

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

# 生态学报

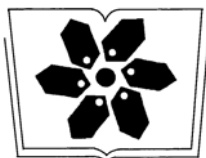
## Acta Ecologica Sinica



第34卷 第6期 Vol.34 No.6 **2014**

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 34 卷 第 6 期      2014 年 3 月    (半月刊)

## 目 次

### 前沿理论与学科综述

- 全球气候变暖对凋落物分解的影响..... 宋 飘,张乃莉,马克平,等 (1327)
- 从系统到景观:区域物质流分析的景观取向 ..... 张晓刚,曾 辉 (1340)
- 论湿地生态系统服务的多维度价值评估方法..... 宋豫秦,张晓蕾 (1352)
- 保幼激素在昆虫中的分子作用机理..... 金敏娜,林欣大 (1361)
- 岩画和壁画类文物微生物病害研究进展..... 李 强,葛琴雅,潘晓轩,等 (1371)
- 基于 3S 技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究 ..... 朱卫红,苗承玉,郑小军,等 (1379)
- 跨界保护区网络构建研究进展..... 王 伟,田 瑜,常 明,等 (1391)

### 个体与基础生态

- 速生树种尾巨桉和竹柳幼苗耗水特性和水分利用效率..... 邱 权,潘 昕,李吉跃,等 (1401)
- 三种增温情景对入侵植物空心莲子草形态可塑性的影响..... 褚延梅,杨 健,李景吉,等 (1411)
- 气象要素及土壤理化性质对不同土地利用方式下冬夏岩溶作用的影响 ..... 刘 文,张 强,贾亚男 (1418)
- 施用纳米碳对烤烟氮素吸收和利用的影响..... 梁太波,尹启生,张艳玲,等 (1429)
- 基于 Voronoi 图的林分空间模型及分布格局研究 ..... 刘 帅,吴舒辞,王 红,等 (1436)
- 近自然毛竹林空间结构动态变化..... 仇建习,汤孟平,沈利芬,等 (1444)
- 基于种实性状的无患子天然群体表型多样性研究..... 刁松峰,邵文豪,姜景民,等 (1451)
- 不同林分起源的相容性生物量模型构建..... 符利勇,雷渊才,孙 伟,等 (1461)

### 种群、群落和生态系统

- 毛竹材用林林下植被群落结构对多花黄精生长的影响..... 樊艳荣,陈双林,杨清平,等 (1471)
- 温度和 CO<sub>2</sub> 浓度升高下转 *Bt* 水稻种植对土壤活性碳氮和线虫群落的短期影响 .....  
..... 陈 婧,陈法军,刘满强,等 (1481)
- 中国东北地区近 50 年净生态系统生产力的时空动态 ..... 李 洁,张远东,顾峰雪,等 (1490)
- 遥感与 GIS 支持下的盘锦湿地水禽栖息地适宜性评价..... 董张玉,刘殿伟,王宗明,等 (1503)
- 秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及对导水性能的影响..... 陆 斌,张胜利,李 侃,等 (1512)
- 磷浓度对铜绿微囊藻、大型溞和金鱼藻三者相互作用的影响..... 马剑敏靳 萍,郭 萌,等 (1520)
- 普生轮藻浸提液对两种淡水藻类的化感抑制作用及其数学模型..... 何宗祥,刘 璐,李 诚,等 (1527)
- 北京永定河-海河干流河岸带植物的区系分析 ..... 修 晨,欧阳志云,郑 华 (1535)
- 基于河流生境调查的东河河流生境评价..... 王 强,袁兴中,刘 红,等 (1548)

景观、区域和全球生态

应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响 ..... 郭军庭,张志强,王盛萍,等 (1559)

长白山不同海拔树木生长对气候变化的响应差异..... 陈 力,尹云鹤,赵东升,等 (1568)

石家庄市空气花粉散布规律及与气候因子的关系..... 李 英,李月丛,吕素青,等 (1575)

不同放牧梯度下呼伦贝尔草甸草原土壤碳氮变化及固碳效应..... 闫瑞瑞,辛晓平,王 旭,等 (1587)

南四湖区农田土壤有机质和微量元素空间分布特征及影响因素..... 武 婕,李玉环,李增兵,等 (1596)

资源与产业生态

跨国土地利用及其生态影响 ..... 陆小璇 (1606)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 288 \* zh \* P \* ¥ 90.00 \* 1510 \* 30 \* 2014-03



**封面图说:** 图们江河流中段——图们江位于吉林省东南边境,发源于长白山东南部的石乙水,河流的绝大部分是中国与朝鲜的界河,下游很小一段为俄罗斯与朝鲜的界河,并由这里流入日本海,我国珲春距离日本海最近的地方仅有 15km。图们江是我国重要的国际性河流之一,随着我国经济的迅速崛起,图们江地区进入到多国合作联合开发阶段,湿地生态系统处于中度预警状态,并有向重度预警发展的趋势,生态安全面临的威胁越来越严重。对该区域进行湿地生态安全评价与预警研究,可为图们江流域生态环境的可持续发展提供依据。图中河道的远方为朝鲜、河道近方为中国。

**彩图及图说提供:** 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@ 163.com

DOI: 10.5846/stxb201307051841

李强, 葛琴雅, 潘晓轩, 王宇, 朱旭东, 郭宏, 潘皎. 岩画和壁画类文物微生物病害研究进展. 生态学报, 2014, 34(6): 1371-1378.

Li Q, Ge Q Y, Pan X X, Wang Y, Zhu X D, Guo H, Pan J. Microbial deterioration in ancient cave and wall paintings. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1371-1378.

## 岩画和壁画类文物微生物病害研究进展

李 强<sup>1</sup>, 葛琴雅<sup>2</sup>, 潘晓轩<sup>1</sup>, 王 宇<sup>1</sup>, 朱旭东<sup>1</sup>, 郭 宏<sup>2</sup>, 潘 皎<sup>1,\*</sup>

(1. 南开大学生命科学学院微生物系, 分子微生物学与技术教育部重点实验室, 天津 300071;

2. 中国文化遗产研究院, 北京 100029)

**摘要:** 古代岩画和壁画是人类文明发展历史进程的重要记录, 具有极高的历史价值、艺术价值及科学价值, 但他们无时无刻不受到环境因素引起的物理、化学及生物的劣化作用。近年, 有关微生物对古代岩/壁画的危害逐渐受到关注。阐述了世界一些著名的岩/壁画文物的微生物的研究进展, 如法国拉斯科洞穴岩画 (Lascaux Cave)、西班牙阿尔塔米拉洞穴岩画 (Altamira Cave)、敦煌石窟壁画、嘉峪关魏晋墓壁画以及我国东北地区公元 5 世纪的墓葬壁画等。通过对以上所述岩画和壁画微生物群落的分析比较, 发现主要的细菌群落是变形菌门和放线菌门, 放线菌门以假诺卡氏菌为主。真菌群落主要以虫生真菌为主。进一步分析了岩画和壁画微生物病害的共性和区别, 揭示了洞穴、墓室等特殊环境下的微生物群落特点, 为防治古代岩/壁画微生物病害提供了以下借鉴。

**关键词:** 岩画和壁画; 群落分析; 变形菌门; 假诺卡氏菌; 虫生真菌; 藻类

## Microbial deterioration in ancient cave and wall paintings

LI Qiang<sup>1</sup>, GE Qinya<sup>2</sup>, PAN Xiaoxuan<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>, ZHU Xudong<sup>1</sup>, GUO Hong<sup>2</sup>, PAN Jiao<sup>1,\*</sup>

1 Key Laboratory of Molecular Microbiology and Technology, Ministry of Education, Department of Microbiology, Nankai University, Tianjin 300071, China

2 Chinese Academy of Cultural Heritage, Chaoyang District, Beijing 100029, China

**Abstract:** Ancient cave and wall paintings are important records of human civilization, with great historical, artistic and scientific value, however they are commonly affected by physical, chemical and biological deterioration. In recent years, the issue of microbial deterioration in ancient cave and wall paintings has received more attention. This paper summarizes the research progress on the effect of microbes on famous cave and wall paintings throughout the world, such as the Lascaux cave paintings (France), the Altamira cave paintings (Spain), the Dunhuang Mogao grottoes murals (China), the Wei and Jin dynasty tomb wall paintings (Jiayuguan, China), and the 5<sup>th</sup> century tomb murals from the northeast of China. Through a comparative study of microbial communities at these sites, we conclude that the microbes responsible for cave painting degradation are mainly Proteobacteria and Actinobacteria, of which *Escherichia* and *Enterobacter* are types of human pathogenic Proteobacteria. According to the analysis in this review, the emergence of these microbial communities in cave and wall paintings is closely related to the presence of tourists. The acid metabolism produced by *Pseudomonas* and *Nitrobacter* causes serious corrosion of murals. Our results suggest that the Actinobacteria *Pseudonocadia* accounts for approximately 68% of bacteria in a clone library produced from samples taken from 5<sup>th</sup> Century tomb murals in northeast China. *Pseudonocadia* is the dominant microflora responsible for white biofilms attached to the murals, while algae are the dominant flora responsible for the green biofilms, the abundance of which is closely related to light, carbon dioxide and humidity levels in the cave. Conversely, fungal communities on cave murals, dominated by entomogenous fungi, appear to

**基金项目:** 财政部中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助; 中国文化遗产研究院基本科研业务费课题 (2009-JBKY-16)

**收稿日期:** 2013-07-05; **修订日期:** 2014-03-03

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: panjiaonk@nankai.edu.cn



have a close relationship with insects that live in the cave. This paper analyzed similarities and differences between microbial communities that do harm to famous ancient cave and wall paintings, in an effort to understand their characteristics under the specific conditions found in caves and tombs, and also provide useful information for ancient painting conservation. Firstly, if effective measures are to be taken to protect these world heritage sites, it is important to consider the ecological perspective. Microorganisms do not grow in isolation and the relationship between various microorganisms, between microorganisms and the environment, and between microorganisms and insects, should be considered in order to facilitate the protection process. For example, a change in cave temperature and humidity will prevent a proportion of the microflora from growing due to the newly unsuitable conditions. Secondly, adopting a cross-disciplinary approach incorporating physics, chemistry, biology and engineering science, will help to control the emergence of these damaging microfloral communities. Furthermore, employing the methodology of phage inhibition and competitive advantage to inhibit the growth of unwanted microbial communities has proven to be an important research direction in recent years. Thirdly, both the conservation and tourist requirements of these cave sites must be balanced in the long-term, for example by reducing the number of visitors that enter the caves and tombs, and by employing the use of disposable sterile clothing and shoe covers to reduce the transmission of exogenous microbes into the caves. The long-term monitoring and regular analysis of cave and tomb paintings and the balancing of the local ecosystem are both important directions for the protection of these cultural heritage sites.

**Key Words:** cave paintings and wall paintings; community analysis; proteobacteria; *Pseudonocardia*; entomogenous fungus; algae

古代岩画与壁画是人类文明历史进程的重要记录,具有极高的历史价值、艺术价值和科学价值。然而,长期的温/湿度改变、光照、风沙、雨水冲刷、微生物等环境以及人类活动的影响,使得这些珍贵文物不得不承受着裂隙、空鼓、酥碱和霉变等多种病害的损坏<sup>[1]</sup>。传统的研究主要是物理化学方面的防治,生物作用给壁画带来的损坏研究较少。但是随着考古科学的进行,生物病害问题逐渐引起关注。法国拉斯科洞穴(Lascaux Cave)岩画就是一个很好地例子。拉斯科洞穴岩画反映了旧石器时代人类的文明,对于现代人追溯远古人类生活和艺术创造活动具有极高的价值。但是由于后续的人为的活动,造成洞穴内部壁画受到了藻类、细菌以及真菌的损坏。西班牙阿尔塔米拉洞穴岩画(Altamira Cave)是保存完好的并反映欧洲旧石器时代晚期社会状况的古老岩画,由于长期对完开放,目前也正遭受到微生物病害的侵袭。敦煌石窟壁画、嘉峪关魏晋墓壁画以及我国东北地区公元5世纪的墓葬壁画是我国古代文明的象征,反映出我国古代人的生活以及社会状况,是古代劳动人民智慧的结晶以及体现古代人极高的艺术造诣。但是,由于一些外界以及人为因素的影响,微生物病害对壁画也造成了严重的损坏。本文

阐述了世界一些著名的岩/壁画类微生物的研究进展,如法国拉斯科洞穴岩画(Lascaux Cave)、西班牙阿尔塔米拉洞穴岩画(Altamira Cave)、敦煌石窟壁画、嘉峪关魏晋墓壁画以及我国东北地区公元5世纪的墓葬壁画等,分析了其微生物病害的共性和区别,以期揭示洞窟、墓室等特殊环境下的一些微生物群落特点,为古代岩/壁画的保护提供参考。

## 1 细菌与岩/壁画文物

马燕天等<sup>[2]</sup>研究表明,洞穴岩画、石窟壁画、墓葬壁画表面的微生物中,细菌占有绝大多数比例,而其中变形菌门和放线菌门是目前发现的主要的细菌类群。

### 1.1 变形菌门

变形菌门是细菌中的一大类,为革兰氏阴性菌。依据16S rRNA基因序列分析及分子系统发育研究,这类细菌可被分为5个纲,分别为 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$ 和 $\epsilon$ 变形菌纲。 $\alpha$ -变形菌纲除了光合微生物外也有固氮微生物的存在; $\beta$ -变形菌纲大部分为好氧和兼性厌氧性细菌,通常具有很强的降解能力; $\gamma$ -变形菌纲是自然界中广泛存在的一类菌,其中一些是医学上和科学研究中很重要的类群,如肠杆菌科

(Enterobacteraceae)、弧菌科(Vibrionaceae)和假单胞菌科(Pseudomonadaceae)等很多重要的病原菌; $\delta$ -变形菌纲主要是跟硫代谢相关的类群,如硫酸盐还原菌; $\varepsilon$ -变形菌纲只有少数几个属,多数是弯曲或螺旋形的细菌。

在法国拉斯科、西班牙阿尔塔米拉和 Tito Bustillo 洞穴,以及中国多地墓室壁画和石窟壁画中均发现,变形菌门一般占到微生物群落的 45%—50%。其中,变形菌门在拉斯科洞穴中可占到 98%<sup>[3]</sup>,其中以青枯杆菌(*Ralstonia* sp.)和假单胞菌(*Pseudomonas* sp.)为主。阿尔塔米拉洞穴中的变形菌门占 52%;Portillo 等人利用 RNA 技术和 DGGE 相结合,对阿尔塔米拉岩画上白色微生物污染菌群进行分析,发现几乎全部为与鞘氨醇单胞属相关细菌(*Sphingomonas*-related bacteria, SRB)为主的  $\alpha$ -变形菌门( $\alpha$ -proteobacteria),其次还有其他优势种类,如酸杆菌门(Acidobacteria)、放线菌门(Actinobacteria)、 $\beta$ -变形菌( $\beta$ -proteobacteria)以及  $\gamma$ -变形菌门( $\gamma$ -proteobacteria)<sup>[4]</sup>;这与基于 16S rDNA 鉴定的主要优势菌为变形菌门和酸杆菌门的结果相吻合<sup>[5]</sup>。在对敦煌莫高窟洞窟内细菌的研究中发现,白色污染物主要是细菌生长而形成的菌斑,所测得的微生物中几乎全部属于  $\gamma$ -变形菌门,变形菌门细菌通常可占到洞窟中微生物群落总数的 45%—50%;测得 5 个属,分别为肠杆菌属(*Enterobacter*)、埃希菌属(*Escherichia*)、固氮菌属(*Azotobacter*)、沙雷氏菌属(*Serratia*)和克雷伯菌属(*Klebsiella*);其中埃希菌属和肠杆菌属为优势属<sup>[6-7]</sup>。本研究组通过构建细菌 16S rDNA 以及真菌克隆文库对我国北方公元 5 世纪墓葬壁画表面微生物进行了群落分析,根据随机挑取的 70 个克隆转化子所含 DNA 片段情况,检测到了埃氏慢生根瘤菌(*Bradyrhizobium elkanii*)、红假单胞菌属(*Rhodopseudomonas* sp.)以及非培养变形菌(Uncultured Proteobacterium)分别占到细菌克隆文库的 2.86%、1.43% 和 7.14%<sup>[8]</sup>,表明这些变形菌的存在对壁画也造成一定潜在的危害。

变形菌门多数为人体致病菌,可以在岩画/壁画等寡营养条件下生存,并且能降解其他生物难以利用的物质。埃希菌、肠杆菌、沙雷氏菌和克雷伯菌属广泛存在于土壤、大气和水环境中,推测洞穴内细菌的大量存在与人类活动有一些相关<sup>[6]</sup>,其大量繁殖

形成的菌落严重影响壁画的美观;而另一类主要菌群假单胞菌如斯氏假单胞菌(*P. stutzeri*)、荧光假单胞菌和弯曲假单胞菌(*P. geniculata*)等的部分菌株具有联合固氮作用,可以把空气中的氮气转化为亚硝酸或者硝酸,对壁画可造成一定的腐蚀<sup>[9]</sup>。此外,发现变形菌门中的铜绿假单胞菌(绿脓杆菌)、荧光假单胞菌、恶臭假单胞菌等在微生物存在于岩石土壤中,该属细菌有较强的解磷作用,即将植物等难以利用的含磷成分转变为可以利用的磷盐形式,特别是以溶解不溶性磷酸盐类为特征的无机解磷作用进而破坏石质文物的岩石结构,造成壁画表面颜料的脱落。由于变形菌门中的微生物分布较广泛,并且与人类的活动密切相关,因此对世界各地已经对外开放的洞窟和洞穴壁画上微生物的群落分析中几乎都能检测到变形菌门的存在。一方面,假单胞菌属、肠杆菌属等常见细菌的生长,会在壁画表面形成大小不等的有色的菌落,影响壁画的美观。阿尔塔米拉洞穴壁画、敦煌莫高窟壁画表面的白色菌斑严重影响了壁画的观赏价值。另一方面,硝化细菌以及硫化细菌的存在把空气中的无机氮以及无机硫转化成可以被其他微生物利用的无机盐类,有利于其他异养菌在壁画上的繁殖。另外,由于壁画大多采用动物胶或者植物胶等有机物为胶结材料,为微生物的生长提供营养物质。异养菌的大量繁殖会造成壁画颜料脱落以及石质材料腐蚀等一系列潜在的危害。

## 1.2 放线菌门

假诺卡氏菌(*Pseudonocardia* sp.)属于放线菌门、诺卡氏菌科、假诺卡氏菌属;基内菌丝多横隔,顶生芽殖;多数种为异养需氧型,少数种可营自养;其适宜生长适 pH 值一般为弱碱性(pH 值 7.5—8.5);代表菌株为嗜热假诺卡氏菌;该类微生物次级代谢旺盛,代谢产物多为色素、有机酸以及粘性物质等;假诺卡氏菌属的许多菌株会产生抗生素,这无疑会对许多微生物起到抑制生长的作用。研究表明,地下墓室、洞穴环境中,壁画会首先会受到以诺卡氏菌属(*Pseudonocardia*)和链霉菌属(*Streptomyces*)为主的放线菌的侵袭,随着环境的改变,逐渐被其他的细菌、真菌和藻类所取代。武发思等<sup>[10]</sup>通过构建克隆文库对嘉峪关魏晋砖壁画墓壁画表面白色菌斑进行 16S rDNA 分析发现,造成 6 号墓和 7 号墓白色污染

的细菌主要是假诺卡氏菌;其中在六号墓克隆文库中假诺卡氏菌占 70%。Stomeo 等<sup>[11]</sup>发现,塞维亚 Dona Trinidad 和 Santimamne 洞穴壁画上代谢活性最强的微生物种群假诺卡氏菌(*Pseudonocardia*)分别占到了 16S rRNA 基因文库和总基因文库中的 85.6%和 65.7%。本课题组针对造成我国北方公元 5 世纪墓葬壁画表面白色病害(图 1),运用 16S rDNA 克隆文库技术对墓室的壁画样品进行分析<sup>[8]</sup>。



图 1 我国东北地区公元 5 世纪墓葬壁画微生物的白色菌斑

Fig. 1 White biofilms on the tomb murals drawn in 5th century in Northeast China

结果表明,造成壁画白色污染的主要为假诺卡氏菌(GenBank 登录号:JX416705),其在墓室多个样品中所占的比例为 68%左右(图 2)。

由于该墓葬属于半地下墓,内部环境较稳定,长年温度 8—17℃,相对湿度多在 95%以上。壁画主要是在花岗岩上直接涂抹颜料和动物胶的混合物绘制的,主体颜色为红、绿、黄,成份分别为朱砂( $\text{HgS}$ )、石绿 $[\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2]$ 和铁黄( $\alpha\text{-FeOOH}$ )。研究中发现该菌在壁画不同颜色颜料上表现出一定的偏好性,绿色颜料几乎全部覆盖白色菌斑,这可能是由于假诺卡氏菌对  $\text{Cu}^{2+}$  有一定的偏好性,进而栖息于该染料上。此外,墓室内壁画的寡养环境以及高盐的特性一定程度上减少了其他微生物与假诺卡氏菌的竞争。壁画表面假诺卡氏菌的生长不仅影响了壁画的观赏,也对壁画造成了潜在的威胁。Abdulla 等<sup>[12]</sup>指出,在完好的石块上没有检测到假诺卡氏菌(*Pseudonocardia*),而只有在破损的石头才能检测出该菌;将该属菌株涂抹在石灰石上培养 4 周后,伴随 pH 值降低,石头重量减少了 4%,说

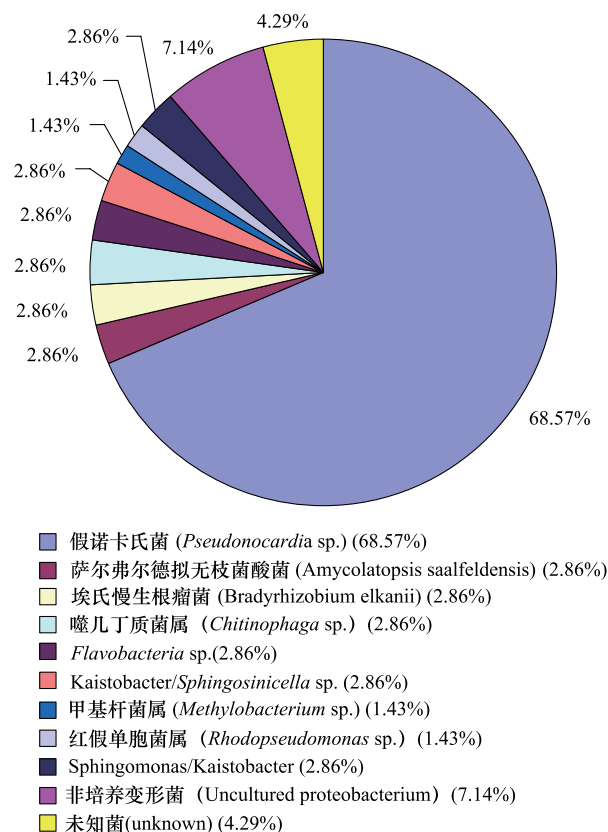


图 2 壁画表面菌斑细菌克隆文库示意图

Fig. 2 The diagram of the bacterial clone libraries from biofilms of mural surface

明该属菌株可能分泌胞外有机酸,对石块造成一定的腐蚀。最近,Soledad Cuezva 等<sup>[13]</sup>发现在阿尔塔米拉洞穴岩画中发现的放线菌能利用空气中的  $\text{CO}_2$  并在壁画的表面形成灰色斑点并造成需钙微生物的生长,其代谢产物中的酸性物质会对壁画造成严重的腐蚀。放线菌的基内菌丝会伸入壁画内部,造成壁画颜料层的脱落;由于大部分的放线菌的次级代谢比较旺盛,其分泌的色素、有机酸以及粘性物质会对壁画的本体材料造成腐蚀作用,严重影响了壁画的保存和外观。

## 2 真菌与岩/壁画文物

虽然在上述洞穴和墓葬壁画微生物中以细菌为主,但一旦爆发真菌病害,可能对壁画造成更加严重的损坏。这是因为真菌产生的菌斑不仅污染壁画,严重影响壁画艺术价值,而且发达的菌丝会伸入壁画内部,造成颜料和地仗脱落,同时分泌的有机酸或者粘性代谢物,会腐蚀壁画并在其表面形成结晶体。



敦煌莫高窟壁画的主要病害之一是红色铅丹的褐变(变色);李最雄<sup>[14]</sup>的研究表明,铅丹褐变过程是铅丹首先转变为铅白,铅白再转化为褐色(黑色)二氧化铅,这种变化在一定的湿度和光照条件下即能完成;后期的研究结果证明,由铅白到二氧化铅的转变必须在微生物的作用下才能够完成,冯清平等<sup>[15]</sup>发现枝孢霉(*Cladosporium* sp.)和黑曲霉可以利用牛皮胶为营养物质的壁画颜料层上生长,造成颜料的脱落和颜料的褐变。在法国拉斯科洞穴、西班牙阿尔塔米拉洞窟以及我国东北地区公元5世纪墓葬壁画也都发现了大量真菌的存在。

对于壁画真菌的防治,不能忽视相同环境中生活的节肢动物。研究发现,一些穴居的昆虫,如石蛾等,经常在洞穴中度过夏天,进入洞穴的同时带去外来真菌;另一方面,这些昆虫的尸体可以为真菌提供丰富的营养物质,为真菌的生长提供良好的生存环境。Valme Jurado 研究发现在洞窟、墓葬、壁画以及教堂外彩绘玻璃窗存在大量的昆虫寄生真菌,在节肢动物的死亡、有机物的清除以及真菌孢子的生长和扩散中起到重要的作用<sup>[16]</sup>。Dupont 等<sup>[17]</sup>首次报道腐皮镰刀菌在拉斯科洞穴中形成的白色菌斑,并且发现了其他真菌,由于这些真菌大部分是昆虫致病真菌,因此推测岩画表面微生物的爆发跟洞穴内的节肢动物存在一定的关系。Jurado 等人<sup>[18]</sup>通过模拟岩画材料的研究,分离出了阿尔塔米拉洞窟中一些真菌,主要为直立顶孢霉(*Acremonium strictum*)、淡色生赤壳菌(*Bionectria ochroleuca*)、枝状枝孢霉(*Cladosporium cladosporioides*)、刀孢轮枝菌(*Lecanicillium psalliotae*)和马昆德拟青霉(*Paecilomyces marquandii*);并且在洞穴内还发现了 *Stenophylax fissus* (一种在西班牙洞窟中常见的石蚕蛾)的尸体,上边覆盖了一层虫草棒束孢菌(*Isaria farinosa*)。同时还发现了感染单端孢菌(*Trichothecium asperum*)的昆虫;这与法国拉斯科洞穴中的黑色霉斑周围的一种弹尾纲跳虫比较相似。这些动物一方面可以把真菌的菌丝体带到壁画的其他地方,造成壁画表面的大面积污染;另一方面它们的蜕皮、尸体可以为真菌提供营养物质。

本课题组在我国东北地区的墓室内同样也发现了弹尾纲虫,并且检测出的真菌,如爪哇拟青霉、毡状地丝霉、蜡蚧轮枝菌等,其大部分为虫生真菌;爪哇拟青霉在自然界里主要感染双翅目和鳞翅目昆

虫,菌丝有很强的几丁质酶活性,可以利用昆虫的外壳为营养物质进行代谢活动(数据未出版)。结果表明,爪哇拟青霉(*P. javanicus*)占真菌克隆文库总数的20%,但不同样品中真菌的优势种群不一致(图3);毡状地丝霉和蜡蚧轮枝菌是重要的昆虫病原体,可以低温下生存并且利用昆虫传播孢子,从而造成壁画大范围的菌害的发生。本研究中弹尾纲虫与真菌间到底存在着怎样的关系,将是本课题组今后研究的一个重要方向。如果弹尾纲虫是真菌的寄生体,并且可以利用昆虫的大范围活动进而传播孢子,那么对于后续病害的防治将提供了新的思路。另外,墓室常年处于低温环境下,为上述推测提供了理论依据。蚂蚁和假诺卡氏菌的共生关系先前早有报道,而在本研究中弹尾纲虫的出现以及假诺卡氏菌害的爆发有无必然的联系,也是后续研究中关注的一个重要的问题。对于墓室内复杂的环境与微生物病害之间的共生关系结合起来讨论,才能制定有效的防治措施,从根本上抑制病害的发生。

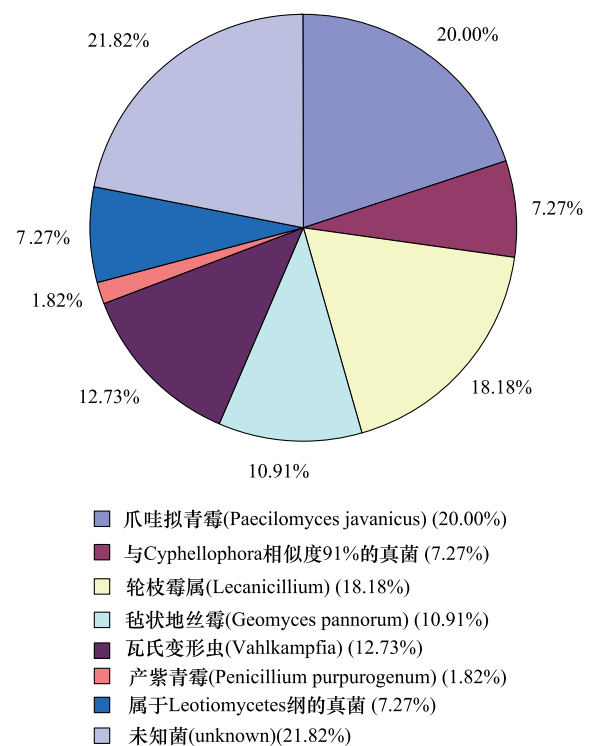


图3 壁画表面菌斑真菌克隆文库示意图

Fig.3 The diagram of the fungal clone libraries from biofilms of mural surface

### 3 藻类与岩画/壁画文物

研究发现,藻类是造成岩画和壁画病害的另一



一个重要原因。拉斯科洞穴第 1 次病害爆发主要是微细绿藻 (*Bracteacoccus minor*) 繁殖, 形成绿色生物被膜<sup>[19]</sup>, 洞穴被迫于 1963 年关闭。本课题组对上述墓室内照明灯附近的绿色微生物进行了分子鉴定, 发现造成墓室内部壁画表面绿色病害微生物主要是蓝细菌 (*Cyanobacteria*) 中的瘦鞘丝藻 (图 4) (数据未出版)。瘦鞘丝藻见于国内外很多报道, 在马耳他古基督徒<sup>[20]</sup>和罗马 St. Callistus and St. Domitilla 的地下墓室<sup>[21]</sup>、意大利 Boboli 花园大理石雕像<sup>[22]</sup>、墨西哥玛雅石质文物<sup>[23]</sup>、西班牙 Seville 大教堂、葡萄牙 Santa Clara-a-Velha 修道院石灰石建筑等<sup>[24]</sup>遗址或文物上均分析出该种类微生物; 中国福建水田<sup>[25]</sup>、(南极) 海洋等自然环境<sup>[26-27]</sup>也分析出该种类微生物, 它是石质建筑表面光合群落里最常见的蓝细菌之一。一方面, 藻类呼吸产生的  $\text{CO}_2$  气体会溶于水形成碳酸, 碳酸的化学酸蚀作用会使石材腐蚀; 另一方面, 藻类与其他真菌形成共生关系, 藻类利用真菌提供的无机质生长, 真菌利用藻类提供的有机物质大量繁殖, 进而造成壁画的脱落和损坏。



图 4 我国北方公元 5 世纪墓葬壁画微生物的绿色菌斑

Fig. 4 Green biofilms on the tomb murals drawn in 5th century in North China

由于墓葬位于地下, 墓室存在严重的渗水现象, 墓室内部水份充足, 墓室长期对外开放, 游客的大量涌入带了了充足的  $\text{CO}_2$ 。绿色菌斑的周围又有长期的日光灯的照射, 为藻类的光合作用提供了充足的外部条件, 使得藻类大量繁殖。研究中发现只在日光灯照射的壁画上出现了绿色藻类, 充分的说明灯光的照射是藻类的大量繁殖的直接原因。李永新<sup>[28]</sup>研究表明, 生长在岩石上的藻类会利用水中的  $\text{CO}_2$  进行光合作用, 进而造成水中  $\text{CO}_2$  的分压降低,

使得  $\text{CaCO}_3$  在水中的溶解度降低而析出沉淀; 同时有些生物能分泌大量含有粘性有机质的胶鞘, 具有粘结、捕获碳酸钙微细颗粒而富集沉积碳酸钙的作用。壁画表面  $\text{CaCO}_3$  颗粒的沉积, 造成壁画内部颜料晶体的迁移进而引起壁画的脱色。

#### 4 展望

目前国内外对各类岩画/壁画的保护大多采用物理、化学以及工程技术的方法, 如应用激光技术进行石材的清洗与翻新、壁画表面化学保护材料的应用、原位保护加固技术以及防腐化学试剂的应用, 在一定程度上延长了文物的寿命, 但是部分方法存在着明显的缺陷, 如材料老化、岩/壁画色泽的变异、保护材料的存留以及后期不可预测的环境问题。尤其是微生物病害问题, 传统的物理化学方法很难从根本上解决。当壁画遭受到微生物的代谢腐蚀和生长损坏时, 对于病害微生物类群的定性研究尤为重要。盲目的使用抗生素或化学杀菌剂会打破岩画和壁画表面固有的微生物群落生态系统的平衡, 由于某些微生物会产生对药物的抗药性而大量繁殖, 从而进一步对岩画和壁画造成不可估量的破坏<sup>[19]</sup>。拉斯科就是一个典型的例子, 为了抑制绿化膜的生长, 人们大量喷洒杀虫剂和甲醛类化学试剂, 造成了青枯杆菌和假单胞菌菌害的爆发, 以及后续的造成壁画表面黑色菌斑的齿梗孢属 (*Scolecobasidium tshawytschae*) 的出现都与滥用杀菌剂有密切关系<sup>[29]</sup>。

因此, 若要采取有效的措施进行世界遗产地的保护, 生态学思想在文物保护中起到重要作用, 为了达到真正的保护目的, 必须从洞穴内整个生态学角度功能方面考虑, 而不是单独的去针对某一方面。因此必须对造成病害的微生物类群进行定期的监测和充分的研究。洞窟以及洞穴环境中的任何一种生物都不是孤立存在的, 对于微生物的检测不能只停留在某种微生物的出现与否为检测依据, 必须充分了解整个生态系统中微生物所处的位置、作用、相互关系及变化规律等。当然这种关系包括微生物之间的关系、微生物与动植物之间的关系、微生物与壁画或岩画的关系以及微生物与杀菌剂、保护材料之间的关系。如洞穴内温度湿度的变化会导致一部分微生物因为环境不适宜而停止生长, 由于微生物之间

可能存在共生或者竞争关系,一种微生物的减少会引起另一种微生物的减少或者增加。由于不同微生物之间代谢类型以及生理生化性质的差异,这种微生物群落结构的变化会对文物造成深远的影响。像本研究中墓室常年处于低温潮湿,环境条件的改变也势必对墓室壁画表面颜料的稳定以及岩石的本体结构造成一定的改变,进而对墓室壁画造成危害。因此开展对墓室内环境的长期的检测,有利于维持墓室内环境的稳定。

现代生物技术的发展,使得文物保护研究的手段不断增多。由于不同文物的地理位置、环境以及材质不同,目前没有形成一套系统的研究保护手段。例如本研究中的白色菌斑主要是假诺卡氏菌,但是敦煌莫高窟壁画上的白色菌斑主要是变形菌门。因此我们要具体问题具体分析。适当学习和借鉴其他文物的保护方法,并且制定出具有针对性的保护方案,有利于保护人类共同的文化遗产。另外,考虑到文物材料本身珍贵,开发新的生物研究手段,如何利用尽可能少的样品得到更多的信息成为文物保护中优先考虑的问题。

适当的人工干预措施也是非常必要的,比如适当控制壁画和岩画所处环境中的温、湿度,减少游客参观以及游客进入时使用一次性无菌衣和鞋套以减少外源微生物的带入等;物理、化学、生物学以及工程学等多学科之间的交叉研究也是目前文物病害检测与保护的热点。另外,采用噬菌体抑制细菌,或依靠微生物之间的拮抗作用等生物防控手段也是当前研究的一个重要方向。因此通过对壁画或岩画表面的微生物群落系统进行长期的定期监测分析,掌握生态系统的稳定状态及变化规律,针对主要病害进行有效的防范和治理,最终达到使整个生态系统维持健康、稳定、平衡的发展,在最大程度上减少微生物对壁画或岩画的破坏,是目前微生物学研究在壁画或岩画保护领域主要的发展方向。

#### References:

- [ 1 ] Li Z X. The protection situation and the task of the Dunhuang grottoes. *Dunhuang Research*, 2000, (1): 10-23.
- [ 2 ] Ma Y T, Wu F S, Ma X, Wang W F, Ma X J, An L Z, Feng H Y. A review on a microbial community in prehistoric Altamira Cave paintings. *Dunhuang Research*, 2011, (6): 115-120.
- [ 3 ] Bastian F, Alabouvette C, Jurado V, Saiz-Jimenez C. Impact of biocide treatments on the bacterial communities of the Lascaux Cave. *Naturwissenschaften*, 2009, 96(7): 863-868.
- [ 4 ] Portillo M C, Saiz-Jimenez C, Gonzalez J M. Molecular characterization of total and metabolically active bacterial communities of "white colonizations" in the Altamira Cave, Spain. *Research in Microbiology*, 2009, 160(1): 41-47.
- [ 5 ] Portillo M C, Gonzalez J M, Saiz-Jimenez C. Metabolically active microbial communities of yellow and grey colonizations on the walls of Altamira Cave, Spain. *Journal of Applied Microbiology*, 2008, 104(3): 681-691.
- [ 6 ] Zhang R L, Tang D P, Zhang N, Wang W R, Zhang D M, Wu F S, Xui L G. The bacterial diversity in the Mogao Grottoes, Dunhuang, China. *Microbiology*, 2012, 39(5): 614-623.
- [ 7 ] Wu F S, Wang W F, He D P, Chen G Q, Ma Y T, Zhang X D, Feng H Y. Molecular techniques used to analyze the bacterial groups on mural paintings in Wei and Jin Dynasty Tombs, Jiayuguan. *Dunhuang Research*, 2011, 130(6): 51-58.
- [ 8 ] Ge Q Y, Li Z M, Sun Y Z, Pan J, Wen A H, Guo H. Application of molecular biological techniques in identifying pathogenic microbes on mural paintings. *Science of Conservation and Archaeology*, 2012, 24(2): 14-21.
- [ 9 ] Yan F, Ge Q Y, Li Q, Yu M, Zhu X D, Pan J. Analysis of microbial community on the surface of the historic stone and nearby rock samples in Yungang Grottoes. *Acta Microbiologica Sinica*, 2012, 52(5): 629-636.
- [ 10 ] Groth I, Vettermann R, Schuetze B, Schumann P, Saiz-Jimenez C. Actinomycetes in Karstic caves of northern Spain (Altamira and Tito Bustillo). *Journal of Microbiological Methods*, 1999, 36(1/2): 115-122.
- [ 11 ] Stomeo F, Portillo M C, Gonzalez J M, Laiz L, Saiz-Jimenez C. Pseudonocardia in white colonizations in two caves with Paleolithic paintings. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2008, 62(4): 483-486.
- [ 12 ] Abdulla H, May E, Bahgat M, Dewedar A. Characterisation of Actinomycetes isolated from ancient stone and their potential for deterioration. *Polish Journal of Microbiology*, 2008, 57(3): 213-220.
- [ 13 ] Schabereiter-Gurtner C, Saiz-Jimenez C, Piñar G, Lubitz W, Rölleke S. Altamira cave Paleolithic paintings harbor partly unknown bacterial communities. *FEMS Microbiology Letters*, 2002, 211(1): 7-11.
- [ 14 ] Li Z X, Stetan M. The effect of Light and humidity on terra rossa, cinnabar and minium. *Dunhuang Research*, 1989, 6: 80-93.
- [ 15 ] Feng Q P, Zhang X J, Ma Q L, Ma X J. Studies on microbiology factor in colour change of Mogao Grottoes Murals-II. Effect of microorganism on the pigment of imitative Mural. *Acta Microbiologica Sinica*, 1998, 38(2): 131-136.
- [ 16 ] Jurado V, Sanchez-Moral S, Saiz-Jimenez C. Entomogenous fungi and the conservation of the cultural heritage: A review.

- International Biodeterioration and Biodegradation, 2008, 62(4): 325-330.
- [17] Dupont J, Jacquet C, Denetiere B, Lacoste S, Boust F, Orial G, Cruaud C, Couloux A, Roquebert M F. Invasion of the French Paleolithic painted cave of Lascaux by members of the *Fusarium solani* species complex. *Mycologia*, 2007, 99(4): 526-533.
- [18] Jurado V, Fernandez-Cortes A, Cuezva S, Laiz L, Cañaveras J C, Sanchez-Moral S, Saiz-Jimenez C. The fungal colonisation of rock-art caves: experimental evidence. *Naturwissenschaften*, 2009, 96(9): 1027-1034.
- [19] Bastian F, Alabouvette C. Lights and shadows on the conservation of a rock art cave: the case of Lascaux Cave. *International Journal of Speleology*, 2009, 38(1): 55-60.
- [20] Zammit G, Psaila P, Albertano P, et al. An investigation into biodeterioration caused by microbial communities colonising artworks in three maltese palaeo-christian catacombs. 9th International Conference on NDT of Art, Jerusalem Israel, 2008: 25-30.
- [21] Saarela M, Alakomi H L, Suihko M L, Maunuksela L, Raaska L, Mattila-Sandholm T. Heterotrophic microorganisms in air and biofilm samples from Roman catacombs, with special emphasis on actinobacteria and fungi. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2004, 54(1): 27-37.
- [22] Lamenti G, Tiano P, Tomaselli L. Biodeterioration of ornamental marble statues in the Boboli Gardens(Florence, Italy). *Journal of Applied Phycology*, 2000, 12(3/5): 427-433.
- [23] McNamara C J, Perry T D, Bearce K A, Hernandez-Duque G, Mitchell R. Epilithic and endolithic bacterial communities in limestone from a Maya archaeological site. *Microbial Ecology*, 2006, 51(1): 51-64.
- [24] Miller A Z, Laiz L, Dionisio A, Macedo M F, Saiz-Jimenez C. Growth of phototrophic biofilms from limestone monuments under laboratory conditions. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2009, 63(7): 860-867.
- [25] Song T Y, Mårtensson L, Eriksson T, Zheng W W, Rasmussen U. Biodiversity and seasonal variation of the cyanobacterial assemblage in a rice paddy field in Fujian, China. *FEMS Microbiology Ecology*, 2005, 54(1): 131-140.
- [26] Premanandh J, Priya B, Prabakaran D, Uma L. Genetic heterogeneity of the marine cyanobacterium *Leptolyngbya valderiana* (Pseudanabaenaceae) evidenced by RAPD molecular markers and 16S rDNA sequence data. *Journal of Plankton Research*, 2009, 31(10): 1141-1150.
- [27] Komárek J. Phenotype diversity of the cyanobacterial genus *Leptolyngbya* in the maritime Antarctic. *Polish Polar Research*, 2007, 28(3): 211-231.
- [28] Li Y X, Tian Y P, Li Y. Tufa algae and biological karstification at Huanglong, Sichuan. *Carsologica Sinica*, 2011, 30(1): 86-92.
- [29] Ma X, Mao L, Ma Y T, Wu F S, Wang W F, Ma X J, An L Z, Feng H Y. A review on microbial community ecology in prehistoric Lascaux Cave paintings. *Dunhuang Research*, 2010, (6): 115-120.

#### 参考文献:

- [1] 李最雄. 敦煌石窟的保护现状和面临的任务. *敦煌研究*, 2000, (1): 10-23.
- [2] 马燕天, 武发思, 马旭, 汪万福, 马晓军, 安黎哲, 冯虎元. 史前洞窟阿尔塔米拉(Altamira Cave)壁画微生物群落研究进展. *敦煌研究*, 2011, (6): 115-120.
- [6] 张曷林, 唐德平, 张楠, 王婉如, 张东明, 武发思, 薛林贵. 敦煌莫高窟中细菌多样性的研究. *微生物学通报*, 2012, 39(5): 614-623.
- [7] 武发思, 汪万福, 贺东鹏, 陈港泉, 马燕天, 张晓东, 冯虎元. 嘉峪关魏晋墓腐蚀壁画细菌类群的分子生物学检测. *敦煌研究*, 2011, 130(6): 51-58.
- [8] 葛琴雅, 李哲敏, 孙延忠, 潘皎, 文安华, 郭宏. 壁画菌害主要种群之分子生物学技术检测. *文物保护与考古科学*, 2012, 24(2): 14-21.
- [9] 颜菲, 葛琴雅, 李强, 于森, 朱旭东, 潘皎. 云冈石窟石质文物表面及周边岩石样品中微生物群落分析. *微生物学报*, 2012, 52(5): 629-636.
- [14] 李最雄, Stefan M. 光和湿度对土红、朱砂和铅丹变色的影响. *敦煌研究*, 1989, 6: 80-93.
- [15] 冯清平, 张晓军, 马清林, 马晓军. 敦煌壁画色变中微生物因素的研究 II. 微生物对模拟石窟壁画颜料的影响. *微生物学报*, 1998, 38(2): 131-136.
- [28] 李永新, 田友萍, 李银. 四川黄龙钙华藻类及其生物岩溶作用. *中国岩溶*, 2011, 30(1): 86-92.
- [29] 马旭, 毛琳, 马燕天, 武发思, 汪万福, 马晓军, 安黎哲, 冯虎元. 拉斯科洞穴史前壁画微生物生态学研究进展. *敦煌研究*, 2010, (6): 115-120.



# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.6 Mar., 2014 (Semimonthly)

## CONTENTS

### Frontiers and Comprehensive Review

- Impacts of global warming on litter decomposition ..... SONG Piao, ZHANG Naili, MA Keping, et al (1327)
- From system to landscape: the other orientation of regional material flow analysis ..... ZHANG Xiaogang, ZENG Hui (1340)
- A multi-dimensional approach for wetland ecosystem service valuation ..... SONG Yuqin, ZHANG Xiaolei (1352)
- Molecular mechanisms of the insect juvenile hormone ..... JIN Minna, LIN Xinda (1361)
- Microbial deterioration in ancient cave and wall paintings ..... LI Qiang, GE Qinya, PAN Xiaoxuan, et al (1371)
- Study on ecological safety evaluation and warning of wetlands in Tumen River watershed based on 3S technology .....  
..... ZHU Weihong, MIAO Chengyu, ZHENG Xiaojun, et al (1379)
- A review of transboundary protected areas network establishment ..... WANG Wei, TIAN Yu, CHANG Ming, et al (1391)

### Autecology & Fundamentals

- Water consumption characteristics and water use efficiency of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* and bamboo-willow  
seedlings ..... QIU Quan, PAN Xin, LI Jiyue, et al (1401)
- Three warming scenarios differentially affect the morphological plasticity of an invasive herb *Alternanthera philoxeroides* .....  
..... CHU Yanmei, YANG Jian, LI Jingji, et al (1411)
- The influence of meteorological factors and soil physicochemical properties on karst processes in six land-use patterns in summer  
and winter in a typical karst valley ..... LIU Wen, ZHANG Qiang, JIA Yanan (1418)
- Effects of nanocarbon application on nitrogen absorption and utilization of flue-cured tobacco .....  
..... LIANG Taibo, YIN Qisheng, ZHANG Yanling, et al (1429)
- The stand spatial model and pattern based on voronoi diagram ..... LIU Shuai, WU Shuci, WANG Hong, et al (1436)
- Dynamic analysis of spatial structure in a close-to-nature *Phyllostachys edulis* stands .....  
..... QIU Jianxi, TANG Mengping, SHEN Lifen, et al (1444)
- Phenotypic diversity in natural populations of *Sapindus mukorossi* based on fruit and seed traits .....  
..... DIAO Songfeng, SHAO Wenhao, JIANG Jingmin, et al (1451)
- Development of compatible biomass models for trees from different stand origin ... FU Liyong, LEI Yuancai, SUN Wei, et al (1461)

### Population, Community and Ecosystem

- The impact of understory vegetation structure on growth of *Polygonatum cyrtoneura* in extensively managed *Phyllostachys edulis*  
plantation ..... FAN Yanrong, CHEN Shuanglin, YANG Qingping, et al (1471)
- Short-term effects of CO<sub>2</sub> concentration elevation, warming and transgenic *Bt* rice cropping on soil labile organic carbon and  
nitrogen, and nematode communities ..... CHEN Jing, CHEN Fajun, LIU Manqiang, et al (1481)
- Temporospatial variations in net ecosystem productivity in Northeast China since 1961 .....  
..... LI Jie, ZHANG Yuandong, GU Fengxue, et al (1490)
- Assessment of the habitat suitability for waterfowls in the Panjin, Liaoning with GIS and remote sensing .....  
..... DONG Zhangyu, LIU Dianwei, WANG Zongming, et al (1503)
- Distribution of soil macropores and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Huoditang forest region of the  
Qinling Mountains ..... LU Bin, ZHANG Shengli, LI Kan, et al (1512)

- Influences of phosphorus concentration on interactions among *Microcystis aeruginosa*, *Daphnia magna* and *Ceratophyllum demersum* ...  
 ..... MA Jianmin, JIN Ping, GUO Meng, et al (1520)
- Allelopathic inhibition and mathematical models of *Chara vulgaris* extracts on two freshwater algae species .....  
 ..... HE Zongxiang, LIU Lu, LI Cheng, et al (1527)
- Flora analysis of riparian vegetation in Yongding-Haihe river system, China ..... XIU Chen, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua (1535)
- Stream habitat assessment of Dong River, China, using *River Habitat Survey* method .....  
 ..... WANG Qiang, YUAN Xingzhong, LIU Hong, et al (1548)

### Landscape, Regional and Global Ecology

- Appling SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern  
 China ..... GUO Juntong, ZHANG Zhiqiang, WANG Shengping, et al (1559)
- Climate response of tree growth along an altitudinal gradient in the Changbai Mountains, Northeast China .....  
 ..... CHEN Li, YIN Yunhe, ZHAO Dongsheng, et al (1568)
- The dispersion of airborne pollen and its relationship with major climatic parameters in Shijiazhuang .....  
 ..... LI Ying, LI Yuecong, LÜ Suqing, et al (1575)
- The change of soil carbon and nitrogen under different grazing gradients in Hulunber meadow steppe .....  
 ..... YAN Ruirui, XIN Xiaoping, WANG Xu, et al (1587)
- Spatial distribution and influencing factors of farmland soil organic matter and trace elements in the nansihu region .....  
 ..... WU Jie, LI Yuhuan, LI Zengbing, et al (1596)

### Resource and Industrial Ecology

- Transnational land use and its potential environmental consequence ..... LU Xiaoxuan (1606)

# 《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 薛建辉

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 34 卷 第 6 期 (2014 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 6 (March, 2014)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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@ cspg. net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@ cspg. 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 90.00 元