

文章编号:0559-9350(2018)01-0126-10

滴灌条件下干旱区农田水盐运移及调控研究进展与展望

田富强, 温洁, 胡宏昌, 倪广恒

(清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

摘要:以滴灌为代表的节水灌溉技术在我国干旱区大面积推广应用,提高了水肥利用效率,也改变了农田水盐运移模式。一方面,地下水位下降,土壤水与地下水之间的联系减弱,减少了潜水蒸发带来的盐分,使得土壤盐碱化减轻;另一方面,由于缺乏洗盐水量,导致积累在土壤表层的盐分不能及时淋洗入深层,表层土壤盐碱化加重。本文通过回顾滴灌技术在干旱区的应用和研究,系统分析了滴灌条件下干旱区农田土壤水盐运移特点和盐分累积规律,概括了不同作物的水盐响应特征,总结了不同滴灌条件下的土壤水盐数值模型,归纳了目前常用的土壤水盐调控方法。在此基础上提出了需要进一步研究的问题和方向,包括:进一步揭示滴灌条件下土壤水盐运移及累积特征,科学制定农田水盐调控方案;进一步揭示作物水盐耦合响应动力学机制,科学确定调控阈值;发展具有我国自主知识产权的水盐运移和作物生长耦合模拟软件;构建基于生态格局的农田排水和区域盐分处置模式。

关键词:滴灌;水盐运移;模拟;作物响应;调控

中图分类号:S275.6

文献标识码:A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20170909

我国西北干旱区面积约占国土面积的24.5%^[1],但水资源总量仅占全国的5.8%,人均和地均水资源占有量分别为全国平均水平的68%和27%^[2],水资源短缺问题突出。在此背景下,以滴灌为代表的节水灌溉技术得到了广泛应用,其中膜下滴灌技术在新疆大面积推广,已日臻成熟。另外,干旱区因降水少、蒸发量大,大部分浅层潜水的矿化度高,咸水和微咸水储量大^[3]。在淡水资源匮乏的条件下,开发利用矿化度较高的咸水和微咸水,将其作为农业和生态灌溉的补充水源,也是解决干旱区水资源短缺问题的重要举措。滴灌技术的推广应用,提高了水肥利用效率,也改变了农田水盐运移模式。一方面,地下水位下降,土壤水与地下水之间的联系减弱,减少了潜水蒸发带来的盐分,使得“自下而上”型盐碱化减轻;另一方面,由于缺乏洗盐水量,导致积累在土壤表层的盐分不能及时淋洗入深层,出现“自上而下”型土壤盐碱化的新风险,当采用咸水和微咸水灌溉时问题更为突出,因此需要在对土壤水盐和作物响应规律深入研究基础上提出科学的应对方案。本文对上述条件下的土壤水盐运移、作物水盐响应、水盐综合调控等方面进行综述,并对需要进一步深入研究的问题进行展望,以期对滴灌技术的发展提供参考。

1 滴灌条件下农田水盐运移规律研究

1.1 滴灌条件下土壤水盐分布特点 与漫灌和沟灌相比,滴灌是最节水且局部压盐效果较好的灌水方式。比较沟灌和滴灌水盐分布特点,发现沟灌形成近似U型的土壤湿润区,沟顶部分在返盐的作用下形成积盐;滴灌则形成近倒圆锥型的土壤湿润区,在湿润层外围形成盐壳^[4]。高龙^[5]根据实测土壤含盐率计算了滴灌后土壤含盐率等值线,分析了滴灌过程中土壤含盐率变化特征,发现受表面积

收稿日期:2017-09-16;网络出版日期:2018-01-24

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180124.0928.001.html>

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0402701, 2007BAD38B01)

作者简介:田富强(1975-),男,河南叶县人,博士,副教授,主要从事水文过程及模拟、农田水利、防洪减灾和跨境河流水资源管理等研究。E-mail: tianfq@tsinghua.edu.cn

水形状的影响,土壤含盐率的等值线分布和湿润体分布形状类似,但不如湿润体形状规则。李毅等^[6]研究了点源滴灌土壤入渗含盐率和盐分浓度在湿润体内的分布情况,得到了土壤含盐率和盐分浓度随水平距离和垂直距离分布规律的指数函数表达式。

王全九等^[7]根据滴灌土壤湿润体内含盐率与土壤初始含盐率、作物耐盐度的相对大小,将土壤湿润体划分为脱盐区(滴灌湿润体内土壤含盐率低于土壤初始含盐率的区域)、达标脱盐区(含盐率低于作物耐盐度的区域)、未达标脱盐区和积盐区。同时还指出定额情况下滴头流量增加有利于水平压盐,而不利于垂直向下压盐。吕殿青等^[8]总结了滴灌条件下土壤水盐运移特性的研究现状,指出滴灌点源入渗的影响因素包括滴头流量、灌水量、土壤初始含水率等。

膜下滴灌显著改变土壤中的水热盐分布特征。张治等^[9]系统分析了气象、土壤水、覆膜等对棉花生育期地温分布的综合影响,发现膜下滴灌可以克服土壤高地温低含水率或低地温高含水率的矛盾,具有良好的保温保墒作用,可以为作物生长创造较好的土壤水热条件。李毅等^[10]研究覆膜地温极值的时空变化,指出覆膜对提高低温段土壤温度有明显作用。地膜阻碍了地表积水区向膜外土壤扩展,减少了无效蒸发,提高了土壤温度^[11]。李明思等^[12]发现覆膜滴灌土壤湿润比(微灌条件下,湿润土体体积与整个计划湿润层土体的比值称为土壤湿润比)高于无覆膜滴灌土壤湿润比。膜下滴灌在生长季节有助于作物避盐,原因是土壤中的盐分随水被淋洗至浸润体外缘,使主要根系层的土壤形成了低盐区^[13]。齐智娟等^[14]比较了河套灌区全膜和半膜覆盖两种方式下滴灌土壤盐分运移规律,结果发现,半膜覆盖脱盐量(2个生长季盐分变化为4.71 mg/hm²和9.24 mg/hm²)远小于全膜覆盖处理(2个生长季盐分变化分别为12.22 mg/hm²和21.55 mg/hm²)。

1.2 咸水和微咸水滴灌对土壤水盐分布的影响 盐分离子含量的多少通常采用灌溉水矿化度表示,灌溉水矿化度影响土壤水盐运移特性。Rhoades等^[15]在FAO报告中指出,灌溉水矿化度为1.5~7.0 g/L的水为咸水,我国通常采用的微咸水矿化度为2.0~5.0 g/L^[16]。杨艳^[17]和王全九等^[18]研究发现,一定范围内,土壤入渗能力随灌溉水矿化度增大而增加,当灌溉水矿化度达到3.0~3.2 g/L时,入渗能力最大,之后土壤的入渗能力随灌溉水矿化度的增加而逐渐减弱。马东豪^[19]通过试验系统研究土壤水盐运移特征,比较了微咸水和淡水灌溉后的累积入渗量和湿润锋。结果表明,微咸水和淡水的入渗特征相似,累积入渗量、湿润锋与入渗时间都呈幂函数关系,累积入渗量与湿润锋呈线性关系。当灌溉水矿化度不大于3.0 g/L时,微咸水的累积入渗、湿润锋和入渗率都随着灌溉水矿化度而增加。另外,微咸水中的化学物质还可能与土壤溶液和固体颗粒作用,从而影响入渗特征。微咸水入渗过程中,随着灌溉水矿化度的增加,碱土的剖面含水量和含盐量都呈现增加趋势,但盐土的剖面含水量和含盐量并未随灌溉水矿化度变化而变化^[20]。

咸水和微咸水的离子组成影响入渗特征。通常采用灌溉水钠吸附比(灌溉水中的钠离子同钙、镁离子浓度平均值的平方根的比值)来描述微咸水主要离子组成。一般而言,钠离子的存在会导致土壤颗粒收缩、胶体颗粒膨胀和分散,使得土壤孔隙减少,土壤渗透性变差^[21]。Oster等^[22]和Murtaza等^[23]研究发现,随着灌溉水钠吸附比增加,入渗率逐渐减小。吴忠东等^[24]通过试验比较不同灌溉水钠吸附比条件下的微咸水入渗过程,发现当土壤初始含水率和灌溉水矿化度一定时,累积入渗量和湿润锋都随灌溉水钠吸附比的增加而减小。

1.3 土壤质地对水盐分布的影响 其他条件相同时,随着土壤黏粒和粉粒含量的增大,土壤盐分含量增大,而随着砂粒含量的增大,土壤盐分含量减小,这是因为土壤中黏粒和粉粒表面积较大,是土壤的活性组成部分,而砂粒相对不活泼^[25]。陈丽娟等^[26]通过试验研究黏土夹层对微咸水入渗规律的影响。结果表明,如果土壤中含有黏粒含量较高的土层,则易发生盐分积累,黏土夹层有限制盐分运移的作用。胡宏昌等^[25]通过分析比较新疆膜下滴灌试验田中取得的563个土壤样本,发现土壤质地对表层土壤含盐量的影响更为显著,原因是表层土壤更容易受到水分入渗和蒸发等地表过程的综合影响。土壤表层覆砂影响盐分的表聚作用,宋日权等^[27]通过试验研究覆砂对土壤入渗、潜水蒸发和土壤盐分迁移的影响,发现砂层能显著地抑制潜水蒸发或是入渗后潜水蒸发,从而降低盐分表聚作用。

1.4 灌溉方式对土壤水盐分布的影响 灌溉制度影响土壤水盐分布, 不同的土壤含水率控制下限条件下土壤盐分分布结果差异明显。当采用较高的土壤含水率作为控制下限, 滴灌频率较高, 根系周围的土壤含水率和基质势维持在较高水平, 弥补了由于土壤中盐分过高而降低的渗透势, 使得作物根系容易吸水。孙贯芳等^[28]通过两年田间试验研究膜下滴灌条件下, 不同灌溉制度(土壤基质势下限分别为: -10、-20、-30和-40 kPa)对河套灌区水热盐运移的影响, 4个处理分别灌水17、15、12和9次。结果表明, 灌水下限-10 kPa处理可有效淋滤0~100 cm土壤盐分, 而其他处理的淋滤作用不明显。谭军利等^[29]在宁夏青铜峡的研究也发现, 当位于滴头正下方20 cm处的土壤基质势为-10 kPa时, 随着种植年限的增加, 0~40 cm土层中的土壤盐分含量、盐离子组成含量, 以及土壤的pH值均降低。

咸淡水交替灌溉影响各层土壤盐分含量。刘小媛等^[30]通过试验研究咸淡水间歇组合灌溉对土壤水盐运移特性的影响, 发现咸淡水间歇组合灌溉土壤脱盐率与淡水灌溉对照比较差异较小, 但明显高于微咸水直接灌溉。朱成立等^[31]比较了不同咸淡水交替组合灌溉对土壤盐分分布的影响, 发现灌溉水矿化度一定时, 同一深度土壤盐分含量由小到大依次为“咸淡淡”“淡咸淡”“淡淡咸”。

李瑞平^[32]基于田间实测资料, 对多年土壤冻融期间水分、盐分和温度的变化资料进行分析。结果表明, 土壤温度的变化比气温变化滞后。当气温升高, 表层土壤温度上升到0℃, 表层冻结土壤开始融化, 冻结锋面逐渐向下发展, 直至全部融通。融通过程影响土壤水分和盐分的迁移。另外, 也有研究在冬季抽提当地高矿化度地下咸水对盐碱地进行灌溉, 咸水在冬季低温作用下迅速冻结成冰, 春季咸水冰层融化过程中, 咸淡水分离入渗, 其中先融化的高矿化度咸水先入渗, 而后融化出的低矿化度微咸水和淡水的入渗对土壤盐分具有较好的淋洗作用, 实现了春季土壤返盐期的土壤脱盐^[33]。

1.5 连续滴灌对农田盐分累积的影响 胡宏昌等^[34]基于在新疆巴州库尔勒市连续5年的试验(2008—2013), 分析15 000余个土壤样本的水盐观测化验结果, 发现膜下滴灌生育期整个土壤剖面内, 盐分在出苗期明显累积, 在滴灌期轻微累积、收获期反常下降、非生育期强烈返盐, 无淋洗灌水下全年盐分累积14%。Zheng等^[35]在新疆南疆喀什(平均降雨量为46.5 mm)开展膜下滴灌棉田实验, 也发现土壤盐分滴灌前期升高, 滴灌期下降, 生育期存在轻微洗盐, 同时还指出地形和气候条件是土壤盐分空间变异的主要来源。Wang等^[36]在新疆北疆克拉玛依重度盐碱地开展了3年的淡水膜下滴灌种植试验, 检测结果显示, 试验后盐碱地得到改良, 1.1 m深度范围内的盐分降低明显, 低至初始剖面的21%~74%(灌水量300~700 mm)。每年生育期土壤盐分基本都处于淋洗状态, 并在滴头下形成明显的脱盐区, 灌溉水量的多少和土壤盐碱化程度决定淋洗效果, 灌水量越大, 土壤盐分含量越高, 淋洗比例越高, 生育期盐分降幅最高可达61%。

影响盐分长期累积规律的因素很多, 水质条件、土壤盐分空间异质性、灌溉方式和耕作情况等因素都会影响盐分的累积, 在复杂条件的共同作用下, 还可能导致不同的累积结果。Kang等^[37]在新疆克拉玛依农场开展棉花滴灌试验, 结果表明, 淡水膜下滴灌不会造成棉田土壤盐分累积, 当灌水量较大时, 灌后0~40 cm深度范围内的盐分明显降低。Kang等^[38]采用电导率为1.7 dS/m至10.9 dS/m范围内5个处理进行滴灌试验, 结果表明, 各处理均会造成土壤盐分的累积, 累积量随灌溉水矿化度增加而增大。Chen等^[39]在新疆北疆石河子开展了3年膜下滴灌棉田实验, 结果发现采用中等盐度($EC=3.6$ dS/m)和高盐度水($EC=6.7$ dS/m)灌溉时, 1 m土层内盐分分别增大为初始剖面的336%和547%。但是李明思等^[40]通过分析采用膜下滴灌技术13年的农田土壤盐分演变特征, 发现在合理的灌溉水质和灌溉制度条件下, 膜下滴灌技术使用年限的延长不会导致盐分积累加重, 膜下滴灌并非造成土壤次生盐碱化的主要原因。

针对滴灌条件下农田水盐运移问题的研究初步揭示了滴灌条件下的土壤水盐运移特征, 滴灌时土壤盐分水平方向上在湿润层外围累积, 垂直方向上在根系层底部累积, 在缺乏淋洗水量的条件下将导致农田“自上而下”的盐碱化。灌溉水矿化度、土壤质地和灌溉方式等因素都不同程度地影响土壤水盐分布。然而, 现有的研究成果多局限于特定的试验条件, 当气候条件、地下水位、作物类

型、灌溉制度等因素发生变化时，土壤中水盐分布规律可能呈现出不同特点。因此需要进一步开展系统研究，揭示不同条件下滴灌农田土壤水盐运移和累积特征。

2 滴灌条件下作物水盐响应研究

滴灌技术可以提高作物的水分生产效率，与畦灌或漫灌相比，滴灌和膜下滴灌的水分利用效率更高。胡宏昌等^[41]对比发现，相同试验条件下，漫灌的水分利用效率为 0.22 kg/m^3 ，而膜下滴灌的效率可以达到 0.68 kg/m^3 。原因是滴灌水分到达的深度较浅，当作物根系也分布在地表 40 cm 的范围内时，作物水分的利用效率较高。另外，地膜的保温保墒作用也进一步促进了土壤水分的利用。

在我国干旱地区，滴灌技术提高了作物的产量。Hou等^[11]在甘肃研究了膜下滴灌番茄的产量与覆膜时间长短的关系，试验结果表明，植株叶面积、干物质、产量和水分利用效率等在覆膜后都有较大提高。胡宏昌等^[41]的研究发现，膜下滴灌条件下根系更为发达，滴灌条件下棉花根系总量是漫灌条件下的 1.6 倍。膜下滴灌条件下，适宜的灌水方式可以获得较高产量。张琼等^[42]通过试验研究当土壤含盐量不同时(0.08% 、 0.8%)，棉花膜下滴灌灌溉周期(2 d 、 6 d)对土壤水盐运动和棉花生长的影响。结果发现：当总灌水量一定时，高含盐量土壤花铃期高频灌溉与低频灌溉相比，可以有效降低土壤湿润体内盐分含量，达到棉花增产 28% 的效果。

采用咸水滴灌时，土壤积盐加重。土壤盐分通过影响作物的生理生化进程来影响产量品质。盐分胁迫对不同作物的影响不同，胁迫过重降低作物的产量，不超过一定阈值的咸水灌溉可以提高某些作物的品质。研究表明，对于大豆、小麦、番茄、黄瓜等作物，当盐分胁迫加重时，种子萌发和出苗率都受到明显抑制，作物根长、生物量和干物质等指标也都显著下降^[43]。当盐分不超过作物的耐受阈值，低浓度咸水灌溉不会导致作物严重减产，还可以提高果实中可溶性糖和有机酸含量，改善某些作物的品质。以玉米为例，灌溉水盐分浓度 3 g/L 为玉米幼苗耐盐上限，灌水浓度低于此值时，幼苗生长正常，高于此值时，幼苗生长受到明显的抑制^[44]。另外，作物遭受盐分胁迫的程度还与土壤水分有关。适宜的土壤含水量可以提高作物的耐盐能力。研究表明，当土壤含水量为田间持水量的 60% 时，小麦在土壤盐分较高时仍能全部出苗^[45]。

滴灌技术提高了作物水分生产效率和作物产量，然而，当采用咸水或微咸水灌溉时，土壤积盐加重，易对作物产生盐分胁迫。目前，作物盐胁迫下的影响机制研究仍然不够透彻，且缺乏微咸水灌溉对土壤理化特征影响的定量研究，人们对作物对土壤水盐的耦合响应问题的认识还远不能满足指导生产实践的需求。

3 滴灌土壤水盐运移数值模拟研究

滴灌土壤水盐运移数值模拟研究基于一般水盐运移模型而发展。Darcy通过饱和砂层的渗透试验，得出通量(渗透流速)和水力梯度成正比的达西定律^[46]。Richards^[47]基于达西定律，建立了多孔介质中非饱和水流运动的基本方程。在土壤水分运移方程的基础上，Lapidus等^[48]将一个与对流扩散方程类似的模拟模型应用于溶质运移问题。此后，国内外学者提出了大量的适用于不同条件的土壤溶质运移模型。概括起来主要为几何模型、对流-弥散模型和随机模型三类^[49]。同时开发了水分和溶质运移模拟软件。目前广泛应用的模型及软件多数为发达国家研究人员所开发，包括HYDRUS系列模型、可变饱和和二维流动与物质运移的VS2DT系列模型、描述冻融土壤水热盐运移规律的SHAW模型等^[32,50-53]。其中，HYDRUS数值模型能够较好的模拟田间点源交汇条件下的水盐分布^[53]。李显徽等^[54-55]应用HYDRUS软件，模拟淋洗压盐条件下暗管排水区域内的土壤水盐运移过程，模拟结果可以为膜下滴灌棉田的盐碱治理提供参考。

近些年来，我国学者提出了可用于地表和地下滴灌条件下的土壤水分、盐分运动模拟的数值模型。针对田间复杂条件下土壤水分运动，高龙^[5]建立了TIVS模型(Tsinghua Integrated Variably Saturat-

ed soil water movement model), 模型改进了地表积水动边界的处理方法^[56-57], 既保证模拟精度, 又提高了计算效率, 在膜下滴灌等条件下取得了较好的模拟效果。在模型的应用过程中, 还增加了地表能量过程模块和土壤含冰量模块, 同时增加了对地表径流过程的描述以扩展模型在水文过程研究中的应用, 改进了TIVS模型。刘晓英等^[58]采用柱坐标二维Richards方程描述地表滴灌条件下土壤水分运动, 采用ADI法和Newton-Raphson法联合运用求解数学模型, 通过室内不同滴头流量下的实测数据进行验证, 发现湿润锋在垂直方向上的吻合程度比在水平方向上要好, 且滴头流量较小时吻合较好。冯绍元等^[59]建立了温室地表滴灌剖面二维土壤水分运动的数学模型, 并在其中加入了对根系吸水过程的描述。

目前, 国内外针对土壤中水盐运移模拟问题展开了大量研究, 并开发了一系列水分和溶质运移模拟软件。我国应用已有国际机构软件展开研究的较多, 而自主开发模型软件相对较少。实际上, 现有软件针对不同滴灌条件下, 土壤盐分运移模拟的适用性方面仍有较多局限性。另外, 计算效率、准确性、模型参数库等方面也还有较大的改善空间。

4 土壤水盐调控方法

4.1 调整耕作方式 调整农业耕作方式可以降低土壤盐碱化程度。将土地进行平整, 深耕晒垡, 采用客土抬高地面、微区改地、整地的方式, 可以改善土壤盐碱化状况。另外, 地表覆盖也是较为有效的控盐措施, 覆膜、秸秆覆盖等地表覆盖措施能有效抑制盐分在表层土壤的累积。郑九华等^[60]和Pang等^[61]分别开展了秸秆覆盖条件下微咸水灌溉对棉花和冬小麦-夏玉米产量及土壤质量的研究, 发现秸秆覆盖对棉花的生长有促进作用, 秸秆覆盖有效地抑制了土壤盐分的积累。宋日权等^[27]研究了覆砂对土壤盐分累积的影响, 结果表明覆砂能有效抑制盐分在表层土壤的累积, 砂厚达到1.7 cm即有显著效果, 但应用时需要考虑覆砂对土壤的净入渗能力的抑制作用。

4.2 调整灌排方式 适宜的灌溉制度和灌水方式可以有效防止土壤盐碱化。以往的研究成果表明, 采用土壤基质势控制下限为-10 kPa的处理, 更利于洗盐^[28-29]; 对于频繁使用咸水灌溉的地区, 为了淋洗土壤中的盐分, 降低土壤溶液的浓度, 可适当增加灌水定额, 并采用轮灌方式, 另外, 初次灌水后逐步增加每次灌水水量, 可以有效增加脱盐效果^[62]。

建设排水工程也是防止土壤盐碱化以及改良盐碱土的重要措施, 排水设施通过降低地下水位, 减少潜水蒸发, 来抑制土壤盐分的累积。常见的排水工程包括明沟排水、暗管排水和竖井排水^[63]。明沟排水开挖简单, 适应性强, 但工程量大, 占地面积大, 不易维护; 暗管地下水排的快, 降的深, 占地小, 但施工技术要求高, 一次性投资较高; 竖井排水效果好, 地下水位降深大, 但需要消耗能源, 运行费用高。近年来, 国内外对暗管排水关注较多, 研究表明, 暗管排水措施可以增加排水、排盐量, 加速土体脱盐, 提高盐碱土淋洗改良效率^[64]。

4.3 改进淋洗方式 土壤盐分变化与非生育期的盐分淋洗密切相关。在长期的盐碱化治理过程中, 总结出耕地土壤盐分具有“盐随水来, 盐随水去; 盐随水聚, 水散盐存”的基本运行规律^[65]。Burt等^[66]在美国加州的开心果滴灌果园进行了盐分淋洗试验, 通过对淋洗根区盐分进行定量分析, 指出采用多行低流速滴灌带供水对盐分累积区域进行淋洗, 可以有效节约淋洗水量。Chen等^[39]基于ENVIRO-GRO模型, 对比了固定水量下非生育期漫灌和生育期膜下滴灌盐分淋洗的效果, 结果显示, 非生育期漫灌对土壤盐分的淋洗效果更好。Phocaides^[67]认为, 在年降水量小于250 mm的区域, 若采用微灌方式, 则需要进行一年一次的盐分集中淋洗。张治^[68]建议在生育期结束后集中灌溉洗盐。

有效利用不同季节特点, 可以加强盐分淋洗效果。钟瑞森^[69]发现冬灌的聚墒和洗盐效果均优于春灌, 采用冬灌作为灌溉洗盐的方式更有效。研究根据冻融条件下浅层土壤洗盐、返盐和积盐的特征, 指出以改良盐碱地为主要目的的冬灌可以实施两次灌水模式。第一次灌水主要用于洗盐, 将浅层(0~60 cm)土壤盐分淋洗到80 cm以下, 甚至地下水中; 第二次灌水使浅层土壤冻结速率加快并形成更厚的冻结层, 减少返盐量和积盐量。另外, 也有研究依据咸水结冰融化过程中咸淡水分离的基

本原理,对土壤盐分进行淋洗,实现春季土壤返盐期的土壤脱盐,结合春季地表覆盖抑盐措施和夏季降雨淋盐,土壤的低盐条件得到保持,从而保证作物整个生长期的正常生长^[33]。

覆膜滴灌条件下,利用地表洗盐排盐技术减少地表积盐。在干旱区强烈的水分蒸发作用下,水平方向上土壤水盐侧向迁移,向着作物生长行间裸露地表层积累。采用覆膜滴灌时,由于“隔膜效应”的存在,使得垂直方向上土壤水分蒸发减弱,进而增强土壤水分侧向运移,最终向作物生长行间裸露区域表层定向迁移^[70]。因此,可以在田间作物行间裸露区域铺设物理吸附材料,将沉淀的盐分吸附物回收经工厂处理再利用,形成土壤盐分资源化利用的模式。

4.4 采用生物及化学改良措施 生物措施通过种植耐盐碱作物,增加土壤有机质、提高土壤的透水和透气性,增强土壤保土保肥能力来达到改良盐碱地土壤的效果。依据以往的种植经验和研究结果,目前主要耐盐作物包括野生大豆、苜蓿、油菜、水稻、小麦和碱蓬等^[71-74]。任崑等^[75]通过试验发现,牧草和枸杞也可以提高土壤的脱盐效率。王全九等^[18]通过试验,发现小麦和油菜轮作种植可以有效抑制土壤盐分的表聚,有利于盐碱地土壤改良。

化学措施通过施用化学改良剂,改变土壤胶体吸附性离子的组成,从而改善土壤物理性质,增强土壤通透性,达到改善盐碱土壤的目的。目前使用的化学改良剂包括石灰、石膏、磷石膏、沸石、氯化钙、硫酸亚铁,硫磺、硫酸、腐殖酸和腐殖酸钙等^[43]。张余良等^[76]通过试验比较改良剂的作用,结果表明,磷石膏或磷石膏加沸石两种改良剂能够明显抑制微咸水对土壤水稳性团聚体的破坏,改良效果较好。刘易等^[77]采用禾康改良剂、DS1997固体改良剂、生物质碳、磷石膏和酸碱平衡剂对微咸水(灌溉水矿化度2~3 g/L)灌溉棉田土壤进行改良效果研究,结果表明,5种改良剂均能不同程度控制土壤pH值变化,降低土壤总盐含量,对比而言,磷石膏具有更好的盐碱改良效果。

调整耕作方式、灌排方式、淋洗方式以及生物化学改良措施都可以改良土壤,降低土壤盐碱化程度。然而单一的调控方式不能从根本上解决土壤盐碱化问题,不合理的措施甚至可能破坏农田生态平衡。因此,有必要开展农田生态工程建设,建立系统化和体系化的农田灌溉排水和区域盐分处置模式。

5 研究展望

滴灌技术在干旱区的应用,改变了农田水盐运移模式,导致农田土壤盐分累积出现新的特点,即由于地下水位下降,由潜水蒸发导致的“自下而上”盐碱化威胁大为降低,但由于缺乏淋洗水量,出现“自上而下”盐分累积的新危险。这种新特点要求我们进一步认识土壤水盐运移机理和作物响应规律,并提出新的农田水盐调控和区域盐分处置技术。根据对研究现状、趋势和实际需求分析,笔者认为亟需开展如下研究。

(1)进一步揭示滴灌条件下土壤水盐运移及累积特征,科学制定农田水盐调控方案。已有研究初步揭示了滴灌条件下的土壤水盐运移特征,譬如滴灌时土壤盐分在水平方向上累积在湿润层外围形成盐壳,垂直方向上在根系层底部累积,在缺乏淋洗水量的条件下将导致农田“自上而下”的盐碱化。但已有的研究成果多局限于特定的试验条件,在气候条件、地下水位、土壤质地、作物类型和灌溉制度等不同的条件下还难以直接推广已有规律,部分研究成果之间还存在矛盾之处,且尚有一些未能解释的现象(如膜下滴灌棉田收获期土壤盐分反常下降),因此需要进一步开展实验、模拟和理论分析研究,揭示不同条件下滴灌农田土壤水盐运移特别是长期累积特征。同时,需结合不同作物土壤盐分耐受阈值,在水盐累积规律基础上综合灌溉、淋洗、生物和化学改良等手段科学制定农田尺度水盐调控方案。

(2)进一步揭示作物水盐耦合响应动力学机制,科学确定调控阈值。作物对土壤水盐的耦合响应是进行亏缺灌溉和生长调控的关键,目前人们对该问题的认识还远不能满足生产实践的需求。亟需加强节水灌溉,尤其是微咸水灌溉与土壤盐碱化对作物影响差异的研究,提出微咸水灌溉条件下作物耐盐度指标和盐分胁迫系数的确定方法,进一步研究作物生长与产量对水盐胁迫耦合响应的动力

学机制。同时,定量研究微咸水灌溉对土壤理化特征的影响,建立盐分较高条件下的作物水盐生产函数,探求微咸水灌溉条件下作物节水抑盐高效的水盐环境的动态阈值。

(3)发展具有我国自主知识产权的水盐运移和作物生长耦合模拟软件。土壤水盐运移数值模型是研究灌溉制度和水盐调控措施的重要工具,但目前我国应用已有国际机构软件的较多,自主开发模型软件的较少。实际上,已有土壤水盐模型系统软件在计算效率、准确性、模型参数库方面还有较大发展空间,特别是在不同滴灌条件下的适应性仍亟待提高,这为我国学者发展自主知识产权软件、并在国际上推广应用提供了很好的机遇。可以在以下几个方面实现模型软件研发的跨越:①耦合水盐在土壤水和地下水中的运动。实现土壤水垂向运动和地下水水平向运动的耦合,可科学量化不同农业措施对区域水盐运移规律的影响;②模型参数库的构建。不同区域的土质、气候等条件不同,模型参数有很大差异,应基于大数据等新技术提供的条件,建立我国不同区域的水盐运移模型的参数库,提高模型的应用性并反过来促进模型的进一步发展完善;③耦合土壤水盐运移模型和作物生长模型。基于作物水盐响应研究成果,耦合土壤水盐运移模型和作物生长模型,建立土壤盐分条件和作物生长之间的有机联系,为综合制定土壤水盐调控和作物生长调控方案提供强有力的模拟工具。

(4)构建基于生态格局的农田排水和区域盐分处置模式。不合理灌溉会导致土壤盐碱化,土壤盐碱化影响作物的生长和品质,最终破坏农田生态平衡。因此,有必要开展农田生态工程建设,建立系统化和体系化的农田灌溉排水和区域盐分处置模式:①量化区域水盐运移的时空演化过程,增强区域节水抑盐协同调控;②建立与节水灌溉技术相适应的多途径排水、排盐的灌区布局及灌排体系,保证灌区水盐平衡;③结合不同地区的气候特征,采用多种技术手段,互相补充,最终实现调节盐碱地土壤水分、盐分季节性分配,使作物避开水分、盐分胁迫敏感期,作物与土壤水盐季节变化耦合,完成作物生命周期并形成产量,最后达到年内土壤积盐和排盐平衡。

参 考 文 献

- [1] 任朝霞, 杨达源. 近 50a 西北干旱区气候变化趋势研究[J]. 第四纪研究, 2006, 26(2): 299-300.
- [2] 陈亚宁, 杨青, 罗毅, 等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 1-9.
- [3] 刘静, 高占义. 中国利用微咸水灌溉研究与实践进展[J]. 水利水电技术, 2012, 43(1): 101-104.
- [4] 郑晓辉, 巴特儿·巴克, 李宏, 等. 不同灌水方式下干旱区盐碱地土壤水盐运移特征分析[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(5): 95-99.
- [5] 高龙. 干旱区棉花膜下滴灌土壤水盐调控试验和模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [6] 李毅, 王文焰, 王全九, 等. 非充分供水条件下滴灌入渗的水盐运移特征研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 1-4.
- [7] 王全九, 王文焰, 吕殿青, 等. 膜下滴灌盐碱地水盐运移特征研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 54-57.
- [8] 吕殿青, 王文焰, 王全九. 滴灌条件下土壤水盐运移特性的研究[J]. 水科学进展, 2001, 19(1): 107-112.
- [9] 张治, 田富强, 钟瑞森, 等. 新疆膜下滴灌棉田生育期地温变化规律[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 44-51.
- [10] 李毅, 邵明安. 新疆农田作物覆膜地温极值的时空变化[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2039-2044.
- [11] HOU X Y, WANG F X, HAN J J, et al. Duration of plastic mulch for potato growth under drip irrigation in an arid region of Northwest China[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2010, 150(1): 115-121.
- [12] 李明思, 康绍忠, 杨海梅. 地膜覆盖对滴灌土壤湿润区及棉花耗水与生长的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 49-54.
- [13] 张伟, 吕新, 李鲁华, 等. 新疆棉田膜下滴灌盐分运移规律[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 15-19.
- [14] 齐智娟, 冯浩, 张体彬, 等. 河套灌区不同覆膜方式膜下滴灌土壤盐分运移研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 301-308.
- [15] RHOADES J D, KANDIAH A, MASHALI A M. The Use of Saline Waters for Crop Production[M]. Rome:

- FAO, 1992.
- [16] 阮明艳. 咸水灌溉的应用及发展措施[J]. 新疆农垦经济, 2006(4): 66-68.
- [17] 杨艳. 土壤溶质运移特征实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- [18] 王全九, 毕远杰, 吴忠东. 微咸水灌溉技术与土壤水盐调控方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(5): 559-564.
- [19] 马东豪. 土壤水盐运移特征研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
- [20] 杨艳, 王全九. 微咸水入渗条件下碱土和盐土水盐运移特征分析[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 13-19.
- [21] 吴忠东, 王全九. 入渗水矿化度对土壤入渗特征和离子迁移特性的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 65-69, 75.
- [22] OSTER J D, SCHROER F W. Infiltration as influenced by irrigation water quality[J]. Soil Science Society of American Journal, 1979, 43(3): 444-447.
- [23] MURTAZA G, GHAFOR A, QADIR M. Irrigation and soil management strategies for using saline-sodic water in a cotton-wheat rotation[J]. Agricultural Water Management, 2006, 81(1/2): 98-114.
- [24] 吴忠东, 王全九. 微咸水钠吸附比对土壤理化性质和入渗特性的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 231-236.
- [25] 胡宏昌, 田富强, 胡和平. 新疆膜下滴灌土壤粒径分布及与水盐含量的关系[J]. 中国科学(技术科学), 2011(8): 13-20.
- [26] 陈丽娟, 冯起, 王昱, 等. 微咸水灌溉条件下含黏土夹层土壤的水盐运移规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 44-51.
- [27] 宋日权, 褚贵新, 张瑞喜, 等. 覆砂对土壤入渗、蒸发和盐分迁移的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(2): 282-288.
- [28] 孙贯芳, 屈忠义, 杜斌, 等. 不同灌溉制度下河套灌区玉米膜下滴灌水热盐运移规律[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 144-152.
- [29] 谭军利, 康跃虎, 焦艳平, 等. 不同种植年限覆膜滴灌盐碱地土壤盐分离子分布特征[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 59-63.
- [30] 刘小媛, 高佩玲, 杨大明, 等. 咸淡水间歇组合灌溉对盐碱耕地土壤水盐运移特性的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1404-1413.
- [31] 朱成立, 舒慕晨, 张展羽, 等. 咸淡水交替灌溉对土壤盐分分布及夏玉米生长的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 220-228.
- [32] 李瑞平. 冻融土壤水热盐运移规律及其SHAW模型模拟研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.
- [33] 郭凯, 巨兆强, 封晓辉, 等. 咸水结冰灌溉改良盐碱地的研究进展及展望[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 1016-1024.
- [34] 胡宏昌, 田富强, 张治, 等. 干旱区膜下滴灌农田土壤盐分非生育期淋洗和多年动态[J]. 水利学报, 2015, 46(9): 1037-1046.
- [35] ZHENG Z, ZHANG F, MA F, et al. Spatiotemporal changes in soil salinity in a drip-irrigated field[J]. Geoderma, 2009, 149(3): 243-248.
- [36] WANG R, KANG Y, WAN S, et al. Salt distribution and the growth of cotton under different drip irrigation regimes in a saline area[J]. Agricultural Water Management, 2011, 99(1): 58-69.
- [37] KANG Y, WANG R, WAN S, et al. Effects of different water levels on cotton growth and water use through drip irrigation in an arid region with saline ground water of Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2012(109): 117-126.
- [38] KANG Y H, MING C, WAN S Q. Effects of drip irrigation with saline water on waxy maize (*Zea mays* L. var. *ceratina* Kulesh) in North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(9): 1303-1309.
- [39] CHEN W, HOU Z, WU L, et al. Evaluating salinity distribution in soil irrigated with saline water in arid regions of northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(12): 2001-2008.
- [40] 李明思, 刘洪光, 郑旭荣. 长期膜下滴灌农田土壤盐分时空变化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 82-87.
- [41] 胡宏昌, 张治, 田富强, 等. 新疆绿洲棉田盐分及作物生长对灌溉方式的响应[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(4): 373-380.

- [42] 张琼, 李光永, 柴付军. 棉花膜下滴灌条件下灌水频率对土壤水盐分布和棉花生长的影响[J]. 水利学报, 2004(9): 123-126.
- [43] 王全九, 单鱼洋. 微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 117-126.
- [44] 张展羽, 郭相平. 微咸水灌溉对苗期玉米生长和生理性状的影响[J]. 灌溉排水学报, 1999(1): 18-22.
- [45] 冯广龙, 罗远培, 杨培岭, 等. 土壤水分对冬小麦初生根、次生根生长发育的影响[J]. 作物学报, 1998, 24(6): 698-704.
- [46] 雷志栋. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [47] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. Physics, 1931, 1(5): 318-333.
- [48] LAPIDUS L, AMUNDSON N R. Mathematics of adsorption in beds. VI. The effect of longitudinal diffusion in ion exchange and chromatographic columns[J]. The Journal of Physical Chemistry, 1952, 56(8): 984-988.
- [49] 吕岁菊, 李春光. 土壤水-盐运移规律数值模拟研究综述[J]. 农业科学研究, 2005, 26(1): 80-84.
- [50] ŠIMUNEK J, van GENUCHTEN M T. Modeling nonequilibrium flow and transport processes using HYDRUS[J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(2): 782-797.
- [51] ŠIMUNEK J, van GENUCHTEN M T, ŠEJNA M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages[J]. Vadose Zone Journal, 2016, 15(7): 25-33.
- [52] HEALY R W, RONAN A D. Documentation of computer program VS2DH for simulation of energy transport in variably saturated porous media: Modification of the US Geological Survey's computer program VS2DT[M]. US Department of the Interior, US Geological Survey, 1996.
- [53] 单鱼洋. 干旱区膜下滴灌水盐运移规律模拟及预测研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2012.
- [54] 李显激, 左强, 石建初, 等. 新疆膜下滴灌棉田暗管排盐的数值模拟与分析 I: 模型与参数验证[J]. 水利学报, 2016, 47(4): 537-544.
- [55] 李显激, 左强, 石建初, 等. 新疆膜下滴灌棉田暗管排盐的数值模拟与分析 II: 模型应用[J]. 水利学报, 2016, 47(5): 616-625.
- [56] LAFOLIE F, GUENNELON F, van GENUCHTEN M T. Analysis of water flow under trickle irrigation: I. Theory and numerical solution[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1989, 53(5): 1310-1318.
- [57] BRANDT A, BRESLER E, DINER N, et al. Infiltration, from a trickle source: I. Mathematical model[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1971, 35(5): 675-682.
- [58] 刘晓英, 杨振刚, 王天俊. 滴灌条件下土壤水分运动规律的研究[J]. 水利学报, 1990(1): 11-22.
- [59] 冯绍元, 丁跃元, 曾向辉. 温室滴灌线源土壤水分运动数值模拟[J]. 水利学报, 2001(2): 59-63.
- [60] 郑九华, 冯永军, 于开芹, 等. 秸秆覆盖条件下微咸水灌溉棉花试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 26-31.
- [61] PANG H C, LI Y Y, YANG J S, et al. Effect of brackish water irrigation and straw mulching on soil salinity and crop yields under monsoonal climatic conditions [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97 (12): 1971-1977.
- [62] 徐存东, 聂俊坤, 刘辉, 等. 干旱灌区灌水方式对田间土壤脱盐效果的模拟研究[J]. 节水灌溉, 2015(8): 67-70.
- [63] 胡骏文. 明沟·暗管·竖井—盐碱地的几种排水措施[J]. 农业工程学报, 1984(4): 14-15.
- [64] 李广波, 李学森, 迟道才. 国内外暗管排水的发展现状与动态[J]. 农业与技术, 2003, 34(2): 312-316.
- [65] 林成谷. 土壤学: 北方本[M]. 北京: 农业出版社, 1983.
- [66] BURT C M, ISBELL B, BURT L. Long-term salinity buildup on drip/micro irrigated trees in California[C]//IA Technical Conference in San Diego, California, 2003.
- [67] PHOCAIDES A. Handbook on Pressurized Irrigation Techniques[M]. Food & Agriculture Org., 2007.
- [68] 张治. 绿洲膜下滴灌农田水盐运移及动态关系研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [69] 钟瑞森. 南疆膜下滴灌棉田水热盐调控措施研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [70] 周和平, 王少丽, 姚新华, 等. 膜下滴灌土壤水盐定向迁移分布特征及排盐效应研究[J]. 水利学报, 2013, 44(11): 1380-1388.
- [71] 武春霞, 杨跃, 杨静慧, 等. 盐胁迫下3种耐盐植物的种子萌发和生长及其耐盐性研究[J]. 安徽农业科

- 学, 2008, 36(10): 3968-3969.
- [72] 王建飞, 陈宏友, 杨庆利, 等. 盐胁迫浓度和胁迫时的温度对水稻耐盐性的影响[J]. 中国水稻科学, 2004, 18(5): 449-454.
- [73] 陈宗金. 小麦等农作物种质资源耐盐性研究[D]. 北京: 南京农业大学, 2012.
- [74] 黄欢. 盐地碱蓬甜菜红素的积累及其耐盐性研究[D]. 南京: 中国科学院大学, 2015.
- [75] 任崑, 罗廷彬, 王宝军, 等. 新疆生物改良盐碱地效益研究[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(4): 211-214.
- [76] 张余良, 陆文龙, 张伟, 等. 长期微咸水灌溉对耕地土壤理化性状的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 969-973.
- [77] 刘易, 冯耀祖, 黄建, 等. 微咸水灌溉条件下施用不同改良剂对盐渍化土壤盐分离子分布的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1): 146-152.

Review on water and salt transport and regulation in drip irrigated fields in arid regions

TIAN Fuqiang, WEN Jie, HU Hongchang, NI Guangheng

(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Drip irrigation, one of advanced water-saving irrigation technologies, has been widely applied in the arid regions of China. It can enhance the efficient use of water and fertilizer and therefore increases crop yield. However, it also changes the distribution and accumulation pattern of salt. On one hand, the phreatic evaporation can be reduced due to dropping down of groundwater table and thus soil salinization is alleviated. On the other hand, few water is applied with irrigation and thus salt tends to accumulate in the surface soil layer due to lack of leaching water. To address this emerging issue of soil salinization, an attempt was made in this paper to rigorously review: (1) water and salt migration and especially soil salt accumulation under drip irrigation, (2) features of crop responses to water and salt stress, (3) numerical models of soil water and salt movement, and (4) measures for soil water and salt regulation. Based on the extensive literature review, several research tasks associated with drip irrigation were identified: (1) to further explore characteristics of water and salt migration and accumulation and to develop sustainable operation schemes for field water and salt management under varied climatic and geologic settings, (2) to explore coupled responses to water and salt stress for different crops and corresponding threshold values for management, (3) to develop the numerical software for coupled water/salt movement and crop growth, and (4) to develop ecological pattern based modes on farmland drainage and regional salinity disposal.

Keywords: drip irrigation; water-salt transport; simulation model; crop response; regulation

(责任编辑: 祁 伟)