

黄河三角洲盐碱地根土水交互过程及其调控

赵英,于金艺,胡秋丽,赵惠丽,索立柱,王毅,吴楠

(鲁东大学 资源与环境工程学院,山东 烟台 264039)

摘要:当前,黄河三角洲盐碱农业发展要求观念突破,由治理盐碱地适应作物向选育耐盐碱植物适应盐碱地转变。黄河三角洲重要的作物类型有小麦、玉米、大豆等,如何创建合理的耕作栽培体系并能基于土壤盐渍状况辅助耐盐碱作物选育是重点和难点。理论上,植物耐盐和土壤改良可以相互促进、“相向而行”,这亟需突破作物适生改土机制与配套栽培技术。就此,本文聚焦于根土水交互作用过程及其调控机理,提出了以下研究途径。首先,明确区域根-土-水三者耦合关系及其对土壤改良、耕作方式和种植模式的响应特征;其次,结合区域浅地下咸水条件和土壤盐碱特征,探寻耕作压实的最佳阈值;最后,研发根层水肥盐优化环境营建技术,促进耐盐碱作物育种。本文为基于盐渍土壤根土过程研究促进作物育种提供了重要思路。

关键词:结构稳定性;土壤压实;土壤显微技术;模型模拟;耐盐碱作物选育

中图分类号:S156.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-8020(2023)02-0097-10

黄河三角洲位于渤海之滨的黄河入海口,是全国最大的三角洲。黄河三角洲盐渍土是中国重要的后备土地资源,盐渍土面积约44万 hm^2 ,占全区面积的一半以上。由于黄河的淤积造陆,每年形成约667 hm^2 左右滩涂新淤地,然而,由于地下水中的可溶性盐随着强烈的水分蒸发不断向表层积累,新生土地盐渍化程度和面积不断增大。黄河三角洲地下潜水普遍埋深较浅(平均埋深为1.14 m),且矿化度较高(含盐量平均值为 $14.3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$),再加上海水浸润顶托作用,土壤含盐量高且极易出现季节性返盐,由此促使土壤次生盐渍化发生风险较高。该区土壤由黄河冲积母质发育而来,质地较轻,不利于土壤团聚体形成。受海水灌溉影响,土壤盐分来源主要为海水氯化物和硫酸盐类的河积粉砂和潮汐沉积物^[1]。土壤中 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 等可溶性盐分含量较高,更加不利于土壤颗粒的凝聚胶结和土壤养分的保持,肥力水平总体较低,限制了农田生产力提升和区域农业可持续发展。目前,黄河三角洲被列入国家级生态农业开发区,伴随这些沿海地区的开发,大面积的盐碱地综合治理和盐碱农业高效发展成为亟待解决的

问题。

2021年10月习近平总书记视察黄河三角洲,提出了“治理盐碱地适应作物”向“选育耐盐碱植物适应盐碱地”转变的新观念。这是一个重大的思想突破,倡导土壤科学家为耐盐碱作物育种服务,重点突破植物适生改土机制与配套栽培技术。诚然,盐碱环境的作物育种是一个新问题,也是一个老话题。耐盐碱作物的选育绝非易事,除了利用当前先进的基因技术,作物生存环境的创建及其长期的适应性评价也非常重要。当前,黄河三角洲重要的作物类型有小麦、玉米、大豆、水稻等,如何创建合理的种植体系并能基于土壤盐渍状况辅助耐盐碱作物基因表达和选育是未来研究的重点和难点。例如,现代高效的粮豆轮作种植体系不仅受土壤类型和气候条件的影响,而且取决于轮作的作物类型(品种)及其配套农作措施形成的不同的接续方式。这其中的关键是如何通过根土水交互的过程及其作用机理解析,结合区域浅地下咸水条件和土壤贫瘠特征,研发盐碱地根层水肥盐优化环境营建与增碳培肥技术,建立多种作物配置适应性种植根际抑盐、“因地

收稿日期:2022-11-03;修回日期:2023-01-25

基金项目:泰山学者青年专家项目(201812096);山东省杰出青年基金项目(ZR2019JQ12)

通信作者简介:赵英(1979—),男,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为土壤水文过程及其机理。E-mail:yzhaosoils@gmail.com

制宜”的耕作制度,并示范应用。

1 黄河三角洲盐碱地适生改土技术

1.1 黄河三角洲盐渍土物理化学改良技术

盐渍化土壤盐分含量高、土壤孔隙度小、渗透率低、土壤结构差、营养缺乏、微生物群落结构简单且活性低,严重限制了农田生产力提升和区域农业可持续发展^[2]。土壤改良是通过改善土壤成分和结构来增强土壤渗透性能、提高土壤肥力、抑制土壤返盐。土壤盐渍化破坏土壤结构,主要表现在 Na^+ 破坏团聚体以及分散土壤黏粒。由此,盐碱地改良的首要目的是降低盐度和 pH 值,增强土壤团聚性能。水稳定性团聚体是土壤肥力的基础,盐碱化土壤颗粒团聚作用微弱,水稳定性团聚体不仅数量少,而且大多为小团聚体,容易形成毛管孔隙,这一方面加速了盐分表聚,另一方面抑制盐分淋洗^[3]。显然,加强土壤颗粒团聚作用,提高大团聚体数量,是创建良好作物根区土壤环境的关键。粘粒、无机胶结剂(多价阳离子如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、碳酸盐、氧化物)和有机胶结剂(土壤有机质、作物残体和真菌菌丝)是团聚体形成与稳定性维系的三大类胶结物质;只有当土壤粘粒或 SOC 含量低时,阳离子才在土壤团聚过程中起主导作用^[4-5]。研究表明化学改良剂中 Ca^{2+} 具有将土壤矿物质和有机物质相结合的能力,从而对 SOC 起到物理保护作用。例如,复合改良措施如“秸秆还田+脱硫石膏较秸秆还田”在降低土壤 pH、全盐量及改善土壤结构方面的效果更好^[6]。然而,目前科学界尚缺乏对不同改良技术的系统比较分析,也未能有效量化这些措施对土壤结构的影响并应用于耐盐碱作物育种之中。

1.2 黄河三角洲盐渍土生物改良技术

生物改良技术是当前国际盐碱地治理的重要手段,其中种植盐生植物是经济环保可持续的重要措施,也是转变“改地适种”为“改种适地”的主要途径。实际表明,种植耐盐植物是培肥盐碱土的重要举措,对降低土壤盐分含量作用明显。种植耐盐植物可以降低土壤容重,增加有机质含量,提高土壤大团聚体的比例和有机碳含量^[7]。候贺贺^[8]对黄河三角洲盐碱地生物改良的研究发现,种植耐盐植物可提高土壤有机质含量、降低土

壤容重和盐分含量,但不同植物脱盐效果差异较大,未能总结出共性规律。最新研究发现,当电导率在 $0.4 \sim 2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 之间,向土壤中添加外源有机质,可以完全恢复微生物活性;当电导率大于 $2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,微生物活性只能部分恢复,应该考虑盐分淋溶与有机质改良的综合调控^[9]。张凌云等^[10]发现施用盐碱土生态修复材料能显著改善滨海盐渍土的理化性质,土壤含盐量、土壤容重、pH 值均有所降低,土壤速效养分和土壤有机质含量得到提高。

1.3 植物耐盐适生微环境创建

适生改土是指通过改善土壤环境,使土壤更加适合植物生长的一种土地治理技术。在黄河三角洲这样盐渍化严重的地区,适生改土可以通过靶向性的根区微环境营造来帮助植物生长和提高土地利用效益。通常,植物通过释放根系分泌物来适应或改善土壤逆境。这主要体现在根系分泌物通过酸化、络合、螯合和置换反应等途径来达到降碱抑盐的目的,同时活化难溶性矿物质为植物提供可吸收的有效养分^[11]。然而,根系分泌物的数量和组成因生物(如植物类型和根系性状)和非生物(如环境胁迫和土壤结构)因素而异^[12]。一般而言,非胁迫环境中具备较大比根长和比根面积的植物通常释放较多的根系分泌物,更能调控土壤微环境。然而,在盐渍胁迫下,其关系仍不确定。此外,研究表明^[13-15]耐盐植物将 30% 左右的光合产物输送到根系,其中 40% 以上的物质以根系分泌物的形式释放到根际,为土壤微生物提供碳源或刺激微生物代谢物的产生,增强植物对盐胁迫的适应性。值得注意的是,根际土壤微生物比非根际微生物对环境胁迫表现出更敏感响应特性^[16]。根际微生物驱动了根际的氮素转化过程,而植物可以通过根系分泌物介导微生物加快根际氮素循环、提高氮素可利用性^[17]。目前国内外已开展了大量关于盐碱土微生物群落(如细菌和真菌)组成和多样性的研究,相关高通量测序技术十分成熟。然而,Benidire 等^[18]发现土壤微生物间的相互作用比群落组成的变化在承受环境胁迫下的潜力更大,强调加深土壤微生物间互作机制的探索有助于提高微生物的定向调控能力。近年来,宏基因组测序技术已成为研究土壤微生物物种信息和功能基因信息的成熟方法,可

在高通量测序基础上进行基因和功能层面的深入研究^[19],但迄今为止仍缺乏基于宏基因组测序技术探索根际功能性微生物对土壤盐碱环境响应特性的研究。

2 盐碱地根土水交互过程及其耦合效应

2.1 种植模式对根土环境的影响

根系是植物吸收养分的主要功能器官,根系的形态、结构及生理性状等直接决定着植物获取养分的能力和效率^[20]。根系性状包括形态(直径、比根长、组织密度等)、结构(根系深度、分支结构)、化学(养分含量、根系分泌物)、生理(根系呼吸速率、养分吸收速率)及生物学(菌根共生)的性状。根系性状具有一定的可塑性,植物可以调整根系形态、解剖结构等以适应环境中养分资源可利用性的变化^[21]。研究发现覆膜滴灌条件下,三年的棉花/盐生植物间作可减少盐碱土盐分,提高土壤理化性质和作物生产力,并在传统单作棉花的基础上提出了新的棉花间作体系,作为改善土壤盐碱化和作物生产力的环境友好型修复方法^[22]。胡宏昌等^[23]发现膜下滴灌条件下,棉花根系总量是漫灌条件下的1.6倍。根系是植物与土壤互作的枢纽,也是植物响应土壤逆境胁迫的“先锋”器官^[24]。根系功能性状是指示植物对周围环境的响应和效应能力的有效指标^[25-26]。有研究报道,适宜环境中,根系通常表现出较小的根直径、较高的比根长(单位面积内细根质量和长度的比值)和根长密度(单位面积内所有根系的总长度),从而获取更多的土壤水分和养分,促进植物生长^[27];而在逆境环境下,植物往往表现出相反的根性状,生长较慢且保守^[28]。然而,目前基于根系性状的研究多集中于森林和草地生态系统,极少关注滨海盐碱地,亟需探索不同类型盐生或耐盐植物根系性状的特性,揭示其对逆境胁迫的适应机制和一般性规律,以促进盐碱地改良植物的筛选。

轮作可提高作物根系多样性,进而增加根系改善压实土壤结构的能力。一般而言,具有直根系的作物比须根作物具有更强的穿透能力,进而有更强的缓解压实土壤的能力^[29]。研究表明苜蓿和菊苣相对于萝卜和草本须根作物具有更强的改善能

力^[30]。但作物对压实土壤的缓解能力即便在同一根系类型作物中也随作物品种的不同而不同。例如,水稻^[31]和小麦^[32]不同品种之间在穿透压实土壤能力方面存在差异。文献^[33]研究指出,如果在筛选潜在的基因型时适当注意根系的穿透性和根系的内部通气性,则有望通过育种提高根系对压实土壤的穿透性。但由于不同作物类型和品种之间根系结构差异性和土壤性质的不同,不同植物种类的根系性状与土壤结构形成仍存在许多不确定性^[31,34],比较同一作物中不同基因型的研究相对更加缺乏。最新研究显示相对于野生型拟南芥和水稻,对乙烯不敏感的突变体拟南芥和水稻具有更强的穿透压实土壤的能力,说明植物根系穿透压实土壤的能力取决于根部乙烯富集浓度的调控作用,而非传统上认为受限于土壤容重^[35],这为植物缓解压实土壤提供了新的思路。

2.2 隔层对土壤水盐运移的正负效应

传统耕作主要有翻耕和旋耕。大量的研究表明传统耕作在改善耕层土壤环境中发挥着积极的作用,但也有越来越多的研究指出传统的耕作方式存在着土壤压实的弊端^[36-37]。土壤压实的表现一方面造成土壤大孔隙数量减少,容重增加,限制土壤水气向下运动^[36,38];另一方面,土体中压实层的存在减缓地下水向上运动,抑制作物根系向下生长。在盐碱地,这同样具有限制地下水返盐的作用,对植物生长有益,可能反而有助于耐盐植物育种。大型机具耕作过程中往往会形成犁底层,其作用效应和土壤隔层类似。当前,有关犁底层对土壤水盐运移的影响研究偏少,但隔层或者层状土影响水盐过程的机理相对比较明确。层状土壤中水分向下运动相比于均质土壤显著不同。例如在上细下粗型分层土壤情况下,文献^[39]指出,当湿润峰到达两层土壤界面时停止移动,达到最大持水量后才会入渗到下层土壤,且入渗速率由不稳定变为稳定。赵沛伦^[40]阐述了上细下粗型分层土壤持水能力较高的原因,指出持水能力增加的原因主要是下面粗毛管对上面细毛管的支持力,从而增加上层土壤持水量。Nicholson等^[41]利用模型发现在排水过程中下层粗质土壤达到的最大吸力也能维持上层细质土壤存在一定厚度的水分饱和层,从而提高上层匀质土壤持水能力。

隔层土壤水分向上运动取决于各分层土壤的

质地、分层之间质地差异性、分层厚度、分层顺序及地下水位的高低。史文娟等^[42]发现夹砂层对于蒸发既有抑制又有促进的作用,主要取决于夹砂层与地下水位之间的距离。隔层对土壤盐分运移的影响目前同样受到关注。隔层的存在一般通过降低土壤水分入渗从而减少土壤盐分的向下淋溶。相反,在土壤蒸发过程中隔层具有抑制地下盐分向上运动的作用。史文娟等^[43]通过研究蒸发条件下地下水埋深与夹砂层共同作用下水盐运移特性,发现不同层位的砂层对水盐运动的影响差异明显。当砂土层在表层时具有加速水盐运动的作用,当层位为 35 cm 时可抑制潜水蒸发量和土壤表层返盐,水盐的抑制率随砂层厚度的增加而增大。余世鹏等^[44]等基于河南商丘 20 年的研究发现,下层黏土对于表层土壤具有很好的保水隔盐能力,但在黏土层容易出现大量积盐的现象。

2.3 压实条件下根土水交互作用关系

厘清压实对根土水相互作用的影响机制是构建土壤力学、水力学函数并建立根系吸水模型的前提^[45]。当根系生长受阻时,植物根系可能产生不同的适应机制。首先,根系生长受土壤结构和水分条件的直接影响。根系在压实土壤中生长阻力较大,Landl 等^[46]利用三维土壤根系模型研究发现,土壤中的生物孔隙有利于植物根系克服土层穿透阻力以汲取深层土壤水,可以在干旱时期缓解蒸腾亏缺,即使在根土接触受限时也能发挥明显的作用,在土壤压实严重、导水性更差的土壤中,生物孔隙的作用则更显著。大量研究表明,土壤水分会影响植物根系表观性状。在干旱条件下,植物可能会生成更多的细根来维持水分/养分的吸收^[47]。而 Chun 等^[48]通过试验发现,大豆在生长初期的根系发育受土壤含水量的影响,当土壤含水量不足田间持水量的 70% 时播种,大豆主根和侧根都将减少。其次,根系构型和土壤水分有效性是控制根系吸水分布的重要因素。大多研究都集中在根系吸水随深度的分布特征,Agee 等^[49]则通过研究发现在生态系统尺度上,根系的侧向(横向)发育有利于保证干旱时期的根系吸水。虽然根毛是植物吸收水分和养分的主要器官,Cai 等^[50]研究发现,在干旱情况下,玉米根毛对于根土界面的水力传导作用贡献很小,土壤质地成为限制根系吸水的主要因素,这一点与大麦明显不同,因此,在进行不同作物类型根系吸水研

究时,根系构型和土壤水力学性质的影响要具体问题具体分析。最后,根系分泌物对根际土壤的水力性质具有重要影响。Carminati 等^[51]利用中子射线成像技术研究了羽扇豆根际土壤的水力特性,发现根际土壤具有更强的持水作用,在干旱条件下根际周围土壤含水量相对外围土壤较高,而且根际水势降低更慢,该研究推测是由于根际分泌物改变了土壤的水力特性,更有利于缺水时期保证根系吸水。Moradi 等^[52]利用中子探测技术监测到鹰嘴豆、白羽扇豆和玉米三种作物根系对根际土壤水分分布产生影响,在主根和侧根周围都出现了相对外围土壤较高的土壤水分含量,而且较深层次根系对土壤水分分布的影响范围更广。此外,干旱限制植物分泌的碳向根际细菌和非菌根真菌的扩散,阻碍潜在有益激发的植物-微生物互作,可见根系对根际土壤生物物理过程的塑造对于干旱条件下根系吸收水分和养分具有重要意义。

对于典型的种植系统,根据土壤质地、水分条件、根系分泌物确定土壤压实度的“阈值”(压实阈值)可能更为关键。不同种类的根-土相互作用将被确定为形成耕作技能,因为表土的大孔隙作为阻力最小的路径和氧气来源^[53],两者都导致压实作物生产力提高有效限制盐分运动的底土。黄河三角洲地下水位浅、盐度高^[54],作物根区往往受到盐分胁迫。土壤水分和根区过程是植物健康的基础,控制着营养物质的运输和光合作用的同化物,促进许多化学反应,并间接支持激素的运输、细胞膨胀和通过根部的蒸腾冷却叶片水吸收^[55]。由此,明确盐碱地根-土-水过程是可持续盐碱农业种植的重要内容。但是,目前压实层在滨海盐碱地中的对土壤盐分的运移影响尚不清楚,特别是压实土壤制约植物根系的伸长和对水分和养分的吸收,进而改变土壤水盐分布方面。由此,通过研究压实农田中水盐运移的特征,可以了解土壤孔隙度、通透性和水分渗透性等对水盐运移的影响,为优化土地利用提供科学依据。

2.4 根系的可视化分析

根系的可视化分析通常借助洗根法、微根管法、根窗法等传统手段进行研究,然而鉴于土壤的不透明性和复杂性,定量评估原位根系性状及其根际过程是一个重大挑战。X 射线计算机断层扫描成像(X-CT)技术是一种依据外部投影数据重

建物体内部结构图像的无损检测技术。越来越多的研究证明 X-CT 是用于原位根土过程分析的有效工具^[56]。使用 X-CT 技术对含有根系的土柱进行连续扫描,结合图像分析技术提取根系数据,不仅能够获取根总长度、根直径、根表面积、根系弯曲度和根系角度等信息,还能获得孔隙和团聚体等土壤结构信息^[57]。此外,Chenu 等^[58]运用 X-CT 技术在微米和纳米分辨率下完成了对土壤微生物空间分布的可视化。近期的研究报道,借助 X-CT 技术和核磁共振成像(MRI)对土壤中的根系分泌物进行了原位可视化分析^[59]。因此,X-CT 技术为揭示根土互作机制提供了有效且直观的方法,但现有研究多围绕根性状-土壤结构、根系分泌物-土壤结构和土壤结构-土壤微生物等两两间的关系,尚未同时探索根性状-根系分泌物-土壤微生物-土壤结构间的互作机制及空间分布特征。因此,进一步研究应该将多种技术结合起来,探索这些参数之间的关系,以更全面地了解根土互作机制及其空间分布特征。

2.5 根系定向调控技术

根系调控技术是当前国际研究的前沿和热点,可广泛应用于耐盐碱作物育种。针对植物的耐盐阈值特点,可以进行靶向性的水土过程调控。在改土过程中,可以通过控制灌溉、排水和施肥等水土因素来调节土壤的水分、盐分和养分等环境,使其更加适合植物的生长。土壤物理性状、灌水、施肥等均可对根系的生长、分布和功能产生影响,进而影响植株的生长发育,并最终决定作物的产量^[60]。根土界面的水分阻力是根系吸收水分时最主要的限制因素。土壤结构特别是土壤机械阻力会影响根系的生长和构型,根系的生长也会重塑土壤结构,如大孔隙的产生会影响土壤中养分和水分的运移。根系可以通过分泌物质粘合土壤颗粒,在根系周围形成根鞘,提高根系和土壤的接触水平,从而缓解根系水分状况,提高根系水分吸收能力。比较根际土壤和非根际土壤团聚体的稳定性,宋日等^[61]发现与非根际土壤相比多糖对根际土壤团聚体的稳定性贡献较小,尽管根际土壤中含有大量具有胶结作用的多糖,他们推测这可能是由于根际土壤的胶结物主要由腐解不完全的植物根系残体构成,其胶结作用要远小于非根际土壤中完全腐解的有机物。尤其是像根际以及有机残体周围的团聚体在这些具有独特环境中的形

成过程和稳定性更需要进一步深入研究。金可默^[62]发现土壤养分的空间异质性可以促进根系的生长和对水分的吸收,而接种根际促生菌会促进作物根系的生长和养分的吸收。尤其是对于盐渍障碍土壤,这方面的研究有助于从“根系定向调控”的角度挖掘农作物适应盐渍土环境潜力。研究表明^[11],根系分泌物通过生物络合、置换反应,清除土壤团粒上多余的 Na^+ ,活化盐碱土壤中难利用的 Fe、Ca、Mg 等微量元素,使其转变为可利用状态被植物吸收,解除植物生理缺素症状。对于受盐碱侵害的农田和新开垦土地,利用有机生化高分子络合土壤中成盐离子,随灌溉水将盐分带到土壤深处,降碱脱盐,可以解除盐分对作物的毒害作用^[63]。

3 盐碱地根土水耦合过程模型模拟

3.1 根系吸水机理

植物根系对于水分或者养分的吸收效率取决于两方面因素的影响,一方面是水分/养分有效性,另一方面是根系吸收的能力及生理效率。植物根系吸水是一个被动过程,主要由大气、土壤和根系中的水势差驱动,植物的水分利用状况由根系觅水能力、植物体水力传导性能和大气蒸发力决定。因此,根系吸水对土壤水分胁迫的响应取决于土壤水分有效性、蒸腾需求,也取决于植物本身的生理生态调控过程,例如植物抗逆性^[64]。补偿性根系吸水是指当部分根系面临水分胁迫时,植物会从湿润的土壤中吸收更多的水分来弥补蒸腾需求^[65]。Thomas 等^[66]通过玉米的分根交替灌溉实验发现,在干旱条件下只对部分根区供水,玉米的蒸腾需求大部分由补偿性根系吸水满足。为了研究盐分对补偿性根系吸水的影响,Tzohar 等^[67]利用称重式分根蒸渗装置研究了西红柿根系处于不同盐分含量土壤时根系吸水的情况,发现当盐分含量超过植株耐盐阈值时($6.44 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$),若全部根系处于该环境会使蒸腾量降低 50%,若只有一半根系处于该环境,植物蒸腾需求则能够通过补偿性根系吸水从不含盐土壤中吸水,可达 85%。因此,补偿性根系吸水不是绝对值,而是盐分浓度、大气蒸发需求和胁迫作用时间的函数,只要没有水力阻隔,部分根系周围土壤水分有效性的暂时性降低都不会明显影响整株尺度的蒸腾。

3.2 根系吸水模型

根系生长在地下,取样和监测都具有一定挑战,借助模型模拟成为一种高效手段。根系吸水模型目前主要包括两类:一类是宏观经验模型,一类是基于物理过程的机理模型。经验模型中的水分胁迫函数,通常定义为实际根系吸水与潜在根系吸水速率之比,量化了土壤水分状态对作物吸水的影响。最常用的是 Feddes 根系吸水函数,已嵌入在 HYDRUS 和 SWAP 模型,能够较好的预测水量平衡各组分;但不能很好反映补偿性吸水机制(即植物通过从根部胁迫较小的部分吸收更多的水分来适应干旱条件,以补偿在胁迫较大的根区水分吸收减小的机制)^[68]。Wu 等^[69]发现将土壤水分有效性相对根系的分布及其胁迫程度对蒸腾的贡献(包括滞后性)纳入根系吸水模型,对模拟结果精度的提高具有重要贡献。

对于根系吸水模型参数化,较多采用反演算法。Sonkar 等^[70]利用土壤水分含量数据通过反演算法成功参数化了考虑补偿性吸水的非线性根系吸水模型,并结合田间试验发现,在中轻土壤质地和不同作物类型条件下都能很好的预测土壤水分动态,而在高度导水特性的砂质土情况下则需要综合利用土壤水分含量和深层渗漏数据来进行参数反演才能得到较好的拟合。Cai 等^[71]评价了是否考虑补偿性根系吸水的三种模型参数化发现,不考虑补偿性吸水的 Feddes 模型^[72]与考虑补偿性吸水的 Feddes-Jarvis 模型^[65]之间的参数具有明显差异,这将导致实际根系吸水的低估。补偿性根系吸水的模拟是通过一个阈值参数实现的。Lei 等^[73]在河套灌区开展了土壤水盐异质性分布对向日葵生长和根系吸水影响的研究,发现决定补偿性根系吸水的阈值参数随土壤水盐特征的变化而变化,而且与环境胁迫因子在不同生育期呈现出不同的函数关系,可据此对盐碱地向日葵的补偿性根系吸水进行更准确的评估。Jorda 等^[74]通过模拟研究发现,根系吸水过程中盐分随水流汇聚在根系表面附近,根表面的盐分浓度和渗透压相对于外围土体的差异会随蒸腾速率的增大而增大,同时也随根系密度的减小而增大。所以在模拟根系吸水速率时,胁迫减少函数应该将蒸腾速率和根系密度一起纳入考虑。

3.3 GSPAC 系统水肥盐耦合运移过程

土壤-植物-大气连续体(SPAC)中盐分-作物关系研究主要集中在耐盐阈值、盐分胁迫对作物生长及微生物活性的影响;与之对应的土壤水肥盐耦合运移及其对作物生长的影响可通过模型予以综合反映(如 WOFOST、HYDRUS、AquaCrop 等)。然而,这些研究没有充分考虑地下水的作用,即地下水-土壤-植物-大气连续体(GSPAC)系统水分传输过程,相关研究成果不适用于滨海盐渍土。此外,在农田体系中,由于肥料的施入,水、肥、盐三因子之间存在相互作用。例如,盐分过高抑制土壤硝化作用,影响氮肥的利用^[75]。反过来,肥料的投入也会抑制盐害。因此,针对黄河三角洲地区土壤积盐的特点,建立盐分较高条件下的作物水肥生产函数、探求微咸水灌溉条件下作物节水抑盐的动态阈值,是实现农业节水增产和水肥高效利用的重要研究内容。然而,由于盐分的影响,明确 GSPAC 系统水分转化机制相当困难。近年来,环境或人为加入稳定同位素技术已经成为研究植物水资源利用的新方法^[76],这为进一步揭示 GSPAC 系统土壤水与溶质运移过程提供了有效手段。此外,茎流测定液流和根系扫描仪量化根系动态的最新进展也为土壤-根-水相互作用过程研究提供了诸多便利。

土壤水盐运移数值模拟是在土壤水分运移方程的基础上与对流扩散方程结合,应用于溶质运移问题。国内外学者提出了大量的适用于不同条件的概念模型、经验或半经验的溶质模型,进行土壤水盐动态趋势的模拟研究^[77-78]。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。实际上,世界各地农业管理措施差异较大,在实际模拟过程中选择的计算区域往往会面临各种各样的边界条件,需要准确甄别边界条件的类型、选择适合的模型并以恰当的数量关系描述边界上水力特征^[79],这些国际上主流模型并不完全适合我国农业管理特色(如膜下滴灌措施)。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,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^[80]。

3.4 耦合土壤水肥盐运移模型和作物生长模型

通过前期比较和验证几个较为流行作物生长模型(DSSAT、AquaCrop、RZWQM等),结果发现:DSSAT模型中的CERES-Wheat模型能够很好地模拟冬小麦的生长发育和产量形成过程,但是模拟土壤水分和盐分的运移过程过于简单、精度较差。AquaCrop模型以作物水分生产函数作为模型的驱动方程,因此能较好模拟水分胁迫对作物产量的影响,但是忽略了众多的作物生长内在过程,机理性较差。RZWQM(根区水质模型)是一个能够较为全面模拟作物主要过程的机理性模型,由最初的模拟作物根层内的水肥盐热以及杀虫剂等污染物的运移过程,到近年又将作物模型CERES-Maize和CERES-Wheat等植入其中,在模拟作物生长方面也取得了重大改进。但是,该模型只能模拟一维情况下土壤水热盐运移过程,无法满足本研究二维至三维情况下土壤可溶物运移机制研究的需求。此外,RZWQM模型是按照美国的农业生产条件开发的,无法模拟一些重要的具有中国特色的农业管理措施。比如,在耕作压实条件下,乃至和垄作栽培方式结合之后,土壤边界条件变得更加复杂,如何准确监测不同管理措施下土壤边界条件的变化,修正模型输入参数,以实现土壤水热及氮素耦合过程的准确模拟和合理预测,值得深入探讨。

HYDRUS模型虽在模拟不同田间管理条件下土壤水热盐耦合运移方面有优势,但缺点是不能进行作物产量模拟。能否将其它作物模型的一些重要算法植入到HYDRUS模型以增强其模拟土壤水热盐过程和作物动态关系的机理性和精度,具有一定的挑战性^[81]。因此,如果基于作物水盐响应研究成果,耦合土壤水盐运移模型HYDRUS和某一作物生长模型,建立土壤盐分条件和作物生长之间的有机联系,可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 展望及前景

综上所述,为了治理盐碱地,学界正在转向新的思维方式,即从适应作物向选育耐盐碱植物适应盐碱地转变。在这种情况下,土壤科学家亟需

重点突破植物耐盐适生改土机制和配套栽培技术,以明确区域根-土-水三者的耦合关系及其对土壤改良、耕作方式和种植模式的响应特征。基于盐渍土壤根-土-水交互作用过程和机理解析,可以辅助耐盐碱作物的选育,并创建适合不同地区的耕作制度和种植模式。

黄河三角洲的盐碱地由黄河冲积母质发育而来,土壤质地较轻,不利于土壤团聚体的形成。由于受海水浸灌的影响,土壤中可溶性盐分含量较高,更不利于土壤颗粒的凝聚胶结和土壤养分的保持,导致肥力水平较低,限制了农田生产力的提升和区域农业的可持续发展。在该区,夏季降雨集中、地下水位浅且排水能力差,这决定了作物在不同生育期中受到盐分胁迫和氧气胁迫的交织影响^[82]。

通常情况下,水利工程措施(如井灌井排、暗管排碱等)是调整浅地下水区土壤盐渍化的最有力措施,但成本较高且难以实施。为了解决这一问题,我们建议通过人工创建土壤隔层的方式,限制地下水的返盐,减低土壤的盐碱度,从而为农作物的生长提供适宜的土壤环境。

参考文献:

- [1] 范晓梅,刘高焕,唐志鹏,等.黄河三角洲土壤盐渍化影响因素分析[J].水土保持学报,2010,24(1):139-144.
- [2] 朱建峰,崔振荣,吴春红,等.我国盐碱地绿化研究进展与展望[J].世界林业研究,2018,31(4):70-75.
- [3] DALIAKOPOULOS I N, TSANIS I K, KOUTROULIS A, et al. The threat of soil salinity: a European scale review[J]. Science of The Total Environment, 2016, 573: 727-739.
- [4] LI Z X, CAI C F, SHI Z H, et al. Aggregate stability and its relationship with some chemical properties of red soils in subtropical China[J]. Pedosphere, 2005, 15(1): 129-136.
- [5] WANG S Q, YAO X Y, ZHANG Z, et al. Soil aggregation and aggregate-related exchangeable base cations under different aged tea (*Camellia sinensis* L.) plantations in the hilly regions of southern Guangxi, China[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2020, 66: 636-644.
- [6] KIM Y J, CHOO B K, CHO J Y. Effect of gypsum and rice straw compost application on improvements of soil quality during desalination of reclaimed coastal tideland soils: ten years of long-term experiments[J].

- Catena, 2017, 156: 131–138.
- [7] 苑亚茹, 韩晓增, 丁雪丽, 等. 不同植物根际土壤团聚体稳定性及其结合碳分布特征[J]. 土壤通报, 2012, 43(2): 320–324.
- [8] 候贺贺. 黄河三角洲盐碱地生物措施改良效果研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- [9] DONG Y, CHEN R, PETROPOULOS E, et al. Interactive effects of salinity and SOM on the coenzymatic activities across coastal soils subjected to a saline gradient[J]. *Geoderma*, 2012, 406: 115–159.
- [10] 张凌云, 赵庚星. 盐碱土壤修复材料对滨海盐渍土理化性质的影响研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1): 32–34.
- [11] 史刚荣. 植物根系分泌物的生态效应[J]. 生态学杂志, 2004(1): 97–101.
- [12] 涂书新, 孙锦荷, 郭智芬, 等. 植物根系分泌物与根际营养关系评述[J]. 土壤与环境, 2000(1): 64–67.
- [13] 吴林坤, 林向民, 林文雄. 根系分泌物介导下植物-土壤-微生物相互作用研究进展与展望[J]. 植物生态学报, 2014, 38(3): 298–310.
- [14] BAIS H P, WEIR T L, PERRY L G, et al. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms[J]. *Annual Review Plant Biology*, 2006, 57: 233–266.
- [15] ROSSKOPF U, UTEAU D, PETH S. Effects of mucilage concentration at different water contents on mechanical stability and elasticity in a loamy and a sandy soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2022, 73(1): e13189.
- [16] LI Y, LI Z, CUI S, et al. Trade-off between soil pH, bulk density and other soil physical properties under global no-tillage agriculture [J]. *Geoderma*, 2020, 361: 114099.
- [17] MEIER I C, FINZI A C, PHILLIPS R P. Root exudates increase N availability by stimulating microbial turnover of fast-cycling N pools [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017, 106: 119–128.
- [18] BENIDIRE L, MADLINE A, PEREIRA S, et al. Synergistic effect of organo-mineral amendments and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on the establishment of vegetation cover and amelioration of mine tailings[J]. *Chemosphere*, 2020, 262: 127803.
- [19] 孙欣, 高莹, 杨云锋. 环境微生物的宏基因组学研究新进展[J]. 生物多样性, 2013, 21(4): 8.
- [20] BARDGETT R D, MOMMER L, FRANCISKA T D. Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes[J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2014, 29(12): 692–699.
- [21] WANG P, NIU G Y, FANG Y H, et al. Implementing dynamic root optimization in Noah-MP for simulating phreatophytic root water uptake [J]. *Water Resources Research*, 2018, 54: 1560–1575.
- [22] LIANG J, SHI W. Cotton/halophytes intercropping decreases salt accumulation and improves soil physico-chemical properties and crop productivity in saline-alkali soils under mulched drip irrigation; a three-year field experiment [J]. *Field Crops Research*, 2021, 262: 108027.
- [23] 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.
- [24] NORBY R J, JACKSON R B. Root dynamics and global change: seeking an ecosystem perspective [J]. *New Phytologist*, 2000, 147: 3–12.
- [25] WESTOBY M, WRIGHT I J. Land-plant ecology on the basis of functional traits[J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2006, 21: 261–268.
- [26] EISSENSTAT D M. On the relationship between specific root length and the rate of root proliferation: a field study using citrus rootstocks[J]. *New Phytologist*, 1991, 118(1): 63–68.
- [27] WEEMSTRA M, MOMMER L, VISSER E J W, et al. Towards a multidimensional root trait framework: a tree root review [J]. *New Phytologist*, 2016, 211(4): 1159–1169.
- [28] CHEN G H, WEIL R R. Penetration of cover crop roots through compacted soils[J]. *Plant and Soil*, 2010, 331(1/2): 31–43.
- [29] PULIDO-MONCADA M, KATUWAL S, REN L, et al. Impact of potential bio-subsoilers on pore network of a severely compacted subsoil [J]. *Geoderma*, 2020, 363: 114154.
- [30] CLARK A. Managing cover crops profitably[M]. Beltsville: Diane Publishing, 2008.
- [31] HALLETT P D, KARIM K H, BENGOUGH A G, et al. Biophysics of the vadose zone: from reality to model systems and back again [J]. *Vadose Zone Journal*, 2013, 12(4): 1–17.
- [32] KUBO K, JITSUYAMA Y, IWAMA K, et al. Genotypic difference in root penetration ability by durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) evaluated by a pot with paraffin-Vaseline discs [J]. *Plant and Soil*, 2004, 262(1/2): 169–177.
- [33] COLOMBI T, KELLER T. Developing strategies to recover crop productivity after soil compaction: a plant eco-physiological perspective [J]. *Soil and Tillage Re-*

- search, 2019, 191: 156–161.
- [34] CHAPMAN N, MILLER A J, LINDSEY K, et al. Roots, water and nutrient acquisition; let's get physical [J]. *Trends in Plant Science*, 2012, 17(12): 701–710.
- [35] PANDEY B K, HUANG G, BHOSALE R, et al. Plant roots sense soil compaction through restricted ethylene diffusion [J]. *Science*, 2021, 371(6526): 276–280.
- [36] HORN R. Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes [J]. *Geoderma*, 2003, 116(1/2): 77–88.
- [37] WANG Y, ZHANG J H, ZHANG Z H. Influences of intensive tillage on water-stable aggregate distribution on a steep hillslope [J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 151: 82–92.
- [38] SCHJØNNING P, VAN DEN AKKER J J H, KELLER T, et al. Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) analysis and risk assessment for soil compaction: a European perspective [J]. *Advances in Agronomy*, 2015, 133: 183–237.
- [39] HILL D E, PARLANGE J Y. Wetting front instability in layered soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1972, 36(5): 697–702.
- [40] 赵沛伦. 母质的两层性对土壤持水性能的影响 [J]. *中国科学院西北水土保持研究所集刊(土壤分水与土壤肥力研究专集)*, 1985, 2: 30–46.
- [41] NICHOLSON R V, GILLHAM R W, CHERRY J A, et al. Reduction of acid generation in mine tailings through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barriers [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1989, 26: 1–8.
- [42] 史文娟, 沈冰, 汪志荣, 等. 夹砂层状土壤潜水蒸发特性及计算模型 [J]. *农业工程学报*, 2007, 23(2): 17–20.
- [43] 史文娟, 沈冰, 汪志荣, 等. 蒸发条件下浅层地下水埋深夹砂层土壤水盐运移特性研究 [J]. *农业工程学报*, 2005(9): 23–26.
- [44] 余世鹏, 沈冰, 汪志荣, 等. 夹砂层状土壤潜水蒸发特性及计算模型 [J]. *农业工程学报*, 2007, 23(2): 17–20.
- [45] KUO T H, CHEN J P, XUE Y. Stem-root flow effect on soil-atmosphere interactions and uncertainty assessments [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(4): 1509–1522.
- [46] LANDL M, SCHNEPF A, UTEAU D, et al. Modeling the impact of biopores on root growth and root water uptake [J]. *Vadose Zone Journal*, 2019, 18(1).
- [47] HENRY M, BEGUIN M, REQUIER F, et al. A common pesticide decreases foraging success and survival in honey bees [J]. *Science*, 2012, 336(6079): 348–350.
- [48] CHUN H C, LEE S, CHOI Y D, et al. Effects of drought stress on root morphology and spatial distribution of soybean and adzuki bean [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 10: 2639–2651.
- [49] AGE E, HE L L, BISHT G, et al. Root lateral interactions drive water uptake patterns under water limitation [J]. *Advances in Water Resources*, 2021, 151: 14.
- [50] CAI G C, CARMINATI A, ABDALLA M, et al. Soil textures rather than root hairs dominate water uptake and soil-plant hydraulics under drought [J]. *Plant Physiology*, 2021, 2: 858–872.
- [51] CARMINATI A, MORADI A B, VETTERLEIN D, et al. Dynamics of soil water content in the rhizosphere [J]. *Plant Soil*, 2010, 332(1/2): 163–176.
- [52] MORADI A B, CARMINATI A, VETTERLEIN D, et al. Three-dimensional visualization and quantification of water content in the rhizosphere [J]. *The New Phytologist*, 2011, 192(3): 653–663.
- [53] COLOMBI T, BRAUN S, KELLER T, et al. Artificial macropores attract crop roots and enhance plant productivity on compacted soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 74: 1283–1293.
- [54] HU Q L, ZHAO Y, HU X, et al. Effect of saline land reclamation by constructing the “Raised Field-Shallow Trench” pattern on agroecosystems in Yellow River Delta [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 261: 107345.
- [55] EHLERS W, GOSS M J. *Water dynamics in plant production* [M]. New York: CABI Publishing, 2003.
- [56] HOU L H, GAO W, WENG Z H, et al. Use of X-ray tomography for examining root architecture in soils [J]. *Geoderma*, 2022, 405: 115405.
- [57] 郑洪兵, 罗洋, 李瑞平, 等. 耕作方式对根土关系的影响及 CT 技术在其研究上的应用 [J]. *中国农学通报*, 2021, 37(33): 5.
- [58] CHENU C, HASSINK J, BLOEM J. Short-term changes in the spatial distribution of microorganisms in soil aggregates as affected by glucose addition [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34(5): 349–356.
- [59] VANVEELEN A, TOURELL M C, KOEBERNICK N, et al. Correlative visualization of root mucilage degradation using X-CT and MRI [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2018, 6: 32.
- [60] 周洪华, 李卫红. 胡杨木质部水分传导对盐胁迫的响应与适应 [J]. *植物生态学报*, 2015, 39(1): 81–91.
- [61] 宋日, 刘利, 马丽艳, 等. 作物根系分泌物对土壤团聚体大小及其稳定性的影响 [J]. *南京农业大学学报*

- 报,2009,32(3):5.
- [62] 金可默.作物根系对土壤异质性养分和机械阻力的响应及其调控机制研究[D].北京:中国农业大学,2015.
- [63] 周和平,张立新,禹锋,等.我国盐碱地改良技术综述及展望[J].现代农业科技,2007,11:159-161.
- [64] FEDDES R A, RAATS P A C. Parameterizing the soil-water-plant root system [M] // FEDDES R A, DE ROOIJ G H, VAN DAM J C. Unsaturated-zone modeling; Progress, challenges and applications. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004: 95-141.
- [65] ŠIMŮNEK J, HOPMANS J W. Modeling compensated root water and nutrient uptake [J]. Ecological Modelling, 2009, 220: 505-521.
- [66] THOMAS A, YADAV B K, SIMUNEK J. Root water uptake under heterogeneous soil moisture conditions: an experimental study for unraveling compensatory root water uptake and hydraulic redistribution[J]. Plant and Soil, 2020, 457(1/2): 421-435.
- [67] TZOHAR D, MOSHELION M, BEN-GAL A. Compensatory hydraulic uptake of water by tomato due to variable root-zone salinity [J]. Vadose Zone Journal, 2021, 20(6): 14.
- [68] DEMELO M L A, VAN LIER Q D. Revisiting the Feddes reduction function for modeling root water uptake and crop transpiration [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 15.
- [69] WU X, SHI J C, ZUO Q, et al. Parameterization of the water stress reduction function based on soil-plant water relations [J]. Irrigation Science, 2021, 39(1): 101-122.
- [70] SONKAR I, SUDESAN S, KOTNOOR H P S R. Compensated non-linear root water uptake model and identification of soil hydraulic and root water uptake parameters [J]. Irrigation and Drainage, 2021, 18.
- [71] CAI G, VANDERBORGHT J, COUVREUR V. Parameterization of root water uptake models considering dynamic root distributions and water uptake compensation [J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 1-21.
- [72] FEDDES R A, KOWALIK P J, ZARADNY H. Simulation of field water use and crop yield [J]. Soil Science, 1978, 129(3): 193.
- [73] LEI G Q, ZENG W Z, ZHU J X, et al. Quantification of leaf growth, height increase, and compensatory root water uptake of sunflower in heterogeneous saline soils [J]. Agronomy Journal, 2019, 111(3): 1010-1027.
- [74] JORDA H, PERELMAN A, LAZAROVITCH N. Exploring osmotic stress and differences between soil-root interface and bulk salinities [J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17: 170029.
- [75] 辛承松,董合忠,唐薇.不同肥力滨海盐土对棉花生长发育和生理特性的影响[J].棉花学报,2007,19(2):124-128.
- [76] BEYER M, KOENIGER P, GAJ M, et al. A deuterium-based labeling technique for the investigation of rooting depths, water uptake dynamics and unsaturated zone water transport in semiarid environments [J]. Journal of Hydrology, 2016, 533: 627-643.
- [77] 王全九,来剑斌,李毅. Green-Ampt 模型与 Philip 入渗模型的对比分析 [J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 13-16.
- [78] ARBAT G, PUIG-BARGUES J, BARRAGAN J, et al. Monitoring soil water status for micro-irrigation management versus modeling approach [J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(2): 286-296.
- [79] QI Z J, FENG H, ZHAO Y, et al. Spatial distribution and simulation of soil moisture and salinity under mulched drip irrigation combined with tillage in an arid saline irrigation district, northwest China [J]. Agricultural Water Management, 2018, 201: 219-231.
- [80] ZHAO Y, ZHAI X F, WANG Z H, et al. Simulation of soil water and heat flow in ridge cultivation with a plastic film mulching system on the Chinese Loess Plateau [J]. Agricultural Water Management, 2018, 202: 99-112.
- [81] LI Y, KINZELBACH W, ZHOU J, et al. Modelling irrigated maize with a combination of coupled-model simulation and uncertainty analysis, in the northwest of China [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2011, 8: 3841-3881.
- [82] ZIPPER S C, SOYLU M E, BOOTH E G, et al. Untangling the effect of shallow groundwater and soil texture as drivers of subfield-scale yield variability [J]. Water Resources Research, 2015, 51: 6338-6358.

(下转第 145 页)

Existence and Multiplicity of Nontrivial Solutions for Semilinear Elliptic Equations Involving Hardy-Sobolev Critical Exponents

SUN Wenheng, FAN Yonghong, WANG Linlin

(School of Mathematics and Statistics Science, Ludong University, Yantai 264039, China)

Abstract: In this paper, a class of semi-linear singular elliptic equations with critical Hardy-Sobolev exponent has been investigated. The existence of a non-zero critical point of the energy function $J(u)$ was proved by studying the $(PS)_c$ sequence, and then the existence theorem of a positive solution of the equation was obtained by using the mountain pass lemma. Finally, the multi-solution of this equation was proved by symmetry.

Keywords: semilinear elliptic equation; Hardy-Sobolev critical exponents; mountain pass lemma; $(PS)_c$ sequence
(责任编辑 顾建忠)

(上接第106页)

Abstract ID: 1673-8020(2023)02-0097-EA

Interactive Processes and Modifications of Root-Soil-Water in Saline Agricultural Development of the Yellow River Delta

ZHAO Ying, YU Jinyi, HU Qiuli, ZHAO Huili, SUO Lizhu, WANG Yi, WU Nan

(School of Resource and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264039, China)

Abstract: Currently, the advancement of saline-alkali agriculture in the Yellow River Delta necessitates a shift in mindset, moving from controlling saline-alkali land to adapting crops and selecting saline-alkali-tolerant plants that can thrive in such soil. Prominent crops in the region include wheat, corn, soybeans, and more. The key challenge lies in establishing a sensible cultivation system and supporting the selection of crops that can withstand soil salinity. The interplay between plant salt tolerance and soil enhancement can potentially bolster one another and move in the same direction, but this requires a breakthrough in understanding how crops adapt to soil improvement and cultivation techniques. To this end, this paper focuses on the interaction process between roots, soil, and water and how to regulate it, proposing the following research approaches. Firstly, the regional relationship between roots, soil, and water and how they respond to soil enhancement, farming techniques, and planting patterns were investigated. Secondly, factor in the regional groundwater conditions and soil salinity features to explore the optimal tillage compactness threshold. Finally, research and develop technology to create an optimal environment for root layer water, fertilizer, and salt, which can promote the breeding of saline-alkali-tolerant crops. This paper presents a vital idea for promoting crop breeding based on the study of root-soil processes in saline soil.

Keywords: structural stability; soil compaction; soil CT; model simulation; breeding of salt-tolerant crops

(责任编辑 李秀芳)