

崇明东滩潮间带硫酸盐还原菌及有机质含量的初步研究

袁琦¹, 崔玉雪¹, 陈庆强², 吕宝一¹, 谢冰^{1*}

(1. 华东师范大学环境科学系, 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200062; 2. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 针对崇明东滩湿地不同潮滩和不同高程的土壤采样, 进行了 MPN 法微生物计数、沉积物有机质含量的测定, 计算了 SO_4^{2-} 和 Cl^- 浓度的摩尔比, 研究了硫酸盐还原菌的分布状况、与有机质含量的相关性、以及植物根际环境对其生长的影响。结果表明, 不同高程潮滩同一深度的硫酸盐还原菌数量, 按大小排序为: 中潮滩 > 高潮滩 > 光滩。同一潮滩不同深度的硫酸盐还原菌含量, 均显示为 51~52 cm > 21~22 cm > 81~82 cm, 说明东滩湿地 51~52 cm 的土壤深度是硫酸盐还原菌生长的主要层位, 与存在较好的适于硫酸盐还原菌生长的条件有关。不同深度土壤中的有机质含量, 呈现高潮滩 > 中潮滩 > 光滩的趋势。从 21~51 cm 处, 随着深度的增加, 有机质含量减少但硫酸盐还原菌的数量却大幅增加, 说明硫酸盐还原菌利用土壤中的有机质进行了还原反应。所有土壤样品的 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 摩尔比值均 < 0.05, 表明硫酸盐还原菌十分活跃地进行着硫酸盐还原作用。芦苇根际中硫酸盐还原菌含量是最高的, 说明东滩湿地芦苇的根际环境对硫酸盐还原菌的生长具有促进作用, 而蕹草根际的硫酸盐还原菌数量相对非根际环境较低, 说明不同的根际效应对于东滩硫酸盐还原菌的生长有不同的影响。

关键词: 崇明东滩; 硫酸盐还原菌; 有机质; $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 摩尔比; 根际效应

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)09-2155-05

Primary Study on Contents of Sulfate Reducing Bacteria (SRB) and Organic Matter from Intertidal Zone at Chongming Dongtan

YUAN Qi¹, CUI Yu-xue¹, CHEN Qing-qiang², LÜ Bao-yi, XIE Bing¹

(1. Key Laboratory of Urbanization and Ecological Restoration of Shanghai, Department of Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Collected soil samples from different tidal flats and elevation in Chongming Dongtan wetland, then conducted sulfate-reducing bacteria (SRB) based on MPN method, determined organic matter content and calculated $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ molar ratio, for the research on the distribution of SRB, relevance to soil organic matter content as well as influence of plant rhizosphere environment on SRB growth. The results show the distribution of SRB is ranked as middle flat > climax flat > bald flat. The same tidal flats at different depths, the SRB levels are shown as 51-52 cm > 21-22 cm > 81-82 cm, therefore 51-52 cm soil depth of Dongtan wetland is the suitable area for SRB to grow. However, in different tidal and depth, the distribution of organic matter content presents climax flat > middle flat > bald flat. From 21-51 cm, as the depth increasing, the organic matter content decreases while the amount of SRB significantly increasing, which indicates SRB utilizes the soil organic matter to carry out reduction reaction. The $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ molar ratios of all soil samples are less than 0.05, indicating that SRB are actively engaged in sulfate reduction. The concentration of SRB in reed rhizosphere soil is the highest, showing that *Phragmites australis* rhizosphere environment in Dongtan wetland could enhance SRB growth, while the number of SRB in *Spartina alterniflora* rhizosphere environment is relatively lower than the non-rhizosphere environment, indicating that the rhizosphere effect has different effects on SRB in Dongtan tidal flats.

Key words: Chongming Dongtan; sulfate-reducing bacteria (SRB); organic matter; $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ molar ratio; rhizosphere effect

微生物作为湿地生态系统的分解者, 推动了湿地生态系统的物质循环和能量流动^[1], 是评价湿地土壤生态功能和污染物净化能力的指标之一^[2], 因此研究湿地土壤微生物与有机质的相互关系, 对湿地土壤生态系统的结构和功能具有非常重要的意义。针对海岸盐沼湿地土壤微生物动态的研究正逐渐引起关注^[3], 海岸盐沼湿地主要分布在潮间带, 有机质降解途径以厌氧微生物代谢为主导, 一般认为潮间带土壤中有有机质的降解途径以硫酸盐还原作

用最为重要^[4], 参与这一途径的主要微生物菌群为硫酸盐还原菌 (sulfate-reducing bacteria, SRB), 在厌氧条件下以硫酸盐或其它含硫化合物作为电子受体, 同化有机物获得能量, 产生 H_2S 和 CO_2 ^[5], 在海岸盐沼湿地生态系统的有机质降解中扮演着重要的

收稿日期: 2009-11-03; 修订日期: 2009-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40772210); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07321-001)

作者简介: 袁琦 (1985~), 女, 硕士, 主要研究方向为环境微生物学, E-mail: cherly_yq@hotmail.com

* 通讯联系人, E-mail: bxie@des.ecnu.edu.cn

角色.不同根际环境产生的根际效应会影响土壤硫酸盐还原菌的数量,且在群落结构与植物相互作用等方面不同于非根际土壤^[6].

关于崇明东滩湿地的研究已有一些报道,如徐晓军等^[7]研究了底栖动物群落在互花米草群落中的时空动态变化;梅雪英等^[8]研究了崇明东滩湿地植被演替过程中储碳、固碳功能的变化.但国内对湿地土壤生态系统的研究起步较晚,关于天然湿地土壤微生物的研究报道相对较少^[9],张士萍等^[2]测定了东滩土壤中微生物含量、有机质含量、土壤酶活性,分析不同类型土壤的生物活性和生态环境效应.本研究通过研究东滩湿地土壤硫酸盐还原菌,分析了东滩湿地土壤和根际环境中硫酸盐还原菌的数量及分布情况,测定土壤有机质含量和孔隙水中 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 的摩尔比,探讨了分析硫酸盐还原菌与有机质的关系,以及植物根际环境对其生长的影响,以期研究东滩湿地的环境生态功能提供参考依据.

1 研究区域概况

崇明东滩是长江口规模最大、发育最完善的河口型潮汐湿地,位于崇明岛最东端,是国际重要湿地,承担着抵抗自然灾害、净化环境、维持生物多样性等重大功能^[10].由长江径流夹带的巨量泥沙在江海的相互作用下沉积而成,面积为 326 km^2 ,目前仍以每年 $80\sim 110\text{ m}$ 的淤长速度向东海推进^[11],其南北狭、东西宽,区内潮沟密布,高、中、光滩分带十分明显.潮汐性质属非正规半日浅海潮,是长江口淡、咸水的交汇地带,平均盐度为 $0.21\text{‰}\sim 5\text{‰}$.湿地的植被类型简单,主要以土著植物芦苇(*Phragmites australis*)和外来入侵植物互花米草(*Spartina alterniflora*)构成的单物种群落,其他还有海三棱藨草(*Scirpus mariqueter*)、藨草(*Scirpus trigeter*)、糙叶苔草(*Carex scabrifolia*)等与混生形成的莎草群落^[12].芦苇主要分布在高潮滩上部与海塘之间,高 $1\sim 3\text{ m}$,地下根茎发达.藨草广泛分布于高潮滩和中潮滩,是崇明东滩重要的自然植被,高度一般为 $25\sim 40\text{ cm}$,根系主要分布于滩面以下 $10\sim 20\text{ cm}$,甚至可达 30 cm 以下^[13].

2 研究方法

2.1 样品采集

在崇明东滩典型高程部位(高潮滩上部、中潮滩下部、光滩)分别采集柱状样品.采样时间为2008年4月12日小潮、落潮时.PVC采样管的内径为 11

cm ,洗净之后用去离子水冲洗数次,风干,将两端用胶带密封备用.3个采样点具体经纬度见表1.

高潮滩柱样长 100 cm ,中潮滩柱样长 60 cm ,光滩柱样长 40 cm .取样后,立即将PVC采样管两端用塑料袋封堵,用胶带将塑料袋固定,使PVC管口密封,将柱状样存于冰柜运回实验室.沿柱样深度方向剖分为二,高潮滩选取深度为 $21\sim 22\text{ cm}$ 、 $51\sim 52\text{ cm}$ 、 $81\sim 82\text{ cm}$ 3处(分别表示为高 $21\sim 22\text{ cm}$,高 $51\sim 52\text{ cm}$,高 $81\sim 82\text{ cm}$);中潮滩选取深度为 $21\sim 22\text{ cm}$ 、 $51\sim 52\text{ cm}$ 2处(分别表示为中 $21\sim 22\text{ cm}$,中 $51\sim 52\text{ cm}$);光滩选取深度为 $21\sim 22\text{ cm}$ 、 $51\sim 52\text{ cm}$ 2处(分别表示为光 $21\sim 22\text{ cm}$,光 $51\sim 52\text{ cm}$),置于自封袋低温($0\sim 4^\circ\text{C}$)保存.在柱样孔位周围 3 m 的范围内 $<20\text{ cm}$ 的深度采集植物根系土壤,高潮滩选取芦苇和藨草这2个根系土壤样品,中潮滩选取互花米草根根系土壤样品,装入自封袋低温($0\sim 4^\circ\text{C}$)保存.

表1 采样点经纬度

Table 1 Latitude and longitude of sample point

采样点	经纬度
高潮滩	$121^\circ56.712'\text{E}$ $31^\circ33.130'\text{N}$
中潮滩	$121^\circ56.842'\text{E}$ $31^\circ33.413'\text{N}$
光滩	$121^\circ56.921'\text{E}$ $31^\circ33.445'\text{N}$

2.2 分析方法

土壤微生物的培养:采用MPN法对硫酸盐还原菌培养计数.在加入 15 mL 培养基的试管中,加入 10% 硫酸亚铁铵(经 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤除菌) 4 滴以及 1% 抗坏血酸 2 滴,振荡摇匀.用 1 mL 移液管吸取配制的样品土壤悬液制成 $10^{-3}\sim 10^{-7}$ 稀释度的土壤悬液,进行接种,放在 30°C 的恒温培养箱中培养 7 d .凡是生成黑色沉淀的试管,即表明有硫酸盐还原菌生长.计数:查表(MPN指数和 95% 置信度检索表).结果表示为 CFU/g ^[14].采用该法对样品培养计数重复3次平行实验后,计算硫酸盐还原菌的平均含量,数值取 $\lg$ 对数后作图.

沉积物有机质的测定:将研磨处理过后的样品放入马弗炉内,在 500°C 灼烧 4 h 后,冷至室温,分别称取样品质量.干土样的质量差即为土样中有机碳的含量,由此计算出土壤有机质含量(质量分数)^[15].

孔隙水中硫酸盐 SO_4^{2-} 和氯离子 Cl^- 浓度的测定:等离子色谱仪测定硫酸盐 SO_4^{2-} ;硝酸汞滴定来测定氯离子 Cl^- ,仪器型号ICAP-6300,工作参数如下:硫波长 182.0 nm ,输出功率 1150 W ,流量 0.5 L/min ,蠕动泵转速 50 r/min ,进样清洗时间 30 s ,积

分时间 15 s, 最后计算 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 的比值^[16].

相关性分析:采用皮尔逊(Pearson)相关系数来确定硫酸盐还原菌和土壤有机质含量的相关性. 用统计软件 SPSS14.0 处理, 通常情况下 $p < 0.05$ 时具有相关性^[17].

3 结果与分析

3.1 东滩潮间带土壤中硫酸盐还原菌的分布

将崇明东滩湿地不同潮滩相同深度土壤中的硫酸盐还原菌平均含量取对数(lg)后进行对比(图1), 可见在 21~22 cm 深度的土壤中, 高潮滩($1.16 \times 10^3 \text{ CFU/g}$)和光滩的硫酸盐还原菌($9.55 \times 10^2 \text{ CFU/g}$)含量相近, 而中潮滩的硫酸盐还原菌数量($3.62 \times 10^4 \text{ CFU/g}$)相对较高, 分别是高潮滩和光滩的 31 和 38 倍; 在 51~52 cm 深度的土壤中情况类似, 亦为中潮滩($1.55 \times 10^6 \text{ CFU/g}$) > 高潮滩($1.48 \times 10^5 \text{ CFU/g}$) > 光滩($9.55 \times 10^2 \text{ CFU/g}$). 中潮滩 51~52 cm 深度出现的最高值($1.55 \times 10^6 \text{ CFU/g}$)与光滩出现的最低值差距可达 4 个数量级. 由此可见, 东滩湿地中潮滩 51~52 cm 的土壤深度是硫酸盐还原菌生长的主要层次. 由于高潮滩土壤中的氧气含量较高, 会抑制硫酸盐还原菌生长; 光滩处于海水淹没时间最长的区域, 虽厌氧环境最佳, 但涨潮的稀释作用和表层沉积物曝气会对硫酸盐还原菌的生长有抑制作用^[17]; 中潮滩则处于两者之间, 可能存在较好的适于硫酸盐还原菌生长的条件, 如, 既有较好的厌氧环境, 同时在 51~52 cm 深度的土壤区域受潮水的影响较小, 该处土壤中有机质含量也较充足, 这些条件均有利于硫酸盐还原菌大量生长.

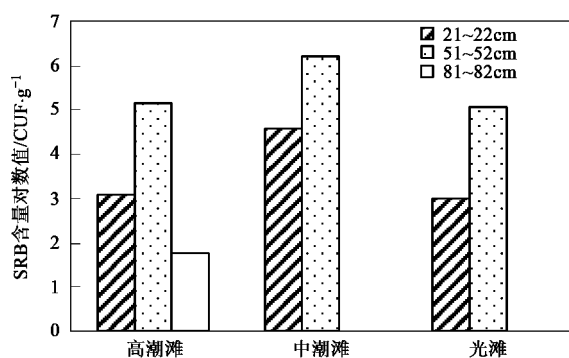


图1 不同潮滩及深度 SRB 含量的对比

Fig. 1 Comparison of SRB in different tidal flat and depths

在相同潮滩的不同深度土壤中, 硫酸盐还原菌的生长也有明显变化, 均显示为 51~52 cm > 21~22 cm > 81~82 cm. 在 21~22 cm 和 51~52 cm 深

度, 硫酸盐还原菌的数量变化较大, 由于硫酸盐还原菌适合在厌氧的环境中生长, 随深度的增加土壤中的氧含量逐渐减少, 因此 51~52 cm 深度土壤中的硫酸盐还原菌的数量明显高于 21~22 cm 深度. 然而高潮滩在 81~82 cm 深度情况却有所不同, 该处的厌氧环境并没有促进硫酸盐还原菌的生长, 数量明显低于前 2 个取样深度, 这可能是由于土壤中有有机质含量的减少或硫酸盐等电子受体的减少限制了硫酸盐还原菌的生长.

3.2 硫酸盐还原菌与有机质含量的关系

天然湿地土壤中的有机质主要来源于土壤原有有机物的矿化和动植物残体的分解, 有机物的输出量则主要包括分解和侵蚀损失, 受各种生物和非生物条件(氧化还原电位、土壤含水量)的影响^[18].

崇明东滩潮间带土壤的有机质含量测定结果如图 2 所示. 不同潮滩相同深度的土壤有机质含量进行对比, 21~22 cm 深度时, 高潮滩 > 中潮滩 > 光滩; 51~52 cm 深度时, 高潮滩 > 光滩 > 中潮滩. 相同潮滩不同深度的土壤有机质含量进行对比, 21~22 cm > 51~52 cm, 都呈由上至下逐渐减少的趋势, 与一般土壤中的分布一致^[18]. 随着高程的增加, 中高潮滩的土壤环境逐渐有利于微生物的生长、代谢和繁衍, 大量的微生物能够将生态系统中植物凋落物等生物残体转化和利用, 使高潮滩湿地土壤中有机碳含量显著增高^[19]. 由于光滩有机质主要受潮水里固体颗粒物中有机碳以及藻类生物残体的影响, 且光滩上没有植物覆盖, 致使该区域对有机碳的滞留能力较差, 从而导致光滩土壤有机质含量较低^[20].

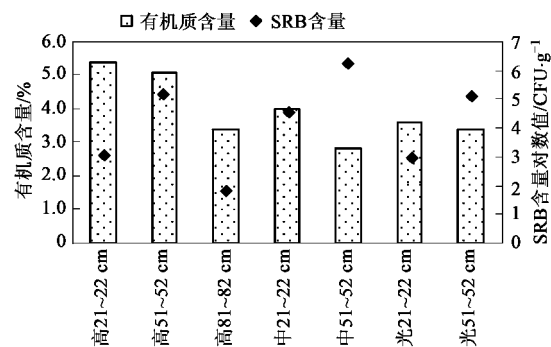


图2 土壤中硫酸盐还原菌与有机质含量的分析

Fig. 2 Analysis about SRB and organic matter content in soil

东滩潮间带土壤中硫酸盐还原菌含量与土壤有机质含量的皮尔逊相关系数为 0.172, p 值为 0.712 (远大于 0.05), 可见硫酸盐还原菌的含量和有机质的含量无相关性. 尽管硫酸盐还原菌和有机质含量

的总体相关性不显著,从图2可以明显看出,不同潮滩51~52 cm深度的土壤有机质含量均低于21~22 cm深度,但递减的程度不同,高潮滩21~22 cm的有机质含量是51~52 cm的1.06倍;中潮滩21~22 cm是51~52 cm的1.43倍,光滩21~22 cm是51~52 cm的1.06倍.与此相反,硫酸盐还原菌的数量却在51~52 cm深度都有所增加,特别是中潮滩,硫酸盐还原菌的增量很大.中潮滩有机质含量递减的程度是最大的,而硫酸盐还原菌的含量增加程度也是最大,故可推测该深度下硫酸盐还原菌较多地利用了土壤中的有机质进行了还原反应,使土壤中的有机质含量呈现大幅下降.

高潮滩81~82 cm深度的有机质的含量以及硫酸盐还原菌的数量都比前2个深度有明显下降(图2).由于潮间带的特殊环境,潮水周期性的冲刷使滩面垂向快速的堆积,随着深度的增加,潮水的影响渐渐变弱,大分子有机质便逐渐被埋藏储存起来,在潮滩表面作为电子供体以及能量来源的有机质则可能均是小分子物质,如乙酸,因此在81~82 cm深度有机质的大量减少主要可能是受到滩面堆积的影响,而并非是硫酸盐还原菌还原作用的影响.

3.3 硫酸盐还原菌与孔隙水中 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 摩尔比的相关分析

由于周期性的潮水淹没,土壤的含水率非常高,均达到50%.硫酸盐 SO_4^{2-} 是易溶的小分子物质,在土壤孔隙水中易于迁移,所以不能单单用孔隙水中 SO_4^{2-} 的浓度大小来表示硫酸盐还原作用的强弱. SO_4^{2-} 和 Cl^- 的地球化学性质相似,且 Cl^- 只存在迁移作用,因此可用 Cl^- 作为 SO_4^{2-} 的修正.海水中氯离子和硫酸根离子摩尔比为定值0.05, Hines等^[21]指出, $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^- < 0.05$ 时,表明土壤中硫酸盐还原菌发生了硫酸盐还原作用以及存在硫化物沉淀作用.

在崇明东滩潮间带中, $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 摩尔比值在0.003 1~0.031 0,均小于0.05(图3),说明在崇明东滩的潮间带中,硫酸盐还原菌十分活跃地进行着硫酸盐还原作用和存在硫化物沉淀作用,验证了硫酸盐还原菌的存在对潮滩土壤中有机质的降解产生了一定影响.不同潮滩相同深度的 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 摩尔比值,均为光滩<高潮滩<中潮滩;而相同潮滩不同深度的,则为51~52 cm<21~22 cm.同一潮滩的不同取样深度,高潮滩或中潮滩的51~52 cm深度与21~22 cm深度相比, $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 的摩尔比急剧下降,而硫酸盐还原菌的数量却有不同程度的增加.尤其是

中潮滩,51~52 cm深度的硫酸盐还原菌数量远远高于21~22 cm深度,说明在51~52 cm深度硫酸盐还原菌的数量丰富,且在相对厌氧和有机质含量充分的条件下,进行着强烈的硫酸盐还原作用.

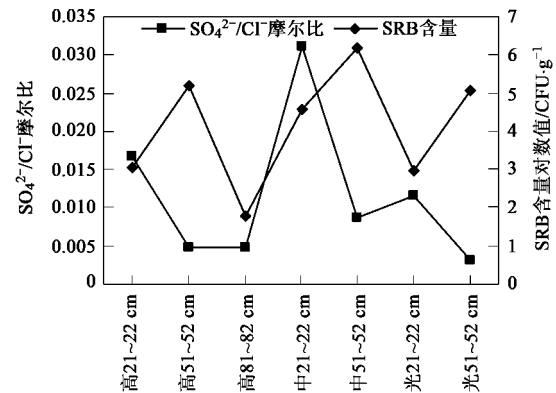


图3 土壤孔隙水中 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 与 SRB 的分布

Fig. 3 Distribution of $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ and SRB in soil

3.4 硫酸盐还原菌与根际环境的相关分析

植物根际环境会产生根系分泌物,其种类繁多包括低分子量的糖、氨基酸、有机酸及某些酚类物质,产生的根际效应改变着根际土壤的 pH、水分、盐分及营养成分等,从多方面影响根际微生物的种类和数量,因此被越来越多的学者所关注和研究^[22].

崇明东滩湿地主要有芦苇、海三棱藨草、互花米草、糙叶苔草各自形成植物群落或混生成群^[23],在这些植物的根际土壤环境中,硫酸盐还原菌的含量与非根际环境的含量有明显不同(图4),高潮滩芦苇根系土壤中硫酸盐还原菌的含量达到 2.73×10^6 CFU/g,藨草根系的含量为 2.75×10^4 CFU/g,中潮滩互花米草根系的含量为 8.45×10^2 CFU/g.与相同潮滩的非根基土壤中硫酸盐还原菌的含量相比,芦苇根际>中潮滩(51~52 cm)>高潮滩(51~52 cm)>藨草根际>互花米草根际,可见芦苇根际环境中的硫酸盐还原菌含量是最高的,比其他根际土壤高出2个数量级,是非根际环境(高潮滩51~52 cm)的18.4倍.项学敏^[24]等研究发现,湿地植物芦苇根际的细菌含量均大于非根际的含量,因此东滩湿地的芦苇根际环境产生的根际效应对硫酸盐还原菌的生长具有一定促进作用,使得硫酸盐还原菌大量生长.而藨草根际的硫酸盐还原菌含量比非根际环境的低. Darrah等^[25]曾用数学模型模拟了可溶性碳同根际微生物数量及死亡率的垂直与水平分布,发现根际微生物数量的水平分布与根周围可溶性碳的分布距离有关,微生物生物量的积累有赖于根分

泌物的释放. 因此, 可能的原因是由于蘆草根系的根际分泌物含量未能达到硫酸盐还原菌大量生长的要求. 而互花米草根际环境中的硫酸盐还原菌含量是最低的, 比非根际环境相差了 3 个数量级, 贺永华等^[22]指出, 植物种类的不同会产生抑制微生物生长的物质, 具体的作用效果取决于植物根际环境的理化特性是否符合微生物的生长环境, 因此可能的原因是互花米草根际产生的根际分泌物抑制了硫酸盐还原菌的生长. 根系分泌物和根际微生物种类繁多, 数量庞大, 影响因素复杂, 不同根际环境产生的根际效应对东滩硫酸盐还原菌生长的影响还有待深入地分析研究.

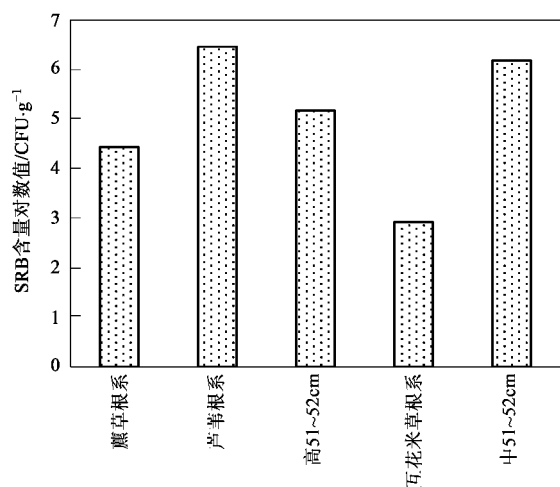


图 4 不同根际硫酸盐还原菌的含量

Fig. 4 Distribution of SRB in different rhizosphere soil

4 结论

(1) 在崇明东滩潮间带中, 硫酸盐还原菌数量均显示为 51 ~ 52 cm > 21 ~ 22 cm > 81 ~ 82 cm; 说明东滩湿地中潮滩 51 ~ 52 cm 的土壤深度是硫酸盐还原菌生长的主要层位, 与存在适于硫酸盐还原菌生长的条件有关.

(2) 不同潮滩相同深度的土壤中, 显示为高潮滩的有机质含量最高; 相同潮滩不同深度的土壤中, 随着深度的增加, 均呈由上到下逐渐减少的趋势, 有机质含量减少的同时硫酸盐还原菌的数量却大幅增加, 说明硫酸盐还原菌参与的硫酸盐还原作用对土壤有机质降解有明显影响.

(3) 东滩潮间带土壤 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 摩尔比值均 < 0.05, 说明硫酸盐还原菌十分活跃地进行着硫酸盐还原作用, 验证了硫酸盐还原菌的存在对潮滩土壤中有机质的降解产生了一定影响.

(4) 芦苇根际的硫酸盐还原菌含量最高, 说明

东滩湿地芦苇的根际环境对硫酸盐还原菌的生长具有促进作用. 而蘆草根际的硫酸盐还原菌数量相对非根际环境较低, 说明不同的根际环境产生的根际效应对东滩硫酸盐还原菌的生长有不同的影响, 有待深入地分析研究.

参考文献:

- [1] 刘兴土. 我国湿地的主要生态问题及治理对策[J]. 湿地科学与管理, 2007, 1(3): 18-22.
- [2] 张士萍, 张文俊, 李艳丽, 等. 崇明东滩湿地土壤生物活性差异性及其环境效应分析[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 112-118.
- [3] 杨茜, 李颖. 盐度对海滨盐沼细菌生长和活性影响的初步研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2007, 43: 295-301.
- [4] 孙炳寅, 经美德. 废黄河口盐沼土硫酸盐还原速率的研究[J]. 应用生态学报, 1990, 1(3): 248-253.
- [5] 李颖, 刘常宏, 安树青. 海岸盐沼湿地土壤硫循环中的微生物及其作用[J]. 生态学杂志, 2007, 26(4): 577-581.
- [6] 丁浩, 凌云, 徐亚同, 等. 梦清园芦苇湿地根际微生物特性初步研究[J]. 四川环境, 2007, 26(2): 6-10.
- [7] 徐晓军, 王华, 由文辉, 等. 崇明东滩互花米草群落中底栖动物群落动态的初步研究[J]. 海洋湖泊通报, 2006, (2): 89-95.
- [8] 梅雪英, 张修峰. 崇明东滩湿地自然植被演替过程中储碳及固碳功能变化[J]. 应用生态学报, 2007, 18(4): 933-936.
- [9] 裴希超, 许艳丽, 魏巍. 湿地生态系统土壤微生物研究进展[J]. 湿地科学, 2009, 7(2): 181-186.
- [10] 王亮, 张彤. 崇明东滩 15 年动态发展变化研究[J]. 上海地质, 2005, (2): 8-10.
- [11] 袁兴中, 陆健健. 长江口岛屿湿地的底栖动物资源研究[J]. 自然资源学报, 2001, 16(1): 37-41.
- [12] 徐宏发, 赵云龙. 上海市崇明东滩鸟类自然保护区科学考察集[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005.
- [13] 何小勤, 戴雪荣, 刘清玉, 等. 长江口崇明东滩现代地貌过程实地观测与分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(2): 23-27.
- [14] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [15] 王才良. 中国化工产品分析方法手册(无机分册)[M]. 北京: 中国农业出版社, 1992.
- [16] Otero X L, Macias F. Spatial and seasonal variation in heavy metals in interstitial water of salt marsh soils[J]. Environmental Pollution, 2002, 120: 183-190.
- [17] 杜冠华, 李素艳, 郑景明, 等. 洞庭湖湿地土壤有机质空间分布及其相关性研究[J]. 现代农业科学, 2009, 16(2): 21-23.
- [18] 陈皓文. 胶州湾潮间带和沿岸区硫酸盐还原菌含量分布[J]. 海洋环境科学, 1999, 18(2): 27-30.
- [19] 白军红, 邓伟, 张玉霞, 等. 洪泛区天然湿地土壤有机质及氮素空间分布特征[J]. 环境科学, 2002, 23(2): 77-81.
- [20] 王红丽, 肖春玲, 李朝君, 等. 崇明东滩湿地土壤有机碳空间分异特征及影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1522-1528.
- [21] 李艳丽, 肖春玲, 王磊, 等. 上海崇明东滩两种典型湿地土壤有机碳汇聚能力差异及成因[J]. 应用生态学报, 2009, 20(6): 1310-1316.
- [22] Hines M E, Evans R S, Sharak B R, et al. Molecular phylogenetic and biogeochemical studies of sulfate-reducing bacteria in the rhizosphere of *Spartina alterniflora*[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, 65(5): 2209-2216.
- [23] 贺永华, 沈东升, 朱荫渭. 根系分泌物及其根际效应[J]. 科技通报, 2006, 22(6): 761-765.
- [24] 宋国贤, 朱丽莎, 钮栋梁. 崇明东滩湿地的保育与利用[J]. 人民长江, 2009, 40(8): 31-34.
- [25] 项学敏, 宋春霞, 李彦生, 等. 湿地植物芦苇和香蒲根际微生物特性研究[J]. 环境保护科学, 2004, 30(124): 35-38.
- [26] Darrah P R, Jungk A. Phosphatase activity in the rhizosphere and its relation to the depletion of soil organic phosphorus[J]. Biol Fertil Soil, 1991, 3: 199-204.