

不同措施对滨海盐渍土壤呼吸、电导率和有机碳的影响^{*}

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 在苏北滩涂围垦区的轻度和中度盐渍土上, 通过田间试验, 研究了不同农田管理措施(传统耕作、施用有机肥、氮肥增施、秸秆还田和免耕)对土壤盐分、呼吸和有机碳等的影响。结果表明, 0~40 cm 土层平均电导率在玉米种植季明显升高, 小麦种植季出现小幅降低, 轻度盐渍土的电导率为 4.57~8.20 dS m⁻¹, 中度盐渍土为 4.89~10.13 dS m⁻¹, 处理之间秸秆还田最低, 免耕最高, 秸秆还田和施用有机肥有效减少了土壤盐分含量。与中度盐渍土相比, 轻度盐渍土的呼吸强度较高, 在夏玉米和冬小麦种植季节分别高约 16% 和 18%。有机肥、氮肥增施、秸秆还田处理的土壤呼吸均高于对照, 而免耕较低。两组试验的土壤有机碳和微生物生物量碳均有缓慢增加, 其中施用有机肥和秸秆还田可以大幅提高其含量。轻度盐渍土壤代谢熵高于中度盐渍土, 总体上对照最高, 免耕最低。

关键词 盐渍土; 土壤呼吸; 有机碳; 微生物生物量碳; 代谢熵

中图分类号 S19; X37 **文献标识码** A

盐渍土广泛分布于全球各地, 大约有 20% 的耕作土地受此影响^[1], 据预测有连年增加的趋势。在我国, 盐渍土资源分布较广, 大量的耕地受不同程度、不同类型的盐渍影响, 其中滨海盐渍土壤作为重要的后备资源, 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。随着中国面临的粮食短缺和土地资源不足的压力逐渐加大, 并将持续很长一段时间, 因此开展盐渍土资源的持续利用与优化管理至关重要。近年来, 气候变化导致海平面上升, 海水入侵加剧, 加剧了滨海盐渍土壤的盐渍化, 引起了一系列的生态环境问题^[2], 而土壤作为全球碳库的重要组成, 其碳库是大气的 3.3 倍, 起着重要的调节碳循环的作用^[3]。因此, 合理地开发和利用后备土地资源, 采用科学的农业生产模式具有极其重要的意义。

另一方面, 土壤作为全球碳循环的释放源之

一, 土壤呼吸的强度受多种因素的共同影响。在农业生态系统中, 土壤释放的 CO₂ 主要来自于作物的根际呼吸和土壤中有有机物质的分解, 受土壤水分、温度、在作物管理措施等因素的综合影响。其中, 土壤中水分和盐分含量的增加会限制其微生物活性, 降低有机物质的分解速率, 因而可减少 CO₂ 的释放^[4]。Iqbal 等^[5]认为在盐渍土中, 土壤含盐量是影响土壤呼吸的重要因素。作物管理措施可以通过改变土壤温度和含水量从而间接影响 CO₂ 的释放^[6]。免耕措施与传统深耕相比, 通过改变土壤水分含量和孔隙比来降低土壤的碳排放^[7]。然而, 氮肥的施用对农田土壤的 CO₂ 排放则有不同的影响, 有研究表明氮肥的增施会限制碳的排放^[8], 而 Sainju 等^[9]则认为与不施氮肥相比, 碳的排放会增加。总之, 通过适合的土壤和作物管理措施, 平衡有机碳的矿化和输入来提高土壤的碳存

^{*} 国家科技支撑计划课题(2015BAD01B03)、中国科学院科技服务网络计划(STS计划)项目课题(KFJ-SW-ST-141-2)和江苏省农业科技自主创新资金项目课题(CX(15)1005)资助 Supported by the National Key Technology R&D Program of China (No. 2015BAD01B03), the Science and Technology Service Network Initiative (STS Plan) of Chinese Academy of Sciences (No. KFJ-SW-ST-141-2), and the Autonomous Innovation Project of Jiangsu Agricultural Science and Technology (No. CX(15)1005)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: 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

收稿日期: 2015-12-07; 收到修改稿日期: 2016-01-25

http://pedologica.issas.ac.cn

储能力是十分必要的。

在我国，研究盐分对土壤碳动态的影响，尤其是对盐渍土壤中碳的累积与损失相对较少，如何平衡农业生产与环境保护之间的关系已成为重要的研究课题。本研究的目的在于阐述不同农田管理措施对土壤呼吸和有机碳固存的影响，评价有机碳和微生物生物量碳与CO₂释放的关系，从而总结出既能减少土壤的碳排放，又能够增加有机碳存储的合理的农田管理措施。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点位于江苏省盐城市东台黄海原种场试验基地（32°38'N，120°52'E），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，年均温度15℃，相对湿度81%，风速2.8 m s⁻¹，日照时长2 130 h，全年无霜期213 d。该区年均降水量1 061 mm（2000年至2013年），约

68%降水集中于6月至9月，年均蒸发量1 007 mm。土壤类型为冲积盐土，属淤泥质海岸带盐渍土。

1.2 试验设计

该试验于2013年6月至2014年5月期间分两组进行，选取两块盐分含量不同的试验地，计为轻度盐渍化土壤和中度盐渍化土壤。试验地耕层土壤理化性质见表1。本试验采用玉米-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。每组试验设计5个处理，两组试验处理相同，分为：

（1）传统耕作，CK；（2）施用有机肥，OF，用量为1.5 t hm⁻²；（3）氮肥增施，NF，用量为常规氮肥施用量的150%；（4）秸秆还田，S，还田量为5.0 t hm⁻²；（5）免耕，NT。试验中除NF处理外作物全生育期施肥量为氮肥210 kg hm⁻²，磷肥99 kg hm⁻²；NF处理氮肥施用量为315 kg hm⁻²，磷肥99 kg hm⁻²。每个处理设置3个重复，小区内随机排列。试验中还田的秸秆经粉碎后翻入土壤。施用的有机肥为市售的颗粒状商品有机肥。

表1 供试土壤理化性质（0~40 cm）

Table 1 Physical and chemical properties of tested soils (0~40 cm)

土壤	电导率	全盐		有机碳	全氮	容重	微生物生物 量碳	田间持水 量	砂粒	黏粒
Soils	EC _e	TS	pH	SOC	TN	BD	MBC	WHC	Sand	Clay
	(dS m ⁻¹)	(g kg ⁻¹)		(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(g cm ⁻³)	(mg kg ⁻¹)	(%)	(%)	(%)
轻度盐渍土 ^①	4.43	1.59	9.04	1.55	0.22	1.36	59.28	17.45	13.48	20.76
中度盐渍土 ^②	6.81	2.28	9.24	1.41	0.27	1.41	52.30	18.41	19.10	12.35

① Slightly salinized soil (A)；② Moderately salinized soil (B)

1.3 样品采集与分析

土壤样品于作物种植前和收获后，在各小区内分层随机采点，采样深度为0~10、10~20、20~30、30~40 cm。土壤电导率的测定采用土水比1:1饱和泥浆法^[10]，盐分的测定采用电导法^[11]，有机碳的测定采用重铬酸钾外加热法^[11]，全氮的测定采用凯氏定氮法^[11]，阳离子交换量（CEC）的测定采用乙酸钠-火焰光度法^[12]，机械组成的测定采用吸管法^[12]，微生物生物量碳（MBC）的测定采用氯仿熏蒸提取法^[13]。

1.4 土壤呼吸的测定

土壤呼吸（CO₂）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^[14]。此方法原理是通过钠石灰吸收土壤排放的CO₂，吸收前后将钠石灰烘干至恒重，计算所称取的质量差值即为CO₂排放量。在田间测定之前，将50 g钠石灰颗粒于105℃烘干14 h至恒重，带至田间。将烘干的钠石灰置于三角铁架上，铁架上方倒扣PVC圆筒（直径30 cm，高11 cm），将钠石灰在圆筒中暴露7 d整。7 d后带回实验室烘干至恒重。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（g m⁻² d⁻¹）；

ΔW 为钠石灰吸收前后的质量差(g); A 为吸收面积(m^2), 即圆筒的表面积; 1.69为校正系数。

土壤代谢熵根据如下公式计算:

$$q\text{CO}_2 = \text{CO}_2 - \text{C} / \text{MBC}$$

式中, $q\text{CO}_2$ 为土壤代谢熵($\mu\text{g h}^{-1} \text{mg}^{-1}$), MBC为微生物生物量碳(mg kg^{-1})。

1.5 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LSD进行差异显著性检验。

2 结 果

2.1 土壤电导率对不同田间管理措施的响应

不同管理措施下农田土壤盐分的动态变化如图1所示。在两组试验中, 土壤盐分的变化均呈现相同的趋势, 即在夏玉米收获后有明显增加, 并

且轻度盐渍土的增加幅度要高于中度盐渍土; 在冬小麦收获后则出现小幅降低, 轻度盐渍土的电导率在 $4.57 \sim 8.20 \text{ dS m}^{-1}$ 之间, 中度盐渍土则在 $4.89 \sim 10.13 \text{ dS m}^{-1}$ 之间。与轻度盐渍土相比, 中度盐渍土各处理的整体含盐量始终较高。

试验结束后, 免耕处理的土壤平均含盐量高于常规耕作, 在轻度盐渍土中达到了 8.20 dS m^{-1} , 中度盐渍土为 8.31 dS m^{-1} ; 其余各处理均低于对照, 其中, 秸秆还田处理的抑盐效果最好, 在轻度盐渍土中电导率为 5.39 dS m^{-1} , 中度盐渍土为 7.12 dS m^{-1} ; 施用有机肥则次之, 而氮肥增施处理并未明显改善土壤盐分水平。两组试验在不同处理措施下的土壤平均电导率表现为 $\text{NT} > \text{CK} > \text{NF} > \text{OF} > \text{S}$ 。与试验开始前相比, 轻度盐渍土盐分的增加幅度较高, 平均升高了约51%, 而中度盐渍土约为10%; 与玉米收获时相比, 小麦收获后轻度盐渍土的平均盐分减少了约7%, 中度盐渍土减少约10%。

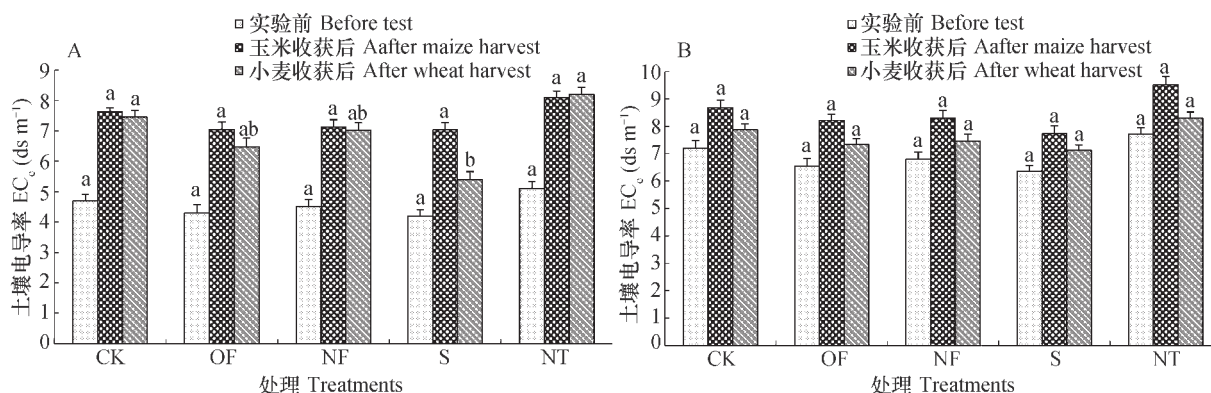


图1 不同管理措施下轻度(A)和中度盐渍土(B)电导率的动态变化

Fig. 1 Dynamics of electrical conductivity (EC_e) in Soils A and B relative to treatments

2.2 土壤呼吸强度、有机碳和微生物生物量碳含量对不同田间管理措施的响应

不同农田管理措施对不同盐分土壤的 CO_2 释放、有机碳和微生物生物量碳的影响见表2。不同处理间的土壤呼吸差异显著, 与中度盐渍土相比, 轻度盐渍土的平均呼吸强度始终较高, 在夏玉米种植时期高约16%, 冬小麦种植时期高约18%。在两组试验中, 有机肥、氮肥增施、秸秆还田处理的土壤呼吸均高于对照, 仅免耕处理有小幅降低, 其中秸秆还田处理呼吸强度最高, 在轻度盐渍土和中度盐渍土中夏玉米种植期间分别较对照高约26%和10%; 冬小麦时期分别较对照高约41%和17%。试验结束后土壤呼吸强度为 $\text{S} > \text{OF} > \text{NF} > \text{CK} > \text{NT}$ 。

随着作物的种植, 两组试验的土壤有机碳和微生物生物量碳含量均呈现缓慢的增加。与试验前相比, 轻度盐渍土中有机碳含量在玉米季增加约7%, 在小麦季增加约47%, 微生物生物量碳在玉米季增加约35%, 在小麦季增加约45%; 在中度盐渍土中, 两季作物种植结束后有机碳分别增加了32%和90%, 微生物生物量碳分别增加了41%和91%。在所有处理中, 施用有机肥和秸秆还田可以大幅提高土壤有机碳和微生物生物量碳的含量。

2.3 土壤呼吸与电导率、有机碳和微生物生物量碳的关系

图2至图4中均显示了各指标与土壤呼吸之间的

表2 不同处理不同收获时期轻度和中度盐渍土0~20 cm土壤总呼吸、有机碳和微生物生物量碳的变化

Table 2 Total respiration-C, soil organic carbon and microbial biomass C in Soils A and B 0 ~ 20 cm in depth relative to treatment and time period

土壤 Soils	处理 Treatments	土壤总呼吸 Total respiration-C		有机碳 Soil organic carbon		微生物生物量碳 Microbial biomass C	
		(g kg ⁻¹)		(g kg ⁻¹)		(mg kg ⁻¹)	
		玉米收获后 After maize harvest	小麦收获后 After wheat harvest	玉米收获后 After maize harvest	小麦收获后 After wheat harvest	玉米收获后 After maize harvest	小麦收获后 After wheat harvest
轻度盐渍土 Slightly salinized soil (A)	CK	1.33 ± 0.01d	3.07 ± 0.02d	1.45 ± 0.09b	1.59 ± 0.14b	71.78 ± 7.26a	61.89 ± 9.16a
	OF	1.51 ± 0.01b	3.48 ± 0.01b	1.65 ± 0.13a	2.54 ± 0.21a	79.22 ± 6.28a	92.44 ± 10.66a
	NF	1.45 ± 0.02c	3.24 ± 0.04c	1.65 ± 0.12a	2.34 ± 0.28a	78.33 ± 6.08a	90.78 ± 8.08a
	S	1.67 ± 0.01a	4.34 ± 0.02a	1.82 ± 0.14a	2.55 ± 0.20a	85.67 ± 12.00a	94.22 ± 13.28a
	NT	1.30 ± 0.01e	2.82 ± 0.01e	1.58 ± 0.20a	2.33 ± 0.24a	77.61 ± 10.64a	85.44 ± 11.89a
中度盐渍土 Moderately salinized soil (B)	CK	1.19 ± 0.01c	2.60 ± 0.01d	1.62 ± 0.15b	2.19 ± 0.18a	64.11 ± 6.69a	82.33 ± 1.20a
	OF	1.22 ± 0.01b	2.79 ± 0.01b	1.78 ± 0.13a	2.73 ± 0.61a	71.67 ± 2.63a	102.00 ± 9.54a
	NF	1.22 ± 0.01b	2.71 ± 0.01c	1.77 ± 0.29a	2.55 ± 0.22a	69.44 ± 7.86a	100.78 ± 18.71a
	S	1.31 ± 0.01a	3.04 ± 0.02a	1.91 ± 0.12a	2.74 ± 0.22a	77.56 ± 4.62a	105.33 ± 18.86a
	NT	1.10 ± 0.01d	2.47 ± 0.01e	1.75 ± 0.19a	2.50 ± 0.25a	68.78 ± 1.64a	88.78 ± 7.23a

注：传统耕作（CK）；施用有机肥（OF）；氮肥增施（NF）；秸秆还田（S）；免耕（NT）。下同 Note: Conventional tillage (CK) ; Organic fertilizer (OF) ; Nitrogen fertilizer (NF) ; Straw return (S) ; No tillage (NT) . The same below

最佳相关性。在不同管理调控措施的作用下，土壤呼吸随着土壤含盐量的升高而逐渐降低（图2），两者呈现显著负相关。在轻度盐渍土中，当土壤电导率临界值为7 dS m⁻¹时，土壤呼吸速率开始缓慢减小并逐渐趋于平稳；在中度盐渍土中，土壤呼吸随着电导率的升高不断减弱，当电导率临界值为9.5 dS m⁻¹时，呼吸速率降为最低。图3和图4显示了土壤呼吸与有机碳和微生物生物量碳呈现显著正相关，即随着土壤中碳源的增加，微生物分解有机

碳的基质增多，释放了更多的CO₂。

2.4 土壤代谢熵（qCO₂）对不同田间管理措施的响应

土壤在不同处理不同作物收获时期代谢熵如表3所示。轻度盐渍土壤代谢熵高于中度盐渍土，在玉米季高约8%，小麦季高约42%。在轻度盐渍土中，玉米收获季秸秆还田处理最高，较对照高约5%；小麦收获季，对照处理最高；免耕处理在不同收获季节始终最低，分别较对照低约10%、

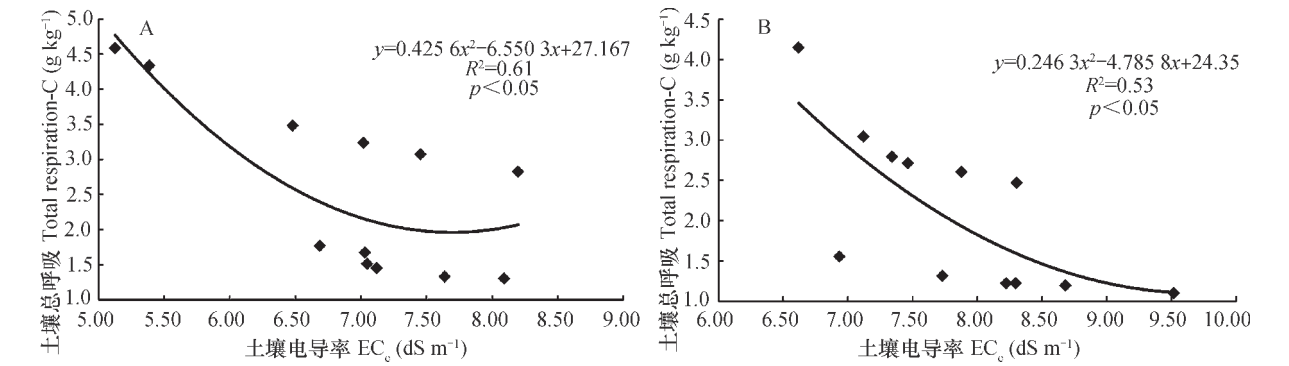


图2 轻度（A）和中度盐渍土（B）土壤呼吸与电导率的关系
Fig. 2 Relationship between EC_e and total respiration-C in Soils A and B

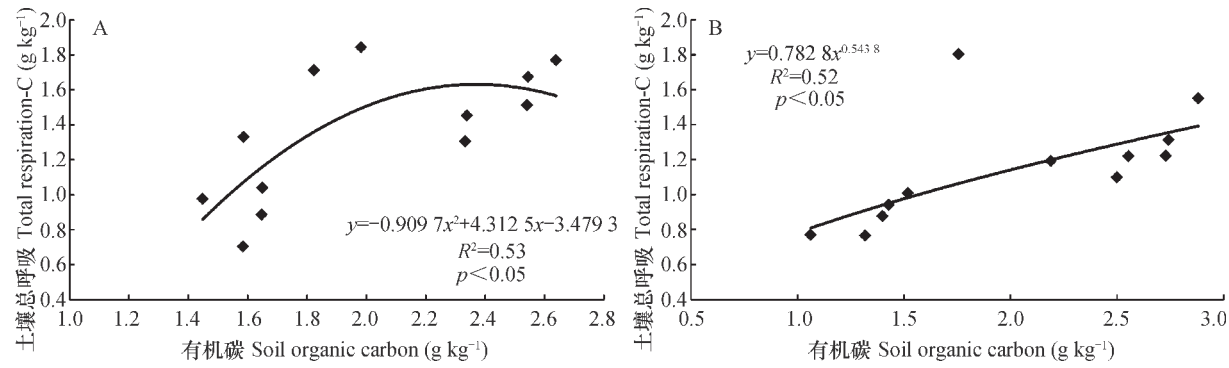


图3 轻度 (A) 和 中度盐渍土 (B) 土壤呼吸与有机碳的关系
Fig. 3 Relationship between organic carbon and total respiration-C in Soils A and B

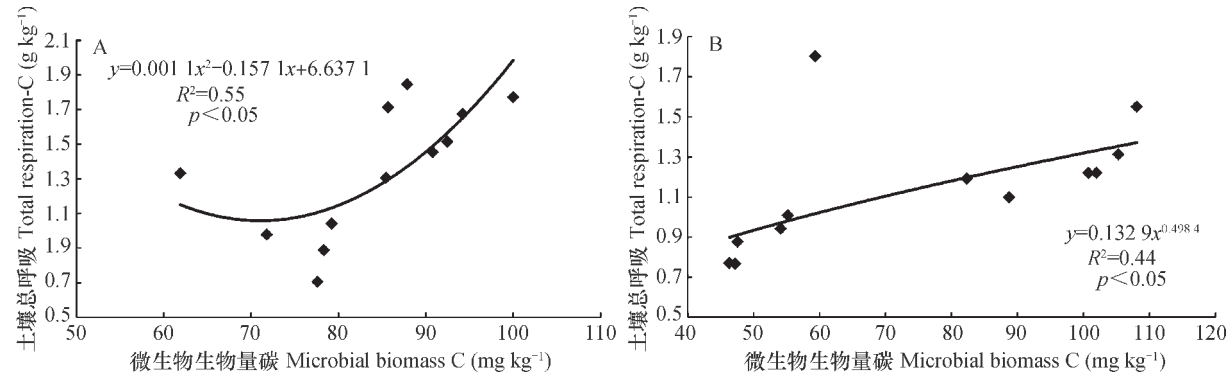


图4 轻度 (A) 和 中度盐渍土 (B) 土壤呼吸与微生物生物量碳的关系
Fig. 4 Relationship between microbial biomass C and total respiration-C in Soils A and B

表3 不同处理不同收获时期轻度和中度盐渍土土壤代谢熵 (qCO₂)

Table 3 Metabolic quotient (qCO ₂) in Soils A and B relative to season				
处理 Treatments	土壤代谢熵 Metabolic quotient (μg h ⁻¹ mg ⁻¹)			
	轻度盐渍土 Slightly salinized soil (A)		中度盐渍土 Moderately salinized soil (B)	
	玉米收获后 After maize harvest	小麦收获后 After wheat harvest	玉米收获后 After maize harvest	小麦收获后 After wheat harvest
CK	7.57 ± 1.30a	6.19 ± 0.35a	7.59 ± 0.09a	3.94 ± 0.63a
OF	7.80 ± 0.74a	4.70 ± 0.27ab	6.96 ± 0.47a	3.41 ± 0.16a
NF	7.57 ± 0.67a	4.45 ± 0.20ab	7.17 ± 0.90a	3.36 ± 0.60a
S	7.98 ± 1.28a	5.74 ± 0.74ab	6.92 ± 0.81a	3.60 ± 0.30a
NT	6.87 ± 0.84a	4.12 ± 0.28b	6.53 ± 0.41a	3.47 ± 0.13a

50%。在中度盐渍土中，玉米收获季免耕处理的土壤代谢熵最低，小麦收获季氮肥增施处理则最低，分别较对照低约16%、17%，而对照处理的熵值始终最高。

3 讨 论

3.1 不同管理措施对土壤电导率的影响

从表1供试土壤基底值中可以看出，两组试验

地土壤pH均大于9, 表现为强碱性, 这可能的原因是滨海围垦农田土壤在脱盐过程中形成的碱化现象, 由于土壤中盐离子移动性的差异, Na^+ 和 Cl^- 移动较快, 随着盐分的淋洗移动到土体下层, 而 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 移动较慢, 导致残余碳酸钠(RSC)较大, 碱性增强。

在整个试验过程中出现土壤电导率短时间内大幅升高的原因主要是在夏玉米生育期间, 研究区遭遇极端干旱气候, 据统计, 该年7月至9月有效降雨总量仅240 mm, 相当于过去10年平均水平的1/3, 因此在强蒸发的天气条件下, 盐分被带至表层, 同时时间短、强度大的降雨极少, 对盐分的淋洗效果较弱。而在冬小麦越冬期过后的加速生长期间, 即从2014年春季开始, 降雨得到了补充, 一方面起到了淋洗的作用, 增加了盐分的渗透, 另一方面促进了作物的生长, 使得作物的覆盖度增大, 减缓了土层表面水分的蒸发, 降低了盐分含量。轻度盐渍土的耕层盐分增加幅度较高可能是由于此试验区试验之前的耕作模式为水旱轮作, 水田的种植将土体上层的盐分淋洗至下层, 此后随着蒸发作用的增强上层盐分逐渐升高导致增幅较大。

试验结束后, 随着秸秆的还田和有机肥的施用, 土壤电导率随之下降, 可能的原因是秸秆翻入土壤有效地改善了土壤结构, 增加了其通气性, 而有机肥的施用阻止了土壤结构的恶化^[15], 有研究表明, 在此试验地通过利用商品有机肥可明显改善盐渍化农田土壤的理化特性^[16]。此外, 两者的加入减小了土壤容重, 提高了导水率^[17], 因而增加了盐分的渗漏。另一方面, 两种措施平衡了土壤温度, 抑制了表面水分的蒸发, 提高了雨水的利用率, 进而增加了土壤的脱盐效率^[18]。免耕处理会引起土壤物理性质的恶化, 导致容重升高和孔隙度降低, 阻碍土体上层盐分的向下移动, 使其滞留在表层。关于各处理在两季作物种植后土壤盐分有一定程度增加, 除气候条件和轮作方式的因素外, 也有研究认为随着有机肥和有机物质的施用, 其中含有的可溶性矿物质和有机酸引起可溶性离子的增加, 从而增加了土壤溶液中盐分的浓度^[19]。

3.2 不同管理措施对土壤呼吸强度、有机碳和微生物生物量碳的影响

在表1供试土壤基底值中, 有机碳的含量与常规相比较低的原因, 可能是由以下原因共同造成的, 一是由于滨海滩涂开垦的速度过快, 在尚未形

成滩涂湿地之前就被围垦种植; 二是由于土壤砂粒含量较高, 难以聚合有机质; 三是土壤盐分含量和碱性高, 阻碍了植被的生长, 使得有机物质输入较少。

在盐渍土壤中, 盐分是土壤呼吸的主要限制因素之一, 并且与 CO_2 的释放呈现显著负相关。与轻度盐渍土相比, 中度盐渍土含有更高的盐分, 因而有相对较弱的呼吸强度, 这可以解释为盐分限制了作物的生长, 由土壤渗透压导致的微生物活性减弱^[20], 以及碳的输入减少和有机质分解程度的降低。此外, 土壤中黏粒含量的差异使得微生物生物体很难分解黏粒中包含的有机物质^[21], 在本试验中, 轻度盐渍土含有更高的黏粒含量, 使其固定了更多的难被微生物分解的有机质, 减少了 CO_2 的释放。

在本研究的两组试验中, 秸秆还田和施用有机肥处理的土壤呼吸强度较高, 可能是由于两种处理提高了微生物活性, 增加了碳的基质, 从而提高了碳的利用效率^[22]。试验中使用的有机肥为商品有机肥, 在试验结束后, 微小的有机肥颗粒在土壤中仍然可见, 其与秸秆相比转化为有机质的速率要低, 使得秸秆还田处理的土壤呼吸强度要略高。土壤中有机质含量的增加为微生物的生长和分解提供了更多的基质, 从而释放出更多的 CO_2 。相比于传统耕作, 免耕措施减少了 CO_2 排放可能是由于免耕减小了土壤的孔隙度, 提高了表层的水分含量^[7], 因此释放了更少的 CO_2 。有研究显示氮肥的施用对土壤呼吸的影响差异较大, 但在本研究中, 氮肥增施处理作用不明显, 这可能是因为作物的生长水平和对氮肥的吸收利用差异导致了对土壤呼吸的影响不显著^[9]。

在盐渍土中, 盐分限制了土壤结构的更新, 降低了团聚体的稳定性、有机质的含量以及作物生物量^[23]。秸秆还田和施用有机肥为土壤加入了碳基质, 一方面提供了养分, 提高了土壤有机碳含量; 另一方面缓解了微生物有机体的渗透压, 为土壤溶液和微生物活动提供了缓冲, 从而提高了微生物生物量碳的含量^[24]。侯晓静等^[25]认为, 与传统耕作相比, 免耕处理通过减少对土壤的扰动, 降低了土壤中有机碳的氧化和分解水平, 使其含量增加。

在试验过程中, 土壤微生物能适应周围环境的变化, 并且微生物基质会形成稳定的平衡状态^[26], 当微生物生物量较高时, 土壤呼吸和微生物生物量

碳同样会达到相同的水平,因此微生物生物量的变化会有助于其分解过程中的碳存储^[19]。在盐渍土壤中,随着秸秆和有机肥的加入,减弱了盐分的副作用,促进了有机碳的积累,提高了微生物生物量,进而增加了微生物生物量碳的含量。传统耕作和免耕处理碳的输入较少,从而使微生物活性降低微生物生物量碳含量减少。长期施用氮肥对微生物生物量碳的影响较小,可能是因为作物生长消耗大部分养分且生长状况较差,作物残留较少,加速了土壤中原有有机碳的分解^[27]。

3.3 不同管理措施对土壤代谢熵的影响

土壤代谢熵是基础呼吸与微生物生物量碳的比值,反映了土壤微生物对碳的利用效率的高低,也代表了对有机物质的利用效率^[28]。与对照相比,其余各处理代谢熵较低,反映了其土壤中具有相对较高的生物活性和微生物生物量,维持了土壤生态系统正常的功能。免耕处理代谢熵最低,主要是因为相比于其他优化处理,土壤有机碳含量较低,但微生物利用较为充足,利用效率较高。

4 结 论

通过在苏北典型盐渍围垦区进行试验,发现免耕处理虽然能降低土壤呼吸强度,提高有机碳和微生物生物量碳含量,但同时也增加了土壤盐分;而秸秆还田和施用有机肥相比于传统耕作,提升了土壤呼吸水平,也提高了土壤的养分含量,促进了作物的生长。通过两组试验对比可以看出,土壤电导率和有机碳成为影响CO₂释放的主要因素。本研究认为,总体而言,秸秆还田与施用有机肥为滨海滩涂农田土壤盐分和养分调控的最优处理,并对作物的生长有极大的促进作用,削减了土壤盐碱障碍,提升了作物产量。因此,施用有机肥和秸秆还田措施在滩涂围垦农田区域有较大的应用推广潜力。

参 考 文 献

- [1] Sumner M E. Handbook of soil science. Boca Raton: CRC Press, 2000
- [2] 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
Yang J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45 (5) : 837—845
- [3] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science, 2004, 304 (5677) : 1623—1627
- [4] 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. Ecological Engineering, 2010, 36 (12) : 1754—1760
- [5] Iqbal J, Hu R G, Du L J, et al. Differences in soil CO₂ flux between different land use types in mid-subtropical China. Soil Biology & Biochemistry, 2010, 40 (9) : 2324—2333
- [6] Sainju U M, Jabro J D, Stevens W B. Soil carbon dioxide emission and carbon sequestration and influenced by irrigation, tillage, cropping system, and nitrogen fertilization. Journal of Environmental Quality, 2006, 37 (1) : 98—106
- [7] Russ W G, Don C R, Robert A G, et al. Influence of tillage and plant residue management on respiration of a Florida Everglades. Histosol. Soil & Tillage Research, 2007, 92 (1/2) : 156—166
- [8] Wilson H M, Al-Kaisi M M. Crop rotation and nitrogen fertilization effect on soil CO₂ emissions in central Iowa. Applied Soil Ecology, 2008, 39 (3) : 264—270
- [9] Sainju U M, Stevens W B, Thecan Caesar-Tonthat, et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity influenced by irrigation, tillage, crop rotation, and nitrogen fertilization. Journal of Environmental Quality, 2014, 43 (3) : 777—788
- [10] Richards L A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soil. Agriculture Handbook No. 60. United States Salinity Laboratory: United States Department of Agriculture
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2005
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2005
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999
Lu R K. Analytical methods for soil and agrochemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999
- [13] Vance W H, Brookes P C, Jenkinson D J. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. Soil Biology & Biochemistry, 1987, 19 (6) : 703—707
- [14] Keith H, Wong S C. Measurement of soil CO₂ efflux using soda lime absorption: both quantitative and reliable. Soil Biology &

- Biochemistry, 2006, 38 (5): 1121—1131
- [15] 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. *Soil Science*, 1996, 161 (8): 502—508
- [16] 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. *土壤*, 2014, 46 (5): 780—786
- Hou X J, Yang J S, Zhao M, et al. Effects of different fertilization on soil organic carbon in costal saline soil region (In Chinese). *Soils*, 2014, 46 (5): 780—786
- [17] Soane B D. The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects. *Soil & Tillage Research*, 1990, 16 (1/2): 179—201
- [18] 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. *土壤学报*, 2014, 51 (1): 184—188
- Zhang J B, Yang J S, Li F R, et al. Effects of farmyard manure and mulching on soil water and salinity in severe salinized tide flat soil of North Jiangsu Province (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (1): 184—188
- [19] Vanessa N L, Wong R C, Richard S B. Carbon dynamics of sodic and saline soils following gypsum and organic material additions: A laboratory incubation. *Applied Soil Ecology*, 2009, 41 (1): 29—40
- [20] Rietz D N, Haynes R J. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35 (6): 845—854
- [21] Raj S, Petra M, Jeff B, et al. Salinity effects on carbon mineralization in soils of varying texture. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43 (9): 1908—1916
- [22] Bhattacharyya P, Roy K S, Neogi S, et al. Effects of rice straw and nitrogen fertilization on greenhouse gas emissions and carbon storage in tropical flooded soil planted with rice. *Soil & Tillage Research*, 2012, 124 (4): 119—130
- [23] Lal R. Global potential of soil carbon sequestration to mitigate the green-house effect. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2003, 22 (2): 151—184
- [24] Chander K, Goyal S, Kapoor K K. Effect of sodic water irrigation and farm yard manure application on soil microbial biomass and microbial activity. *Applied Soil Ecology*, 1994, 1 (2): 139—144
- [25] 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. *土壤*, 2015, 47 (4): 781—789
- Hou X J, Yang J S, Zhao M, et al. Effects of tillage on soil organic carbon and stability of soil aggregates in costal saline soil region (In Chinese). *Soils*, 2015, 47 (4): 781—789
- [26] Liu H S, Li L H, Han X G, et al. Respiratory substrate availability plays a crucial role in the response of soil respiration to environmental factors. *Applied Soil Ecology*, 2006, 32 (3): 284—292
- [27] 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 等. 26年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2015, 35 (5): 1445—1451
- Zang Y F, Hao M D, Zhang L Q, et al. Effects of wheat cultivation and fertilization on soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and soil basal respiration in 26 years (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (5): 1445—1451
- [28] 冯书珍, 苏以荣, 秦新民, 等. 喀斯特峰丛洼地土壤剖面微生物特性对植被和坡位的响应. *生态学报*, 2013, 33 (10): 3148—3157
- Feng S Z, Su Y R, Qin X M, et al. Responses of soil microbial properties in soil profile to typical vegetation pattern and slope in karst-cluster depression area (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (10): 3148—3157

Effects of Farming Practice on Soil Respiration, EC_e and Organic Carbon in Coastal Saline Soil

MI Yingbin YANG Jingsong[†] YAO Rongjiang YU Shipeng

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

Abstract In China, the pressure of the shortage of land resources is getting more and more intense gradually, so it

is very important to develop sustainable utilization and optimal management of the coastal saline soil resources. On the other hand, climate change is intensifying salinization of the inshore saline soil, thus causing a series of ecological environment problems. However, soil, as an important component of the global carbon pool, plays an important role in regulating the carbon cycle. A field experiment was carried out to study effects of various farming practices on electrical conductivity (EC_e), total respiration, organic carbon (OC), microbial biomass C (MBC), and metabolic quotient (qCO_2) in coastal saline soil. In the experiments, maize was cultivated in rotation with wheat in two tracts of saline soil different in salinity, Soil A (slightly salinized soil) and Soil B (moderately salinized soil), and both tracts were subjected to five different treatments or farming practices, that is (1) CK, conventional farming; (2) OF, application of organic fertilizer at a rate of 1.5 t hm^{-2} ; (3) NF, application of a higher rate of nitrogen fertilizer, about 150% of that in CK; (4) S, incorporation of straw at a rate of 5.0 t hm^{-2} ; and (5) NT, no tillage. It was found that after two crops were harvested, EC_e varied in the range from 4.57 to 8.20 dS m^{-1} in Soil A, and from 4.89 to 10.13 dS m^{-1} in Soil B, and was the lowest in Treatment S and the highest in Treatment NT, which indicates that incorporation of straw and application of organic fertilizer effectively reduced salt content in the surface soil. Compared to Soil B, Soil A was higher in mean soil respiration intensity, 16% higher during the summer maize season and 18% higher during the wheat season. Treatments OF, NF and S were all higher than CK in soil respiration in comparison with CK, and only Treatment NT was a bit lower. In terms of soil respiration intensity measured in the end of the experiment, the treatments followed an order of $S > OF > NF > CK > NT$, regardless of soil salinity. When soil EC_e got higher than the critical value, soil respiration rate began to slow down. After the crops were harvested, SOC and MBC tended to increase, especially in Treatment OF and S. The treatments varied sharply in SOC and MBC content, which were significantly and positively related to soil respiration. That is to say, with increase SOC content, content of the matrix which soil microbes can decompose into organic carbon increased, thus releasing more CO_2 . However, organic carbon did not have any linear relationship with EC_e . Soil A was slightly higher than Soil B in qCO_2 and among the treatments, CK was the highest and NT was the lowest. Comparison of the two groups of treatments in the experiment indicates that the soil electrical conductivity and organic carbon content were the two main factors affecting CO_2 release. All in all, though Treatment NT lowers soil respiration intensity and, increases organic carbon and microbial biomass carbon contents, it increases soil salinity too. This study holds that incorporation of straw and application of organic fertilizer are two optimal farming practices that can be adopted to ameliorate coastal tidal flats, improve soil fertility, promote crop growth, alleviate soil salinity and increase crop yield. Therefore, the practices of organic fertilizer application and straw incorporation have a great potential for extension in coastal polders.

Key words Saline soil; Soil respiration; Organic carbon; Microbial biomass C; Metabolic quotient

(责任编辑: 陈德明)