

# 互花米草控制技术对湿地土壤有机碳保留能力与微生物活性的影响

李艳丽, 王磊, 张文俊, 张士萍, 王红丽, 付小花, 乐毅全

(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)

**摘要:** 鉴于多种技术被用于控制崇明东滩互花米草的蔓延, 为了选择更好的互花米草控制技术, 首先比较不同控制技术作用下湿地土壤总有机碳(SOC)含量的差异, 并对土壤中的微生物活性进行研究以分析土壤中总有机碳的输出能力, 进而分析土壤总有机碳的保留能力。结果表明, 经过刈割/翻耕、刈割/翻耕/水位调节、刈割/生物(芦苇)替代等控制措施后, 湿地土壤中土壤总有机碳含量、可培养微生物菌落数、土壤转化酶活性和土壤呼吸强度均高于对照, 而通过 DGGE 技术对微生物种群进行分析后发现, 修复后的湿地土壤多样性显著低于对照。在几种不同的控制技术中, 刈割/翻耕/水位调节模式由于增加了土壤的滞水时间, 其土壤微生物活性相对较低, 有机碳含量较高, 表明采用该修复技术后土壤的碳代谢能力相对较弱, 因此该修复技术更有利于湿地土壤有机碳的保留。相对其他控制技术而言, 刈割/翻耕/水位调节模式可在控制互花米草蔓延的同时有效地保留土壤有机碳。

**关键词:** 崇明东滩; 互花米草; 物理控制; 碳保留; 土壤总有机碳; 微生物活性; 土壤呼吸

中图分类号: X171.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2009)07-1529-06

## Effect of *Spartina Alterniflora* Controlling Technologies on Organic Carbon Sequestration and Microbial Activities in Wetland Soil

LI Yan-li, WANG Lei, ZHANG Wen-quan, ZHANG Shi-ping, WANG Hong-li, FU Xiao-hua, LE Yi-quan

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Various technologies were employed to control the spread of *Spartina alterniflora* in Dongtan of Chongming Island. Although these technologies were found to be able to control spread of *Spartina alterniflora*, the effect on the soil organic carbon(SOC) retaining and microbial activity of wetland soil, which related to the capability of climatic regulation of wetland, had not been studied in detail. In order to select an suitable technology either from the view of *Spartina alterniflora* control effect or from the capability of climatic regulation of wetland soil, the capability of organic carbon retaining and microbial activities of wetland soil after treatment with different technologies for one year were assessed by analyzing the differences of SOC content and microbial biomass, soil enzyme and soil respiration. Results showed that total SOC content and soil respiration were significant different( $P<0.05$ ) in the soil with various control technologies, including cutting/digging tillage, cutting/digging tillage/water level control, cutting/biological substitute (with *Phragmites communis*). Generally, total SOC content of the soil with various controlling technologies increased due to the increase of the plant biomass input, comparing to the control, while microbial activity(including microbial biomass, invertase activities and respiration) also increased and microbial biodiversity index decreased. The results indicated that artificial measure for controlling *Spartina alterniflora* would always improve microbial activity of soil, resulting in the increase of organic carbon output. Among these technologies, the microbial activity in soil with cutting/digging tillage/ water level control was the lowest due to the extension of stagnant water time, thus the organic carbon content was the highest( $21.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). This implied that this controlling mode could restrain the organic carbon degradation and profit its sequestration relatively. So compared to other controlling modes, cutting/digging tillage/water level control could both control the expanding of *Spartina alterniflora* and profit the soil organic carbon sequestration.

**Keywords:** Dongtan of Chongming Island; *Spartina alterniflora*; physical controls; carbon sequestration; soil organic carbon; microbial activities; soil respiration

收稿日期: 2008-10-14

基金项目: 科技部科技支撑计划重大项目(2006BAC01A14); 上海市科委重大科技攻关项目(06DZ12302)

作者简介: 李艳丽(1982—), 女, 湖北公安县人, 博士研究生, 主要研究方向为湿地土壤环境生态功能。E-mail: birdrain@hotmail.com

通讯作者: 王磊 E-mail: celwang@yahoo.com

湿地在调节气候、涵养水源、蓄洪防旱、控制土壤侵蚀、促淤造陆、净化水体、维持生物多样性和生态平衡等方面均具有十分重要的作用,有“自然之肾”之称<sup>[1]</sup>。近年来,由于气候变暖导致海平面上升、工农业污染导致水质下降、修建水利工程切断了下游洪水补给量以及外来物种入侵造成植物种群数减少等原因,我国湿地生态系统受到了严重的影响,湿地面积减少,质量与功能持续下降,表现在生物多样性降低、物种栖息地丧失、水质改变、大气调节与污染净化等环境功能下降等。虽然对于湿地生物多样性和水质变化的研究分析多见于报道,但对于受损湿地生态系统修复后的土壤环境生态功能的评价鲜见研究。这主要是由于生态系统的复杂性和某些环境要素的突发性,加之人们对生态过程及其内部运行机制认识的局限性,而且,在某种意义上,湿地生态系统的恢复具有一定的风险,生态修复过程是按照一定的功能水平要求,由人工设计并在生态系统层次上进行的,因而具有较强的综合性、人为性。目前,已有部分对湿地环境生态功能退化进行修复的研究,如对断流引起湿地退化进行水文恢复的研究<sup>[2]</sup>;对围垦造成湿地减少进行退田还湖的修复<sup>[3]</sup>以及对大米草入侵湿地采用割除/生物替代法控制其生长量<sup>[4]</sup>。

外来物种的入侵被认为是海滨湿地所面临的五大威胁之一<sup>[5]</sup>。由于人类有意或无意的引种,互花米草在原产地以外地区迅速扩散,在海滨潮间带形成单优势植物群落,不断侵占土著生物群落的生境,已对海滨湿地生态系统造成了严重的生态与进化后果<sup>[6-9]</sup>。对互花米草的入侵常用的控制措施有物理法(如筑堤、刈割、遮盖等)、化学法(如采用除草剂等)、生物法(如引进天敌等)。目前对于不同互花米草控制技术作用与效果的评价主要集中在控制效率,生物多样性恢复等方面,而忽视了其对湿地土壤碳保留能力的影响。

一般而言,未受干扰的湿地生态系统具有较高的植被净初级生产力,同时由于低温、水淹和缺氧等导致湿地土壤呼吸强度较弱,动植物的残体返回到土壤后的分解过程较慢,湿地有机碳的周转时间通常可长达数十年至数百年<sup>[10]</sup>,因而被认为是大气 CO<sub>2</sub> 的“汇”<sup>[11]</sup>,也是湿地重要的环境功能。

近年来,由于外来种互花米草的入侵与快速蔓延,崇明东滩互花米草群落分布面积达 910.17 hm<sup>2</sup>,约占植被总面积的 33.1%<sup>[12]</sup>。为控制互花米草蔓延,华东师范大学等单位已研究了刈割、翻耕、水淹等多种物理控制方法和生物(芦苇)替代法,其控制效果已

被报道<sup>[13]</sup>,然而对采用不同技术修复后湿地土壤碳代谢能力和有机碳保留能力的变化尚缺乏深入的研究。本研究主要分析了不同类型的控制技术作用于互花米草入侵湿地一年后湿地土壤的微生物活性以及有机碳保留能力的变化状况,进而从湿地土壤的环境生态效应角度评价不同修复模式的有效性,研究结果将为选择合适的受损湿地修复模式提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 修复区域

图 1 为处于崇明东滩东旺沙的修复区域,有刈割/翻耕、刈割/翻耕/水位调节、刈割/生物替代(替代品种为芦苇)3 种控制模式。筑堤水淹一方面能限制米草根茎的横向蔓延,另一方面也能隔绝潮流,抑制营养吸收和氧气交换,最终导致互花米草的死亡;刈割能遏制其生长,限制种子产生,最终杀死植株<sup>[14]</sup>;翻耕可将植物根茬翻入土壤,提高土壤有机碳含量,降低土壤盐分,从而提高土壤肥力;而在刈割后种植芦苇可以取代互花米草的优势地位。

本研究于 2008 年 4 月初在互花米草修复现场采集经几种不同修复模式(刈割/翻耕,刈割/翻耕/水位调节,刈割/生物替代)作用一年后的土壤样品,土壤的含盐量 4.63~5.17 g·kg<sup>-1</sup>,总氮的含量 307.33~388.17 mg·kg<sup>-1</sup>,总磷的含量 316.87~380.43 mg·kg<sup>-1</sup>。每个修复模式区域(包括未修复的对照区域)均匀布点 3 个(图 1),每个样点在 2 m×2 m 内采用梅花形布点取样法,取 5 个点的次表层土(-5~-20 cm)500 g 土壤混合均匀,将均匀土壤中的 1 kg 装入自封袋,带回实验室于 4℃冰箱保存,备用。取其中一半土壤风干研碎,过 60 目筛,装瓶测土壤总有机碳含量和转化酶活性。

### 1.2 研究方法

土壤总有机碳分析:采用日本岛津 TOC-VCPN 总有机碳分析仪。

土壤可培养微生物菌落的分离计数:微生物的分离计数采用稀释平板法之混菌法<sup>[15]</sup>。好氧细菌与厌氧性细菌采用牛肉膏蛋白胨琼脂,于 37℃在培养箱和厌氧工作站内(Thermo Forma 1029)分别培养 2、3 d。

土壤转化酶活性测定:采用 E.Hoffmann 与 A. Seegere 法,其活性以单位土质量的 0.05 mol·L<sup>-1</sup> 硫酸钠毫升数(对照与试验测定的差)表示<sup>[16]</sup>。

土壤微生物呼吸强度测定:土壤微生物呼吸强度采用 OxiTop<sup>®</sup>-C 仪器法测定。首先预设 OxiTop<sup>®</sup>

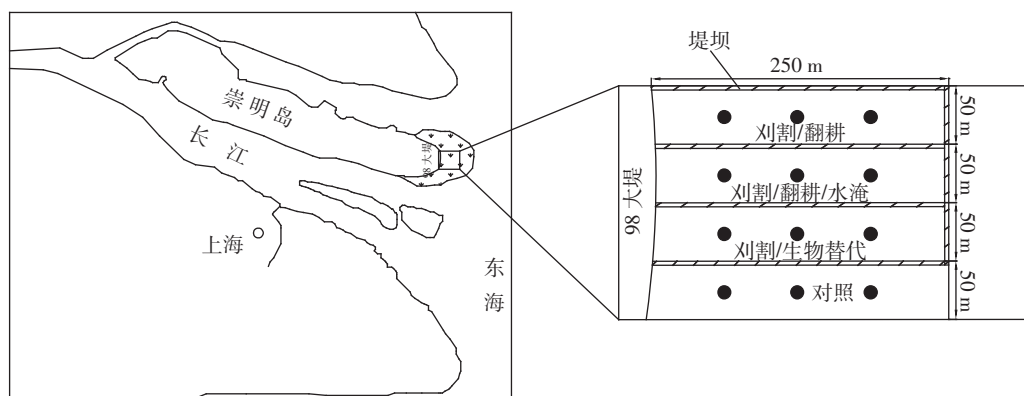


图 1 不同修复模式与土壤采样示意图

Figure 1 Sketch map of study area under different physical controls

Controller110 控制器参数, 于 28 ℃ 培养 3 d。操作步骤如下: 称取适量新鲜土样至 OxiTop<sup>®</sup>-C 仪器配备的 600 mL 培养瓶中, 加 1% 土样量的葡萄糖, 加水定容至 100 mL, 用带有 OxiTop<sup>®</sup>-C 测量头的专用瓶盖密封使其与外界空气隔绝; 将培养瓶放入 28 ℃ 的摇床恒温振荡培养, 立即用 OxiTop<sup>®</sup>-C Controller110 控制器激活测量头开始测量; 在预设的培养天数后, 用 OxiTop<sup>®</sup>-C Controller110 控制器读取全部数据。

土壤微生物多样性分析: 土壤样品总 DNA 的提取用美国 OMIGA 公司的土壤样品总 DNA 小量提取试剂盒。将提取物先以 8f (5'-AGAGTTTGATCCTG-GCTCAG-3'), 1492r (5'-GGTTACCTTGTACGACTT-3') 为引物对 16S rDNA 的 V3 区进行 PCR 扩增; 再以 PCR 产物为模板, 以 341f (5'-CGCCGCGCGCGCGCGCGGGCGGGCGGGGGCAGCGGGGGCCTAGGGGAGGCAGCAG-3') 和 534r (5'-ATTACCGCGGCTGCTGG-3') 为引物进行 PCR 扩增。反应条件为: 94 ℃ 3 min、94 ℃ 30 s、56 ℃ 30 s、72 ℃ 50 s, 30 个循环; 72 ℃ 延伸 10 min。扩增产物采用变性梯度凝胶电泳 (DGGE) 进行电泳, 电泳仪为 D-Code system (Bio-Rad, 美国伯乐公司), 变性剂梯度为 35%~65%。采用 Smartview 软件 (上海复日科技) 扫描分析电泳条带中的光密度值及条带数, 根据各样品在 DGGE 指纹图谱中的表现用香农-威纳指数 (Shannon-Weiner Index) 来计算其群落多样性。香农指数是基于 DNA 条带在凝胶中的光密度值计算得到的, 计算公式为:

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \log_{10} P_i \quad (1)$$

式中:  $H$  为香农-威纳指数,  $S$  为 DGGE 胶中条带数量,  $P_i$  为第  $i$  条带灰度占该样品条带总灰度的比率。

### 1.3 数据处理

采用 SPSS11.5 软件对数据进行 ANOVA 方差分析比较, 并对置信区间在 95% 的范围内差异显著的数据采用 LSD 法进行多重比较分析。

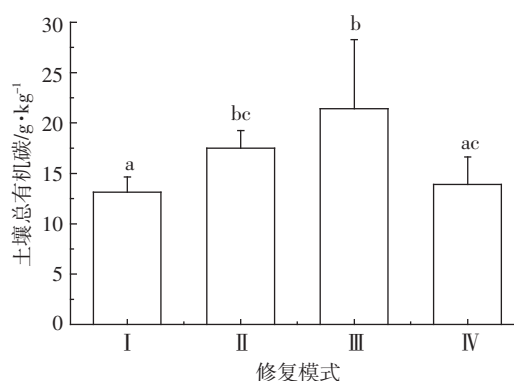
## 2 结果与讨论

### 2.1 不同修复技术对土壤总有机碳含量的影响

土壤对碳的同化和呼吸作用决定了陆地生态系统与大气之间碳的净交换, 若土壤中的有机质含量增加 1%, 大气中的二氧化碳含量将下降  $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  [17]。

土壤的有机碳含量是输入与输出量的平衡, 可以初步反映土壤中有机碳的保留能力。对几种不同修复技术作用一年后的土壤总有机碳含量分析结果如图 2 所示。

方差分析表明, 4 种修复模式下土壤总有机碳含



① I: 对照; II: 刈割/翻耕; III: 刈割/翻耕/水位调节; IV: 刈割/生物替代; ② 图中误差线旁具有相同字母表明其根据 LSD 法检验其差异在  $\alpha=0.05$  水平上不显著。下同。

图 2 修复模式对土壤总有机碳的影响

Figure 2 Soil organic carbon content under different physical controls



量差异显著( $P<0.05$ )。其中刈割/翻耕/水位调节模式下土壤总有机碳含量最高,达  $21.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而刈割/翻耕一方面将根茬翻入土壤,增加了土壤总有机碳的返还量,另一方面增加了土壤的通气性能,加强了土壤的呼吸强度,可促进有机碳的分解,因此使得采取刈割/翻耕模式时的土壤有机碳含量( $17.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )低于刈割/翻耕/水位调节模式下土壤有机碳含量( $21.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),模式Ⅱ和模式Ⅲ都显著高于不作处理的对对照样地。刈割/生物替代由于没有根茬翻入土壤,其土壤总有机碳含量显著低于模式Ⅲ的含量,仅为  $13.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,与对照样地有机碳含量  $13.132 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  的差异不显著。

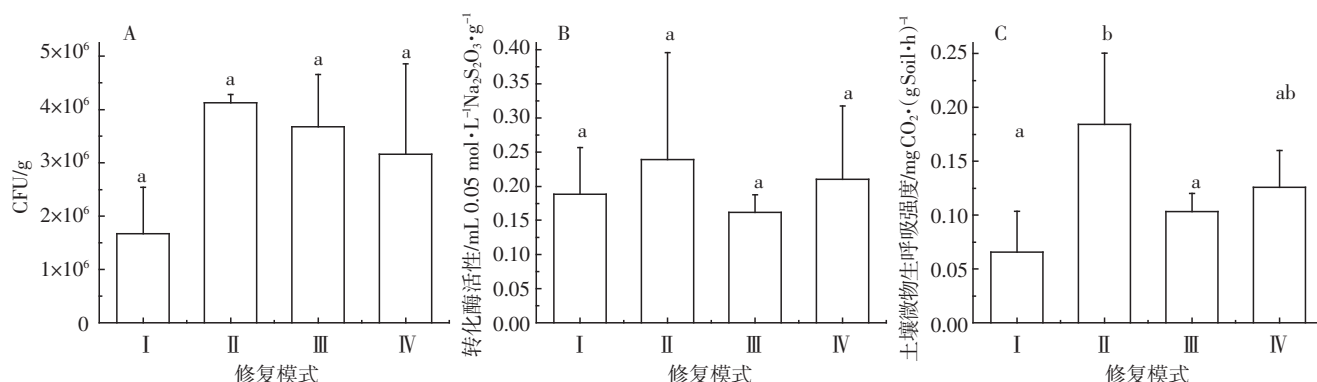
总体而言,经过修复的土壤总有机碳含量高于对照,但这并不能说明修复后的土壤具有较高的有机碳保留能力,可能是由于刈割/翻耕增加了土壤中有有机碳的输入量。为此,必须进一步研究土壤微生物活性以考察修复前后土壤的碳代谢能力,通过综合比较土壤总有机碳的含有量和输出能力,进而分析修复/控制技术对湿地土壤总有机碳的保留能力的影响。

## 2.2 对土壤的微生物活性与有机碳代谢能力的影响

影响土壤微生物活性的主要因素有土壤微生物总量、土壤酶活性、土壤呼吸强度以及土壤微生物群落结构。土壤微生物量及其群落结构与土壤的各项理化指标有显著相关性<sup>[18]</sup>。在土壤微生物中细菌是主要组成者,可占土壤微生物总量的70%~90%,它可以分解土壤中的有机残体,并将其转变为新生微生物细胞以及二氧化碳和甲烷等物质,同时代谢产生的许多有机酸类能提高土壤养分的有效性。图3(A)中的可培养微生物菌落数主要是指好氧菌与厌氧菌之和。土壤酶是一类具有催化能力的生物活性物质,它直接参与了土壤中的生物化学反应,其活性高低可反映土壤营养

物质转化、能量代谢和污染物降解等过程能力的强弱。转化酶能将土壤中高分子量的多糖水解成能够被植物和土壤微生物吸收利用的小分子葡萄糖或果糖,为土壤生物体提供充分能源,其活性反映了土壤有机碳累积与分解转化的能力。土壤呼吸包括土壤微生物呼吸、土壤无脊椎动物呼吸和植物根系呼吸这3个生物学过程和土壤中含碳物质化学氧化过程的总和,其中土壤无脊椎动物呼吸量和化学氧化量非常微小,往往忽略不计,而根系呼吸量对所有植被而言平均约为24%<sup>[19]</sup>,土壤微生物呼吸是土壤有机碳输出的主要形式,是土壤碳素同化异化平衡作用的结果,表现为土壤与大气二氧化碳的交换。有研究表明<sup>[20]</sup>在湿润的生态系统或有干湿交替的生态系统中比较湿润的季节,降水事件对土壤呼吸可能会产生比较明显的抑制现象。

由图3可知,在3种修复模式中,刈割/翻耕模式下土壤可培养微生物菌落数最多( $4.12 \times 10^6 \cdot \text{g}^{-1} \text{土}$ ),转化酶活性最高( $0.24 \text{ mL } 0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot \text{g}^{-1}$ ),土壤微生物呼吸强度最强( $0.18 \text{ mg CO}_2 \cdot (\text{g} \text{土} \cdot \text{h})^{-1}$ )。其中土壤微生物呼吸强度差异显著( $P<0.05$ )。这是由于刈割/翻耕模式下根茬翻入土壤,总有机碳的返还量高,透气性好,适合细菌的生长繁殖,微生物量较大使得其土壤微生物呼吸强度显著高于模式Ⅰ和模式Ⅱ。采用刈割/翻耕/水位调节模式的土壤由于滞水时间较长,透气性较差,可培养微生物菌落数量相对较少,转化酶活性和土壤呼吸强度也较弱。而采用刈割/生物替代模式下的土壤由于也受到人工种植等人为扰动的影响,可培养微生物菌落数、转化酶活性和土壤呼吸强度都要比对照高;但由于其土壤未经翻耕而较密实,其土壤生物活性较刈割/翻耕模式低;同时由于其未受水淹,所以其土壤转化酶活性和呼吸强度较刈



A: 土壤中可培养微生物菌落总数; B: 土壤转化酶活性; C: 土壤呼吸强度;

图3 修复模式对土壤微生物活性的影响

Figure 3 Microbial activities under different physical controls

割/翻耕/水位调节模式高。总体而言,相比于对照样地,3 种修复模式下的微生物活性均较对照高,但水淹对维持土壤较低的微生物活性有较显著作用。

由于各类微生物(如细菌和古细菌)的 16S rDNA 基因序列中可变区的碱基顺序有很大的差异,所以土壤中不同微生物的 16S rDNA 基因 V3 区的扩增 DNA 片断在 DGGE 中能够得到分离,根据电泳条带的多寡和条带的位置,可以初步辨别出样品中微生物的种类多少,粗略分析土壤样品中微生物的多样性。

图 4 是几种修复模式作用下土壤微生物的 16S rDNA 的 PCR-DGGE 结果。由图 4 可见,不同模式修复前后的土壤既有共同的优势种群也有各自特有的种群,而各自特有的微生物群落则是由于工程措施导致的土壤质地和植物结构的不同造成的。计算图 4 各修复模式中指纹图谱的香农指数可知,在对照模式下的香农指数最大,表明微生物多样性最多(表 1)。修复模式作用下微生物的多样性指数明显低于对照,这也从一个侧面反映了修复以后的湿地土壤比较适合微生物生长,从而导致某些生长较快的微生物种类大量繁殖,从而竞争性地抑制了其他生长缓慢的微生物,造成微生物种群的减少。

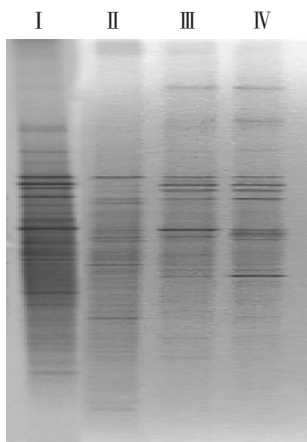


图 4 PCR-DGGE 指纹图谱

Figure 4 PCR-DGGE fingerprinting

上述结果表明各种修复模式作用一年后土壤的微生物活性均较对照有所提高,从而增加土壤总有机碳的输出,不利于土壤有机碳的保留,因此修复后土壤有机碳的提高主要是由于人为的工程措施一次性增加了土壤总有机碳的输入量所导致的。但就几种修复模式的相对比较而言,刈割/翻耕/水位调节模式作用后土壤的微生物活性相对较低,其土壤中残留的有机碳也相对较高。

表 1 DGGE 指纹图谱分析

Table 1 Analysis on DGGE fingerprinting

| 修复模式 | DGGE 条带数 | Shannon 指数 |
|------|----------|------------|
| I    | 36       | 3.12       |
| II   | 34       | 1.49       |
| III  | 27       | 1.25       |
| IV   | 26       | 1.20       |

### 3 结论

本研究结果表明,4 种模式下土壤总有机碳含量差异显著,其中经刈割/翻耕/水位调节模式处理后的湿地土壤总有机碳含量相对较高,而可培养微生物菌落数、碳代谢相关酶(转化酶)活性和土壤微生物呼吸强度相对较低,这表明通过刈割/翻耕/水位调节模式修复的湿地土壤微生物活性相对较低,对有机碳的分解能力较弱,因而相对其他控制措施而言,其更有利于湿地土壤碳的保留。

从对互花米草的治理和土壤有机碳保留能力两方面考虑,刈割/翻耕/水位调节模式是一种较合适的控制技术。

从研究结果同时发现,经过人为的工程措施后,土壤的环境得到改变,有利于微生物的生长代谢,使某些生长快速的微生物得以大量繁殖,提高了优势种微生物活性而降低了土壤微生物的多样性,强化了修复后土壤的碳代谢能力。修复后的湿地土壤有机碳含量和微生物活性同时增强,随着时间的推移,修复后的土壤可能会趋于稳定,土壤的微生物活性和碳代谢能力也可能会持续下降,对照样地和修复样地土壤总有机碳保留能力的比较有待进一步跟踪与考察。

### 参考文献:

- [1] Edward B B, Mike A, Duncan K. Economic valuation of wetlands[M]. Ramsar Convention Bureau Gland, Switzerland, 1997:2-3.
- [2] 路 峰, 毕作林, 谭学界. 黄河三角洲芦苇湿地恢复评价[J]. 山东林业科技, 2007(2):52-54.
- LU Feng, BI Zuo-lin, TAN Xue-jie. Evaluation of restoration on wetland with *phragmites communis* in the Yellow River Delta[J]. *Shandong Forestry Science and Technology*, 2007(2):52-54.
- [3] 熊 鹰, 王克林, 蓝万炼, 等. 洞庭湖区湿地恢复的生态补偿效应评估[J]. 地理学报, 2004, 59(5):772-780.
- XIONG ying, WANG Ke-lin, LAN Wan-lian, et al. Evaluation of ecological compensation on wetland restoration in Dongting Lake Area[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(5):772-780.
- [4] 陈玉军, 郑松发, 廖宝文, 等. 珠海市淇澳岛红树林引种扩种问题的

- 探讨[J]. 广东林业科技, 2002, 18(2):31-36.
- CHEN Yu-jun, ZHENG Song-fa, LIAO Bao-wen, et al. A study on mangrove introduction and expanding cultivation in Qiao Island, Zhuhai City[J]. *Forestry Science and Technology of Guangdong Province*, 2002, 18(2):31-36.
- [5] Jackson J B C, Kirby M X, Berger W H, et al. Historical over fishing and the recent collapse of coastal ecosystems[J]. *Science*, 2001, 293:629-637.
- [6] Simenstad C, Thom R M. *Spartina alterniflora* (Smooth Cordgrass) as an invasive halophyte in Pacific Northwest Estuaries[J]. *Hortus Northwest*, 1995(6):9-12, 38-40.
- [7] Callaway J C, Josselyn M N. The introduction and spread of smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) in South San Francisco Bay[J]. *Estuaries*, 1992, 15(2):218-226.
- [8] Daehler C C, Strong D R. Status, Prediction and prevention of introduced cordgrass *Spartina* spp. invasions in pacific estuaries, USA [J]. *Biological Conservation*, 1996, 78:51-58.
- [9] 陈慧丽, 李玉娟, 李 博, 等. 外来植物入侵对土壤生物多样性和生态系统过程的影响[J]. 生物多样性, 2005, 13(6):555-565.
- CHEN Hui-li, LI Yu-juan, LI Bo, et al. Impacts of exotic plant invasions on soil biodiversity and ecosystem processes[J]. *Biodiversity Science*, 2005, 13(6):555-565.
- [10] 田应兵. 湿地土壤碳循环研究进展[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2005, 2(8):1-4.
- TIAN Ying-bing. Research advances on carbon Cycle on Wetland Soil [J]. *Journal of Yangtze University(Nat Sci Edit)*, 2005, 2(8):1-4.
- [11] Smish C J, Delaune R D, Patrick W H J. Carbon dioxide emission and carbon accumulation in coastal wetlands[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1983, 17(1):21-29.
- [12] 赵广琦, 李贺鹏. 上海地区外来植物互花米草的入侵现状与治理探讨[J]. 园林科技, 2008(1):37-42.
- ZHAO Guang-qi, LI He-peng. A study on invasion status and controlling technology of alien *Spartina alterniflora* in Shanghai[J]. *Landscape Architecture Science Technology*, 2008(1):37-42.
- [13] 李贺鹏, 张利权. 外来植物互花米草的物理控制实验研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2007(6):44-55.
- LI He-peng, ZHANG Li-quan. Experimental study on physical controls of an exotic plant *Spartina alterniflora* in Shanghai [J]. *Journal of East China Normal University(Natural Science)*, 2007(6):44-55.
- [14] Spartina T F. Spartina management program; integrated weed management for private lands in willapa Bay[R]. Washington, 1994:47-67.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985:40-67.
- Department of Microbiological, Institute of Soil Science, the Chinese Academy of Sciences. Soil microbiological method[M]. Beijing: Science Press, 1985:40-67.
- [16] (苏)Ф.Х.哈兹耶夫著. 郑洪元等译. 土壤酶活性[M]. 北京: 科学出版社, 1980:49-55.
- [17] Mullen R W, Thomason W E, et al. Estimated increase in atmospheric carbon dioxide due to worldwide decrease in soil organic matter[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1999, 30(11-12):1713-1719.
- [18] Groffman P M, McDowell W H, Myersc J C, et al. Soil microbial biomass and activity in tropical riparian forests[J]. *Soil Biol & Biochem*, 2001, 33:1339-1348.
- [19] 杨 昕, 王明星. 陆面碳循环研究中若干问题的评述[J]. 地球科学进展, 2001, 16(3):427-435.
- YANG Xin, WANG Ming-xing. Review on the problem in terrestrial carbon cycle[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(3):427-435.
- [20] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. 生态学报, 2003, 23(5):972-978.
- CHEN Quan-Sheng, LI Ling-Hao, HAN Xing-Guo, et al. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5):972-978.