

滨海新围滩涂不同改良方式对土壤盐渍化调控效应及其主控因素

解雪峰^{1,3}, 吴涛¹, 沈洪运^{2,3}, 朱明^{2,3}, 朱丽东¹, 濮励杰^{2,3}

(1.浙江师范大学地理与环境科学学院, 金华 321004; 2.南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 3.自然资源部海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210023)

摘要: 土壤盐渍化是制约滨海新围滩涂围垦区土壤质量的最主要因子, 严重抑制了作物的生长和产量。试验设置了对照处理(CK)、有机肥(OM)、聚丙烯酰胺+有机肥(PAM+OM)、秸秆覆盖+有机肥(SM+OM)、秸秆深埋+有机肥(BS+OM)和生物菌肥+有机肥(BM+OM)6个处理方式, 研究不同改良方式对滨海盐碱地土壤盐渍化的调控效应, 明确改良过程中土壤盐渍化程度变异的主控因素。结果表明, 表层土壤含盐量、钠吸附比和碱化度随着燕麦生育期的推移逐渐上升, 而 pH 随着燕麦生育期的推移逐渐下降。与 CK 处理相比, PAM+OM、SM+OM、BS+OM 和 BM+OM 措施能够显著降低 0—20 cm 深度的土壤含盐量、pH、钠吸附比和碱化度。其中, SM+OM 措施对土壤含盐量的抑制效果最好, 达到 68.0%~73.6%; 而 BM+OM 措施对 pH、钠吸附比和碱化度的调控效果最佳, 分别降低 4.5%~8.2%, 61.5%~80.8% 和 55.5%~79.4%。主控因素分析表明环境因子中的土壤容重、土壤含水量和蒸发量对表层土壤盐渍化程度的影响均达到极显著水平($P<0.01$), 而风速和降水量的影响则达到显著水平($P<0.05$)。

关键词: 滨海盐碱地; 土壤盐渍化; 主控因素; 土壤改良剂

中图分类号: S156.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)02-0340-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.02.048

Regulatory Effect of Different Amelioration Methods on Soil Salinization and Its Main Control Factors in a Newly Reclaimed Coastal Tidal Land

XIE Xuefeng^{1,3}, WU Tao¹, SHEN Hongyun^{2,3}, ZHU Ming^{2,3}, ZHU Lidong¹, PU Lijie^{2,3}

(1.College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua,

Zhejiang 321004; 2.School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023;

3.Key Laboratory of the Coastal Zone Exploitation and Protection of Ministry of Natural Resources, Nanjing 210023)

Abstract: Soil salinization is the most important factor that restricts the soil quality in the newly coastal reclamation area, which seriously inhibits the growth and yield of crops. Six treatments including control treatment (CK), organic fertilizer (OM), polyacrylamide+organic fertilizer (PAM+OM), straw mulching +organic fertilizer (SM+OM), buried straw+organic fertilizer (BS+OM), and bacterial fertilizer+organic fertilizer (BM+OM) were set up to study the effects of different amelioration on soil salinization in coastal saline-alkali soil, and to identify the main factors controlling the variation of soil salinization degree. The results showed that the salt content, sodium adsorption ratio, and exchangeable sodium percentage of surface soil gradually increased, while the pH decreased gradually with the growth stage of oats. Compared with CK treatment, PAM+OM, SM+OM, BS+OM, and BM+OM treatments could significantly reduce soil salinity, pH, sodium adsorption ratio, and exchangeable sodium percentage at 0—20 cm depth. Among them, SM+OM treatment had the best inhibition effect on soil salinity, reaching 68.0%~73.6%, while BM+OM treatment had the best inhibition effect on pH, sodium adsorption ratio, and exchangeable sodium percentage, which decreased by 4.5%~8.2%, 61.5%~80.8%, and 55.5%~79.4%, respectively. The analysis of key influencing factors showed that the effects of soil bulk density, soil water content, and evaporation on the salinization degree of surface soil reached an extremely significant level ($P<0.01$), while

收稿日期: 2019-08-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(41230751; 41572345); 自然资源部公益性行业科研专项(201511086); 浙江省自然科学基金项目(LY19D010007)

第一作者: 解雪峰(1991—), 男, 安徽合肥人, 讲师, 博士, 主要从事土地利用及其环境效应研究。E-mail: xiexuefeng2008@126.com

通信作者: 濮励杰(1965—), 男, 江苏吴江人, 教授, 博士生导师, 主要从事土地利用及其环境效应、土地利用规划研究。E-mail: ljpu@nju.edu.cn

the effects of wind speed and precipitation reached a significant level ($P<0.05$).

Keywords: coastal saline-alkali soil; soil salinization; main control factors; soil amendment

土壤盐渍化是限制沿海滩涂围垦区土壤质量的最主要因子,严重抑制了作物的生长和产量^[1-2]。因此,调控土壤水盐动态、抑制表层土壤返盐是提升滩涂围垦农田土壤质量、促进作物生长的基础^[3-4]。我国沿海地区丰富的降水有利于土壤脱盐,然而季风性气候使得土壤盐渍化特征具有显著地季节变异。此外,滩涂围垦地区地下水埋深浅、矿化度高,土表蒸发强烈使得冬春季节极易返盐^[5-6]。在以往改良实践中,常采用物理改良(秸秆覆盖、秸秆还田等)、化学改良(聚丙烯酰胺、脱硫石膏等)、生物改良(生物菌肥、耐盐植物等)和工程改良(灌排沟渠、暗管排盐等)方式来降低根区土壤盐分,提升作物产量^[7-11]。

燕麦作为耐盐植物,常被用来作为盐碱地生物改良植物之一^[12-13]。然而,燕麦在生长季节对土壤盐分也十分敏感,特别是出苗和抽穗阶段^[14]。因此,在生长季节降低根区盐渍化水平有利于燕麦的生长和产量。以往的研究^[15-16]多集中在单个改良措施的比较研究上,较少将这些改良措施进行有机组合,已经难以满足改良的需要。同时,过往研究^[17-18]多关注改良活动对土壤的脱盐效果,对土壤脱碱效果则关注不足。此外,前人研究易

忽略改良过程中土壤盐渍化动态的影响因素,不利于针对性的制定返盐调控措施,造成改良实践失败。因此,本研究选取小麦秸秆、鸡粪堆肥、聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM)结构改良剂、生物菌肥等改良物质,结合土地平整和深耕等措施,将物理、化学、生物和工程改良措施进行优化组合形成不同改良方式,研究不同改良方式对滨海新围重度盐渍化土壤盐渍化的调控机制,探讨改良期间土壤盐渍化动态的主控因素,以期为后期干预土壤返盐制定调控措施,实现滩涂土壤资源可持续利用提供理论借鉴。

1 试验设计

1.1 试验区概述

试验区于 2016 年在江苏省南通市通州湾滨海园区建立(32°11'N,121°22'E),属北亚热带季风性湿润气候,多年平均降水量 1 028.6 mm,多年平均气温 15.0 ℃;地下水埋深为 1.2~1.8 m。试验区于 2008 年围垦,主要用于海水养殖;土壤来源于现代的海相和河相沉积,属于砂质壤土,土壤盐渍化程度高。试验区 2016—2017 年燕麦生育期内气象参数和试验前土壤基本理化性质分别见表 1 和表 2。

表 1 2016—2017 年燕麦生育期内气象参数变化特征

气象参数	2016—11	2016—12	2017—01	2017—02	2017—03	2017—04	2017—05
月累积降水量/mm	95.4	29.8	52.3	24.2	30.5	70.2	58.1
月累积蒸发量/mm	44.9	41.0	36.3	40.7	72.7	92.1	97.8
月平均气温/℃	13.8	9.9	6.4	6.2	9.4	15.9	21.1
月平均风速/(m·s ⁻¹)	2.5	2.4	2.6	3.1	3.2	3.1	3.1

表 2 试验前土壤基本理化性质

土层	砂粒	粉粒	黏粒	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	EC _{1:5} / (dS·m ⁻¹)	pH _{1:2.5}
深度/cm	比例/%	比例/%	比例/%			
0—10	79.35	17.45	3.19	1.49	1.82	8.06
10—20	79.01	17.72	3.26	1.53	1.43	8.16

1.2 试验设计

试验田块于 2016 年 9 月修建,每个田块面积为 6 m²(3 m×2 m)。先在各田块四周开挖宽 30 cm、深 60 cm 的深沟,将双层塑料薄膜置于沟内,中间空隙用土填实,用于阻隔各田块间的水盐交换,保证各田块的独立性^[19]。考虑到研究区土壤容重较高,渗透性差等特征,在试验前将所有田块深翻至 20 cm,并反复细翻直至土壤盐分基本一致^[20]。试验设计了对照处理(CK)、有机肥(OM)、聚丙烯酰胺+有机肥(PAM+OM)、秸秆覆盖+有机肥(SM+OM)、秸秆深埋+有机肥(BS+OM)和生物菌肥+有机肥(BM+

OM)6 种处理方式,每种方式 3 次重复,随机区组排列,所有处理措施见表 3。燕麦于 2016 年 11 月 3 日以 60 cm 行距进行条播,播种量为 90 kg/hm²,品种为美国海盗。在燕麦拔节期以 180 kg/hm²的用量施用尿素,生育期内不再进行灌水,其他管理措施与当地农户一致,至 2017 年 6 月 2 日收获。

1.3 样品采集与分析

研究区大气降雨量、大气温度、风速、蒸发量、土壤温度等基础参数由小型气象站监测。在燕麦播种后,每隔 30 天在 0—10 cm(表层)和 10—20 cm(次表层)采集土壤样品。所有土壤样品在每个田块内随机

采集 3 次,并混合均匀。整个燕麦生育期内,采集 8 次,共采集土壤样品 288 个。所有土壤样品分为 2 部分:一部分置于铝盒放入烘箱在 105 ℃ 下烘至恒重并计算土壤含水量;另一部分自然风干并过 2 mm 筛以测量土壤盐分离子浓度、阳离子交换量、pH 等性质。土壤容重采用环刀法测定;土壤 pH 使用蒸馏水制备 1∶2.5 土水质量比溶液,用 PHS-3C 型 pH 计测定;土壤阳离子交换量采用乙酸铵交换法测定^[21-22]。土壤盐分离子浓度采用滴定法测定,其中,HCO₃⁻、CO₃²⁻采用标准硫酸滴定法测定;Cl⁻采用标准硝酸

银滴定法测定;Mg²⁺、Ca²⁺、SO₄²⁻采用 EDTA 络合滴定法测定;Na⁺、K⁺采用火焰光度法测定;土壤含盐量为 8 大离子浓度之和。钠吸附比(Sodium adsorption ratio, SAR)和碱化度(Exchange sodium percentage, ESP)的计算公式分别为^[23]:

$$SAR=\frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{1}{2}(Ca^{2+}+Mg^{2+})}} \tag{1}$$

$$ESP=\frac{\text{交换性 } Na^{+}}{\text{阳离子交换量}}\times 100\% \tag{2}$$

表 3 处理方式设计和具体措施

处理措施	具体措施	参考
CK	对照处理,无任何措施	无
OM	在 0—20 cm 深度施用有机肥,种类为鸡粪,用量为 15 t/hm ²	有机肥用量参考张建兵等 ^[3] 的研究
PAM+OM	综合施用 PAM 结构改良剂和有机肥,其中 PAM 结构改良剂为非离子 800 万分子量,用量为 5‰ (2 t/hm ²);有机肥种类为鸡粪,二者均匀施用于 20 cm 深度,用量为 15 t/hm ²	PAM 的种类及用量参考沈洪运等 ^[21] 的研究
SM+OM	在 0—20 cm 深度施用有机肥,种类为鸡粪,用量为 15 t/hm ² ;然后将小麦秸秆剪为 10 cm 每段,以 15 t/hm ² 的用量覆于地表	秸秆覆盖量参考梁建财等 ^[16] 研究
BS+OM	将小麦秸秆剪为 10 cm 每段,以 15 t/hm ² 的用量埋于地下 20 cm 深度,然后在 0—20 cm 深度施用有机肥,种类为鸡粪,用量为 15 t/hm ²	秸秆埋藏深度及用量参考梁建财等 ^[16] 研究
BM+OM	复合施用生物菌肥(嘉华牌)和有机肥,其中嘉华牌生物菌肥由加拿大滑铁卢大学生命科学院研制,含生物细菌 0.2 亿个/g,有机质≥45%,有效养分(N+P+K)≥12%,有机肥种类为鸡粪;二者均匀施于 20 cm 深度,用量 15 t/hm ²	生物菌肥用量参考生产厂家推荐,并与有机肥用量保持一致

1.4 数据处理与分析

采用单因素方差分析(One-way ANOVA)研究不同改良方式对土壤盐渍化参数的影响,并通过 LSD 法进行显著性多重比较,差异显著性水平为 α 为 0.05。采用三因素方差分析(Three-way ANOVA)研究不同改良措施、土层深度、生育期及其交互作用对土壤盐渍化参数的影响;不同改良方式下土壤盐渍化参数与环境因子的关系采用冗余分析(Redundancy analysis, RDA)进行研究,采用蒙特卡洛检验排序研究环境因子对土壤盐渍化程度影响的重要性。所有数据的统计分析均在 SPSS 19.0 for Windows 软件进行,RDA 分析和蒙特卡洛检验排序在 Canoco 4.5 for Windows 软件中进行。

2 结果与分析

2.1 土壤含盐量

燕麦生育期内,各处理方式下表层(0—10 cm)土壤含盐量均随生长季的推移呈逐渐上升的趋势,而 10—20 cm 深度的土壤含盐量则呈现出相对稳定的

状态(表 4)。相对于 CK 处理,SM+OM、BS+OM、PAM+OM、BM+OM 和 OM 处理下的表层土壤含盐量在燕麦生育期内分别下降 68.0%~73.6%,63.1%~70.9%,58.2%~72.0%,46.5%~63.0% 和 28.7%~41.7%。此外,不同改良方式下次表层的土壤含盐量在燕麦生育期内同样显著低于 CK 处理,但 PAM+OM、SM+OM、BS+OM 和 BM+OM 处理间的土壤含盐量并没有显著性差异。从空间上来看,PAM+OM、SM+OM、BS+OM 和 BM+OM 处理均能够有效抑制 0—20 cm 深度的土壤含盐量,而 CK 和 OM 处理下的土壤含盐量在燕麦生长中后期(抽穗期、灌浆期和成熟期)呈现出明显的表聚特征。三因素方差分析结果表明,改良措施、土层深度和生育期对土壤含盐量的影响均达到极显著水平,且改良措施对土壤含盐量的影响要大于生育期和土层深度;改良措施与土层深度、改良措施与生育期和土层深度与生育期的双因子交互作用对土壤含盐量的影响同样达到了极显著水平;改良措施、土层深度和生育期三者交互作用对土壤含盐量的影响达到了显著水平(表 5)。

表 4 燕麦生育期内不同改良方式下 0—10,10—20 cm 土壤含盐量动态

单位:g/kg

土层 深度/cm	处理 措施	苗期 (播后 0~60 d)	拔节期 (播后 60~90 d)	抽穗期 (播后 90~120 d)	灌浆期 (播后 120~150 d)	成熟期 (播后 150~210 d)
0—10	CK	6.18±1.92a	9.85±1.69a	12.72±2.47a	13.03±0.87a	14.96±0.86a
	OM	3.79±1.03b	7.02±1.16b	8.58±2.34ab	8.55±2.29b	8.73±2.36b
	PAM+OM	2.10±0.77c	2.76±0.33c	3.83±0.67c	5.45±1.79c	4.80±0.84c
	SM+OM	1.98±0.41c	2.88±0.20c	3.39±1.52c	3.45±0.80c	4.32±0.88c
	BS+OM	1.80±0.35c	2.94±1.25c	4.02±1.13bc	3.85±0.44c	5.52±0.62c
	BM+OM	2.97±0.79bc	3.87±0.06c	6.81±0.13bc	5.56±0.48c	5.53±0.82c
10—20	CK	6.14±1.56a	6.16±0.81a	6.70±0.71a	7.65±1.15a	7.79±0.98a
	OM	4.62±0.62b	4.73±1.04b	5.25±1.23ab	6.47±0.12b	6.18±0.32b
	PAM+OM	3.32±0.63cd	3.77±0.42bc	3.59±0.64bc	4.78±0.87c	4.59±0.83c
	SM+OM	3.52±0.66cd	3.83±0.34bc	4.13±1.83bc	3.51±0.76c	4.54±0.54c
	BS+OM	3.27±0.71d	3.43±0.95c	3.20±0.40c	3.84±0.31c	4.99±0.62c
	BM+OM	4.50±1.46bc	3.61±0.31bc	4.90±1.10abc	4.70±1.04c	4.73±0.95c

注:表中数据为平均值±标准差;同列数据后不同小写字母表示在同一时间不同改良措施间差异显著($P<0.05$)。

表 5 改良措施、土层深度和生育期对土壤含盐量影响的方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方差	<i>F</i>	<i>P</i>
T	888.809	5	177.762	130.387	0
SD	51.870	1	51.870	38.046	0
GS	305.279	4	76.320	55.980	0
T×SD	175.121	5	35.024	25.690	0
T×GS	87.775	20	4.389	3.219	0
SD×GS	99.842	4	24.961	18.308	0
T×SD×GS	44.559	20	2.228	1.634	0.048

注:T 为处理措施;SD 为土层深度;GS 为生育期。

2.2 土壤 pH

燕麦生育期内,各处理方式下表层土壤 pH 均随生长季的推移波动下降,而次表层土壤 pH 则呈现出先上升后下降的趋势(表 6)。整个燕麦生育期内,BM+OM 处理下的表层土壤 pH 在显著低于 CK 处理,平均下降 4.5%~8.2%;其余改良方式下的土壤 pH 较 CK 处理均有不同程度的上升(除成熟期外),

尤其以 PAM+OM 和 SM+OM 处理上升幅度最大。不同改良方式下次表层土壤 pH 动态变化特征与表层相似,其中 BM+OM 处理方式下的土壤 pH 在燕麦生育期内显著低于其他处理。从空间上来看,CK、OM、PAM+OM、SM+OM 和 BS+OM 处理的土壤 pH 在苗期呈现出表层土壤高于次表层土壤,而在拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期则低于次表层土壤;BM+OM 处理下的土壤 pH 则在整个燕麦生育期内呈现出表层土壤低于次表层土壤。三因素方差分析结果表明,改良措施、土层深度和生育期对土壤 pH 的影响均达到极显著水平,且改良措施对土壤 pH 的影响要大于土层深度和生育期;改良措施与土层深度、改良措施与生育期和土层深度与生育期的双因子交互作用对土壤 pH 的影响同样达到了极显著水平,且土层深度与生育期的交互作用影响最大;而改良措施、土层深度和生育期三者交互作用对土壤 pH 的影响并不显著(表 7)。

表 6 燕麦生育期内不同改良方式下 0—10,10—20 cm 土壤 pH 动态

土层 深度/cm	处理 措施	苗期 (播后 0~60 d)	拔节期 (播后 60~90 d)	抽穗期 (播后 90~120 d)	灌浆期 (播后 120~150 d)	成熟期 (播后 150~210 d)
0—10	CK	8.61±0.14c	8.42±0.12b	8.53±0.07a	8.53±0.02ab	8.47±0.07ab
	OM	8.75±0.02b	8.39±0.02b	8.55±0.16a	8.50±0.06b	8.36±0.08ab
	PAM+OM	8.69±0.15bc	8.62±0.12a	8.52±0.12a	8.69±0.22ab	8.32±0.14b
	SM+OM	8.98±0.13a	8.64±0.08a	8.58±0.14a	8.72±0.13a	8.52±0.17a
	BS+OM	8.71±0.12bc	8.38±0.10b	8.41±0.03a	8.65±0.09ab	8.13±0.17c
	BM+OM	8.13±0.09d	8.04±0.08c	7.83±0.36b	8.15±0.12c	7.84±0.23d
10—20	CK	8.58±0.11b	8.71±0.02ab	8.67±0.07a	8.70±0.03ab	8.45±0.07bc
	OM	8.67±0.04b	8.69±0.09ab	8.62±0.23a	8.64±0.06ab	8.43±0.11bc
	PAM+OM	8.64±0.11b	8.70±0.21ab	8.73±0.12a	8.79±0.21a	8.55±0.11ab
	SM+OM	8.84±0.12a	8.85±0.14a	8.79±0.13a	8.86±0.21a	8.59±0.12a
	BS+OM	8.44±0.14c	8.56±0.19bc	8.78±0.12a	8.84±0.09a	8.44±0.11bc
	BM+OM	8.21±0.10d	8.44±0.03c	8.36±0.14b	8.51±0.07b	8.33±0.13c

注:表中数据为平均值±标准差;同列数据后不同小写字母表示在同一时间不同改良措施间差异显著($P<0.05$)。

表 7 改良措施、土层深度和生育期对土壤 pH 影响的方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方差	F	P
T	6.507	5	1.301	78.682	0
SD	1.409	1	1.409	85.197	0
GS	2.588	4	0.647	39.111	0
T×SD	0.529	5	0.106	6.398	0
T×GS	0.796	20	0.040	2.407	0.001
SD×GS	1.168	4	0.292	17.649	0
T×SD×GS	0.460	20	0.023	1.390	0.131

注：T 为处理措施；SD 为土层深度；GS 为生育期。

2.3 土壤 SAR

燕麦生育期内,各处理方式下表层土壤的 SAR 变化特征与土壤盐分含量相似,均随生长季的推移波动上升,以 CK 处理的幅度最大上升;且不同的改良方式下土壤 SAR 在生长季内也存在较大的差异(表 8)。整个生育期内各改良方式均能有效的降低土壤 SAR 水平,其中 BM+OM、BS+OM、SM+OM、

PAM+OM 和 OM 处理下的土壤 SAR 在生育期内较 CK 处理分别下降 61.5%~80.8%,39.9%~60.6%,30.5%~51.2%,34.0%~50.2%和 14.0%~24.3%。燕麦生育期内不同改良方式下次表层土壤 SAR 的动态变化特征与表层相似,同样表现出 BM+OM、BS+OM、SM+OM 和 PAM+OM 显著低于 CK 处理。从空间上来看,在整个燕麦生育期内所有处理措施下的土壤 SAR 水平均呈现出表层土壤低于次表层土壤。三因素方差分析结果表明,改良措施、土层深度和生育期对土壤 SAR 的影响均达到极显著水平,且改良措施对土壤 SAR 的影响要大于土层深度和生育期;改良措施与土层深度的交互作用对土壤 SAR 的影响达到了显著水平,而改良措施与生育期、土层深度与生育期的双因子交互作用和改良措施、土层深度和生育期的三因子交互作用对土壤 SAR 的影响并不显著(表 9)。

表 8 燕麦生育期内不同改良方式下 0—10,10—20 cm 土壤 SAR 动态

单位:mmol/L^{1/2}

土层深度/cm	处理措施	苗期 (播后 0~60 d)	拔节期 (播后 60~90 d)	抽穗期 (播后 90~120 d)	灌浆期 (播后 120~150 d)	成熟期 (播后 150~210 d)
0—10	CK	23.62±7.15a	28.25±1.96a	27.18±4.18a	27.81±3.48a	29.90±3.98a
	OM	20.32±2.70a	21.94±3.33a	21.14±1.98ab	23.18±1.45ab	22.63±2.81b
	PAM+OM	14.61±5.24b	14.08±3.06b	15.96±3.03bc	18.36±2.11bc	17.26±3.62c
	SM+OM	11.54±3.79bc	15.40±1.24b	14.56±5.36c	19.34±3.74bc	20.32±1.98bc
	BS+OM	9.31±2.39cd	11.40±3.09b	12.88±3.97cd	16.70±2.53c	13.56±1.86d
	BM+OM	4.53±1.61d	5.51±0.83c	8.95±3.50d	10.70±2.61d	8.85±2.60e
10—20	CK	29.11±8.92a	31.39±1.74a	30.07±2.43a	32.59±2.90a	30.03±1.74a
	OM	24.90±4.09ab	24.40±5.50b	25.72±2.06ab	25.84±1.35b	24.89±1.80b
	PAM+OM	18.88±2.22bc	20.41±5.61bc	20.62±3.11bc	19.41±5.11cd	23.23±3.13b
	SM+OM	24.05±4.24b	25.11±0.31b	22.81±7.94b	26.52±1.71b	25.89±2.86b
	BS+OM	16.69±5.89c	17.49±2.18c	17.88±5.14bc	22.06±2.61bc	17.88±2.59c
	BM+OM	9.82±2.41d	9.57±1.61d	12.52±4.67c	15.56±3.39d	14.92±3.83c

注:表中数据为平均值±标准差;同列数据后不同小写字母表示在同一时间不同改良措施间差异显著(P<0.05)。

表 9 改良措施、土层深度和生育期对土壤 SAR 影响的方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方差	F	P
T	7970.819	5	1594.164	114.041	0
SD	1414.073	1	1414.073	101.158	0
GS	636.578	4	159.145	11.385	0
T×SD	184.870	5	36.974	2.645	0.024
T×GS	199.043	20	9.952	0.712	0.811
SD×GS	66.079	4	16.520	1.182	0.320
T×SD×GS	125.210	20	6.260	0.448	0.981

注：T 为处理措施；SD 为土层深度；GS 为生育期。

2.4 土壤 ESP

燕麦生育期内,各处理方式下表层土壤的 ESP 的变化特征与 SAR 和土壤含盐量相似,均随生长季的推移波动上升,以 CK 处理的幅度最大;且不同的改良方式下土壤 ESP 在生长季内也存在较大的差异(表 10)。整个生育期内各改良方式均能有效的降低土壤 SAR 水平,其中 BM+OM、BS+OM、SM+OM、

PAM+OM 和 OM 处理的表层土壤 ESP 分别比 CK 处理低 55.5%~79.4%,33.4%~55.5%,24.9%~45.7%,27.8%~43.5%和 10.1%~18.9%。此外,不同改良方式下次表层土壤的 ESP 在燕麦生育期内的动态变化特征与表层相似;均表现在燕麦拔节期、灌浆期和抽穗期显著高于 CK 处理。从空间上来看,随着土层深度的增加,各改良方式下的土壤 ESP 含量均逐渐上升,且各改良措施间土壤 ESP 含量的差异逐渐降低。三因素方差分析结果表明各因子对土壤 ESP 的影响与 SAR 相似,其中改良措施、土层深度和生育期对土壤 ESP 的影响均达到极显著水平,且改良措施对土壤 ESP 的影响要大于土层深度和生育期;改良措施与土层深度的交互作用对土壤 ESP 的影响达到了极显著水平,而改良措施与生育期、土层深度与生育期的双因子交互作用和改良措施、土层深度和生育期的三因子交互作用对土壤 ESP 的影响并不显著(表 11)。

表 10 燕麦生育期内不同改良方式下 0—10,10—20 cm 土壤 ESP 动态 单位: %

土层 深度/cm	处理 措施	苗期 (播后 0~60 d)	拔节期 (播后 60~90 d)	抽穗期 (播后 90~120 d)	灌浆期 (播后 120~150 d)	成熟期 (播后 150~210 d)
0—10	CK	24.74±6.20a	28.76±1.47a	27.88±3.27a	28.38±2.68a	29.90±2.81a
	OM	22.24±2.41a	23.65±2.86a	23.00±1.72ab	24.76±1.20ab	24.25±2.35b
	PAM+OM	16.57±5.55b	16.24±3.22b	18.15±3.03bc	20.49±1.98bc	19.36±3.38c
	SM+OM	13.44±4.31bc	17.65±1.24b	16.66±5.57bcd	21.32±3.47bc	22.27±1.76bc
	BS+OM	11.02±2.87c	13.37±3.40b	14.92±4.32cd	18.89±2.45c	15.74±1.97d
	BM+OM	5.10±2.15d	6.42±1.07c	10.53±4.24d	12.62±2.92d	10.46±3.10e
10—20	CK	28.89±6.88a	31.04±1.21a	30.09±1.77a	31.85±2.02a	30.07±1.28a
	OM	26.05±3.34ab	25.60±4.44b	26.80±1.64ab	26.92±1.08b	26.14±1.46b
	PAM+OM	20.96±2.04bc	22.17±4.96bc	22.51±2.71ab	21.31±4.66cd	24.74±2.60b
	SM+OM	25.36±3.62ab	26.35±0.24ab	24.05±6.94ab	27.45±1.32ab	26.91±2.20b
	BS+OM	18.59±5.76c	19.67±2.10c	19.87±4.93bc	23.79±2.23bc	20.02±2.43c
	BM+OM	11.61±2.83d	11.36±1.89d	14.48±5.21c	17.73±3.43d	17.03±3.91d

注:表中数据为平均值±标准差;同列数据后不同小写字母表示在同一时间不同改良措施间差异显著($P<0.05$)。

表 11 改良措施、土层深度和生育期对
土壤 ESP 影响的方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方差	F	P
T	6805.674	5	1361.135	115.620	0
SD	1235.728	1	1235.728	104.967	0
GS	643.848	4	160.962	13.673	0
T×SD	186.469	5	37.294	3.168	0.009
T×GS	224.339	20	11.217	0.953	0.521
SD×GS	74.160	4	18.540	1.575	0.183
T×SD×GS	101.880	20	5.094	0.433	0.985

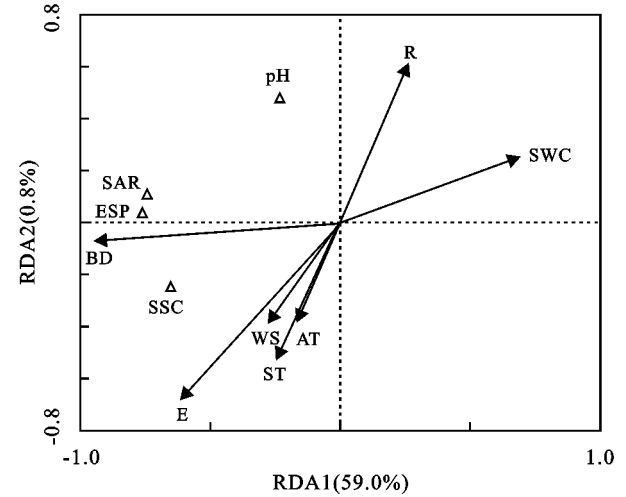
注:T 为处理措施;SD 为土层深度;GS 为生育期。

2.5 燕麦生育期土壤盐渍化程度主控因素

选取采样前 7 日的平均大气温度、平均风速、累积降水量、累积蒸发量和采样时的土壤含水量、土壤温度、土壤容重 7 个指标作为影响燕麦生育期土壤盐渍化参数的环境因子,选取表层土壤含盐量、土壤 pH、土壤 SAR 和土壤 ESP 作为土壤盐渍化参数。对燕麦生育期表层土壤盐渍化参数和环境因子进行 RDA 分析,结果表明环境因子对土壤盐渍化参数的变异程度在第 I 轴、第 II 轴的解释量分别达到 59.0%和 0.8%,表明前两轴土壤环境因子累计能够解释土壤盐渍化参数变异的 59.8%,并且主要由第 I 轴决定(图 1)。

土壤容重、土壤含水量、蒸发量的箭头连线最长,表明其能够较好地解释土壤盐渍化程度的差异。其中土壤容重与土壤含盐量、pH、SAR 和 ESP 的夹角较小且方向一致,呈显著正相关关系,说明土壤容重对土壤盐渍化程度存在显著的正效应;而土壤含水量与土壤含盐量、pH、SAR 和 ESP 的夹角较大且方向相反,呈极显著负相关关系,说明土壤含水量对土壤盐渍化特征存在显著的负效应;降雨量均与含盐量、SAR 和 ESP 呈显著负相关关系,与 pH 呈正相关关系,说明不同土壤改良措施和降雨量的增加均会显著的降低土壤盐渍化水平,但同时也会一定程度的导致土壤 pH 上升。蒸发量、风速、土壤温度和大气温度

与土壤盐分含量和钠吸附比均呈显著的正相关关系,与 pH 无显著相关关系,表明过高的蒸发量、温度和风速均会导致表层土壤出现返盐现象。



注:R 为 7 日累积降雨量;E 为 7 日累积蒸发量;AT 为 7 日平均气温;WS 为 7 日平均风速;BD 为土壤容重;ST 为土壤温度;SWC 为土壤含水量;SSC 为土壤含盐量;SAR 为土壤钠吸附比;ESP 为土壤碱化度。

图 1 表层土壤盐渍化特征与环境因子冗余分析

通过蒙特卡洛检验排序后表明,环境因子对表层土壤盐渍化程度差异的影响程度由大到小依次为土壤容重>土壤含水量>蒸发量>土壤处理措施>风速>降水量>土壤温度>大气温度(表 12)。其中,土壤容重、土壤含水量和蒸发量对表层土壤盐渍化特征的影响均达到极显著水平($P<0.01$),且对土壤盐渍化特征差异性大小的解释量分别达 51.8%,28.0%和 22.2%,说明土壤土壤容重、土壤含水量和蒸发量是影响研究区土壤盐碱参数变异的关键因子。风速、降水量和土壤温度对表层土壤盐渍化特征的解释量分别达到 4.7%,4.3%和 3.9%,其影响均达到显著水平($P<0.05$);说明气象因子也显著影响土壤盐渍化动态变异。大气温度对整体土壤盐渍化特征的影响均未达到显著性水平。

表 12 环境因子对土壤盐渍化程度解释的重要性
排序和显著性检验结果

环境 因子	重要性 排序	环境因子所占 解释量/%	<i>F</i>	<i>P</i>
土壤容重	1	51.8	118.21	0.002
土壤含水量	2	28.0	42.85	0.002
蒸发量	3	22.2	31.30	0.002
风速	4	4.7	5.41	0.018
降水量	5	4.3	4.97	0.030
土壤温度	6	3.9	4.47	0.032
大气温度	7	1.8	2.00	0.174

3 讨论

不同改良方式能显著改善土壤环境,提升土壤理化性质,降低根区土壤盐渍化水平。本试验中,PAM+OM、SM+OM、BS+OM 和 BM+OM 处理措施均在燕麦生育期内有效的降低 0—20 cm 的土壤盐渍化程度,但其抑盐机制不甚相同。韩凤朋等^[24]的研究表明,PAM 的施用能够增加土壤表层颗粒间凝聚力,提高土壤团聚体的稳定性和土壤孔隙率;王全九等^[25]的研究同样发现,添加 PAM 结构改良剂可以有有效的提升土壤入渗速率,从而降低根区盐渍化水平。诸多研究^[19,26]表明,秸秆的覆盖/深埋可以提高土壤持水能力、调控土壤温度,抑制土壤蒸发,阻断地下潜水上行,进而降低根层土壤盐渍化水平;大量研究^[9,27]表明,生物菌肥中含有大量的有益细菌,能够显著的增强微生物活性和有机底物的代谢,增加有机质、氮、磷、钾等养分含量,改善土壤物理结构,促进蓄水保墒,同时导致盐渍土中游离离子浓度降低,特别是 Na⁺ 和 Cl⁻ 的降低,从而降低土壤盐渍化水平;张建兵等^[3]在东台滩涂围垦区改良过程中发现,OM 处理措施在燕麦生长前期阶段能较好地抑制土壤盐渍化,这是因为有机肥能够改善土壤结构,增加有机质、氮、磷、钾等养分含量,有利于盐渍土的保水和盐分的淋溶;然而在燕麦生长中后期阶段,其抑盐效果随着有机肥的分解流失逐渐下降,导致土壤重新上升至重度盐渍化水平。此外,土壤容重的降低可以增加土壤孔隙度,改善通气透水性,改变土壤水盐运移特征,降低土壤盐渍化水平,本研究中各改良措施均有效的降低了土壤容重,从而有效的抑制了土壤盐分含量^[28]。

根区土壤盐渍化水平常受植物生育期生长耗水和土层深度影响。土壤水分是影响土壤盐分的主要因子之一,有研究^[29]表明,由蒸发或蒸腾造成土壤水分损失,导致地下潜水上升是引起根区土壤盐渍化水平上升的主要原因。燕麦在不同的生育期阶段内对土壤水分的需求量也存在差异,从而导致土壤盐渍化程度的差异。本试验中,三因素方差分析表明燕麦生育期对土壤含盐量、pH、SAR 和 ESP 的影响均达到显著性水平,说明受不同生长阶段耗水的差异,土壤

盐渍化水平显著不同(表 5、表 7、表 9、表 11)。由于燕麦在抽穗和灌浆期的生物量迅速扩大,使得水分消耗显著增加,进而导致盐渍化水平上升。相似地,不同土层深度土壤的盐渍化水平同样存在显著差异;三因素方差分析表明土层深度对土壤含盐量、pH、SAR 和 ESP 的影响均达到了显著性水平,而土层深度与处理方式的交互影响同样对土壤盐渍化指标的影响达到显著性水平。燕麦抽穗期以后,不同处理措施下的土壤盐分均呈现不同程度的返盐现象,0—10 cm 土层的土壤含盐量显著高于 10—20 cm,而 pH、SAR 和 ESP 则刚好呈相反趋势,这可能与土壤碱性参数的迁移速率滞后于土壤盐分有关,相关学者^[30-31]在如东和东台滩涂围垦区均发现相似现象。

根区土壤盐渍化水平还受降水、蒸发、风速、气温、湿度等气象条件的影响^[28,32]。研究区属亚热带季风气候,使得土壤的盐渍化动态呈现出明显的季节变化特征。在燕麦生育期内,所有处理方式下的表层土壤盐分逐渐上升,且各处理措施下的土壤含盐量均呈现出强烈的时间变异性,与研究区的气象条件密切相关。冗余分析表明,本试验中土壤含盐量、pH、SAR 和 ESP 均与蒸发量和降雨量呈现出显著的相关关系,表明气象因素是影响改良活动中土壤盐渍化动态的重要因素。此外,大气风速和土壤温度均与土壤盐渍化特征呈现出显著的正相关关系,这是由于研究区冬春季节较大的风速、气温的回升使得土壤蒸发量增加,进而导致土壤盐渍化水平上升(图 1)。因此,在春季蒸发旺盛时期可通过适当人工灌溉,抑制土壤返盐。

4 结论

(1)表层盐分随着燕麦生育期的推移逐渐上升。与 CK 处理相比,不同改良措施均能够显著的降低 0—20 cm 土层深度的土壤盐分,且 PAM+OM、SM+OM、BS+OM 和 BM+OM 之间的土壤盐分含量并无显著性差异。

(2)燕麦生育期内,土壤 pH 均随时间的推移逐渐下降,而 SAR 和 ESP 则缓慢的上升。整个生长季内各改良措施均能较好的降低 SAR 和 ESP,其中以 BM+OM 处理效果最佳。

(3)环境因子对土壤盐碱参数变异的重要性由大到小依次为土壤容重>土壤含水量>蒸发量>风速>降水量>土壤温度>大气温度。其中,土壤容重、土壤含水量和蒸发量对表层土壤盐渍化程度的影响均达到极显著水平,而风速和降水量的影响则达到显著水平。

参考文献:

[1] 韩建均,杨劲松,姚荣江,等.苏北滩涂区水盐调控措施对土壤盐渍化的影响研究[J].土壤,2012,44(4):658-664.

[2] 姚荣江,杨劲松,陈小兵,等.苏北海涂围垦区土壤质量模糊综合评价[J].中国农业科学,2009,42(6):2019-2027.

- [3] 张建兵,杨劲松,李芙蓉,等.有机肥与覆盖对苏北滩涂重度盐渍土壤水盐调控效应分析[J].土壤学报,2014,51(1):184-188.
- [4] 徐彩瑶,濮励杰,朱明.沿海滩涂围垦对生态环境的影响研究进展[J].生态学报,2018,38(3):1148-1162.
- [5] He B, Cai Y L, Ran W R, et al. Spatial and seasonal variations of soil salinity following vegetation restoration in coastal saline land in eastern China[J].Catena,2014,118:147-153.
- [6] Mohan J A, Walther B D. Spatiotemporal variation of trace elements and stable isotopes in subtropical estuaries: II. Regional, local, and seasonal salinity-element relationships[J]. Estuaries and Coasts,2015,38(3):769-781.
- [7] 霍龙,逢焕成,卢闯,等.地膜覆盖结合秸秆深埋条件下盐渍土壤呼吸及其影响因素[J].植物营养与肥料学报,2015,21(5):1209-1216.
- [8] 周继,陈晓燕,谢德体,等.土壤改良剂聚丙烯酰胺对紫色土物理性质及其空间变异的影响[J].水土保持学报,2009,23(6):171-177.
- [9] 宋双双,孙保平,张建锋.保水剂和微生物菌肥对半干旱区造林和土壤改良的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):337-342.
- [10] 王慧,解文斌,刘宁,等.基于栽植沙枣的晋北盐碱地土壤改良处理组合研究[J].水土保持学报,2016,30(4):281-287.
- [11] 赵永敢,逢焕成,李玉义,等.秸秆隔层对盐碱土水盐运移及食葵光合特性的影响[J].生态学报,2013,33(17):5153-5161.
- [12] 刘慧军,刘景辉,于健,等.土壤改良剂对燕麦土壤理化性状及微生物量碳的影响[J].水土保持学报,2012,26(5):68-72.
- [13] 刘建新,王金成,贾海燕,等.燕麦幼苗对盐胁迫和碱胁迫的生理响应差异[J].水土保持学报,2015,29(5):331-336.
- [14] Han L P, Wang W H, Eneji A E, et al. Phytoremediating coastal saline soils with oats: Accumulation and distribution of sodium, potassium, and chloride ions in plant organs[J].Journal of Cleaner Production,2015,90(1):73-81.
- [15] El-Mageed T, Semida W M, El-Wahed M H. Effect of mulching on plant water status, soil salinity and yield of squash under summer-fall deficit irrigation in salt affected soil[J].Agricultural Water Management,2016,173:1-12.
- [16] 梁建财,史海滨,杨树青,等.秸秆覆盖对盐渍土壤水盐状况及向日葵产量的影响[J].土壤通报,2014,45(5):1202-1206.
- [17] 赵永敢,李玉义,胡小龙,等.地膜覆盖结合秸秆深埋对土壤水盐动态影响的微区试验[J].土壤学报,2013,50(6):1129-1137.
- [18] Gill J S, Sale P W G, Peries R R, et al. Changes in soil physical properties and crop root growth in dense sodic subsoil following incorporation of organic amendments[J].Field Crops Research,2009,114(1):137-146.
- [19] 赵永敢,王婧,李玉义,等.秸秆隔层与地覆膜盖有效抑制潜水蒸发和土壤返盐[J].农业工程学报,2013,29(23):109-117.
- [20] Xie X F, Pu L J, Shen H Y, et al. Effects of soil reclamation on the oat cultivation in the newly reclaimed coastal land, Eastern China[J].Ecological Engineering,2019,129:115-122.
- [21] 沈洪运,解雪峰,濮励杰,等.不同改良方式下滩涂围垦区土壤水盐动态:以江苏如东为例[J].土壤通报,2019,50(2):316-322.
- [22] 解雪峰,濮励杰,王琪琪,等.滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系[J].环境科学,2018,39(3):1404-1412.
- [23] 解雪峰,濮励杰,朱明,等.基于典范对应分析的滨海滩涂围垦区景观格局与土壤盐渍化关系[J].地理研究,2017,36(3):495-505.
- [24] 韩凤朋,郑纪勇,李占斌,等.PAM对土壤物理性状以及水分分布的影响[J].农业工程学报,2010,26(4):70-74.
- [25] 王全九,张继红,谭帅.微咸水入渗下施加 PAM 土壤水盐运移特性研究[J].土壤学报,2016,53(4):1056-1064.
- [26] Zhao Y G, Pang H C, Wang J, et al. Effects of straw mulch and buried straw on soil moisture and salinity in relation to sunflower growth and yield[J].Field Crops Research,2014,161:16-25.
- [27] Zhang T, Wang T, Liu K S, et al. Effects of different amendments for the reclamation of coastal saline soil on soil nutrient dynamics and electrical conductivity responses [J]. Agricultural Water Management, 2015, 159:115-122.
- [28] Xie X F, Pu L J, Wang Q Q, et al. Response of soil physicochemical properties and enzyme activities to long-term reclamation of coastal saline soil, Eastern China[J].Science of the Total Environment,2017,607/608:1419-1427.
- [29] Pang H C, Li Y Y, Yang J, et al. Effect of brackish water irrigation and straw mulching on soil salinity and crop yields under monsoonal climatic conditions [J]. Agricultural Water Management,2010,97:1971-1977.
- [30] Yin A J, Zhang M, Gao C, et al. Salinity evolution of coastal soils following reclamation and intensive usage, Eastern China[J].Environment Earth Science,2016,75:1281.
- [31] Xie X F, Pu L J, Zhu M, et al. Linkage between soil salinization indicators and physicochemical properties in a long-term intensive agricultural coastal reclamation-area, Eastern China[J].Journal of Soils and Sediment,2019,19:3699-3707.
- [32] Liu D D, She D L, Yu S, et al. Rainfall intensity and slope gradient effects on sediment losses and splash from a saline-sodic soil under coastal reclamation[J].Catena,2015,128:54-62.