

不同管理措施对滨海盐渍农田土壤 CO₂ 排放及碳平衡的影响^①

米迎宾, 杨劲松*, 姚荣江, 余世鹏

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘要: 为探讨不同管理措施对滨海盐渍农田碳平衡的影响, 本文通过玉米-小麦轮作试验, 研究农田土壤的 CO₂ 释放规律, 及其农田碳收支状况。试验设计 6 个处理: 常规对照(CK); 有机肥常量(OF); 氮肥增施(NF); 秸秆还田(S); 有机肥加秸秆(OF+S); 免耕(NT)。研究表明, 秸秆还田和有机肥的施用增加了土壤呼吸的强度, 而免耕处理的 CO₂ 平均释放量最低, 不同处理下土壤呼吸总体表现为 OF+S > S > OM > NF > CK > NT。各处理土壤有机碳含量随着作物的收获逐渐升高, 其中 OF 与 NT 增加最多, 而增施氮肥处理并没有显著提高土壤的有机碳水平。各处理间的有机碳含量没有显著性差异。在两季作物种植结束后, 各处理的碳输入均高于碳输出, 均为碳净输入, 表现出较强的碳汇特征。秸秆还田和单施有机肥的碳净输入均显著高于对照, 可有效减缓因农田土壤 CO₂ 排放而造成的全球气候变化问题。

关键词: 盐渍农田; CO₂ 释放; 土壤碳库; 碳平衡

中图分类号: S19; X37

近年来, 由于化石燃料的使用和土地利用的变化等人为因素导致了大气中 CO₂ 浓度的增加, 极大程度上改变了地球碳素平衡, 引起了全球气候变化等一系列生态环境问题^[1]。土壤是全球碳循环中重要的碳库之一, 据估计, 土壤碳储量约为大气碳库的 3.3 倍, 生物碳库的 4.5 倍^[2]。土壤碳库与大气碳库之间也存在着动态平衡, 土壤中有机质的减少会导致大气中 CO₂ 含量的增加。其中, 农业对于全球气候变暖的贡献约为 20%, 而农田土壤对温室气体减排和固存有着巨大的潜力。

盐渍土在我国北方广泛分布, 大约 20% 的耕作土壤受此影响, 并且有逐年增加的趋势。盐分在土壤中的运移严重影响其物理、化学和生物性质, 随着盐分含量的增加, 会产生严重的土壤退化问题。盐渍化土壤是有机碳库损失量大、治理后具有巨大固碳潜力的土地类型。滨海盐渍土壤作为重要的后备资源, 广泛分布于我国沿海的中北部、黄河三角洲和长江三角洲地区, 由于受潮汐更替和海水入侵的双重影响, 具有高盐碱、低养分、高矿化度地下水和地表淡水资源缺乏等特点, 同时, 气候变化也导致了海平面上升, 海水入侵加剧, 引起了一系列的生态环境问题^[3]。盐

碱地改良复垦后能够提供土壤有机碳含量及陆地碳储量, 并且抵消一些人为因素引起的碳排放。段晓南等^[4]研究发现沿海滩涂盐沼的固碳速率远高于内陆盐沼。严慧峻等^[5]通过实施不同有机肥处理方式及不同种植利用方式对黄淮海平原盐渍土进行改良, 结果表明有机质含量低的土壤可以通过一定的施肥提高其含量。范亚文^[6]通过种植耐盐植物的措施来改良东北地区的盐碱土, 发现施有机肥既可以制约盐碱, 又可以增加土壤有机质。目前在我国的相关研究主要集中在对盐渍化农田土壤性质和结构的改良、作物产量的提高以及增碳措施的管理, 然而, 对盐渍土壤碳排放与碳循环的影响, 尤其是对土壤固碳与减排相结合的研究则相对较少。

江苏滩涂面积巨大, 已成为重要的后备土地资源。因此, 科学合理地利用盐渍土资源对减缓土壤中温室气体的排放, 提高土壤质量, 有着重要的理论和现实意义。同时可以为滨海盐碱农田的固碳效应评价和滩涂土地资源的合理利用提供科学依据。本研究通过对盐渍土壤改土抑盐和固碳增汇相结合的研究, 合理设计盐渍土壤的农业管理措施, 达到既能提高盐渍土农田生态系统的固碳潜力, 又能增加盐渍土壤的改

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171181)资助。

* 通讯作者(jsyang@issas.ac.cn)

作者简介: 米迎宾(1984—), 男, 吉林白城人, 博士研究生, 主要从事盐渍土壤改良利用与碳平衡的研究。E-mail: ybmi@issas.ac.cn

良效果和作物生产量的目的。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点位于江苏省东台市黄海原种场研究基地(32°38'N, 120°52'E), 选取的试验区代表当地土地利用的区域特征, 农场围垦于 1999 年。该区地处亚热带季风气候区, 具有明显的海洋性季风气候特征, 四季分明, 年平均气温 15℃, 相对湿度 81%, 风速 2.8 m/s, 年均日照时间 2 130.5 h, 全年无霜期 213 天。该区常年平均降雨量 1 061.2 mm(2000—2013 年), 约 68% 降水量集中于 6—9 月, 年平均蒸发量 1 006.7 mm。

1.2 试验设计

选择具有均一土壤性质的地块划分试验小区, 试

验前土壤基本性质见表 1。试验于 2013 年 6 月至 2014 年 5 月, 采用玉米-小麦轮作种植方式, 夏玉米 2013 年 6 月底播种, 10 月收获; 冬小麦 11 月播种, 2014 年 5 月底收获。试验设计 6 个处理: 常规对照(CK);

有机肥常量(OF), 施用量为 1.5 t/hm²; 氮肥增施(NF), 施用量为常规施肥量的 150%; 秸秆还田(S), 还田量为 5 t/hm²; 有机肥加秸秆(OF+S), 有机肥施用量为 1.5 t/hm², 秸秆还田量为 5 t/hm²; 免耕(NT)。为了使处理间施肥水平保持一致, 除处理 NF 外其余各处理在作物全生育期内施肥量相同, 氮肥 210 kg/hm², 磷肥 99 kg/hm², 包括基肥和追肥; 处理 NF 氮肥施用量为 315 kg/hm², 磷肥 99 kg/hm²。每个处理设置 3 个重复, 随机排列。还田的秸秆在玉米季为小麦秸秆, 小麦季为水稻秸秆, 作物收获后粉碎翻入土壤。施用的有机肥为商品有机肥。

表 1 供试土壤理化性质(0~40 cm)
Table 1 Physical and chemical properties of tested soil

EC _e (dS/m)	pH	CEC (cmol/kg)	SOC (g/kg)	TN (g/kg)	BD (g/cm ³)	C/N	土壤持水量 (g/kg)	砂粒 (g/kg)	黏粒 (g/kg)	粉粒 (g/kg)
6.81	9.24	2.42	1.41	0.27	1.41	5.22	184.1	191.0	123.5	685.5

1.3 土壤样品采集与分析

土壤样品于作物种植前和收获后, 在各小区内随机采点, 采样深度为 0~10、10~20、20~30、30~40 cm。所采样品除去植物残留后装于采样袋, 经自然风干, 过 20 目筛。将土样完全混合后分取少量过 100 目筛。土壤有机碳的测定采用重铬酸钾外加热法^[7]; 全氮的测定采用凯氏定氮法^[7]; 土壤体积质量的测定采用环刀法。

1.4 土壤呼吸的测定

土壤呼吸的测定于 2013 年 7 月至 2014 年 5 月之间进行, 采用静态箱钠石灰吸收法^[8]。此方法原理是通过含有 NaOH 和 Ca(OH)₂ 的钠石灰吸收土壤排放的 CO₂ 而发生的化学反应, 吸收前后将钠石灰烘干至恒重, 计算所称取的质量差值(精确至 0.1 mg)即为 CO₂ 排放量。在田间测定之前, 将装入玻璃培养皿中的 50 g 钠石灰颗粒于 105℃ 烘干 14 h 至恒重, 随即密封防止外部空气进入, 带至田间。清除测定点土壤表面作物残留和地上部植物, 将烘干的钠石灰用 8 ml 水润湿, 并把培养皿置于三角铁架上, 铁架上方倒扣 PVC 圆筒(直径 30 cm, 高 11 cm, 厚度约 2 mm, 非透明, 为了避免阳光直射后影响桶内温度), 将圆筒下边缘旋入土壤 2~3 cm, 以避免筒内外空气交换。确保钠石灰在圆筒中暴露 7 天整。实验过程中同时将

3 个装有钠石灰的培养皿分别置于完全封闭的 PVC 圆筒内, 作为空白对照。7 天后取出培养皿, 带回实验室于 105℃ 烘干 14 h 后称重。每两星期测定一次, 如遇天气的影响则推后, 连续测定夏玉米和冬小麦的土壤呼吸。

土壤 CO₂ 释放量根据如下公式计算:

$$R_s = [\Delta W \times 1.69 / A] \times [12 / 44]$$

式中: R_s 为测定期间土壤 CO₂ 释放量(C, g/(m²·d)); ΔW 为钠石灰吸收前后的质量差(g); A 为吸收面积, 即圆筒的表面积(m²); 1.69 是校正系数。

1.5 土壤及植株碳含量的测定与计算

玉米收获后, 在各小区内随机选取 8 株完整的(包括根系)植株; 小麦收获后, 选取 24 株。地上部杀青并烘干至恒重, 根系洗净后烘干至恒重。作物地上部植株与地下部根系有机碳的测定均采用重铬酸钾外加热法^[7]。

土壤碳库 = 耕层土壤体积 × 耕层土壤体积质量 × 土壤有机碳含量

作物植株固定碳量(C_t)为地上部植株固定碳量(C_a)与地下部根系固定碳量(C_r)之和。作物地上部植株固定碳量为:

$$C_a = 0.40Y$$

式中: Y 为作物生物量干物质重(kg/hm²); 0.40 为本试验所测定的地上部植株含碳量(%)。

作物地下部根系固定碳量为：

$$Cr = 0.35 \times Y \times P / (1 - P)$$

式中： Y 为作物生物量干物质重(kg/hm^2)； P 为根系分配系数，本文 P 取 0.30；0.35 为本试验所测定的地下部根系含碳量(%)^[9]。

1.6 统计分析

数据处理用 SPSS 16.0 和 Excel 2010 软件分析，所有数据的测定结果均以平均值 $\pm$ 标准差的形式表示，用 Tukey 进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 作物生育期内土壤 CO_2 释放量

不同管理措施下土壤 CO_2 的释放规律如图 1 所示。从图中可以看出，在夏玉米种植开始至次年冬小麦收获结束期间，各处理土壤 CO_2 释放量的季节变化基本趋于一致，均表现为夏季高，冬季低。在夏玉米种植后，随着作物的生长以及温度的升高，土壤 CO_2 的排放量不断增加，并在 8 月中上旬达到最大值，其中 OF+S 处理最高，为

$6.14 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ；随着作物的生长，土壤 CO_2 释放量呈现下降的趋势，除在 9 月 23 日出现小幅回升。冬小麦由于受种植季节和生育期限的影响，土壤 CO_2 释放量呈现先稳定后缓慢上升的趋势。两季作物的碳释放均在拔节期升高，并在灌浆期达到最大值，玉米季的累积土壤呼吸强度比小麦季高约 25%。

不同管理措施对土壤 CO_2 释放量影响显著。与对照相比，秸秆还田和有机肥的施用增加了土壤呼吸的强度，其中秸秆还田与有机肥施用相结合的处理释放量最高，土壤平均释放的 CO_2 达到 $3.32 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ；而免耕处理的平均释放量为 $2.10 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。在全生育期内，氮肥增施处理并没有明显增加土壤呼吸强度，不同处理下土壤呼吸总体表现为 $\text{OF+S} > \text{S} > \text{OF} > \text{NF} > \text{CK} > \text{NT}$ 。为进一步研究不同管理措施对土壤呼吸的影响，对各处理进行差异显著性检验，玉米季 OF 和 NF 处理土壤 CO_2 释放量差异不显著，其余各处理之间均有显著差异；在小麦季结束后各处理之间均呈现显著性差异。

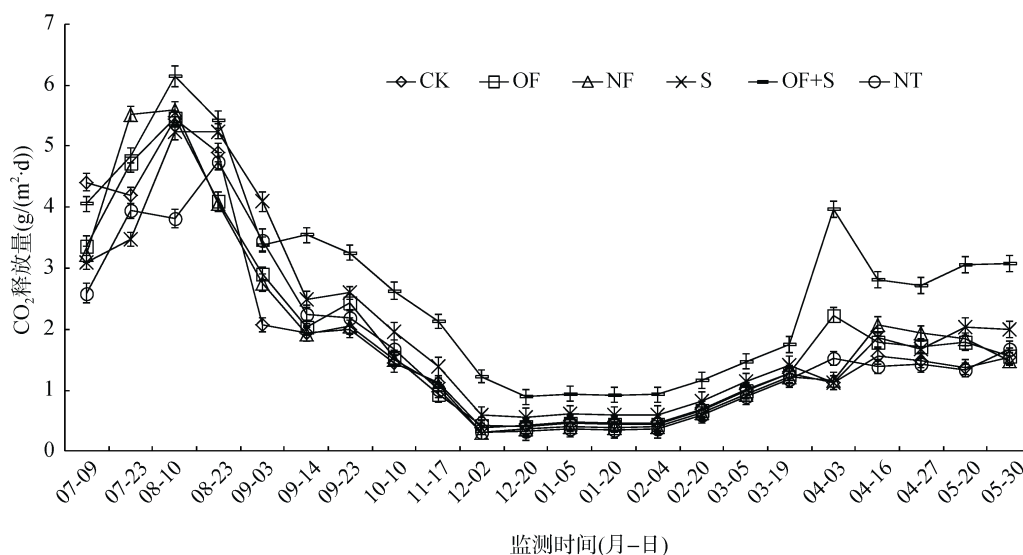


图 1 作物生育期内土壤 CO_2 释放量的季节变化(2013 年 7 月至 2014 年 5 月)

Fig. 1 Seasonal variations of soil CO_2 fluxes during cropping season

2.2 不同处理下土壤有机碳含量与碳库变化

不同管理措施下 0 ~ 40 cm 土层有机碳含量的变化如图 2 所示。试验前土壤的有机碳含量与其他类型的土壤相比较低，在优化种植措施下，各处理土壤有机碳含量随着作物的收获逐渐升高，导致土壤碳库相应增加，如表 2 所示，说明该土壤具有碳汇的功能。其中 OF 与 NT 处理增加最多，S

处理次之，玉米季结束后 NT 处理增加了约 33%，小麦季结束后 OF 处理增加了约 53%；而土壤有机碳含量最高的是 OF+S 处理，对照则最低。增施氮肥并没有显著提高土壤的有机碳水平，免耕和施用有机肥可以促进碳在土壤中的累积。在两季作物种植结束后，各处理间土壤的有机碳含量没有显著性差异。

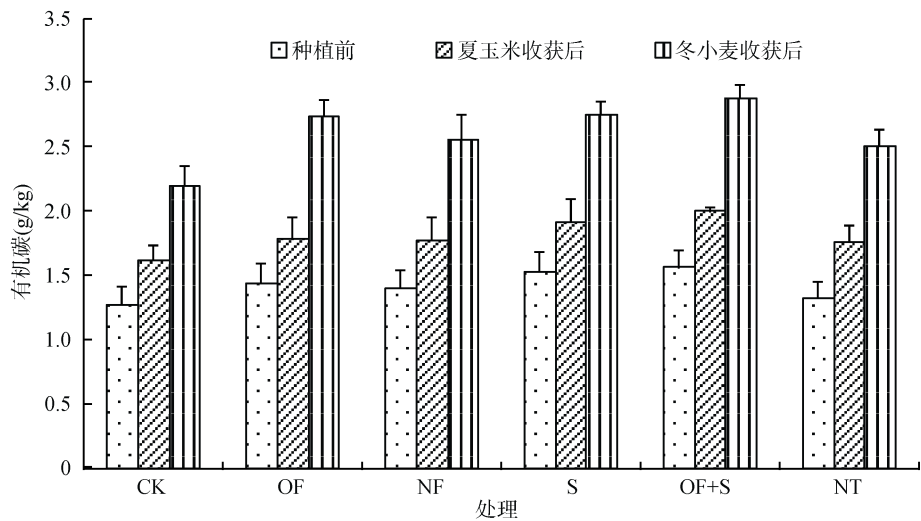


图 2 作物收获后不同处理对土壤有机碳(0~40 cm)含量的影响
Fig. 2 Effects of different treatments on soil organic carbon (0-40 cm) after harvest

表 2 不同处理土壤 CO₂ 累积释放量和碳库变化(kg/hm²)

Table 2 Cumulative emission of CO ₂ and changes in soil carbon storage in different treatments			
处理	土壤 CO ₂ 累积排放量	试验前土壤碳库	试验后土壤碳库
CK	7 393.07 e	716.50 a	1 243.30 a
OF	7 809.10 c	798.49 a	1 526.37 a
NF	7 705.89 d	794.55 a	1 450.44 a
S	8 230.26 b	821.38 a	1 483.35 a
OF+S	11 095.24 a	832.31 a	1 541.04 a
NT	7 021.86 f	749.85 a	1 421.87 a

注：同列数据小写字母不同表示处理间差异达到 $P<0.05$ 显著水平。

2.3 植株碳库

由表 3 可知，施用有机肥和秸秆还田明显提高了作物植株地上部和地下部的生物量，从而增加了植株各部分对碳的固定。而免耕处理并没有显著增加作物生物量和固定碳量。与对照相比，施用有机肥和秸秆处理的作物总固定碳量分别增加了 41% 和 52%，而两者配施效果更加显著。免耕处理的作物总固定碳量仅比对照增加了 18%，同时，增施氮肥并没有显著提高作物的固碳能力。

表 3 作物地上部和地下部固定碳量(kg/hm²)

Table 3 Carbon sequestration by crops in aboveground and underground parts									
处理	夏玉米生物量		夏玉米固定碳量		冬小麦生物量		冬小麦固定碳量		总固定碳量
	地上部	地下部	地上部	地下部	地上部	地下部	地上部	地下部	
CK	10 235.32	416.99	4 094.13	62.55	6 657.17	1 174.83	2 662.87	176.23	6 995.77
OF	14 270.34	630.57	5 708.13	94.59	9 716.00	1 360.50	3 886.40	204.08	9 893.20
NF	13 069.65	612.74	5 227.86	91.91	8 447.33	1 294.83	3 378.93	194.26	8 892.93
S	14 751.64	698.94	5 900.66	104.84	10 985.67	1 380.67	4 394.27	207.10	10 606.86
OF+S	17 206.96	767.73	6 882.78	115.16	11 703.83	1 801.67	4 681.53	270.25	11 949.73
NT	11 924.98	485.77	4 769.99	72.87	8 041.50	1 254.33	3 216.60	188.15	8 247.61

3 讨论

3.1 土壤 CO₂ 的释放

在作物种植初期，土壤 CO₂ 的释放量相对较少，随着作物的不断生长以及气温的升高，CO₂ 的释放量随之增加，在作物灌浆期达到最大值，随之逐渐减少。在冬小麦种植季节的 12 月份到翌年 2 月份，土壤呼吸相对稳定。影响土壤呼吸比较重要的因子包括土壤温度和水分状况，主要是由于土壤中微生物的活性主

要受这两个因素的影响，而 CO₂ 的释放是微生物分解土壤中的有机物质的结果。在本研究中，试验区夏季气温逐渐升高，土壤呼吸作用强度较高出现在 7 月下旬至 8 月下旬，该时期日平均气温高于 32℃，同时降水量达到全年最大值，温度和水分状况的改变有效地促进了土壤中微生物的活性上升，开始分解作物残留和土壤中的碳源，CO₂ 的释放也随之增加；而冬季气温低且比较稳定，降水较少，抑制了土壤中微生物的活性，CO₂ 的释放量相应较低。

土壤中盐分含量的升高也会对微生物的活性产生抑制作用,从而降低了微生物分解有机质的速率,减少了土壤中 CO_2 的排放^[10]。在本试验中,供试土壤属于中等盐渍化土壤,在春夏季,由于降水量较大,表层土壤的盐分被淋洗至土体下层,盐分降低后微生物活性增强,加上上述两个因素,均有利于土壤呼吸作用的增强;在秋冬季节,随着降水量的减少,土壤中的盐分随着水分的蒸发被带至土壤表层,从而限制了微生物的活性。

农田土壤施用有机物质导致土壤呼吸作用的增强已经被许多相关研究所证明。在作物生育期期间,秸秆还田处理和施用有机肥与对照相比土壤 CO_2 的释放量差异较大,其主要原因是随着有机物质的输入,土壤中的碳源增加,这为微生物分解提供了基质,在适宜的温度和水分条件下,使得 CO_2 的释放量增加。本试验发现,增施氮肥处理对土壤 CO_2 的排放影响不显著,这可能是由于影响土壤呼吸的因素较多,氮肥的施用效应较为复杂^[11]。黄斌^[12]认为,在施用氮肥的较短时间内,土壤 C/N 下降,有利于土壤有机碳的矿化过程,因此土壤 CO_2 的释放量增加。本试验中可能是土壤含碳量极低,碳氮比小,从而氮肥对有机质分解的促进有限,所以在作物的整个生育期施用氮肥对增强土壤呼吸作用并不明显。

保护性耕作,如少耕免耕,可以减少对土壤的扰动,增强土壤的团粒结构,增加土壤有机质含量,并降低土壤中稳定的有机物质的矿化速率,减少 CO_2 的排放^[13]。本研究中,免耕减少了 CO_2 的释放,这与多数研究基本一致。但同时也有研究结果表明,免耕并没有显著增加 CO_2 的释放,可能是由于免耕提高了土壤表层的有机质含量和酶活性,弥补了与耕作土壤碳排放的差异,也可能由于受采样时间的影响^[9,14]。也有耕作实验显示,免耕促进了土壤 CO_2 的释放,可能是因为免耕增加了土壤的水分含量,保持了土壤温度,从而提高了碳的矿化水平^[15]。

目前有很多国内外研究学者应用钠石灰碱吸收法进行土壤的 CO_2 测定。该方法有一定不利因素,如在圆筒放置时对土壤有轻微扰动,增加了原点位的土壤含水量,影响地表土壤 O_2 和 CO_2 的流动变化,并且改变了土壤温度,但该方法能够在设定时间内持续监测土壤 CO_2 释放,且操作简单,试验成本低,可利用一定的重复以消除土壤空间变异对测定的影响^[12]。另外,试验所采用的烘干时间、钠石灰使用量、测定重复数和测定时间都经过学者的研究论证,为合理的选择,可在一定程度上抵消测定方法带来的误差^[16]。

3.2 土壤有机碳含量、土壤与植株碳库

土壤固定的有机碳主要来自于作物残留和外源有机物质的输入,大量有机物质的输入通常会产生更高的有机碳含量。在本研究中,随着不同管理措施的应用产生了不同的土壤有机碳含量。在盐渍土中,土壤表层盐分含量升高会抑制土壤结构的更新,降低土壤团聚体的稳定性、有机碳的存储和生物量的产量^[17]。在本研究区域的相关研究中,侯晓静等^[18]认为与传统耕作相比,免耕能使土壤有机碳含量增加 18% ~ 32%。盐渍土壤通常以促进分散团粒的结合,增加作物生物量来改良土壤,通过物理保护和阻止微生物分解来增强土壤颗粒的团聚,从而增加有机碳的固定。本试验中土壤有机碳的变化有其特殊性,即土壤起点有机碳含量非常低,约为正常土壤的十分之一,但经过一年的试验之后土壤有机碳含量明显增加,一方面可能是由于秸秆还田和有机肥的施用在规定时间内提供了基质碳源,使得土壤中有机碳的含量在短时间内显著提高;另一方面,随着管理措施利用,改善了土壤结构,增加了碳的储存,使得有机碳含量升高^[19]。免耕处理由于减少了对土壤的扰动,从而减少了土壤中有机碳的氧化和分解速率,增加了其含量。本研究发现,氮肥的施用没有显著增加土壤有机碳的含量,可能的原因是与本试验的采样时间有关,试验中所施用的氮肥主要是尿素,易于挥发,而土壤样品的采集时间是作物收获后,因此可能在作物整个生育期内对提高有机碳含量效果不明显。

在两季作物种植结束后,各处理之间的土壤有机碳含量并没有显著性差异,表明在作物的试验种植过程中,土壤中有机碳的分解率低,碳基质的转化速率慢^[20]。因此需要开展长期持续的相关试验,以揭示各管理措施对土壤中有机碳和盐分的影响。

在盐渍化土壤中,影响作物生长的主要障碍因子为土壤盐分含量。在本试验中,随着秸秆和有机肥料的加入,使得土壤表层盐分含量下降,可能是由于商品有机肥明显改善盐渍化农田的理化特性^[21],从而促进了作物地上部和地下部的生长,这可能是由于作物秸秆在起分解的过程中,促使土壤颗粒团聚体的形成,有效地改善了土壤结构,通气性增加;而有机肥可以阻止土壤结构恶化^[22]。因此,秸秆和有机肥良好的养分供给和土壤改善功能^[23]降低了土壤体积质量,提高其导水率,增加了盐分的渗漏,促进了作物的生长,使得作物地上部和地下部固定碳量明显高于对照。

3.3 碳平衡的估算

土壤中碳的平衡包括土壤固定碳量、作物植株固

定碳量以及土壤释放的 CO₂ 等。其中，土壤碳库和作物植株固定的碳量为碳输入，而由于本试验均为旱旱轮作，土壤释放的 CO₂ 则为碳输出。由表 4 可知，在两季作物种植结束后，各处理的碳输入均高于碳输出，使得各处理均为碳净输入，表现出较强的碳汇特征。秸秆还田和施用有机肥的碳净输入均显著高于对照，说明两种处理通过提高土壤有机碳含量和作物生物量来增加农田系统的碳输入。同时，免耕处理的碳

净输入也相对较高，表明免耕能使土壤积累更多的有机碳而排放更少的 CO₂。此外，从表中可以看出，有机肥与秸秆配施的净固碳量要低于单施处理和农田免耕，可能的原因是虽然配施处理增加了土壤碳输入量和作物的生物量产量，但是同时也提高了土壤的 CO₂ 排放量，导致了土壤的碳净输入较低。在本研究中，增施氮肥与传统施肥相比增加了土壤中碳的净输入，但与其他单项管理措施相比效果不明显。

表 4 不同处理碳收支及平衡估算(kg/hm²)
Table 4 Assessment of carbon budget in different treatments

项目	CK	OF	NF	S	OF+S	NT
土壤固定碳量	1 243.30	1 526.37	1 450.44	1 483.35	1 541.04	1 421.87
作物固定碳量	6 995.77	9 893.20	8 892.93	10 606.86	11 949.73	8 247.61
CO ₂ 累积排放量	7 393.07	7 809.10	7 705.89	8 230.26	11 095.24	7 021.86
总固定碳量	8 239.07	11 419.57	10 343.37	12 090.21	13 490.77	9 669.48
ΔC	846.00	3 610.47	2 637.48	3 859.95	2 395.53	2 647.62

通过本轮试验研究，建议考虑应用秸秆还田、施用有机肥和农田免耕措施来增加土壤有机碳的含量，提高盐渍农田生态系统的碳汇能力，以减缓因农田土壤 CO₂ 排放而造成的全球气候变化问题。

4 结论

1) 所有处理与对照相比均增加了土壤的碳库容量，同时也提高了盐渍农田土壤 CO₂ 的排放水平，其中以秸秆还田和有机肥处理最为显著。

2) 农田免耕可以降低 CO₂ 的释放，同时增加土壤有机碳的含量。

3) 秸秆还田、有机肥的施用和农田免耕处理提高了盐渍农田系统碳的输入，表现出较强的大气碳汇的功能。

参考文献：

[1] IPCC. 政府间气候变化专门委员会第四次评估报告第一工作组报告决策者摘要-气候变化[R]. 2007. <http://wk.baidu.com/view/a657203143323968011c92a7>

[2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304 (5 667): 1 623-1 627

[3] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837-845

[4] 段晓男, 王效科, 逯非, 等. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 463-469

[5] 严慧峻, 刘继芳, 张锐, 等. 黄淮海平原盐渍土有机质消长规律的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(1): 1-8

[6] 范亚文. 种植耐盐植物改良盐碱土的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2001

[7] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005

[8] Keith H, Wong S C. Measurement of soil CO₂ efflux using soda lime absorption: Both quantitative and reliable[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38: 1 121-1 131

[9] 李成芳, 曹凑贵, 汪金平, 等. 不同耕作方式下稻田土壤 CH₄ 和 CO₂ 的排放及碳收支估算[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2 482-2 488

[10] Li Y L, Wang L, Zhang W Q, et al. Variability of soil carbon sequestration capability and microbial activity of different types of salt marsh soils at Chongming Dongtan[J]. Ecological Engineering, 2010, 36: 1 754-1 760

[11] 孟凡乔, 关桂红, 张庆忠, 等. 华北高产农田长期不同耕作方式下土壤呼吸及其季节变化规律[J]. 环境科学学报, 2006, 26(6): 992-999

[12] 黄斌. 冬小麦、夏玉米轮作农田土壤 CO₂ 释放与碳平衡的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004

[13] 杨学明. 利用农业土壤固定有机碳—缓解全球变暖与提高土壤生产力[J]. 土壤与环境, 2000, 9(4): 311-315

[14] 李华兴, 卢维盛, 刘远金, 等. 不同耕作方法对水稻生长和土壤生态的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 553-556

[15] Franzluebbers A J, Hons F M, Zuberer D A. Tillage-induced seasonal changes in soil physical properties affecting soil CO₂ evolution under intensive cropping[J]. Soil and Tillage Research, 1995, 34: 41-60

[16] Kleber M. Carbon exchange in humid grass land soils[D]. Stuttgart, Germany: University Hohenheim, 1997

[17] Lal R. Global potential of soil carbon sequestration to mitigate the green-house effect[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2003, 22(2): 151-184

[18] 侯晓静, 杨劲松, 赵曼, 等. 耕作方式对滨海盐渍土有机碳含量及团聚体特性的影响[J]. 土壤, 2015, 47(4): 781-789

- [19] Wong V N L, Dalal R C, Greene R S B. Carbon dynamics of sodic and saline soils following gypsum and organic material additions: A laboratory incubation[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 41: 29–40
- [20] Setia R, Marschner P, Baldock J, et al. Salinity effects on carbon mineralization in soils of varying texture[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43: 1 908–1 916
- [21] 侯晓静, 杨劲松, 赵曼, 等. 不同施肥措施对滨海盐渍土有机碳含量的影响[J]. *土壤*, 2014, 46(5): 780–786
- [22] Thomas G W, Haszler G R, Blevines R L. The effects of organic matter and tillage on maximum compactibility of soils using the Proctor test[J]. *Soil Science*, 1996, 161: 502–508
- [23] 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

Effects of Different Managements on CO₂ Emission and Carbon Balance in Coastal Saline Soils

MI Yingbin, YANG Jinsong^{*}, YAO Rongjiang, YU Shipeng

(*State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China*)

Abstract: To evaluate the effects of different management measures on carbon balance in the inshore saline farmland, field maize-wheat rotation experiments were conducted to study CO₂ emissions and carbon balance under different management measures. The treatments were: 1) conventional control (CK); 2) application of organic fertilizer (OF); 3) the increase of nitrogen fertilizer (NF); 4) application of straw (S); 5) application of organic fertilizer and straw (OF + S); 6) no tillage (NT). The results showed that the measures of straw returned and organic fertilizer application increased the intensity of soil respiration, and the no-tillage led to the minimum average CO₂ efflux. The average carbon emission rate under different measures followed the order: OF+S > S > OM > NF > CK > NT. As crops harvest, soil organic carbon content increased in each treatment, and OF and NT led to the greatest increase in soil organic carbon, while NF did not significantly raise the level of soil organic carbon. The difference of soil organic carbon among different treatments was not significant. After the two cropping seasons, the carbon input was higher than carbon output in each treatment, which led to the net carbon input, showing the strong characteristics of carbon sink. The carbon net inputs in the treatments of S and OF were significantly higher than CK. These measures can effectively slow down the global climate change caused by the CO₂ emissions from farmland soils.

Key words: Saline farmland; CO₂ emission; Soil carbon pool; Carbon balance