

红树林区微生物资源*

龙寒 向伟 庄铁城 林鹏**

(厦门大学生命科学院, 厦门 361005)

摘要 随着工业的迅猛发展,工业废料源源不断地向海洋输出,污染日趋严重。人们在大力开发海洋微生物自净能力的同时,也对海岸线的绿色卫士——红树林给予了密切关注,积极展开红树林区微生物资源的开发利用。本文从红树林区微生物库的资源多样性、微生物在物质循环和能量流动中的作用、生理活性物质、代谢产物和污染治理等几个方面进行综述。

关键词 红树林,微生物,生理活性物质,代谢产物,污染处理

中图分类号 Q93 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2005)06-0696-07

Microorganism resource of mangrove ecosystems. LONG Han, XIANG Wei, ZHUANG Tiecheng, LIN Peng (School of Life Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(6):696~702.

With the rapid development of industry, more and more industrial waste is constantly exported to the ocean which causes serious pollution problems. Researchers are paying more attention to the mangrove, the important guard of the coastline, and the exploitation of mangrove microorganism resource has been expanded in many aspects, as well as developing the self-clean ability of ocean microorganism. This review summarized the diversity of mangrove microorganism resource, the role of microorganism in material recycle and energy flow, physiological active material, metabolic product and pollution management.

Key words mangrove, microorganism, physiological active matter, metabolic production, pollution management.

1 引言

红树林在热带亚热带的海岸潮间带构建了一片美丽的海上森林,虽然它占据的陆地面积不到全球陆地面积的千分之一,却以相当于亚马逊热带雨林的高生产力与珊瑚礁、上升流、海滨沼泽湿地组成了四大海洋高生产力生态系统。其特殊的生长环境创造了极为丰富又极具特色的微生物资源。近年来的红树林微生物研究工作中,已分离出了许多特殊功能菌,其中包括对各类污染物有较强降解能力的微生物,生理活性物质和代谢产物研究也相继展开。人们对于红树林微生物的认识,从“被忽视”的空白至“重要一环”并具有“多功能”的环境效应;从宏观深入到微观;从平面到立体;从群落结构到分子水平。人类已经意识到红树林对地球环境保护和生物资源开发具有的不可忽视作用。红树林微生物资源的开发是红树林资源开发不可缺少的部分,应当继续加强和拓宽其研究内容,为红树林生态系统更好的开发和利用提供更多的微生物资料。

2 红树林中微生物库的资源多样性

红树林生活在热带亚热带海岸潮间带,其生境具有强还原性、强酸性、高含盐量、营养丰富^[12]等特征。因此,这里的微生物资源既丰富又不失特色,主要类群为细菌、真菌、放线菌、微型藻类等。其中已分离鉴定出的红树林真菌超过百种,成为海洋真菌第二大类群^[58,92]。在热带红树林中,微生物的组成大致为:细菌和真菌占微生物资源总量的91%,藻类和原生动物分别占7%和2%^[35,92]。目前,已发现并且分离出许多新的菌种,例如我国新发现的两个海生疫霉种(泡囊海疫霉、刺囊海疫霉)^[31]、II型甲烷氧化菌等。正在研究中的红树林微生物有高效固氮菌、溶磷细菌、硫化还原菌、光合厌氧菌、产甲烷菌及红树林真菌。

在红树林生态系统中,固氮率的高低和植物体呼吸、根、树皮、林下土壤、蓝细菌、沉积物及覆于其

*国家自然科学基金资助项目(30270272)。

**通讯作者

收稿日期:2004-06-17 改回日期:2004-08-16

上的腐解枝叶等因素有关。红树林内积累着大量生物降解产生的有机物,这些有机物为固氮提供大量的能量,所以,在红树林内发现高效固氮菌是很正常的。在红树林中,乙炔还原比率同有机物可利用性有着明显的相关性,林下非固氮微生物通过分解凋落物为固氮提供了足够能量,因此,凋落物分解过程中氮含量的增加不会受到外来碳源的影响。而在无红树林区,外来碳源的加入会显著提高固氮率^[93,94]。从红树林区中分离的固氮微生物包括自生固氮菌、联合固氮菌和共生固氮菌,其中大部分蓝细菌均具有高效固氮活性。Sengupta等^[78]从不同种类红树林沉积物、根际及根表分离出的固氮菌分别归属于固氮螺菌属(*Azospirillum*)、固氮菌属(*Azotobacter*)、根瘤菌属(*Rhizobium*)、梭菌属(*Clostridium*)和克雷伯氏菌属(*Klebsiella*);Holgoin等^[55]从墨西哥的大红树(*Rhizophora mangle*)、亮叶白骨壤(*Avicennia germinans*)和假红树(*Laguncularia racemosa*)林中也分离出 *Vibrio campbelli*, *Listonella anguillarum*, *Vibrio aestuarianus* 和 *Phyllobacterium* sp. 等固氮菌。另外,同位素示踪发现,这些固氮菌确能在红树植物体内定居并向植物根部提供无机氮,促进红树植物的生长发育^[26,40,49,85]。在澳大利亚南部的红树林生态系中,凋落物及表面沉积物的固氮量能提供全年氮需求的40%^[86];在佛罗里达的红树林,生物固氮能满足该生态系60%的氮需求量^[93]。可见,固氮作用是红树林生态系统中细菌的重要功能之一。

以往红树林研究中,对微生物溶磷作用的研究不多,对溶磷细菌(Phosphate-solubilizing bacteria)的研究也就相对较少。在对墨西哥红树林的研究中,研究者们从黑红树(Black mangrove)根部分离出了9种溶磷细菌(*Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus atrophaeus*, *Paenibacillus macerans*, *Xanthobacter agilis*, *Vibrio proteolyticus*, *Enterobacter aerogenes*, *E. taylorae*, *E. asburiae*, 和 *Kluyvera cryocrescens*),从假红树中分离出3种溶磷细菌(*Bacillus. licheniformis*, *Chryseomonas luteola*, 和 *Pseudomonas stutzeri*)^[87],其中, *Xanthobacter*, *Kluyvera* 和 *Chryseomonas* 是首次红树林中发现,也是首次发现这3种细菌具有固氮能力。Vazquez等^[87]在添加了磷酸钙的培养基上对这些分离出来的细菌进行培养,发现在生长的菌落周围会出现透明圈,从而首次证明了这些种类细菌的溶磷能力。溶磷细菌为红树

林植物提供了可溶性磷,在红树植物的生长发育中起着不可忽视的作用。

由于红树林沉积物的氧含量几乎为零,在这里发生的分解作用主要通过硫化还原进行。硫化还原菌(Sulfate-reducing bacteria)作为沉积物中有机物的主要分解者普遍存在于红树根际和林下沉积物中。例如,印度果阿红树林沉积物中硫化还原菌的种群密度为 10^3 cfu \cdot g⁻¹^[76];在佛罗里达大红树和亮叶白骨壤的根际,硫化还原菌的种群密度达到了 10^6 cfu \cdot g⁻¹(鲜重)^[93]。红树林生态系统含硫丰富及厌氧的土壤环境也为另一细菌群体的生存繁殖提供了很好的条件,这就是光合厌氧菌(Photosynthetic anoxygenic bacteria),包括紫色硫细菌(purple sulfur bacteria)、紫色非硫细菌(purple non-sulfur bacteria)和绿色非硫细菌(green non-sulfur bacteria)。可能由于这类细菌生长缓慢,难于在实验室培养,故红树林内这类细菌的研究报道并不多见,目前已分离鉴定的科属包括:着色菌科(Chromatiaceae)和红螺菌科(Rhodospirillaceae)^[88,89],着色菌属(*Chromatium*)、贝氏硫细菌属(*Beggiatoa*)、板硫菌属(*Thiopedia*)、*Chloronema*、*Leucothiobacteria*^[45,48]、*Rhodobacter*、*Rhodopseudomonas*^[80]等。另外,硫化还原菌和一些光合厌氧菌也具有固氮功能^[53,93]。在红树林生态系统中还生活着另一种重要的细菌群落——产甲烷菌,研究人员已分离出 *Methanococcus methylutens*^[65] 和4种未鉴定耐热产甲烷菌^[62]。产甲烷菌的数量会受到硫化还原菌的限制^[70]。就研究最多的红树林真菌而言,目前已分离鉴定的红树林真菌种类超过了100种,红树植物区系多样性、群落年龄、群落周围陆栖树种以及微生境的差异造成了各个红树林区真菌种数的差异^[56]。

红树林细菌除具有上述固氮、溶磷等功能特性外,还具有在一定盐胁迫下生长的特性,这是由红树林生态系统的环境特点决定的。红树林区为盐生环境^[12],其中的微生物具有一定的耐盐和嗜盐性。红树林耐盐及嗜盐微生物资源的研究也正在起步中。嗜盐微生物是光能转化蛋白膜——紫膜提取的主要原料,是细菌视紫红质(BR)的生产者,二者均为应用前景极佳的生物分子光电材料和光存储材料^[54,64]。嗜盐微生物的代谢产物多种多样,包括胞外多糖、维生素、抗生素胰岛素等等^[17]。特别值得一提的是,嗜盐微生物所产生的酶在高盐条件下仍具有很高活性,因此它们在污染物降解——尤其是

高盐环境中的污染物降解起到了非常重要的作用^[61]。在医学上,嗜盐菌产生的具热塑性、生物降解和生物相容性的聚羟基丁酸可用于可降解生物材料的开发^[7];在农业上,通过转基因技术将嗜盐微生物的一定基因片段转入农作物中,可提高作物的抗盐性^[3]。此外,耐盐、嗜盐微生物在食品工业、石油开采等方面均有广泛的应用^[7]。

3 红树林微生物在物质循环和能量流动中的作用

红树林生态系统的生产力极高^[11~16],这归功于它所拥有的高效营养循环系统^[2,4,12,60]。因为在红树林生态系统中,只有少量的营养保留,新的营养不断从腐烂的红树树叶中产生,微生物的活动在其中起到了非常主要的作用^[36,38,55],是驱动红树林生态系统中营养转化的主要因素之一^[9,59,69,70,90]。

生活在热带红树林沉积物中的细菌促使了大部分碳流的形成。它们推动了大部分的能量流动和营养流动,担当着碳沉降的角色^[39]。红树林沉积物中的细菌群落能够消耗溶解在间隙水中的有机碳,通过这种方式防止了该种形式的碳流失到临近的生态系统中^[35,36,37,43]。溶解在间隙水中的有机碳浓度高于沉积物上方水层中的有机碳浓度,而在这两个水层之间碳的净通量为零。具有很高活力和生产力的细菌群落在沉积物中大量繁殖。虽然间隙水中溶解的游离氨基酸与上层潮汐水中的氨基酸浓度具有很大的梯度,但在这两个水层之间没有发现氨基酸的流动^[82]。所以说,在热带红树林中,细菌群落消耗绝大多数溶解在间隙水中的碳。在河口,大量的碳通过光合作用被固定,固定的碳堆积在沉积物中,被细菌在厌氧条件下矿化,细菌从这个过程获得能量用于自身生长,而代谢所产生的能量则通过碎屑食物链依次传递给无脊椎动物和鱼类。通过对河口淤泥和盐沼泥炭的测定表明,厌氧微生物的新陈代谢,特别是硫的循环,引起了大部分生态系统中大部分能量的流动^[46],因此可以说在红树林中细菌作为循环者要比作为营养者更为出色^[52]。

红树林生态系统中各类氮化物的比率和流动取决于系统的特性^[52]。在墨西哥红树林中,研究者在测定氮的流失时发现,由于反硝化作用而导致的氮流失是可以忽略的^[74],这显示氮在被以氮气释放进大气前就已经被消耗了。细菌和植物对系统中可利用氮的竞争可能很强烈,沉积物中的由含氮有机化合物分解而来的硝酸盐可能在细菌的作用下转化

成为铵离子,被细菌和植物吸收,这个过程保存了生态系统中的氮^[72,73]。除此之外,异化的硝酸盐转化成铵(dissimilatory nitrate reduction to ammonium)^[84]或铵可能为无氧氧化(the possible anaerobic oxidation of ammonium)^[57]也可能为系统保存了氮。

Bano等^[39]研究发现,在热带和亚热带红树林生态系统中生活着多种多样的具有高生产力微生物群体,它们不断地把死掉的红树植物中的营养转化为能够被植物利用的氮、磷和其他形式的营养,与此同时,植物体也为生活在这个生态系统中的微生物提供食物来源。营养物质作为微生物和植物之间的桥梁使二者之间建立起非常亲密的关系,营养物质的循环和存储就是建立二者关系的机制^[52]。

红树的叶和枝干在凋落后就为林下微生物占据并立即开始被分解。在分解过程中,腐烂的叶和枝干中的总氮、磷浓度以及蛋白质含量随时间而增加。van der Valk等^[86]研究白骨壤叶片分解,105 d时,由于碳的流失导致氮浓度由0.7%增加到1.2%,而整个落叶层由于林下微生物的固氮作用使得氮由41%增加到64%;凋落的*Rhizophora* spp. 枝干在分解的最初两个月内,氮含量增加了500%^[75];巴拿马海湾中红树叶片在经27 d分解后,干重减少了50%,而氮浓度由0.3%增加到2.9%(干重),磷的浓度由0.04%增加到0.13%(干重)^[47]。Odum等^[66]发现,刚凋落的红树叶片中蛋白质含量仅为6%,6个月后,叶片蛋白质增加到20%,这可能是脂肪、碳水化合物转化的结果。

4 代谢产物的研究

随着人类对陆地资源的大力开发,继续从中寻找新的微生物药物及化合物资源已愈加困难。面对各种新型病毒的不断产生以及病毒抗性对传统药物的逐渐适应,人类开始把目光投向海洋资源,而四大海洋生态系统之一的红树林也已经受到人们的关注。1989年Poch等^[67]从夏威夷红树林内生真菌中分离出helascolidesA、B和赭曲霉毒素;1991年又从该地区内生真菌中分离到AuranticinsA、B(其中A具有显著抗菌活性,可抑制枯草芽孢杆菌和金黄色葡萄球菌生长)^[68];1998年Schlingmann等^[77]分离的*Hypoxylon oceanicum*可产生一系列脂肪缩酚肽和大环内脂化合物(其产生的脂肪缩酚肽15G256可抑制真菌细胞壁合成)。近年来,我国的研究者已经开展了不少有关红树林内生真菌代谢物的研究,

分离了许多新型化合物和不少具抗菌活性、抗癌活性物质,其中包括首次在微生物中分离出的环(酪-脯)二肽^[32],首次从海洋真菌中分离出的尿囊素、5-对羟基苯乙基-2,4-咪唑烷二酮和环(苯丙-丙苯)二肽、新的聚酮类、连烯类化合物及型甘油单棕榈酸酯(-glycerol monopalmitate)、piliformic 酸(2-hexylidene-3-methylsuccinic acid)、对羟基苯甲酸(p-hydroxy benzoic acid)、3,4-二羟基苯甲酸甲酯(proto-catechuic acid methyl ester)、2-甲氧基-4-甲基-乙酰苯(4-hydroxy-2-methoxy-acetophenone)、麦角甾醇(ergosterol)等多种化合物,以及异香豆素、灰黄霉素和多种醌类抗生素等^[1,6,18,20,27]。

研究人员在对红树林内生真菌抗菌、抗肿瘤活性物质的研究中发现,红树植物内生真菌中存在着一定数量的抗肿瘤活性物质产生菌。在我国福建省厦门地区红树林植物中分离出的125株内生真菌中,有8.8%的菌株对HL-60或KB有抑制作用,其中以拟青霉属和曲霉属为主。该研究分离的两株高效活性菌株HQ1和FQ1对KB、HL-60、HeLa、BGC等肿瘤细胞具有显著的细胞毒素作用。研究HQ1和FQ10代谢产物,从HQ1的发酵液中分离到具有抗肿瘤活性的化合物布雷菲德菌素A,从FQ10的发酵液体中分离到一个纯化合物环(酪-脯)二肽,该化合物是首次在微生物中发现^[32]。

红树林以其生境的特殊性养育了大量具有特色代谢产物的微生物,肽类化合物(环肽类化合物)已越来越多地被从菌体和培养液中分离出来,例如,从南海红树林内生真菌1356发酵液中分离出来的多种鞘胺醇和环二肽(其中鞘胺醇A是一种新型的神经鞘胺醇葡萄糖苷,环Pro-Tyr可以诱导生物发光以及色素产生)^[21,24],从真菌2524培养液的乙酸乙酯提取物中分离的5个环二肽(其中两个环二肽A、B氢谱具异常化学位移,环二肽E则具镇静作用)^[5]。肽类化合物具有很强的生理活性,它们不仅是抗生素、毒素、免疫抑制剂、离子转移调节器、蛋白粘合抑制剂、酶抑制剂,它们还可以用来促进记忆、调节激素、调控能量代谢、抑制肿瘤细胞活性等。除了肽类、环肽类化合物外,对胞外多糖等一些大分子代谢产物的研究也在相继展开,我国研究者已在南海红树林内生真菌(endophytefungus)1356号的菌体中分离提取得到一种新的多糖W₂₁,并通过甲醇解初步研究了该多糖的组成^[28]。微生物胞外多糖在食品医药化工等众多领域广泛应用。早在80

年代,黄单胞菌多糖(黄原胶)(xanthan gum)就已作为食品添加剂获得世界卫生组织和粮农组织在世界范围使用的批准,而美国Kelco公司更是在60年代初就已开始了大量商业性生产。此后Kelco公司又将结冷胶(gellan gum)投入生产,这种由沼假单胞菌ATCC31431生产的线性阴离子杂多糖作为凝胶剂、增稠剂、悬浮剂和成膜剂在食品工业中的应用不逊于黄原胶。除此之外,它还被作为培养基凝固剂、胶囊、胶片、纤维等制品的制作材料广泛应用于工农业中。继黄原胶和结冷胶生产之后,凝结多糖(curdlan)又成为Kelco新推出的目标,该产品仍作为食品稳定剂、增稠剂致力于食品工业中的应用^[34]。在临床医学中,胞外多糖能作为机体免疫增效剂,增强机体抗肿瘤、抗细菌、抗病毒、抗寄生虫的性能^[19,29],有希望用以阻止癌症复发、微转移和HIV携带者症状的表现^[23]。微生物胞外多糖已有很多种被成功的应用到人们的生产生活中。除此之外,有研究将胞外多糖用于污水处理收到良好的效果^[33]。

5 红树林微生物酶资源

红树林生境非常特殊,因此微生物产酶情况也具有特殊性。在红树林内,凋落物非常丰富,在凋落物分解过程中微生物产生的酶以纤维素分解酶、木质素分解酶为主。实验表明,红树林区绝大多数真菌都能产生用于降解木质素、纤维素和其他植物成分的酶^[44,50,51,81],某些地区的放线菌也能产生纤维素酶^[90];另外,红树林内一些放线菌还产生如-淀粉酶抑制剂、胰蛋白酶抑制剂、胃蛋白酶抑制剂以及几丁质酶等生物活性物质^[26]。除主要的纤维素酶和木质素酶外,红树林微生物还生产如果胶酶、木聚糖酶、蛋白酶、葡萄糖酶、脂肪酶、淀粉酶和琼脂糖酶等用途广泛的酶类。例如,在台湾淡水河口的红树林真菌、放线菌大部分均能产生纤维素酶、果胶酶、蛋白酶、脂肪酶、琼脂糖酶^[90]。还有人从台湾海峡红树林土壤中分离到一株产纤维素酶的短小芽孢杆菌S-27,该菌只产生葡聚糖内切酶^[22]。在印度果阿的红树林中,异养细菌具有纤维素水解、果胶水解、淀粉水解和蛋白质水解活性^[63],而红树植物的降解真菌具有果胶酶、蛋白酶、淀粉酶活性并具有降解木质纤维素化合物的能力^[51]。红树林内微生物产酶多样化,这些酶类物质在医药卫生、工农业生产、生活资料加工上也都有着广泛的用途。纤维素酶的用

途就极为广泛,可在纺织工业中作为生物整理剂(如靛蓝牛仔服的酶洗和棉、Tencel、粘胶、黄麻、亚麻及其混纺织物的生物整理)、饲料生产中作为生物添加剂、果蔬加工中提高果汁或药物的萃取率,另外在石油开采、发酵工业、造纸、中成药加工、洗涤剂工业、垃圾治理等方面,纤维素酶和木质素酶都有着非常广泛的用途。因此,大力开发红树林微生物酶资源对生产生活具有重要意义。

6 红树林微生物对污染的治理作用

红树林位于河口入海处,是阻止陆地污染向海洋生态系统扩散的一道坚固大门,是海洋污染净化工程的重要参与者,而红树林微生物则是肩负这一重要使命不可替代的“特种兵”。红树林污染生态学的研究早在20世纪70年代就开始了,而直到90年代微生物在红树林污染生态中扮演的角色才逐渐引起人们的关注。在微生物对污染物的降解研究中,人们已发现红树林微生物在处理沿海排放的城市废水上起了很大作用,它们可能将废水中的重金属离子吸附固定,并利用废水中的营养物质,从而达到净化废水的目的^[83]。在对农药降解方面,经测定,红树林土壤微生物对甲胺磷具有较强的降解能力,某些细菌的降解率更是高达70%以上^[8,30]。在滨海油污的净化处理上,利用红树林微生物对海岸工业油污、船舶油污、原油泄漏等进行处理也收到了巨大的功效。研究人员发现红树林微生物对柴油的降解一个月内可达60%以上^[10];红树林土壤微生物对多环芳烃等有机物污染也有显著的清除作用^[25],研究者们还分离出了对油田钻井废液具降解活性的石油降解菌——产碱菌和微球菌^[41,42]。另外,利用红树林土壤内好氧嗜热微生物对海洋淤泥进行初期发酵以防止海洋淤泥的富营养化也是目前正在进行的红树林微生物开发利用项目之一^[91]。

红树林微生物对陆地、海洋污染的分解净化是多渠道多方面的,我们在不断分离高效的分解菌株的同时,应该利用分子技术和基因工程技术对现有菌株进行加工改造,以生产出分解效率更高、分解范围更广的工程菌。

参考文献

- [1] 王军,林永成,吴雄宇,等. 2001. 从红树林内生真菌 No. 2533 分离出新的异香豆素[J]. 中山大学学报(自然科学版), 40(1): 127~128.
- [2] 云南大学生物系. 1980. 植物生态学[M]. 北京: 人民教育出版社, 310~311.
- [3] 卢青. 2000. 植物耐盐性的分子生物学研究进展[J]. 生物学杂志, 17(4): 9~11.
- [4] 卢昌义, 林鹏. 1989. 两种红树植物叶分解速率的研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 27(6): 679~683.
- [5] 李厚金, 林永成, 刘晓红, 等. 2002. 红树林内生真菌 2524 号的肽类成分() [J]. 中山大学学报(自然科学版), 41(1): 110~112.
- [6] 朱峰, 林永成, 周世宁, 等. 2003. 南海红树林内生真菌 2534 号代谢产物的研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 42(1): 52~54.
- [7] 刘爱民. 2002. 嗜盐菌的研究进展[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 25(2): 181~193.
- [8] 庄铁诚, 张瑜斌, 林鹏. 2000. 红树林土壤微生物对甲胺磷的降解[J]. 应用环境生物学报, 6(3): 276~280.
- [9] 庄铁城, 林鹏. 1992. 九龙江口秋茄红树林凋落叶自然分解与落叶腐解微生物的关系[J]. 植物生态学与地植物学学报, 16(1): 17~25.
- [10] 庄铁诚, 林鹏. 1995. 红树林下土壤微生物对柴油的降解[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 34(3): 442~446.
- [11] 林鹏. 1990. 红树林研究论文集(第1集)[C]. 厦门: 厦门大学出版社, 23~30.
- [12] 林鹏. 1997. 中国红树林生态系[M]. 北京: 科学出版社, 23~30.
- [13] 林鹏, 尹毅, 卢昌义. 1992. 广西红海榄群落的生物量和生产力[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 31(2): 199~202.
- [14] 林鹏, 卢昌义. 1985. 九龙江口红树林研究. 秋茄群落的生物量和生产力[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 24(4): 508~514.
- [15] 林鹏, 卢昌义, 王恭礼, 等. 1990. 海莲红树林的生物量和生产力[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 29(2): 209~213.
- [16] 林鹏, 陈荣华. 1991. 红树林有机碎屑在河口生态系统中的作用[J]. 生态学杂志, 10(2): 45~48.
- [17] 张永光, 李文均, 姜成林, 等. 2002. 嗜盐放线菌的研究进展[J]. 微生物学杂志, 22(4): 45~48.
- [18] 陈光英, 刘晓红, 温露, 等. 2003. 南海红树林内生真菌 1893 代谢产物研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 42(1): 49~54.
- [19] 杜宇野. 1995. 香菇研究进展[J]. 中国食用菌, 14(4): 9~11.
- [20] 吴雄宇, 李曼玲, 胡谷平, 等. 2002. 南海红树林内生真菌 2508 代谢物研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 42(3): 34~36.
- [21] 吴雄宇, 林永成, 冯爽, 等. 2001. 海南红树林内生真菌 1356 代谢产物的研究[J]. 热带海洋学报, 20(4): 80~86.
- [22] 杨智源, 陈荣忠, 杨丰, 等. 2001. 短小芽孢杆菌葡聚糖内切酶基因的克隆及序列测定[J]. 微生物学报, 40(1): 76~81.
- [23] 周卫东, 刘如林, 邢邦华, 等. 1997. 深层发酵香菇水溶性胞外多糖的生物学活性[J]. 菌物系统, 16(3): 220~207.
- [24] 周世宁, 林永成, 吴雄宇, 等. 2002. 海洋真菌与细菌发酵物中的环二肽[J]. 微生物学通报, 29(3): 59~62.
- [25] 郑天凌, 庄铁城, 蔡立哲, 等. 2001. 微生物在海洋污染环境中的生物修复作用[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 40(2): 524~534.
- [26] 郑志成, 周美英, 姚炳新. 1989. 红树林根系放线菌的组成[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 28(3): 306~310.
- [27] 姜广策, 林永成, 周世宁, 等. 2003. 中国南海红树林内生真菌 No. 1403 次级代谢物研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 39(6): 119.
- [28] 胡谷平, 余志刚, 吴耀文, 等. 2002. 南海海洋红树林内生真菌胞外多糖的研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 41(1): 121~122.
- [29] 胡承钰, 王三英. 2001. 细菌胞外多糖复合应用的免疫增强作用[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 40(5): 1129~1132.
- [30] 郑天凌, 庄铁城, 蔡立哲, 等. 2001. 微生物在海洋污染环境中的生物修复作用[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 40(2): 524~534.

- [31] 曾会才,郑服丛,贺春萍. 2001. 海南红树林生境中海疫霉种的分离与鉴定[J]. 菌物系统, **20**(3):310~315.
- [32] 郑忠辉,缪莉,黄耀坚,等. 2002. 红树植物内生真菌的抗肿瘤活性[J]. 厦门大学学报(自然科学版), **42**(4):513~516.
- [33] 潘道东,陈杰,韩正康,等. 2002. 胞外多糖 Pullulan 处理养猪场污水效果[J]. 畜牧与兽医, **34**(1):23~24.
- [34] 魏培莲. 2002. 微生物胞外多糖研究进展[J]. 浙江科技学院学报, **14**(2):8~12.
- [35] Alongi DM. 1988. Bacterial productivity and microbial biomass in tropical mangrove sediments[J]. *Microb. Ecol.*, **15**:59~79.
- [36] Alongi DM. 1994. The role of bacteria in nutrient recycling in tropical mangrove and other coastal benthic ecosystems[J]. *Hydrobiologia*, **285**:19~32.
- [37] Alongi DM, Boto KG, Tirendi F. 1989. Effect of exported mangrove litter on bacterial productivity and dissolved organic carbon fluxes in adjacent tropical nearshore sediments[J]. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **56**:133~144.
- [38] Alongi DM, Christoffersen P, Tirendi F. 1993. The influence of forest type on microbial-nutrient relationships in tropical mangrove sediments[J]. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **171**:201~223.
- [39] Bano N, Nisa MU, Khan N, et al. 1997. Significance of bacteria in the flux of organic matter in the tidal creeks of the mangrove ecosystem of the Indus river delta, Pakistan[J]. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **157**:1~12.
- [40] Bashan Y, Puente ME, Myrold DD, et al. 1998. In vitro transfer of fixed nitrogen from diazotrophic filamentous cyanobacteria to black mangrove seedlings[J]. *FEMS Microbiol. Ecol.*, **26**(3):165~170.
- [41] Benkacoker MO, Olumgin A. 1995. Waste drilling-fluid-utilising microorganisms in a tropical mangrove swamp oilfield location[J]. *Bioresour. Technol.*, **53**(3):211~215.
- [42] Benkacoker MO, Olumgin A. 1996. Effects of waste drilling fluid on bacterial isolates from a mangrove swamp oilfield in the Niger Delta of Nigeria[J]. *Bioresour. Technol.*, **55**(3):175~179.
- [43] Boto KG, Alongi DM, Nott ALJ. 1989. Dissolved organic carbon-bacteria interactions at sediment-water interface in a tropical mangrove system[J]. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **51**:243~251.
- [44] Bremer GB. 1995. Lower marine fungi (*Labyrinthulomycetes*) and the decay of mangrove leaf litter[J]. *Hydrobiologia*, **295**:89~95.
- [45] Chandrika V, Nair PVR, Khambhadkar LR. 1990. Distribution of phototrophic thionic bacteria in the anaerobic and micro-aerophilic strata of mangrove ecosystem of Cochin[J]. *J. Mar. Biol. Assoc. India*, **32**:77~84.
- [46] Day JW Jr eds. 1989. Microbial ecology and organic detritus in estuaries[A]. In: Day JW Jr, eds. Estuarine Ecology[C]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 257~308.
- [47] D' Croz L, Del Rosario J, Holness R. 1989. Degradation of red mangrove (*Rhizophora mangle*) leaves in the bay of Panama[J]. *Rev. Biol. Trop.*, **37**:101~104.
- [48] Dhevendaran K. 1984. Photosynthetic bacteria in the marine environment at Porto-Novo[J]. *Fish Technol. Soc. Cochín.*, **21**:126~130.
- [49] Ellison AM, Farnsworth EJ, Twilley RR. 1996. Facultative mutualism between red mangrove and root-fouling sponges in Belizean mangal[J]. *Ecology*, **77**(8):2431~2444.
- [50] Fell JW, Master IM, Wiegert RG. 1984. Litter decomposition and nutrient enrichment[A]. In: The Mangrove Ecosystem: Research Methods (Monograph on oceanographic methodology, 8) [C]. Paris: UNESCO, 239~251.
- [51] Findlay RH, Fell JW, Coleman NK, et al. 1986. Biochemical indicators of the role of fungi and thraustochytrids in mangrove detrital systems[A]. In: Moss ST, ed. The biology of marine fungi [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 91~104.
- [52] Gna H, Patricia V, Yoav B. 2001. The role of sediment microorganisms in the productivity, conservation, and rehabilitation of mangrove ecosystems: An overview[J]. *Biol. Fert. Soils*, **33**(4):265~278.
- [53] Gotto JW, Taylor BF. 1976. N₂ fixation associated with decaying leaves of the red mangrove (*Rhizophora mangle*) [J]. *Appl. Environ. Microbiol.*, **31**:781~783.
- [54] Haronian D, Lewis A. 1991. Element of a unique bacteriorhodopsin neural network architecture[J]. *Appl. Optics*, **30**(5):597~608.
- [55] Holguin G, Bashan Y, Mendoza-Salgado RA, et al. 1999. Microbiology of mangroves, forests in the frontier between land and sea[J]. *Ciencia Desarrollo*, **25**(144):26~35.
- [56] Hyde KD, Lee SY. 1995. Ecology of mangrove fungi and their role in nutrient cycling: What gaps occur in our knowledge? [J]. *Hydrobiologia*, **295**(1~3):107~188.
- [57] Jetten MSM, Strous M, van de Pas-Schoonen KT, et al. 1998. The anaerobic oxidation of ammonium[J]. *FEMS Microbiol. Rev.*, **22**:421~437.
- [58] Jones EBG, Hyde KD. 1988. Methods for the study of marine fungi from the mangroves[A]. In: Agate AD, eds. Mangrove Microbiology: Role of Microorganism in Nutrient Cycling of Mangrove Soils and Waters[C]. Paris: UNDP/ UNESCO, 9~27.
- [59] Köhlmeyer J, Bebout B, Volkman KB. 1995. Decomposition of mangrove wood by marine fungi and teredinids in Belize[J]. *Mar. Ecol.*, **16**:27~39.
- [60] Lu CY, Lin P. 1990. Studies on litter fall and decomposition of *Bruguiera sexangula* (Lour) poir community on Hainan Island, China[J]. *Bull. Mar. Sci.*, **47**(1):139~148.
- [61] Maltseva O, Oriol P. 1997. Monitoring of an alkaline 2,4,6-trichlorophenol-degrading enrichment culture by DNA fingerprinting methods and isolation of the responsible organism, *Haloalkaliphilic Nocardioides* sp. strain M6 [J]. *Appl. Environ. Microbiol.*, **63**:4145~4149.
- [62] Marty DG. 1985. Description of four souches methanogenes thermotolerantes isolees of interial or marine sediments[J]. *C. R Acad. Sci.*, **300**:545~548.
- [63] Matondkar SGP, Mahtani S, Mavinkurve S. 1981. Studies on mangrove swamps of Goa. I. Heterotrophic bacterial flora from mangrove swamps[J]. *Mahasagar Bull. Nat. Inst. Oceanogr.*, **14**:325~327.
- [64] Miyasaka T, Koyama K, Itoh I. 1992. Science quantum conversion and image detection by a bacteriorhodopsin-based artificial photoreceptor[J]. *Science*, **255**(1):342~344.
- [65] Mohanraju R, Rajagopal BS, Daniels L, et al. 1997. Isolation and characterization of a methanogenic bacterium from mangrove sediments[J]. *J. Mar. Biotechnol.*, **5**:147~152.
- [66] Odum WE, Heald EJ. 1975. Mangrove forests and aquatic productivity[A]. In: Hasler AD, ed. Coupling of Land and Water Systems: Ecological Study No. 10 [C]. New York: Springer-Verlag, 129~136.
- [67] Poch GK, Goer J. 1989. Helicascolides A and B: New lactones from the marine fungus *Helicascus kanaloanus* [J]. *J. Natl. Prod.*, **52**:257~260.
- [68] Poch GK, Goer J. 1991. Auranticens A and B: Two new depsidones from a mangrove isolate of the fungus *Preussia aurantiaca* [J]. *J. Natl. Prod.*, **54**:213~217.
- [69] Raghukumar S, Sharma S, Raghukuma C, et al. 1994. Thraustochytrid and fungal component of marine detritus. 4. Laboratory studies on decomposition of leaves of the mangrove *Rhizophora apiculata* Blume[J]. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **183**(1):113~131.
- [70] Raghukumar S, Sathepatak V, Sharma S, et al. 1995. Thraus-

- tochytrid and fungal component of marine detritus. 3. Field studies on decomposition of leaves of the mangrove *Rhizophora apiculata*[J]. *Aquat. Microb. Ecol.* ,**9**(2):117~125.
- [71] Ramamurthy T, Raju RM, Natarajan R. 1990. Distribution and ecology of methanogenic bacteria in mangrove sediments of Pitchavaram, east coast of India[J]. *Indian J. Mar. Sci.* ,**19**:269~273.
- [72] Rivera-Monroy VH, Day WJ, Twilley RR, et al. 1995a. Flux of nitrogen and sediment in a fringe mangrove forest in Terminos lagoon, Mexico[J]. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* ,**40**:139~160.
- [73] Rivera-Monroy VH, Twilley RR, Boustany RG, et al. 1995b. Direct denitrification in mangrove sediments in Témminos Lagoon, Mexico[J]. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* ,**126**:97~109.
- [74] Rivera-Monroy VH, Twilley RR. 1996. The relative role of denitrification and immobilization in the fate of inorganic nitrogen in mangrove sediments (Témminos Lagoon, Mexico)[J]. *Limnol. Oceanogr.* ,**41**:284~296.
- [75] Robertson AI, Daniel PA. 1989. Decomposition and the annual flux of detritus from fallen timber in tropical mangrove forests[J]. *Limnol. Oceanogr.* ,**34**:640~646.
- [76] Saxena D, LokarBharathi PA, Chandramohan D. 1988. Sulfate reducing bacteria from mangrove swamps of Goa, central west coast of India[J]. *Indian J. Mar. Sci.* ,**17**:153~157.
- [77] Schingmann G, Milne L, Williams DR, et al. 1998. Cell wall active antifungal compounds produced by the marine fungus *Hypoxylon oceanicum* LL-15 G256. II. Isolation and structure determination[J]. *J. Antibiot.* ,**51**(3):303~316.
- [78] Sengupta A, Chaudhuri S. 1990. Halotolerant Rhizobium strains from mangrove swamps of the Ganges River Delta[J]. *Indian J. Microbiol.* ,**30**:483~484.
- [79] Sengupta A, Chaudhuri S. 1991. Ecology of heterotrophic dinitrogen fixation in the rhizosphere of mangrove plant community at the Ganges River Estuary in India[J]. *Oecologia* ,**87**:560~564.
- [80] Shoreit AAM, El-Kady IA, Sayed WF. 1994. Isolation and identification of purple nonsulfur bacteria of mangal and non-mangal vegetation of Red Sea Coast, Egypt[J]. *Limnologica* ,**24**:177~183.
- [81] Singh N, Steinke TD. 1992. Colonization of decomposing leaves of *Bruguiera gymnorrhiza* (Rhizophoraceae) by fungi, and in vitro cellulolytic activity of the isolates[J]. *South Afric. J. Bot.* ,**58**(6):525~529.
- [82] Stanley SO, Boto KG, Alongi DM, et al. 1987. Composition and bacterial utilization of free amino acids in tropical mangrove sediments[J]. *Mar. Chem.* ,**22**:13~30.
- [83] Tam NFY. 1998. Effects of wastewater discharge on microbial population and enzyme activities in mangrove soils[J]. *Environ. Poll.* ,**102**(2~3):233~242.
- [84] Tiedje JM. 1988. Ecology of denitrification and dissimilatory nitrate reduction to ammonium[A]. In: Zehnder AJB, ed. *Biology of Anaerobic Microorganisms*[C]. New York: Wiley, 179~244.
- [85] Toledo G, Bashan Y, Soeldner A. 1995. In vitro colonization and increase in nitrogen fixation of seedling roots of black mangrove inoculated by a filamentous cyanobacteria[J]. *Can. Microbiol.* ,**41**(11):1012~1020.
- [86] van der Valk AG, Attiwill PM. 1984. Acetylene reduction in an *Avicennia marina* community in southern Australia[J]. *Aust. J. Bot.* ,**32**:157~164.
- [87] Vazquez P, Holguin G, Puente ME, et al. 2000. Phosphate-solubilizing microorganisms associated with the rhizosphere of mangroves in a semiarid coastal lagoon[J]. *Biol. Fertil. Soils* ,**30**:460~468.
- [88] Vethanayagam RR. 1991. Purple photosynthetic bacteria from a tropical mangrove environment[J]. *Mar. Biol.* ,**110**:161~163.
- [89] Vethanayagam RR, Krishnamurthy K. 1995. Studies on anoxygenic photosynthetic bacterium *Rhodopseudomonas* sp. from the tropical mangrove environment[J]. *Indian J. Mar. Sci.* ,**24**:19~23.
- [90] Wu RY. 1993. Studies on the microbial ecology of Tansui Estuary[J]. *Bot. Bull. Acad. Sin.* ,**34**(1):13~30.
- [91] Yoshihiro A, Naoya M, Kazuyoshi Y, et al. 2001. Initial fermentation of sea sludge using aerobic and thermophilic microorganisms in a mangrove soil[J]. *Biores. Technol.* ,**80**:83~85.
- [92] Zhuang T, Cheng LP. 1998. Soil microbial function of *Kandelia candel* mangrove: degradation of diesel oil[A]. In: Morton B, ed. *The Marine Biology of the South China Sea*[C]. Hongkong: Hongkong University Press, 389~395.
- [93] Zuberer DA, Silver WS. 1978. Biological dinitrogen fixation (Acetylene reduction) associated with Florida mangroves[J]. *Appl. Environ. Microbiol.* ,**35**:567~575.
- [94] Zuberer DA, Silver WS. 1979. N₂ fixation (acetylene reduction) and the microbial colonization of mangrove roots[J]. *New Phytol.* ,**82**:467~471.

作者简介 龙寒,女,1980年生,硕士研究生,主要从事植物生态学研究。E-mail:longh@etang.com
责任编辑 王伟