

doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.18.1151



面向可持续灌溉农业发展的 涝渍盐碱管理



许迪

许迪^{1,2}, 李益农^{1,2}, 龚时宏^{1,2}, 张宝忠^{1,2*}

(1.中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038; 2.国家节水灌溉北京工程技术研究中心,北京 100048)

摘要:发展可持续灌溉农业是实现全球粮食安全、维持民众生计的必要保障条件之一,但因灌溉诱发的农田涝渍盐碱协同危害却对作物生长及产量产生直接和间接影响,严重制约灌溉农业生产水平,带来农田生态环境负效应。文中在对灌溉诱发的涝渍盐碱共存形成机制、作物生长和土壤特性对涝渍盐碱的响应、涝渍盐碱对作物产量的影响进行综述基础上,从排水、用水、灌溉、土壤、作物、社会经济等各种涝渍盐碱管理途径入手,阐述相关的治理措施与技术应用效果,围绕“节灌、减排、控盐、增效”的面向可持续灌溉农业发展的涝渍盐碱管理目标,从涝渍盐碱共存机制研究、涝渍盐碱共存状况监测评价、涝渍盐碱治理技术组合及集成模式研发、涝渍盐碱危害风险分析与评估等层面上,提出相应的主要研究内容与重点。

关键词:灌溉农业;涝渍;盐碱;共存机制;响应;管理

中图分类号: S277.9 文献标志码: A 文章编号: 1674-8530(2019)01-0063-10

许迪,李益农,龚时宏,等.面向可持续灌溉农业发展的涝渍盐碱管理[J].排灌机械工程学报,2019,37(1):63-72.

XU Di, LI Yinong, GONG Shihong, et al. Waterlogging and saline-alkaline management for development of sustainably irrigated agriculture [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2019,37(1):63-72. (in Chinese)

Waterlogging and saline-alkaline management for development of sustainably irrigated agriculture

XU Di^{1,2}, LI Yinong^{1,2}, GONG Shihong^{1,2}, ZHANG Baozhong^{1,2*}

(1.China Institute of Water Resources & Hydropower Research, National Key Laboratory of Basin Water Cycle Simulation and Control, Beijing 100038, China; 2.National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research, Beijing 100048, China)

Abstract: Developing sustainable irrigation agriculture is one of the necessary supporting conditions for global food security and maintenance of people's livelihood. However, farmland waterlogging saline-alkaline caused by irrigation exert some effects crop growth process and yield in direct or indirect ways, which severely restricts agricultural productivity and induces negative environment effects on farmland. Based on a thorough review of formation mechanism of waterlogging saline-alkaline caused by irrigation, response of crop growing and soil characteristics to waterlogging saline-alkaline, as well as influence of waterlogging saline-alkaline on crop yield, related management measures and technology applications for treating waterlogging saline-alkaline were discussed in view of drainage, water-use, irrigation, soil, crop, and socio-economic etc. Besides, related research topics and important contents,

收稿日期: 2018-03-21; 修回日期: 2018-05-23; 网络出版时间: 2019-01-03

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20190103.1020.022.html>

基金项目: 国家科技支撑计划重点项目(2011BAD25B00, 2012BAD08B00, 2014BAD12B00); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201501016)

第一作者简介: 许迪(1957—),男,四川乐山人,教授级高级工程师(xudi@iwhr.com),主要从事农业节水理论与技术研究。

通信作者简介: 张宝忠(1981—),男,山西太原人,教授级高级工程师(zhangbz@iwhr.com),主要从事作物用水理论与技术研究。

namely different levels of coexistence mechanism of waterlogging saline-alkaline, monitoring and evaluation of waterlogging saline-alkaline coexistence situation, combination and integration mode development of waterlogging saline-alkaline treatment technologies, and risk analysis and evaluation of waterlogging saline-alkaline damage, were proposed to meet the goal of waterlogging saline-alkaline management such as " saving irrigation, reducing emission, controlling salinity and increasing efficiency" based on sustainable irrigation agriculture.

Key words: irrigated agriculture; waterlogging; saline-alkaline; coexistence mechanism; respond; management

预计全世界人口将从目前 74 亿增加到 2050 年的 97 亿,相应需增加粮食产量 60%才可满足人口增长需求^[1].发展可持续灌溉农业是实现全球粮食安全、维持民众生计的必要保障条件之一,这对干旱和半干旱地区尤为重要,但受灌溉粗放、排水不畅、管理不当等影响,常导致农田涝渍盐碱发生,在全球 2.3 亿 hm²灌溉面积中有超过 4 400 万 hm²农田正受到涝渍盐碱影响^[2].

因灌溉诱发的涝渍和盐碱常为孪生威胁,虽彼此相互影响,却又是 2 个不同过程,许多时期内可同时迸发,也可能不同存.如雨季灌溉可能导致涝渍却无盐碱,而没有充足的淡水淋洗盐分或无人工或自然排水条件时,或许会产生盐碱而无涝渍.文中主要针对涝渍盐碱共存状况开展研究综述.

因灌溉诱发的涝渍盐碱胁迫涉及对作物和土壤产生大量的生理生化效应,这已成为农学、水文学、作物学、灌溉和土壤科学中亟待解决的关键问题.由于作物木质部中钠离子和氯离子浓度增加,涝渍可能在盐碱或非盐碱条件下致使气孔关闭,土壤缺氧会对作物水(养)分吸收产生不良影响,并经毛细作用使更多盐分汇聚地表,浅层咸地下水下的涝渍对作物生长更为有害^[3].此外,土壤盐分通过增加土壤溶液渗透势对作物产生负面影响,严重降低作物汲取水(养)分的能力,而土地碱化却严重降低土壤理化性质,表皮结痂、入渗特性下降、曝气减少等造成根区处于低氧或缺氧状态,间接影响作物正常生长^[4].BARRETT-LENNARD^[5]详细回顾了作物受到涝渍盐碱影响的诸多后果;SINGH^[6]概述了灌溉农业涝渍盐碱问题及其相应管理措施.由此可见,应针对涝渍盐碱共存形成机制以及作物生长和土壤特性对涝渍盐碱的响应,采用各种涝渍盐碱管理途径与措施,实现面向可持续灌溉农业发展的涝渍盐碱管理目标,文中对此进行综述,并提出亟待深入开展的主要研究方向与重点.

1 涝渍盐碱共存形成机制

地表滞水或地下水浸渍易带来涝渍危害,恶化土壤理化性状,导致水、热、气和养分失调,而特定灌排及土壤条件下的土壤高含盐量和高 pH 值又常引起盐碱灾害,致使土壤渗透势降低和离子失衡,打乱作物生理过程并抑制生长.由此可见,涝渍盐碱共存形成机制与灌排条件紧密关联.

涝渍易使作物成为浅根植物,并形成根区厌氧状态,而毛细作用又会导致盐分上升产生危害,使得农田不再适宜于农业生产.WICHELNS^[7]发现一旦地下水位上升到距地表 2 m 以内,作物根区条件将受到抑制.SMEDDEMA^[8]描述了因灌溉引起的涝渍盐碱过程,阐述了孪生威胁、补救措施和一些典型案例下的具体危害.HATTON 等^[9]提出诱发涝渍盐碱的相关要素,指出涝渍盐碱对重质土的影响最为明显,其中受涝渍危害的有效期要比轻质土持续更长时间.此外,涝渍还通过降低豆科作物的固氮率减少土壤肥力.MIRSHEL 等^[10]提出涝渍引起的作物营养生长状况下降是由于氮素供应受到抑制所致.FLEXAS 等^[11]发现胁迫下作物光合速率下降受到气孔关闭影响;文献[12]指出作物早期生长阶段内的涝渍可能推迟小麦分蘖期,导致高分蘖现象发生.

蒸发、蒸腾、排水不畅是导致灌溉土地盐碱化的关键要素.当地下水位不断上升并向地表移动时,季风期内会出现涝渍危害,而盐碱程度有所减轻,但随着冬季来临,水蒸发而去,盐分被留存于表土,盐碱程度加重.BENNETT 等^[13]指出对湿润地区,表土盐分会向土壤深部运移,并最终通过小溪河流汇入大海,而对干旱和半干旱地区,因雨量不足,盐分无法向下层土壤迁移,此时盐分淋洗是暂时的,且在炎热季节,因降雨淋洗下的盐分又会通过毛细作用再次返回地表.研究表明,充足的水分供给和充分的供水时间使得根区土壤达到饱和状态是导致涝

渍的基本前提,而土壤剖面盐分蓄积、调控盐分的水分供给以及盐分再分布机制则是引起盐碱的必要条件,因此,水盐运动与运移分布规律及其相关机制间的互馈是形成涝渍盐碱共存的机制所在^[14].

2 作物生长对涝渍盐碱的响应

涝渍通过减少供氧使得作物根系呼吸困难,致使长期内涝下的根系死亡,使得作物受到伤害,缺氧是产生涝渍灾害的主要原因.长期内涝还会对幼苗机能产生不利影响,二氧化碳、乙烯、乙醇和乳酸盐积累将改变土壤化学性质.EVANS 等^[15]报道了各种主要作物的地下水位埋深阈值,其为作物类型、土壤和气候特征的函数,一旦超过该值,作物营养生长即刻受到影响.

MARCAR^[16]研究了盐碱条件下涝渍对一年生作物茎部组织中钠氯含量的影响,指出涝渍对作物和多年生木本植物也有负面影响;BARRETT-LEN-NARD^[17]提出盐碱状态下涝渍可能会引起根区缺氧,并增加幼苗中的钠氯离子浓度.BRISSON 等^[18]开展了盐碱条件下对小麦作物涝渍响应影响的分析,2个胁迫变量分别是根区淹水时间和根系在浅层地下水位中的比例,发现48 h 后的涝渍影响作用较为明显;CONATY 等^[19]也指出涝渍减小了棉花的叶面积和光合作用以及叶片的养分浓度.低盐分胁迫下的涝渍可能会严重抑制植物生长,且受涝作物更易受到盐分伤害,特别是在作物营养生长期.如PALTA 等^[20]分析了涝渍对鹰嘴豆根系生长和植株生物量的影响,指出涝渍改变了其生根模式,减缓了根系分枝,严重影响分枝根的发育生长;YADAV 等^[21]也指出品种是决定涝渍对鹰嘴豆生长影响的关键因子之一.

涝渍对木本植物的负面影响主要反映在茎伸长减少、叶片脱落以及根和植物死亡上.但由于具备深根模式以及较高的需水要求,木本植物和多年生树种可在一定程度上用于涝渍盐碱治理.如TURNER 等^[22]研究了澳大利亚利用多年生牧草和农林业治理涝渍盐碱的作用;BENNETT 等^[13]提倡应将多年生牧草与农林业相结合开展涝渍盐碱治理,详细介绍了涝渍盐碱制约下的牧草生产情况;CARTER 等^[23]指出湿地树木对涝渍盐碱胁迫的耐受性主要取决于其对离子吸收和有机溶质产生的控制作用.

3 土壤特性对涝渍盐碱的响应

土壤特性对涝渍盐碱的响应主要体现在盐碱上.土壤溶液中的钠离子积累及其交换过程常会影响土壤物理性质,包括结构稳定性、水力传导率、入渗率等,含有较高黏土矿物、pH 值、低倍半氧化物、石灰和有机质含量的土壤更易受到影响,且土壤的湿润速率及时间、前期含水量等外在物理条件的时空变化也会影响土壤特性对盐碱的响应^[24].高钠含量与低盐分结合可减小土壤渗透性,并通过黏土膨胀与分散以及团聚体的熟化降低入渗能力.土壤团聚体分解将减少大孔隙的数量和水力传导率,因水解引起的团聚体破坏可能起因于各种物理和物理化学机制,这包括在土壤快速湿润期间因压缩所夹带的空气而引起的崩解,以及由压力膨胀差引起的崩解、雨滴溅击引起的崩解、在渗透胁迫下因低电解质水湿润土壤引起的物理化学弥散,这些机制因土壤团聚体分解涉及的能量类型差异有所不同^[25].

团聚体稳定性是衡量土壤抗崩解能力的标准.最初发现土壤团聚体的稳定性是有机物、黏土和氧化物含量的函数,随后认为团聚体稳定性和土壤渗透性同时取决于土壤交换性钠百分比和渗透溶液盐分的浓度.LEVY 等^[26]研究了6种具有不同黏粒含量的土壤团聚体的抗崩解能力,对粗、中质土而言,团聚体稳定性相对较低,且不受灌溉水盐性能影响,而细质地土的团聚体稳定性则相对较高,并随土壤交换性钠百分比的增加而下降.

石膏(或磷石膏)、聚丙烯酰胺等土壤改良剂已被用于防止表土形成致密层以及径流侵蚀过程.溶解后的石膏可将电解质释放到雨水中,而溶解后的钙离子经复杂的交换可置换出钠离子,进而产生一定改良效果.对具有活性阴离子的聚丙烯酰胺开展室内外研究表明,少量表施可在保持土壤高渗透率同时减少地表径流和土壤侵蚀程度,特别是当聚丙烯酰胺与石膏合用时效果最佳^[27].

4 涝渍盐碱对作物产量的影响

当高于特定土壤盐分阈值时,作物产量常呈现出直线下降趋势,作物对盐分的忍耐程度可分为耐受性、适度耐受性、敏感性和中度敏感性.HANKS 等^[28]指出苜蓿和玉米的籽粒及干物质产量随盐分含量上升呈直线下降趋势;MAAS 等^[29]也指出涝渍

盐碱下的水稻产量亦表现出线性下降规律。CAO 等^[30]指出棉花对涝渍胁迫的敏感期主要在开花期和铃期,减产主要与棉铃数量减少有关;SOLAIMAN 等^[31]提出涝渍对豆类产量的负面影响主要是通过减少茎部生长施加的,基于建立的地表涝渍指数与地下涝渍指数相结合的理论,提出了该综合指数与豆类作物产量之间的关系。DICKIN 等^[32]研究了夏季干旱和冬季涝渍对小麦生长及产量的影响,得出涝渍减小作物高度但根深不变的结论;刘凯文等^[33]对棉花涝渍过程开展试验研究,探讨了涝渍胁迫对产量的影响,并建立了用于管理涝渍农田的排水指数;HOSSAIN 等^[34]发现涝渍盐碱胁迫严重降低了小麦籽粒产量,缘由是单位面积的籽粒数量减少,而受粒重的影响却相对较小。

涝渍盐碱共生对作物产量危害要大于其单个效应。ZHENG 等^[35]研究了涝渍盐碱胁迫对小麦叶绿体合成、叶片光合作用和抗氧化能力的综合影响,发现涝渍对叶片光合速率的负面作用要大于盐碱,且两者的组合影响要比单个影响更为严重;SAQIB 等^[36]指出由于减少了穗长、粒质量和小穗数量,涝渍盐碱共生胁迫严重影响小麦产量。KAHLOWN 等^[37]研究了 Indus 流域涝渍盐碱胁迫对作物产量的综合及个体效应,与单个效应相比,综合效应对作物产量的危害更大;SHENG 等^[38]针对紫花苜蓿和玉米指出单次涝渍或盐分胁迫下加速了叶片衰老并抑制了光合速率,而组合胁迫对这些过程的影响要比单次胁迫更加严重。

5 涝渍盐碱管理途径与措施

5.1 排水管理

常采用地表或/和地下排水工程系统减轻涝渍盐碱危害程度。潮湿地区排水的目的是控制土壤水分条件,获得良好的土壤通透性,干旱和半干旱地区则为了维系土壤水盐平衡并改造涝渍盐碱地。JANSEN 等^[39]提出在地表排水系统中应借助截水沟拦截来自邻近渠道的侧渗水量,从而减少渠灌区的排水需求;TAO 等^[40]采用强透水材料替代位于排水暗管上部的土壤,改进了常规暗管排水的结构型式,其与明沟排水的组合应用有效提高了整体排水能力。对地下排水系统而言,水平排水要比垂直排水在控制涝渍盐碱上更为普遍采用,但在使用优质地下水的地区,仅使用垂直排水也可获得较好效果^[41];CHANDIO 等^[42]阐述了采用组合式排水系统

是治理涝渍盐碱的得力措施。

生物排水是利用植物的生物能源经蒸腾作用去除多余的土壤水分,这既可作为降低地下水位的手段也可作为拦截土壤水分到达地下水位之前的预防措施。与传统的工程排水相比,生物排水具有经济可行和环境友好特点,具备高蒸腾、耐盐性的深根植物均可作为生物排水选材。如 KHAMZINA 等^[43]分析了在中亚地区采用 9 种多用途树种降低地下水位上升的潜力,基于经济回报分析认为理想的树种应具有快速生长、实用价值高、存活率高等特点;GAFNI 等^[44]分析了在以色列北部应用生物排水控盐的影响和作用;RAM 等^[45]报道了桉树能降低渠灌区的涝渍盐碱程度,提高了作物产量。虽然生物排水是治理涝渍盐碱的一种有效补救措施,但也会对树木、毛竹等生物排水材料的种植地带及其根区盐分积累产生长期的负面影响,这成为制约在干旱和半干旱地区应用生物排水措施的关键因素。

传统思维认为应对盐碱的最佳办法是保持盐分尽可能远离作物根区。GOWING 等^[46]提出对特定农业区而言,若闲置的荒地面积足够大,其蒸发强度足够高,则不需要借助排水工程系统也能实现当地的土壤水盐平衡,这即为干排水(盐)的概念。ASGHAR 等^[47]开发了一个量化干排水(盐)系统的动态模型,对巴基斯坦下游和印度河流域典型条件下的初步模拟结果证实了先前的观测结果,即若作物灌溉面积与闲置的荒地面积大致相等,则干排水(盐)作用有效;KONUKCU 等^[48]研究 Indus 流域小麦-棉花种植模式下的干排水(盐)系统,排水区的面积要大致等于作物灌溉面积,且地下水位埋深约在 1.5 m。

5.2 用水管理

微咸水灌溉常采用咸淡水混合和咸淡水交替 2 种模式,通常交替利用模式好于混合利用模式。MINHAS 等^[49]指出对谷类作物应尽量使用交替利用模式,类似于盐分输入,该模式的优势在于水分供给上;MANDARE 等^[50]研究了印度西北部微咸水联合利用下的管理问题,评估了各种小麦作物轮作下应用不同微咸水利用模式的长期效应;RASOULI 等^[51]评价了伊朗小麦生长期间使用微咸水灌溉产生的影响作用,冬季降水在减少盐分上要比类似雨量分布下在整个冬、春、秋季上更为有效。KAN 等^[52]研究了以色列在田间和区域灌溉管理之间的相互关系,为微咸水灌溉再利用制定了相关的政策指南。

地下水位管理也称为控制排水,即在排水出口

处通过修建控制性建筑物,达到有效控制地下水位、减少排水及盐分和污染物排放、维持一定土壤水分状况的目的.WESSSTRÖM 等^[53]在瑞典南部开展田间试验评估控制排水对水文环境的影响,与传统的地下排水相比,控制排水下的排水量、含盐量以及硝态氮淋失量均明显减少,且冬季土壤剖面含氮量也显著下降.AYARS 等^[54]讨论了控制排水系统的设计方法,给出在干旱和半干旱地区优化设计控制排水系统的标准与建议;SKAGGS 等^[55]论述了控制排水管理对减少排水及氮素损失的有效性,指出有效减少地下排水氮素淋失量取决于控制排水系统的设计、建筑物埋设位置以及土壤质地等.NEGM 等^[56]采用 DRAINMOD-DSSAT 农业生态系统模型,针对美国中西部适合采用控制排水的区域,模拟了控制排水对排水量、氮素淋失量和作物产量产生的长期作用.

5.3 灌溉管理

水资源时空分布差异使其无法在量质上充分满足作物灌溉需求,故须开展地表水与地下水联合利用.KARIMOV 等^[57]在中亚 SYRDARYA 流域开展的研究结果表明,联合利用水资源可减少用水量并实现节水灌溉.PERANGINANGIN 等^[58]在亚洲季风缺水条件下评价了水资源联合利用模式,认为小田块和空间分散的景观是制约大规模采用联合利用模式的主要约束条件;ISLAM 等^[59]评估了干旱缺水区的水资源联合运用模式,认为经济、政策、管理和环境因素应作为评价的基础和依据. MARQUES 等^[60]指出在水资源联合利用模式下,减少水资源的可变性和不确定性可降低该利用模式对环境可能带来的不利影响,一个管理得当的水资源联合利用系统要比单独管理地表水或地下水系统能获得更多的水经济价值.

因灌溉渠道水量侧渗引起的地下水位抬升被认为是引起涝渍盐碱危害的主要原因之一.SINGH 等^[61]评估了来自渠道入渗的补给情况,指出侧渗损失主要取决于渠道的湿润周长、长度、渠床衬砌状况以及渠道底部土层的固有渗透率,且渠道衬砌后并不能完全避免渗漏损失.在印度无衬砌渠道的水量渗漏损失为 $0.3 \times 10^{-6} \sim 7.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m}^2)$,而在西部湿润地区,无衬砌和有衬砌渠道的渗漏损失水量分别为 $2.5 \times 10^{-6} \sim 3.0 \times 10^{-6}$ 和 $0.62 \times 10^{-6} \sim 0.75 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m}^2)$,衬砌后可减少损失近 70%.此外,渠道衬砌与否应以成本效益分析为基础,在相同渠道规模和河床坡度下,衬砌后的流速可提高 50%~

100%,在相同流量下可优化获得较小渠道横断面,节省工程投入.

作物灌溉下的土壤入渗水深应保持相对均匀,才可在满足作物自身生理需水同时又能有效淋洗盐分,故需采用精细地面灌溉、微灌等先进节水灌溉技术及灌溉制度.在基于激光控制土地精平下的水平畦田灌溉过程中,灌溉供水可均匀布在整个田面,这有利于精确控制淋洗水量,获得较好淋洗效果^[62].在盐碱条件下应用滴灌具有一定的优势和特点,其少量间歇的供水方式可有效去除较小土壤孔隙中的盐分,淋洗除盐作用显著.如 SUN 等^[63]基于中国北方沿海地区开展田间试验,研究了滴灌对土壤盐分管理和土壤水力性能以及作物生长的影响; MANSOUR 等^[64]研究了微咸水灌溉下 3 种地表和地下滴灌系统对埃及小麦生长和作物水分生产率以及土壤盐分状况的影响作用.

5.4 土壤管理

通过降雨灌溉淋洗根区土壤盐分使其含量不超出作物耐受程度是确保作物正常生长的重要条件之一.通常用于估算盐分淋洗需水量的传统模型均建立在稳态条件下,但大多数情况下却难以成立. CORWIN 等^[65]对传统的淋洗估算模型、WATSUIT 模型、TETrans 模型和 UNSATCHEM 模型进行了分析对比,评估了在稳态和瞬态条件下的适宜性,指出传统模型和 WATSUIT 属稳态模型,而 TETrans 和 UNSATCHEM 为瞬态模型; WATSUIT 和 UNSATCHEM 模型考虑了沉淀溶解反应,而传统模型和 TETrans 却未涉及; UNSATCHEM 模型认为腾发量和产量是基质势和渗透势的函数,但在其他模型中并没考虑. 瞬态模型可以捕获和评估影响淋洗需水量的更多变量参数,而传统模型常高估计算结果,故仍需开发更为精确的估算模型与方法.此外,在盐分淋洗方式上,主要采用一维或二维淋洗以及空间变量分布淋洗等,在淋洗方法上则包括连续或间歇积水、喷洒、隔沟(畦)淋洗、表面冲洗等.

一般采用色谱模型描述基于石膏的碱化土复垦,但现场测试发现预测值与实测结果间的差异要低于碱化土中出现的典型水平向变化.TANJI 等^[66]将该法扩大到包括硫化作用在内的几种化学反应动力学速率中,这虽可较好预测复垦的化学作用,但却不能很好估算土壤水分状况或复垦率.数值求解基于对流传输和水动力弥散的溶质运移方程是混相驱替模型的核心所在,关键在于严格地描述溶质迁移过程.当与化学反应模型相耦合时,混相驱替

模型可较好地描述复垦效果,但在野外尚未得到广泛应用,这受限于来自特定地点的大量详细数据^[67].此外,常采用 UNSATCHEM 模型定量计算的交换效率、方解石溶解和灌溉水的钙含量来确定石膏的需求量,复垦后的电导度和钠吸附比预测结果与实测值之间的吻合良好,这表明该模型考虑了电导度、钠吸附比和 pH 值对土壤水力传导率的影响^[68].

5.5 作物管理

在阐明植物耐盐分子和遗传学方面已取得较快进展,目前应鼓励分子和遗传植物生物学家与生理学家及农学家一起,在整个植物和生态系统尺度上整合作物生长对盐分的响应,深入开展相关田间试验研究.在整个生长季节期间,作物并非仅遇到单一的非生物胁迫影响,但人们对作物盐分响应机制以及盐分胁迫与涝渍、干旱、施肥等其他非生物胁迫之间相互作用的了解仍十分有限^[69].

以往人们通常利用拟南芥作为模式植物开展耐盐试验,但其对盐分较为敏感,而最新发现的一种盐芥植物却为开展相关研究开辟了新的机遇.KANNAI 等^[70]描述了一种新的耐盐机理,他们在普通芦苇中发现了一种耐盐植物,吸收的钠离子可被滞留在其茎基中,并优先与淀粉颗粒结合,从而减少了细胞溶质中游离的钠离子,降低了茎基细胞中的钠离子毒性;LUNDE 等^[71]在耐盐苔藓类植物中发现了小立碗藓植物,其中存在着与催化三磷酸腺苷分解为腺苷二磷酸和磷酸的酶相关的质膜,将相关表达式转移到高等作物上后,即可增强耐盐性.

利用转基因方法可以提高作物耐盐性,但在环境胁迫下开展改善作物耐盐性的努力尚未取得多少成就,这与人们尚不完全了解植物抗逆性的基本机理有关.盐分敏感型植物常限制盐分的摄取并通过合成相容性溶质(脯氨酸、甜菜碱、糖)调节其渗透压,而耐盐植物则吸收并积累盐分进入细胞液泡,控制细胞溶质中的盐分浓度并维持较高的 K⁺, Na⁺比,盐生和非盐生植物在耐盐程度上的差异清晰表明植物对盐分的响应有其自身的遗传学基础^[72].目前正通过 2 种基本的遗传学途径达到提高作物抗逆性的目的,一是自然遗传变异开发,即在胁迫环境下直接选择或通过 QTL 定位以及随后的分子标记辅助选择,二是引入新的基因或改变现有基因的表达水平开发转基因植物^[73].

5.6 社经管理

除上述技术类管理途径与措施外,涝渍盐碱管

理还会受到经济和社会等因素制约,这主要体现在政府支持、人员培训与能力、经济分析、公共政策与制度等方面.

由于对灌排工程的投资具有浓重的公益性色彩,故需要来自国家的投资以及政府各相关部门间的密切协作.尤其是加大对排水工程的投资,且在干旱和半干旱地区排水工程应与灌溉工程具有同等重要的地位.OSTER 等^[74]指出政府主管部门必须了解和清楚排水可能引起的负面影响,用水农户缺乏足够的诱因、能力和资金,开展这些在区域层面上应该加以解决的问题.

在人员培训与能力建设上,为了制定更为明智适宜的灌排管理政策与制度并建立更有效的排水工程系统,VISCONTI 等^[75]建议政府主管人员、各级规划者和设计工程师要不断了解和学习新的动态管理模式,基于植物修复理念开展盐碱土改良,增强合理利用排水和复垦盐碱土的技术有效性选择.对涝渍盐碱排水的经济分析应着重阐述其对作物产量和种植模式的影响,这有助于评估涝渍盐碱排水管理的田间投资成本与收益状况.此外,还应评估区域涝渍盐碱管理和排水方案的公共投资效应,以及涝渍盐碱排水和解决方案对农田生态环境产生的短期和长期效应^[76].鉴于盐分排水固有的负面外在性,还应在考虑农田排水系统能力的同时,采用包括公共投资、规章制度、激励措施等在内的各种干预措施与政策^[77].

6 涝渍盐碱管理主要研究方向与重点

从以上论述中可以看出,分属于不同涝渍盐碱管理途径的各种治理措施与技术涉及排水、用水、灌溉、土壤、作物、社经等多学科范畴及内容,具有涉及面广、综合性强、相互影响大等突出特点与特征,但现有成果多集中在单项治理措施与技术研发上,面对可持续灌溉农业发展的“节灌、减排、控盐、增效”涝渍盐碱管理综合目标,针对气候变化对农业水管理影响的长期趋势,深入开展涝渍盐碱共存机制研究、涝渍盐碱共存状况监测评价、涝渍盐碱治理技术组合及集成模式研发、涝渍盐碱危害风险分析与评估应成为主要研究方向与重点.

1) 涝渍盐碱共存机制研究.涝渍通过减少作物生理活动直接影响或通过降低养分有效性间接影响作物正常生长,并通过延迟播种时间影响各种田间作业的适宜性,盐碱则通过提高土壤溶液渗透势

和改变土壤结构及其理化特性,影响作物生长及产量,而涝渍盐碱共存胁迫的危害性常会大于涝渍或盐碱的个体影响。涝渍盐碱之间不仅相互影响,还可能受到其他非生物胁迫的作用,如干旱、施肥等也可能会对盐碱产生潜在影响。应基于植物生理学、基因组学、分子生物学等学科,针对涝渍盐碱共存互馈机制以及涝渍盐碱与其他非生物胁迫的耦合机制和交互作用等,深入开展室内外试验和机理机制研究,为有效提高涝渍盐碱综合管理水平奠定坚实的科学基础。鉴于作物的耐盐性和耐涝性之间难以统筹的现实,应将作物耐盐耐涝机理机制研究与现代转基因工程技术结合,开发培育出同时具有耐受涝渍和盐碱特性的作物种质新材料与新品种,从而提升非生物胁迫影响下的灌溉农业生产力水平。

2) 涝渍盐碱共存状况监测评价。传统的土柱、盆栽、测坑和大田试验仍是开展涝渍盐碱共存基础研究的主要途径,但需要丰富和发展上述试验过程中的监测手段和方法,以便增加监测频率和精度,节省人力和物力。应重点研究基于卫星遥感、无人机遥感和高光谱/多光谱地面成像产品进行作物涝渍盐碱耦合胁迫诊断和预警信号指征的提取方法,强化涝渍盐碱耦合胁迫下作物和土壤光谱特征曲线的变异机理研究,探讨基于跨平台遥感数据同化进而提高涝渍盐碱共存状况诊断时空分辨率的相关数学方法。与此同时,无论是对涝渍盐碱共存产生过程,还是评估各种治理技术与措施的实施效果,都必须深刻认识农业区域复杂人类活动干预下大气-水-土壤-作物复杂系统中的水盐运动规律和互馈机制与过程,基于传统田间尺度的水盐作物模型并借助尺度提升方法,构建灌区尺度的水-盐-作物分布式模拟预测模型,为合理选择涝渍盐碱管理技术与模式提供可靠的分析工具与手段。

3) 涝渍盐碱治理技术组合及集成模式研发。在继续开展各单项治理措施与技术研发同时,应特别重视对涝渍盐碱治理技术组合及集成模式的研发。一是要加强灌溉管理与用水管理的密切结合,在适宜的灌溉管理技术下,将微咸水利用和地下水位管理相结合是有效减缓涝渍盐碱协同危害的较佳治理技术组合及集成模式,实现既节水灌溉又提高水资源利用效率并有效控制地下水位的目的,减排、控盐、防渍、维持特定土壤水分的作用明显,相关研究重点是节水灌溉、水资源联合利用与地下水位管理的治理技术组合及集成模式研发;二是要增强灌溉管理与排水管理的紧密结合,鉴于灌排之间存在

的先天性紧密关联,研发基于灌排组合的涝渍盐碱协同治理一体化技术组合及集成模式,可有效提高灌溉效率并最大限度减少水量渗漏损失,这对实现灌排互补均衡至关重要,相关研究重点是节水灌溉、渠道衬砌防渗与组合排水的治理技术组合及集成模式研发。

4) 涝渍盐碱危害风险分析与评估。应从风险管理的角度和思路出发,开展涝渍盐碱共存状况下的风险预警预报及管理研究,提出针对不同气候区、不同作物及其生育阶段受到不同程度涝渍盐碱胁迫下的作物生理指征和信号表达特征,确定涝渍盐碱协同危害的风险指标及其阈值,研究不同灌排、气候和土壤条件下涝渍盐碱协同危害可能的风险与遭遇概率,探讨灾前、灾中和灾后下的风险管理与处置对策。

参考文献(References)

- [1] United Nations. World population prospects: 2015 revision population database [EB/OL]. (2015-10-30) [2018-03-01]. <http://www.un.org/esa/population/unpop.htm>.
- [2] Food and Agricultural Organization of the United Nations. Management of salt affected soils [EB/OL]. (2016-04-05) [2018-03-01]. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/management-of-some-problem-soils/salt-affected/-soils/en/>.
- [3] HOUK E, FRASIER M, SCHUCK E. The agricultural impacts of irrigation induced waterlogging and soil salinity in the Arkansas Basin [J]. Agricultural water management, 2006, 85(1/2):175-183.
- [4] BASTAWESY M E, ALI R R. The use of GIS and remote sensing for the assessment of waterlogging in the dryland irrigated catchments of Farafra Oasis, Egypt [J]. Hydrological processes, 2011, 27(2):206-216.
- [5] BARRETT-LENNARD E G. The interaction between waterlogging and salinity in higher plants: causes, consequences and implications [J]. Plant & soil, 2003, 253(1):35-54.
- [6] SINGH A. Waterlogging and salinity management for sustainable irrigated agriculture. II: engineering measures and biodrainage [J]. Journal of irrigation and drainage engineering, 2017, 143(9):04017036 .
- [7] WICHELNS D. An economic model of waterlogging and salinization in arid regions [J]. Ecological economics, 1999, 30(3):475-491.
- [8] SMEDEMA L K. Irrigation performance and waterlogging

- and salinity[J]. Irrigation & drainage systems, 1990, 4 (4):367-374.
- [9] HATTON T J, BARTLE G A, SILBERSTEIN R P, et al. Predicting and controlling water logging and groundwater flow in sloping duplex soils in Western Australia [J]. Agricultural water management, 2002, 53 (1): 57-81.
- [10] MIRSCHEL W, WENKEL K O, SCHULTZ A, et al. Dynamic phenological model for winter rye and winter barley [J]. European journal of agronomy, 2005, 23 (2):123-135.
- [11] FLEXAS J, BOTA J, LORETO F, et al. Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C(3) plants. [J]. Plant biology, 2004, 6 (3):269-279.
- [12] CELEDONIO R P D S, ABELEDO L G, MIRALLES D J. Identifying the critical period for waterlogging on yield and its components in wheat and barley [J]. Plant & soil, 2014, 378(1/2):265-277.
- [13] BENNETT S J, BARRETT-LENNARD E G, COLMER T D. Salinity and waterlogging as constraints to saltland pasture production: a review[J]. Agriculture ecosystems & environment, 2009, 129(4):349-360.
- [14] MCFARLANE D J, WILLIAMSON D R. An overview of water logging and salinity in southwestern Australia as related to the 'Ucarro' experimental catchment[J]. Agricultural water management, 2002, 53(1):5-29.
- [15] EVANS R O, FAUSEY N R, SKAGGS R W, et al. Effects of inadequate drainage on crop growth and yield [J]. Agricultural drainage, 1999.
- [16] MARCAR N E. Waterlogging modifies growth, water use and ion concentrations in seedlings of salt-treated eucalyptus camaldulensis, e. tereticornis, e. robusta and e. globulus[J]. Functional plant biology, 1993, 20(1): 1-13.
- [17] BARRETT-LENNARD E G. Restoration of saline land through revegetation[J]. Agricultural water management, 2002, 53(1):213-226.
- [18] BRISSON N, REBIÈRE B, ZIMMER D, et al. Response of the root system of a winter wheat crop to waterlogging[J]. Plant & soil, 2002, 243(1):43-55.
- [19] CONATY W C, TAN D, CONSTABLE G A, et al. Genetic variation for waterlogging tolerance in cotton [J]. Journal of cotton science, 2008, 12(2):53-61.
- [20] PALTA J A, GANJEALI A, TURNER N C, et al. Effects of transient subsurface waterlogging on root growth, plant biomass and yield of chickpea[J]. Agricultural water management, 2010, 97(10):1469-1476.
- [21] YADAV S S, KUMAR J, YADAV S K, et al. Evaluation of helicoverpa and drought resistance in desi and kabuli chickpea[J]. Plant genetic resources, 2006, 4 (3): 198-203.
- [22] TURNER N C, WARD P R. The role of agroforestry and perennial pasture in mitigating water logging and secondary salinity: summary[J]. Agricultural water management, 2002, 53(1):271-275.
- [23] CARTER J L, COLMER T D, VENEKLAAS E J. Variable tolerance of wetland tree species to combined salinity and waterlogging is related to regulation of ion uptake and production of organic solutes[J]. Newphytologist, 2010, 169(1):123-134.
- [24] RUIZVERA V M, WU L. Influence of sodicity, clay mineralogy, prewetting rate, and their interaction on aggregate stability[J]. Soil science society of america journal, 2006, 70(6):1825-1833.
- [25] FALSONE G, BONIFACIO E, et al. Destabilization of aggregates in sometypic fragiudalfs [J]. Soil science, 2006, 171(3):272-281.
- [26] LEVY G J, GOLDSTEIN D, MAMEDOV A I. Saturated hydraulic conductivity of semiarid soils: combined effects of salinity, sodicity, and rate of wetting[J]. Soil Science Society of America journal, 2005, 69(3):653-662.
- [27] SOJKA R E, BJORNEBERG D L, ENTRY J A, et al. Polyacrylamide in agriculture and environmental land management[J]. Advances in agronomy, 2007, 92:75-162.
- [28] HANKS R J, ASHCROFT G L, RASMUSSEN V P, et al. Corn production as influenced by irrigation and salinity — Utah studies[J]. Irrigation science, 1978, 1 (1):47-59.
- [29] MAAS E V, GRATTAN S R. Crop yield as affected by salinity[J]. Agricultural drainage agronomy monograph, 1999(38):55-108.
- [30] CAO G, WANG X, YU L, et al. Effect of water logging stress on cotton leaf area index and yield[J]. Procedia engineering, 2012, 28(12):202-209.
- [31] SOLAIMAN Z, COLMER T D, LOSS S P, et al. Growth responses of cool-season grain legumes to transient waterlogging [J]. Australian journal of agricultural research, 2007, 58(5):406-412.
- [32] DICKIN E, DAVID W. The effects of winter waterlogging and summer drought on the growth and yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. European journal of agronomy, 2008, 28(3):234-244.
- [33] 刘凯文, 朱建强, 吴启侠. 蕾铃期涝渍相随对棉花叶

- 片光合作用与产量的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(1):23–26.
- LIU Kaiwen, ZHU Jianqiang, WU Qixia. Effects of subsurface waterlogging following after surface waterlogging in period of cotton budding to flowering and bearing bolls on leaf photosynthesis [J]. Journal of irrigation & drainage, 2010, 29(1):23–26. (in Chinese)
- [34] HOSSAIN M A, ARAKI H, TAKAHASHI T. Poor grain filling induced by waterlogging is similar to that in abnormal early ripening in wheat in Western Japan [J]. Field crops research, 2011, 123(2):100–108.
- [35] ZHENG C, JIANG D, LIU F, et al. Effects of salt and waterlogging stresses and their combination on leaf photosynthesis, chloroplast ATP synthesis, and antioxidant capacity in wheat [J]. Plant science an international journal of experimental plant biology, 2009, 176(4): 575–582.
- [36] SAQIB M, AKHTAR J, QURESHI R H. Pot study on wheat growth in saline and waterlogged compacted soil: I. grain yield and yield components [J]. Soil & tillage research, 2004, 77(2):179–187.
- [37] KAHLOWN M A, AZAM M. Individual and combined effect of waterlogging and salinity on crop yields in the Indus basin [J]. Irrigation & drainage, 2002, 51(4): 329–338.
- [38] SHENG M, TANG M, CHEN H, et al. Influence of arbuscular mycorrhizae on photosynthesis and water status of maize plants under salt stress [J]. Mycorrhiza, 2008, 18(6/7):287–296.
- [39] JANSEN H C, BHUTTA M N, JAVED I, et al. Groundwater modelling to assess the effect of interceptor drainage and lining Example of model application in the Fordwah Eastern Sadiqia project, Pakistan [J]. Irrigation and drainage systems, 2006, 20(1):23–40.
- [40] TAO Y, WANG S, XU D, et al. Experiment and analysis on flow rate of improved subsurface drainage with ponded water [J]. Agricultural water management, 2016, 177:1–9.
- [41] RITZEMA H P, SATYANARAYANA T V, RAMAN S, et al. Subsurface drainage to combat waterlogging and salinity in irrigated lands in India: Lessons learned in farmers' fields [J]. Agricultural water management, 2008, 95(3):179–189.
- [42] CHANDIO A S, LEE T S, MIRJATM S. Simulation of horizontal and vertical drainage systems to combat waterlogging problems along the Rohri Canal in Khairpur District, Pakistan [J]. Journal of irrigation and drainage engineering, 2013, 139(9):710–717.
- [43] KHAMZINA A, LAMERS J P A, MARTIUS C, et al. Potential of nine multipurpose tree species to reduce saline groundwaters in the lower Amu Darya River region of Uzbekistan [J]. Agroforestry systems, 2006, 68(2):151–165.
- [44] GAFNI A, ZOHARY Y. Hydrological and salinity impacts of a bio-drainage strategy application in the Yizre'el Valley, Israel [J]. Hydrological processes, 2010, 21(16): 2164–2173.
- [45] RAM J, DAGAR J C, LAL KHAJANCHI, et al. Bio-drainage to combat water logging, increase farm productivity and sequester carbon in canal command area of North-West India [J]. Current science, 2011, 100(11): 1673–1680.
- [46] GOWING J W, WYSEURE G C L. Dry-drainage a sustainable and cost-effective solution to waterlogging and salinisation [C]//Proceedings of the 5th International Drainage Workshop, 1992.
- [47] ASGHAR H N, NADEEM M. Computer simulation of salinity control by means of an evaporative sink [D]. Newcastle: University of Newcastle upon Tyne, 1996.
- [48] KONUKCU F, GOWING J W, ROSE D A. Dry drainage: a sustainable solution to waterlogging and salinity problems in irrigation areas [J]. Agricultural water management, 2007, 83(1):1–12.
- [49] MINHAS P S, DUBEY S K, SHARMA D R. Comparative effects of blending, intera/inter-seasonal cyclic uses of alkali and good quality waters on soil properties and yields of paddy and wheat [J]. Agricultural water management, 2007, 87(1):83–90.
- [50] MANDARE A B, AMBAST S K, TYAGI N K, et al. On-farm water management in saline groundwater area under scarce canal water supply condition in the Northwest India [J]. Agricultural water management, 2008, 95(5):516–526.
- [51] RASOULI F, POUYA A K, SIMUNEK J, et al. Modeling the effects of saline water use in wheat-cultivated lands using the UNSATCHEM model [J]. Irrigation science, 2013, 31(5):1009–1024.
- [52] KAN I, RAPAPORT-ROM M. Regional blending of fresh and saline irrigation water: is it efficient? [J]. Water resources research, 2012, 48(7):7517.
- [53] WESSTRÖM I, MESSING I, LINNÉR H, et al. Controlled drainage-effects on drain outflow and water quality [J]. Agricultural water management, 2001, 47(2):85–100.
- [54] AYARS J E, CHRISTEN E W, HORNBUCKLE J W. Controlled drainage for improved water management in

- arid regions irrigated agriculture [J]. Agricultural water management, 2006, 86(1):128–139.
- [55] SKAGGS R W, FAUSEY N R, EVANS R O. Drainage water management [J]. Journal of soil & water conservation, 2012, 67(6):167–172.
- [56] NEGM L M, YOUSSEF M A, JAYNES D B. Evaluation of DRAINMOD-DSSAT simulated effects of controlled drainage on crop yield, water balance, and water quality for a corn-soybean cropping system in central Iowa [J]. Agricultural water management, 2017, 187:57–68.
- [57] KARIMOV A, MOLDEN D, KHAMZINA T, et al. A water accounting procedure to determine the water savings potential of the Fergana Valley [J]. Agricultural water management, 2012, 108(2):61–72.
- [58] PERANGINANGIN N, SAKTHIVADIVEL R, SCOTT N R, et al. Water accounting for conjunctive groundwater/surface water management: case of the Singkarak-Ombilin River basin, Indonesia [J]. Journal of hydrology, 2004, 292(1):1–22.
- [59] ISLAM N, ARORA S, CHUNG F, et al. Callite: California central valley water management screening model [J]. Journal of water resources planning and management, 2011, 137(1):123–133.
- [60] MARQUES G F, LUND J R, HOWITT R E. Modeling conjunctive use operations and farm decisions with two-stage stochastic quadratic programming [J]. Journal of water resources planning and management, 2010, 136(3):386–394.
- [61] SINGH A, PANDA S N, FLUGEL W A, et al. Waterlogging and farmland salinisation: causes and remedial measures in an irrigated semi-arid region of India [J]. Irrigation & drainage, 2012, 61(3):357–365.
- [62] AYARS J E, CHRISTEN E W, SOPPER W O, et al. Resource potential of shallow groundwater for crop water use: a review [J]. Irrigation science, 2006, 24:147–160.
- [63] SUN J, KANG Y, WAN S, et al. Soil salinity management with drip irrigation and its effects on soil hydraulic properties in north China coastal saline soils [J]. Agricultural water management, 2012, 115(1):10–19.
- [64] MANSOUR H A, EL-HADY M A, BRAALTSV F, et al. Performance automation controller of drip irrigation systems using saline water for wheat yield and water productivity in Egypt [J]. Journal of irrigation and drainage engineering, 2016, 142(10):05016005.
- [65] CORWIN D L, RHOADES J D, SIMUNEK J. Leaching requirement for soil salinity control: Steady-state versus transient models [J]. Agricultural water management, 2007, 90:165–180.
- [66] TANJI KK, DEVEREL S J. Simulation modeling for reclamation of sodic soils [J]. Ecological studies analysis & synthesis, 1984, 51: 238–251.
- [67] ROBBINS C W, WAGENET R J, JURINAK JJ. A combined salt transport-chemical equilibrium model for calcareous and gypsiferous soils [J]. Soil science society of America journal, 1980, 44(6):1191–1194.
- [68] SUAREZ D L. Sodic soil reclamation: modelling and field study [J]. Soil research, 2001, 39(6):1225–1246.
- [69] MUNNS R, TESTER M. Mechanisms of salinity tolerance [J]. Annual review of plant biology, 2008, 59(1):651–685.
- [70] KANAI M, HIGUCHI K, HAGIHARA T, et al. Common reed produces starch granules at the shoot base in response to salt stress [J]. New phytologist, 2007, 176(3):572–580.
- [71] LUNDE C, DREW D P, JACOBS A K, et al. Exclusion of Na⁺ via sodium ATPase (PpENA1) ensures normal growth of Physcomitrella patens under moderate salt stress [J]. Plant physiology, 2007, 144(4):1786–1796.
- [72] GLENN E P, BROWN J J, BLUMWALD E. Salt tolerance and crop potential of halophytes [J]. Critical reviews in plant sciences, 1999, 18(2):227–255.
- [73] SAHI C, SINGH A, BLUMWALD E A. Beyond osmolytes and transporters: novel plant salt-stress tolerance-related genes from transcriptional profiling data [J]. Physiologia plantarum, 2010, 127(1):1–9.
- [74] OSTER J D, WICHELNS D E W. Hilgard and the history of irrigation in the San Joaquin Valley: stunning productivity, slowly undone by inadequate drainage [M]//Salinity and Drainage in San Joaquin Valley, California, 2014:7–46.
- [75] VISCONTI F, PAZ J M D, MARTÍNEZ D, et al. Irrigation recommendation in a semi-arid drip-irrigated artichoke orchard using a one-dimensional monthly transient-state model [J]. Agricultural water management, 2014, 138(22):26–36.
- [76] KHAN S, RANA T, HANJRA M A, et al. Decision support model for water policy in the presence of waterlogging and salinity [J]. Water policy, 2011, 13(2):187–207.
- [77] WARD F A. Economic impacts on irrigated agriculture of water conservation programs in drought [J]. Journal of hydrology, 2014, 508(2):114–127.