

干旱区土壤盐分积累过程研究进展

刘丽娟^{1,2} 李小玉^{1,2*}

(¹浙江农林大学林业与生物技术学院, 杭州 311300; ²中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要 中国干旱区盐碱化土壤面积大,分布广,盐碱化作为土壤退化的一个重要方面,已严重影响了农业经济的可持续发展。中国作为土壤盐碱化危害最严重的国家之一,盐分的聚积及影响一直是干旱区研究的热点问题,全面开展土壤盐碱化的防治任重而道远。本文在分析干旱区土壤盐碱化的监测技术与方法的基础上,从土地利用、灌溉方式、自然环境因子等3个方面,综述了土壤盐分积累与运移过程及其影响因素,并认为:在盐碱化土地改良方面,应综合考虑各灌区的不同因素,探求既环保又经济的最佳组合改良模式;而在耐盐植物的筛选方面,应加强培育高效的土壤盐分改良植物。针对土壤盐分运移过程,提出了在流域或景观尺度上研究绿洲盐分运移过程的展望,以期于干旱区土壤盐碱化的防治和管理提供参考。

关键词 盐碱化; 监测技术; 土地利用; 灌溉方式; 土壤盐分; 干旱区

Progress in the study of soil salt accumulation in arid region. LIU Li-juan^{1,2}, LI Xiao-yu^{1,2*}

(¹*School of Forestry and Bio-technology, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China;*

²*Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China).*

Abstract: Soil salinization land is widely distributed in the dry regions of China. Salinization, as one of the main aspects of soil degradation, has important impact on the sustainable development of agriculture. As one of the countries most seriously threatened by salinization, China needs to pay more attention to the prevention and control of soil salinization. We summarized the technologies and methods of soil salinization monitoring, and analyzed the effects of land use, irrigation, and natural environmental factors on soil salt accumulation and migration processes. In the aspect of prevention and control of soil salinization, we should comprehensively consider the different factors in each irrigation basin and explore the best combination model to improve salinized soil at the balance of environmental protection and economic cost. Furthermore, we should strengthen screening and cultivation of more suitable and efficient salt-tolerant plants. We proposed the future research directions of salt transport processes at river basin or landscape scale, to provide reference for the prevention and management of soil salinization in arid regions.

Key words: salinization; monitoring technology; land use; irrigation mode; soil salt; arid region.

盐碱化是中国干旱区土壤退化的典型特征之一,分布广,面积大,严重制约着干旱区农业的可持续发展(罗毅,2014)。受气候变化和人类活动的影响,由盐渍化导致的土壤退化已对粮食生产和土地安全等产生了影响,全球每年约 $10 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 的灌溉耕地因土壤盐碱化问题而被弃耕(Shahid *et al.*,

2013)。干旱地区降水稀少、蒸发强烈,土壤中可溶性盐分随水分运移到地表并累积,形成大面积盐碱化区域(Gregorich *et al.*, 1997; Metternicht *et al.*, 2009),成为了制约干旱区农业发展的主要障碍(Masoud *et al.*, 2006),也是影响绿洲生态系统稳定性的重要因素(罗毅,2014),同时,次生盐碱化也是导致干旱区土地沙化的重要因素之一(Vlek *et al.*, 2008)。由于干旱区内陆河流域的封闭环境,大量的盐分在土壤内循环,无法移出盆地,随着大量平原

国家自然科学基金项目(41501205, U150310132, 31470708, 41271202)资助。

收稿日期: 2018-05-31 接受日期: 2018-11-28

* 通讯作者 E-mail: lixy76@163.com

水库的修建和人工渠网的建成,使原流入尾间湖的大量河水被完全截流到平原绿洲灌溉区,改变了河流携带物沉积过程,原来被带入到尾间湖泊中的大量盐分随灌溉引水被截留在绿洲灌溉区内,残余积盐和现代积盐过程都十分强烈(肖笃宁等,2006;董新光等,2007;侯振安等,2013;Wang *et al.*, 2018)。干旱区由于其特殊的地理特征和环境条件,盐分的聚积及其影响一直是内陆河流域的热点问题(石玉林等,2013),且随着水土资源开发利用强度的不断增加,其对绿洲生产力和稳定性的影响日益强烈,土壤盐渍化已成为威胁绿洲生态安全和经济发展的的重要因素(刘广明等,2011;石玉林等,2013),从而更加地突出了全面认识干旱区盐分聚积过程的必要性和紧迫性(王涛,2009)。

本文在分析干旱区土壤盐碱化的监测技术与方法的基础上,从土地利用、灌溉方式、自然环境因子等3个方面综述了土壤盐分积累与运移过程及其影响因素,并针对土壤盐分运移过程,提出了在流域或景观尺度上深入土壤盐碱化研究的展望,以期为干旱区土壤盐碱化的防治和管理提供参考。

1 土壤盐分的监测技术与方法

目前,土壤盐分的监测主要有传统的土壤采样法、电磁感应技术监测和高光谱遥感反演等。传统的野外定点采样法,费时、费力,并且破坏性比较强,涉及范围较窄,所采样本有限,难以满足快速、动态地获取大面积土壤盐分信息的要求,在很大程度上限制了大空间尺度的盐分估算。

电磁感应方法是在不接触土壤的情况下,通过调整电磁感应装置与地面的距离,可以对不同深度及不同体积的土壤电导率进行测量。适用于大面积土壤盐分监测评估,所测量值可消除土壤的不均匀性,由于其测量过程的非侵入性,使其更适合在干旱及石质土壤中进行测量(刘广明等,2003;刘梅先等,2011)。但其测量结果是不同深度土层电导率的加权值,并非简单平均值,因此其反演、校正过程较为复杂(张顺等,2014)。

高光谱遥感反演技术凭借其波段多且连续、信息丰富、定量反演精度高等显著优点,很好地克服了传统人工地面监测方法的不足,已成为监测大尺度土壤表层盐分的主要手段,是目前进行土壤盐碱化监测较为理想的手段(Metternicht *et al.*, 2003;彭杰等,2014),其可借助多源、多时相的高光谱数据对

盐碱化较为严重的区域进行高效监测(Weng *et al.*, 2010),土壤光谱微分变换与土壤盐分含量相关性较强的波段主要集中在可见光波段、1930~1940 nm、2010~2030 nm 和 2360~2410 nm 波段范围(张建明等,2013)。但由于高光谱遥感监测中,地表植被、区域水分、有机质、土壤类型等都会对光谱的反射造成干扰,使得监测结果较难达到精确水平(李建国等,2012)。如何去除植被等其他要素对光谱的影响已成为目前高光谱遥感盐分反演亟需解决的问题(扶卿华等,2007;李建国等,2012)。如Ma等(2018)基于经验模态分解法,将地表温度、蒸散发、降水和数字高程模型(DEM)等作为遥感环境变量,模拟分析了新疆准噶尔盆地的土壤盐分与环境因子的相互关系;Gorji等(2017)基于多时相Landset遥感数据,通过建立实测电导率和遥感盐分指数的相关性,分析了土耳其1990—2015年的土壤盐分的时空变化;张贤龙等(2018)运用倒数、导数、对数等15种光谱变换对土壤含盐量进行反演,并利用原始光谱的波段反射率构造光谱指数对土壤盐分进行建模,发现一阶微分和一阶对倒数变换下土壤盐分估算模型的精度较高。尽管大量研究采用遥感影像反演方法或电磁感应技术在大尺度上评估区域土壤盐分,但在评估机理上并未考虑影响土壤盐分的各种因素,如地形、温度、地下水位、地下水矿化度、植被等,并且主要是针对土壤表层盐分进行解析。随着空间统计学理论的发展和完善,将地面实测方法与电磁感应和高光谱遥感反演等技术相结合,综合考虑引起土壤盐分的结构性因素(气候、地下水位、地下水矿化度、地形、植被等)和随机性因素(耕作、施肥、灌溉等),对区域土壤盐分从表层到剖面进行更精确的评估,已成为近年来农业水土资源研究的新趋势(刘梅先等,2011;姚远等,2014;吴亚坤等,2015)。

2 干旱区土壤盐分积累与运移过程的影响因素

2.1 土地利用对土壤盐分积累的影响

干旱区不同的土地利用类型会形成不同的盐分分布和迁移特征(Jayawickreme *et al.*, 2011;罗毅, 2014)。如贡璐等(2013)研究了塔里木河上游阿拉尔垦区不同土地利用类型的土壤表层盐分,发现该区域盐分表层聚集特征明显,表层盐分含量($52.93 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)远大于心土层和底土层,不同土地利用类型的表层盐分含量依次为:盐碱地>天然林>人工

林>荒草地>撂荒地>耕地>新开耕地。周丽等(2013)以新疆三工河流域原生盐碱荒地和开垦耕地为研究对象,发现开垦显著降低了0~50 cm土壤的可溶性盐含量,开垦达100 a以上的老耕地可溶性盐含量($2.31 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)仅为原生盐碱荒地($26.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的11%。郑琦等(2016)分析了新疆玛纳斯河流域4种土地利用类型的盐分含量,发现不同的土地利用类型下的土壤含盐量差异显著:荒地>林地>草地>耕地,且未开垦的荒地土壤含盐量远高于其他3种土地利用类型,表明开垦等人为因素对土壤盐分的影响具有明显的时间效应。

土地利用模型和盐分累计过程的结合,为在更大尺度上揭示干旱区盐碱化过程提供好了有力的手段。Sivapalan等(1996a, 1996b, 1996c)通过水盐平衡理论分别基于小流域水平衡模型、水盐平衡耦合模型和大流域模型较早地模拟分析了土地利用变化对流域盐分运移过程的影响,认为土地利用的变化会增加流域径流的盐分输移,进而提高下游水系灌溉、生活用水的含盐量,增加下游土壤盐碱化的风险;而且,土地利用与土壤盐碱化的互馈耦合关系具有极强的尺度依耐性,但这种尺度效应的转化规律还需进一步的量化研究。Greiner(1997)在澳大利亚的干旱区平原,基于多因素综合模拟了土地利用和农田管理对流域土壤盐碱化的影响,并通过不同农田管理模式和土壤盐碱化的情景分析,提出了控制土壤盐碱化的最优管理策略。Zhou等(2012)通过元胞自动机-马尔科夫模型(CA-Markov model)将土地利用变化和盐碱化过程结合,分析和预测了盐碱化土壤的时空变化格局,可为流域土壤盐碱化管理提供简洁清晰的科学依据。Wang等(2012)通过绿洲土地利用变化和土壤盐分含量的时空叠加分析,表明在绿洲-荒漠交错带随着新垦耕地的增加,土壤盐分积累呈加重趋势。

在土壤盐碱化与人类活动关系的量化研究方面,探索性数据分析法不失为一种有效的视角,如Salvati等(2015)通过该方法研究了122个社会经济因子与土壤盐碱化的关系,并将其归纳为6个类型,并分别量化了其对区域土壤盐碱化的贡献,为从社会经济和人类活动的角度理解土壤盐碱化过程提供了新的思路。

对不同尺度下土壤盐分空间变异特征的量化,是诊断和防治土壤盐渍化的基础。如银川平原土壤盐分含量高的区域主要集中平原北部的局部地区,

且呈明显的从中心向四周扩展的分布格局,0~120 cm土层盐分的空间相关距离为20~28 km(张源沛等,2009);塔里木河下游表层土壤盐分整体上呈现出条带状的分布格局,沿着河流走向,表层土壤盐分“两头高,中间低”,从河流横向看,离河道越远,盐分越低(杨红梅等,2010);新疆于田绿洲土壤表层盐分在空间上并非随机分布,而是存在较强的空间依赖关系,空间自相关指数为0.479,总体呈现出西北高、东南低的格局,地下水矿化度、地下水埋深、高程和温度是影响干旱区平原绿洲表土积盐的主要因子(袁玉芸等,2016);内蒙古河套灌区内重度盐化土、盐土呈斑块状广泛分布于地下水埋深较浅的低洼地带,而在可耕地(包括耕地和草地)土壤含盐量整体较低,同时城镇周边盐渍化程度普遍较低(黄权中等,2018);新疆艾比湖周边绿洲土壤盐分在总体上呈现西北高东南低的格局,与地形、地下水、植被覆盖等因素的空间异质性密切相关(张飞等,2018)。

可以看出,土地利用对土壤盐分运移过程的研究从定性描述向定量模拟发展,在研究方法上从影响因素在空间上的简单叠合发展到多因子的综合模拟,但模型的驱动仍以土地利用变化为主,而对盐分本身的运移和“源-汇”过程考虑较少。

2.2 农田灌溉对土壤水盐过程的影响

中国北方干旱区由于降水稀少、蒸发强烈,农业生产严重依赖于灌溉。但水资源又十分有限,在强烈蒸发和蒸腾的双重作用下,土壤中水盐运移非常活跃,导致在地表蒸发过程中地下水会沿着土壤毛细管上移,盐分随之上移,水分随蒸发过程耗散于大气,而盐分则留在土壤表层,当盐分离子积累达到一定高的浓度时,就发生土壤盐渍化(缙倩倩等,2011)。随着可利用水资源的日趋紧张,节约灌溉已成为当前普遍趋势,不同灌溉方式和措施有着各自不同的水盐过程,研究不同灌溉方式下的绿洲水盐过程,对揭示盐碱化发生机理有着重要意义。郑晓辉等(2011)采用滴灌、畦灌和漫灌的3种不同灌溉方式,分析了新疆干旱区典型盐碱地灌水前后土壤盐分的时空运移规律,结果表明,3种不同灌水方式下,土壤盐分变化随时间的推进表现出“盐随水动”的特点,在水分短缺条件下采取滴灌方式是局部压盐效果较好,也是最节水的灌溉水方式。陈小芹等(2014)在新疆北部采用漫灌与滴灌2种方式进行冬灌时发现,滴灌方式不但便于控制灌水定额,

水分入渗均匀,有效保持土壤水分,而且还可均匀驱离盐分,大定额滴灌($3000\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)在干旱区高蒸发的地区更为适用。陈文玲等(2018)以新疆玛纳斯河中游灌区为例,分析了荒地、漫灌、滴灌3种灌溉方式对棉田土壤盐分的影响,表明0~100 cm剖面内土壤含盐量荒地最高,滴灌棉田灌溉初期次之,漫灌棉田相对最低;随滴灌年限增加,土壤含盐量呈波动上升趋势。张鹏等(2011)在塔里木河下游绿洲防护林的研究中发现,较窄的滴头距离(1.5 m)可将盐分压在50 cm以下,而较宽的滴头距离(3 m)使盐分聚集于40~50 cm的土层中,且随着滴灌年限的增加,淋洗作用增强,返盐速度明显延缓。田富强等(2018)认为,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。

目前,覆膜栽培和滴灌相结合的膜下滴灌技术被认为是最为节水、节能的灌溉方式,它既可以防止水分深层渗漏、减少水分的地表蒸发,同时也具有增温、保墒的作用(王全九等,2001;康静等,2013),在我国西北干旱地区,特别是新疆,得到了全面推广(牟洪臣等,2011;杨鹏年等,2011),其对盐分运移过程的影响受到了广泛关注(罗毅,2014;王振华等,2014;Zhang *et al.*, 2014)。罗毅(2014)以最早开展膜下滴灌应用的新疆玛纳斯河绿洲作为研究区,分析了膜下滴灌对土壤盐碱化的长期影响,表明滴灌对土壤脱盐与积盐影响并存,在原荒地基础上进行滴灌,土壤呈脱盐趋势,而在原耕地基础上长期滴灌,土壤呈积盐趋势,说明土地利用历史对土壤盐分运移有着关键性的影响。Zhang等(2014)研究了膜下滴灌对土壤盐分水平和垂直分布的影响,发现膜下滴灌对土壤表层的盐分分布起着关键性作用,但随着土壤深度的增加其影响减弱。王振华等(2014)通过对新疆典型灌区应用膜下滴灌年限长短的比较发现:在膜下滴灌应用的前3 a,属于快速脱盐阶段;3~10 a盐分降低趋势明显;膜下滴灌10~15 a盐分含量趋于稳定,随灌水、施肥、蒸发等影响略有波动,属于脱盐稳定阶段;根区土壤盐分随膜下滴灌应用年限延长总体呈降低趋势。杨鹏年等(2011)在新疆巴州灌溉试验站的膜下滴灌试验表明,单次滴灌后土壤剖面的盐分形成了脱盐区、稳定区与积盐区,且脱盐区的面积要大于积盐区;在整个生育期内,剖面土壤的盐分则受灌水周期的影响,呈

上下振荡、振幅缩小且总体脱盐的变化趋势。牟洪臣等(2011)通过对新疆石河子膜下滴灌棉田的研究发现,垂直方向上0~20 cm土层盐分减少,60~100 cm土层累积程度较大;水平方向上滴头处盐分累积最少,膜间处盐分累积较多;随滴灌年限的增加各土层含盐率相应增加,且60~100 cm土层为盐分聚积的最大区域。以上研究成果对于揭示膜下滴灌农田水盐运移过程和盐碱地的改良起到了积极作用。但是,由于滴灌土壤的水盐迁移为局部扩散模式,因此土壤盐分的分布表现出很强的时空变异性,并受到土壤质地、灌溉制度、滴头流量、根系特征等的影响,而目前大多缺少长时间定点连续的监测数据,研究周期相对较短,或研究地块单一,监测数量较少,造成了一些研究结论的不一致。为了在较大尺度上理解和揭示膜下滴灌对土壤盐分的影响过程和机理,需要加强不同土壤质地和灌溉制度下水盐动态的长期定点监测。

与此同时,随着干旱区水资源的日益紧缺,咸水灌溉逐渐被引入到农业生产中,一些学者对咸水灌溉下土壤盐分运移问题进行了研究。李从娟等(2015)对咸水灌溉下的塔克拉玛干沙漠公路沿线防护林及其土壤盐分进行了研究,发现地下咸水灌溉虽然导致了表层土壤盐分聚集以及盐结皮的形成,但并未对植物生长造成影响,因为盐分聚集的地方几乎没有植物吸收根的分布,而在植物根系分布最集中的土层(40~60 cm),土壤盐分却不到 $1.0\text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。可见,地下咸水灌溉并未对植物的正常生长产生盐害或毒害,同时有利于沙漠风沙土的演变。因此,制定合理的灌溉制度可以有效遏制或缓解干旱区土壤的盐渍化发展,以促进西北干旱地区水资源的可持续利用。

2.3 自然环境因子对土壤盐分的影响

影响土壤盐分的环境因子很多,如降水、温度、蒸发、地表水、地下水埋深、地下水矿化度、海拔、地形和地貌等,这些因子之间相互影响又相互制约,共同影响着土壤盐分的迁移过程。在干旱区,尤其是新疆地区,由于地处欧亚大陆中心,远离海洋,气候极其干燥,全年降水不足200 mm,因此,降水对土壤盐分的影响可忽略不计;但是,高温干燥和强烈蒸发使土层中的上升水流远比下降水流大,使得含盐的地下水通过土壤毛细管作用在地表大量蒸发而使盐分聚积于地表,导致土壤积盐普遍,形成大面积的盐土(胡志林等,1993)。水溶性钠离子含量在不同土

层随气温升高而快速递增,而与空气湿度关系不是很密切。土壤温度的增加会显著增加土壤中盐分的集聚性,10~15 cm 的剖面上最为明显(郭全恩等,2011);同时,地表灌溉水和地下水的共同作用也是导致绿洲土壤盐渍化发生的重要因素(刘蔚等,2005)。周洪华等(2008)在新疆塔里木河下游的铁干里克绿洲研究发现,当地下水埋深较浅时,土壤盐分的增加主要由地下水所导致;当地下水埋深较大时,表层0~50 cm 的土壤盐分由地表灌溉用水引起。地下水埋深直接关系到土壤毛细水能否到达地表,在一定程度上决定着土壤的积盐程度,埋深愈浅,蒸发量越大,土壤积盐越严重(贡璐等,2015;丁建丽等,2016)。此外,当地下水埋深<6 m 时,地下水矿化度的高低是影响土壤盐分的主要因子(周洪华等,2008;周在明等,2015)。

中国西北干旱区属于亚欧干旱气候带的一部分,包括塔里木盆地、准噶尔盆地、柴达木盆地、河西走廊等,区内中生代以来的构造运动形成典型的山盆系统(曲焕林,1991)。这种特殊地貌构造由于地形封闭、土壤母质含盐重等自然原因,使得西北干旱区土壤含盐量普遍较高(樊自立等,2001)。从地形因子来看,海拔较低的地区土壤盐分含量高,与之相反的是地势起伏相对较大的内陆区土壤盐分含量较低,土壤盐分含量在不同高程上存在分布差异,并随着高程的增大,土壤盐分含量呈减少趋势(周在明等,2015;丁建丽等,2016)。如新疆天山北坡玛纳斯河自南向北流,地势由东南向西北倾斜,致使其西北区域成为水盐汇集中心,导致土壤盐分含量从南向北的增加趋势(颜安等,2014)。

3 土壤盐碱化的防治措施

3.1 干旱区盐碱化土壤改良措施

西北干旱区是我国盐碱化土壤分布的重点区域,其中新疆盐碱化土壤面积占到了全国盐碱化总面积的36.8%(乔木等,2011),严重制约了干旱区农业的可持续发展(王海江等,2014)。随着人口数量的不断增加和耕地面积的日益减少,盐碱化土地的改良问题已引起了社会的高度关注。盐碱化土地改良的方法较多,最常见有物理、水利、化学和生物改良措施等。

①物理改良,主要采取平整土地、抬高地形、及时松土、冲洗脱盐、深翻松耕、压沙等方法。此方法见效快,在前期的治理中效果较好,尤其在20世纪

80年代应用较为广泛(张茂省等,2005),但由于工程量大,又不能彻底消除土壤中的盐分,治标不治本,实施难度大等缺点而不易推广。

②水利改良,如灌溉洗盐、地下排盐、灌排配套、蓄淡压盐等措施。如在灌溉洗盐方面,间歇淋洗的效果要高于连续淋洗,且灌水量越大盐分淋洗效果越好(罗雪园等,2017)。目前,一些灌区排水系统坍塌淤堵严重,导致排水不畅,地下水位抬高等问题,造成盐分随水上移,积于表面,对盐碱地的改良造成了一定的影响。

③化学改良,施用土壤改良剂(石膏、磷石膏、过磷酸钙、腐殖酸、泥炭、醋渣等),其作用原理是改变土壤胶体的吸附性离子组成,消除土壤中的盐分和交换性钠离子,从而改善土壤的理化性质。土壤改良剂由于见效快、实施方便等特点,是一种理想的盐碱地改良措施。刘瑞敏等(2017)选用7种土壤改良剂对内蒙古河套灌区中度盐渍化土壤进行研究,发现土壤改良剂在土壤脱盐及降低土壤碱性方面优势明显,尤其在0~60 cm 土层内脱盐效果最佳。化学改良措施虽然见效快,效果明显,但成本昂贵,且使用不当易对环境造成二次污染,在应用范围和适用条件方面也存在一定的局限性(Qadir *et al.*, 2006)。

④生物改良,即利用植物避盐、泌盐和体内藏盐等生物特性,筛选和培育抗盐基因型植物来改良盐渍化土地的方法。该方法价格低廉,可持续性强,既有利于生态环境的保护,又能产生一定的经济效益,是改良盐碱地的一种有力措施。目前,国内外已开展了较多利用盐生植物改良土壤的研究。吴振振等(2016)在新疆塔克拉玛干沙漠北缘盐碱荒漠,研究胀果甘草(*Glycyrrhiza inflata*)生长发育过程中对盐碱地土壤性质的影响,发现该方法可有效改善土壤理化性质,降低土壤含盐量,并且能够显著提高土壤脲酶、磷酸酶和蔗糖酶的活性,达到改良盐碱土的效果。李志强等(2010)研究了不同种植年限的四翅滨藜(*Atriplex canescens*)对土壤盐分含量的影响,发现土壤可溶性盐分含量随四翅滨藜定植年限的增长而降低。赵振勇(2015)基于生物改良方法建立了“滴灌+生物排盐+快速熟化”的干旱区盐碱地开发利用体系,在水资源短缺背景下的盐碱低产农田高效利用和新垦盐碱地快速改良方面具有较好的经济和社会效益。生物改良是干旱区盐渍化土地优化节水灌溉、达到最佳排盐效果的方式之一,但通常改良

周期较长,不能在较短的时间内完成(Kilic *et al.*, 2008)。

对于干旱区农业而言,生物改良也许是最经济最有效的方式之一。但是,由于我国西北干旱区各区域诸多因素差异较大,一个灌区的研究成果不能直接应用到其他灌区,在盐碱化土地改良方面,应做到因地制宜,综合考虑各灌区的不同因素,探求一种既环保又经济的最佳组合模式,达到干旱区排盐效果的最大化。

3.2 耐盐植物筛选与土壤盐分改良

随着对于干旱区盐碱土改良的不断深入,通过筛选在高盐环境中可生存的盐生植物对土壤盐分进行抑制,已成为盐碱土改良的一种重要措施。彭飞等(2015)在甘肃民勤绿洲对盐爪爪(*Kalidium foliatum*)的研究发现,根部较低的钠离子含量可以使其在严重盐渍化土壤中存活,盐爪爪的盐分含量主要存储于茎部,并可以通过吸收土壤盐分以降低5~10 cm 土层的盐分含量。韩张雄等(2014)在新疆阜康荒漠生态站对盐渍生境中的盐穗木(*Halostachys caspica*)研究发现,在不同的土壤水盐含量条件下,盐穗木有不同的盐分适应方式,随着盐胁迫的增加,在盐含量较高且水分含量较低的土壤中,其以合成脯氨酸为主来抵御盐胁迫。赵振勇等(2013a, 2013b)以克拉玛依市重盐化土壤为对象进行了盐生植物田间试验,结果表明在无排水灌区盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)与野榆钱菠菜(*Atriplex aucheri*)可以进行灌区脱盐;同时,在灌溉条件下,盐角草(*Salicornia europaea*)和盐地碱蓬均对钠离子、氯离子和硫酸根离子具有较强的摄取能力,尤其是对氯离子表现出更强的选择吸收倾向,但盐角草的盐分吸收能力更强,钠离子和氯离子含量分别是盐地碱蓬的2.33倍和2.22倍,盐角草对钠离子和氯离子的强积聚特征使其更适于对氯化物盐渍土的改良,郭洋等(2015)的研究结果也得到了相似的结果。李从娟等(2015)在罗布泊研究了盐地碱蓬对盐碱土的改良作用,结果表明,在盐碱土环境中种植盐地碱蓬不仅可降低土壤的盐分含量和pH,同时也可增加土壤有机质和养分含量。陆嘉惠等(2013)研究了盐碱荒漠草甸药用植物胀果甘草的耐盐范围和盐适应机制,发现胀果甘草幼苗通过对盐离子的吸收和运输调控、离子区域化和渗透调节,选择耐盐和避盐2种方式适应盐碱荒漠环境。可见,不同盐生植物对不同盐分离子的吸收具有选择偏向性。

综上所述,植物耐盐性大多数表现出生理和形态适应性,但不同植物对盐胁迫的适应性反应不尽相同。目前,大多数耐盐植物筛选研究主要集中在植株地上部分耐盐特性方面,由于植物耐盐性机制十分复杂,应加强盐胁迫条件下植物的根系分布、生理生态和形态结构等的盐分响应研究,通过揭示植物耐盐机理筛选出和培育出更为适宜和高效的土壤盐分改良植物。

4 研究展望

干旱区绿洲农田的盐分运移研究已取得了较为系统的成果,但运移过程研究的尺度相对较小,多集中在田间水平上,对于大尺度的流域和景观水平的研究较少。受时间和空间的限制,同样的研究结论并不完全适合于其他区域,在一定程度上限制了研究结果的推广。同时,随着干旱区高强度的水资源开发利用,河道在出山口即被水库和人工渠网所取代,形成了密集的灌溉网络,天然河道几乎全部解体,导致自然状态下的水盐平衡和运移过程在很大程度上被改变,仅田块和较小尺度上的水盐过程,已无法满足流域盐分综合防治和管理的需求。关于宏观尺度上的土壤盐分过程的研究,既是当前研究的热点,也是难点所在,不论在理论探索还是实践应用上都具有重要意义。

(1)土壤盐分的定量遥感反演,为快速、准确、大范围监测盐渍化状况提供有效手段,建立基于光谱的盐分含量定量反演模型是土壤盐分遥感反演的基础,但土壤盐分的分布受地形、气候、地表径流、地下水、植被覆盖、灌溉等多种因素的影响。因此,土壤盐分遥感反演研究中不能只依赖于单纯的影像光谱特征,需要将各影响因子作为参量引入到土壤盐分的遥感反演中。

(2)随着空间技术的发展,为从景观及流域尺度上来研究土壤盐分运移过程提供了有效手段,在方法上将田块尺度的微观过程和流域尺度的格局分析相结合,过程模型与空间直观模型相结合,实现土地利用和人类活动格局与土壤盐分迁移过程的时空耦合,在流域尺度上揭示土壤盐分时空过程和土地利用的关系,可为揭示干旱区盐分运移过程提供新的思路和视角。

参考文献

陈文玲,冉圣宏,刘韬韬. 2018. 不同灌溉方式棉田土壤含

- 盐量的分布特征:以玛纳斯河中游灌区为例. 灌溉排水学报, **37**(5): 33-38.
- 陈小芹, 王振华, 何新林, 等. 2014. 北疆棉田不同冬灌方式对土壤水分、盐分和温度分布的影响. 水土保持学报, **28**(2): 132-137.
- 丁建丽, 陈文倩, 陈芸. 2016. 干旱区土壤盐渍化灾害预警——以渭-库绿洲为例. 中国沙漠, **36**(4): 1079-1086.
- 董新光, 周金龙, 陈跃滨. 2007. 干旱内陆区水盐监测与模型研究及其应用. 北京: 科学出版社.
- 樊自立, 马英杰, 马映军. 2001. 中国西部地区的盐渍土及其改良利用. 干旱区研究, **18**(3): 1-6.
- 扶卿华, 倪绍祥, 王世新, 等. 2007. 土壤盐分含量的遥感反演研究. 农业工程学报, **23**(1): 48-54.
- 贡璐, 刘曾媛, 塔西甫拉提·特依拜. 2015. 极端干旱区绿洲土壤盐分特征及其影响因素. 干旱区研究, **32**(4): 657-662.
- 贡璐, 冉启洋, 张雪妮, 等. 2013. 塔里木河上游绿洲土壤表层盐分特征及其影响因子分析. 环境科学研究, **26**(6): 631-636.
- 侯倩倩, 韩致文, 王国华. 2011. 中国西北干旱区灌区土壤盐渍化问题研究进展. 中国农学通报, **27**(29): 246-250.
- 郭洋, 陈波浪, 盛建东, 等. 2015. 几种一年生盐生植物的吸盐能力. 植物营养与肥料学报, **21**(1): 269-276.
- 郭全恩, 王益权, 马忠明, 等. 2011. 植被类型对土壤剖面盐分离子迁移与累积的影响. 中国农业科学, **44**(13): 2711-2720.
- 韩张雄, 李利, 徐新文, 等. 2014. 盐穗木对盐渍荒漠区不同土壤水盐含量的适应机制研. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, **42**(2): 167-172.
- 侯振安, 龚江, 谢海霞. 2013. 干旱区滴灌棉花土壤水盐养分运移与调控. 杨凌: 西北农林科技大学出版社.
- 胡志林, 钟骏平. 1993. 土壤学及新疆土壤. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社.
- 黄权中, 徐旭, 吕玲娇, 等. 2018. 基于遥感反演河套灌区土壤盐分分布及对作物生长的影响. 农业工程学报, **34**(1): 102-109.
- 康静, 黄兴法. 2013. 膜下滴灌的研究及发展. 节水灌溉, (9): 71-74.
- 李从娟, 孙永强, 范敬龙, 等. 2015. 盐地碱蓬在高盐碱环境中的生态学意义. 干旱区研究, **32**(6): 1160-1166.
- 李建国, 濮励杰, 朱明, 等. 2012. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点. 地理学报, **67**(9): 1233-1245.
- 李志强, 朱新萍, 高文伟, 等. 2010. 四翅滨藜对干旱区内陆盐渍土的改良效应研究. 新疆农业大学学报, **33**(6): 484-488.
- 刘蔚, 王涛, 苏永红, 等. 2005. 黑河下游土壤和地下水盐分特征分析. 冰川冻土, **27**(6): 890-898.
- 刘广明, 杨劲松, 何丽丹, 等. 2011. 基于模糊综合评判法的新疆典型干旱区土壤盐漠退化风险评价. 农业工程学报, **27**(3): 1-5.
- 刘广明, 杨劲松, 鞠茂森, 等. 2003. 电磁感应土地测量技术及其在农业领域的应用. 土壤, **35**(1): 27-29.
- 刘梅先, 杨劲松. 2011. 土壤盐分的原位测定方法. 土壤, **43**(5): 688-697.
- 刘瑞敏, 杨树青, 史海滨, 等. 2017. 河套灌区中度盐渍化土壤改良产品筛选研究. 土壤, **49**(4): 776-781.
- 陆嘉惠, 吕新, 梁永超, 等. 2013. 新疆胀果甘草幼苗耐盐性及对 NaCl 胁迫的离子响应. 植物生态学报, **37**(9): 839-850.
- 罗毅. 2014. 干旱区绿洲滴灌对土壤盐碱化的长期影响. 中国科学 D 辑: 地球科学, **44**(8): 1679-1688.
- 罗雪园, 周宏飞, 柴晨好, 等. 2017. 不同淋洗模式下干旱区盐渍土改良效果分析. 水土保持学报, **31**(2): 322-326.
- 牟洪臣, 虎胆·吐马尔白, 苏里坦, 等. 2011. 干旱地区棉田膜下滴灌盐分运移规律. 农业工程学报, **27**(7): 18-22.
- 彭飞, 黄翠华, 廖杰, 等. 2015. 盐爪爪(*Kalidium foliatum*)群落对土壤盐分影响. 中国沙漠, **35**(1): 90-93.
- 彭杰, 刘焕军, 史舟, 等. 2014. 盐渍化土壤光谱特征的区域异质性及盐分反演. 农业工程学报, **30**(17): 167-174.
- 乔木, 周生斌, 卢磊, 等. 2011. 近 25 a 来塔里木盆地灌区土壤盐渍化时空变化特点与改良治理对策. 干旱区地理, **34**(4): 604-613.
- 曲焕林. 1991. 中国干旱半干旱地区地下水资源评价. 北京: 科学出版社.
- 石玉林, 王立新, 任继周, 等. 2013. 新疆人工绿洲建设、盐碱地改良与农林牧业可持续发展. 北京: 中国水利水电出版社.
- 田富强, 温洁, 胡宏昌, 等. 2018. 滴灌条件下干旱区农田水盐运移及调控研究进展与展望. 水利学报, **49**(1): 125-135.
- 王涛. 2009. 干旱区绿洲化、荒漠化研究的进展与趋势. 中国沙漠, **29**(1): 1-9.
- 王海江, 石建初, 张花铃, 等. 2014. 不同改良措施下新疆重度盐渍土壤盐分变化与脱盐效果. 农业工程学报, **30**(22): 102-111.
- 王全九, 王文焰, 汪志荣, 等. 2001. 盐碱地膜下滴灌技术参数确定. 农业工程学报, **17**(2): 47-50.
- 王振华, 杨培岭, 郑旭荣, 等. 2014. 典型绿洲灌区长期膜下滴灌棉田根区土壤盐分及离子变化特征. 水土保持学报, **28**(3): 158-165.
- 吴亚坤, 刘广明, 杨劲松, 等. 2015. 基于多源数据的中原黄泛典型区土壤盐分空间变异分析. 农业工程学报, **31**(5): 115-120.
- 吴振振, 马森, 张旭龙. 2016. 甘草对新疆盐碱地土壤理化性质及土壤酶活性的影响. 农学学报, **6**(6): 24-29.
- 肖笃宁, 李小玉, 宋冬梅, 等. 2006. 民勤绿洲地下水开采时空动态模拟. 中国科学 D 辑: 地球科学, **36**(6): 567-578.
- 颜安, 蒋平安, 盛建东, 等. 2014. 玛纳斯河流域表层土壤盐分空间变异特征研究. 土壤学报, **51**(2): 410-414.
- 杨红梅, 徐海量, 樊自立, 等. 2010. 塔里木河下游表层土壤盐分空间变异和格局分析. 中国沙漠, **30**(3): 564-570.
- 杨鹏年, 董新光, 刘磊, 等. 2011. 干旱区大田膜下滴灌土壤盐分运移与调控. 农业工程学报, **27**(12): 90-95.
- 姚远, 丁建丽, 张芳, 等. 2014. 基于电磁感应技术的塔里木盆地北缘绿洲土壤盐分空间变异特性. 中国沙漠, **34**(3): 765-772.
- 袁玉芸, 瓦哈甫·哈力克, 关靖云, 等. 2016. 基于 GWR 模型的于田绿洲土壤表层盐分空间分异及其影响因子. 应用生态学报, **27**(10): 3273-3282.

- 张 飞, 李怡博, 王东芳, 等. 2018. 精河绿洲盐渍土表层土壤盐分因子的空间变异及分布格局. *生态与农村环境学报*, **34**(1): 64–73.
- 张 鹏, 赵新风, 张 涛, 等. 2011. 滴灌对于旱区绿洲防护林土壤盐分的淋洗作用. *农业工程学报*, **27**(5): 25–30.
- 张 顺, 贾永刚, 连胜利, 等. 2014. 电导率法在土壤盐渍化中的改进和应用进展. *土壤通报*, **45**(3): 754–759.
- 张建明, 齐文文. 2013. 民勤绿洲土壤盐分组成与光谱特征. *生态学杂志*, **32**(10): 2620–2626.
- 张茂省, 朱立峰, 王晓勇. 2005. 关中盆地地下水系统分析与地下水资源可持续开发利用对策. *第四纪研究*, **25**(1): 15–22.
- 张贤龙, 张 飞, 张海威, 等. 2018. 基于光谱变换的高光谱指数土壤盐分反演模型优选. *农业工程学报*, **34**(1): 110–117.
- 张源沛, 胡克林, 李保国, 等. 2009. 银川平原土壤盐分及盐渍土的空间分布格局. *农业工程学报*, **25**(7): 19–24.
- 赵振勇, 李中邵, 张福海, 等. 2013a. 盐生植物种植对克拉玛依农业开发区盐分平衡的影响. *水土保持通报*, **33**(4): 211–215.
- 赵振勇, 张 科, 王 雷, 等. 2013b. 盐生植物对重盐渍土脱盐效果. *中国沙漠*, **33**(5): 1420–1425.
- 赵振勇. 2015. 一种干旱区盐碱地生物改良方法: 中国, ZL201310350696.6[P]. 2015-03-15.
- 郑 琦, 王海江, 李万涛, 等. 2016. 玛纳斯河流域土壤盐渍化影响因素研究. *农业资源与环境学报*, **33**(3): 214–220.
- 郑晓辉, 巴特尔·巴克, 李 宏, 等. 2011. 不同灌水方式下干旱区盐碱地土壤水盐运移特征分析. *东北农业大学学报*, **42**(5): 95–98.
- 周 丽, 王玉刚, 李 彦, 等. 2013. 盐碱荒地开垦年限对表层土壤盐分的影响. *干旱区地理*, **36**(2): 285–291.
- 周洪华, 陈亚宁, 李卫红. 2008. 新疆铁干里克绿洲水文过程对土壤盐渍化的影响. *地理学报*, **63**(7): 714–724.
- 周在明, 赵淑惠. 2015. 华北半干旱平原区表层土壤盐分累积的影响因素分析. *干旱区地理*, **38**(5): 976–984.
- Gorji T, Sertel E, Tanik A. 2017. Monitoring soil salinity via remote sensing technology under data scarce conditions: A case study from Turkey. *Ecological Indicators*, **74**: 384–391.
- Gregorich EG, Carter MR. 1997. Soil Quality For Crop Production and Ecosystem Health. The Netherlands: Elsevier Science Publishers.
- Greiner R. 1997. Optimal farm management responses to emerging soil salinisation in a dryland catchment in eastern Australia. *Land Degradation & Development*, **8**: 281–303.
- Jayawickreme DH, Santoni CS, Kim JH, et al. 2011. Changes in hydrology and salinity accompanying a century of agricultural conversion in Argentina. *Ecological Applications*, **21**: 2367–2379.
- Kilic CC, Kukul Y, Anac D. 2008. Performance of purslane (*Portulaca oleracea* L.) as a salt-removing crop. *Agricultural Water Management*, **95**: 854–858.
- Ma LG, Yang ST, Simayi Z, et al. 2018. Modeling variations in soil salinity in the oasis of Junggar Basin, China. *Land Degradation & Development*, **29**: 551–562.
- Masoud AA, Koike K. 2006. Arid land salinization detected by remotely-sensed landcover changes: A case study in the Siwa region, NW Egypt. *Journal of Arid Environments*, **66**: 151–167.
- Metternicht G, Zinck JA. 2009. Remote Sensing of Soil Salinization: Impact on Land Management. Boca Raton: CRC Press.
- Metternicht GI, Zinck JA. 2003. Remote sensing of soil salinity: Potentials and constraints. *Remote Sensing of Environment*, **85**: 1–20.
- Qadir M, Noble AD, Schubert S, et al. 2006. Sodicity induced land degradation and its sustainable management: Problems and prospects. *Land Degradation and Development*, **14**: 301–307.
- Salvati L, Ferrara C. 2015. The local-scale impact of soil salinization on the socioeconomic context: An exploratory analysis in Italy. *Catena*, **127**: 312–322.
- Shahid SA, Abdelfattah MA, Taha FK. 2013. Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation: Innovative Thinking and Use of Marginal Soil and Water Resources in Irrigated Agriculture. Dordrecht: Springer Science + Business Media.
- Sivapalan M, Ruprecht JK, Viney NR. 1996a. Water and salt balance modelling to predict the effects of land-use changes in forested catchments: 1. Small catchment water balance model. *Hydrological Processes*, **10**: 393–411.
- Sivapalan M, Viney NR, Jeevaraj CG. 1996b. Water and salt balance modelling to predict the effects of land-use changes in forested catchments: 3. The large catchment model. *Hydrological Processes*, **10**: 429–446.
- Sivapalan M, Viney NR, Ruprecht JK. 1996c. Water and salt balance modelling to predict the effects of land-use changes in forested catchments: 2. Coupled model of water and salt balances. *Hydrological Processes*, **10**: 413–428.
- Vlek PLG, Braimoh AK. 2008. Land Use and Soil Resources. Dordrecht: Springer.
- Wang YG, Deng CY, Liu Y, et al. 2018. Identifying change in spatial accumulation of soil salinity in an inland river watershed, China. *Science of the Total Environment*, **621**: 177–185.
- Wang YG, Li Y. 2012. Land exploitation resulting in soil salinization in a desert-oasis ecotone. *Catena*, **100**: 50–56.
- Weng YL, Peng G, Zhu ZL. 2010. A spectral index for estimating soil salinity in the Yellow River Delta Region of China using EO-1 hyperion data. *Pedosphere*, **20**: 378–388.
- Zhang Z, Hu HC, Tian FQ, et al. 2014. Soil salt distribution under mulched drip irrigation in an arid area of northwestern China. *Journal of Arid Environments*, **104**: 23–33.
- Zhou D, Lin ZL, Liu LM. 2012. Regional land salinization assessment and simulation through cellular automaton-Markov modeling and spatial pattern analysis. *Science of the Total Environment*, **439**: 260–274.

作者简介 刘丽娟,女,1980年生,硕士,主要从事生态学方面的研究与编辑工作。E-mail: liulij79@163.com
责任编辑 魏中青