应模型;第7章介绍了盐渍化地区作物根系吸水模型;第8章介绍了盐渍化土壤节水灌溉原理的应用;第9章介绍了土壤水盐与作物信息空间结构性及其协同关系;第10章对盐渍化地区节水灌溉原理的未来研究方向做了展望。

本书可供水利、农学、土壤专业的本科生、研究生及从事相应专业的科研、教学和工程技术人员参考。

本书由史海滨、杨树青、李瑞平、孔东、张丽辉、霍再林、李为萍、乔冬梅等撰写,最终由史海滨统稿完成。陈亚新、郭云、魏占民、何京丽、郭少宏、张义强、彭芳、李延林、屈忠义、刘宏云、王长生、翟进和薛铸等也参加了项目的研究工作。

中国工程院院士、武汉大学教授茆智先生在百忙之中欣然为本书作序;在本书的完成过程中曾得到武汉大学杨金忠教授,中国农业大学康绍忠教授、冯绍元教授,中国水利水电科学研究院李久生研究员的指导与帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于本研究涉及多学科的交叉内容,书中必定存在许多缺点与错误,恳请有关专家与读者批评指正。

作者

2008年3月于呼和浩特

目录

序

前言

第1章 引言	1
1.1 问题的提出	1
1.2 研究内容与意义	1
1.3 国内外研究进展	4
第2章 盐渍化土壤节水灌溉试验设计	19
2.1 研究区域与设备	19
2.2 试验方案与试验设计	33
第3章 作物对水盐联合胁迫响应关系研究	37
3.1 作物对盐分胁迫的响应关系	37
3.2 作物对水盐联合胁迫的响应关系	63
3.3 作物根系生理生态的研究	83
第4章 盐渍化地区 SPAC 能态研究	95
4.1 含盐土壤作物叶水势分析	95
4.2 大气水势	101
4.3 土壤基质势	101
4.4 SPAC 中各能态的关系	105
第5章 SPAC 动态模拟研究	108
5.1 参考作物腾发量(ET_0)的人工神经网络模型	108
5.2 基于 SWAP 模型作物需水量的推求	122
5.3 叶水势的动态模拟	142
5.4 小结	144
第6章 作物—水—盐响应模型研究	146
6.1 以土壤溶液相对浓度为变量的作物水盐响应模型	147
6.2 考虑盐分胁迫的相对腾发量的作物水盐响应模型	159
6.3 作物水盐响应的 BP—ANN 模型研究	166
第7章 盐渍化地区作物根系吸水模型研究	177
7.1 土壤水分运动参数测定及标定	177

7.2	作物根系吸水速率的推求	187
7.3	作物根系吸水速率的验证	192
7.4	盐渍化地区作物根系吸水模型建模	196
7.5	小结	199
第8章	盐渍化土壤节水灌溉原理的应用	200
8.1	土壤适宜含水量的确定	200
8.2	盐渍化土壤最优灌溉制度	204
第9章	土壤水盐与作物信息空间结构性及其协同关系研究	209
9.1	概述	209
9.2	采样系统设计	213
9.3	试验数据的统计分析与特异值处理	214
9.4	土壤水盐空间结构性分析	223
9.5	向日葵茎粗、株高东西方向空间结构性分析	231
9.6	土壤水盐与作物信息协同关系研究	237
第10章	展望	254
	参考文献	255

第 1 章 引 言

1.1 问题的提出

20 世纪 80 年代以来,随着对节水农业内涵认识的不断加深和因缺水及不合理的水资源开发利用所造成的环境问题的加剧,许多学者逐渐深入开展了包括水分亏缺对作物产量的影响、作物不同生育阶段对水分亏缺的允许程度、作物水分利用效率的潜力及其改善途径、作物不同生育阶段的土壤水分调控指标、土壤水分调控模型以及作物水分关系最优调控机制等节水农业应用基础的研究工作。近年来,通过对水分亏缺与作物生长和产量间的研究已经证明在作物适宜的阶段经历适度的水分亏缺,不但不会造成减产,而且对作物还会产生有益的影响,作物水分利用效率的高值往往是在中等水分条件下获得。这些成果也为由传统的丰水高产型灌溉转向节水优产型的“限水灌溉”(limited irrigation)或“非充分灌溉”(no full irrigation)提供了理论指导,也为调亏灌溉(Regulated deficit irrigation, RDI)和控制性分根交替灌溉(Controlled root-divided alternative irrigation, CRAI)等新的灌水方式的提出提供了依据。

国内外对于非盐渍化地区的节水灌溉原理研究较多,灌溉制度的研究已由传统的丰水高产型转向节水优产型,但是对于盐渍化地区土壤含盐条件的节水灌溉原理的研究较少。对于盐渍化土地,作物对盐分、水分的反应很难割裂开来。在区域农业灌溉管理中,作物对水、盐关系的数学表达——作物水盐响应模型具有极为重要的作用,广泛用于节水防盐、灌溉水优化管理、咸水灌溉等方面。盐分使土壤溶液渗透压增高,引起土水势下降,从而造成作物根系细胞吸水困难,即使土壤中有足够多的水分,作物也难以有效利用,产生所谓生理干旱。当土壤中水分不足时,盐分则加剧作物的水分胁迫。在腾发过程中,盐分并不随水分转移到大气之中,而是在土壤中不断积累,这一过程将改变土壤溶液的渗透势(potential osmotic)和基质势(matric potential)。目前国内外研究主要关注水分亏缺对作物的胁迫影响,多以单目标为主进行研究,而关于土壤水分与盐分对作物的联合胁迫影响研究尚少。由于土壤盐分与水分是两个相互关联的变量,很难将作物与这两个因子的关系分隔开来。因此,开展盐渍化地区水—盐联合胁迫影响与节水灌溉原理的研究,对于西北干旱地区的农业生产具有非常重要的现实意义。本研究得到国家自然科学基金(NO.50269002)、教育部高等学校骨干教师资助计划及内蒙古自治区水利厅重点项目的资助,在课题组成员共同努力下,历时 6 年取得了一些有益的成果。

1.2 研究内容与意义

我国北方,特别是西北干旱寒冷荒漠地区,降雨稀少,地区间、年际间、季节间分布

不均、变幅很大,土壤蒸发强烈,土壤母质含盐,地下水位较高,存在着严重的土壤次生盐渍化的潜在威胁。水资源紧缺是制约本地区农业发展最主要的因素,并日益受到人们的普遍关注。开展含盐土壤节水灌溉原理研究,制定节水调盐双重目标管理模式是西北盐渍化地区亟待解决的关键问题。

我国农业的季节性、区域性干旱缺水问题突出,是国民经济和社会发展的主要制约因素,节水灌溉技术研究成为国际上学科前沿关注的热点。然而,目前国内外节水灌溉的研究大部分集中在非盐渍化土地。研究土壤水分与盐分对作物的联合胁迫影响对于在盐渍化土壤地区开展节水灌溉显然是至关重要的。在盐分胁迫下,水盐胁迫机制更加复杂,研究难度增大。除了基质势的作用外,又加上渗透势的影响,强烈减少了土壤有效水分含量。其直接影响作物的根系吸水性能和正常生长,与非盐渍化地区有显著不同。在学科前沿对于干旱盐渍化土壤地区,节水灌溉和高效用水及防治盐害的新原理仍是空白。这也是内蒙古河套灌区和其他类似地区节水改造工程与水资源优化利用中迫切需要解决的关键技术之一。此研究也有助于西部大开发项目在内蒙古西部的顺利实施。根据作物不同生育期的耐盐程度和需水要求适时适量地进行科学灌溉,调控盐分,制定满足双重目标的科学管理模式,探索节水调盐的灌溉新原理,具有广泛开发的应用前景。研究在现有农业耕作技术水平下,考虑节水灌溉措施对农田水文循环变化规律的影响,主要针对土壤水分和盐渍度对不同生育期的胁迫影响(敏感度)以及不同生育阶段作物耐盐缺水间的关联度研究。提供作物不同生育阶段水盐动态的响应数学模型,制定满足节水、调盐双重目标管理模式,指导干旱盐渍化灌区的优化灌溉管理模式,成果对于华北、西北干旱半干旱区均具有重要意义和指导价值。

我国是一个水资源相对贫乏的国家。虽然水资源总量为 28100 亿 m^3 ,居世界第 6 位,但人均水资源占有量却仅为 2162 m^3 ,不足世界人均水平的 1/4,居世界 109 位。随着人口压力的增大,工业化进程的加速,工业、生活用水激增,水资源占有与分配更加不均匀,致使用水大户农业用水更加紧张。同时,由于我国所处的特殊地理位置,自然来水和径流在空间分布不均匀,形成地区之间水量丰枯悬殊。例如,内蒙古属于干旱半干旱少水带,径流深小于 100mm。气温低且气候干燥,年降水量在 400mm 以下,全年降水日少于 70d,且与绝大多数作物的需水期之间耦合程度差,成为我国缺水较为严重的地区之一。特殊的地理位置,量少而集中的雨水,严重影响农作物的生长。因此节约用水是当今世界各国供水、用水的必然选择,水资源短缺成为影响社会、经济、生态环境可持续发展的重要制约因素。为了合理利用水资源,灌溉农业应用而生。

灌溉农业经过半个多世纪的发展,取得了长足的进步。但是面对人口的激增,要满足对粮食的巨大需求,除了增加灌溉面积和灌溉用水量外,全面提高灌溉水的利用率和利用效率,发展节水灌溉,建设节水农业成为缓解我国水资源短缺矛盾的关键。目前我国灌区大部分地区仍采用传统的地面灌水技术,对全国不同地区、不同类型灌区平均灌溉水利用系数约在 0.45 左右。另一方面,我国灌溉水利用效率也很低,单方水生产粮食不足 1 kg/m^3 ,而以色列已达到 2.32 kg/m^3 ,一些发达国家大多都在 2 kg/m^3 左右。因此进行大规模的以节水为中心的大型灌区改造工作是国家提高水资源利用率的重要措施之一。依据《黄河内蒙古河套灌区续建配套与节水改造规划报告》,当灌区节水改造工程实施完成后,河

套灌区引黄水量将从目前年均 52 亿 m^3 至 2010 年下降到 40 亿 m^3 。通过渠系配套、渠道衬砌和科学管理,渠系水利用系数将从目前的 0.43 提高到 0.61 左右,可以部分提高水分的有效利用率。但是随着河套灌区引水量的大幅度减少也可能出现一些新的问题需要解决。如河套灌区盐渍化土壤占耕地面积的 70% 左右,引水量大幅降低后必将涉及灌区内盐渍化的防治、水资源的优化利用和农业生产可持续发展等问题。

在 20 世纪 80 年代 FAO 也曾预测“容易开发的土地均已利用,现在的注意力正在转向干旱地区以减轻人口的压力和提供更多的粮食”。目前国内外(包括河套灌区)已进行了许多节水灌溉的研究与推广,但主要集中在非盐渍化土地。全世界现有盐渍土近 10 亿 hm^2 , 占地球陆地面积的 10%, 而我国盐渍化土地近 0.149 亿 hm^2 , 约占世界 10%。主要分布在干旱半干旱地区,其中现代盐渍化土壤 0.055 亿 hm^2 , 潜在盐渍化土壤 0.026 亿 hm^2 , 全国受盐碱危害的耕地 0.014 亿 hm^2 。在西北地区大中型灌区节水改造过程中开发盐渍土节水灌溉是生态节水的关键技术之一。

含盐土壤的传统灌溉方法,一直局限在较大灌溉定额的冲洗脱盐或加大灌溉定额的淋洗理论,任务比较单一,很少从提高灌溉生产效率的角度出发,全面研究多目标的灌溉原理。而含盐土壤的节水灌溉具有许多不同于传统灌溉工程学的独特之处,具有较强的学科交叉和学科综合特点,涉及植物生理、作物栽培、土壤改良、灌溉理论和灌溉管理体制等方面。在过去这一领域较多的停留在单项研究上,很少从多学科综合的角度进行联合研究,至今有许多方面还缺乏深入了解,如作物的耐盐性与缺水抗逆性、含盐土壤的水盐耦合生产函数、如何提高水分利用率等。实行盐渍化土壤节水灌溉科学的理论依据和机制仍有待进一步揭示,并使之与盐渍化土壤节水灌溉紧密结合。这一问题的探索将有助于缓解西北干旱半干旱地区水资源紧缺的矛盾,并对在节水的前提下改造西北地区大面积盐渍化土地具有直接的指导意义。

研究采用田间节水灌溉试验和有针对性地运用多学科交叉的理论方法来进行:采用田间小区对比试验,盆栽试验研究水、盐联合胁迫对作物生理性态与最终产量的影响以及 SPAC 能态和根系分布与影响因素,探讨作物水盐响应关系;引入人工智能技术(人工神经网络和遗传算法)用于建模及系统优化;同时将 SWAP 模型用于 SPAC 水流通量的求解;运用地质统计学理论进行土壤水—盐与作物信息空间结构关系研究。

内容主要包括:

- (1) 土壤盐渍度对作物不同生育期的胁迫效应及不同生育阶段作物耐盐缺水间的关联度研究。
- (2) 不同生育阶段作物水—盐动态的响应数学模型的研究。
- (3) 作物缺水性信号与缺水状况的定量诊断方法。
- (4) 研究不同生育阶段内作物与农田微气象因子间的关联度。
- (5) 盐渍化地区 SPAC 能态、叶水势动态模拟以及根系吸水模型的研究。
- (6) 土壤水盐与作物信息空间结构性及其协同关系的研究。
- (7) 建立节水防盐双重目标管理模式,指导干旱盐渍化灌区的优化灌溉管理。

1.3 国内外研究进展

国内外有关节水灌溉与生物学基础的研究（如土壤物理、植物生理和灌溉原理）主要针对非盐渍土，关于盐渍土方面的研究尚很薄弱。随着易开发的土地已经利用，近30年来注意力正在向干旱地区转移（FAO）。20世纪末中国提出了西部大开发，都将涉及到地带性大面积盐渍土的利用和灌区内中低产田盐渍化的防治问题。中国盐渍土地面积占世界的10%，主要分布在干旱半干旱地区，其中具有活性的现代盐渍土和次生盐渍化的潜在盐渍土分别占了37.3%和17.5%，是目前科学技术和经济能力可开发利用的重点，也是西北地区大中型灌区节水改造的重点。在水资源紧迫和生态环境保护与时俱进的形势下，开发盐渍土节水灌溉成为生态节水的关键技术之一。在第15届世界土壤学年会的土壤盐渍化研究进展主题报告中，预测到“21世纪土壤盐渍化还会继续发展并将成为世界关注的重要问题之一”，指出了相应对策要实行节水灌溉和劣质水利用，并关注与生态环境的相互关系（I. Szabolcs, 1994）。

近代农业可持续发展的高效节水灌溉管理无论是对规划设计或是管理决策，都要依据作物—水—盐响应关系微观机制揭示和宏观量化分析，作物—水—盐响应模型（Model of Crop Response to Water and Salt, MCRWS）也称水盐生产函数是其理论和应用的基础，其模型成为预测的主要工具。

1.3.1 作物与盐分关系的研究

盐渍土、盐碱土或者盐碱地是人们习惯地对盐化土壤、碱化土壤、盐土和碱土的一个总称。由于不同的盐类对作物的危害不同，因此，在划分盐土的含盐起始值时，必须考虑不同盐类的毒害性。

当土壤中含盐量超过植物正常生长发育所能忍受的范围就产生毒害，以至死亡。而盐分对作物的影响是一个很复杂的问题，长期以来人们对其进行了大量的实验研究。早期的研究主要从宏观上研究盐分对作物的影响，侧重于建立作物经济产量与盐分之间的数量关系，主要用于确定作物的耐盐度，指导农业种植或进行盐害防治、预测预报。近年来，由于量测技术的提高和设备的改善，发展成为从生理学角度探讨盐分对作物生理性状的影响，以揭示作物盐分反应的生理机制，从更高层次上掌握盐分对作物的影响规律，为建立作物水盐响应模型提供完善的理论支持，满足现代农业水盐管理的迫切要求。

1. 盐分对作物生长和产量的影响

土壤中过多的盐分显著抑制作物的正常生长发育，最终降低作物经济产量。从宏观上看，生长在盐渍化土地上的作物往往植株低矮，叶小茎粗，长势不旺，产量下降。作物各个部分对盐分的反应并不相同，一般作物地上部分比地下部分易受盐分的影响，从而使根冠比增大。盐分在各个生育阶段对作物均有影响，但作物对盐分的敏感性随生育阶段的不同而不同。不同作物在相同生育阶段对盐分的敏感性也有较大的差异。例如，水稻、燕麦、玉米在发芽、成熟阶段有较强的耐盐性，在苗期和营养生长期对盐分特别敏感。而甜

菜、红花在发芽期则耐盐性较弱。

当土壤中盐分较少时,对作物并无影响,而当盐分含量较大时才使作物生长发育受到抑制并使产量降低。而这时的盐分含量称为临界含盐量,用以确定作物的耐盐性指标。不同的作物其临界含盐量是不同的,且当土壤含盐量超过临界含盐量后,盐分对作物产量影响的程度亦不同。Mass 和 Hoffman (1977) 通过对大量试验资料的分析比较,确定了大部分作物的临界含盐量,同时提出了作物产量随含盐量的增加而呈线性下降,并给出了产量降低速率。

2. 盐分胁迫作用机理

盐分胁迫涉及的致胁迫因素很多,渗透作用和离子毒害作用是最主要的。在盐分胁迫下,植物面临的首先是渗透胁迫作用,而这种渗透胁迫又是通过细胞膜发生的。细胞膜作为一种半透膜,是植物细胞与环境间的屏障。当细胞内渗透势大于环境溶液的渗透势时,植物细胞则失水。所以,在盐碱地区,虽然土壤含水量很大,但由于含盐量也很高,致使植物因吸水不足造成缺水,导致生理干旱。因此,在盐分胁迫下,植物体必须进行渗透调节才能适应环境。也就是说,在高浓度盐的环境下,植物细胞要建立更高的内部溶液浓度以降低自身的水势,提高吸水力。这就迫使植物从环境中吸取无机离子或自身合成小分子有机物。为了揭示盐分对作物生理性状的影响,1992 年 Katerji 等用 3 种不同盐分浓度 ($EC_e=0.9\text{ds/m}$; 2.1ds/m ; 4ds/m) 的水灌溉蚕豆,研究中采用黎明前叶水势、气孔导度、叶面积、干物质和籽粒产量来揭示在盐分条件下水分胁迫的生理机制。试验结果得出:灌溉水含盐浓度越高,气孔导度和叶水势就越低。这一结果表明,较多的盐分使作物水分胁迫更为严重。但在不同生长期不同盐分浓度处理的叶水势、气孔导度的差别并不相同,叶水势最大差值为 0.2kPa ,而气孔导度最大差值为 0.4cm/s 。表明在不同生长期作物对盐分的敏感性存在着显著差异。灌溉水盐分浓度越高,叶面积和干物质重越小。叶面积和干物质在不同生长阶段其下降幅度不同,生育后期下降达 15% 。 $EC_e=4\text{ds/m}$ 的产量比 $EC_e=0.9\text{ds/m}$ 的产量下降 28% 。

渗透胁迫降低了水分的利用,抑制了植物的生长,而特殊离子的影响对抑制植物生长具有同等作用。这些离子对植物细胞的作用可分为两个方面。一方面是离子的毒害作用。不同离子过量的渗入细胞后,使原生质凝聚,叶绿素被破坏。同时,蛋白质的合成受抑,而水解则加强,造成游离氨基酸的积累。这些氨基酸又会转化为丁二胺、戊二胺及游离氨,达到一定浓度时,细胞就会中毒死亡。另一方面是特殊离子的存在对植物营养状况产生影响。在盐碱地,这些离子相对浓度偏高,致使一些低浓度营养元素供应不足。比如, Na^+ 的存在,抑制了 K^+ 、 NO_3^- 和 Ca^{2+} 的吸收,破坏作物体内矿质营养平衡,因而使这些离子含量不足或引起阳离子之间平衡的破坏。植物因某些矿质营养供应不足而使生长受抑。如在高硫含量的盐渍化土壤中,钙元素较缺乏,使西红柿、青椒出现烂花,芹菜产生黑心,番茄的蒂腐病、莴苣内部产生锈斑等,可使作物减产。

3. 盐分对土壤水分有效性的影响

土壤中的盐分使土壤溶液渗透压增高,引起土水势下降,从而造成作物根系细胞吸水困难。即使土壤中有足够多的水分,作物并不能有效利用,产生所谓生理干旱。盐渍土的土壤溶液的浓度很高,它的渗透势可以低于 $-4\sim-6\text{MPa}$,有的甚至可低至 -10MPa 。当

土壤中水分不足时,盐分则更加剧了作物的水分胁迫。作物吸收水分时,要求细胞液的浓度比土壤溶液的浓度高1倍左右,盐渍土含有较多盐分,相对土壤溶液浓度的提高,细胞液的浓度就相对降低了,作物吸水的速度便降低,当土壤溶液溶度过高,作物不仅不能吸水,反而会发生反吸现象。资料表明,当渗透压大于101kPa使作物根系吸水困难,而当渗透压大于689kPa时,水分出现反渗透现象。

美国植物生理学会很早以前曾对不同土壤盐渍度水平(含盐量0, 0.1%, 0.3%, 0.4%)时土壤水分势能(吸力)与土壤水分含量的关系作过定量揭示。对于正常土壤溶液,在1.5MPa时凋萎系数接近6%,当盐分含量达0.4%后凋萎系数则提高到10%,减少了约1/3的土壤总有效水分。由于这种情况下的土壤水分有效性受到土壤基质势和溶质势的共同作用,将显著降低根系吸收土壤水分的有效性。在正常生产的土壤中,由于溶解物质的浓度影响溶质势(渗透压)在0.1~0.2MPa之间,然而在一些不毛盐地中,溶质势有高达20MPa的情况。

4. 碱度对作物的毒害作用

土壤吸收性复合体中有较多的交换性钠,从而降低钙及镁的有效性,同时亦降低植物吸收利用 Ca^{2+} 的能力;含钠的吸收性复合体的水解作用,形成少量氢氧化钠,从而造成一个高碱度的土壤环境,直接对植物产生毒害;交换性钠在吸收性复合体中积累较多,对土壤产生分散作用,造成一种湿时泥泞、干时坚硬收缩状态的恶劣的土壤物理性质,严重地阻碍水和空气的通透性。

1.3.2 作物—盐分响应模型研究

土壤的盐分含量过多或水分过少都会造成土壤溶液浓度升高,使根系吸水困难,如同缺水对作物的反应,也会造成减产,因此在研究盐渍化灌区作物—水分关系时,还应研究作物产量—土壤盐渍度的关系。

在作物—盐分模型研究中一般分为两类,一类是以渗透势与产量之间的关系;一类是土壤含盐量或浓度与产量的关系。

1. 生理干旱的缺水反应(势)函数

Feddes 和 Belman (1983) 建议用无量纲的缺水反应函数即势函数 $\alpha(\varphi)$ 表达由于土壤缺水和溶液浓度过高对根系吸水的胁迫影响。

$$S = \alpha(\varphi) S_m \quad (1.1)$$

式中 φ ——土水势,由基质势 φ_m 和渗透势 φ_s 两项组成; $\varphi = \varphi_m + \varphi_s$;

S ——吸水率根系;

S_m ——最大根系吸水率。

当 $\alpha(\varphi) = 1$ 时,根系吸水速率与最大吸水率相等。当 $\alpha(\varphi) < 1$ 时,由于作物吸水困难,根系实际吸水率小于最大吸水率,作物受到水分胁迫。

Van. Genuchten 等认为势函数可表达为

$$\alpha(\varphi) = \frac{1}{1 + \left[\frac{\alpha(\varphi)_m + \varphi_s}{\varphi_{s,50}} \right]^p} \quad (1.2)$$

$$\alpha = \frac{\varphi_{s,50}}{\varphi_{m,50}}$$

式中 $\varphi_{m,50}$ ——产量降低到 50% 时的基质势；

$\varphi_{s,50}$ ——产量降低到 50% 时的渗透势；

p ——系数，一般取为 3。

将式 (1.2) 代入式 (1.1) 得 Van. Genuchten 和 Hoffman (1984) 模型

$$\frac{Y}{Y_m} = \frac{1}{1 + \left[\frac{\alpha(\varphi)_m + \varphi_s}{\varphi_{s,50}} \right]^p} \quad (1.3)$$

式中 Y ——作物实际产量；

Y_m ——作物最大产量。

该模型属于 φ_m 和 φ_s 两种因子共同影响下相对产量机制结构模型。

2. 盐渍度—产量关系的函数

作物对土壤盐渍度的敏感性随生长发育阶段不同而变化，作物生育期内不同阶段盐分的综合敏感影响也可类似作物—水分响应模型 (Model of Crop Response to Water, MCRWS) 如同乘法模型表征作物—盐分响应模型 (Model of Crop Response to Salt, MCRS)。

$$\frac{Y}{Y_m} = \prod_{i=1}^n (S_i)^{\lambda_i} \quad (1.4)$$

式中 S_i ——土壤含盐量或浓度；

λ_i ——第 i 阶段土壤盐分的敏感指数。

上述 MCRS 也可用于咸水灌溉。

1.3.3 作物—水—盐关系的研究

在淡水资源日益紧张的形势下，世界范围内的需水要求增加，使人们更加关注限水灌溉的研究，并逐渐把注意力转向在盐渍化土地上进行限水灌溉或使用含盐劣质水灌溉作物。

农作物生长条件下的农田水盐运动是一个复杂的系统，土壤、水分、盐分以及作物各因子间相互制约耦合，构成了农田水盐动态变化并由此影响作物的种植生长环境。当灌溉水中含有盐分或在盐渍化土地上进行亏缺灌溉时，就有可能使土壤盐分含量积累，造成土壤溶液浓度过高，引起作物生理干旱。盐分因素存在引起的生理干旱如同水分因素不足引起的干旱缺水，一样会造成作物减产或死亡。土壤中的盐分和水分是影响作物生长和产量的相互作用的两个变量。盐分的多少影响土壤水分对于作物的有效性。对于盐渍化土地，作物对盐分、水分的反应很难割裂开来。在盐渍化地区农业灌溉管理中，作物对水、盐关系的数学表达——作物水盐响应模型具有极为重要的作用，广泛用于节水防盐、灌溉水优化管理、咸水灌溉等。国外对作物水盐响应模型进行了较多的研究。由于作物产量、水分、盐分的不同表达，研究者提出了不同形式的模型。按水分和盐分的取值期限，可分为全生育期的作物水—盐响应模型和生育阶段的作物水—盐响应模型。按建模方法，可分为经验关系模型和机制因子结构模型。随着作物水盐关系的深入研究，紧接着也展开了作物

水盐关系的探索。

从非充分灌溉与劣质水利用角度研究盐渍土对作物产量响应的基本原理，必须揭示作物节水防盐自身规律与环境影响的认识，要从多方面解释作物生命过程并提供一些不可缺少的响应概念。响应（Response）是作物适应水—盐环境的基础，也是作物内部生理活动对水—盐环境刺激的敏感回答，核心在于揭示作物抗性（抗旱性和抗盐性）和盐分对土壤有效水分的影响及水—盐联合胁迫问题。

1. 水—盐联合胁迫的传统响应概念

盐渍化程度（TS，EC）影响土壤水分的物理特性早有认识。如其对土壤凋萎系数（PSW）的影响实质是反映盐渍度对植物产生的水分胁迫。20世纪90年代以来许多学者如 J. W. VanHoorm 等（1993），N. Katerji 等（1996），K. S. Chantzoulakis 等（1997），K. Lamsal 等（1999）深入研究了盐渍度对小麦、玉米、马铃薯等的水分胁迫和对土壤水分有效性的影响，都证明盐渍度增大了 PSW，降低了土壤有效水分（AWC），加剧了植物的水分胁迫。李小刚（2001）研究了甘肃景泰灌区盐分对土壤吸湿系数（HC）的影响，认为可达到极显著水平，如 17.9%~38.8%（重量含水率），当 TS>0.25% 时，全

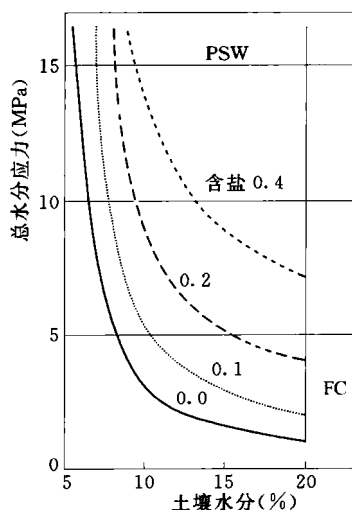


图 1.1 不同土壤盐渍度水平时土壤水分应力与土壤水分的关系
(美国植物生理学会)

盐对 HC 的影响明显表现出来，当 TS>0.5% 时，HC 随全盐呈指数增加，并认为对 PW 的影响不如 HC 对盐分敏感，说明盐渍土通过水气吸附作用可使其含水量达到田间持水量（FC）以上；离子组成中以 Cl^- 与 PSW 的相关性最大。

盐分对土壤有效水的影响的可加性假设形成已有半个世纪。土壤物理学认为，土壤的胁迫（势能）水平决定植物吸收水分容易与否，田间正常生产的土壤中由于溶解物质浓度，渗透压（溶质势）一般在 1~2MPa 之间，此时盐渍土的饱和提取液在 25℃ 时电导度一般 $\text{EC} > 4.0 \text{ mmho/cm}$ 。从美国植物生理学会很早就获得的如图 1.1 所示，图 1.1 中可以看出，在土壤中盐分浓度不同对土壤水分有效性的影响就是按传统可加性假设处理的，其中土壤水分总应力（也称总土水势 φ ）即正常的土壤基质势 φ_m 与土壤溶质浓度产生的溶质势 φ_s 之和。即完全等于两种效应同时施加 $\varphi = \varphi_m + \varphi_s$ ，如在非盐渍土中，正常的土壤溶液在 15MPa 时 $\text{PSW} \approx 6\%$ ，当加入 0.4% 浓度的盐分后，PSW 提高到 10%，结果减少了土壤中有有效水分 $\text{AWC} = \text{FC} - \text{PSW}$ 总量约 1/3，构成对作物的“生理干旱”。在此基础上形成了水—盐联合胁迫的传统概念模型，如 Van Genuchten 和 Hoffman（1984）模型，用无量纲缺水响应函数 $\alpha(\varphi)$ 表达 $\varphi_m(S_m)$ 和 $\varphi_s(S_s)$ 对根系吸水的联合胁迫响应。

$$\alpha(\varphi) = S/S_m \quad (1.5)$$

式中 S_m ——非盐渍化土壤根系最大吸水率；

S ——盐渍化条件下根系（root）吸水率。