

土壤盐渍化研究现状及未来研究热点

李建国¹, 濮励杰^{1,2}, 朱 明¹, 张润森¹

(1. 南京大学国土资源与旅游学系, 南京 210093;

2. 国土资源部土地利用重点实验室, 北京 100029)

摘要: 随着全球气候暖化问题的日益加剧, 土壤盐渍化问题已经成为各国关心的全球性问题, 全球约有7%的土地受到盐渍化的威胁, 而且这个数字还在上升。我国是土壤盐渍化比较严重的国家, 盐渍化土壤面积大, 分布广, 对区域农业发展构成了严重的威胁。本文对70年来我国土壤盐渍化研究的内容框架进行了梳理和概括, 并结合国内外的相关研究成果对已有研究中存在的不足进行了评述; 借助文献数据库和相关数据共享网络对近30年来国内外盐渍土研究的趋势和总体概况进行了总结, 提出了新形势下土壤盐渍化研究的5个重点领域和方向, 旨在为今后开展盐渍土研究提供新的思路。

关键词: 盐渍土; 研究进展; 现状; 热点

1 前言

土壤盐渍化是由自然或人类活动引起的一种主要的环境风险, 全球大约有8.31亿 hm^2 的土壤受到盐渍化的威胁^[1], 面积相当于委内瑞拉国土面积的10倍, 法国的20倍。而次生盐渍化的面积大约为7700万 hm^2 , 其中58%发生在灌溉农业区, 接近20%的灌溉土壤受到盐渍化的威胁, 而且这个比例还在增加。土壤盐渍化可能不像地震和海啸那样引人注目和具有巨大的破坏性, 但是具有很严重的环境风险和危害。尤其是在干旱地区的灌溉农业, 由于落后的水资源管理引起的土壤盐渍化会对作物产量以及区域农业生产造成巨大的影响。一般情况下, 灌溉土地中受盐渍化影响的面积比例为20%, 而在干旱和半干旱国家一般会达到30%, 比如埃及、伊朗和委内瑞拉^[2]。未来随着人口的激增将会有更多的荒地被开垦为耕地, 这主要是靠灌溉来实现, 同时带来的盐渍化问题也将更加突出。

随着全球暖化趋势的日益加剧, 中低纬度区域的土壤盐渍化问题将日趋明显, 美国、中国、匈牙利、澳大利亚等国的盐渍化问题将会日益显著, 而非洲北部、东部、南美洲、中东、中亚和南亚地区的盐渍化问题将会更加严峻。众多国家已经将土壤盐渍化问题纳入到国家未来的发展规划当中, 盐渍化问题已经成为全球变化研究框架下的重要内容, 国际盐渍化论坛已经成为土壤学家探讨全球变化背景下土壤盐渍化发展演化的重要平台^[3]。2008年第二届国际盐渍化论坛在澳大利亚的阿德莱德召开, 主要讨论全球性盐渍化、水资源和社会问题及其地区相关对策等, 涉及灌溉盐渍化、旱地盐渍化和都市盐渍化以及咸水入侵等问题, 强调了当前水资源利用与气候变化对土壤盐渍化的重叠影响, 旨在建立新型水资源的盐渍化调控和管理途径。

收稿日期: 2012-05-17; 修订日期: 2012-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(40871255); 南京大学研究生科研创新基金(2012CL14) [Foundation: National Natural Science Foundation, No.40871255; The Scientific Research Foundation of Graduate School of Nanjing University, No.2012CL14]

作者简介: 李建国(1986-), 男, 江苏泗阳人, 博士生, 主要从事土地利用与规划研究。E-mail: lijanguo531@126.com
通讯作者: 濮励杰(1965-), 男, 江苏吴江人, 教授, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110001875M), 主要从事土地利用与生态环境响应研究。E-mail: ljpu@nju.edu.cn

我国盐渍土总面积约3600万 hm^2 ，占全国可利用土地面积的4.88%^[3]。我国从20世纪30-40年代开始关注盐渍土问题，并组织大规模的土壤盐渍化调查和摸底，基本上搞清楚了我国盐渍土的分布与面积；70年代以后，我国启动了多项与旱涝盐碱综合治理相关的国家科技攻关项目，如“黄淮海平原中低产地区的旱涝盐碱综合治理”^[4]。盐碱综合治理实践和相关科学研究工作对我国盐渍土和中低产地区产生了广泛影响，推动了我国盐渍土及其改良工作的发展。同时，在科技攻关期间，还根据不同类型区特点在黄淮海平原建立了多个综合治理试验站(区)^[5]。新疆宁夏等地的排水种稻、吉林的综合改良苏打盐土、江浙鲁冀等省的海涂开发、内蒙古一些地区的井排等均在综合治理方面取得了可喜进展。本文通过对已有研究的整理，对近70年来我国盐渍土研究的内容框架和重点领域进行了概括，对已有研究中存在的不足进行了评述；借助文献数据库和相关数据共享网络对近30年来国内外盐渍土研究的趋势和总体概况进行了总结，并提出了新形势下土壤盐渍化研究的5个重点领域和方向，以服务我国盐渍土研究的新需要，为今后开展盐渍土研究提供新的思路。

2 土壤盐渍化的研究现状

我国开展盐渍土研究已经有70年的历史^[6]，对我国盐渍土的类型分布、盐渍化发生、演化的机理与趋势都有了比较系统的认识。20世纪70年代开始从理论研究向应用实践研究转变^[7]，在此基础上形成了相对完整的土壤盐渍化研究的内容框架(图1)。土壤盐渍化研究经历基础理论探索→应用实践两个主要阶段。从内容上看，研究主要集中于以下五个方面：

2.1 盐分离子的毒害机理研究

提出了渗透抑制论，矿质营养失调理论，离子毒害论和氮素代谢影响理论四种理论^[5]，发现土壤中盐分离子的集聚会引起植物生理性缺水，土壤盐分离子的增加会抑制植物对其他养分的吸收，导致植物发育不良进而导致减产或死亡； Na^+ 和 Mg^{2+} 离子的增加会引起植物细胞的结构性损伤以及阻碍植物光合作用，减少叶绿素的产生^[8]；同时土壤盐分能引起植物氮素代谢过程中产生具有毒性的中间产物，促使作物新陈代谢过程减弱等机理性问题。Kinraide T. B.的研究表明， K^+ 离子对于植物的根具有较高的毒性，而 Na^+ 对于植物的根发育毒性更明显，并驳斥了 K^+ 释放假说(Na^+ 毒性的显现主要是源于对植被组织中 K^+ 的释放)和 Cl^- 毒性假说(Na^+ 的毒性是由 Cl^- 所引致)^[9]。

同时，科学家也发现盐分的增加会显著提高土壤重金属的迁移能力，特别是对于Cd和Pb两种元素，从而增加重金属污染土壤修复的困难^[10]；盐分离子的聚集对于水生生物也具有相当大的危害，特别是对于环节动物和软体动物的生活史影响比较大^[11]；盐分的积累也在很大程度上影响小麦^[12]、玉米^[13]、水稻^[14]、柚子(Shaddock)^[15]、海枣(Date Palm)^[16]等农作物的产量。同时，研究人员发现，随着耕作带来的土壤不断熟化，土壤有机质的不断升高，土壤的盐分呈

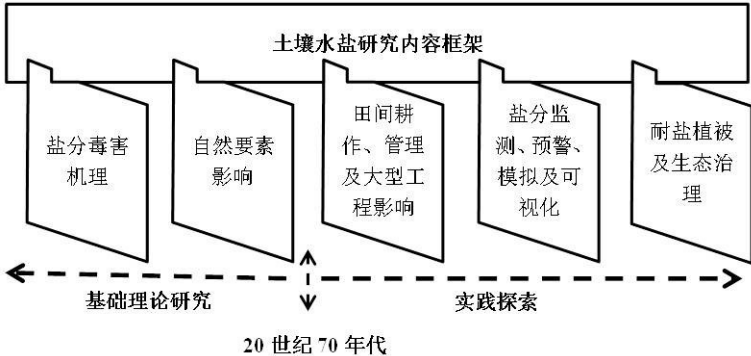


图1 土壤盐渍化研究内容框架

Fig. 1 The content frame of soil salinization research

不断下降的趋势^[17],但这种逆向关系是否具有可以追溯的科学机理关系,还有待进一步的研究。

2.2 不同环境、土壤结构与地貌及现代工程对于土壤盐渍化的影响

(1) 降雨、温度、湿度、PH值、蒸发、植被覆盖对于土壤盐分累积的影响。研究发现不同土层水溶性Na⁺的含量随气温升高过程而快速递增,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^[18]。而且,不同的土壤类型、土地利用方式、地貌组合都会对土壤盐分的迁移累积产生显著地影响^[19]。暴雨对于土壤盐分的脱盐作用很明显,张妙仙^[20]利用粉砂壤土土柱研究特大暴雨过程中土壤盐分运移特征,发现当地下水位为2.5 m时,雨后0~83 cm土层土壤盐分下移至83~200 cm土层段,其淋洗效果最佳。另外,由于不同植被的地表覆盖程度不同,进而引起地表蒸发量的差异^[18],从而引起表土层(0~5 cm)土壤不同的盐分表聚特性,如郭全恩在甘肃省秦安县兴国镇郑川村的研究发现,裸地相对小麦地和玉米地具有更明显的盐分集聚,而常年的小麦种植可以明显减少土壤中0~100 cm的盐分含量^[8]。

(2) 土壤盐渍化与地下水位密切相关。刘广明用粉砂壤土土柱进行了为期一年的室内模拟试验表明:地下水埋深85 cm、105 cm情况下,0~40 cm深度土壤电导率与地下水矿化度呈良好正相关关系^[21];山西省水利科学研究所和中科院南京土壤研究所的研究表明:地下水埋深在40~80 cm时,对作物有增产作用,地下水埋藏深度为60 cm时的玉米产量最高。全剖面亚砂土和层砂层粘互层土柱小麦最佳地下水埋藏深度分别为1.5 m和1.3 m,全剖面粉砂壤土、30 cm黏土层和100 cm黏土层棉花的最佳水深分别为2.5 m、2 m和1.5 m^[22]。

(3) 大型工程对于土壤盐渍化发生具有明显的季节性和梯度表现。三峡大坝建成运行后,季节调蓄对于长江河口土壤水盐动态的研究表明:10-12月份三峡水库蓄水期间,加速长江口的土壤的盐渍化,并有Na⁺碱化的趋势^[23];祝寿泉研究表明,南水北调工程的运行对于南四湖以北黄淮海平原地下水位为2~3 m的区域具有较高的盐渍化威胁^[24]。在国外,大型工程的盐渍化风险也备受关注,埃及阿斯旺高坝的建设加速了尼罗河下游平原的盐渍化发育,甚至影响到苏伊士运河的盐分演化^[25]。

(4) 土壤孔隙等物理结构同样对于盐分迁移、累积产生影响。砂土层的土壤粒间孔隙较大,对土壤盐水上移表聚具有明显的阻隔效应,而黏土层有良好的保水和隔盐能力,尤其对表土积盐的抑制效果显著,且抑盐效果随黏土层厚度增加而提升^[26]。同时,黏土层中钠离子吸收比(SAR)有显著地下降,对抑制土壤碱化具有很好的效果^[27]。

2.3 不同种植耕作与管理方式对于盐分离子迁移累积的影响

目前学者对于滴灌、覆膜、咸水—淡水轮灌、咸水灌溉、氮肥、有机肥料、秸秆覆盖以及废水灌溉等方式下土壤的盐渍化演化趋势都有了比较清楚的认识。研究表明:淡水滴灌盐土,可使上部土体(20 cm以上)逐渐脱盐;微咸水滴灌盐土,土壤表层盐分含量会有一定增加并稳定于一定数值^[28],同时,微咸水灌溉也会引起土壤盐分浓度大幅升高^[29]。对于低盐土壤,微咸水灌溉引入的盐分主要增加深层土壤的盐分含量;对于高盐土壤,微咸水灌溉携带的盐分主要积累于土壤表层(0~20 cm)^[30]。米迎宾认为,3 g/L的微咸水可以作为小麦和玉米的灌溉用水,但连续使用会导致土壤发生积盐,组合灌溉最好采用咸淡交替的方式;综合土壤的积盐状况和作物产量分析,淡淡咸的组合灌溉顺序为最优方案^[31];麦秸覆盖能够减少微咸水灌溉区不同层次土壤的盐分含量,与不覆盖处理相比,覆盖处理0~20 cm、20~40 cm和0~100 cm土层土壤盐分的平均含量分别降低10.2%、14.0%和1.8%^[32]。

废水灌溉(waste water irrigation agriculture)农业在澳大利亚较为普遍,但Muyen Z在澳大利亚东南部的试验研究表明:长期废水灌溉在带来丰富的营养盐之外,也加速了地下

水污染、盐碱化以及土壤物理特性的劣变^[33]。废水盐浓度变化对作物的产量也有一定的影响, Aljaloud 的研究表明, 玉米和高粱的产量随着废水中盐含量的增加而增加, 当废水盐含量大于 2300 mg/L 时产量则会出现下降^[34]。

2.4 盐渍土盐分监测、预警、模拟、可视化及评估技术

土壤盐渍化的大面积快速监测预报一直是科学家关注的焦点。从 1999-2011 年间国家自然科学基金总共资助 14 项不同方法、数据源的土壤盐渍化监测、预报及可视化项目。主要包括 EM38、雷达遥感、MODIS、微波成像辐射计、高光谱、地统计插值与计算机制图等等^[35-40]; 在实用性评估技术上主要有: 田间尺度的土壤盐分运移与模拟研究, 土壤盐渍化综合检测与评估技术, 比如, GIS 与 EM38 相结合的快速土壤盐渍化程度评价体系、盐渍化土壤肥力与土壤适宜性评价体系、土壤盐渍化风险评价体系、土壤质量等级评价体系等等^[41-43]。同时, 在水盐平衡理论及实用模拟软件方面也取得了众多的成果, 人们基于 Schofield 的水盐平衡理论和 Henry Darcy 总结的 Darcy 定律, 提出对流—弥散方程和两域模型^[44]对土壤水盐过程进行数值模拟, 在此基础上开发出众多水盐平衡模拟软件, 最具代表性的有: CDE 模型^[45]、STM 模型^[46]、HYDRUS 模型^[47]、SHAW 模型^[48]等等。

2.5 耐盐性植被的盐分适应性与盐渍土的生态治理与改良研究

已有的研究中对沿海滩涂芦苇、大米草、互花米草、冬小麦、水稻、玉米、棉花等农作物与耐盐植物对于盐分的适应性进行了研究; 对于耐盐植物的研究现在主要集中于互花米草和大米草的研究, 主要是米草的耐盐性、群落特征以及饲用价值的探讨^[49]; 南京大学盐生植物实验室引进的一种油脂植物资源—棉葵, 该植物具有良好的耐盐性, 同时能大大提高高含盐量滩涂资源利用的经济价值。

在改良盐渍土方面, 已有的措施主要包括:

(1) 建立完善的农田灌溉水利设施, 保证旱季不缺水, 雨季不积水, 防止盐渍化的发生。“盐随水来, 盐随水去”是研究水盐动态的重要依据, 水的水平运动和垂直运动使得土壤中盐类的地球化学成分产生分异^[50]。水的运动和盐类的移动紧密结合, 土壤水分的水利工程调节是控制土壤盐渍化重要的措施。我国在 20 世纪 70 年代已经进行了大量的排水脱盐水利工程试验, 完善了盐土排水脱盐的理论体系, 建立了完整的干、支、斗、农、毛五级沟渠排水系统。目前主要的排水排盐水利工程措施有明沟排水、暗管排水、生物排水、井灌井排和盐土综合治理等。暗管排水相对于明沟排水具有较好的脱盐效率^[51], 在我国的内陆干旱、半干旱以及黄淮海地区主要实施以沟管结合、暗管排水为主的排水脱盐措施^[52]; 井灌井排措施主要应用于新疆垦区^[53]; 在东北盐碱地主要采用冲洗的方式进行脱盐^[54]; 植被种植不但能够减少地表盐分的表聚性上系, 还能通过植被蒸腾进行变相排水。已有的研究表明, 666.67 m²林地一年能够蒸腾 666.7~1333.3 m³的水分^[55], 在实际应用中生物排水主要与其他几种排水措施结合使用。在滨海高盐区主要采用海水养鱼、淡水养鱼、种稻^[3]、蓄淡压盐以及围堤挡水为主的工程措施。在盐渍土综合治理方面, 天津市采用的“节水型盐碱滩地物理—化学—生态综合改良与植被构建技术”, 在不破坏耕地取土的条件下, 通过改良土壤, 可使滨海盐碱滩地土壤含盐量快速降至 0.3% 以下, 苗木成活率达到 95% 以上^[56]。同时, 国内外在淋溶需水量核算 (Leaching Requirement)^[57-58]、排水通道的设计与布局、排水季节安排都已经形成成熟的理论体系和厘定模型^[59]。

(2) 化学改良的方式, 一些发达国家如美国、澳大利亚在盐土上, 特别在碱土上施化学改良剂^[60], 如石膏、硫酸、矿渣磷石膏, 因土地类型不同, 施入量也不同, 施用时间长短取决于当地的经验和资金的状况, 如: 日本东京大学研究向土壤中注入聚丙烯酸脂溶液与土壤形成的不透水层, 从而减少土壤水分的蒸发, 减少盐分随毛管水蒸发向表土累积, 使作物产量明显增加^[61]。

(3) 生物、生态措施, 通过农耕、种植耐盐性植物来提高对盐渍土的利用率^[62], 比如

中国科学院地理科学与资源研究所康跃虎在华北平原区利用地下咸水资源试验开发耐盐糯玉米品种^[63],有的通过杂交技术进行互花米草与玉米杂交^[64]。相对耐盐小麦、玉米、棉花品种而言,耐盐水稻品种研发速度较为滞后。最近,中美科学家共同破解了水稻的耐盐基因,为进一步的耐盐水稻培育创造了条件^[65]。2010年浙江三门转OsCYP2基因耐盐水稻培育成功,在海水全程灌溉下,抽穗率能接近70%,千粒重有20多克^[66],泰国近年来也培育出耐盐量达3%NaCl的水稻,并取得可喜的单产水平^[67]。其中,通过生物、生态措施来改善盐渍土是目前盐渍化改良的重要方向,此种方式一方面可以促进土壤脱盐;另一方面还能给农户带来额外的经济收入,更重要的是此种方法,投入成本低、易于掌握、推广性好,是农户乐于首先采用的技术措施^[3]。

3 土壤盐渍化研究的发展趋势

笔者在中国学术期刊网络出版总库 (CNKI) 和科学引文检索 (SCI) 主题栏中输入“盐渍土”及其相关关键字获得近30年来盐渍土研究的论文成果数据 (图2); 国家自然科学基金资助情况通过国家自然科学基金委员会网站查询获得 (图3), 其中国家自然科学基金包括青年基金项目、面上项目、地方科学基金项目和重点项目。

可以看出,近30年来无论是中文期刊还是英文期刊,盐渍土研究相关论文著作都呈逐渐上升的趋势,中文论文著作由1981年的130篇,上升到2011年的1078篇,30年间上升了近10倍。SCI&SSCI发文量由1981年的225篇,上升到2011年的886篇,上升了近4倍。从国内外盐渍土研究相关论文著作的数量变化来看,国内研究表现出起步晚 (1981年CNKI为130篇,SCI&SSCI

为225篇),发展快的趋势 (2011年CNKI为1078篇,SCI&SSCI为886篇)。而且进入21世纪以后,国内外盐渍土及相关研究成果呈显著增加的态势。同时,从国内自然科学基金资助的情况来看,不论数量还是资助金额近10年 (1999-2011年) 都有较大的提升,但起伏较大,呈波动上升的趋势。1999年国家资助盐渍土及相关研究仅为两项,分别为“长江河口分汊耦合系统盐度的多因子响应研究”与“黄河三角洲地下水向渤海的营养盐输送及其生态环境意义”,资助金额仅为30万元,从区位上看都位于东部较发达的地区。而到了2011年,盐渍土及相关研究受资助项目上升为21项,从东到西覆盖我国主要的盐渍土发生区域以及

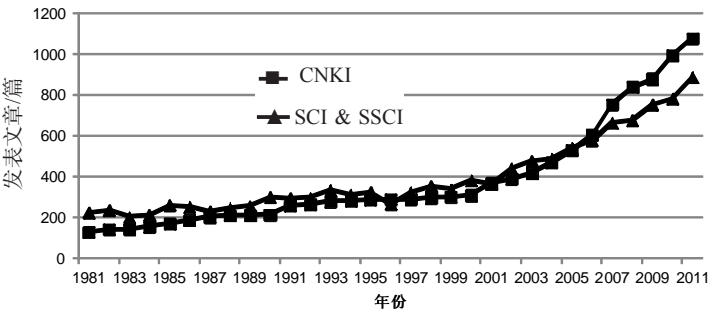


图2 近30年来盐渍土研究发表的论文著作
Fig. 2 Publications on saline soil research over 30 years

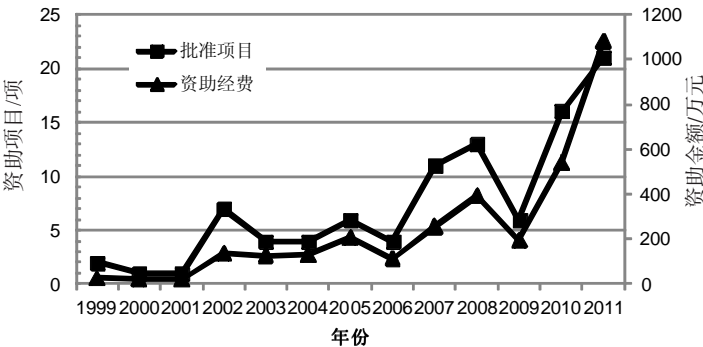


图3 盐渍土研究国家自然科学基金资助情况
Fig. 3 The situation of saline soil research funded by NNSF

重点研究领域,涉及盐渍土监测的新方法、盐渍土发育的碳汇效应以及人一盐渍土互馈演化响应关系,基金资助总额达到1078万元(图3)。由此可以看出,土壤盐渍化及相关问题在全球气候急剧变化背景下的表现和演化走向还不明朗,正得到政府决策者、生态学者以及地理学者的高度关注。

4 未来盐渍化土壤研究的热点

土壤圈是五大圈层中最核心的圈层,也是受到人类影响最明显的圈层,全球变化催生下的圈层系统协同互馈关系综合作用于土壤,使作为土壤病态化表现的土壤盐渍化发生,受到来自全球暖化的深刻影响。同时土壤盐渍化也受到区域环境要素与人类活动的交互影响,在此形势下的土壤盐渍化表现为土壤盐渍化区域性突变与全球性加剧并存、湿润半湿润区次生盐渍化与干旱半干旱区盐碱地并存、局地盐渍化减缓与加剧并存、新技术应用推广与旧田间管理体制并存、被动耐盐植被培育与主动盐渍土改良并存等等。简言之,在全球气候变化的大背景下,土壤盐渍化的表现和演化走向并不明朗。同时已有的文献对于盐渍化发生的机理性认识还不够,全球气候变化背景下的土壤盐渍化还没有一个统一的研究框架。在此背景之下,笔者认为有以下5个领域应该要重点关注:

4.1 高光谱、微波等多元遥感数据支持下的盐渍化高精度监测与制图

目前,遥感监测是大尺度土壤盐渍化监测的主要手段,也是唯一手段^[68]。盐渍土卫星遥感监测的潜力在于,借助卫星图片以及相关的处理软件可以实现盐渍土空间格局的快速制图、借助GIS的空间分析功能可以确定土壤盐渍化的演化方向和强度。但是遥感监测也存在许多不足^[69-70]:①不同的盐具有不同的电磁波谱吸收特征,特定波段只能对于特定的盐渍化类型进行监测;②植被的干扰可以导致遥感图像上象元的混合,增加盐渍化识别难度;③盐渍化是个不断变化的动态过程,遥感卫星的时间分辨率很难达到;④基于盐结皮表面的几何特征进行盐渍化识别,由于放牧和人类活动的影响,现实意义并不明显。针对遥感监测的这些不足,政府投入了大量的人力财力进行技术突破。研究表明,土壤调节植被指数(SAVI)对于土壤盐渍化的监测具有较好的效果,SAVI随着土壤盐分的上升而下降,经测定当盐含量为6900 mg/L时,SAVI为0.155;当盐含量为41000 mg/L时,SAVI降为0.104^[71]。同时,遥感监测可以直接对无植被的土壤表层盐进行直接观测,也可以通过植被生长状况来进行间接监测^[72]。

高光谱是目前进行土壤盐渍化监测较为理想的监测手段。借助多源、多时相的高光谱数据对盐渍化较为严重的区域具有很好的监测效果^[73]。但是盐渍化区域也多是农耕区和滨海地区,区域水分、有机质、土壤类型都会对光谱的反射造成干扰,特别是地表植被,比如:在滨海高盐围垦区,当地居民为了加速脱盐广泛种植水稻、棉花、玉米以及经济林木,这导致围垦区土壤盐分的反射光谱曲线并不明显,而且与实验室光谱仪(ASD)测得的理论反射曲线差异很大。同时,不同的农作物对不同光谱的吸收反射特性也有差异,如何去除植被等其他要素对光谱的影响成为目前高光谱盐分反演亟需克服的瓶颈。近二十年来,不同学者开发出十几种基于不同植被覆盖的盐分综合反演模型^[74]。但是已有的模型监测精度一直较低,准确率基本都维持在0.6以下^[74],不能满足现实生产生活的需要。虽然有的学者对这些模型的不足作了大量的改进^[74],但是效果依然没有达到对于裸地和光滩的盐分反演精度。而受制于星载高光谱仪的波段划分以及数据传输等问题,高光谱卫星数据较少,多使用机载高光谱数据,虽然有较好的盐渍化水平监测精度和时间分辨率,但是在在大尺度上监测还有很多困难。

4.2 土壤盐渍化发生与全球碳循环之间的互馈耦合关系

全球气候变化框架催生下的全球碳循环研究既是科学的前沿也有现实的需求。碳循环

研究的主要内容就是确定全球碳源和碳汇的主要类型、空间布局、碳通量以及总量平衡的清单制定^[75]。而盐渍土的面积占到地球表面积的7%，对全球生态系统平衡起到至关重要的作用，经过连续近5年的监测，中国科学院新疆生态与地理研究所研究发现，盐碱土对CO₂有很好的吸收能力。而且每平方米盐碱土每年可以吸收62~622 g的CO₂^[76-77]，其吸收量相当于植物的两倍至15倍，因为即便是热带森林每年每平方米的吸收量也仅为30~40 g，这就表明盐渍土也是一种重要的陆地碳汇系统(图4)。在此认识之上，国家批准了国家重点基础研究发展计划(973计划)“干旱区盐碱土碳过程与全球变化”项目以及国家自然科学基金项目“滨海盐渍土固碳影响要素与土壤增碳的管理调控机制研究”，以促进盐渍土碳汇过程的研究。研究发现，季节是决定盐渍土碳吸收量的一个重要因素。盐渍土碳吸收活动夏季活跃、冬季停滞；白天吸收量很小，晚上碳吸收量很大。但是盐渍土的碳吸收过程是非生命的土壤化学过程，其吸收机理、过程等还有待进一步的研究。

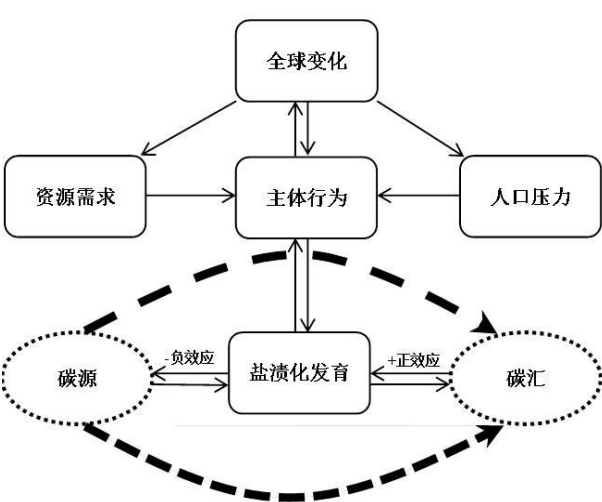


图4 全球变化框架下的土壤盐渍化研究内容
Fig. 4 The content of saline soil research in global warming settings

4.3 土地利用变化与土壤盐渍化响应关系

土地利用既是一种人类经济活动行为也是一种自然要素改造过程，不合理的土地利用模式，特别是灌溉农业的不合理开发会造成土壤盐渍化的发生。但是随着人口的膨胀、资源短缺在短期内无法解决的前提下，提高土地利用强度、开垦新的土地是当前无法避免的战略抉择。在此过程当中必然会引起一系列的土壤生态问题，比如：新的荒地的开垦对土壤界面和结构都会产生剧烈的影响^[78]，建设用地带来土地硬质表面的增加，提高了土壤表面坡面漫流的初始速度，造成了土壤中水分运移加速，导致盐分空间运移加速；农业耕作导致大量的化学肥料的投入，促进土壤有机质的聚集，有利于土壤脱盐，但却会出现土壤碱化和酸化的现象^[79-80]；农业生产中的定期和不定期灌溉以及沟渠网络的建设也会导致区域水分的空间不平衡，进而加剧盐分空间变异的复杂性^[81]。同时土地的整理和开发也会直接改变局地的土壤结构和类型(如：新土填埋、工程土方挖掘等等)，造成盐分输移通道和转移速率的变化等现象，这都应受到足够的重视，以避免土地利用急速转变过程中出现盐渍化加剧的现象。

已有的研究表明，土地利用的变化会增加流域径流的营养盐输移，进而加速下游湖泊水系灌溉、生活用水的含盐量，增加下游土壤盐渍化的风险，同时，土地利用与土壤盐渍化风险的互馈耦合关系具有极强的尺度依耐性^[82-84]。这种尺度关系的内部推演转化规律需要进一步的量化研究来确定。

4.4 土壤有机质与土壤盐分离子迁移、累积互馈机理的认识

随着耕作带来的土壤不断熟化，土壤有机质的不断升高，土壤的盐分呈不断下降的趋势。已有的研究多从基于经验统计的相关性角度了解土壤脱盐与土壤有机质的关系，没有从机理层次给出科学合理的解释^[17]。目前国内外的相关研究多集中于不同盐碱程度对土壤有机质含量的影响^[85]，但是完全忽视了有机质增加对于土体盐分迁移、累积的积极影响，笔者认为两者之间不是完全的单向作用，而是具有相互影响的互馈关系：吉林省郭前

旗灌区做的苏打盐土种稻试验发现,通过施加草炭与厩肥并搭配绿肥使土壤中的有机质增加,可以收到很好的脱盐效果。在此基础上,人们发现土壤中有机的作用很大,能够改善土壤结构,减少地面蒸发,既利于盐分下淋,又堵盐分上升。能增强微生物活动,产生各种有机酸,中和土壤碱性,释放各种养分。此外,有机质本身的吸附力还具有一定的缓冲作用^[86]。这是目前为止对于有机质脱盐的最直接的描述,但是研究仅限于对有机质有利于降低盐分的表象说明,没有从机理上给出科学的解释,比如,哪些有机质组分加速土壤的脱盐?这些有机质的哪些特性对于盐分离子的迁移起作用?这些有机质对盐分离子迁移、累积模式具有哪些影响?其影响力如何?等等问题都没能给出解释。

而且已有的研究发现,土壤有机质中的可溶性有机质组分(dissolved organic matter,简称DOM)是土壤有机质的重要组成部分,DOM比固相有机质具有更多的活性点位^[87-90]。DOM在自然环境中不仅可以影响污染物(重金属、农药)和C、N等元素的迁移能力和生物有效性^[91-92],更重要的是 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 四种盐分离子本身也是DOM的重要无机组成部分。土壤中DOM通过离子交换、吸附、络合、螯合、絮凝和沉淀等一系列反应直接与水体、土壤和底泥中的金属离子、氧化物、矿物质和有机质发生各类反应,尤其是对土壤中金属离子迁移有明显的影响,DOM的酸性基团可与金属发生络合作用,从而影响矿物的风化作用^[93]。因此,被认为是陆地生态系统、水生生态系统和湿地生态系统中一种重要的、活跃的化学组分^[94]。此外,金属离子在土壤剖面的淋溶作用与DOM也有很大关系。但是目前有机质与土体盐分离子的互馈机理的研究,特别是有机质对于盐分迁移影响的研究成果国内外都未见报道。所以,开展土壤有机质与土体盐分离子的互馈机理,对于全面了解土壤脱盐的科学过程,制定合理的区域土壤脱盐方法具有重要意义。

4.5 耐盐性植被的培育

玉米、水稻、小麦等主要农作物对于土壤盐分都具有极强的敏感性,研究表明,当土壤电导率达到 0.8dS/m 时就会对主要农作物的生长发育产生不良影响^[19]。因此,耐盐性农作物和植被是今后研究的主要方向。耐盐的作物种类很多,据南京大学盐生植物研究所统计,世界上盐生植物种类达到1560余种,其中,中国有517种。目前培育的耐盐性杂交水稻能在含3%NaCl的土壤中生长,在海水全程灌溉下,抽穗率能接近70%,千粒重有20多g^[67];耐盐性小麦的培育时间较早,中国科学院新疆生态与地理研究所推出“新冬26号”和“新冬34号”两个品种的耐盐性小麦,并成功在西部的干旱盐碱地推广,亩产超过400 kg^[95];德州市农业科学研究所引进培育的耐盐小麦品种“德抗961”能在土壤含盐量0.3%~0.6%的盐碱地上种植^[96]。大米草玉米是近年来通过以大米草与玉米的杂交培育出的新的耐盐性玉米品种,能够在0.4%的海水中生长^[64]。已有的耐盐农作物品种都解决了盐生环境下的生长问题,但是相比于正常土壤栽培环境,大多耐盐性农作物在盐生环境中的产量相对较低,表现出一定的盐分胁迫特征,新的耐盐植被的培育需要克服产量提高的瓶颈。

5 结语

我国对于土壤盐渍化及次生盐渍化的研究已经有70年的历史,由盐分离子毒害理论等基础研究,逐步过渡到盐渍土监测与修复的实践研究,进而形成了相对完整的盐渍土研究内容框架^[97]。在此框架下,结合我国丰富的土壤盐渍化类型案例进行了大量的科学研究,取得了丰硕的成果,然而仍有一些基础问题没有得到完整清晰的解释。

进入21世纪以后,随着全球气候变化问题日益突出,土壤盐渍化问题已经成为全球性生态问题。在此背景下土壤盐渍化出现许多新问题和新的挑战。通过全球尺度的土壤盐渍化监测,掌握全球土壤盐渍化的格局与趋势,对土壤盐渍化的严重地区进行重点监控并开

展样区综合治理试点甚为必要。同时,在全球气候变化的大背景下,土壤盐渍化的表现和演化走向并不明朗,这就需要在进一步完善现有土壤盐渍化研究内容的基础上对盐渍土研究出现的新问题和新挑战给予更多的重点关注。

参考文献 (References)

- [1] Ghassemi F, Jakeman A J, Nix H A. Salinisation of land and water resources: Human causes, extent, management and case studies. Canberra, Australia, 1995: 1-3.
- [2] Goossens R, Van Ranst E. The use of remote sensing to map gypsiferous soils in the Ismailia Province (Egypt). *Geoderma*, 1998, 87: 47-56.
- [3] Wang Jiali, Huang Xianjin, Zhong Taiyang et al. Review on sustainable utilization of salt-affected land. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5): 673-684. [王佳丽, 黄贤金, 钟太洋 等. 盐碱地可持续利用研究综述. *地理学报*, 2011, 66(5): 673-684.]
- [4] Yang Jingsong. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 837-845. [杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望. *土壤学报*, 2008, 45(5): 837-845.]
- [5] Zhu Tingyun. The Treatment Methods in Salt-affected Irrigation Area. Beijing: Agriculture Press, 1992. [朱庭芸. 灌区土壤盐渍化防治. 北京: 农业出版社, 1992.]
- [6] Shi Yuanchun, Xin Dehui. Comprehensive Treatment Methods of Water and Salt Movement and Droughts and Salinization in the Huang-Huai-Hai Plain. Shijiazhuang: Hebei People's Press, 1983. [石元春, 辛德惠. 黄淮海平原的水盐运动和旱涝盐碱的综合治理. 石家庄: 河北人民出版社, 1983.]
- [7] Bresler E. Simultaneous transport of solutes and water under transient unsaturated flow condition. *Water Resour. Res.*, 1973, (9): 975-986.
- [8] Guo Quanen. The response mechanism of soil salinity transfer and diversity rule to environment factor [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2010. [郭全恩. 土壤盐分离子迁移及其分异规律对环境因素的响应机制[D]. 陕西杨凌: 北农林科技大学, 2010.]
- [9] Kinraide T.B. Interactions among Ca^{2+} , Na^{+} and K^{+} in salinity toxicity: Quantitative resolution of multiple toxic and ameliorative effects. *Journal of Experimental Botany*, 1999, 50(338): 1495-1505.
- [10] Acosta J A, Jansen B, Kalbitz K et al. Salinity increases mobility of heavy metals in soils. *Chemosphere*, 2011, 85: 1318-1324.
- [11] Hall L W, Anderson R D. The influence of salinity on the toxicity of various classes of chemicals to aquatic biota. *CRC Critical Reviews in Toxicology*, 1995, 25(4): 281-346.
- [12] Francois L E, Maas E V, Donovan T J et al. Effect of salinity on grain yield and quality, vegetative growth, and germination of semi-dwarf and durum wheat. *Agron. J.*, 1986, 78(6): 1053-1058.
- [13] Katerji N, Van Hoorn J W, Hamdy A et al. Effect of salinity on water stress, growth, and yield of maize and sunflower. *Agricultural Water Management*, 1996, 30(3): 237-249.
- [14] Zeng L, Shannon M C, Lesch S M. Timing of salinity stress affects rice growth and yield components. *Agricultural Water Management*, 2001, 48(3): 191-206.
- [15] Maas E V. Salinity and citriculture. *Tree Physiology*, 1993, 12(2): 195-216.
- [16] Aldakheel Y Y. Assessing NDVI spatial pattern as related to irrigation and soil salinity management in AlHassa Oasis, Saudi Arabia. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2011: 1-10.
- [17] Chen Zirui, Wang Jinghong, He Gaobin. The distribution and evolution of the northern Jiangsu coastal saline soil. *Soil*, 1986, (4): 208-210. [陈子锐, 王景宏, 何高斌. 苏北滨海盐渍土的分布及演变. *土壤*, 1986, (4): 208-210.]
- [18] Guo Quanen, Wang Yiquan, Ma Zhongming et al. Effect of vegetation types on soil salt ions transfer and accumulation in soil profile. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(13): 2711-2720. [郭全恩, 王益权, 马忠明 等. 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*, 2011, 44(13): 2711-2720.]
- [19] Fang H, Liu G, Kearney M. Georelational analysis of soil type, soil salt content, landform, and land use in the Yellow River Delta, China. *Environmental management*, 2005, 35(1): 72-83.
- [20] Zhang Miaoxian, Yang Jingsong, Li Dongshun. Salt migration characteristics of silt loam soil by rainstorm. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(2): 47-49. [张妙仙, 杨劲松, 李冬顺. 特大暴雨作用下土壤盐分运移特征研究. *中国生态农业学报*, 2004, 12(2): 47-49.]
- [21] Liu Guangming, Yang Jingsong. Salt dynamics in soil under conditions of different groundwater tables and salinities. *Acta Pedologica Sinica*. 2003, 40(1): 65-69. [刘广明, 杨劲松. 地下水作用条件下土壤积盐规律研究. *土壤学报*. 2003, 40(1): 65-69.]

- [22] Zhang Miaoxian, Yang Jingsong, Li Dongshun et al. Optimum ground water depths for different optimized objectives. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(suppl.1): 72-75. [张妙仙, 杨劲松, 李冬顺 等. 各种优化目标的最佳地下水埋藏深度探讨. *土壤通报*, 2001, 32(增刊1): 72-75.]
- [23] Yu Shipeng, Yang Jingsong, Liu Guangming. Impact on soil salinization in Yangtze River estuary by Three-Gorge Project. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science*, 2009, 28(6): 1013-1017. [余世鹏, 杨劲松, 刘广明. 三峡工程对长江河口土壤盐渍化演变影响. *辽宁工程技术大学学报: 自然科学版*, 2009, 28(6): 1013-1017.]
- [24] Zhu Shouquan, Shan Guangzong, Hu Jichang et al. Preliminary analysis on soil salinization along the proposed east route in South-to-North Water Transfer Project. *Geographical Research*, 1984, 3(4): 111-118. [祝寿泉, 单光宗, 胡纪常 等. 南水北调东线沿线土壤盐渍化初步分析. *地理研究*, 1984, 3(4): 111-118.]
- [25] El-Sabh M I. Effect of the Aswan high dam on the distribution of salinity in the Suez Canal. *Nature*, 1968, 218: 758-760.
- [26] Yu Shipeng, Yang Jingsong, Liu Guangming. Effect of clay interlayers on soil water salt movement in easily salinized regions. *Advances in Water Science*, 2011, 22(4): 495-501. [余世鹏, 杨劲松, 刘广明. 易盐渍区粘土夹层对土壤水盐运动的影响特征. *水科学进展*, 2011, 22(4): 495-501.]
- [27] Suarez D L, Wood J D, Lesch S M. Effect of SAR on water infiltration under a sequential rain-irrigation management system. *Agricultural Water Management*, 2006, 86(1/2): 150-164.
- [28] Liu Chunqin, Yang Jingsong, Wu Yuxi et al. Soil water and salt dynamic under film mulched drip irrigation. *Journal of Anhui University of Technology*, 2010, 27(1): 94-97. [刘春卿, 杨劲松, 吴玉喜 等. 覆膜滴灌条件下土壤水盐运移规律. *安徽工业大学学报: 自然科学版*, 2010, 27(1): 94-97.]
- [29] Ma Wenjun, Cheng Qinjuan, Li Liangtao et al. Effect of slight saline water irrigation on soil salinity and yield of crop. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1): 73-80. [马文军, 程琴娟, 李良涛 等. 微咸水灌溉下土壤水盐动态及对作物产量的影响. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 73-80.]
- [30] Yang Shuqing, Yang Jinzhong, Shi Haibin. Experimental research on crop growth and salinity of soil under light saline water irrigation. *China Rural Water and Hydropower*, 2008, (7): 32-42. [杨树青, 杨金忠, 史海滨. 微咸水灌溉对作物生长及土壤盐分影响的试验研究. *中国农村水利水电*, 2008, (7): 32-42.]
- [31] Mi Yingbin, Qu Ming, Yang Jingsong et al. Effects of rotational irrigation with saline water on soil salinity and crop yield. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(6): 83-86. [米迎宾, 屈明, 杨劲松 等. 咸淡水轮灌对土壤盐分和作物产量的影响研究. *灌溉排水学报*, 2010, 29(6): 83-86.]
- [32] Wu Qinghua, Zhang Wei, Lin Wenjing et al. Study on soil water dynamics evolution law under straw mulching condition. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(4): 76-82. [吴庆华, 张薇, 蔺文静 等. 秸秆覆盖条件下土壤水动态演变规律研究. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(4): 76-82.]
- [33] Muyen Z, Moore G A, Wrigley R J. Soil salinity and sodicity effects of wastewater irrigation in South East Australia. *Agricultural Water Management*, 2011, 99: 33-41.
- [34] Aljaloud A A, Hussain G, Alsaati A J et al. Effects of wastewaters on plant growth and soil properties. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1993, 7(2): 173-179.
- [35] Slavich P G, Petterson G H. Estimating average rootzone salinity from electromagnetic induction (EM-38) measurements. *Soil Research*, 1990, 28(3): 453-463.
- [36] Swift C T, McIntosh R E. Considerations for microwave remote sensing of ocean-surface salinity. *Geoscience and Remote Sensing*, 1983, (4): 480-491.
- [37] Kerr Y H, Waldteufel P, Wigneron J P et al. Soil moisture retrieval from space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission. *Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(8): 1729-1735.
- [38] Yao Rongjiang, Yang Jingsong, Liu Guangming et al. Study on classification and evaluation of soil salinity profiles using with electromagnetic induction EM38. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2007, 18(4): 54-59. [姚荣江, 杨劲松, 刘广明 等. 电磁感应仪 EM38 用于土壤盐渍剖面分类与评价研究. *中国地质灾害与防治学报*, 2007, 18(4): 54-59.]
- [39] Walter C, Mcbratney A B, Douaoui A et al. Spatial prediction of topsoil salinity in the Chelif Valley, Algeria, using local ordinary Kriging with local variograms versus whole-area variogram. *Soil Research*, 2001, 39(2): 259-272.
- [40] Naumann J C, Anderson J E, Young D R. Linking physiological responses, chlorophyll fluorescence and hyperspectral imagery to detect salinity stress using the physiological reflectance index in the coastal shrub, *Myrica cerifera*. *Remote sensing of environment*, 2008, 112(10): 3865-3875.
- [41] Yang Jingsong, Yao Rongjiang. Evaluation of soil quality in reclaimed coastal regions in north Jiangsu Province. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(3): 410-415. [杨劲松, 姚荣江. 苏北海涂围垦区土壤质量综合评价研究. *中国生态农业学报*, 2009, 17(3): 410-415.]
- [42] Yang Qiyong, Yang Jingsong, Li Xiaoming et al. GIS-based soil suitability evaluation of cultivated land in saline soil

- improvement district. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(3): 477-485. [杨奇勇, 杨劲松, 李晓明, 等. 基于GIS的盐渍土改良区耕地土壤适宜性评价. *自然资源学报*, 2011, 26(3): 477-485.]
- [43] Yao Rongjiang, Yang Jingsong, Chen Xiaobing et al. Evaluating soil salinization risk in typical coastal reclaimed regions in North Jiangsu Province. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(5): 1000-1006. [姚荣江, 杨劲松, 陈小兵 等. 苏北海涂典型围垦区土壤盐渍化风险评估研究. *中国生态农业学报*, 2010, 18(5): 1000-1006.]
- [44] Chen C, Thomas D M, Green R E. Two-domain estimation of hydraulic properties in macropore soils. *Soil Sci. Soc. Am.*, 1993, 57: 680-686.
- [45] Ellsworth T R, Shouse P J, Skaggs T H et al. Solute transport in unsaturated soil: Experimental design, parameter estimation, and model discrimination. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, 60(2): 397-407.
- [46] Guo R, Feng Q, Si J et al. Progress in the study of models for water and salinity transport in soils. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(3): 527-534.
- [47] Hanson B, Hopmans J W, Simunek J. Leaching with subsurface drip irrigation under saline, shallow groundwater conditions. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(2): 810.
- [48] Li R, Shi H, Takeo A et al. Scheme of water saving irrigation in autumn based on SHAW model in Inner Mongolia Hetao irrigation district. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering/Nongye Gongcheng Xuebao*, 2010, 26(2): 31-36.
- [49] Zhong Chongxin, Zhuo Rongzong. *Spartina anglica* was imported into China for twenty years. *Journal of Nanjing University*, 1985(special issue): 31-35. [仲崇信, 卓荣宗. 大米草在我国的二十二年. *南京大学学报*, 1985(专辑): 31-35.]
- [50] Wang Zunqin. *Salt-affected Soil in China*. Beijing: Science Press, 1993. [王遵亲. *中国盐渍土*. 北京: 科学出版社, 1993.]
- [51] Yao Zhongying, Zhao Zhengling, Su Xiaolin. Application of subsurface pipe drainage in drought-prone region. *Journal of Tarim University*, 2005, 17(2): 76-78. [姚中英, 赵正玲, 苏小琳. 暗管排水在干旱地区的应用. *塔里木大学学报*, 2005, 17(2): 76-78.]
- [52] Zhao Shaoyong. Application of subsurface pipe drainage technology. *Ningxia A&F Technology*, 2005, (6): 67. [赵少勇. 暗管排水技术应用. *宁夏农林科技*, 2005, (6): 67.]
- [53] Gao Changyuan. Open ditch drainage and tube well drainage. *Ground Water*, 2001, 23(4): 194. [高长远. 明沟排水与竖井排灌. *地下水*, 2001, 23(4): 194.]
- [54] Li Huiping. Improving the salt-affected soil by using irrigation. *Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy*, 2010, (4): 45-46. [李慧萍. 冲洗改良盐碱土. *黑龙江水利科技*, 2010, (4): 45-46.]
- [55] Li Liqun. *Basic Knowledge on Saline Soil*. Beijing: Science Press, 1986. [黎立群. *盐渍土基础知识*. 北京: 科学出版社, 1986.]
- [56] 天津攻克滨海盐碱绿化难题, 江苏沿海全面推广[EB/OL]. 凤凰网, <http://finance.ifeng.com/roll/20101118/2908215.shtml>.
- [57] Letey J, Hoffman G J, Hopmans J W et al. Evaluation of soil salinity leaching requirement guidelines. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(4): 502-506.
- [58] Wang Xuefeng, You Wenrui. Irrigation leaching requirement of salt-affected soil with a highly salinized surface horizon. *Acta Pedologica Sinica*, 1994, 31(2): 190-196. [王学锋, 尤文瑞. 表层盐化土壤的灌溉淋洗需要量. *土壤学报*, 1994, 31(2): 190-196.]
- [59] Shi Yuanchun. *Reclamation of Saline-alkali Soils: Diagnosis, Management and Reclamation*. Beijing: Science Press, 1986. [石元春. *盐碱土改良: 诊断、管理、改良*. 北京: 农业出版社, 1986.]
- [60] Hulugalle N R, Weaver T B, Ghadirri H et al. Changes in soil properties of an eastern Australian vertisol irrigated with treated sewage effluent following gypsum application. *Land Degradation & Development*, 2006, 17: 527-540
- [61] 土壤盐渍化[EB/OL]. 互动百科, www.hudong.com/wiki/%E5%9C%9F%E5%A3%A4%E7%9B%90%E6%B8%8D%E5%8C%96?prd=citiao_right_xiangguancitiao.
- [62] Zhao Mingfan. The status and tendency of salt-affected soil research. *World Forestry Research*, 1994, (1): 84-86. [赵明范. 世界土壤盐渍化现状及研究趋势. *世界林业研究*, 1994, (1): 84-86.]
- [63] Kang Y, Chen M, Wan S. Effects of drip irrigation with saline water on waxy maize (*Zeamays L. var. Ceratina Kulesh*) in North China Plain. *Agricultural Water Management*, 2010, 97: 1303-1309.
- [64] Feng Chen, Dang Gaobing, Xie Jiancang et al. Salt-tolerant effect of rice grass-maize and improvement on saline soil. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(6): 47-50. [冯琛, 党高兵, 解建仓 等. 大米草玉米的耐盐效果及对盐渍化土壤的改良试验. *水土保持通报*, 2011, 31(6): 47-50.]
- [65] Ren Z H, Gao J P, Li L G et al. A rice quantitative trait locus for salt tolerance encodes a sodium transporter. *Nature Genetics*, 2005, 37(10): 1141-1146.

- [66] Guangdong Agricultural Sciences Editorial Office. The breakthrough of transgenic salt-tolerant rice breeding in Sanmen, Zhejiang Province. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2010, (10): 234. [《广东农业科学》编辑部. 转基因耐盐水稻新品种培育在浙江三门突破. *广东农业科学*, 2010, (10): 234.]
- [67] 泰国培育成功最耐盐的水稻[EB/OL]. 生物通网, www.ebiotrade.com/newsf/2001-9/L019113113.htm.
- [68] Metternicht G I, Zinck J A. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85(1): 1-20.
- [69] Hunt G., Salisbury J, Lenhoff, C. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: V. Halides, phosphates, arsenates, vanadates and borates. *Modern Geology*, 1972, 3: 121-132.
- [70] Eklund P, Kirkby S, Salim A. Data mining and soil salinity analysis. *International Journal of Geographical Information Science*, 1998, 12: 247-268.
- [71] Alhammadi, M S, Glenn E P. Detecting date palm trees health and vegetation greenness change on the eastern coast of the United Arab Emirates using SAVI. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(6): 1745-1765.
- [72] Mougenot B, Pouget M, Epema G. Remote sensing of salt-affected soils. *Remote Sensing Reviews*, 1993, 7: 241-259.
- [73] Yong-Ling W, Peng G, Zhi-Liang Z. A spectral index for estimating soil salinity in the Yellow River Delta Region of China using EO-1 hyperion data. *Pedosphere*, 2010, 20(3): 378-388.
- [74] Zhang T T, Zeng S L, Gao Y et al. Using hyperspectral vegetation indices as a proxy to monitor soil salinity. *Ecological Indicators*, 2011, 11: 1552-1562.
- [75] Maier-Reimer E, Hasselmann K. Transport and storage of CO₂ in the ocean: An inorganic ocean-circulation carbon cycle model. *Climate Dynamics*, 1987, 2(2): 63-90.
- [76] Li Yan, Wang Qinxue, Ma Jian et al. Water, heat and CO₂ transfer over a saline desert in the arid area. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(1): 33-39. [李彦, 王勤学, 马健 等. 盐生荒漠地表水、热与CO₂输送的实验研究. *地理学报*, 2004, 59(1): 33-39.]
- [77] Liu Ran, Wang Qinxue, Tang Lisong et al. Seasonal variation in water, heat and CO₂ fluxes and its driving forces over a saline desert. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 67-75. [刘冉, 王勤学, 唐立松 等. 盐生荒漠地表水热与二氧化碳通量的季节变化及驱动因素. *生态学报*, 2009, 29(1): 67-75.]
- [78] Liu Yunlong, Lu Jun, Wang Renchao et al. Soil structure, nutrient accumulation and water retention character in eroded hilly red soil after virecence. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(4): 79-82. [柳云龙, 吕军, 王人潮 等. 低丘侵蚀红壤垦种绿化后土壤结构、养分积聚和持水性能. *水土保持学报*, 2000, 14(4): 79-82.]
- [79] Yu Renpei, Yang Daoping. Studies on the process of soil alkalization I. the effect of sodium bicarbonate on the alkalization of soil. *Acta Pedologica Sinica*, 1982, 19(4): 344-350. [俞仁培, 杨道平. 土壤碱化过程与实质的研究: 重碳酸钠对土壤碱化的作用. *土壤学报*, 1982, 19(4): 344-350.]
- [80] Zheng Daxian, Sha Jiqin. The change in soil properties under beefwood shelter belt on the aeolian sandy coast in Fujian and its influence on the reforestation of the slashland. *Acta Geographica Sinica*, 1994, 49(4): 345-352. [郑达贤, 沙济琴. 福建滨海木麻黄林下土壤性质的变化及其对林带更新的影响. *地理学报*, 1994, 49(4): 345-352.]
- [81] Yu Shipeng, Yang Jingsong, Liu Guangming. Study on prevention and control of secondary soil salinization under intensifying irrigation and straw returning in Huang-Huai-Hai Plain farmland. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(3): 1-4. [余世鹏, 杨劲松, 刘广明. 优化灌溉与秸秆还田防控黄淮海平原农田土壤次生盐渍害研究. *灌溉排水学报*, 2009, 28(3): 1-4.]
- [82] Sivapalan M, Ruprecht J K, Viney N R. Water and salt balance modelling to predict the effects of land-use changes in forested catchments. 1. Small catchment water balance model. *Hydrological Processes*, 1996, 10(3): 393-411.
- [83] Sivapalan M, Viney N R, Ruprecht J K. 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*, 1996, 10(3): 413-428.
- [84] Sivapalan M, Viney N R, Jeevaraj C G. Water and salt balance modelling to predict the effects of land-use changes in forested catchments. 3. The large catchment model. *Hydrological Processes*, 1996, 10(3): 429-446.
- [85] Mavi M S, Marschner P, Chittleborough D J et al. Salinity and sodicity affect soil respiration and dissolved organic matter dynamics differentially in soils varying in texture. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 45: 8-13.
- [86] Chen Enfeng, Wang Ruyong, Wang Chunyu. The progress and tendency of saline soil emendation in china. *Chinese Journal of Soil Science*, 1979, (1): 1-4. [陈恩凤, 王汝镛, 王春裕. 我国盐碱土改良研究的进展与展望. *土壤通报*, 1979, (1): 1-4.]
- [87] Qualls R G, Haines B L. Geochemistry of dissolved organic nutrients in water percolating through a forest ecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1991, 55(4): 1112-1123.
- [88] Kuiter A T, Mulder W. Water soluble organic matter in forest soils. *Plant and Soil*, 1993, 152(2): 225-235.
- [89] Temminghoff E J M, Vander Zee S E A T M, De Haan F A M. Copper mobility in a copper-contaminated sandy soil as affected by pH and solid and dissolved organic matter. *Environ. Sci. & Tech.*, 1997, 31(4): 1109-1115.

- [90] Kaiser K, Zech W. Rates of dissolved organic matter release and sorption in forest soils. *Soil Science*, 1998, 163(9): 714.
- [91] Grasso D, Chin Y, Weber W J. Structural and behavioral characteristics of a commercial humic acid and natural dissolved aquatic organic matter. *Chemosphere*, 1990, 21(10): 1181-1197.
- [92] Li Rui, Qu Ming. Effects of dissolved organic matter on environment. *Ecology and Environment*, 2004, 13(2): 271-275. [李睿, 屈明. 土壤溶解性有机质的生态环境效应. *生态环境*, 2004, 13(2): 271-275]
- [93] Lin C F, Lee D Y, Chen W T et al. Determination of stability constant for the dissolved organic matter/copper (II) complex using a real-time full spectra fluorescence spectrophotometer. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*. 1993, 24(19/20): 2585-2593.
- [94] Denny C M, Elliott H A. Soil adsorption of cadmium from solutions containing organic ligands. *Journal of Environmental Quality*, 1982, 11(4): 658-663.
- [95] 我国成功培育出耐盐小麦新品种[EB/OL]. 新华网, http://news.xinhuanet.com/newscenter/2009-05/03/content_11303840.htm.
- [96] Zhang Kunpu, Yang Xiufeng, Zhang Min. Salt-tolerant, high-yield winter wheat variety: DEKANG 961. *China Rural Science & Technology*, 2003, (9): 22. [张坤普, 杨秀凤, 张敏. 耐盐、高产冬小麦新品种: 德抗 961. *中国农村科技*, 2003, (9): 22.]
- [97] Li Baoguo, Li Yunzhu, Shi Yuanchun. Thirty years (1973-2003): Research on soil water and salt movement. *Journal of China Agricultural University*, 2003, (Suppl.1): 5-19. [李保国, 李韵珠, 石元春. 水盐运动研究 30 年 (1973-2003). *中国农业大学学报*, 2003, (增刊 1): 5-19.]

The Present Situation and Hot Issues in the Salt-affected Soil Research

LI Jianguo¹, PU Lijie^{1,2}, ZHU Ming¹, ZHANG Runsen¹

(1. *Department of Land Resources and Tourism Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China;*

2. *Key Laboratory of Land Use, Ministry of Land and Resources, Beijing 100029, China)*

Abstract: With the global warming, soil salinization has become a global concern in the world, and about 7% of the global land is threatened by salinity. In addition, this figure is rising. Soil salinization in China is critical, and the area of salt-affected soil is vast, which poses a great threat to agricultural development. This study summarizes the framework of the soil salinization research in China over the past 70 years, and make comments on the inadequencies in previous studies at home and abroad. This study summarizes the present situation and future tendency of soil salinization research across the world in the last 30 years by using the literature database and data-sharing network, and identifies five research priorities and orientations for providing new ideas to carry out the saline soil research in the future.

Key words: saline soil; progress of research; present situation; hot issues