

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 15 期 Vol.31 No.15 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 15 期

2011 年 8 月 (半月刊)

目 次

地面节肢动物营养类群对土地覆被变化和管理扰动的响应·····	李锋瑞,刘继亮,化伟,等 (4169)
两种书虱微卫星富集文库的构建及比较·····	魏丹丹,袁明龙,王保军,等 (4182)
菲律宾蛤仔 EST-SSRs 标记开发及不同地理群体遗传多样性·····	闫喜武,虞志飞,秦艳杰,等 (4190)
菲律宾蛤仔大连群体不同世代的遗传多样性·····	虞志飞,闫喜武,杨霏,等 (4199)
玻璃温室与田间栽培小麦幼穗分化的比较·····	姜丽娜,赵艳岭,邵云,等 (4207)
施用有机肥环境下盐胁迫小麦幼苗长势和内源激素的变化·····	刘海英,崔长海,赵倩,等 (4215)
黄土高原半干旱区气候变化对春小麦生长发育的影响——以甘肃定西为例·····	姚玉璧,王润元,杨金虎,等 (4225)
不同耕作模式下稻田水中氮磷动态特征及减排潜力·····	冯国禄,杨仁斌 (4235)
大田环境下转 Bt 基因玉米对土壤酶活性的影响·····	颜世磊,赵蕾,孙红炜,等 (4244)
短期淹水培养对水稻土中地杆菌和厌氧粘细菌丰度的影响·····	朱超,Stefan Ratering,曲东,等 (4251)
气候变化背景下广东晚稻播期的适应性调整·····	王华,陈新光,胡飞,等 (4261)
长期封育对不同类型草地碳贮量及其固持速率的影响·····	何念鹏,韩兴国,于贵瑞 (4270)
黄土丘陵区两种主要退耕还林树种生态系统碳储量和固碳潜力·····	刘迎春,王秋凤,于贵瑞,等 (4277)
植物叶表面的润湿性及其生态学意义·····	石辉,王会霞,李秧秧 (4287)
长白山北坡主要森林群落凋落物现存量月动态·····	郑金萍,郭忠玲,徐程扬,等 (4299)
古尔班通古特沙漠及周缘 52 种植物种子的萌发特性与生态意义·····	刘会良,宋明方,段士民,等 (4308)
吉首蒲儿根的繁殖生态学特性及其濒危成因·····	邓涛,陈功锡,张代贵,等 (4318)
栖息地永久性破坏的比例对物种多度稳定值影响的迭代算法·····	时培建,戈峰,杨清培 (4327)
喷施多效唑提高麻疯树幼苗耐盐性的生理机制·····	毛轶清,郑青松,陈健妙,等 (4334)
阿尔山落叶松主要蛀干害虫的种群空间生态位·····	袁菲,骆有庆,石娟,等 (4342)
2009 年云南省白背飞虱早期迁入种群的虫源地范围与降落机制·····	沈慧梅,吕建平,周金玉,等 (4350)
中华稻蝗长沙种群的生活史及其卵滞育的进化意义·····	朱道弘,张超,谭荣鹤 (4365)
“518”油桃主要害虫与其捕食性天敌的关系·····	施晓丽,毕守东,耿继光,等 (4372)
青藏东缘若尔盖高寒草甸中小型土壤动物群落特征及季节变化·····	张洪芝,吴鹏飞,杨大星,等 (4385)
青海可鲁克湖水鸟季节动态及渔鸥活动区分析·····	张国钢,刘冬平,侯韵秋,等 (4398)
排放与森林碳汇作用下云南省碳净排放量估计·····	刘慧雅,王铮,马晓哲 (4405)
北京城市生态占水研究·····	柏樱岚,王如松,姚亮 (4415)
专论与综述	
植物水分传输过程中的调控机制研究进展·····	杨启良,张富仓,刘小刚,等 (4427)
环境介质中的抗生素及其微生物生态效应·····	俞慎,王敏,洪有为 (4437)
自然生态系统中的厌氧氨氧化·····	沈李东,郑平,胡宝兰 (4447)
研究简报	
山东半岛南部海湾底栖动物群落生态特征及其与水环境的关系·····	张莹,吕振波,徐宗法,等 (4455)
新疆乌伦古湖浮游甲壳动物的季节演替及与环境因子的关系·····	杨丽丽,周小玉,刘其根,等 (4468)
不同施肥与灌水量对槟榔土壤氮挥发的影响·····	卢丽兰,甘炳春,许明会,等 (4477)
学术信息与动态	
水土资源保持的科学政策:全球视野及其应用——第 66 届美国水土保持学会国际学术年会述评·····	卫伟 (4485)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 320 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 34 * 2011-08



封面图说: 塞罕坝地处内蒙古高原南缘向华北平原的过渡带,地势分为坝上、坝下两部分。解放初期,这里是“飞鸟无栖树,黄沙遮天日”的荒原沙丘,自 1962 年建立了机械化林场之后,塞罕坝人建起了 110 多万亩人工林,造就了中国最大的人工林林场。这是让人叹为观止的落叶松人工林海。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

沈李东, 郑平, 胡宝兰. 自然生态系统中的厌氧氨氧化. 生态学报, 2011, 31(15): 4447-4454.

Shen L D, Zheng P, Hu B L. Anaerobic ammonium oxidation in natural ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(15): 4447-4454.

自然生态系统中的厌氧氨氧化

沈李东, 郑平, 胡宝兰*

(浙江大学环境工程系, 杭州 310058)

摘要:厌氧氨氧化(anaerobic ammonium oxidation, anammox)是由 anammox 菌在缺氧条件下以氨为电子供体、以亚硝酸为电子受体的生物反应,反应产物为氮气,该反应的发现为全球氮素循环增添了新的内容。参与 anammox 反应的微生物是 anammox 菌, anammox 菌是一群分支很深的浮霉菌,目前已发现的 anammox 菌有 5 个属 8 个种。催化 anammox 反应的是一种特殊的细胞结构-厌氧氨氧化体,每种已发现的 anammox 菌中都存在该特殊结构。有关 anammox 反应的生化机理目前普遍认为,NO 和联氨(N_2H_4)是 anammox 反应的重要中间体,NO 可将 NH_4^+ 直接氧化,形成 N_2H_4 , N_2H_4 在联氨氧化酶的作用下最终转化为氮气。Anammox 最初发现于人工脱氮系统,已发现的 8 种 anammox 菌中 7 种来自于人工系统。但越来越多的证据表明,anammox 菌广泛分布于自然界的海洋、淡水和陆地生态系统中,在区域氮素循环中起着不同程度的作用。影响自然生态系统中 anammox 反应的主要环境因子包括有机质含量、 NO_3^- 浓度和盐度等,但在不同的生态系统,anammox 反应的主导影响因子存在较明显差异。综述了 anammox 菌的类群和生化反应机理,总结了 anammox 菌在各种自然生态系统中的分布与生态多样性,论述了 anammox 反应在全球氮素循环中的重要性以及影响此过程发挥的主要环境因子。

关键词:厌氧氨氧化菌;自然生态系统;生化机理;生态多样性;贡献率;环境因子

Anaerobic ammonium oxidation in natural ecosystems

SHEN Lidong, ZHENG Ping, HU Baolan*

Department of Environmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract: Anaerobic ammonium oxidation (anammox), a reaction oxidizing ammonium to dinitrogen gas with nitrite as the electron acceptor under anoxic conditions, is one of the most recent discoveries in the biogeochemical nitrogen cycle. The anammox reaction is mediated by anammox bacteria, a deep-branching monophyletic group of bacteria within the phylum *Planctomycetes*. Presently, five genera and eight species of anammox bacteria have been identified, including *Candidatus* 'Brocadia' (*C. 'Brocadia anammoxidans'* and '*Brocadia fulgida*'), *C. 'Kuenenia stuttgartiensis'*, *C. 'Scalindua'* (*C. 'Scalindua brodae'*, '*Scalindua wagneri*' and '*Scalindua sorokinii*'), *C. 'Anammoxoglobus propionicus'* and *C. 'Jettenia asiatica'*. The anammox reaction takes place inside the anammoxosome, an intracytoplasmic compartment bounded by a single ladderane lipid-containing membrane. This unique cell structure has been found in all identified anammox bacteria. Although, there is no agreement on the biochemical mechanism of the anammox reaction, nitric oxide (NO) and hydrazine (N_2H_4) are recognized as important intermediates in the anammox reaction. The NO can oxidize ammonium to N_2H_4 , and the N_2H_4 generated can be oxidized to dinitrogen gas by a hydrazine-oxidizing enzyme. The anammox process was first observed in a wastewater nitrogen-removal system, and seven of the eight anammox species were found in different wastewater treatment systems. Subsequently, many studies have reported the ubiquitous distribution of anammox bacteria in a variety of natural ecosystems, including anoxic marine sediments and water columns, marine oxygen-minimum zones, estuarine sediments, freshwater sediments and soil ecosystems. Anammox bacteria and their activities were

基金项目:浙江省自然科学基金项目(Y507227);中央高校基本科研业务费专项资助项目(2010QNA6017)资助

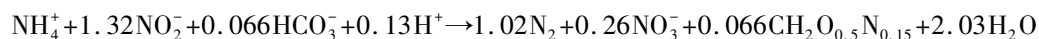
收稿日期:2010-07-13; 修订日期:2011-04-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: blhu@zju.edu.cn

also detected in several special ecosystems, such as high-temperature and low-temperature ecosystems. All available evidence indicates that the anammox process is critically important in natural ecosystems, and particularly in marine environments. In anoxic marine sediments and water columns, the anammox bacteria can account for 20%—79% and 20%—50% of total dinitrogen gas production, respectively. Anammox bacteria are also mainly responsible for nitrogen loss in the marine oxygen-minimum zones that are the most productive regions of the world's oceans. Anammox activities have been detected in freshwater and soil ecosystems but the specific contribution of anammox to the nitrogen cycle is poorly known and needs further investigation. Although anammox bacteria are broadly distributed in a variety of natural ecosystems, the overall diversity of anammox bacteria is low. The anammox bacteria detected in most marine and freshwater ecosystems are all affiliated with the genera *C. 'Scalindua'* or *C. 'Brocadia'*. Recently, different anammox bacterial communities composed of *C. 'Brocadia'*, *'Kuenenia'*, *'Scalindua'* and *'Jettenia'* species were found simultaneously in some estuarine and soil ecosystems, which expanded knowledge of the diversity of anammox bacteria in natural ecosystems. The different levels of anammox bacterial diversity and contribution of anammox to the nitrogen cycle observed in different natural ecosystems indicate that the anammox process is influenced by local environmental conditions. The organic content, availability of water column NO_3^- or NO_2^- , salinity and temperature are regarded as the most important environmental factors influencing the anammox process in different natural ecosystems. This review summarizes the classification, biochemical mechanism, distribution and diversity of anammox bacteria in natural ecosystems, the importance of anammox in the global nitrogen cycle and the main factors influencing the anammox process in natural habitats.

Key Words: anaerobic ammonium oxidation; natural ecosystems; biochemical mechanism; diversity; contribution rate; environmental factor

长期以来,人们普遍认为反硝化是去除自然环境中无机氮的唯一生物途径^[1],20 世纪 90 年代发现的厌氧氨氧化反应打破了这一传统观念,为全球氮素循环增添了新的内容。参与 anammox 反应的微生物是 anammox 菌,其催化氨(NH_4^+)和亚硝酸(NO_2^-)反应生成氮气(N_2)。Anammox 反应在一特殊的细胞结构-厌氧氨氧化体内进行。Anammox 的反应式^[2]如下:



许多自然生态系统中,由于氧供应不足或电子供体(硫化物或有机质)有限,常常发生 NH_4^+ 氧化成 NO_2^- 或 NO_3^- 还原成 NO_2^- 的情况,是 anammox 菌的良好生境。现代分子生物学技术的快速发展为研究自然生态系统中 anammox 菌提供了强有力的方法和手段,是目前研究 anammox 菌生态学特性的主要工具^[3]。这些分子生物学手段主要包括聚合酶链式反应(polymerase chain reaction,PCR)、变性梯度凝胶电泳(denaturing gradient gel electrophoresis,DGGE)和荧光原位杂交(fluorescence in situ hybridization,FISH)等^[3-8]。迄今为止研究者采用这些分子生物学方法已在不同的自然生态系统中检测出了不同种群的 anammox 菌^[3,7]。同位素测试是研究自然生态系统中 anammox 活性的重要手段,它可以检测 anammox 在不同生态系统中的活性强度,评价其在区域氮循环中的作用^[9]。但目前不同学者对同位素活性测定方法有所不同,尚未见统一的测定方法,常用的方法是通过 ^{15}N 标记的 $^{15}\text{NH}_4^+$ 和未标记的 NO_2^- (NO_3^-) 或 ^{15}N 标记的 $^{15}\text{NO}_2^-$ ($^{15}\text{NO}_3^-$) 和未标记的 NH_4^+ 进行 anammox 的活性测试,利用 $^{29}\text{N}_2$ 的产量计算 anammox 的速率,并通过计算 $^{29}\text{N}_2$ 占 N_2 总产量(除 $^{29}\text{N}_2$ 外的 N_2 主要由反硝化所致)的比值来评价 anammox 在某一生态环境氮素循环中的贡献率。与此同时,自然生态系统中的 anammox 反应与环境因子的变化密切相关。为更好地了解 anammox 反应与生态环境间的关系,进而保持生态系统氮素循环的稳定性,研究环境因子对 anammox 反应的影响已受到越来越多的关注。研究表明,有机质含量、 NO_3^- 浓度、盐度和温度等环境因子是影响自然生态系统中 anammox 反应主要因素^[3,6,8,10]。

1 Anammox 菌及其生化反应机理

1.1 Anammox 菌的类群

到目前为止,还没有得到 anammox 纯培养菌株。利用现代分子生物学技术,已经鉴定到 8 个 anammox

种,它们分别属于 5 个属: *Candidatus Brocadia* (*Candidatus Brocadia anammoxidans*^[2], *Candidatus Brocadia fulgida*^[11]); *Candidatus Kuenenia* (*Candidatus Kuenenia stuttgartiensis*^[12]); *Candidatus Scalindua* (*Candidatus Scalindua brodae*^[13], *Candidatus Scalindua wagneri*^[13], *Candidatus Scalindua sorokinii*^[14]); *Candidatus Anammoxoglobus propionicus*^[4] 和 *Candidatus Jettenia asiatica*^[15]。图 1 为 anammox 菌的 16S rRNA 系统发育树^[16]。系统发育分析表明,这些 anammox 菌都归属于浮霉状菌门 (phylum Planctomycetales),并构成了 anammox 菌科 (Anammoxaceae),它们彼此间的进化距离较远,其中 *Brocadia* 属与 *Scalindua* 属的 16S rRNA 基因平均只有 85% 的序列同源性。以上这些 anammox 菌除 *Candidatus Scalindua sorokinii* 发现并广泛分布于自然生态系统,其余 anammox 菌均发现于人工生态系统。

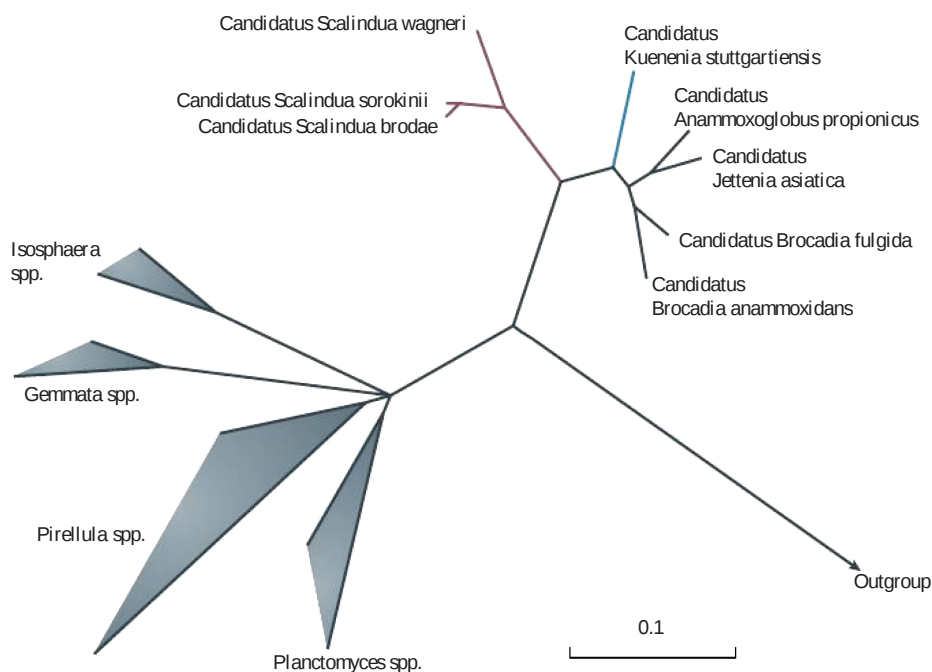


图 1 Anammox 菌的系统发育树^[16]

Fig. 1 Polygenetic tree of anammox bacteria^[16]

Candidatus Brocadia anammoxidans: 待定厌氧氨氧化布罗卡地菌^[17]; *Candidatus Brocadia fulgida*: 待定荧光布罗卡地菌^[17]; *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis*: 待定斯图加特库氏菌^[17]; *Candidatus Scalindua brodae*: 待定布罗达氏阶梯烷菌^[17]; *Candidatus Scalindua wagneri*: 待定韦格氏阶梯烷菌^[17]; *Candidatus Scalindua sorokinii*: 待定黑海阶梯烷菌^[17]; *Candidatus Anammoxoglobus propionicus*: 待定丙酸厌氧氨氧化球菌^[17]; *Candidatus Jettenia asiatica*: 待定亚洲杰特氏菌^[17]; *Isosphaera*: 等球菌属; *Gemmata*: 出芽菌属; *Pirellula*: 小梨形菌属; *Planctomyces*: 浮霉状菌属

1.2 Anammox 菌的生化反应机理

在 anammox 菌体内存在一个单一双分子层的厌氧氨氧化体,占细胞总体积的 50%—80%,它是 anammox 菌进行 anammox 反应的场所,是具产能能力的细胞器。有关 anammox 反应的生化机理目前普遍认为: NO_2^- 首先在含有细胞色素 c 和细胞色素 d1 的亚硝酸还原酶作用下转化为 NO,再在联氨水解酶的作用下,NO 将 NH_4^+ 直接氧化,形成联氨(N_2H_4),最后在联氨氧化酶的作用下将 N_2H_4 氧化成 N_2 ,在此,NO 和 N_2H_4 是 anammox 反应的重要中间产物,在 anammox 反应中起着重要作用。 N_2H_4 氧化成 N_2 的过程中会释放 4 个电子,并通过细胞色素 c、泛醌、细胞色素 bc_1 复合体、其他细胞色素 c 传递给亚硝酸还原酶和联氨水解酶。在电子传递过程中,质子被排至厌氧氨氧化体外侧,在膜两侧形成质子梯度,用于驱动 ATP 和 NADPH_2 的合成^[18-20]。在 anammox 的代谢过程中, NH_4^+ 和 NO_2^- 的消耗以及 NO_3^- 的生成比为:1:1.32:0.26,其中 NO_3^- 的生成用于产生电子固定 CO_2 ^[21]。

2 Anammox 菌在不同自然生态系统中的分布、生态多样性及重要作用

Anammox 菌的研究最初集中于人工生态系统,随后越来越多的研究发现 anammox 菌在许多自然生态系统中广泛分布,并起着重要作用。

2.1 海洋生态系统

2.1.1 海洋沉积物

海洋沉积物常处于缺氧状态,有机质分解会释放出产物 NH_4^+ ,反硝化和好氧氨氧化都会产生中间产物 NO_2^- ,为 anammox 菌提供了极为有利的生存条件。图 2 显示了海洋沉积物中氮素化合物的存在形式及转化过程^[22]。

目前已有大量研究者报道了海底沉积物中 anammox 菌的分布。Thamdrup 和 Dalsgaard^[9] 利用 ^{15}N 稳定同位素示踪首次在丹麦沿海沉积物中检测出了 anammox 活性,证实了天然生态系统中存在 anammox 反应。随后,研究者在许多不同地域的海洋沉积物中亦检测出了 anammox 反应^[5-8,23-26]。由于不同种类 anammox 菌所需环境因子(生态位)不同,在同一生境中往往只分布有一种 anammox 菌^[3]。在海洋沉积物中存在的 anammox 菌种群较为单一,基本属于具有较强耐盐能力的 *Scalindua* 属。Dale 等^[3] 的研究结果却发现,在开普菲尔河口(Cape Fear River Estuary) anammox 菌的分布呈现出了种群多样性,可同时检测到 *Brocadia*, *Kuenenia*, *Jettenia* 和 *Scalindua* 四个属的 anammox 菌。Amano 等^[7] 在淀川河口(Yodo Estuary)亦检测出了多种 anammox 菌的共存,包括 *Brocadia*, *Kuenenia* 和 *Scalindua* 属的 anammox 菌。出现河口环境中多种 anammox 菌共存的原因推测是由于河口是海陆作用最为剧烈、生态结构最为复杂的区域之一,可营造适合不同种类 anammox 菌生存的微环境。此外,*Brocadia*, *Kuenenia* 和 *Jettenia* 属在河口沉积物中的分布表明,除 *Scalindua* 属的 anammox 菌,其它种属的 anammox 菌也具备一定的耐盐能力。

研究证实,anammox 菌在海洋沉积物的氮素循环中起着重要作用,其贡献率高达 50% 以上^[16]。然而,不同海域沉积物氮素循环中 anammox 的贡献率差异较大,范围为 0—67%^[5-9,23-26]。研究发现,在丹麦海运带斯卡格拉克海峡(Skagerrak)检测到的 anammox 反应在该海峡氮素循环中的贡献率高达 67%,超过了反硝化作用^[9]。Engström 等^[26] 在华盛顿湾(Washington Bay)也检测出了较高活性的 anammox 反应,其在该区域氮素循环中的贡献率达 40%—42%,与反硝化强度相当。Anammox 在某些海洋沉积物氮素循环中的贡献率却较低^[6-8],如 Amano 等^[7] 在淀川河口沉积物中测得的 anammox 反应在此沉积物氮素循环中的贡献率仅为 0.9%—1.6%,反硝化作用占据了主导地位。造成 anammox 在不同海域沉积物氮素循环中贡献率差异的原因是受不同生态系统中诸多环境因子的影响。Trimmer 等^[6] 发现有机质含量是影响海洋沉积物中 anammox 反应的主导因素,随着泰晤士河口(Thames Estuary)沉积物中有机质含量的升高,anammox 在区域氮素循环中的贡献率从 1% 增至 8%。导致该趋势的原因可能是在适当范围内,随着沉积物中有机质含量的升高,反硝化活性增强,反硝化过程释放出的中间产物 NO_2^- 量随之增加,为 anammox 菌提供了充足的反应基质。然而也有研究表明,随着有机质含量的提高,anammox 在区域氮素循环中的贡献率会随之降低^[27]。造成这种差异的原因可能源于不同沉积物中有机质含量大小的不同。在高有机质含量的环境下,反硝化活动不断增强,释放出

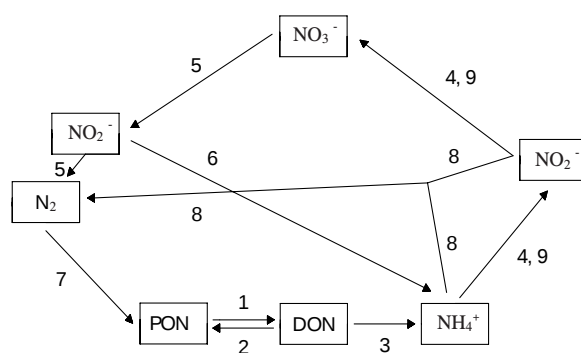


图 2 海洋沉积物中氮素化合物的存在形式及转化过程^[22]

Fig. 2 General view of the complex web of reactions transforming nitrogen compounds of a wide range of forms and oxidation states in marine sediment^[22]

PON: 颗粒有机氮, DON: 溶解性有机氮; 1—6 分别为海洋沉积物中氮素的转化途径: 1: 颗粒有机氮的水解, 2: 微生物对溶解性有机氮的同化吸收, 3: 氨化, 4: 好氧硝化, 5: 反硝化, 6: 同化硝酸盐/亚硝酸还原, 7: 微生物固氮作用, 8: anammox, 9: 氨厌氧氧化为亚硝酸和硝酸

的 NO_2^- 量不断增多, anammox 反应活性虽随之提高, 但反硝化活性增加的强度要比 anammox 大, 致使 anammox 在沉积物氮素循环中的贡献率反而有所降低。

海底水体的 NO_3^- 浓度是影响海洋沉积物中 anammox 反应的又一限制性因子。Risgaard-Petersen 等^[23] 比较了丹麦浅海河口区域两个不同位点的 anammox 活性差异, 发现在 NO_3^- 浓度常年较高的兰德斯峡湾 (Randers Fjord) anammox 活性较高, 在 NO_3^- 浓度很低的诺斯敏纳峡湾 (Norsminde Fjord) anammox 活性无法被检出。究其原因可能是由于 NO_3^- 浓度越高, 反硝化产生的 anammox 反应基质 NO_2^- 的量便越多, 利于 anammox 反应的进行。Rich 等^[8] 在考察切萨皮克湾 (Chesapeake Bay) 沉积物中 anammox 活性大小时也发现, NO_3^- 浓度与 anammox 活性及其在区域氮素循环中的贡献率呈良好的正相关。

盐度也是影响海底沉积物 anammox 活性的主要环境因子之一。Dale 等^[3] 考察了开普菲尔河口 3 个不同位点的 anammox 活性差异, 发现盐度及其变化强度对 anammox 菌的活性影响最为显著, 盐度与 anammox 在区域氮素循环中的贡献率呈明显正相关。造成这种结果的原因可能是反硝化细菌对盐度较为敏感, 其活性易受盐度的抑制, 而 anammox 菌对盐度具有较强的适应能力。此外, 盐度对于沉积物中游离 NH_4^+ 的吸附有很重要的影响, 随着盐度的增加, 游离 NH_4^+ 的浓度也会增加, 因而这亦有可能会增强 anammox 活性。但目前关于盐度对 anammox 活性影响的真正机理尚不明确, 还有待进一步研究。

2.1.2 海洋水体

海洋水体的低氧区是海洋生态系统的重要组成部分, 据估计海洋中 35% 以上的 N_2 产生于此^[28]。研究表明 anammox 菌在这些低氧区中异常活跃, 由 anammox 反应所致的氮损失占了海洋水体低氧区 N_2 产生的 10%—100%^[28-31], anammox 在海洋水体的氮素循环中亦起着重要作用。与海洋沉积物中发现的 anammox 菌类似, 海洋水体中存在的 anammox 菌亦基本属于 *Scalindua* 属, 只有在拉斯尼策湖 (Lake Rassnitzer) 水体中发现了 *Brocadia* 属 anammox 菌的分布^[29]。Kuypers 等^[30] 发现, anammox 反应在本格拉港 (Benguela) 低氧区氮素循环中占据了绝对优势, 而反硝化活性无法被检出。Thamdrup 等^[31] 在智利中部沿岸远海的低氧区中亦只检测出了 anammox 活性。Ward 等^[28] 的研究却表明, 在阿拉伯海 (Arabian Sea) 的低氧区中, 反硝化活性超过了 anammox 活性, anammox 在此低氧区氮素循环中的贡献率小于 13%。可见, anammox 在不同海域水体低氧区氮素循环中起着不同程度的作用, 而这种差异又主要取决于不同海洋水体低氧区的环境条件。Lam 等^[32] 研究发现, 秘鲁海 (Peruvian) 水体低氧区中 67% 的 NO_2^- 源于 NO_3^- 的还原, 33% 源于 NH_4^+ 的氧化。因而, NO_3^- 浓度对于秘鲁海水体中的 anammox 反应显得尤为重要。Ward 等^[28] 则认可有机质含量是影响阿拉伯海水体低氧区中 anammox 和反硝化活性相对强弱的重要环境因子。其原因是阿拉伯海水体中 NO_3^- 的量较有机质丰富, 致使后者成为反硝化活动的限制性因子。有机质含量低, 反硝化活动减弱, 其产生的中间产物 NO_2^- 量也相应减少, 继而影响 anammox 反应。

2.2 淡水生态系统

Anammox 菌在海洋环境中广泛分布, 目前有关 anammox 菌在淡水生态系统中分布的研究报道却并不多。Schubert 等^[10] 首次证明了天然淡水生态系统坦噶尼喀湖 (Lake Tanganyika) 中 anammox 菌的分布, anammox 菌的最大活性为 10 nmol N_2/h , 在该区域氮素循环中的贡献率为 13%, 其活性与贡献率值与某些海洋生境中发生的 anammox 反应相比并不逊色^[6-8]。Schubert 等^[10] 认为温度是促使坦噶尼喀湖淡水水体中 anammox 活性较高的一个重要环境因子。坦噶尼喀湖地处热带, 常年温度较高, 因而此处的 anammox 菌具有较高的代谢活性。此外, Penton 等^[33] 和 Zhang 等^[34] 分别在温特格林湖 (Lake Wintergreen) 和江苏新沂河 (Xinyi River) 淡水沉积物中也检测到了 anammox 菌的分布。Zhang 等^[34] 还对新沂河淡水沉积物中的 anammox 菌进行了富集研究, 经 25d 的短期培养后, anammox 的活性明显高于自然生态系统中 anammox 菌的原位活性。迄今在淡水生态系统中检测到的 anammox 菌种群多样性水平较低, 以 *Scalindua* 属居多, 只有在新沂河沉积物中检测到了 *Candidatus Brocadia anammoxidans* 的分布^[34]。

总体来说, 目前有关 anammox 菌在天然淡水生态系统中的分布、种群多样性水平以及在淡水系统氮素

循环中的贡献率尚不明晰,其主要的因子也不明确,为此急需更多的研究者在更为广泛的天然淡水环境中开展 anammox 的研究,揭示 anammox 菌在淡水生态系统中的生态学特性及重要作用。

2.3 陆地生态系统

陆地生态系统是地球重要组成部分,约占地球总面积的 1/3,生态环境极为复杂。人类活动产生的大量氮素污染物(尤其是 NO_3^-)可通过各种途径排放到陆地生态系统,因而陆地生态系统中的某些缺氧区域可能同时存在 NH_4^+ 和 NO_2^- ,是发生 anammox 反应的良好生境。Humbert 等^[35]首次在不同陆地生态系统(包括沼泽、受污染的孔隙含水层、冻土和农田土壤)中检测出了不同种群的 anammox 菌,种群多样性水平较高,包括 *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis*, *Candidatus Brocadia fulgida*, *Candidatus Scalindua wagneri* 和 *Candidatus Jettenia asiatica*。Humbert 等的研究^[35]发现,并非在所有土壤样品中都存在 anammox 菌,而只在土壤的一定深度范围内才有 anammox 菌的分布。Humbert 等^[35]由此认为,不同深度土层的环境因子(如土壤的含水率和氮素含量等)决定了 anammox 菌的存在与否以及 anammox 菌的种群结构和多样性水平。Zhu 等^[36]在中国的多处淡水湿地生态系统也检测出了 anammox 菌的存在,主要为 *Brocadia* 属的 anammox 菌。由于目前尚缺少充分的证据表明这些陆地生态系统中 anammox 菌具有 anammox 活性,因而有关 anammox 菌在陆地生态系统中的具体作用及影响因素还有待进一步研究。

2.4 其它生态系统

除以上 3 类生态系统外,anammox 菌还分布于其它特殊生态系统中。Byrne 等^[37]在温度高达 60—85℃ 的大西洋中脊(Mid Atlantic Ridge)深海热液口处检测到了 *Scalindua* 属的 anammox 菌,并证实其具有 anammox 活性。Jaeschke 等^[38]发现在温度为 65℃ 的温泉中也存在 anammox 菌的特异性阶梯烷膜脂,含量为 0.3—52 ng/g,16S rRNA 系统发育分析表明,温泉中存在 *Candidatus Brocadia fulgida*, *Candidatus Brocadia anammoxidans* 和 *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis* 的序列。另有研究者报道了 anammox 菌也可在低温生态系统中生存。Schmid 等^[5]发现在温度低至 0℃ 的格陵兰海(Greenland Sea)的迪斯科湾(Disko Bay)海冰中存在具有活性的 *Scalindua* 属的 anammox 菌。这些特殊生态系统中 anammox 菌的发现对于发掘耐高温和耐低温的 anammox 菌种资源提供了前景。此外,Hoffmann 等^[39]还在海洋的海绵体内发现了 anammox 菌的踪迹,检测到了 *Candidatus Scalindua sorokinii* 和 *Candidatus Scalindua brodae*,并证实了这些 anammox 菌亦具有 anammox 活性。Mohamed 等^[40]也在海绵体内发现有 anammox 菌的分布,该研究中检测到的 anammox 菌与 *Candidatus Brocadia fulgida* 有较远的亲缘关系。以上几类生态系统中 anammox 菌的分布表明,anammox 菌除在海洋、淡水和陆地生态系统外,还在某些特殊生态系统的氮素循环中起着重要作用。

3 研究展望

Anammox 不仅在人工系统,而且在自然生态系统中(尤其是海洋生态系统)都扮演着重要角色,其在全球氮素循环中的作用不容忽视。但总体而言,目前人们对自然生态系统中 anammox 的认识还不够深入,仍有较多问题需要进一步地研究:(1)对自然生态系统中的 anammox 菌进行富集培养,获得其纯培养,对阐明其生化机理具有重要意义;(2)不同生境下各种环境因子对 anammox 反应的影响差异较大,不同生态系统中影响 anammox 反应的主导环境因子亦不同,因而研究者在自然环境下研究 anammox 反应,需全面考察生态系统中的所有环境因子,结合单一因子的影响进行深入分析其综合效应;(3)目前发现的 anammox 菌都集中在浮霉菌,如能发现更多其他种类的细菌具有 anammox 能力,将大大扩大 anammox 菌的研究范围,更全面的了解 anammox 菌的代谢特性;(4)anammox 菌在海洋生态系统中广泛分布,但就全球范围而言,anammox 菌在全球的分布及其在氮素循环中的贡献尚不明晰,如能对目前研究较为匮乏的淡水生态系统、陆地生态系统以及其它特殊生态系统进行全面的研究,将更好的了解 anammox 在全球氮素循环中的重要作用。

References:

- [1] Francis C A, Beman J M, Kuypers M M M. New processes and players in the nitrogen cycle; the microbial ecology of anaerobic and archaeal

- ammonia oxidation. The ISEM Journal, 2007, 1(1): 19-27.
- [2] Strous M, Fuerst J A, Kramer E H M, Logemann S, Muyzer G, van de Pas-Schoonen K T, Webb R I, Kuenen J G, Jetten M S M. Missing lithotroph identified as new planctomycete. Nature, 1999, 400(6743): 446-449.
- [3] Dale O R, Tobias C R, Song B. Biogeographical distribution of diverse anaerobic ammonium oxidizing (anammox) bacteria in Cape Fear River Estuary. Environmental Microbiology, 2009, 11(5): 1194-1207.
- [4] Kartal B, Rattray J, van Niftrik L A, van de Vossenberg J, Schmid M C, Webb R I, Schouten S, Fuerst J A, Damsté J S, Jetten M S M, Strous M. *Candidatus "Anammoxoglobus propionicus"* a new propionate oxidizing species of anaerobic ammonium oxidizing bacteria. Systematic and Applied Microbiology, 2007, 30(1): 39-49.
- [5] Schmid M C, Risgaard-Petersen N, van de Vossenberg J, Kuypers M M M, Lavik G, Petersen J, Hulth S, Thamdrup B, Canfield D, Dalsgaard T, Rysgaard S, Sejr M K, Strous M, Op den Camp H J M, Jetten M S M. Anaerobic ammonium-oxidizing bacteria in marine environments: widespread occurrence but low diversity. Environmental Microbiology, 2007, 9(6): 1476-1484.
- [6] Trimmer M, Nicholls J C, Deflandre B. Anaerobic ammonium oxidation measured in sediments along the Thames Estuary, United Kingdom. Applied Microbiology and Biotechnology, 2003, 69(11): 6447-6454.
- [7] Amano T, Yoshinaga I, Okada K, Yamagishi T, Ueda S, Obuchi A, Sako Y, Suwa Y. Detection of anammox activity and diversity of anammox bacteria-related 16S rRNA genes in coastal marine sediment in Japan. Microbes and Environments, 2007, 22(3): 232-242.
- [8] Rich J J, Dale O R, Song B, Ward B B. Anaerobic ammonium oxidation (anammox) in Chesapeake Bay sediments. Microbial Ecology, 2008, 55(2): 311-320.
- [9] Thamdrup B, Dalsgaard T. Production of N₂ through anaerobic ammonium oxidation coupled to nitrate reduction in marine sediments. Applied and Environmental Microbiology, 2002, 68(3): 1312-1318.
- [10] Schubert C J, Durisch-Kaiser E, Wehrli B, Thamdrup B, Lam P, Kuypers M M M. Anaerobic ammonium oxidation in a tropical freshwater system (Lake Tanganyika). Environmental Microbiology, 2006, 8(10): 1857-1863.
- [11] Kartal B, van Niftrik L, Rattray J, van de Vossenberg J, Schmid M C, Damsté J S, Jetten M S M, Strous M. *Candidatus 'Brocadia fulgida'*: an autofluorescent anaerobic ammonium oxidizing bacterium. FEMS Microbiology Ecology, 2008, 63(1): 46-55.
- [12] Schmid M C, Twachtmann U, Klein M, Strous M, Juretschko S, Jetten M S M, Metzger J W, Schleifer K H, Wagner M. Molecular evidence for genus level diversity of bacteria capable of catalyzing anaerobic ammonium oxidation. Systematic and Applied Microbiology, 2000, 23(1): 93-106.
- [13] Schmid M C, Walsh K, Webb R I, Rijpstra W I, van de Pas-Schoonen K, Verbruggen M J, Hill T, Moffett B, Fuerst J, Schouten S, Damsté J S, Harris J, Shaw P, Jetten M S M, Strous M. *Candidatus "Scalindua brodae"*, sp. nov., *Candidatus "Scalindua wagneri"*, sp. nov., two new species of anaerobic ammonium oxidizing bacteria. Systematic and Applied Microbiology, 2003, 26(4): 529-538.
- [14] Kuypers M M M, Slikers A O, Lavik G, Schmid M C, Jørgensen B B, Kuenen J G, Damsté J S, Strous M, Jetten M S M. Anaerobic ammonium oxidation by anammox bacteria in the Black Sea. Nature, 2003, 422(6932): 608-611.
- [15] Quan Z X, Rhee S K, Zuo J E, Yang Y, Bae J W, Park J R, Lee S T, Park Y H. Diversity of ammonium-oxidizing bacteria in a granular sludge anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) reactor. Environmental Microbiology, 2008, 10(11): 3130-3139.
- [16] Kuenen J G. Anammox bacteria: from discovery to application. Nature Reviews Microbiology, 2008, 6(4): 320-326.
- [17] Zheng P, Zhang L. Characterization and classification of anaerobic ammonium oxidation (anammox) bacteria. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2009, 35(5): 473-481.
- [18] Strous M, Pelletier E, Mangenot S, Rattei T, Lehner A, Taylor M W, Horn M, Daims H, Bartol-Mavel D, Wincker P, Barbe V, Fonknechten N, Vallenet D, Segurens B, Schenowitz-Truong C, Médigue C, Collingro A, Snel B, Dutilh BE, Op den Camp H J M, van der Drift C, Cirpus I, van de Pas-Schoonen K T, Harhangi H R, van Niftrik L, Schmid M C, Keltjens J, van de Vossenberg J, Kartal B, Meier H, Frishman D, Huynen M A, Mewes H W, Weissenbach J, Jetten M S M, Wagner M, Le Paslier D. Deciphering the evolution and metabolism of an anammox bacterium from a community genome. Nature, 2006, 440(7085): 790-794.
- [19] Shimamura M, Nishiyama T, Shinya K, Kawahara Y, Furukawa K, Fujii T. Another multiheme protein, hydroxylamine oxidoreductase, abundantly produced in an anammox bacterium besides the hydrazine-oxidizing enzyme. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2008, 105(3): 243-248.
- [20] van Niftrik L, Geerts W J C, van Donselaar E G, Humbel B M, Webb R I, Fuerst J A, Verkleij A J, Jetten M S M, Strous M. Linking ultrastructure and function in four genera of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria: cell plan, glycogen storage, and localization of cytochrome c proteins. Journal of Bacteriology, 2008, 190(2): 708-717.
- [21] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, Jetten M S M. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms. Applied Microbiology and Biotechnology, 1998, 50(5): 589-596.

- [22] Hulth S, Aller R C, Canfield D E, Dalsgaard T, Engström P, Gilbert F, Sundbäck K, Thamdrup B. Nitrogen removal in marine environments: recent findings and future research challenges. *Marine Chemistry*, 2005, 94(1/4): 125-145.
- [23] Risgaard-Petersen N, Meyer R L, Schmid M C, Jetten M S M, Enrich-Prast A, Rysgaard S, Revsbech N P. Anaerobic ammonia oxidation in an estuarine sediment. *Aquatic Microbial Ecology*, 2004, 36(3): 293-304.
- [24] Rysgaard S, Glud R N, Risgaard-Petersen N, Dalsgaard T. Denitrification and anammox activity in Arctic marine sediments. *Limnology and Oceanography*, 2004, 49(5): 1493-1502.
- [25] Jaeschke A, Rooks C, Trimmer M, Nicholls J C, Hopmans E C, Schouten S, Damsté J S. Comparison of ladderane phospholipid and core lipids as indicators for anaerobic ammonium oxidation (anammox) in marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(7): 2077-2088.
- [26] Engström P, Penton C R, Devol A H. Anaerobic ammonium oxidation in deep-sea sediments off the Washington margin. *Limnology and Oceanography*, 2009, 54(5): 1643-1652.
- [27] Gihring T M, Lavik G, Kuypers M M M, Kostka J E. Direct determination of nitrogen cycling rates and pathways in Arctic fjord sediments (Svalbard, Norway). *Limnology and Oceanography*, 2010, 55(2): 740-752.
- [28] Ward B B, Devol A H, Rich J J, Chang B X, Bulow S E, Naik H, Pratihary A, Jayakumar A. Denitrification as the dominant nitrogen loss process in the Arabian Sea. *Nature*, 2009, 461(7260): 78-81.
- [29] Hamersley M R, Woebken D, Boehrer B, Schultze M, Lavik G, Kuypers M M M. Water column anammox and denitrification in a temperate permanently stratified lake (Lake Rassnitzer, Germany). *Systematic and Applied Microbiology*, 2009, 32(8): 571-582.
- [30] Kuypers M M M, Lavik G, Wöbken D, Schmid M C, Fuchs B M, Amann R, Jørgensen B B, Jetten M S M. Massive nitrogen loss from the Benguela upwelling system through anaerobic ammonium oxidation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2005, 102(18): 6478-6483.
- [31] Thamdrup B, Dalsgaard T, Jensen M M, Ulloa O, Farías L, Escobedo R. Anaerobic ammonium oxidation in the oxygen-deficient waters off northern Chile. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(5): 2145-2156.
- [32] Lam P, Lavik G, Jensen M M, van de Vossenberg J, Schmid M C, Woebken D, Gutiérrez D, Amann R, Jetten M S M, Kuypers M M M. Revising the nitrogen cycle in the Peruvian oxygen minimum zone. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(12): 4752-4757.
- [33] Penton C R, Devol A H, Tiedje J M. Molecular evidence for the broad distribution of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria in freshwater and marine sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, 72(10): 6829-6832.
- [34] Zhang Y, Ruan X H, Op den Camp H J M, Smits T J M, Jetten M S M, Schmid M C. Diversity and abundance of aerobic and anaerobic ammonium-oxidizing bacteria in freshwater sediments of the Xinyi River (China). *Environmental Microbiology*, 2007, 9(9): 2375-2382.
- [35] Humbert S, Tarnawski S, Fromin N, Mallet M P, Aragno M, Zopfi J. Molecular detection of anammox bacteria in terrestrial ecosystems: distribution and diversity. *The ISME Journal*, 2010, 4(3): 450-454.
- [36] Zhu G B, Jetten M S M, Kusch P, Ettwig K F, Yin C Q. Potential roles of anaerobic ammonium and methane oxidation in the nitrogen cycle of wetland ecosystems. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, 86(4): 1043-1055.
- [37] Byrne N, Strous M, Crépeau V, Kartal B, Birrien J L, Schmid M C, Lesongeur F, Schouten S, Jaeschke A, Jetten M S M, Prieur D, Godfroy A. Presence and activity of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria at deep-sea hydrothermal vents. *The ISME Journal*, 2009, 3(1): 117-123.
- [38] Jaeschke A, Op den Camp H J M, Harhangi H, Klimiuk A, Hopmans E C, Jetten M S M, Schouten S, Damsté J S. 16S rRNA gene and lipid biomarker evidence for anaerobic ammonium-oxidizing bacteria (anammox) in California and Nevada hot springs. *FEMS Microbiology Ecology*, 2009, 67(3): 343-350.
- [39] Hoffmann F, Radax R, Woebken D, Holtappels M, Lavik G, Rapp H T, Schlöppy M L, Schleper C, Kuypers M M M. Complex nitrogen cycling in the sponge *Geodia barretti*. *Environmental Microbiology*, 2009, 11(9): 2228-2243.
- [40] Mohamed N M, Saito K, Tal Y, Hill R T. Diversity of aerobic and anaerobic ammonia-oxidizing bacteria in marine sponges. *The ISME Journal*, 2010, 4(1): 38-48.

参考文献:

- [17] 郑平, 张蕾. 厌氧氨氧化菌的特性与分类. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2009, 35(5): 473-481.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.31 ,No.15 August ,2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Trophic group responses of ground arthropods to land-cover change and management disturbance	LI Fengrui, LIU Jiliang, HUA Wei, et al (4169)
Construction and comparative analysis of enriched microsatellite library from <i>Liposcelis bostrychophila</i> and <i>L. entomophila</i> genome	WEI Dandan, YUAN Minglong, WANG Baojun, et al (4182)
Development of EST-SSRs markers and analysis of genetic diversities among different geographical populations of Manila clam <i>Ruditapes philippinarum</i>	YAN Xiwu, YU Zhifei, QIN Yanjie, et al (4190)
Genetic diversity of different generations of the Dalian population of Manila clam <i>Ruditapes philippinarum</i> through selective breeding	YU Zhifei, YAN Xiwu, YANG Fei, et al (4199)
Comparative study of spike differentiation in wheat in the glasshouse and field	JIANG Lina, ZHAO Yanling, SHAO Yun, et al (4207)
Effects of organic fertilizer on growth and endogenous hormone contents of wheat seedlings under salt stress	LIU Haiying, CUI Changhai, ZHAO Qian, et al (4215)
Impacts of climatic change on spring wheat growth in a semi-arid region of the Loess Plateau: a case study in Dingxi, Gansu Province	YAO Yubi, WANG Runyuan, YANG Jinhu, et al (4225)
Dynamic changes in nitrogen and phosphorus concentrations and emission-reduction potentials in paddy field water under different tillage models	FENG Guolu, YANG Renbin (4235)
Effects of planting and straw returning of transgenic Bt maize on soil enzyme activities under field condition	YAN Shilei, ZHAO Lei, SUN Hongwei, et al (4244)
Effects of short-term flooding on <i>Geobacteraceae</i> spp. and <i>Anaeromyxobacter</i> spp. abundance in paddy soil	ZHU Chao, Stefan Ratering, QU Dong, et al (4251)
Adaptive adjustments of the sowing date of late season rice under climate change in Guangdong Province	WANG Hua, CHEN Xinguang, HU Fei, et al (4261)
Carbon and nitrogen sequestration rate in long-term fenced grasslands in Inner Mongolia, China	HE Nianpeng, HAN Xingguo, YU Guirui (4270)
Ecosystems carbon storage and carbon sequestration potential of two main tree species for the Grain for Green Project on China's hilly Loess Plateau	LIU Yingchun, WANG Qiufeng, YU Guirui, et al (4277)
Wettability on plant leaf surfaces and its ecological significance	SHI Hui, WANG Huixia, LI Yangyang (4287)
Seasonal dynamics of litter accumulation in major forest communities on the northern slope of Changbai Mountain, Northeast China	ZHENG Jinping, GUO Zhongling, XU Chengyang, et al (4299)
A comparative study of seed germination traits of 52 species from Gurbantunggut Desert and its peripheral zone	LIU Huiliang, SONG Mingfang, DUAN Shimin, et al (4308)
The reproductive ecological characteristics of <i>Sinosenecio jishouensis</i> (Compositae) and its endangerment mechanisms	DENG Tao, CHEN Gongxi, ZHANG Daigui, et al (4318)
Iterative algorithm for analyzing the influence of the proportion of permanently destroyed sites on the equilibrium abundances of species	SHI Peijian, GE Feng, YANG Qingpei (4327)
Physiological mechanism of foliage spraying paclobutrazol on increasing salt tolerance of <i>Jatropha curcas</i> seedlings	MAO Yiqing, ZHENG Qingsong, CHEN Jianmiao, et al (4334)
Spatial ecological niche of main insect borers in larch of Aershan	YUAN Fei, LUO Youqing, SHI Juan, et al (4342)
Source areas and landing mechanism of early immigration of white-backed planthoppers <i>Sogatella furcifera</i> (Horváth) in Yunnan, 2009	SHEN Huimei, LÜ Jianping, ZHOU Jinyu, et al (4350)
Life history and the evolutionary significance of egg diapause in Changsha population of the rice grasshopper, <i>Oxya chinensis</i> (Orthoptera: Catantopidae)	ZHU Daohong, ZHANG Chao, TAN Ronghe (4365)
Relationships between main insect pests and their predatory natural enemies in "518" nectarine orchard	SHI Xiaoli, BI Shoudong, GENG Jiguang, et al (4372)
Dynamics of soil meso- and microfauna communities in Zoigê alpine meadows on the eastern edge of Qinghai-Tibet Plateau, China	ZHANG Hongzhi, WU Pengfei, YANG Daxing, et al (4385)
Seasonal changes in waterbirds population and movements of Great Black-headed Gull <i>Larus ichthyaetus</i> at Keluke Lake of Qinghai, China	ZHANG Guogang, LIU Dongping, HOU Yunqiu, et al (4398)
Predictions of net carbon emissions based on the emissions and forest carbon sinks in Yunnan Province	LIU Huiya, WANG Zheng, MA Xiaozhe (4405)
Ecological water depletion by human use in Beijing City	BAI Yinglan, WANG Rusong, YAO Liang (4415)
Review and Monograph	
Research progress on regulation mechanism for the process of water transport in plants	YANG Qiliang, ZHANG Fucang, LIU Xiaogang, et al (4427)
Antibiotics in environmental matrices and their effects on microbial ecosystems	YU Shen, WANG Min, HONG Youwei (4437)
Anaerobic ammonium oxidation in natural ecosystems	SHEN Lidong, ZHENG Ping, HU Baolan (4447)
Scientific Note	
Ecological characteristics of macrobenthic communities and their relation to water environmental factors in four bays of southern Shandong Peninsula	ZHANG Ying, LÜ Zhenbo, XU Zongfa, et al (4455)
Seasonal succession of crustacean zooplankton in relation to the major environmental factors in Lake Ulungur, Xinjiang	YANG Lili, ZHOU Xiaoyu, LIU Qigen, et al (4468)
Effect of different fertilization and irrigation practices on soil ammonia volatilization of Arecanut (<i>Areca catechu</i> L.)	LU Lilan, GAN Bingchun, XU Minghui, et al (4477)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 15 期 (2011 年 8 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 15 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元