

典型气候/环境因子变化对九段沙湿地碳固定潜力的影响

唐玉姝^{1,2}, 王磊^{1*}, 席雪飞¹, 胡煜¹, 张艳楠¹, 陈金海¹, 陈秀芝³, 孙瑛³

(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. 上海市农业科技服务中心, 上海市科技兴农重点攻关项目管理办公室, 上海 200335; 3. 上海市九段沙湿地自然保护区管理署, 上海 200135)

摘要: 利用人工气候室模拟长江口区域几种典型气候/环境因子的变化特征(全球变暖、CO₂ 增加和海水无机氮污染加剧等), 并从植物生长量和土壤呼吸角度综合分析了这些气候/环境因素的变化对九段沙湿地土壤有机碳汇聚能力的影响。初步结果表明, 在实验范围内, 与对照相比, 单方面的温度升高、无机氮污染加剧和 CO₂ 浓度升高会提高九段沙土壤的有机碳汇聚能力。无机氮污染加剧协同升温对土壤呼吸有一定的消减作用, 从而提高了土壤有机碳汇聚能力; 无机氮污染加剧协同 CO₂ 浓度升高会促使土壤有机碳的排放, 使其碳汇聚能力下降; CO₂ 浓度升高和全球升温的共同作用不会显著降低有机碳汇聚能力; 无机氮污染加剧和 CO₂ 浓度升高的基础上加入升温的三因素交互作用会促进土壤有机碳的排放, 使其碳汇聚能力下降。因此, 要尽力避免海水中无机氮污染加剧和 CO₂ 浓度升高两个因素, 以及在此基础上升温情况的同时发生。

关键词: 全球变化; 河口湿地; 碳循环; 人工气候室

中图分类号: X16 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)04-0874-07 doi:10.11654/jaes.2013.04.031

Effects of Changes of Typical Climate/Environmental Factors on Soil Carbon Sequestration Potential in Jiuduansha Wetland, China

TANG Yu-shu^{1,2}, WANG Lei^{1*}, XI Xue-fei¹, HU Yu¹, ZHANG Yan-nan¹, CHEN Jin-hai¹, CHEN Xiu-zhi³, SUN Ying³

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Science and Technology Key Project Management Office, Shanghai Agricultural Science and Technology Service Center, Shanghai 200335, China; 3. Shanghai Jiuduansha Wetland Nature Reserve Administration, Shanghai 200135, China)

Abstract: The organic carbon reservation capability in soil has great significance on reduction of the greenhouse gases release and relief of global warming. With the further global climate warming, it has gradually attracted more and more attentions on the research of the soil respiration and carbon sequestration in coastal salt marsh. Jiuduansha wetland with many important ecological functions is the most impermanent original ecological coast salt marsh ecosystem in the Yangtze River estuary, and its carbon sequestration function is of great significance to the balance of carbon emissions in Shanghai. In this study, the possible effects of the changes of some typical climate/environment factors such as warming, atmospheric CO₂ enrichment and inorganic nitrogen addition on soil carbon accumulation ability in Jiuduansha wetland were studied. The results showed that both considering of soil respiration and plant biomass, warming, atmospheric CO₂ enrichment and inorganic nitrogen addition, respectively, within certain ranges could increase the soil organic carbon accumulation ability comparing with the control. Warming combined with inorganic nitrogen addition also could enhance the soil organic carbon accumulation ability. However, atmospheric CO₂ enrichment combined with aggravated water eutrophication prompted the issue of soil organic carbon, which ultimately decreased the soil organic carbon accumulation ability. Atmospheric CO₂ enrichment combined with warming had no significantly effect on soil organic accumulation capability of Jiuduansha wetland. Warming, atmospheric CO₂ enrichment combined with inorganic nitrogen addition could prompt the issue of soil organic carbon, which ultimately decreased the soil organic carbon accumulation ability. So, the situation of warming, atmospheric CO₂ enrichment combined with inorganic nitrogen addition should be avoid as far as possible in the further for keeping organic carbon reservation capability of Jiuduansha wetland.

Keywords: global change; estuary wetland; carbon cycle; artificial climatic chamber

收稿日期: 2012-07-01

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2010BAK69B13); 上海市重大科技攻关项目(项目号: 10dz1200803); 上海市重大科技攻关项目(项目号: 10dz1200805)

作者简介: 唐玉姝(1982—), 女, 四川南充人, 博士, 农艺师, 主要研究全球变化下湿地生态功能。E-mail: tys0803@163.com

* 通信作者: 王磊 E-mail: celwang@yahoo.com

大气 CO₂ 浓度增加将引起温室效应,影响地球表面其他环境因子如温度升高、海平面上升;同时,城市工业废水和生活污水大量排入海中,使营养物质在水体中富集,导致沿海水域无机氮污染等加剧^[1]。这些气候/环境因素的变化将导致湿地水土环境质量问题,并直接或间接影响植物生长及其水分利用效率,已引起世界范围内的科学家、公众和各国政府部门的强烈关注。

三角洲地带是全球经济最发达地区,也是地球环境系统最复杂和对环境变化最敏感的地带。作为宝贵的湿地资源,其重要的生态环境功能已经逐渐引起各沿海国家的广泛关注^[2]。作为一个现代化超级大都市,上海的碳排放能力不可小觑。位于长江口的九段沙国家自然保护区,是长江口最年轻的河口沙洲。土壤发育时间仅 50 a 左右,成土过程原始。植被以芦苇(*Phragmites australis*)、海三棱藨草(*Scirpusma riquer*)和互花米草(*Spartina alterniflora*)为主,属典型盐沼生态系统。九段沙湿地是上海最重要的生态屏障,对长三角地域的微气候调节有非常重要的作用。

在大气与土壤界面,土壤 CO₂ 释放的驱动因子是多种多样的,在全球环境变化条件下研究相关气候与环境因子对滩涂湿地土壤呼吸和植被生物量的影响是全球变化研究的一个重要内容。模拟单一或多个环境因子变化对生态系统的影响,是目前用以探究全球变化对生态系统影响的常用方法。本研究将系统模拟长江口区域气候/环境指标变化特征(全球变暖、CO₂ 增加和无机氮污染加剧等),并从植物生长量和土壤呼吸角度综合分析这些典型气候/环境因素的变化对九段沙湿地土壤有机碳汇聚能力的影响,以期预测全球环境变化背景下九段沙湿地未来有机碳汇聚能力的可能变化趋势奠定基础,并为采取必要的预防和应对措施提供决策参考。

1 材料和方法

1.1 试验设计

应用 Design expert 6.0.5 设计 3 因素 2 水平试验如表 1。根据该设计,在室内控制条件下进行模拟九段沙生态系统试验。各设一个施氮、增温和 CO₂ 倍增 3 种单因素处理,其中增施氮为水体无机氮污染加剧因子、增温为全球变暖因子,CO₂ 倍增为全球变化因子。同时,设置对照,增温和施氮、增温和 CO₂ 倍增、施氮和 CO₂ 倍增 3 种两因子共同作用处理,以及施氮、增温和 CO₂ 倍增 3 种因子共同作用处理。

表 1 试验设计
Table 1 Experiment design

处理	无机氮(N)	温度(T)	CO ₂
1(CK)	-	-	-
2(N+)	+	-	-
3(T+)	-	+	-
4(N+, T+)	+	+	-
5(CO ₂ +)	-	-	+
6(CO ₂ +, N+)	+	-	+
7(CO ₂ +, T+)	-	+	+
8(CO ₂ +, N+, T+)	+	+	+

注:表中“+”代表未来水平;“-”代表现今水平;N+:0.844 mg·L⁻¹, N-:0.404 mg·L⁻¹;CO₂+:700±100 mg·L⁻¹, CO₂-:350±100 mg·L⁻¹;T+和 T-参照表 2。

采用两台宁波海曙赛福仪器厂生成的 PRX-1000C 智能人工气候箱对温度、湿度、光照、昼夜时间及 CO₂ 浓度等环境条件进行试验控制。

在每个小格中放入一个 PVC 箱(48 cm×48 cm×30 cm),其隔板上有渗水孔 25 个(直径 2 cm),侧面有通气孔和排水孔各 1 个(直径 3 cm),如图 1 所示。于 2009 年 10 月 18—19 日,沿下沙潮沟选取有代表性的不同植被类型湿地采集土样(图 2)。光滩 S1(5 袋)、海三棱藨草区 S2(5 袋)、海三棱藨草带/互花米草区 S3(4 袋)、互花米草 S4(1 袋)和芦苇区 S5(2 袋半),共约 1 t;同时采集成熟的海三棱藨草种子。在每个箱中分别装入近 100 kg 混合均匀的土壤,并在隔板上层铺设砂石混合物 1 cm。

虽然芦苇、互花米草和海三棱藨草都是湿地生态系统的典型植被,但由于海三棱藨草是我国特有种,既能适应潮水的淹没,又能适应退潮后太阳的暴晒,还能耐受一定的土壤盐度,在土壤盐度 0~0.4%中生长良好,且在九段沙分布面积最大,可视为九段沙的

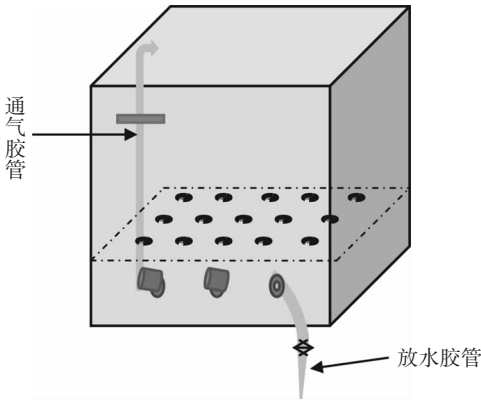


图 1 PVC 箱示意图
Figure 1 PVC experiment box

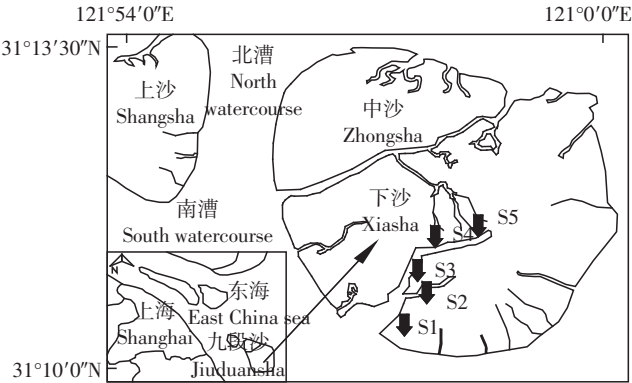


图 2 九段沙样区分布图

Figure 2 Map of sampling stations in Jiuduansha wetland

代表植被。故于 2010 年 4 月在人工气候室每个 PVC 箱内均匀播入海三棱藨草种子 50 颗。

在微宇宙试验中的海水采用养海水鱼用人工海水盐和自来水配置。经测定九段沙野外现场下沙海水 pH 为 7.78, 含盐量为 $3.40\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 无机氮的含量为 $0.401\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。人工海水配方: 15 L 自来水加入 65 g 海水盐。经测定 pH 为 7.61, 含盐量为 $3.33\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 无机氮含量为 $0.404\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。经方差检验 Duncan 多重比较, 实际海水和配置海水两者并无显著性差异 ($P>0.05$)。

为模拟氮污染加剧情况, 需往海水中加入无机氮。根据 $5\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 的标准^[3], 配置 N+(无机氮污染高水平)海水时往 15 L 人工配置海水中(无机氮污染低水平)加入硝酸钠 7.9 g 和氯化铵 5.0 g 作污染源。经测定此时海水中无机氮的含量为 $0.844\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.2 运行设置

根据九段沙现状和 IPCC 报告^[4], 分别对两台人工气候室(Ⅰ和Ⅱ)中温度、湿度和昼夜时间进行设定。从 2010 年 4 月正式开始运行, 共两个周期, 且每个周期分为春夏两个阶段, 各阶段持续 3 个月。详细运行参数见表 2。

表 2 人工气候室运行参数

Table 2 Operation parameter in artificial climatic chamber

项目		春季		夏季	
		昼 12 h	夜 12 h	昼 12 h	夜 12 h
气候室Ⅰ	温度/℃	17(T-)	12(T-)	25(T-)	20(T-)
	湿度/%RH	80	85	80	85
气候室Ⅱ	温度/℃	21(T+)	16(T+)	29(T+)	24(T+)
	湿度/%RH	80	85	80	85

注: 第一周期 CO₂+ : 浓度 $350\pm100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 第二周期 CO₂- : 浓度 $700\pm100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

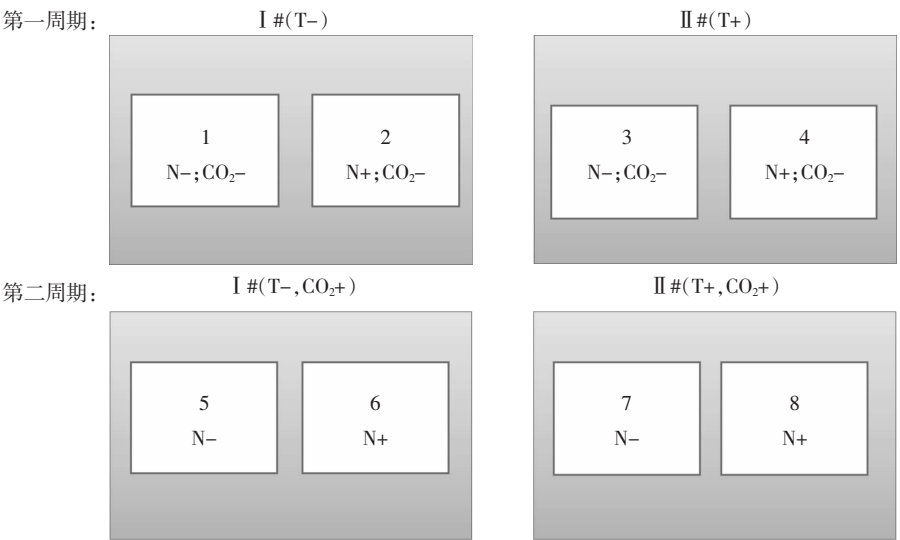
结合人工气候室运行和试验设计结果, 对 4 个 PVC 箱进行试验内容安排。结果如图 3 所示。

1.3 样品采集

分别于两个周期的春、夏两季结束时采样对每个处理进行昼夜土壤呼吸的测定。同时在每个周期结束时, 采集植株测定生物量。

1.4 实验方法

土壤呼吸: 采用 LI-8100 土壤碳通量自动测量系统(Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA), 于采样期间对每个处理进行土壤呼吸的测定。昼夜各测定 1 组数据,



图中 N 代表海水中无机氮; T 代表温度; + 代表因素高水平处理; - 代表因素低水平处理

图 3 PVC 箱实验内容

Figure 3 Operation parameter in PVC experiment box

并保持土壤环在整个测定期间位置不变。

植被生物量:每个样区按固定面积各采集5株海三棱藨草,收获地上和地下部分植株,于105℃烘箱中至恒重,称量确定其生物量(精确到0.1g)

1.5 数据处理

采用SPSS 16.0统计软件对所测数据进行单因素方差分析(ANOVA)和相关性分析,Duncan多重比较($P=0.05$ 或 0.01)分析各指标的显著差异。

2 结果与讨论

2.1 单因子变化对九段沙湿地土壤有机碳汇聚能力的影响

野外自然条件下,很难研究单一因素对土壤碳汇能力的影响,故采用室内模拟的方法研究了单一环境因子变化的条件下对土壤碳汇能力的影响。

由于城市工业废水和生活污水不断排放入海,使营养物质如氮素等在海水中富集,造成附近海域无机氮污染加剧^[9]。这会导致滨海湿地土壤中氮含量的增加,对土壤呼吸造成直接或间接的影响。选取1#箱(CK)和2#箱(单因素N高水平)作为研究对象。1#箱和2#箱土壤呼吸均值分别为 1.41 、 $1.31 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,运用方差分析和Duncan法进行多重组分检验,两者之间并不具有显著性差异($P>0.05$)(图4),说明SMR并没有在海水中无机氮增加的情况下显著增强。这与珊丹等^[6]研究在控制性施氮条件下荒漠草原土壤呼吸并没有显著增加的结论相似,原因可能是由于氮元素与碳的亲合性降低了碳元素的可利用性,进而对微生物的代谢活动产生阻碍,减缓了 CO_2 的排放。一般认为氮对土壤呼吸的影响可分为两个方面,

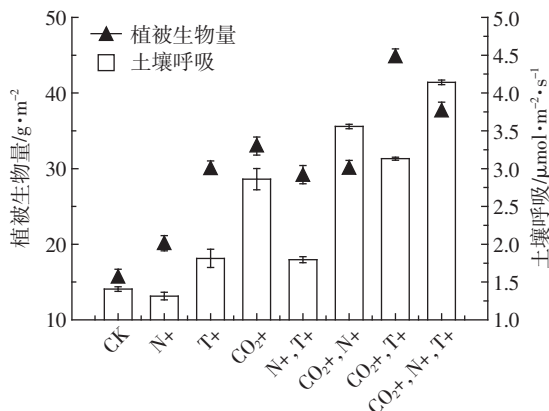


图4 典型气候/环境因子变化对九段沙湿地土壤有机碳汇聚能力的影响

Figure 4 The effect of typical climate/environmental factors on soil organic carbon accumulation ability

一方面是氮的增加会改变土壤矿化速率而影响土壤 CO_2 的释放,另一方面是氮的输入可能改变了植物在生长过程中不同营养器官的C/N比,进而改变了其归还到土壤中的碎屑的C/N比。有研究表明,短期氮输入对土壤呼吸速率无影响,但长期的氮增加则会降低土壤呼吸速率^[7]。

地球表面温度升高是未来气候变化的主要趋势之一,IPCC^[4]第4次评估报告中预测,从现在开始到2100年,全球平均气温将升高 $1.8\sim 4.0^\circ\text{C}$ 。全球碳循环重要环节之一的土壤呼吸对温度变化非常敏感,土壤呼吸对温度变化的响应已成为生态学研究的一个重要内容。选取1#箱(CK)和3#箱(单因素T高水平)作为研究对象。1#箱和3#箱土壤呼吸均值分别为 1.41 、 $1.81 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,运用方差分析和Duncan法进行多重组分检验,3#箱土壤呼吸显著高于1#箱($P<0.05$)(图4),说明土壤呼吸在温度增加的情况下显著增强。近十几年来,模拟土壤呼吸对气候变暖的响应的实验结果大都表明,在一定范围内,土壤的呼吸速率通常随着温度的增加而升高^[8],且呈指数增长。这即是碳循环与全球变暖之间的一个正反馈效应。Kang等^[8]研究了土壤微环境条件下气候变化对土壤呼吸的影响,发现气候变暖可以持续地增加土壤呼吸速率。但随着温度的升高或增温时间的延长,土壤呼吸速率的增长幅度往往下降甚至停止,其对温度变化的敏感程度降低,表现出所谓的温度适应性。有研究表明^[9],在温度升高的初期,土壤微生物呼吸因为温度升高的刺激而耗竭大量活性较大的碳,一旦土壤中这些易于分解的活性较大的碳被分解掉,随着温度的进一步升高或升温时间的延长,土壤微生物获取基质困难,就可能出现土壤呼吸对温度升高响应迟钝的情况。因此,温度对土壤呼吸的长期效应还有待进一步验证。

CO_2 浓度升高所引起的温室效应,会影响地球表面其他环境因子并直接或间接影响植物生长及其水分利用效率,给全球生态环境和气候变迁带来深刻的变化。据模型预测^[4],到本世纪末,大气 CO_2 浓度将达到 $700 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。截止目前,针对大气 CO_2 浓度升高条件下的土壤呼吸研究已有约40年的历史,随着高 CO_2 环境试验技术的逐步成熟和陆地碳循环研究成为全球热点之一,针对土壤呼吸及其相关研究也逐渐增多。选取1#箱(CK)和5#箱(单因素 CO_2 高水平)作为研究对象。1#箱和5#箱土壤呼吸均值分别为 1.41 、 $2.86 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,运用方差分析和Duncan法进

行多重组分检验,5#箱土壤呼吸极显著高于1#箱($P<0.01$)(图4),说明土壤呼吸在 CO_2 浓度升高的情况下显著增强。这与以前的许多研究结果相符:大气 CO_2 浓度升高促进了土壤呼吸。这可能是由于大气 CO_2 浓度升高,促使植物光合产物更多地流向根系,致使根系分泌物增加、地上和地下部分凋落物增加,土壤微生物活性增强,从而导致土壤呼吸增加。Williams等^[10]发现 CO_2 浓度升高时,0~15 cm的土层微生物活性显著增加。Niklus^[11]在研究了 $600\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 高浓度 CO_2 处理了3年的石灰质土壤草地土壤微生物呼吸后发现其显著增加。此外,大气 CO_2 浓度升高条件下根际微生物呼吸增加29%。

随着环境因子的变化,植被生物量也有不同程度的增长。与对照植被生物量($15.99\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)相比,单因素N高水平($20.14\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)、单因素T高水平($30.21\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)和单因素 CO_2 高水平($32.99\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)有显著提高(图4)。大量研究指出^[12],大气氮沉降的增加可以促进光合作用,刺激植物生长,特别是在氮限制的生态系统中,提高其初级生产力。温度也是影响植被生物量及物种组成变化的重要因素。杨永辉等^[13]在英格兰北部的Moor House自然保护区利用海拔高度不同造成的温差模拟全球变暖对植物群落结构和生物量的影响发现,温度的上升会导致植被生物量的增长。不同光合途径的植物生物量随 CO_2 浓度的升高均有所提高。Poorter^[14]认为:C3植物的生物量将平均提高41%;C4植物22%,CAM植物15%。因而,植物生物量随地球 CO_2 浓度升高而发生的改变,将对陆地净第一性生产力和全球的碳循环有重大的影响。

土壤中汇聚的有机碳由两方面决定,即输出(土壤呼吸)和输入(植被生物量)。因此,土壤呼吸与植被生物量的比例大小可以粗略代表该土壤有机碳的净汇聚能力,该值越小,土壤的有机碳汇聚能力越强^[15]。本研究中,土壤呼吸/植被生物量之比:单因素T高水平(0.060)<单因素N高水平(0.065)<单因素 CO_2 高水平(0.087)<CK(0.088)。由此可见,每种单因素高水平处理都低于CK,说明在本试验条件下,单方面的温度升高、污染加剧和 CO_2 浓度升高会提高土壤的有机碳汇聚能力,并且单因素T高水平相较于其他几种单因素处理,具有最高的土壤有机碳汇聚能力。这可能是由于温度的升高,一方面提高了有机碳分解的速率,增加了土壤有机碳的释放量,另一方面也提高了植被的生物量,增加了植被残体向土壤的归还量。已有研究表明^[16],植物净初级生产力NPP和土壤有机碳分解

二者对温度的相对敏感性将在很大程度上决定全球变暖下土壤有机碳对大气 CO_2 的源/汇作用。在本研究的条件范围内,升温导致植被生物量提高的比例大于有机碳分解的比例,因此土壤表现为有机碳的汇聚作用。

2.2 两种环境因素交互作用对九段沙湿地土壤碳汇能力的影响

前面研究了单一环境因子改变时(海水中无机氮污染加剧、全球变暖和 CO_2 浓度升高)对土壤呼吸的影响。然而,在野外自然条件下,大都不仅仅是单因子发生变化,而是两个因子或者两个以上的因子同时发生改变。为了使研究更接近于自然状况,本节分别研究了两两因子同时发生改变时土壤微生物呼吸的变化情况,并分析了其交互效应及其机理,以期为了了解湿地土壤呼吸对环境变化的实际响应提供有益的参考。

选取1#箱(CK)、2#箱(单因素N高水平)、3#箱(单因素T高水平)、和4#箱(双因素N和T高水平),研究海水中无机氮污染加剧和全球变暖交互作用对土壤呼吸的影响。4个箱子的土壤呼吸均值为 1.41 、 1.31 、 1.81 、 $1.79\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。应用Duncan多重比较,发现双因素N和T高水平处理的土壤呼吸极显著高于对照和高N,但略低于高T处理(图4)。由前面结果可知,温度可以促进SMR,但是过量的无机氮反而会抑制SMR的强度,升温和海水中无机氮同时作用时,可视为高N部分抵消了高T对土壤呼吸的促进作用,使土壤呼吸相较于单因素变化时有了一定的减少。这个结果与珊丹等^[6]研究在控制性增温和施氮条件下荒漠草原土壤呼吸变化相似。与对照植被生物量($15.99\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)相比,单因素N高水平($20.14\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)、单因素T高水平($30.21\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)和双因素N和T高水平($29.21\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)有显著提高。说明同时施N和增温对植物量生长有明显的促进作用。在本研究中,土壤呼吸/植被生物量之比:单因素T高水平(0.060)<双因素N和T高水平(0.061)<单因素N高水平(0.065)<CK(0.088)。说明在本实验范围内无机氮污染加剧和全球升温的消减效应会使土壤有机碳汇聚能力较单因素氮高水平有一定提高。

选取1#箱(CK)、2#箱(单因素N高水平)、5#箱(单因素 CO_2 高水平)和6#箱(双因素N和 CO_2 高水平),研究海水中无机氮污染加剧和 CO_2 浓度升高交互作用对土壤呼吸的影响。4个箱子的土壤呼吸均值分别为 1.41 、 1.31 、 2.86 、 $3.56\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。应用

Duncan 多重比较, 双因素 N 和 CO₂ 高水平处理的土壤呼吸高于 CK 和单因素 N 高水平, 略低于两种单因素处理下的平均土壤呼吸之和 ($P < 0.05$) (图 4)。这说明在本实验范围内, CO₂ 浓度升高和施氮的互作效应使土壤呼吸明显提高。这两种单一因子对土壤呼吸的影响程度存在一定差异, 添加氮素对土壤呼吸有所抑制, 而 CO₂ 浓度的升高则会大大促进土壤呼吸, 但两者的互作最终使得土壤呼吸相较于单因素变化时有明显的增加。与对照植被生物量 ($15.99 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) 相比, 单因素 N 高水平 ($20.14 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) 有了一定增长, 单因素 CO₂ 高水平 ($32.99 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) 的生物量最大, 双因素 N 和 CO₂ 高水平 ($30.38 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) 的植被量也有显著提高, 但低于单因素 CO₂ 高水平。本研究中, 土壤呼吸/植被生物量之比: 单因素 N 高水平 (0.065) < 单因素 CO₂ 高水平 (0.087) < CK (0.088) < 双因素 N 和 CO₂ 高水平 (0.117)。说明无机氮污染加剧与 CO₂ 浓度升高交互作用较单因素 N 及 CO₂ 高水平会促使土壤有机碳的排放, 使其碳汇聚能力下降。所以, 要尽力避免海水中无机氮污染加剧和 CO₂ 浓度升高两个因素同时出现的情况发生。

选取 1# 箱 (CK)、3# 箱 (单因素 T 高水平)、5# 箱 (单因素 CO₂ 高水平) 和 7# 箱 (双因素 CO₂ 和 T 高水平), 研究 CO₂ 浓度升高和全球变暖交互作用对土壤呼吸的影响。4 个箱子的土壤呼吸均值分别为 1.41、1.81、2.86、3.13 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。应用 Duncan 多重比较, 双因素 CO₂ 和 T 高水平处理显著高于 CK 和单因素 T 高水平, 略高于单因素 CO₂ 高水平 ($P < 0.05$) (图 4)。CO₂ 浓度升高与温度升高共同作用下平均土壤呼吸低于两种单因素处理下的平均 SMR 之和, 但均高于每个单因素的土壤呼吸值, 表明仍有一定促进作用。即在本实验范围内, CO₂ 浓度升高和升温的互作效应使土壤呼吸有一定提高。前面研究表明, 这两种单一因子对土壤呼吸的影响均为促进作用, 两者共同作用最终使得土壤呼吸相较于单因素变化时有了一定程度的增加。与对照植被生物量 ($15.99 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) 相比, 单因素 T 高水平 ($30.21 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) 和单因素 CO₂ 高水平 ($32.99 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) 有了一定增长, 双因素 CO₂ 和 T 高水平 ($45.14 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) 的植被量则最高。说明同时升温和提高 CO₂ 浓度使植被植物量有了显著增长。升高 CO₂ 浓度和温度通过对植物光合作用和其他生理代谢的作用而影响到植被生长和生产力, 并取决于植被本身结构和物种特征及其他环境因素。本研究中, 土壤呼吸/植被生物量之比: 单因素 T 高水平 (0.060) < 双因素 CO₂

和 T 高水平 (0.070) < 单因素 CO₂ 高水平 (0.087) < CK (0.088), 说明 CO₂ 浓度升高和全球升温的共同作用不会显著降低有机碳汇聚能力。

2.3 3 种环境因素交互作用对九段沙湿地土壤碳汇能力的影响

在全球环境变化的大背景下, 未来九段沙湿地土壤可能会受到大气 CO₂ 浓度升高、全球变暖和海水无机氮污染加剧 3 种因素的共同作用。故三种环境因素同时出现的情况虽然较为复杂, 但更接近真实的环境状况。根据上面的分析发现, 无机氮污染加剧和 CO₂ 浓度升高交互作用会显著促使土壤有机碳的排放, 使其碳汇聚能力下降。因此, 在此基础上进行了无机氮污染加剧和 CO₂ 浓度升高再加入及温度升高的三因素交互作用对九段沙湿地土壤碳汇能力的影响分析。

选取 1# 箱 (CK)、3# 箱 (单因素 T 高水平)、6# 箱 (双因素 N 和 CO₂ 高水平) 和 8# 箱 (三因素 T、N 和 CO₂ 高水平), 研究海水中无机氮污染加剧和 CO₂ 浓度升高的基础上加入升温的三因素交互作用对土壤呼吸的影响。四个箱子的土壤呼吸均值分别为 1.41、1.81、3.56、4.14 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。应用 Duncan 多重比较, 三因素高水平处理的土壤呼吸极显著高于 CK ($P < 0.05$) (图 4)。三因素高水平共同作用下平均土壤呼吸略低于双因素 N 和 CO₂ 高水平及单因素 T 高水平处理下的平均土壤呼吸之和, 但均显著高于每个处理的土壤呼吸值, 仍有较显著促进作用。即在本实验范围内, 海水中无机氮污染加剧和 CO₂ 浓度升高的基础上加入升温的互作效应使土壤呼吸明显提高。与对照植被生物量 ($15.99 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) 相比, 三因素高水平处理 ($37.98 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) 极显著的高于对照, 说明水中无机氮污染加剧和 CO₂ 浓度升高的基础上加入升温的互作效应使植被量也有显著增长。

本研究中, 土壤呼吸/植被生物量之比: 单因素 T 高水平 (0.060) < CK (0.088) < 三因素 T、N 和 CO₂ 高水平 (0.109) < 双因素 N 和 CO₂ 高水平 (0.117)。说明无机氮污染加剧和 CO₂ 浓度升高的基础上加入升温的三因素交互作用会促进土壤有机碳的排放, 使其碳汇聚能力下降, 但仍然低于水中无机氮污染加剧和 CO₂ 浓度升高的双因素作用对土壤有机碳排放的促进。这可能是由于加入升温因素后导致土壤呼吸和植被生物量都有所增长, 但最终升温导致植被生物量提高的比例大于有机碳分解的比例, 从而缓解了土壤有机碳的排放。这与前面单因素 T 高水平对土壤碳汇能力的影响结果是一致的。

3 结论

(1)在本实验范围内,综合考虑土壤呼吸和植被生物量的变化情况后发现,单方面的温度升高、无机氮污染加剧和 CO_2 浓度升高会提高土壤的有机碳汇聚能力,并且单因素 T 高水平相较于其他几种单因素处理,具有最高的土壤有机碳汇聚能力。

(2)在本实验范围内:无机氮污染加剧和全球升温的消减效应会使土壤有机碳汇聚能力有一定提高;无机氮污染加剧与 CO_2 浓度升高交互作用会促使土壤有机碳的排放,使其碳汇聚能力下降; CO_2 浓度升高和全球升温的共同作用不会显著降低有机碳汇聚能力。

(3)无机氮污染加剧和 CO_2 浓度升高的基础上加入升温的三因素交互作用会促使土壤有机碳的排放,使其碳汇聚能力下降。因此,要尽力避免海水中无机氮污染加剧和 CO_2 浓度升高两个因素、以及在此基础上升温的情况同时发生。

(4)上述结论都是根据实验室中半年的运行结果得出的,与实际情况肯定存在较大的偏差。要阐明全球环境变化背景下九段沙湿地未来有机碳汇聚能力的可能变化趋势,还需要进行大量的、长时间的研究。

参考文献:

- [1] 席雪飞. 环境变化对九段沙湿地土壤微生物呼吸影响的模拟研究[D]. 上海:同济大学, 2011.
XI Xue-fei. Simulation studies in the effects of enviromental change on soil microbial respiration in the Jiuduansha Wetland[D]. Shanghai: Tongji University, 2011.
- [2] 樊勇. 潜堤在保滩促淤工程中的应用研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2008.
FAN Yong. Investigation on the application of submerged dyke in project of bench rotection and siltation promotion[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.
- [3] 赵光影, 刘景双, 王洋, 等. 大气 CO_2 浓度升高和氮肥施用对三江平原湿地小叶章生物量及根冠比的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(1): 38-41.
ZHAO Guang-ying, LIU Jing-shuang, WANG Yang, et al. Effects of elevated CO_2 concentration and application of N fertilizer on biomass and root/shoot ratio of *calamagrostis angustifolia* in typical wetland of Sanjiang plain[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, 25(1): 38-41.
- [4] IPCC. Climate Change[R]. Cambridge University Press, 2007.

- [5] 黄小平, 黄良民, 谭烨辉, 等. 近海赤潮发生于环境条件之间的关系[J]. 海洋环境科学, 2002, 21(4): 63-69.
HUANG Xiao-ping, HUANG Liang-min, TAN Ye-hui, et al. Relationship between red tide and environment conditions in coastal waters[J]. *Biomedical and Environmental Sciences*, 2002, 21(4): 63-69.
- [6] 珊丹. 控制性增温和施氮对荒漠草原植物群落和土壤的影响[D]. 内蒙古:内蒙古农业大学, 2008.
SHAN Dan. The effects of experiment warming and nirtogen addition on plant community and soil in desert steppe[D]. Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2008.
- [7] Bowen R D, Davidon E, Savage K, et al. Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196: 43-56.
- [8] Kang S K, Don S, Lee D, et al. Topographic and climatic controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(10): 1427-1437.
- [9] Christensen T R, Johnasson S, Callaghan T V, et al. On the potential CO_2 release from tundra soils in a changing climate[J]. *Application of Soil Ecology*, 1999, 11: 127-134.
- [10] Williams M A, Rice C W, Owensby C E. Carbon dynamics and microbial activity in tallgrass prairie exposed to elevated CO_2 for 8 years[J]. *Plant and Soil*, 2000, 227: 127-137.
- [11] Niklaus P A. Effects of elevated atmospheric CO_2 on soil microbiota in calcareous grassland[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4: 451-458.
- [12] Field C B, Chapin F S, Matson P A III, et al. Responses of terrestrial ecosystems to the changing atmosphere: a resource-based approach[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1992, 23: 201-235.
- [13] 杨永辉, Harrison A F, Ineson P. 山地草原生物量的垂直变化及其与气候变暖和施肥的关系[J]. 植物生态学报, 1997, 21(3): 234-241.
YANG Yong-hui, Harrison A F, Ineson P. Biomass responses to a simulated global warming by changing of elevation and fertilizer addition in upland grassland[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, 21(3): 234-241.
- [14] Poorter H, Gifford R M, Kriedemann PE, et al. A quantitative analysis of dark respiration and carbon contents as factors in the growth response of plants to elevated CO_2 [J]. *Australian Journal of Botany*, 1992, 40: 501-513.
- [15] Tang Y S, Wang L, Jia J W, et al. Response of soil microbial community in Jiuduansha wetland to different successional stages and its implications for soil microbial respiration and carbon turnover[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43: 638-646.
- [16] 倪健, 张新时. CO_2 增浓和气候变化对陆地生态系统的影响[J]. 大自然探索, 1998, 17(1): 1-6.
NI Jian, ZHANG Xin-shi. The effect of elevated CO_2 and climate change on terrestrial ecosystem [J]. *Discovery of Nature*, 1998, 17(1): 1-6.