

两种基于芦苇秸秆还田的改良措施对崇明东滩围垦土壤理化性质和微生物呼吸的影响

陈金海¹, 李艳丽¹, 王磊^{1*}, 张文全¹, 王红丽¹, 付小花¹, 乐毅全¹, 管永健², 邱忠虹²

(1.同济大学环境科学与工程学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 2.上海东滩国际湿地有限公司)

摘要:在崇明东滩湿地公园设置了3块实验田,研究基于芦苇直接还田(处理I)和堆肥后还田(处理II)的处理措施对盐碱土壤的改良效应以及对土壤微生物呼吸和植物生长的影响,并通过主成分分析法评价仅考虑传统土壤肥力指标及加和了土壤微生物呼吸和植物生物量等碳收支指标的土壤综合改良效应。结果表明,两种模式都能显著提高土壤的养分。总氮、总磷和总钾均显著高于对照($P<0.05$),有机质较对照分别提高10.8%($P=0.053$)和10.9%($P=0.052$);地上生物量为对照的344%($P=0.000$)和167%($P=0.000$),但土壤微生物呼吸仅分别较对照提高14%($P=0.085$)和43%($P=0.001$)。主成分分析结果显示仅考虑传统的土壤肥力指标,对照、处理I、处理II的综合得分分别为-0.641、0.260、0.381,加和土壤微生物呼吸与植物生物量后综合主成分得分为-1.011、0.644、0.367。这表明按传统评价指标,处理II是较好的改良模式,但加和了土壤微生物呼吸与植物固碳量等碳收支指标后,处理I得分高于处理II,因此这是一种相对低碳化的改良模式。

关键词:崇明东滩;盐碱土改良;芦苇秸秆还田;微生物呼吸;主成分分析

中图分类号:S156.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)02-0307-09

Effect of Two Improving Measures Based on Returning *Phragmites communis* Straw on Soil Phy-chemical Properties and Microbial Respiration of the Reclaimed Lands in Chongming Dongtan, China

CHEN Jin-hai¹, LI Yan-li¹, WANG Lei^{1*}, ZHANG Wen-quan¹, WANG Hong-li¹, FU Xiao-hua¹, LE Yi-quan¹, GUAN Yong-jian², QIU Zhong-hong²

(1.State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2.Shanghai dongtan international wetlands Co., LTD, China)

Abstract: Returning crop straw to land is generally an important measure to soil improvement. *Phragmites communis* is the most plentiful straw resource in Chongming Island, China. However, few studies on returning *Phragmites communis* straw and its soil improving effect have been reported. In the experiment, three experimental fields in Chongming Dongtan were selected to study the effect of two improving measures based on returning *Phragmites communis* straw (measure I: returning *Phragmites communis* straw plus tillage and fertilization; measure II: returning *Phragmites communis* straw after composting plus tillage and fertilization) on phy-chemical properties and microbial respiration of saline-alkali soil. In addition, the principal components analysis (PCA) was used to evaluate the comprehensive soil improving effect of the two improving measures. The results showed that both measure I and measure II could significantly increase soil nutrient, e.g. TN, TP, TK by 48%, 48%, 19% and 24%, 74%, 105%, and soil organic carbon by 10.8% and 10.9%, in comparison with the control. Plant biomass was as 3.44 times and 1.67 times high as that in the control, but soil microbial respiration increased by only 14% and 43%. The PCA results indicated that synthetic scores of the control, measure I and measure II were -0.641, 0.260 and 0.381 respectively when just considering the traditional soil fertility index. However, after adding soil carbon turnover index, such as soil microbial respiration and plant biomass, the synthetic scores were -1.011, 0.644 and 0.367, respectively. Therefore, measure II was the optimal mode in the view of the traditional standard, but

收稿日期:2010-06-17

基金项目:科技部科技支撑重大项目(2010BAK69B13);上海市科委重大科技攻关项目(10dz1200903)

作者简介:陈金海(1987—),男,福建莆田人,在读硕士研究生,主要从事土壤修复及环境污染防治研究。E-mail:chenjinhai1987@126.com

*通讯作者:王磊 E-mail:celwang@yahoo.com

when taking soil microbial respiration and plant biomass into accounts, the score of measure I was higher than measure II. Thus, measure I was relatively a low carbon improving mode.

Keywords: Chongming Dongtan; saline-alkali soil improvement; returning *Phragmites communis* straw; microbial respiration; principal components analysis

土壤除了作为植物生长的载体,还具有重要的碳保留能力。在目前全球变暖的大背景下,土壤碳库的聚碳能力已得到人们的广泛关注。保守估计,即使是2 m深的土壤,其碳储量已达2 400 Pg,约是植被碳库的4.4倍、大气碳库的3.2倍^[1]。土壤有机碳库的平衡由输入和输出两方面因素共同决定,前者可通过输入植物碎屑对土壤有机质进行补充,而后者则主要受到土壤呼吸强度的影响^[1]。有研究表明,土壤呼吸使大量的有机碳以CO₂形式释放到大气中,是陆地生态系统向大气释放CO₂的主要过程,是全球碳循环的最大通量之一^[2]。据估计,全球每年由土壤释放到大气中的碳量约为 $(0.8\sim4.6)\times10^{15}$ g^[3],其中农田生态系统释放强度可达 $640\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,因此土壤呼吸的微量变化将导致大气中CO₂浓度的显著变化。

滨海土地多由滩涂围垦而成,围垦的土壤由于来源于海洋,含盐量高、土壤板结、物质输送困难,导致土壤贫瘠,不利于植物生长发育。同时低下的土壤微生物量和土壤酶活性严重影响了盐碱土壤系统物质循环及土壤资源为植物持续利用^[4]。为使围垦滩涂产生环境效益和经济效益,对其修复、改良和可持续利用等已成为生态学家和政府管理者广泛关注的问题。

农业秸秆还田是秸秆的主要利用方式也是土壤改良的重要手段^[5],目前主要的还田形式有直接还田、堆腐还田等。秸秆还田技术对土壤的改良效应主要表现在养分效应、改土效应、微生物学效应、经济效应和环境效应等方面^[6]。传统的农业秸秆还田(包括堆肥还田)虽然可增加土壤有机质、改善土壤结构,但土壤有机质的增加和异养微生物的大量繁殖往往导致土壤呼吸增强,使改良后的土壤成为CO₂释放源。

崇明东滩位于长江口最大的沙岛——崇明岛的最东面,是全国自然保护区中最年轻的河口湿地保护区之一^[7],过去10多年,在崇明东滩有三次大规模的围垦。围垦土壤面积广,含盐高,肥力低,其修复、改良和可持续利用等已引起生态学家和当地政府的广泛关注。在崇明岛建设低碳经济示范区的背景下,开发低碳化的盐碱土壤改良技术,在改良土壤、提升肥力的同时,相对降低改良土壤的呼吸强度已成为崇明岛发展低碳农业、低碳旅游的重要前提之一。

芦苇是崇明滩涂最主要的植物,是崇明最丰富的秸秆资源之一。Brix等研究表明芦苇凋落物每年仅有15%被降解而回归大气,因此是一种较稳定的秸秆,这可能是由于其纤维组成中难降解的木质素含量较高的原因^[8]。与普通农作物秸秆相比(如稻草、麦秆等),芦苇秸秆还田后其有机质可在土壤中保留较长时间,从而可能降低由于秸秆还田导致的土壤呼吸的增加。然而目前对于芦苇秸秆还田用于滨海盐碱土壤的改良尚缺乏详细的研究,对于芦苇秸秆直接还田与堆肥还田对土壤的改良效应以及对土壤微生物呼吸的影响缺乏全面的评价。

本文以崇明东滩湿地公园围垦湿地土壤为对象,研究了两种基于芦苇直接还田与堆肥还田的改良措施对土壤理化性质及微生物活性的影响,并从传统的土壤肥力以及考虑土壤微生物呼吸和地上生物量的角度分别评价了两种基于芦苇还田的改良措施对盐碱土壤的综合改良效应,以期对崇明围垦土壤的低碳化改良,提高生态和经济利用价值提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 样地概述

实验样地位于崇明东滩湿地公园西北面的一个湖心小岛上,自1998年大堤围垦后,一直处于芦苇植被的自然生长状态,基本未受人为干扰。该区土壤由于含盐量较高肥力较差,植物不易成活(2009年春地上残留的植物生物量仅为 $250\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右),严重影响了湿地公园的植物景观建设,急需改良。2009年3至11月对该区实施改良,试验研究期间,该区的平均温度 $21.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,总降水量为1 062.7 mm。样区概况如图1。

1.2 改良处理模式与样品采集

设置两种改良模式:处理I和处理II,每块处理样地面积均为约 600 m^2 ,具体改良措施如下:

处理I,试验前原场地植物全部收割并原位翻耕入土,随后将150 kg(干重)芦苇破碎为2~3 cm的芦苇屑,直接撒入土壤表面,在芦苇屑表面喷洒耐盐菌、纤维素降解菌后通过翻耕将芦苇翻入土壤中。

处理II,试验前原场地植物全部收割并原位翻耕入土,将150 kg(干重)芦苇粉碎为2~3 cm的碎芦苇

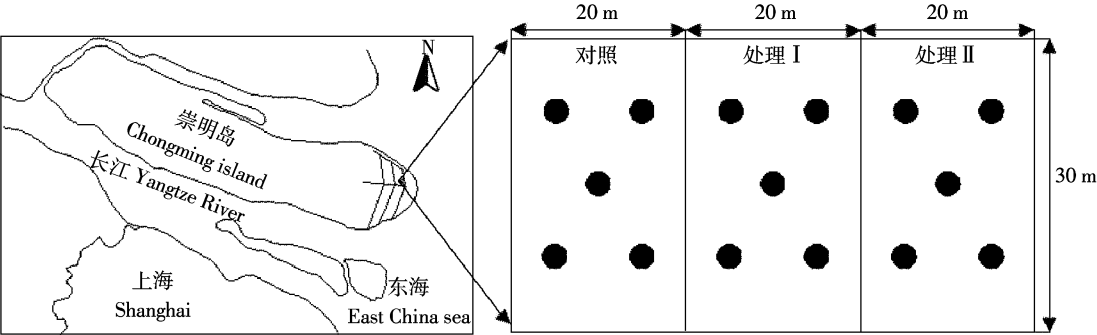


图 1 改良区示意图

Figure 1 Sketch map of improved areas

后与耐盐菌、纤维素降解菌混合,调节含水率到 60% 左右,按每 100 kg 芦苇添加 30 kg 鸟粪,堆肥处理 2 个月,再将腐熟的堆料撒入土壤表层并翻耕入土。

对照,取同一环境下的同等大小的样地作为对照。对对照样地原有的植物于 6 月初也被翻耕入土。

具体操作过程见表 1。

全部改良措施在 5 月底完成,并于 6 月初播种田菁。分别于 5、7、9、11 月底对 3 块样地采样。每块样地设置 5 个采样区,在每个采样区采用梅花状布点采样,每点采集次表层土(−5~20 cm)500 g,所得新鲜土样去掉较大根系后,混合均匀,利用四分法分出两份,一份风干后过 60 目筛于常温下保存,一份鲜样保存在 4℃冰箱中。在每块样地的单一植物群落中随机选取 3 个 1 m×1 m 的样方清点植株数,并挖深 10 cm 左右刈割采集具有代表性的田菁草 10 株,包括地上部分和地下根茎,用聚乙烯袋包装,带回实验室测定生物量。

1.3 样品分析

土壤容重采用环刀法测定;土壤含盐量按 1:5 土水比浸泡,水相采用 Hydrolab 多参数测定仪(HACH)

测电导率,并折算成土壤含盐量;TN 采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;土壤 TOC 采用日本岛津 TOC-VCPN 测定,平行绝对误差不超过 5%;土壤中 TP、TK 测定采用微波消解-电感耦合等离子体原子发射光谱法; β -葡萄糖苷酶采用比色法进行测定^[9];土壤微生物生物量的测定采用三磷酸腺苷法(ATP)^[10]。

采集的田菁草样品先用自来水将表层泥沙冲洗干净,再用蒸馏水冲洗 2 遍,植物生物量的测定采用常压恒温干燥法^[11]。

土壤微生物呼吸强度的测定:在原有室内培养法^[12]的基础上,采用气相色谱(GC214B,SHIMADZU)替代 NaOH 溶液检测 CO₂。色谱条件:10 m×2 mm 不锈钢色谱柱;进样口温度、柱温以及检测器(TCD)温度分别为 40、40℃和 90℃;载气为氮气,流速为 30 mL·min^{−1};进样量 0.2 mL。

1.4 数据处理

各个样点数据按 5 个平行样平均值计算。数据的统计分析采用 SPSS13.0 软件完成,对数据进行 ANOVA 方差分析比较,并对置信区间在 95%的范围

表 1 3 块样地的具体改良措施

Table 1 Specific improving measures for three sample areas

改良措施	时间	对照	处理 I	处理 II
原地芦苇收割翻耕入土	3 月 15 日	—	有	有
芦苇粉碎/kg	3 月 18 日	—	150	150
芦苇预腐	3 月 29 日	—	芦苇直接还田预腐	芦苇堆肥预腐
耐盐菌液投加量/10 ⁹ ·mL ^{−1}	3 月 29 日	—	16 000 mL	16 000 mL
纤维素降解菌液投加量/10 ⁹ ·mL ^{−1}	3 月 29 日	—	5 000 mL	5 000 mL
土壤翻耕	3 月 31 日	—	有	—
堆肥芦苇还田并翻耕	5 月 29 日	—	—	有
有机肥投加量/kg	5 月 29 日	—	160	160
20 cm 表层土翻耕	6 月 3 日	有(原植物翻耕入土)	有	有
播种	6 月 4 日	田菁	田菁	田菁

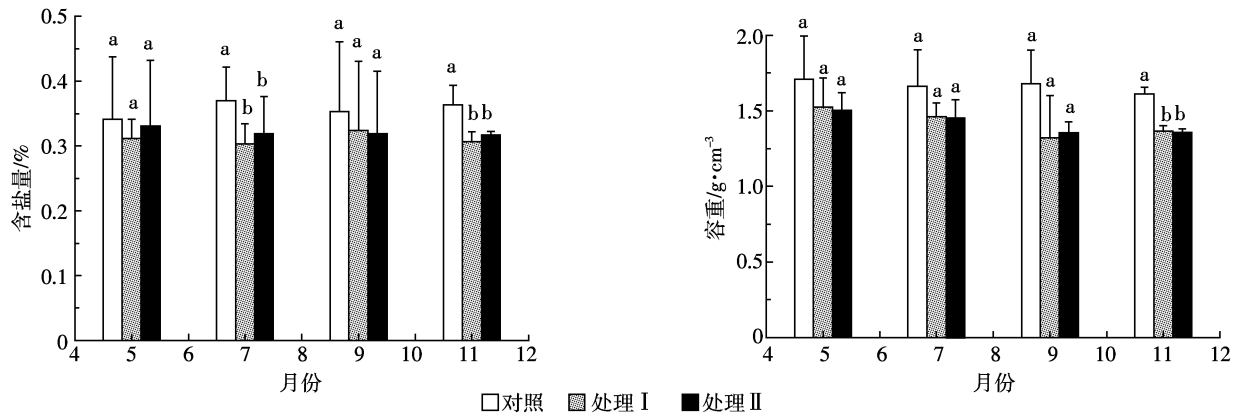
内差异显著的数据采用 LSD 法进行多重比较分析。

主成分分析采用 SPSS13.0 软件完成,SPSS 软件分析得出主成分矩阵中的各个系数分别表示不同指标与各个主成分的相关性,正值表示正相关,负值为负相关,绝对值越大,相关性越大。主成分列向量矩阵与标准化后的指标矩阵的乘积即为各个主成分值,所得主成分值的列向量求和得出综合主成分的得分,作为评价不同改良模式对土壤改良效果的依据,得分越高,综合改良效果越理想。

2 结果与分析

2.1 不同改良模式对土壤理化性质的影响

由图 2 可见,在 5 月份即种植田菁草前处理 I 和处理 II 的含盐量分别较对照低 8.5% 和 2.9%,土壤容重较对照低 10.9% 和 12.1%。6 月份田菁草播种后,随着时间推移和植物的生长,至 11 月份时处理 I 和处理 II 的土壤含盐量分别较对照低 15.6% ($P=0.024$) 和 12.8% ($P=0.041$), 土壤容重分别较对照低 15.1% ($P=$



* 柱状图上方有相同字母标识说明各模式间无显著差异(LSD 法, $P>0.05$)。下同。

图 2 不同改良模式土壤含盐量和容重的变化趋势

Figure 2 The variation trend of soil salinity and volume-weight in different improved models

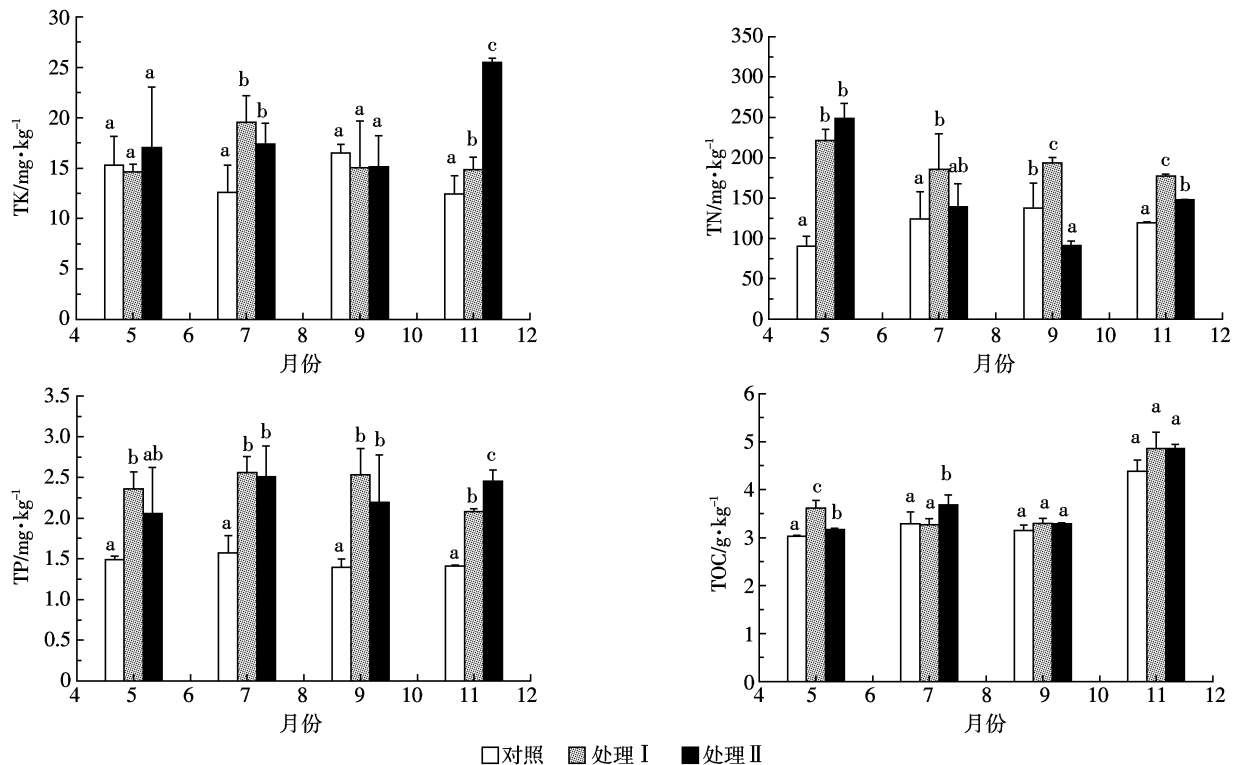


图 3 不同改良模式土壤养分的变化趋势

Figure 3 The variation trend of soil nutrients in different improved models

0.000)和 15.8%($P=0.000$),且处理 I 和处理 II 间无显著差异。

由图 3 可见,由于进行了一系列改良措施,处理 I 和处理 II 的土壤中 TOC、TN、TP 含量在 5 月份的时候已高于对照,TK 含量与对照无显著差异。6 月份田菁草播种后,随着时间推移和植物的生长,处理 I 和处理 II 的土壤中 TN、TK、TP 含量有所降低(可能是被植物吸收所致),TOC 含量变化较不明显。至 11 月份时,经过改良处理的样地土壤中 TN、TP 和 TK 含量均高于对照,处理 I 和处理 II 土壤中 TN 分别为对照的 148%($P=0.000$)和 124%($P=0.000$);TP 分别为对照的 148%($P=0.000$)和 174%($P=0.000$);TK 分别为对照的 119%($P=0.002$)和 205%($P=0.003$)。处理 I 和处理 II 改良模式土壤总有机碳均达到改良的最高值,分别为 4.84 、 $4.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别比对照提高的 10.8% ($P=0.053$)和 10.9% ($P=0.052$)。

2.2 不同改良模式对植物生物量和土壤微生物活性

的影响

由图 4 可见,在 11 月份处理 I 的地上生物量达 $1243 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 处理 II 次之为 $597 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 对照最低为 $357 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。处理 I 与处理 II 地上生物量分别为对照的 344%($P=0.000$)和 167%($P=0.000$),且不同处理间差异显著。随着改良的进行,不同改良模式土壤微生物呼吸强度总体呈上升趋势。除 5 月份外,土壤微生物呼吸强度呈处理 II > 处理 I > 对照的趋势,11 月份时,土壤微生物呼吸强度较对照增加了 14% ($P=0.085$)和 43% ($P=0.001$),且处理 II 与处理 I 间差异显著,但处理 I 的土壤微生物呼吸仍显著低于传统农业耕作模式改良的土壤^[13]。

由图 5 可见,不同改良模式土壤微生物量总体呈上升后急速下降趋势。5 月份时不同处理对土壤微生物量并没有明显影响。6 月份田菁草播种后,随着时间推移,土壤微生物量在 9 月份达到最高,11 月份时不同改良样地土壤微生物总量明显下降,这可能是由于秋

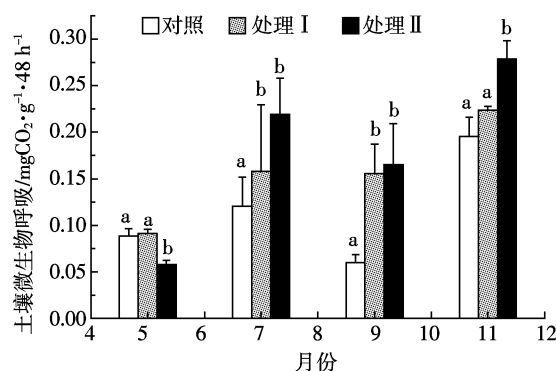


图 4 不同改良模式土壤微生物呼吸与地上生物量的变化趋势

Figure 4 The variation trend of soil microbial respiration and plant biomass in different improved models

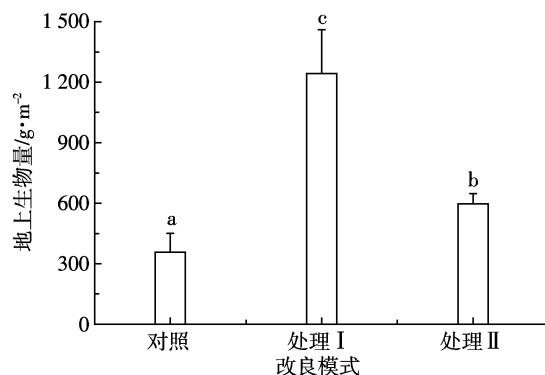
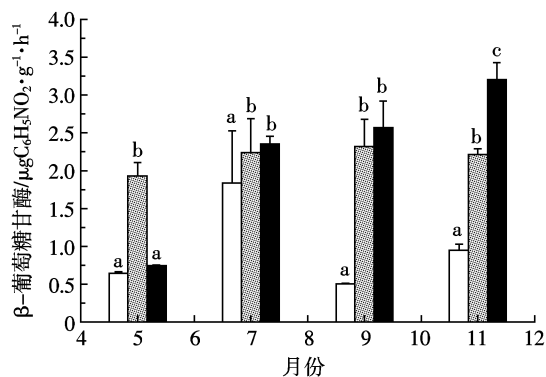
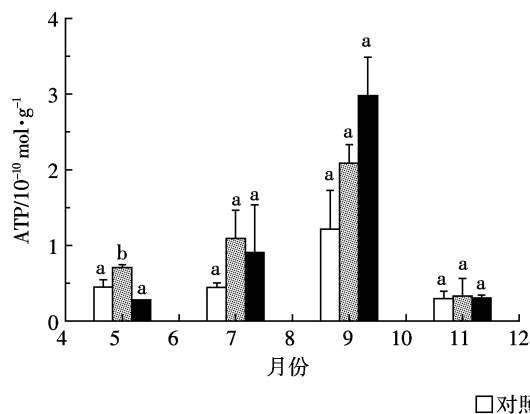


图 5 不同改良模式土壤生物量和酶活性变化趋势

Figure 5 The variation trend of soil biomass and enzyme activity in different improved models



季气温偏低,降水量较少,导致微生物生长减缓。 β -葡萄糖苷酶活性在改良过程中总体呈上升趋势,各个月份对照样地中均最低,且在改良过程中变化不大。除5月份外, β -葡萄糖苷酶活性呈处理Ⅱ>处理Ⅰ>对照的趋势,11月份时,不同处理间 β -葡萄糖苷酶活性差异显著。

2.3 不同改良模式土壤改良效应的综合评价

上述分析结果显示,4次采样的各种土壤理化、生物数据的变化缺乏统一的规律。处理Ⅰ的地上生物量最高,土壤呼吸强度却并不是最强,处理Ⅱ的微生物活性最强,且土壤微生物呼吸最强,但地上生物量却并不是最多。由于季节性因素对土壤的物理、化学和生物指标有显著的影响,有可能是季节性的波动掩盖了实际的改良效果,无法评价出最优改良模式。为此,采用主成分分析方法将改良土壤的理化性质、酶活、微生物量、土壤微生物呼吸、植物生物量综合分析。在计算综合主成分得分时,分别进行了两次评分,第一次仅输入4次采样的土壤理化指标和微生物量、土壤酶活等传统土壤肥力指标,为传统评价;第二次则加和了植物生物量与土壤微生物呼吸强度等土壤碳收支指标,为低碳化评价。

评价时首先对上述原始数据进行标准化处理,得到 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 指标矩阵,由特征值和特征向量得出系数列向量矩阵,由此传统评价与低碳化评价的综合主成分模型分别为^[13-14]:

$$F_1 = 0.071131X_1 + 0.274328X_2 + 0.272161X_3 - 0.09376X_4 + 0.188472X_5 + 0.098513X_6 - 0.01242X_7 - 0.26384X_8$$

$$F_2 = 0.149122X_1 + 0.152593X_2 + 0.075855X_3 + 0.066904X_4 + 0.218102X_5 - 0.16343X_6 + 0.061824X_7 - 0.29817X_8 - 0.05575X_9 + 0.259984X_{10}$$

其中 F_1, F_2 分别为仅考虑传统肥力指标和加和了土壤呼吸与植被生物量后的综合主成分得分;

$X_1, X_2, \dots, X_{10}$ 分别为标准化后的微生物量、TOC、 β -葡萄糖苷酶、TN、TP、TK、含盐量、容重、土壤微生物呼吸、地上生物量。

根据上述模型得到的综合得分结果见表2。

由表2可见,仅考虑传统的评价指标,处理Ⅱ改良效果好于处理Ⅰ,但加和土壤呼吸和植物固碳量等

碳收支指标后处理Ⅰ的评价得分高于处理Ⅱ。这表明相对而言,处理Ⅰ属于低碳化的改良措施。

3 讨论

3.1 芦苇秸秆还田对土壤性质和肥力的改良效应

土壤容重是土壤孔隙度和通透性的综合表现,土壤通气透水条件良好能促进土壤微生物活动,从而增强土壤养分的转化和供应,有利于作物生长^[15]。李焕珍等^[16]研究发现,玉米秸秆还田后可以增加土壤孔隙度、减少土壤容重。张立宾等报道^[17],种植植物可以从土壤中吸收盐分,并积累在植物体中,因而随着植物的收获,土壤盐分就实现了转移。本研究结果也表明,芦苇直接还田的处理Ⅰ与芦苇堆肥还田处理Ⅱ土壤含盐量和土壤容重均较对照降低($P < 0.05$)。这主要是由于在翻耕过程中将碎芦苇与腐熟芦苇混入土壤,改善了土壤结构,增加土壤孔隙度,使得土壤容重降低,土壤盐分易于被冲刷;同时处理Ⅰ和处理Ⅱ的地上生物量显著高于对照,也可以有效抑制地表积盐,降低土壤盐分。

袁家富^[18]在麦田覆盖3000 kg·hm⁻²稻草的试验中发现,秸秆覆盖能增加土壤的N、P的含量,特别是可溶性K的含量,并且促进土壤有机质的形成,土壤有机质含量较裸地和试验前都有所提高。黄继川等^[19-20]施用玉米秸秆堆肥进行盆栽试验发现施用玉米秸秆堆肥处理相比于其他处理土壤有机质含量最高,且土壤碱解N、速效P、速效K均显著提高,土壤真菌、细菌、放线菌增加,微生物多样性提高,土壤相关酶活性显著提高,植物生物量也显著提高。本试验的研究结果也表明,无论是处理Ⅰ还是处理Ⅱ的样地,土壤养分和植物生物量都有所提高,其中土壤有机质分别比对照提高了10.8%和10.9%。一般而言土壤有机质的提高是一个长期过程,本实验在短短7~8个月即提高了10%左右,这可能是因为改良过程中有机质投加量较大,且添加了芦苇腐化菌,加快了芦苇的腐化稳定。此外芦苇秸秆中木质素含量较农作物秸秆高^[21-22],使得芦苇还田后降解速率较低,不易被彻底降解为CO₂而回归大气^[23],因此还田后将会有更多的有机碳以土壤腐殖质的形式保留在土壤中。

上述分析表明,与其他农作物秸秆相比,芦苇秸秆直接还田或堆肥腐熟后还田也能有效改善土壤结构、增加土壤有机质及养分,从而提高土壤肥力;且芦苇还田后在土壤中较难彻底降解,可使土壤有机质积

表2 不同改良模式及评价模式的综合得分

Table 2 Synthetic scores in different improved and evaluation models

改良模式	对照	处理Ⅰ	处理Ⅱ
传统评价	-0.641	0.260	0.381
低碳化评价	-1.010	0.689	0.321

累,延长土壤有机质的周转时间,相对减少土壤 CO_2 的排放^[24]。

3.2 两种处理措施对土壤微生物活性和植被生物量影响的差异性分析

潘志勇等^[25]研究小麦、玉米秸秆还田时发现,无论是偏施氮肥还是只用秸秆还田,都对土壤 CO_2 的排放有促进与加强作用。本研究结果表明无论是芦苇直接还田或堆肥还田,土壤理化性质的改善以及土壤养分的提高程度无明显差异,但土壤微生物呼吸的提高程度有较大差异。这可能是由于芦苇经过2个月堆肥后,芦苇内部结构被破坏,还田后易于被微生物进一步利用,而且堆肥中又添加了较多的氮源,为微生物提供了丰富的营养源。另外芦苇堆肥还田翻耕时间是在夏初,温度较高,此时翻耕补充土壤氧气,更易促进土壤微生物的生长,从而有利于微生物代谢和产酶,故该处理模式土壤酶活性高于芦苇直接还田模式(见图5)。而土壤酶活对土壤微生物呼吸又有一定的促进作用^[26]。处理Ⅰ芦苇直接还田,芦苇秸秆难降解,不易为微生物利用,且翻耕时间是在春季,翻耕时补充的氧气对微生物生长的促进作用较夏季低,这些因素导致微生物活性和呼吸增加量并不大。因此,处理Ⅰ相对更有利于减少土壤 CO_2 的排放。

由分析结果可知,芦苇直接还田和堆肥还田处理后土壤的养分均有提高,但两者间无明显差异,然而植物生物量却是处理Ⅰ显著高于处理Ⅱ,这是一个很有趣的现象。可能是由于土壤为植物直接提供的养分主要是矿物质而不是腐殖质,处理Ⅱ芦苇堆肥后得到了初步腐化稳定,部分矿物质在堆肥过程中已流失。而处理Ⅰ直接还田活性有机质和矿物质较多,被土壤微生物矿化后,为植物生长提供有效养分^[27]。也可能和处理Ⅰ改良后的土壤结构有利于 PO_4^{3-} 、 K^+ 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子的传输有关,从而易于被植物吸收。当然这仅仅是推测,尚有待在后续工作中给予阐明。

3.3 低碳化土壤改良效应的综合评价方法

影响土壤肥力的因素很多,且诸因素间存在一定的相关性。指数法虽简单易行,但带有很强的主观性,会掩饰土壤某些性质的变化^[28]。应用主成分分析方法(PCA)可在复杂的土壤肥力指标体系中筛选出若干个彼此不相关的综合性指标,且能反映原来全部指标所提供的大部分信息。相关研究也表明,主成分分析法是土壤质量定量评价中应用最为广泛的数理统计方法^[29],能够客观准确地筛选土壤属性的变异性。陈留美等^[30]选取了理化和生物相关指标,利用主成分分

析法评价淡灰钙土土壤肥力;吴玉红等^[31]以杨凌为研究区域,利用主成分分析法探讨了土壤肥力评价指标的选取。但这些评价均未考虑土壤微生物呼吸与植被生物量等碳收支指标,而在目前发展低碳经济的背景下,评价土壤的改良效应时有必要考虑土壤呼吸和地上生物量等碳收支指标。

本文采用主成分分析法,比较了仅考虑传统肥力指标和加和了土壤呼吸和植物生物量等碳收支指标后不同处理的改良效应。结果发现对照得分均最低,分别为-0.641和-1.010,说明未改良的土壤肥力和固碳能力均极差(植物量少)。按照传统的评价体系,即仅考虑土壤肥力,处理Ⅱ得分高于处理Ⅰ,说明处理Ⅱ综合肥力指标好于处理Ⅰ。但在加和了土壤微生物呼吸与地上生物量后,处理Ⅰ得分大幅升高,对照和处理Ⅱ的得分反而有所降低。这说明在考虑土壤碳汇等有关指标后,处理Ⅰ的综合改良效果好于处理Ⅱ。同时也表明植物生物量在土壤碳汇能力中所占权重较大,处理Ⅰ生物量最大,从而降低了单位生物量的土壤微生物呼吸。处理Ⅱ的土壤肥力最强,但其土壤微生物呼吸强度也较强,而地上生物量并不多,单位生物量的土壤微生物呼吸强度高于处理Ⅰ。综合考虑土壤结构、土壤肥力、地上生物量、土壤微生物呼吸等因素,处理Ⅰ模式有比较理想的低碳化改良效果。

4 结论

通过分析不同模式对湿地公园盐碱土壤的改良效应,可以初步得出以下结论:

(1)两种基于芦苇秸秆还田的处理措施均能改善土壤的结构与理化性质,主要表现在降低土壤容重和含盐量,提高土壤 N、P、K 含量和有机质含量,从而提高土壤肥力。

(2)处理Ⅰ、Ⅱ改良后土壤的植物生物量分别是对照的 3.44 倍和 1.67 倍,但土壤微生物呼吸强度仅较对照增加了 14%、43%。

(3)仅考虑传统土壤肥力指标,主成分分析得出处理Ⅱ模式的改良效果较佳。但加和了植物固碳量和土壤微生物呼吸等土壤碳收支指标后,处理Ⅰ得分较高,因此处理Ⅰ是一种相对低碳化的盐碱土壤改良措施。

参考文献:

- [1] Lal R. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon [J]. *Advances in Agronomy*, 2001, 71: 145-191.

- [2] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1):7-20.
- [3] ZHANG Xu-hui, LI Lian-qing, PAN Gen-xing. Topsoil organic carbon mineralization and CO₂ evolution of three paddy soils from South China and the temperature dependence[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(3):319-326.
- [4] 林学政, 陈靠山, 何培青, 等. 种植盐地碱蓬改良滨海盐渍土对土壤微生物区系的影响[J]. *生态学报*, 2006, 26(3):801-807.
LIN Xue-zheng, CHEN Kao-shan, HE Pei-qing, et al. The effects of *Suaeda salsa* L. planting on the soil microflora in coastal saline soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3):801-807.
- [5] 申源源, 陈 宏. 秸秆还田对土壤改良的研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2005, 25(19):291-292.
SHEN Yuan-yuan, CHEN Hong. The progress of study on soil improvement research with straw stalk[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 25(19):291-292.
- [6] 刘 娣, 范丙全, 龚明波. 秸秆还田技术在中国生态农业发展中的作用[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(6):404-407.
LIU Di, FAN Bing-quan, GONG Ming-bo. The role of technology of straw returning to field in developing ecological agriculture[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(6):404-407.
- [7] YANG Shi-lun, DING Ping-xing, CHEN Shen-liang. Changes in progradation rate of the tidal flats at the mouth of the Changjiang (Yangtze) River, China[J]. *Geomorphology*, 2001, 38:167-180.
- [8] Brix H, Sorrell B K, Lorenzen B. Are phragmites-dominated wetlands a net source or net sink of greenhouse gases?[J]. *Aquatic Botany*, 2001, 69:313-324.
- [9] Tabatabai M A. Soil Enzymes[M]//Weaver R W, Angle J S, Bottomley P. S. Methods of soil analysis, Part 2-microbiological and biochemical properties. SSSA Book Series, No. 5. 677 S. Segoe Rd., Madison, WI 53711, USA; Soil Science Society of America, 1994:775-833.
- [10] 姚槐应, 黄昌勇, 等. 土壤微生物生态学及其实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006:143-144.
YAO Huai-ying, HUANG Chang-yong, et al. Soil microbial ecology and experiment technology[M]. Beijing: Science Press, 2006:143-144.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000:302-304.
LU Ru-kun. Chemical analysis methods of agricultural soil[M]. Beijing: Chinese Agricultural Technology Press, 2000:302-304.
- [12] 范志平, 王 红, 邓东周, 等. 土壤异养呼吸的测定及其温度敏感性影响因子[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(7):1221-1227.
FAN Zhi-ping, WANG Hong, DENG Dong-zhou, et al. Measurement methods of soil heterotrophic respiration and key factors affecting the temperature sensitivity of the soil heterotrophic respiration [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(7):1221-1227.
- [13] 张文佐, 王 磊, 颜一青, 等. 不同农业耕作模式下崇明盐碱土壤低碳化改良效应的模型评价[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(5):1006-1014.
ZHANG Wen-quan, WANG Lei, YAN Yi-qing, et al. Assessment of different agricultural pattern for amelioration of salty soil by low carbon model in Chongming, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5):1006-1014.
- [14] 张文霖. 主成分分析在 SPSS 中的操作应用[J]. *市场研究*, 2005, (12):31-34.
ZHANG Wen-lin. The applied of PCA in SPSS software[J]. *Market Research*, 2005, (12):31-34.
- [15] 吴 婕, 朱钟麟, 郑家国, 等. 秸秆覆盖还田对土壤理化性质及作物产量的影响[J]. *西南农业学报*, 2006, 19(2):192-195.
WU Jie, ZHU Zhong-lin, ZHENG Jia-guo, et al. Influence of straw mulching treatment on soil physical and chemical properties and crop yield[J]. *Southwest China Journal of Agriculture Science*, 2006, 19(2):192-195.
- [16] 李焕珍, 张忠源, 杨伟奇, 等. 玉米秸秆直接还田培肥效果的研究[J]. *土壤通报*, 1996, 27(5):213-215.
LI Huan-zhen, ZHANG Zhong-yuan, YANG Wei-qi, et al. Effect of returning corn straw on soil fertility[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1996, 27(5):213-215.
- [17] 张立宾. 盐生植物的耐盐能力及其对滨海盐渍土的改良效果研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2005.
ZHANG Li-bin. Salt-Tolerance capacity of halophytes and their effects on coastal saline soil improvement [D]. Taian: Shangdong Agricultural University, 2005.
- [18] 袁家富. 麦田秸秆覆盖效应及增产作用 [J]. *中国生态农业学报*, 1996, 4(3):61-65.
YUAN Jia-fu. Effects of straw muleh in wheat field and its effects on yield increase[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 1996, 4(3):61-65.
- [19] 黄继川, 彭智平, 于俊红, 等. 玉米秸秆堆肥处理对芥菜品质及土壤肥力的影响[J]. *广东农业科学*, 2009, 12:88-91.
HUANG Ji-chuan, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, et al. The impact of applying corn-straw compost on quality of mustard and soil fertility[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2009, 12:88-91.
- [20] 黄继川, 彭智平, 李文英, 等. 施用堆肥对生菜品质和土壤生物活性及土壤肥力的影响[J]. *热带作物学报*, 2010, 31(5):705-710.
HUANG Ji-chuan, PENG Zhi-ping, LI Wen-ying, et al. The impact of applying compost on the quality of lettuce, soil biological activity and soil fertility[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2010, 31(5):705-710.
- [21] 张木明, 徐振林, 张兴秀, 等. 预处理对稻草秸秆纤维素酶解产糖及纤维木质素含量的影响[J]. *农产品加工(学刊)*, 2006(3):4-6.
ZHANG Mu-ming, XU Zhen-lin, ZHANG Xing-xiu, et al. Effects of pretreatments on the enzymatic hydrolysis and the content of cellulose and lignin of rice straw[J]. *Academic Periodical of Farm Products Processing*, 2006(3):4-6.
- [22] 唐艳军, 刘秉钺, 李友明, 等. 芦苇化学成分及其化学机械浆性能研究[J]. *林产化学与工业*, 2006, 26(2):69-73.
TANG Yan-jun, LIU Bing-chen, LI You-ming, et al. Study on chemical composition and chemical-mechanical pulping properties of reed[J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2006, 26(2):69-73.
- [23] 刁治民, 周富强, 高晓杰, 等. 农业微生物生态学[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2008:196-199.
DIAO Zhi-min, ZHOU Fu-qiang, GAO Xiao-jie, et al. Agricultural

- microbiology ecology [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2008:196-199.
- [24] 潘根兴. 农业土壤固碳与缓解气候变化[J]. 国际学术动态, 2009(6):25-27.
- PAN Gen-xing. Agricultural soil carbon sequestration and climate change mitigation[J]. *International Academic Developments*, 2009(6): 25-27.
- [25] 潘志勇, 吴文良, 牟子平, 等. 不同秸秆还田模式和施氮量对农田CO₂排放的影响[J]. 土壤肥料, 2006(1):16.
- PAN Zhi-yong, WU Wen-liang, MOU Zi-ping, et al. Effect of straw-return and nitrogen fertilizer application on the CO₂ emission in farmland[J]. *Soils and Fertilizers*, 2006(1):16.
- [26] Lee K H, Jose S. Soil respiration and microbial biomass in a pecan-cotton alley cropping system in Southern USA [J]. *Agroforestry Systems*, 2003, 58:45-54.
- [27] 赵加瑞, 王益权, 刘 军, 等. 灌溉水质与土壤有机质累积的关系[J]. 生态环境, 2008, 17(3):1240-1243.
- ZHAO Jia-rui, WANG Yi-quan, LIU Jun, et al. Effect of irrigation water quality on soil organic matter accumulation[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(3):1240-1243.
- [28] 张 贞, 魏朝富, 高 明, 等. 土壤质量评价方法进展[J]. 土壤通报, 2006, 37(5):999-1000.
- ZHANG Zhen, WEI Chao-fu, GAO Ming, et al. Assessment methods for soil quality: A review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(5):999-1000.
- [29] Yemefack M, Jetten V G, Rossiter D G. Developing a minimum data set for characterizing soil dynamics in shifting cultivation systems [J]. *Soil&Tillage Research*, 2006, 86:84-98.
- [30] 陈留美, 桂林国, 吕家珑, 等. 应用主成分分析和聚类分析评价不同施肥处理条件下新垦淡灰钙土土壤肥力质量 [J]. 土壤, 2008, 40(6):971-975.
- CHEN Liu-mei, GUI Lin-guo, LV Jia-long, et al. Evaluation on soil fertility quality of newly cultivated light sierozem under different fertilization with methods of principal component and cluster analyses[J]. *Soils*, 2008, 40(6):971-975.
- [31] 吴玉红, 田霄鸿, 同延安, 等. 基于主成分分析的土壤肥力综合指数评价[J]. 生物学杂志, 2010, 29(1):173-180.
- WU Yu-hong, TIAN Xiao-hong, TONG Yan-an, et al. Assessment of integrated soil fertility index based on principal components analysis[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(1):173-180.