

外来种互花米草对盐沼土壤微生物多样性的影响 ——以江苏滨海为例

周虹霞^{1,2}, 刘金娥¹, 钦 佩^{1*}

(1. 南京大学生命科学院, 南京 210093; 2. 中国科学院昆明植物研究所, 昆明 650204)

摘要:研究了江苏滨海外来种互花米草的生长对潮间带土壤微生物特征的影响, 结果显示: 与原有光滩相比, 互花米草的大面积生长, 使当地潮间带土壤微生物量增加, 并随植被的生长状况发生变化, 潮间带土壤微生物对碳和营养物质的利用相对较少; 同时微生物生理功能群中占优势的活动组分发生了变化, 组成可能更复杂。土壤微生物群落生理功能多样性 (CLPP) 分析结果显示, 潮间带土壤微生物群落对碳源底物的利用能力不高, 所利用碳源以糖类、氨基酸类、羧酸类占优势; 其中互花米草盐沼微生物利用的碳源种类多于光滩, 并且不同季节土壤微生物群落碳源利用类型存在差异; 潮间带土壤微生物在不同的季节中其生理功能群组成发生着变化, 互花米草盐沼的土壤微生物在植被生长减弱时具有与光滩相近的代谢类群, 在生理功能上具有一定的相似性; 当植被生长旺盛时, 其代谢类群增多, 代谢强度升高, 微生物群落功能多样性增加。外来种互花米草在滨海潮间带的大面积生长, 改善了土壤理化性质, 为该处土壤微生物提供了不同的碳源, 增强了土壤微生物的活动, 改变了土壤微生物群落生理功能结构。

关键词: 外来种; 互花米草; 潮间带; 土壤微生物量; 生理功能

文章编号: 1000-0933(2005)09-2304-08 **中图分类号:** Q938, Q948 **文献标识码:** A

Effects of an alien species (*Spartina alterniflora*) on soil microorganism diversity in salt marshes, Jiangsu coastal inter-tidal ecosystem

ZHOU Hong-Xia^{1,2}, LIU Jin-E¹, QIN Pei^{1*} (1. Life Science School, Nanjing University, Nanjing 210093; 2. Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650204, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2304~2311.

Abstract: *Spartina alterniflora*, an introduced species vegetating on inter-tidal flats from the eastern coast of the United States, has become a hot topic focusing on its invasion to local species in the coastal zone of China. Impacts of *S. alterniflora* to inter-tidal soil microbiological properties and soil microbial diversity in Jiangsu coastland are discussed in the paper by the control of those living in barren tidal flats. The soil microbial biomass in inter-tidal zone increases more with the growth of *S. alterniflora* comparing with the barren tidal flats, which also indicating seasonal changes with the plant. Less carbon and nutrients are demanded to form the body of soil microorganism in *Spartina* salt marshes. The community components may be more complicated in *Spartina* salt marshes with the dominant components activities in microbial physiological function group. Analysis on functions of microbial physiological groups indicates that the carbon utilization of soil microbes is lower at inter-tidal area, which focusing on carbohydrate, amino acid and carboxyl acid as its primary carbon substances and differing with seasonal variety. The soil microbes shows some similarities in physiology with those living in mudflats when *Spartina* withers in autumn. The function diversity of microbes increases with the vegetation blooming in spring as well as contributing to larger

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2001036); 国家自然科学基金资助项目 (30470326)

收稿日期: 2004-10-19; **修订日期:** 2005-06-04

作者简介: 周虹霞 (1973~), 女, 上海人, 博士生, 主要从事植物多样性保护和入侵生态学研究. E-mail: pometia7@yahoo.com.cn

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: qinpei@nju.edu.cn

致谢: 周军、吴学军、龚津平、杨扬协助野外采样工作, 左平先生对写作给予帮助, 在此深表谢意

Foundation item: Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK2001036); National Natural Science Foundation of China (No. 30470326)

Received date: 2004-10-19; **Accepted date:** 2005-06-04

Biography: ZHOU Hong-Xia, Ph. D. candidate, mainly engaged in conservation of plant biodiversity and invasion ecology. E-mail: pometia7@yahoo.com.cn

size of microbial population, metabolic activities and composition. *S. alterniflora* has greatly ameliorated soil characteristics by providing carbon sources, increasing microbe activities and changing its physiological structure when being introduced to Jiangsu coastal inter-tidal zone.

Key words: alien species; *Spartina alterniflora*; inter-tidal ecosystem; soil microbial biomass; physiological function

海岸带盐沼是具有高生产力的自然生态系统之一,其重要的生态功能和社会价值^[1,2]不可忽视。沿海滩涂土壤含盐量高,绿色植被种类少,对干扰相对较敏感。基于互花米草(*Spartina alterniflora*)的消浪缓流^[3]和促进沉积^[4]作用,我国于1979年引进该物种,目前江苏沿海受互花米草掩护的标准海岸线已达410 km^[5],互花米草这一先锋植物已在潮间带中下部形成单种优势植被。

互花米草为海滨湿地的保护和生态修复提供了先锋植物种质资源,但同时在一些地区的海滨滩涂生态系统中,其生长影响了本地物种的生存,造成了负面效应,其典型的“两面性”引起了学术界的广泛关注和热烈争论,关于该植物对侵入地的生物多样性、海岸带生态系统过程及功能的影响研究迫在眉睫。

土壤微生物对维持生态系统过程^[6]和功能^[7]具有重要作用。微生物群落结构和功能影响着生态系统中土壤元素的生物地球化学循环,能够快速反映生态系统过程的变化,受干扰的系统中微生物多样性的变化模式可作为生态系统功能的敏感指标^[8],在系统的恢复及重建中具有重要意义。

微生物功能多样性分析被广泛应用于土壤微生物的结构组成和相对多度的研究^[9],如不同土壤类型和与之相关的植物群落对土壤微生物的影响研究^[10~12]。此外,由于微生物量在调节土壤生态系统水平的过程如营养物质循环、有机质降解等方面具有关键作用^[13],因而也成为评价系统中土壤环境变化的较好指标。

目前我国对互花米草的研究集中于其促淤保堤效果、生态综合开发利用^[14~18],以及扩展和分布特征^[5]等方面,关于互花米草侵入后对海岸潮间带生态系统过程和功能的影响未见有系统报道。本文通过对互花米草侵入的潮间带土壤微生物量、土壤微生物群落生理功能特征的研究,探讨外来种互花米草对潮间带生态系统的影响,为滨海湿地退化生态系统的恢复和重建提供土壤微生物学方面的依据。

1 材料与方法

1.1 样地概况和取样设置

江苏省海岸带处于暖温带向北亚热带过渡地区^[19],以季风气候为主。日总辐射量达110~126×4.18 kJ/(cm²·a),日照总时数2000~2650h/a,日照百分率达50%~55%。全年平均气温因受海洋的调节,冬半年(9月~翌年2月)偏暖,夏半年(3~8月)偏凉,春季回暖迟,气温低,秋季降温迟,明显偏暖,无霜期较长,气温年、日变化小。年平均降雨量850~1000mm,1月份平均气温0~3℃,最热月平均气温近海边29~31℃,滩地无霜冻期230d左右。所选互花米草盐沼位于大丰县海岸,并以如东县海岸潮间带光滩为对照。

大丰县海岸线长达112 km,土壤以粉砂淤泥质为主,互花米草盐沼充分发育,海岸带沉积速率高;如东县海岸线103.3 km,目前仅其小洋口岸段潮间带保留有无植被光滩。本研究中互花米草盐沼位于大丰王港垦区,33°17'N,120°45'E,该区于1989年种植互花米草,随着互花米草向海方向逐年生长,对成熟盐沼的围垦活动也随之向前推进,目前的互花米草盐沼为4年生的草滩;潮间带光滩位于如东小洋口凌洋垦区,32°36'N,120°59'E;二者相距79 km。

在所选样地内按向海梯度(高潮带、中潮带、低潮带)设置1m×1m小样方各15个(图1),小样方间距500~1000 m;分别于2002年10月、12月和2003年4月、7月进行样地调查及相关取样,在如图所示每个小样方内分别取2~20 cm深的土壤样品约100 g,装入无菌封口袋,带回实验室,4℃保存,作为土壤微生物分析用样品,实验前分别将二样地中15个小样方的样品混合,过2mm筛,备用。另外在各小样方取2~20 cm深的土壤样品,作为土壤理化性质分析用样品,分别测定二样地中每个小样方的土样。

1.2 实验方法

1.2.1 土壤理化性质 土壤含水量测定用烘干法(GB 7833-87),于105℃烘12h至恒重;另取土壤样品,风干后过2mm筛,氯化钾浸提-靛酚蓝比色法测定土壤铵态N;土壤pH值测定采用酸度计法(1:5土水比)(GB 7859-87),土壤盐度测定采用电导法(1:5土水比)(GB 7871-87);另取风干土样过0.15 mm筛,重铬酸钾氧化-外加热法测定土壤有机碳(GB 7857-87)、半微量开氏法测土壤全N(GB 7113-87)^[20]。

1.2.2 土壤微生物量 参考Brookes等^[21]和Vance等^[22]的氯仿熏蒸——0.5 mol/L硫酸钾提取法进行测定:称取25g鲜土,放入装有无醇氯仿的真空干燥器中,抽真空使氯仿沸腾5 min,关闭活塞,避光,黑暗处25℃熏蒸24 h后取出装有氯仿的小烧杯,反复抽真空2~3次(每次5 min)以排尽氯仿;另称取一批相同重量的土样放入干燥器中,不用氯仿熏蒸处理,同样避光于黑

暗处 25 °C 培养 24 h, 作为对照。每份土样用 100 ml 0.5 mol/L 硫酸钾溶液浸提, 振荡 30 min, 过滤, 滤液待测。微生物量 C 以重铬酸钾氧化、硫酸亚铁滴定法; 微生物量 N 以吸取 50 ml 提取液, 加入 5 ml 浓硫酸浓缩消煮, 开氏定氮法定氮。

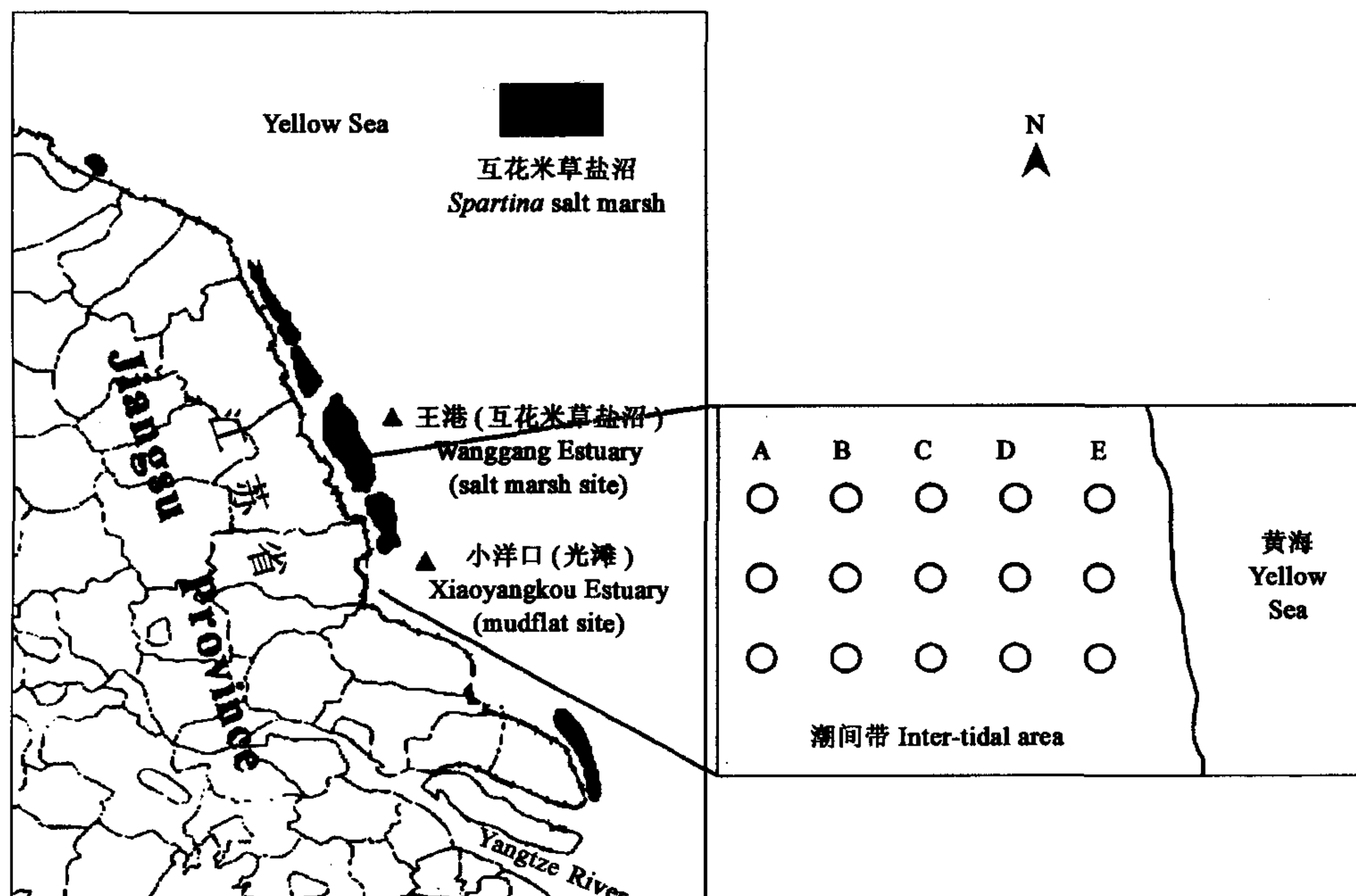


图 1 江苏滨海潮间带互花米草盐沼与无植被光滩取样位置及向海梯度小样方设置

Fig. 1 The location of the salt marshes and mudflats sampled at Jiangsu, China and the sampling scheme along the inter-tidal area

1.2.3 土壤微生物群落水平生理多样性 (CLPP) Garland 和 Mills^[23] 建立了一套利用 BIOLOG 微平板 (BIOLOG, Inc., Hayward, CA) 鉴定系统来研究不同环境下的基于不同底物利用模式的微生物特征差异的方法。Zak 等^[10] 扩展了此方法的应用, 将其结合到生物多样性的生态学概念中, 通过研究不同微生物群落对单一碳源底物的利用能力 (Sole-Carbon-Source Utilization, SCSU) 差异, 统计分析后获得大量土壤微生物群落结构和功能多样性方面的信息。在分析过程中, 如果一个微生物群落对 95 个不同的碳源利用方式与另一个微生物群落的相似, 则认为这两个微生物群落在功能上具有相似性。

土壤微生物悬液 称取相当于 10 g 风干土重的新鲜土样, 加入 100 ml 无菌的 0.1 mol/L 磷酸缓冲液 (K_2HPO_4/KH_2PO_4 , pH 7.2), 于 30 °C, 150 r/min 摇床振荡 20 min。然后 500 × g 离心 5 min, 取上清液, 即为 1 : 10 提取液; 再用上述磷酸缓冲液稀释 10 倍, 得到 1 : 100 提取液, 用于 BIOLOG 平板反应。

ELISA 反应 将 BIOLOG GN 平板从冰箱内取出, 预热到室温; 取 1 : 100 土壤微生物提取液, 加到 BIOLOG GN 微平板中, 每孔加样 120 μl; 将加好样的 BIOLOG 微平板于 30 °C 温育; 温育过程中分别在 0, 24, 48, 72, 96, 120, 144 h, 用 ELISA 反应微平板读数器 (BIO-RAD 3550 Microplate Reader) 于 595 nm 波长读数, 记录数据。

1.2.4 数据处理 数据处理应用 STATISTICA (StatSoft, Inc. 1993) 进行 ($p < 0.05$)。

土壤微生物群落水平生理多样性 BIOLOG GN 微平板 ELISA 反应采用每孔颜色平均变化率 (Average Well Color Development, AWCD) 来描述^[24]; 计算公式如下: $AWCD \text{ 值} = [\sum (C \times R)] / 95$, 其中 C 是所测得 95 个反应孔的光吸收值, R 是对照孔 A1 的光吸收值。

计算过程中先减去各平板反应时间为 0h 的各孔光吸收值数据以进行背景值校正, 计算 AWCD 时, 需再减去对照孔 A1 的光吸收值, 各孔的光吸收值小于 0.3 的按 0 计。光滩和互花米草盐沼土壤微生物生理活性测定通过计算所有碳源的平均光吸收值得到。

土壤微生物群落功能多样性计算公式见表 1, 采用反应 72 h 的数据计算。

2 结果与讨论

2.1 土壤理化性质及土壤微生物量 C、N 季节变化

土壤理化性质及微生物量变化见表 2。与光滩相比, 互花米草盐沼土壤全 N、有机 C、 $NH_4\text{-N}$ 、含水量较高, 而 pH 较低, 此外二者土壤含盐量变化无显著性差异 (表 3)。季节变化表现为在互花米草盐沼中, 4 月份和 7 月份全 N、土壤有机 C 含量较低, 其

中 4 月份土壤全 N 含量与光滩相比无显著性差异(表 3);C/N 为 10 月最低,并且在此时与光滩 C/N 存在显著差异(表 3);而光滩中,全 N 含量在各季节相近,其中 7 月份最低,10 月份最高;有机 C 含量 7 月份最低,12 月份最高;C/N 在 7 月份最低,12 月份最高。

表 1 土壤微生物群落功能多样性指数计算公式
Table 1 Formulas for functional diversity calculations of soil microbial communities

多样性指数 Biodiversity index	表征的内涵 Connotation	公式 Formulas	备注 Remark
Simpson 指数 Simpson diversity index(<i>D</i>)	常见种的优势度	$D = 1 - \sum P_i^2$	P_i 为 N_i 与整个平板相对吸光值的比率; N_i 为第 i 孔的相对吸光值($C-R$); S 为颜色发生变化的孔数
Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index(H')	丰富度和均匀度	$H' = - \sum P_i \ln P_i$	
Pielou 均匀度 Eveness(J)	由 Shannon-Wiener 指数得出的均匀度	$J = (- \sum P_i \ln P_i) / \ln S$	
Margalef 指数 Margalef index(M)	丰富度	$M = (S - 1) / \ln N$	

表 2 互花米草盐沼和光滩土壤理化性质和土壤微生物量季节变化特征

Table 2 Physiochemical and microbial biomass characteristics of soils of *Spartina* salt marshes (S) and mudflat (M) in sampling seasons (mean value±SE)

项目 Item	互花米草盐沼 <i>Spartina</i> salt marsh (S)				光滩 Mudflat (M)			
	10 月 Oct.	12 月 Dec.	4 月 Apr.	7 月 Jul.	10 月 Oct.	12 月 Dec.	4 月 Apr.	7 月 Jul.
土壤含盐量 Soil salinity(%)	1.17±0.33	1.05±0.12	0.35±0.05	0.42±0.07	1.06±0.18	1.11±0.39	0.29±0.04	0.31±0.10
土壤 pH Soil pH	8.36±0.03	8.36±0.02	8.38±0.04	8.13±0.04	8.50±0.05	8.45±0.06	8.42±0.02	8.32±0.13
土壤含水量 Soil water content(%)	35.97±7.04	39.58±5.28	33.97±5.38	44.40±5.59	30.68±2.06	30.60±4.44	28.13±1.70	29.57±2.90
土壤全氮 Soil total N (mg/g)	0.40±0.13	0.42±0.08	0.28±0.13	0.28±0.10	0.20±0.02	0.18±0.01	0.16±0.02	0.14±0.01
土壤铵态氮 Soil NH ₄ -N (μg/g)	3.69±0.60	2.51±0.28	1.97±0.62	2.37±0.98	1.92±0.33	2.22±0.35	1.06±0.09	0.92±0.34
土壤有机碳 Soil organic C(%)	0.41±0.12	0.47±0.07	0.38±0.10	0.34±0.07	0.23±0.03	0.25±0.04	0.20±0.03	0.16±0.07
土壤 C/N Soil C/N	10.31±0.36	11.15±0.61	16.32±7.80	12.80±3.33	11.66±0.38	13.34±1.77	12.45±2.80	11.37±4.51
微生物量碳 Biomass C (mg/kg)	45.27	53.02	40.83	65.07	19.39	48.07	25.29	59.06
微生物量氮 Biomass N (mg/kg)	1.22	9.39	2.96	3.37	0.68	3.49	3.57	6.92
微生物量 C/N Biomass C/N	37.11	5.65	13.79	19.31	28.51	13.77	7.08	8.53
微生物量碳/土壤有机碳 Biomass C/Soil organic C(%)	1.10	1.13	0.99	1.08	0.81	1.30	1.23	1.81
微生物量氮/土壤全氮 Biomass N/Soil total N	0.31	2.22	0.73	0.60	0.34	1.84	1.80	4.03

互花米草盐沼土壤微生物量 C、N 及土壤微生物量 C/N 值皆高于光滩。光滩土壤有机质含量较低,可利用的 C 源相对较少,多数微生物处于不活跃状态,一旦有机底物进入土壤,它们即能积极活动并大量增殖^[24],因此互花米草盐沼土壤微生物量 C 较高。微生物量 C/土壤有机 C 的结果显示,除 10 月外,互花米草盐沼的值都比光滩低,这是由于互花米草盐沼与光滩土壤微生物量 C 含量的差异小于土壤有机 C 含量的差异,表明互花米草生长后,潮间带微生物对碳和营养物质的利用相对较少。

本研究中土壤微生物量 N/土壤全 N 比值的变化与土壤微生物量 N 的季节变化趋势相似(表 2),但在互花米草盐沼和光滩中二者存在差异,其中互花米草盐沼以 12 月份的值为最高,从 4~7 月份比值略有增加,但其结果差异不如秋冬季节的明显;而光滩在 7 月份具有最高值。土壤微生物量 N 的高低主要取决于土壤 C/N,因为土壤 C/N 直接影响了土壤中微生物的活度,对根际微生物的生长来说,相比于 N,C 是更重要的限制因子^[25]。互花米草盐沼中土壤微生物对 N 的利用模式与对 C 的利用模式相似。

Bremer 和 van Kessel^[26]认为高的微生物 C/N 可能是由于占优势的活动微生物相对于休眠微生物具有更高的 C/N。互花米草盐沼土壤微生物量 C/N 高于光滩,说明互花米草的生长使潮间带土壤中占优势的活动微生物群落组成发生了变化。

何振立^[27]的研究表明,土壤微生物在其生命活动过程中需要能量和养分,并对温度、湿度、通气性等环境条件有一定要求。冬季低温会降低微生物的活性,但由于有大量枯落物逐渐进入土壤,土壤微生物获得充足的能源供应,得以不断增殖;同时冬季温度低,代谢弱,微生物能在较低的能量供给下生存下来,土壤微生物量 C 的消耗较低,从而使土壤能维持相对较多的微生物量。本研究中冬季土壤微生物量亦并非最低值,尤其在互花米草盐沼中,微生物量 N 的最高值出现在 12 月,而此时土壤有机 C 含量亦较高。春季天气开始变暖,微生物活动增强,土壤剩余的能源很快被耗竭,当能源供应不足时,微生物活性开始减弱,互花米草盐沼中微生物量 C 此时出现最低值,此趋势直到植物根系旺盛生长能够提供较多有机物即夏季时得到扭转。

微生物量的季节变化表明在不同季节土壤微生物群落结构发生了改变。光滩土壤微生物量 C、N 的季节变化趋势相同,最高值出现在 7 月份,最低值都出现在 10 月份;而互花米草盐沼土壤微生物量 C、N 的季节变化趋势与之不尽相同,其微生物量 C 最高值在 7 月份,最低值为 4 月份,而微生物量 N 的最高值在 12 月份,最低值为 10 月份。不同的微生物群其微生物量和微生物活动之间显示着不同的相关性^[28],由此可见,互花米草的生长支持了不同的微生物群的生长活动,改变了潮间带土壤微生物的活动,与光滩相比,微生物量的季节动态虽具有部分相似性,但微生物的组成可能更复杂化。

2.2 互花米草盐沼土壤微生物量与土壤养分的关系

微生物量和活性大小与土壤肥力状况密切相关^[27]。已有研究认为土壤微生物量 N 含量与加入土壤的有机 C 源种类和数量有关^[29~30],同时与土壤的供 N 水平密切相关,土壤含 N 量高可加大微生物对 N 的固定,但并非土壤中含 N 量越高微生物量 N 也越高。在本研究中互花米草盐沼 12 月份和 10 月份土壤全 N 含量较高,是由于此时互花米草停止生长并开始枯萎凋落,逐渐向土壤中释放 N 素,导致微生物可利用的 N 增加,从而得到高的微生物量 N 值。

土壤水分含量的波动会不同程度的对土壤微生物量 C 产生影响,本研究中互花米草盐沼土壤含水量除 10 月份外,在其他取样季节都与光滩土壤含水量具有较明显的差异(表 3),但二者土壤微生物量 C 的季节变化并不完全与土壤含水量的季节变化一致(表 2)。这可能是由于本研究中互花米草盐沼和对照光滩都属于滨海潮间带湿地,经历着相似的潮水浸淹活动,土壤含水量的季节波动与其他类型生态系统具有较大差异,因而该生态系统中土壤微生物量的变化不能单纯归因于水分含量的变化。

土壤微生物对土壤有机质的矿化和转化作用是土壤有效 N 的重要来源^[31~32],土壤微生物量 N 是植物养料的储备库,并且和土壤有效 N 之间存在着一定的平衡关系^[33]。土壤微生物量的多少反映了土壤同化和矿化能力的大小,是土壤活性大小的标志。本研究中互花米草盐沼土壤微生物量总体上大于光滩土壤,在一定程度上反映出潮间带植被的生长增强了土壤活性。本研究中土壤微生物量的季节变化与土壤全 N、有机 C、土壤 C/N 以及 NH₄-N 无显著相关性(表 4)。

表 3 互花米草盐沼及光滩土壤理化因子季节变化差异性检验(t-test)

Table 3 P value (t-test) of environmental variables between *Spartina* salt marshes and mudflat in sampling seasons

项目 Item	10 月 Oct.	12 月 Dec.	4 月 Apr.	7 月 Jul.
土壤含盐量 Soil salinity	0.214	0.711	0.131	0.181
土壤 pH Soil pH	0.001	0.022	0.007	0.009
土壤含水量 Soil water content	0.083	0.018	0.048	0.004
土壤全氮 Soil total N	0.018	0.002	0.108	0.029
土壤铵态氮 Soil NH ₄ -N	0.002	0.245	0.004	0.036
土壤有机碳 Soil organic C	0.025	0.004	0.025	0.008
土壤 C/N Soil C/N	0.010	0.080	0.222	0.702

表 4 互花米草盐沼(S)与光滩(M)土壤微生物量与土壤养分相关系数

Table 4 The correlations of microbial biomass and soil nutrients in *Spartina* salt marshes (S) and mudflat (M)

土壤养分 Soil nutrients	互花米草盐沼 <i>Spartina</i> salt marshes(S)				光滩 Mudflat(M)			
	微生物量碳 Biomass C		微生物量氮 Biomass N		微生物量碳 Biomass C		微生物量氮 Biomass N	
	相关系数 Correlation	<i>p</i>	相关系数 Correlation	<i>p</i>	相关系数 Correlation	<i>p</i>	相关系数 Correlation	<i>p</i>
土壤全氮 Soil total N	-0.15	0.85	0.46	0.54	-0.62	0.38	-0.93	0.07
土壤有机碳 Soil organic C	-0.32	0.68	0.68	0.32	-0.45	0.55	-0.80	0.20
土壤 C/N Soil C/N	-0.19	0.80	-0.09	0.91	0.01	0.98	-0.20	0.80
土壤铵态氮 Soil NH ₄ -N	-0.048	0.95	-0.29	0.71	-0.2	0.8	-0.66	0.34

2.3 土壤微生物群落生理功能——碳源利用特征

BIOLOG 技术对于检测不同位点土壤细菌的差异性是一较理想的方法,同时它还可用于评估为生物多样性和该位点环境条件的相关性^[9]。该方法是根据微生物对碳源(有机质)的利用程度来反映其生理活动特征,消耗的有机质越多,其生理活动越强。因此该方法能够直观地反映微生物生理活动的强度,同时还能反映出微生物群落结构的生理特征以及微生物功能多样性的

变化。有效区分土壤在微生物群落结构方面的差异性、微生物对碳源的利用程度和方式,比较其生态功能的变化,对探讨不同土地利用情况下土壤微生物的生理效应具有重要的生态意义。

基于土壤微生物群落对不同碳源底物的利用情况(表 5)分析发现,光滩土壤微生物所利用的碳源底物基本上也都为互花米草盐沼土壤的微生物所利用,二者皆以糖类、氨基酸类和羧酸类为主,表明二者有相似的微生物生理类群。

10 月份的结果显示互花米草盐沼与光滩土壤微生物群落功能相差不大,4 月份和 7 月份的多样性指标分析表明互花米草盐沼明显高于光滩(表 6),提示了该生态系统中土壤微生物的功能多样性与互花米草植被生长状况密切联系。

Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数的变化可在一定程度上间接说明生境条件的差异,一般而言,生境条件越适宜,多样性就越高。多样性指数计算和碳源底物利用类型结果显示,在 10 月份互花米草的成熟期,盐沼土壤微生物群落的生理功能多样性与光滩相近。在植物的生长季节,盐沼内 4 月份和 7 月份的碳源利用类型相似,与光滩的碳源利用类型相比,此季节内二者差异较明显,其中 7 月份的差异更大。本研究中互花米草盐沼土壤微生物群落的代谢多样性最高值出现在 7 月份,而光滩的则在 4 月份,二者的代谢多样性的季节变化不同,表现出互花米草植被的生长状况对土壤微生物群落的变化有明显的影响作用。

Sarathchandra 等^[34]研究发现,牧场草地 N 的增加对总的细菌含量没有影响;此外增加了 N 肥投入量后,通过 Shannon 多样性指数(H')和平均孔颜色变化(AWCD,Biolog GN 平板)表现的土壤微生物功能多样性下降。本研究结果显示(表 7),互花米草盐沼土壤微生物利用碳源的丰富度与土壤全 N 含量表现为显著的负相关,其功能多样性与土壤 C/N 表现为正相关;光滩中土壤有机质含量较低,土壤微生物功能多样性表现出与有机 C 含量具有正相关关系。土壤微生物区系反映的功能多样性的不同变化趋势,表明在互花米草盐沼和光滩中,影响微生物群落结构的环境因素发生了变化,也说明潮间带土壤微生物群落功能结构组成发生了较明显的改变。

表 7 互花米草盐沼(S)及光滩(M)土壤微生物群落多样性指数与土壤理化因子相关性

Table 7 The correlations between microbial community functional diversity index and soil nutrients in *Spartina* salt marshes (S) and mudflat (M)

土壤养分 Soil nutrients	相关系数 Correlations									
	Shannon 指数 Shannon index		Pielou 均匀度 Eveness		Margalef 指数 Margalef index		丰富度 Richness		Simpson 指数 Simpson index	
	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
土壤全氮 Soil total N	-0.99	0.57	-0.88	0.98	-0.96	0.40	-1.00*	0.43	-0.99	0.55
土壤有机碳 Soil organic C	-0.91	0.76	-0.48	1.00*	-0.96	0.62	-0.86	0.64	-0.92	0.74
土壤铵态氮 Soil NH ₄ -N	-0.91	0.38	-0.98	0.92	-0.85	0.19	-0.95	0.23	-0.90	0.35
土壤 C/N Soil C/N	0.80	0.87	1.00*	0.26	0.72	0.95	0.87	0.94	0.79	0.88

* $p < 0.05, N = 3$

土壤微生物的功能多样性实际上是通过所利用碳源底物的数量和类型来实现的。植物被认为强烈影响着土壤微生物量的组成和活动,微生物代谢潜力的差异可能来源于物种组成的不同^[6]。图 2 显示,互花米草盐沼土壤微生物的代谢能力较光滩升高,并且在夏季达到最高值。本研究中秋季二者的代谢能力与其他季节相比差异较小,并且此时它们所利用的碳源底物类型最相近(表 5),可见互花米草的生长状况强烈影响着微生物的活动,在植被生长减弱时,碳源底物利用类型的比较结果显示互花

表 5 互花米草盐沼(S)及光滩(M)土壤微生物群落碳源底物类型利用情况比较

Table 5 The utilization of different carbon resources by soil microbial community in *Spartina* salt marshes (S) and mudflat (M)

碳源底物类型(个) Carbon resources (ind.)	10 月 Oct.		4 月 Apr.		7 月 Jul.	
	S	M	S	M	S	M
糖类 Saccharide	9	9	24	12	24	1
氨基酸类 Amino acid	5	3	15	13	17	6
羧酸类 Carboxylic acid	9	13	10	12	16	7
聚合物 Polymer	3	2	5	2	4	1
氨基化合物 Amide	2	0	2	0	2	0
磷酸化合物 Phosphorylating compound	1	2	0	0	1	0
芳香族化合物 Aromatics	1	1	2	2	2	1
酯类 Esters	1	1	1	1	2	0
醇类 Alcohol	1	0	1	1	1	0
溴化物 Bromide	0	1	0	1	1	0
胺类 Amines	0	0	1	0	1	1
合计 Total	32	32	61	44	71	17

表 6 互花米草盐沼(S)及光滩(M)土壤微生物群落多样性指数比较

Table 6 Biodiversity index of soil microbial community in *Spartina* salt marshes (S) and mudflat (M)

多样性指数 Biodiversity index	10 月 Oct.		4 月 Apr.		7 月 Jul.	
	S	M	S	M	S	M
Shannon 指数 Shannon index(H')	3.37	3.41	4.07	3.66	4.18	2.72
Pielou 均匀度 Eveness(J)	0.97	0.98	0.99	0.97	0.98	0.96
Margalef 指数 Margalef index(M)	6.87	6.44	10.77	8.39	10.8	3.68
丰富度 Richness(S)	32	32	61	44	71	17
Simpson 指数 Simpson index($1/D$)	26.88	29.00	56.54	35.32	61.72	13.94

米草盐沼具有和光滩相近的土壤微生物生理功能群,而随着植被生长开始活跃,二者的微生物生理功能群表现出明显的差异。

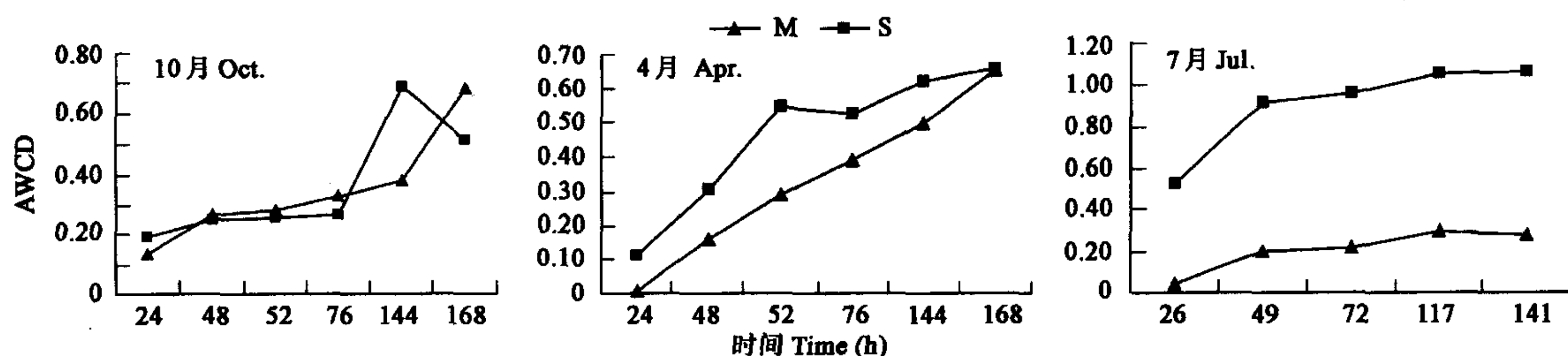


图2 互花米草盐沼(S)及光滩(M)土壤微生物 CLPP 反应 AWCD 值变化比较

Fig.2 AWCD of soil microbial community level physiological profiles in different sampling seasons in *Spartina* salt marshes (S) and mudflat (M)

3 结论

本研究中,互花米草在潮间带生长后,潮间带土壤微生物量增加;与光滩相比,互花米草盐沼的土壤微生物对碳和营养物质的利用相对较少;同时微生物生理功能群中占优势的活动组分发生了变化,组成可能更复杂,增强了潮间带土壤活性。

土壤微生物群落生理功能多样性分析结果显示,潮间带滩涂土壤中微生物群落对碳源底物的利用能力不高,所利用的碳源以糖类、氨基酸类、羧酸类占优势;其中互花米草盐沼中微生物所利用的碳源种类多于光滩,并且不同季节互花米草盐沼土壤微生物群落利用碳源类型存在差异。潮间带土壤微生物在不同的季节中其生理功能群组成发生着变化,互花米草盐沼的土壤微生物在植被生长减弱时具有与光滩相近的代谢类群,在生理功能上具有一定的相似性;当植被生长旺盛时,其代谢类群增多,代谢强度升高,微生物群落功能多样性增加。

外来种互花米草在滨海潮间带的大面积生长,改善了土壤理化性质,为该处土壤微生物提供了不同的碳源,增强了土壤微生物的活动,也改变了土壤微生物群落生理功能结构。而作为生态系统的重要组成部分,土壤微生物的这种改变在大尺度上对当地潮间带生态系统将带来怎样的影响,需要继续进行深入地研究。

References:

- [1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, 1998, 25: 3~15.
- [2] Mitsch W J and Gosselink J G. *Wetlands*. Third Ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 2000.
- [3] Knuston P L, Brochu R A, Seeling W N, et al. Wave damping in *Spartina alterniflora* marshes. *Wetlands*, 1982, 2: 87~104.
- [4] Stumpf R P. The processes of sedimentation on the surface of a salt marsh. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1983, 17: 495~508.
- [5] Shen Y M, Liu Y M, Chen Q Z. Analysis of the expanding process of the *Spartina alterniflora* Loisel salt marsh on Jiangsu Province coast by remote sensing. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2002, 11(2): 33~38.
- [6] Fisk M C, Ruether K F, Yavitt J B. Microbial activity and functional composition among northern peatland ecosystems. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35: 591~602.
- [7] Doran J W, Zeiss M R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15: 3~11.
- [8] Kennedy A C, Smith K L. Soil microbial diversity and the sustainability of agricultural soils. *Plant and Soil*, 1995, 170: 75~86.
- [9] Li Q, Allen H L, Wollum A G. Microbial biomass and bacterial functional diversity in forest soils: effects of organic matter removal, compaction, and vegetation control. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36: 571~579.
- [10] Zak J C, Willig M R, Moored D L, et al. Functional diversity of microbial communities: a quantitative approach. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26: 1101~1108.
- [11] Garland J L. Patterns of potential C source utilization by rhizosphere communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28: 223~230.
- [12] Grayston S J, Campbell C D. Functional biodiversity of microbial communities in the rhizospheres of hybrid larch (*Larix eurolepis*) and Sitka spruce (*Picea sitchensis*). *Tree Physiology*, 1996, 16: 1031~1038.
- [13] Grayston S J, Campbell C D, Bardgett R D, et al. Assessing shifts in microbial community structure across a range of grasslands of differing management intensity using C;PP, PLFA and community DNA techniques. *Applied Soil Ecology*, 2004, 25: 63~84.
- [14] Chen H Y. The resource and utilization of *Spartina* at inter-tidal area in north Jiangsu. *Natural Resources*, 1990, 18(6): 56~63.

- [15] Ma Y J, Li L, Yuan B J, *et al.* Studies on component of *Spartina alterniflora* Loisel I. Fatty acids in lamina with GC-MS. *Chinese Journal of Biochemical Pharmaceutics*, 2001, **22**(4): 184~186.
- [16] Ma Y J, Yuan B J, Li L, *et al.* Studies on component of *Spartina alterniflora* Loisel I. the research of volatile component with GC-MS. *Chinese Journal of Biochemical Pharmaceutics*, 2002, **23**(1): 36~37.
- [17] Shen Y M, Zhang R S, Wang Y H. The tidal creek character in salt marsh of *Spartina alterniflora* Loisel on strong tide coast. *Geographical Research*, 2003, **22**(4): 520~527.
- [18] Qin P, Xie M, Jiang Y. *Spartina* green food ecological engineering. *Ecological Engineering*, 1998, **11**(1-4): 147~156.
- [19] Ren M E, Xu T G, Zhu J W, *et al.* In: *Survey of the Coastal and Salt Marsh Resource in Jiangsu Province (Report)*. Beijing: China Ocean Press, 1985. 1:25~46,110~120.
- [20] Liu G S, Jiang N H, Zhang L D, *et al.* Eds. In: *Standard Methods for Observation and Analysis in Chinese Ecosystem Reaearch Network: Soil Physical and Chemical Analysis and Description of Soil Profiles*. Beijing: Standard Press of China, 1996.
- [21] Brookes P C, Landman A, Pruden G, *et al.* Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 1985, **17**: 837~842.
- [22] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology & Biochemistry*, 1987, **19**: 703~707.
- [23] Garland J L, Mills A L. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level sole-carbon-source utilization. *Applied Environment and Microbiology*, 1991, **57**:2351~2359.
- [24] Dick R P. A review: Long-term effects of agricultural systems on soil biochemical and microbial parameters. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 1992, **40**: 25~36.
- [25] Bottner P, Sallih Z, Billes G. Root activity and carbon metabolism in soils. *Biology and Fertility of Soils*, 1988, **7**: 71~78.
- [26] Bremer E, van Kessel C. Seasonal and microbial biomass dynamics after addition of lentil and wheat residues. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, **56**: 1141~1146.
- [27] He Z L. Soil microbial biomass and its significance in nutrients cycle and environmental quality evaluation. *Soils*, 1997, **2**: 61~69.
- [28] Papatheodorou E M, Stamou G P, Giannotaki A. Response of soil chemical and biological variables to small and large scale changes in climatic factors. *Pedobiologia*, 2004, **48**: 329~338.
- [29] Aoyana M, Nozawa T. Microbial biomass nitrogen and mineralization-immobilization processes of nitrogen in soils incubated with various organic materials. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1993, **39**: 23~32.
- [30] Patra D D, Bhandari S C, Misra A. Effect of plant residues on the size of microbial biomass and nitrogen mineralization in soil: incorporation of cowpea and wheat straw. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1992, **38**: 1~6.
- [31] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Phosphorus in the soil microbial biomass. *Soil Biology & Biochemistry*, 1984, **16**: 169~175.
- [32] Gao Y C, Zhu W S, Chen W X. Estimation for biomass and turnover of soil microorganisms. *Chinese Journal of Ecology*, 1993, **12**(6): 6~10.
- [33] Chapman S J. Microbial sulfur in some Scottish soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 1987, **9**: 301~305.
- [34] Sarathchandra S U, Ghani A, Yeates G W, *et al.* Effect of nitrogen and phosphate fertilizers on microbial and nematode diversity in pasture soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, **33**: 953~964.

参考文献:

- [5] 沈永明,刘咏梅,陈全站. 江苏沿海互花米草(*Spartina alterniflora*)盐沼扩展过程的遥感分析. *植物资源与环境学报*, 2002, **11**(2):33~38.
- [14] 陈宏友. 苏北潮间带米草资源及其利用. *自然资源*, 1990, **18**(6):56~63.
- [15] 马永建,李莉,袁宝君,等. 互花米草成分研究 I. GC-MS法研究叶片中脂肪酸. *中国生化药物杂志*, 2001, **22**(4):184~186.
- [16] 马永建,袁宝君,李莉,等. 互花米草成分研究 I. GC-MS法研究挥发性成分. *中国生化药物杂志*, 2002, **23**(1):36~37.
- [17] 沈永明,张忍顺,王艳红. 互花米草盐沼潮沟地貌特征. *地理研究*, 2003, **22**(4):520~527.
- [19] 任美镔,许廷官,朱季文,等. 江苏省海岸带和海涂资源综合调查报告. 北京:海洋出版社,1985. 1,25-46,110~120.
- [20] 刘光菴. 土壤理化分析与剖面描述. 北京:中国标准出版社,1996.
- [27] 何振立. 土壤微生物量及其在养分循环和环境质量评价中的意义. *土壤*, 1997, **2**:61~69.
- [32] 高云超,朱文珊,陈文新. 土壤微生物生物量周转的估算. *生态学杂志*, 1993, **12**(6):6~10.