

速缓效氮肥配施有机肥对滨海盐渍土供氮能力及小麦产量的影响

张乃丹¹, 宋付朋¹, 张喜琦², 左世福³, 王文杰⁴

(1.土壤资源高效利用国家工程实验室, 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018;

2.山东省食品药品检验研究院, 济南 250101; 3.沂南县农业农村局, 山东

沂南 276300; 4.东营市农业农村局, 山东 东营 257000)

摘要: 为了提高盐渍土氮素肥力和小麦产量, 达到改良培肥、增产增效的目的, 2017—2019 年在滨海盐渍土区进行田间试验, 研究盐渍土氮肥与有机肥的运筹模式。田间试验按裂区设计, 在同一施氮(N)量 225 kg/hm² 条件下, 分设 3 个速缓效氮肥掺混比例: 100% : 0 (F1), 50% : 50% (F2), 30% : 70% (F3); 3 个有机肥用量: 6 t/hm² (O1), 12 t/hm² (O2), 15 t/hm² (O3), 不施氮肥和有机肥处理为空白对照(CK)。结果表明, 与其他速缓效氮肥掺混比例和有机肥用量相比, F3O3 处理能有效降低盐渍土耕层水溶性盐含量 0.7%~9.5%; 土体剖面 20—100 cm 各土层硝、铵态氮含量与耕层相比分别降低 1.3%~42.3%, 3.8%~44.3%, 有效减少了氮素淋出耕层; 小麦返青期至成熟期耕层土壤速效硝、铵态氮含量分别显著提高 16.6%~59.8%, 21.5%~60.4%; 两季小麦分别增产 5.9%~47.0%, 8.3%~46.6%, 并提高了氮肥利用效率和经济效益。因此, 小麦播前撒施速缓效比例 30% : 70% 掺混氮肥 225 kg/hm² 配施有机肥 15 t/hm² (F3O3) 并翻耕与耕层混匀能够有效降低滨海盐渍土耕层盐分, 减少氮素淋失, 提升耕层土壤的供氮能力, 并达到增产增效, 是滨海盐渍土改良培肥最优的氮肥与有机肥运筹模式。

关键词: 控释尿素; 有机肥; 小麦; 供氮能力; 产量

中图分类号: S156.4⁺2; S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)06-0337-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.06.047

Effect of Available and Slow-released Nitrogen Fertilizer Combined with Organic Fertilizer on Soil Nitrogen Supply Capacity and Wheat Yield in Coastal Saline Soil

ZHANG Naidan¹, SONG Fupeng¹, ZHANG Xiqi², ZUO Shifu³, WANG Wenjie⁴

(1. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources,

College of Resources and Environment, Shandong Agriculture University, Tai'an, Shandong 271018;

2. Shandong Institute of Food and Drug Control, Jinan 250101; 3. Yinan Agricultural and Rural

Bureau, Yinan, Shandong 276300; 4. Dongying Agricultural and Rural Bureau, Dongying, Shandong 257000)

Abstract: In order to improve the nitrogen fertility and wheat yield of saline soil, achieve the purpose of improving fertilizer, increasing yield and efficiency, a field experiment was conducted in coastal saline soil test site to study the reasonable fertilizer management suitable for coastal saline soil. The split plot experiment was conducted from 2017 to 2019, with three mixing ratio of available and slow-released nitrogen fertilizer (N: 225 kg/hm²), 100% : 0 (F1), 50% : 50% (F2), 30% : 70% (F3), were used as the main plots. Three organic fertilizer rates were set as sub plots: 6 t/hm² (O1), 12 t/hm² (O2), and 15 t/hm² (O3), and no nitrogen application was the control (CK). The results showed that compared with other nitrogen and organic fertilizer treatments, the F3O3 treatment effectively reduced the salt content in the surface of saline soil by 0.7%~9.5%, reduced the content of nitrate and ammonium nitrogen in 20—100 cm soil layers by 1.3%~42.3% and 3.8%~44.3% respectively, which effectively reduced the nitrogen leaching out of the plough layer, increased the contents of available nitrate and ammonium nitrogen in plough layer by 16.6%~

收稿日期: 2020-04-27

资助项目: 山东省重大科技创新工程项目(2017CXGC0301, 2019JZZY010723)

第一作者: 张乃丹(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤肥力资源管理与高效利用研究。E-mail: sndznd@163.com

通信作者: 宋付朋(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤肥力资源管理与高效利用研究。E-mail: fpsong@126.com

59.8% and 21.5% ~ 60.4% respectively from the turning green stage to mature stage. And the F3O3 treatment significantly increased wheat grain yield, increasing by 5.9% ~ 47.0% in 2018 and 8.3% ~ 46.6% in 2019 compared with other nitrogen and organic fertilizer treatments. To sum up, in the coastal saline soil, the treatment of 70% slow-released urea and 30% available urea combined with organic fertilizer 15 t/hm² could effectively reduce the soil salinity and nitrogen leaching, maintained the available nitrogen nutrients, and improved the nitrogen supply capacity of the surface soil and wheat yield. It was the reasonable fertilizer operation mode of nitrogen fertilizer combined with organic fertilizer in coastal saline soil which can be widely used to improve fertilization and soil fertility.

Keywords: control-release urea; organic fertilizer; wheat; nitrogen supply capacity; yield

黄河三角洲滨海盐渍土是我国重要的后备土地资源,也是重要的粮食生产区。滨海盐渍土区域海水入侵严重,地下水位浅且矿化度高,地表蒸发量大,耕层过量积盐,造成土壤理化性状恶化,并抑制作物生长和产量提高^[1]。盐分含量高不仅影响土壤结构和作物生长,而且影响土壤氮素养分有效性;盐分胁迫下,氮素的硝化和有机氮的矿化以及铵态氮的吸附均受到抑制作用,加速土壤氮挥发,同时盐渍土结构性差,造成大量氮素养分淋失^[2]。多数农民在滨海盐渍土粮食作物生产中为获得高产而盲目施化肥,尤其是大量施用速效氮肥,加剧了氮挥发和氮素淋失,降低了氮肥利用率,污染了滨海盐渍土生态环境。国内外滨海盐渍土的改良方法,主要采用水利工程、生物农艺、化学改良等措施进行耕层土壤脱盐、降盐及其性状改良,但采用淋洗方法进行耕层土壤脱盐和降盐易造成土壤养分淋失、土壤性状恶化及其土壤肥力降低,尤其是氮素肥力的降低^[3]。因此,如何提高滨海盐渍土耕层氮素肥力成为滨海盐渍土研究的重点与热点。

滨海盐渍土氮素的研究多数集中在盐胁迫环境下不同氮素形态^[4]、施氮水平对植株的生长及生理特性的影响等方面^[5]。有研究^[6]表明,增施氮肥有利于滨海盐渍土有效氮素养分的供应,更有利于作物吸收并调节体内离子平衡,缓解盐分胁迫,促进生长,提高作物产量^[7]。很多非盐渍土研究缓效控释尿素对土壤氮素和作物生长的研究^[8]发现,在拔节期至抽穗期,小麦对氮素养分需求最高,缓效控释尿素的养分释放与小麦的需氮规律相吻合,提高了土壤氮素有效养分且满足了小麦生长对氮素的吸收需求;与普通尿素相比,缓效控释尿素为一次性基施,不仅降低劳动成本^[9],而且能有效提高氮素利用率和小麦产量^[10]。但缓效控释尿素在滨海盐渍土氮素研究中应用较少,尤其是探讨不同速、缓效氮肥比例的相关研究鲜见报道。对于滨海盐渍土理化性状的改良,多数研究^[11]采用增施有机肥的方法,达到提高土壤有机质含量、改善土壤结构、提高通气透水、保水保肥和供水供肥性能及调节土壤微生物和酶活性的目的。因此,研究探讨既能调控滨海

盐渍土氮素肥力,提高耕层供氮能力,满足作物生长需求,又能改良其理化性状的改良培肥模式,成为现代滨海盐渍土改良技术措施研究的必然。

本研究在滨海盐渍土区根据滨海盐渍土性状与氮素肥力特点及其小麦生长发育对氮素的需求规律,研究不同的速缓效氮肥掺混比例配施有机肥对滨海盐渍土耕层供氮能力和小麦产量及氮肥利用效率的影响,探讨降盐保肥、提氮增碳、增产增效的最优滨海盐渍土改良培肥模式,为滨海盐渍土绿色改良和粮食生产提供科学理论与实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于山东省东营市利津县渤海粮仓试验田(118°36'E, 37°47'N),南依黄河,东临渤海。年平均降水量 537 mm,年平均气温 14.5 °C,属于暖温带半湿润季风气候。中国土壤系统分类为弱盐淡色潮湿雏形土(Parasalic Ochri-Aquic Cambosols),耕层土壤质地为黏壤土(含黏粒 31.3%,砂粒 42.2%,粉粒 26.5%)。耕层土壤的基本理化性质为:pH 8.13,水溶性盐含量 2.07 g/kg,有机质含量 13.2 g/kg,全氮含量 1.43 g/kg,硝态氮含量 7.1 mg/kg,铵态氮含量 5.8 mg/kg,有效磷含量 18.6 mg/kg,有效钾含量 299.3 mg/kg。

1.2 试验设计

田间试验于 2017 年 10 月 15 日至 2018 年 6 月 19 日、2018 年 10 月 8 日至 2019 年 6 月 11 日进行,供试冬小麦品种为“济麦 22”,播种量为 300 kg/hm²。试验共设 10 个处理,每个处理重复 3 次(表 1)。

供试肥料:缓效尿素(N 35%,控释期为 90 天)、普通尿素(N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 18%)、硫酸钾(K₂O 50%)、供试商品有机肥(有机质 ≥ 45%,氮磷钾总养分 ≥ 5%,N 0.32%)。所有处理均施过磷酸钙 P₂O₅ 150 kg/hm²和硫酸钾 K₂O 75 kg/hm²。除了速缓效比为 100% : 0 的处理氮肥按照当地农民习惯做法:50%小麦播前基施,50%拔节期后抽穗期前随水追施外,所有处理的有机肥、氮磷钾肥均在小麦播前一次性撒施后耕翻与耕层混匀。

1.3 测定项目与方法

耕层土壤样品及冬小麦植株样品分别于分蘖期(2017 年 12 月,2018 年 11 月)、返青期(2018 年 3 月,2019 年 3 月)、拔节期(2018 年 4 月,2019 年 4 月)、抽穗期(2018 年 5 月,2019 年 5 月)、成熟期(2018 年 6 月,2019 年 6 月)分小区进行采集,风干后磨细过 1,0.25 mm 筛待用。土壤含水量采用烘干称

重法测定,硝态氮和铵态氮含量采用 2 mol/L KCl 浸提—流动分析仪测定,有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定,全盐采用水土比(v/w)5∶1 浸提液—烘干残渣法测定。田间收获每小区 1 m²小麦植株测量穗数和穗粒数,实验室置于烘箱中 105 ℃杀青 30 min,65 ℃烘干至恒重,考种磨细后采用硫酸—过氧化氢消煮、凯氏定氮法测定植株全氮。

表 1 试验处理

处理	速效尿素/ (N, kg · hm ⁻²)	缓效控释尿素/ (N, kg · hm ⁻²)	氮肥比例/% 速效∶缓效	氮肥代号	有机肥/ (t · hm ⁻²)	有机肥 代号	有机肥氮量/ (N, kg · hm ⁻²)
CK	0	0	—	—	0	—	—
F1O1	225	0	100∶0	F1	6	O1	19.2
F1O2	225	0	100∶0	F1	12	O2	38.4
F1O3	225	0	100∶0	F1	15	O3	48.0
F2O1	112.5	112.5	50∶50	F2	6	O1	19.2
F2O2	112.5	112.5	50∶50	F2	12	O2	38.4
F2O3	112.5	112.5	50∶50	F2	15	O3	48.0
F3O1	67.5	157.5	30∶70	F3	6	O1	19.2
F3O2	67.5	157.5	30∶70	F3	12	O2	38.4
F3O3	67.5	157.5	30∶70	F3	15	O3	48.0

1.4 数据处理

氮肥效率相关指标的计算方法^[12]:
氮肥农学效率(kg/kg)=(施氮区籽粒产量—不施氮区籽粒产量)/施氮量
氮肥偏生产力(kg/kg)=施氮区籽粒产量/施氮量
氮肥利用率(%)=(施氮处理氮累积量—不施氮处理氮累积量)/施氮量×100%
田间调查和室内测定数据均采用 Microsoft Excel 2010、SPSS 19.0、Origin 8.0、DPS 3.01 软件对试验数据进行统计分析和绘图。

2 结果与分析

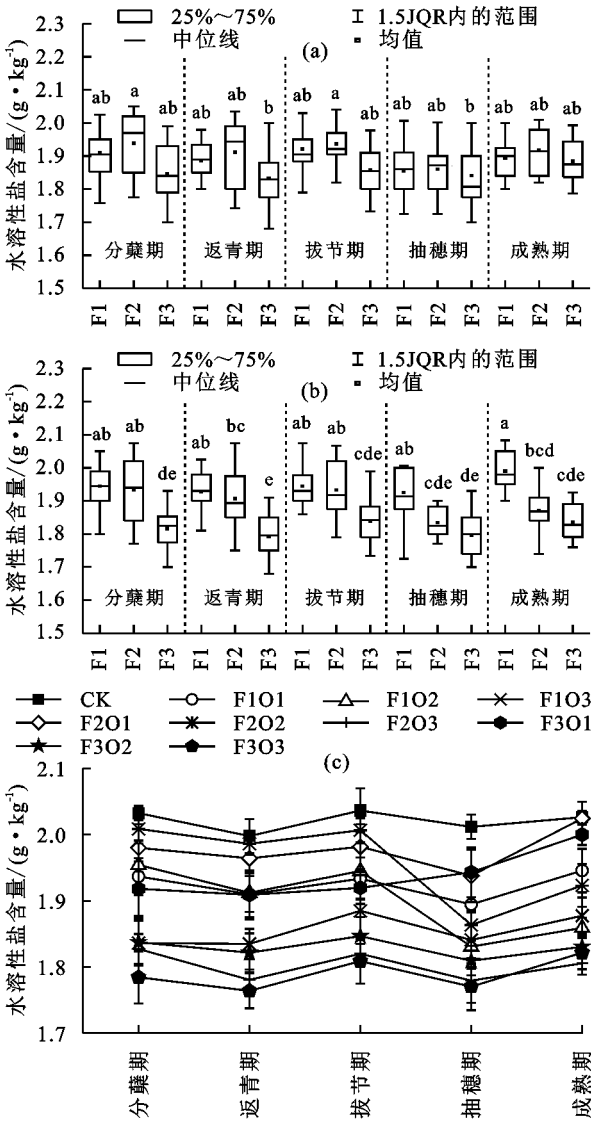
2.1 不同处理对盐渍土耕层水溶性盐含量的影响

不同速缓效氮肥比例和有机肥用量对小麦不同生育期耕层土壤水溶性盐含量影响不同(图 1)。不同速缓效氮肥比例 F1、F2、F3 处理耕层水溶性盐含量无显著差异(图 1a);不同有机肥用量 O1、O2、O3 处理耕层水溶性盐含量差异显著(图 1b),小麦分蘖期至拔节期,与 O1、O2 处理相比,O3 处理的耕层水溶性盐含量显著降低;在小麦抽穗期和成熟期,O3 处理与 O2 处理差异不显著,但显著低于 O1 处理;在小麦不同生育期,与 O2、O1、CK 处理相比,O3 处理耕层水溶性含量分别降低 4.2%,6.7%,10.2%。
F3O3 处理在各生育期平均水溶性盐含量为 1.79 mg/kg(图 1c);分蘖期和返青期,F3O3 处理的耕层水溶性盐含量与 F1O3、F2O3、F3O2 差异不显著,显

著低于其他处理;拔节期,F3O3 处理与 F1O3、F2O3、F3O1、F3O2 差异不显著,显著低于其他处理;抽穗期,F3O3 处理显著低于 CK、F1O1、F2O1、F3O1,与其他处理差异不显著;成熟期,F3O3 处理与 F1O2、F1O3、F2O3、F3O2 差异不显著,显著低于其他处理。

2.2 不同处理对滨海盐渍土耕层速效氮含量的影响

所有施肥处理耕层土壤硝态氮含量显著高于 CK 处理,最高达 33.84 mg/kg(图 2)。速缓效氮肥 F3 所有处理(F3O1、F3O2、F3O3)除了在小麦分蘖期显著低于 F2 所有处理(F2O1、F2O2、F2O3)、在小麦抽穗期显著低于 F1O3 外,在其他生育期,F3 所有处理耕层土壤硝态氮含量平均显著高于其他处理 44.1%。在同一速缓效氮肥比例条件下,耕层土壤硝态氮含量基本随有机肥用量的增加而增加,其中 O3 处理(F1O3、F2O3、F3O3)较 O1 处理(F1O1、F2O1、F3O1)、O2 处理(F1O2、F2O2、F3O2)分别平均增加 16.7%,10.4%。
小麦分蘖期,F3O3 处理耕层土壤硝态氮含量与 F1O1、F1O2、F1O3、F3O2 处理差异不显著,除显著高于 F3O1 处理外,均显著低于其他处理。小麦抽穗期,F3O3 处理耕层土壤硝态氮含量与 F1O1、F1O2 处理差异不显著,与其他处理均差异显著。在小麦返青期、拔节期和成熟期,F3O3 处理耕层土壤硝态氮含量最高,与其施肥处理相比均显著增加 12.8%~77.3%,9.9%~127.6%和 15.1%~86.7%,提高了耕层土壤硝态氮的供应能力。



注：(a)为不同速缓效氮肥比例处理；(b)为不同有机肥用量处理；(c)为不同速缓效氮肥比例配施有机肥处理。

图 1 不同速缓效比例和有机肥处理下耕层土壤水溶性盐含量

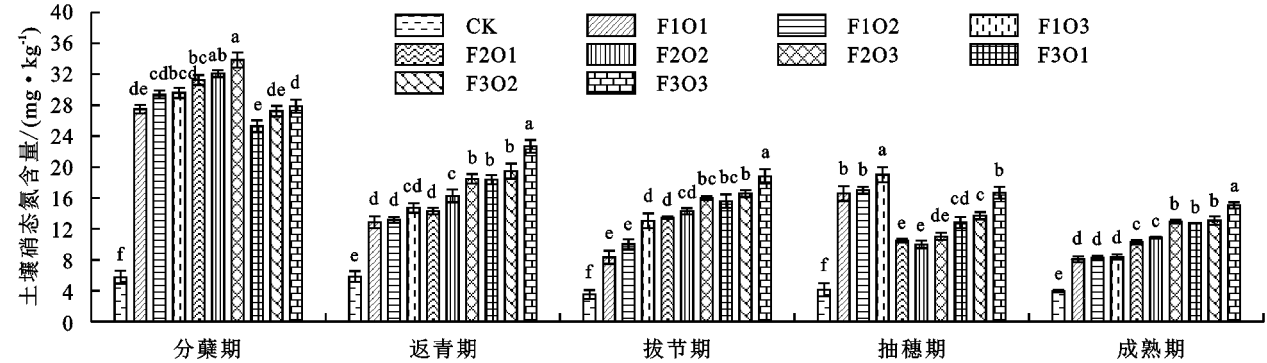


图 2 不同处理小麦各生育期耕层土壤硝态氮含量

不同处理在 0—20, 20—100 cm 土层间铵态氮含量差异显著;且 20—100 cm 不同土层中铵态氮含量变化差异较小(图 4b)。在 0—20 cm 土层 F3O3 处理铵态氮含量最高,除与 F2O2、F2O3、F3O2 处理不显著外,较其他速缓效氮肥和有机肥处理显著增加 35.6%~67.4%;40—60, 60—80, 80—100 cm 土层中,

速缓效氮肥 F3 所有处理的耕层土壤铵态氮含量随小麦生长缓慢减少,返青期较分蘖期平均降低 23.7%;与 F1、F2 所有处理相比,平均降低 58.8%,51.1%(图 3)。有机肥用量在速缓效氮肥 F3 处理下显著影响铵态氮含量,F3O3 较 F3O1 处理小麦各生育期铵态氮含量显著增加 20.5%~55.1%。小麦分蘖期,F3O3 处理的铵态氮含量较 F3O1、F3O2 处理显著增加,较 F2O3 处理显著降低;返青期 F3O3 处理较其他施肥处理显著增加 32.1%~128.0%;拔节期 F3O3 处理与 F3O2 处理差异不显著,较其他施肥处理显著增加 16.4%~74.8%;抽穗期,F3O3 与 F1O1、F1O2、F1O3 处理差异不显著,较其他施肥处理平均显著增加 44.6%;成熟期表现为 F3O3 处理与 F2O3 处理不显著,F3O3 较其他处理显著增加 17.1%~62.7%。综上,F3O3 处理的耕层硝、铵态氮含量较高且变化稳定,有利于满足小麦不同生育期对氮素的需求。

2.3 不同处理对滨海盐渍土剖面速效氮含量的影响

试验数据显示,随土层加深,F3O3 处理的硝态氮含量显著减少(图 4a)。0—20 cm 土层中速缓效氮肥 F1 所有处理的硝态氮含量最低,F3O3 处理的硝态氮含量显著高于其他速缓效氮肥和有机肥处理 9.5%~179.2%,且不同有机肥用量对硝态氮含量影响显著,表现为硝态氮含量 O3>O2>O1;20—40 cm 土层中,F3O3 处理硝态氮含量显著低于 F3O2 和 F2O3 处理,较其他处理显著升高或无显著差异;40—60 cm 土层中,F1 所有处理硝态氮含量升高,F3O3 处理显著低于 F1O1、F1O2、F1O2、F2O3 处理;60—100 cm 土层中,F3O3 处理的硝态氮含量显著低于 F1O1、F1O2、F1O2、F2O1 处理,同时硝态氮含量随有机肥用量增加而减少。综上 F3O3 处理没有明显深层累积的现象,大部分积聚在表层,利于氮素供应并减少硝态氮淋失。

F3O3 处理较 F1O1、F1O2、F2O1 处理铵态氮含量均显著降低,分别平均降低 39.4%,41.2%,41.9%,与其他处理差异不显著。同时,随有机肥用量的增多,0—20 cm 土层中铵态氮含量增加,而 20—100 cm 各土层中铵态氮含量逐渐减少。综上,F3O3 处理增加了耕层无机氮含量,减少剖面氮素累积。

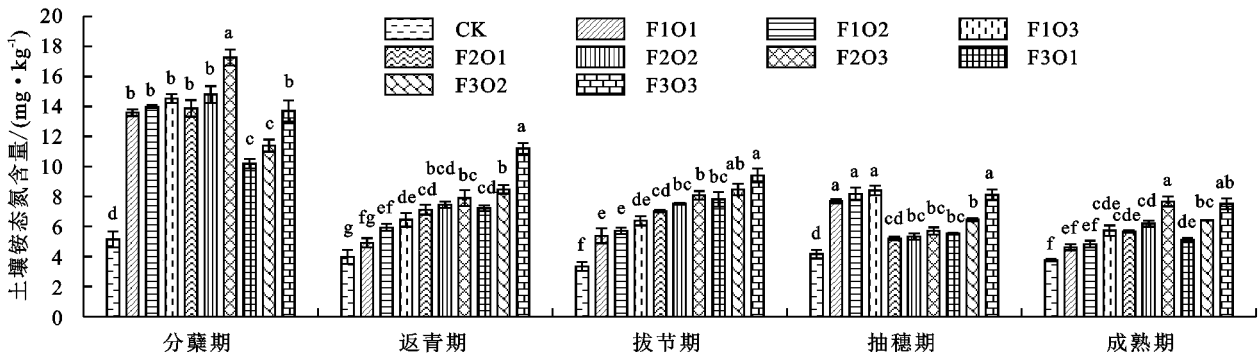


图3 不同处理小麦各生育期耕层土壤铵态氮含量

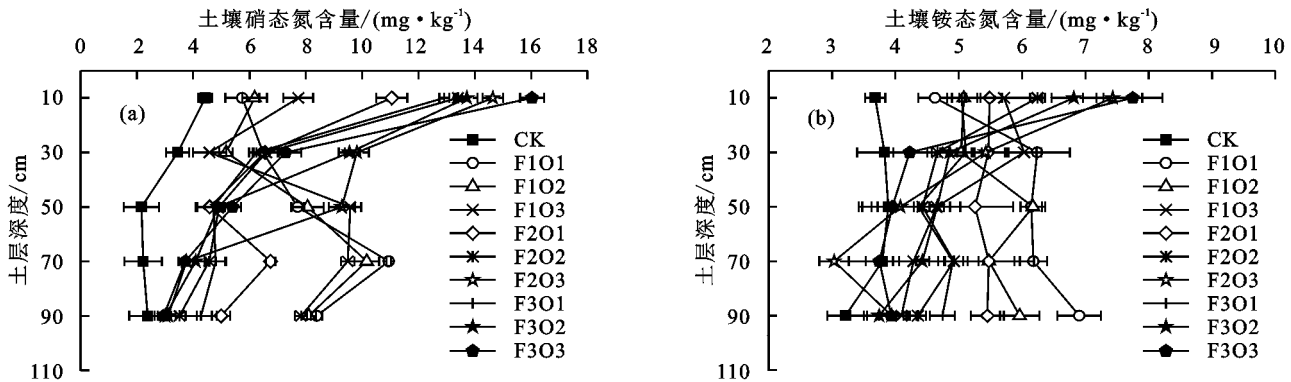


图4 小麦收获后不同处理土壤剖面硝态氮和铵态氮含量分布

2.4 不同处理对盐渍土有机质含量的影响

与CK相比,施用速缓效氮肥和有机肥处理小麦收获后耕层土壤有机质含量显著增加,变化范围为15.99~18.30 g/kg(图5)。同一有机肥用量条件下,不同速缓效氮肥比例对有机质含量无显著影响;而同一速缓效氮肥比例条件下,有机质含量随有机肥用量增加而增加,其中速缓效氮肥F2、F3处理下,有机肥O2和O3处理有机质含量较O1处理显著增加,F3O3较F3O1处理有机质含量显著增加14.4%。同时,F3O3处理的有机质含量与F1O1、F2O2、F2O3、F3O2处理差异不显著,较其他速缓效氮肥和有机肥处理显著增加8.5%~12.9%。

2.5 不同处理对小麦产量及氮肥效率的影响

两季小麦产量与产量构成受不同速缓效氮肥比例和不同有机肥用量影响差异显著(表2)。同一有机肥用量水平下,小麦2年产量均表现为F3处理优

于F2和F1处理;有机肥用量分别为O1、O2、O3时,F3较F2处理2年平均显著提高4.8%、5.5%、7.6%。同一速缓效氮肥比例条件下,有机肥用量显著影响小麦产量,其中F3处理下,O3较O2处理2年平均显著增产7.1%,O2较O1处理2年平均显著增产9.4%。同时,F3O3处理的小麦籽粒产量最高,较其他速缓效氮肥和有机肥处理显著增产5.9%~47.0%。

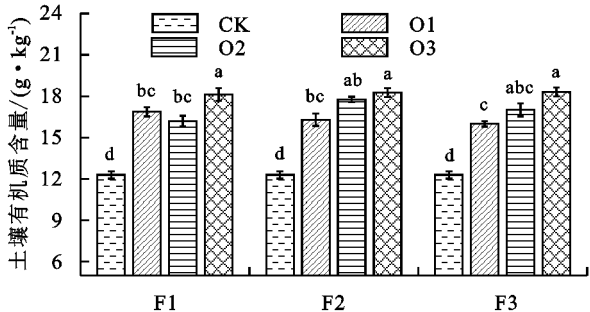


图5 小麦成熟期不同处理耕层土壤有机质含量

表2 不同处理小麦产量及产量构成

处理	籽粒产量/(kg·hm ⁻²)		穗数/(个·m ⁻²)		穗粒数		千粒重/g	
	2018年	2019年	2018年	2019年	2018年	2019年	2018年	2019年
CK	3692h	3655g	426.7g	433.3f	28.6f	28.8g	35.6e	34.5f
F1O1	5003g	5188f	456.7f	463.3e	34.9e	36.6f	36.9de	36.0e
F1O2	5367f	5370f	468.3e	470.0de	35.8e	36.2f	37.7cd	37.1de
F1O3	5887e	5767e	480.0d	476.7d	36.8d	37.1ef	39.2b	38.4bcd
F2O1	6036e	6146d	515.0c	506.7c	37.3cd	38.3de	37.0d	37.3cde
F2O2	6635c	6601c	521.7bc	515.0bc	38.7b	39.0bcd	38.7bc	38.6bc
F2O3	6914b	6985b	526.7ab	530.0a	39.5ab	40.0abc	39.1bc	38.7b
F3O1	6296d	6474c	525.0ab	525.0ab	38.1bc	39.0cd	37.1d	37.2de
F3O2	6945bc	7022b	530.0ab	533.3a	39.6a	40.3ab	38.9bc	38.5bcd
F3O3	7354a	7605a	533.3a	536.7a	39.6a	41.1a	41.0a	40.6a

注:同列数据后标有相同小写字母的处理间差异不显著(P<0.05)。下同。

随速缓效氮肥比例的减小和有机肥用量的增加,小麦穗数、穗粒数和千粒重逐渐增加。F3O3 处理的穗数与 F2O3、F3O1、F3O2 无显著差异,较其他速缓效氮肥和有机肥处理显著增加 2.2%~16.8%。F3O3 处理的穗粒数与 F2O3、F3O3 不显著,较 F3O1 平均显著增加 4.7%。F3O3 处理的千粒重较其他处理显著提高,两季平均提高 5.4%~16.3%。

由表 3 可以看出,随速缓效氮肥比例的减小和有机肥用量的增加,氮肥效率显著增加,F3 所有处理氮肥农学效率、氮肥偏生产力和氮肥利用率显著高于 F1 和 F2 部分处理,且有机肥用量 O3 所有处理较 O1、O2 部分处理显著增加。F3O3 较 F2O3 处理氮肥农学效率、氮肥偏生产力和氮肥利用率分别显著增加 16.2%,7.6%和 12.7%;与 F3O2 处理相比,除 2018 年氮肥偏生产力和氮肥利用率不显著外,F3O3 处理分别显著提高 10.7%,4.5%和 10.9%,施用缓效控释尿素能显著提高氮肥利用率,配施有机肥可进一步提高肥效。

表 3 不同处理小麦氮肥效率

处理	氮肥农学效率/ (kg·kg ⁻¹)		氮肥偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)		氮肥利用率/%	
	2018 年	2019 年	2018 年	2019 年	2018 年	2019 年
	—	—	—	—	—	—
CK	—	—	—	—	—	—
F1O1	5.4g	6.3g	20.5e	21.2d	34.6d	33.4d
F1O2	6.4f	6.5g	20.4e	20.4e	34.2d	34.6d
F1O3	8.0e	7.7f	21.6d	21.1de	34.7d	39.3c
F2O1	9.6d	10.2e	24.7c	25.2c	40.6c	39.5c
F2O2	11.2b	11.2d	25.2b	25.1c	39.6c	42.6bc
F2O3	11.8b	12.2bc	25.3b	25.6c	40.9c	42.6bc
F3O1	10.7c	11.5cd	25.8b	26.5b	42.0bc	43.8bc
F3O2	12.4b	12.8b	26.4ab	26.7b	44.0ab	44.0b
F3O3	13.4a	14.5a	26.9a	27.9a	45.3a	48.8a

2.6 不同处理对小麦经济效益的影响

从表 4 可以看出,总收入随小麦产量变化而变

化,肥料成本随缓效控释尿素和有机肥用量增加逐渐增加。其中 F3O1 处理净收益较 F2O1 显著增加 8.3%,F3O2 处理净收益较 F2O2 显著增加 11.2%,F3O3 处理净收益较 F2O3 显著增加 15.1%。因此,F3 的净收益较 F2 平均增加 16.8%。速缓效氮肥 F3O3 处理的小麦净收入除与 F3O2、F3O1 处理不显著外,显著高于其他处理 16.2%~116.2%。尽管 F3O3 处理的肥料成本最高,但 F3O3 处理由于节省了部分追肥人工成本并获得最多的产量而增加净收益,同时降低不合理施肥带来的环境危害。

表 4 不同处理的两季小麦平均经济效益

处理	收入和支出/(元·hm ⁻²)				增收/%
	总收入	肥料成本	其他成本	净收入	
CK	8915.0	1347.5	3675.0	3892f	-20.0
F1O1	12365.0	3821.8	3675.0	4868e	—
F1O2	13029.0	5501.8	3675.0	3851f	-20.9
F1O3	14141.0	6341.8	3675.0	4124f	-15.3
F2O1	14782.0	4040.5	3175.0	7566bc	55.4
F2O2	16061.0	5720.5	3175.0	7165cd	47.2
F2O3	16866.0	6560.5	3175.0	7130d	46.4
F3O1	15496.0	4128.0	3175.0	8193a	68.3
F3O2	16949.0	5808.0	3175.0	7965ab	63.6
F3O3	18152.0	6648.0	3175.0	8329a	71.1

注:市场均价小麦 2 426.9 元/t,尿素 1 624 元/t,缓效控释尿素 1 916 元/t,过磷酸钙 1 023 元/t,硫酸钾 3 300 元/t,有机肥 280 元/t,其他成本包括播种、施肥、翻耕、灌溉、农药等用工和其他材料。

速缓效氮肥比例和有机肥用量的双因素分析结果(表 5)表明,速缓效氮肥比例和有机肥用量是小麦穗数、穗粒数、千粒重、籽粒产量、氮肥农学效率、氮肥偏生产力、氮肥利用率和净收益的重要影响因素,两者的交互作用对小麦穗数、穗粒数、氮肥利用率无显著影响,但对小麦千粒重、籽粒产量、氮肥农学效率、氮肥偏生产力和净收益均有显著影响。

表 5 速缓效尿素比例和有机肥用量对不同指标的方差分析

变异来源	穗数	穗粒数	千粒重	籽粒产量	氮肥农学效率	氮肥偏生产力	氮肥利用率	净收益
F	**	**	**	**	**	**	**	**
O	**	**	**	**	**	**	**	**
F×O	ns	ns	**	**	*	*	ns	**

注:F 为速缓效氮肥比例;O 为有机肥用量;F×O 为速缓效氮肥比例与有机肥用量;ns 表示 $P>0.05$; * 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$ 。

利用二元逐步回归分析,建立小麦产量(Y_1 , t/hm²)、氮肥利用率(Y_2 , %)、净收入(Y_3 , 元/hm²)与缓效控释尿素添加比例(X_1 , %)和有机肥用量(X_2 , t/hm²)之间的关系,得到方程式:

$$Y_1 = 3.784 + 3.361X_1 + 0.202X_2 - 1.979X_1^2 - 0.004X_2^2 + 0.020X_1X_2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 40.029 + 1.698X_1 + 1.460X_2 + 13.571X_1^2 + 0.083X_2^2 + 0.289X_1X_2 \quad (2)$$

$$Y_3 = 4192.849 + 5957.884X_1 + 109.700X_2 - 2073.664X_1^2 - 8.813X_2^2 + 103.912X_1X_2 \quad (3)$$

式(1)中: $R^2=0.953$, $P=0.001\ 9<0.05$,式(2)中 $R^2=0.930$, $P=0.014\ 0<0.05$,式(3)中 $R^2=0.969$, $P=0.000\ 8<0.05$ 。一次项系数大小和正负表明,缓效控释尿素和有机肥具有增产增效作用,且缓效控释尿素添加比例的影响大于有机肥用量的影响;交

互项系数表明,缓效控释尿素和有机肥具有正向交互作用。根据模型计算得到最大产量 7.786 t/hm^2 时,缓效控释尿素添加比例为 75.9% (即速缓效氮肥比例为 $24.1\% : 75.9\%$),有机肥用量为 16.425 t/hm^2 ; 同样,得到最大氮肥利用率 50.63% 时,缓效控释尿素添加比例为 74.41% ,有机肥用量为 15.97 t/hm^2 时; 得到最大净收入 $8\,527.52 \text{ 元/hm}^2$ 时,缓效控释尿素添加比例为 73.78% ,有机肥用量为 14.16 t/hm^2 。

3 讨论

3.1 速缓效氮肥配施有机肥对滨海盐渍土水溶性盐含量的影响

本试验中,随着有机肥用量增加,水溶性盐含量显著降低,与施用有机肥改善土壤物理结构有关。有研究^[13]表明,施用有机肥可以减小土壤容重,增加土壤孔隙,改善盐渍土理化性状; 而且有效平衡土壤温度,减小蒸发量,从而抑制盐分表聚^[14]; 同时灌水和降雨促进脱盐和抑制返盐,改善土壤盐渍化^[15]。未施有机肥的空白处理加剧了土壤板结,不利于表层盐分的移动。研究^[16]表明,轻度盐渍土上适量施氮肥可以有效减少土壤溶液中的盐离子浓度,减小电导率,缓解盐分胁迫。本试验研究结果显示,速缓效氮肥配施有机肥有效降低土壤水溶性盐含量,但不同速缓效氮肥比例影响差异不显著,说明氮素有效性对土壤溶液中盐分的浓度影响较小,可能通过促进小麦生长扎根,提高对抗盐分胁迫的能力。

3.2 速缓效氮肥配施有机肥对滨海盐渍土供氮的影响

速缓效氮肥 F1 和 F2 处理耕层土壤速效氮含量在施肥后较高,然后迅速降低,是因为过量速效尿素施入土壤后,在脲酶和硝化作用下转化为硝铵态氮^[17],多余的速效氮易造成氨挥发或硝态氮的淋洗损失,从而含量显著下降。而本试验中缓效控释尿素与有机肥配施与杨修一等^[18]试验结果一致,显著提高小麦返青期后土壤无机氮含量,缓解了氮素供应与小麦本身需氮之间矛盾的问题^[19]。不仅因为缓效尿素可以控制释放速率,而且高碳氮比的有机肥,增加了土壤微生物活性和微生物固氮能力,固定的氮素在作物需氮时释放^[20]; 另外有机肥能促进盐渍土上的氮素矿化,提高氮素有效性^[21]。

两季试验后 F3O3 处理耕层土壤速效氮含量较高,而在 $20\text{—}100 \text{ cm}$ 土层内较其他施肥处理降低。这是因为基施 30% 的速效尿素和有机肥的矿化可供小麦生长前期对氮素的需求,而 70% 的缓效控释尿素在生育后期缓慢释放^[22],减少了速效氮在土壤溶液中的停留时间,减少氮素损失,提高氮素有效性; 另外,较高的氮素有效性可以促进有机质矿化补充无机氮。硝态氮易在剖面中随水流失,铵态氮受盐分影响

易造成氨挥发^[23]。施用有机肥不仅有助于团聚体形成,增加胶体对铵态氮的吸附,而且有机肥分解过程中产生有机酸和腐殖质,降低土壤酸碱度,从而减少盐渍土铵态氮挥发损失^[20]; 同样,有机肥可以缓解硝态氮在土壤剖面的累积和淋洗^[24],一方面通过提高微生物的活性,增加微生物固氮减少硝态氮流失; 另一方面通过改善土壤有机碳含量及团聚体稳定性,增加阳离子代换量,从而增加对硝态氮的固持作用。

3.3 速缓效氮肥配施有机肥对小麦产量及氮肥利用率的影响

有研究^[25]表明,缓效控释尿素较速效尿素显著提高小麦产量与产量构成,且有机无机肥配施可以显著增加滨海盐渍土作物产量及氮肥利用率^[26]。本试验表明,增施缓效尿素和有机肥显著提高小麦产量、产量构成和氮肥利用率。由于氮素有效性的提高,促进小麦氮素吸收和生长,并且足量有机肥保持较高的植株根系吸收氮素的能力和养分向籽粒的转运能力^[27],进而提高盐分胁迫下小麦的生长。本试验中,速缓效氮肥比例 $30\% : 70\%$ 显著增效与梁靖越等^[28]在旱地研究的 $60\% : 40\%$ 增效结果不一致,可能是由于滨海盐渍土的氮素匮乏和盐分胁迫使小麦在营养生长和生殖生长的快速阶段需要供应充足的氮素,而施用 70% 的缓效尿素和 30% 的速效尿素与 15 t/hm^2 的有机肥供氮能力更强。

4 结论

(1)速缓效氮肥 $30\% : 70\%$ 配施 15 t/hm^2 有机肥在小麦季土壤水溶性盐含量较空白平均显著降低 11.4% , 较其他用量处理平均降低 $0.7\% \sim 9.5\%$ 。速缓效氮肥 $30\% : 70\%$ 配施 15 t/hm^2 有机肥的供氮能力最优,在小麦返青期至抽穗期,较速缓效氮肥 $50\% : 50\%$ 处理分别提高了耕层土壤硝、铵态氮含量 $17.5\% \sim 66.9\%$, $16.4\% \sim 57.4\%$, 同时收获后 $20\text{—}100 \text{ cm}$ 各土层平均硝、铵态氮含量较其他速缓效氮肥和有机肥处理降低 $1.3\% \sim 42.3\%$, $3.8\% \sim 44.3\%$, 有效缓解了氮素淋失。

(2)速缓效氮肥 $30\% : 70\%$ 配施 15 t/hm^2 有机肥获得最优的小麦产量、氮肥效率和经济效益,较其他速缓效氮肥和有机肥处理显著增加产量 $5.9\% \sim 47.0\%$, 增加氮肥农学效率、氮肥偏生产力和氮肥利用率 $8.1\% \sim 148.1\%$, $1.9\% \sim 36.8\%$ 和 $3.0\% \sim 46.1\%$, 并增加净收益 $1.7\% \sim 116.2\%$, 回归模型计算缓效控释尿素占氮肥施用比例 $73\% \sim 76\%$, 有机肥用量 $14.0 \sim 16.5 \text{ t/hm}^2$, 可达到产量和氮肥利用率的同步提高,还能实现最大经济效益。

(3)速缓效氮肥比例 $30\% : 70\%$ 配施 15 t/hm^2 有机肥一次性基施可以有效降低盐分表聚,显著改善

小麦生育期土壤供氮能力,提高小麦氮肥利用率、产量及经济效益,充分发挥了两者的保肥、促生、增效的作用,推荐在滨海盐渍土种植小麦区应用推广。

参考文献:

- [1] 管孝艳,王少丽,高占义,等.盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J].生态学报,2012,32(4):1202-1210.
- [2] Zeng W Z, Xu C, Huang J S, et al. Emergence rate, yield, and nitrogen-use efficiency of sunflowers (*Helianthus annuus*) vary with soil salinity and amount of nitrogen applied[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2015, 46(8): 1006-1023.
- [3] 李建国,濮励杰,朱明,等.土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J].地理学报,2012,67(9):1233-1245.
- [4] 隋利,易家宁,王康才,等.不同氮素形态及其配比对盐胁迫下紫苏生理特性的影响[J].生态学杂志,2018,37(11):3277-3283.
- [5] 起德花.氮素水平和伴生密度对黄河三角洲盐地碱蓬与碱蓬竞争的影响[D].山东 烟台:中国科学院烟台海岸带研究所,2019.
- [6] 刘梅,郑青松,刘兆普,等.盐胁迫下氮素形态对油菜和水稻幼苗离子运输和分布的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(1):181-189.
- [7] 单晶晶.肥盐交互作用对滨海盐渍土与冬小麦生长的影响及肥料效应研究[D].山东 烟台:中国科学院烟台海岸带研究所,2017.
- [8] Subramanyam S, Sardesai N, Minocha S C, et al. Hessian fly larval feeding triggers enhanced polyamine levels in susceptible but not resistant wheat[J]. BMC Plant Biology, 2015, 15: <http://doi.org/10.1186/s12870-014-0396-y>.
- [9] Yang Y C, Zhang M, Zheng L, et al. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency, yield, and quality of wheat[J]. Agronomy Journal, 2011, 103(2): 479-485.
- [10] Zheng W K, Zhang M, Liu Z G, et al. Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system [J]. Field Crops Research, 2016, 197(13): 52-62.
- [11] 刘海英,崔长海,赵倩,等.施用有机肥环境下盐胁迫小麦幼苗长势和内源激素的变化[J].生态学报,2011,31(15):4215-4224.
- [12] 于飞,施卫明.近 10 年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J].土壤学报,2015,52(6):1311-1324.
- [13] Cong P F, Ouyang Z, Hou R X, et al. Effects of application of microbial fertilizer on aggregation and aggregate-associated carbon in saline soils[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 168: 33-41.
- [14] 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.
- [15] 罗佳,盛建东,王永旭,等.不同有机肥对盐渍化耕地土壤盐分、养分及棉花产量的影响[J].水土保持研究,2016,23(3):48-53.
- [16] 梁飞,田长彦,田明明,等.追施氮肥对盐地碱蓬生长及其改良盐渍土效果研究[J].草业学报,2013,22(3):234-240.
- [17] 耿计彪,张民,马强,等.控释氮肥对棉花叶片生理特性和产量的影响[J].水土保持学报,2015,29(4):267-271.
- [18] 杨修一,耿计彪,于起庆,等.有机肥替代化肥氮素对麦田土壤碳氮迁移特征的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):230-236.
- [19] Shi Z L, Li D D, Jing Q, et al. Effects of nitrogen applications on soil nitrogen balance and nitrogen utilization of winter wheat in a rice-wheat rotation[J]. Field Crops Research, 2012, 127(1): 241-247.
- [20] 周慧,史海滨,徐昭,等.化肥有机肥配施对盐渍化土壤氮挥发及玉米产量的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(7):1649-1656.
- [21] Wang X W, Hui C, Liu Y L, et al. Addition of organic fertilizer affects soil nitrogen availability in a salinized fluvo-aquic soil[J]. Environmental Pollutants and Bioavailability, 2019, 31(1): 331-338.
- [22] Zheng W K, Liu Z G, Zhang M, et al. Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system[J]. Field Crops Research, 2017, 205(6): 106-115.
- [23] 闵伟,侯振安,梁永超,等.土壤盐度和施氮量对灰漠土尿素 N 转化的影响[J].土壤通报,2012,43(6):1372-1379.
- [24] Wen Z, Shen J, Blackwell M, et al. Combined applications of nitrogen and phosphorus fertilizers with manure increase maize yield and nutrient uptake via stimulating root growth in a long-term experiment[J]. Pedosphere, 2016, 26: 62-73.
- [25] 郑文魁,李成亮,窦兴霞,等.不同包膜类型控释氮肥对小麦产量及土壤生化性质的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):162-167,174.
- [26] 朱海,杨劲松,姚荣江,等.有机无机肥配施对滨海盐渍农田土壤盐分及作物氮素利用的影响[J].中国生态农业学报,2019,27(3):441-450.
- [27] 谢军,赵亚南,陈轩敬,等.有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率[J].中国农业科学,2016,49(20):3934-3943.
- [28] 梁靖越,张敬昇,王昌全,等.控释尿素对小麦籽粒产量和氮素利用率的影响[J].核农学报,2018,32(1):157-164.