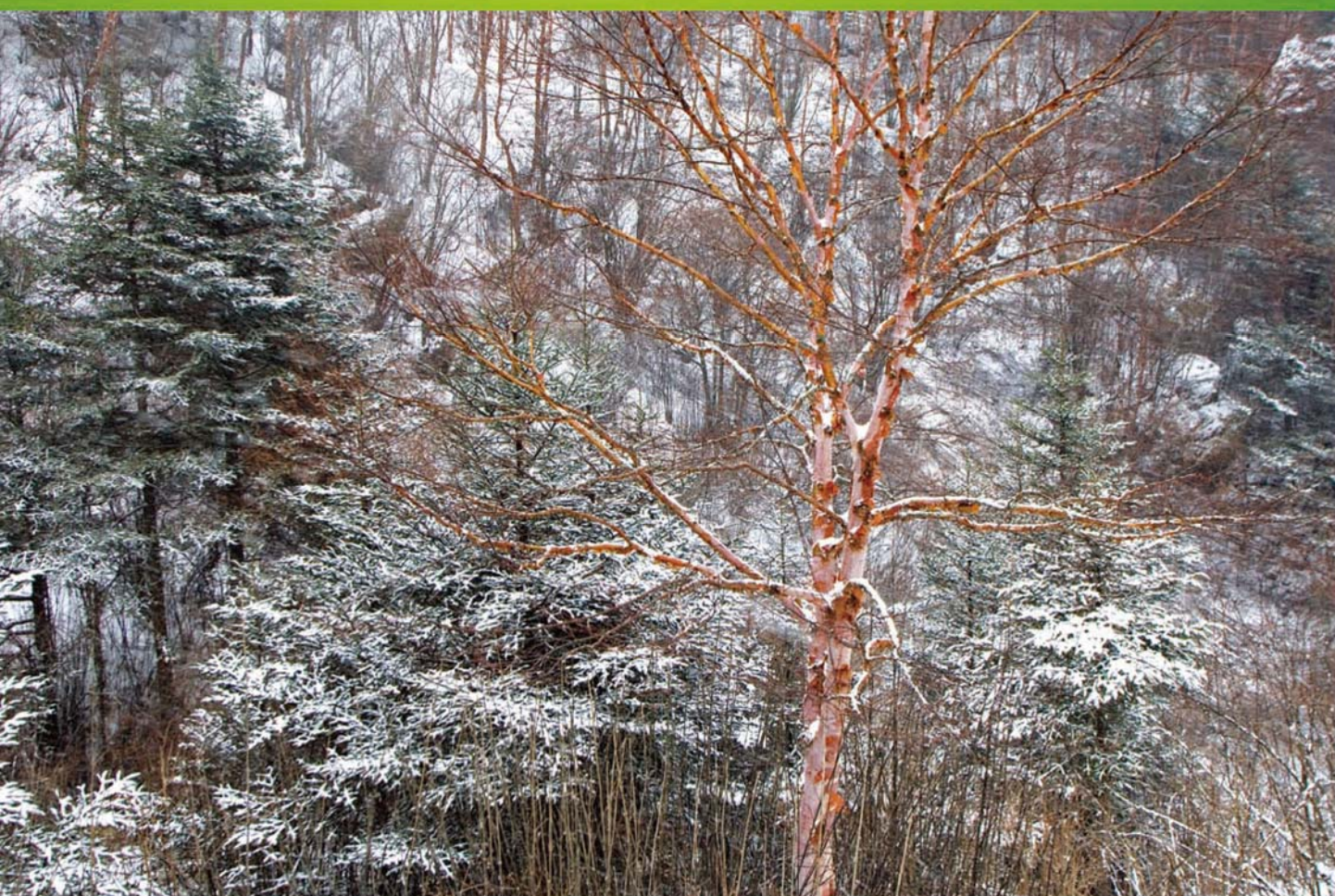


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

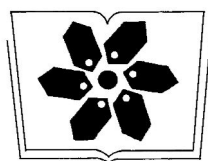
Acta Ecologica Sinica



第34卷 第8期 Vol.34 No.8 **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 8 期 2014 年 4 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 海洋浮游纤毛虫生长率研究进展..... 张武昌,李海波,丰美萍,等 (1897)
- 城市森林调控空气颗粒物功能研究进展..... 王晓磊,王 成 (1910)
- 雪地生活跳虫研究进展..... 张 兵,倪 珍,常 亮,等 (1922)

个体与基础生态

- 黄河三角洲贝壳堤岛叶底珠叶片光合作用对 CO_2 浓度及土壤水分的响应.....
..... 张淑勇,夏江宝,张光灿,等 (1937)
- 米槠人促更新林与杉木人工林叶片及凋落物溶解性有机物的数量和光谱学特征.....
..... 康根丽,杨玉盛,司友涛,等 (1946)
- 利用不同方法测定红松人工林叶面积指数的季节动态..... 王宝琦,刘志理,戚玉娇,等 (1956)
- 环境变化对兴安落叶松氮磷化学计量特征的影响 平 川,王传宽,全先奎 (1965)
- 黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征 程立平,刘文兆,李 志 (1975)
- 土壤水分胁迫对拉瑞尔小枝水分参数的影响..... 张香凝,孙向阳,王保平,等 (1984)
- 遮荫处理对臭柏幼苗光合特性的影响..... 赵 顺,黄秋娴,李玉灵,等 (1994)
- 漓江水陆交错带典型立地根系分布与土壤性质的关系..... 李青山,王冬梅,信忠保,等 (2003)
- 梭梭幼苗的存活与地上地下生长的关系..... 田 媛,塔西甫拉提·特依拜,李 彦,等 (2012)
- 模拟酸雨对西洋杜鹃生理生态特性的影响..... 陶巧静,付 涛,项锡娜,等 (2020)
- 岩溶洞穴微生物沉积碳酸钙——以贵州石将军洞为例..... 蒋建建,刘子琦,贺秋芳,等 (2028)
- 桂东北稻区第七代褐飞虱迁飞规律及虫源分析..... 齐会会,张云慧,蒋春先,等 (2039)

种群、群落和生态系统

- 鄱阳湖区灰鹤越冬种群数量与分布动态及其影响因素..... 单继红,马建章,李言阔,等 (2050)
- 雪被斑块对川西亚高山两个森林群落冬季土壤氮转化的影响..... 殷 睿,徐振锋,吴福忠,等 (2061)
- 小秦岭森林群落数量分类、排序及多样性垂直格局 陈 云,王海亮,韩军旺,等 (2068)
- 2012 年夏季挪威海和格陵兰海浮游植物群落结构的色素表征 王肖颖,张 芳,李娟英,等 (2076)
- 云南花椒园中昆虫群落特征的海拔间差异分析..... 高 鑫,张立敏,张晓明,等 (2085)
- 人工湿地处理造纸废水后细菌群落结构变化..... 郭建国,赵龙浩,徐 丹,等 (2095)
- 极端干旱区尾间湖生态需水估算——以东居延海为例 张 华,张 兰,赵传燕 (2102)

景观、区域和全球生态

- 秦岭重点保护植物丰富度空间格局与热点地区…………… 张殷波,郭柳琳,王 伟,等 (2109)
- 太阳辐射对黄河小浪底人工混交林净生态系统碳交换的影响…………… 刘 佳,同小娟,张劲松,等 (2118)
- 黄土丘陵区油松人工林生态系统碳密度及其分配 …………… 杨玉姣,陈云明,曹 扬 (2128)
- 湘潭锰矿废弃地不同林龄栎树人工林碳储量变化趋势…………… 田大伦,李雄华,罗赵慧,等 (2137)

资源与产业生态

- 湘南某矿区蔬菜中 Pb、Cd 污染状况及健康风险评估 …………… 吴燕明,吕高明,周 航,等 (2146)

城乡与社会生态

- 北京市主要建筑保温材料生命周期与环境经济效益评价 …………… 朱连滨,孔祥荣,吴 宪 (2155)
- 城市地表硬化对银杏生境及生理生态特征的影响…………… 宋英石,李 锋,王效科,等 (2164)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 276 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 29 * 2014-04



封面图说:冷杉红桦混交林雪——冷杉是松科的一属,中国是冷杉属植物最多的国家,约 22 种 3 个变种。冷杉常常在高纬度地区至低纬度的亚高山至高山地带的阴坡、半阴坡及谷地形成纯林,或与性喜冷湿的云杉、落叶松、铁杉和某些松树及阔叶树组成针叶混交林或针阔混交林。冷杉具有较强的耐阴性,适应温凉和寒冷的气候,土壤以山地棕壤、暗棕壤为主。川西、滇北山区的冷杉林往往呈混交状态,冷杉红桦混交林为其中重要的类型。雪被对冷杉林型冬季土壤氮转化影响的研究对揭示高山森林对气候变化的响应及其适应机制提供重要的理论支持。

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/stxb201307011813

郭建国, 赵龙浩, 徐丹, 孙野青. 人工湿地处理造纸废水后细菌群落结构变化. 生态学报, 2014, 34(8): 2095-2101.

Guo Jianguo, Zhao Longhao, Xu Dan, Sun Y Q. The bacterial community changes after papermaking wastewater treatment with artificial wetlands. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(8): 2095-2101.

人工湿地处理造纸废水后细菌群落结构变化

郭建国, 赵龙浩, 徐 丹, 孙野青*

(大连海事大学环境系统生物学研究所, 大连 116026)

摘要: 人工湿地通过模拟自然湿地的生态系统, 能够实现污染物的去除, 是一种高效经济的污水处理手段, 但是对人工湿地处理后污水中细菌群落的研究较少。采集了造纸厂排污口和人工湿地出水口的水样, 检测了溶解氧、pH 值和盐度等水质指标, 对主要污染物的含量进行了测定和分析, 并利用 DGGE 技术对细菌群落的变化进行了研究。结果表明: (1) 造纸污水经人工湿地处理后水质有明显提高; (2) 人工湿地处理后细菌群落结构发生变化, 优势菌由 γ 变形菌和衣原体变为 α 变形菌, 而且微生物多样性指数 Shannon-Wiener's 降低; (3) 人工湿地处理前污水中存在着大量致病微生物和降解微生物, 处理后以环境友好的固氮菌和少量致病菌为主。研究结果揭示了人工湿地不仅可以去除造纸废水中的污染物, 改善水质而且可以大大减少向环境中排放的致病微生物, 防止由致病微生物引起的生态灾难的发生, 为将来人工湿地应用于工业污水处理和微生物生态安全评估提供有效可靠的依据。

关键词: 人工湿地; 造纸废水; 细菌群落

The bacterial community changes after papermaking wastewater treatment with constructed wetlands

GUO Jianguo, ZHAO Longhao, XU Dan, SUN Yeqing*

Institute of Environmental Systems Biology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

Abstract: Constructed wetlands are efficient and economic sewage disposal means, characterized by stimulation of natural wetland ecosystems. They could remove the pollutants of wastewater to achieve purification of sewage, and microbes play an important role in this process. The aim of this study is to investigate bacterial community structure variation after effective wastewater treatment with constructed wetlands. We collected the water samples from the outfall of paper mill and outlet of constructed wetlands, and examined several parameters of the conventional water quality. Using DGGE method and cloning sequencing analysis of dominant microbes, we analyzed the variation of the bacterial community structure and major microbial species in the water samples. The results are as follows: (1) The water quality was greatly improved after papermaking wastewater treatment with constructed wetlands; (2) The structure of bacterial community remarkably changed, showing that the major microbes in the wastewater changed from *Gamma-proteobacteria* and *Chlamydia* to *Alpha-proteobacteria*, with the decrease in the Shannon-Wiener's index; (3) Before papermaking wastewater treatment, dominant pathogenic bacteria included *Legionella*, *Klebsiella* and *Parachlamydia* and degrading bacteria included *Thioalkalivibrio*, *Dehalococcoides* and *Hyphomicrobium*. In contrast, the main priority of microbes became environment friendly bacteria such as *Mesorhizobium* and *Rhizobium* mostly, and the species and proportion of pathogenic bacteria significantly decreased after treatment with constructed wetlands. These findings suggest that constructed wetlands can not only improve water quality and change the structure of microbial community, but also remove a great deal of pathogens in the wastewater, providing powerful experimental evidence for application of constructed wetlands in industrial wastewater treatment and assessment of

基金项目: 国家科技支撑项目 (2010BAC68B02); 大连市科技计划项目 (2011E11SF007)

收稿日期: 2013-07-01; 修订日期: 2014-03-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yqsun@dlmu.edu.cn

microbial ecology safety in the future.

Key Words: constructed wetland; papermaking wastewater; bacterial community

人工湿地是一类人工建造、模仿自然湿地的综合性生态体系^[1],通过对自然湿地的模拟,利用人造生态系统中的物理、化学和生物的协同作用,可以促进废水中污染物良性循环,实现对污水的净化,防止环境的再污染,获得污水处理与资源化的最佳效益。人工湿地作为一种低成本、高效率的手段早在 20 世纪初就开始被应用于污水的处理,目前已经被广泛用于各种污水处理;如重金属排放工业污水、生活污水、造纸污水和畜牧业废水等^[2-11]。在人工湿地的去污过程中,植物、基质和微生物共同发挥了重要的作用,其中微生物的作用最大^[12-13],是降解水体中污染物的主力军。

目前,关于人工湿地微生物的研究多集中于人工湿地基质中的不同位置,不同深度微生物群落的结构及随时间的动态演变过程^[13-14],用于探索人工湿地中稳定的微生物群落的形成规律。人工湿地处理的工业污水,大多关注于其中污染物的含量,如 COD,对于排入环境的水样中微生物群落结构的研究较少,对人工湿地处理造纸污水后的微生物群落的研究更少。

造纸行业为全世界第五大能源耗费产业,也是需水量最多的行业,能够造成严重的河流污染问题,因此如何处理和净化造纸污水已经越来越受到重视。但是污水排放过程中的微生物的危害并没有引起太大关注。在微生物监测中,通常选择大肠杆菌,产气荚膜梭菌,沙门氏菌等一些生活污水中的代表性微生物,这些微生物在工业污水中有的并不具有代表性,而其他的一些代表微生物的危害性不容忽视。所以,本论文结合人工湿地对造纸污水处理后水质的情况和细菌群落的变化来研究人工湿地在污染物和病原微生物去除的双重作用,为今后人工湿地作为处理工业污水和降低病原微生物的环境排放提供有效可靠的依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本研究的水样于 2012 年 8 月采自辽宁省锦州市金城造纸厂排污口和人工湿地处理后的出水口。

将排污口水样编号为 PWK,出水口水样编号为 CSK。该人工湿地为水平潜流湿地,基质填料为砾石,占地 10hm²,处理规模 2t⁴/d,主要的挺水植物为茭白、芦苇、香蒲。企业排放的污水在厂区内进行处理后,经过约 2km 管线输送至潜流湿地处理区的提升泵站,将污水由泵提升至潜流湿地去除多种污染物,潜流湿地出水进入渠塘湿地,最后排入大凌河。

1.2 实验方法

1.2.1 水样理化因素的测定

DO 由溶氧仪雷磁 GTB-607A 测定,pH 由 PH 计雷磁 THB-1 测定,盐度 S 由盐度计测定,总氮、氨氮、总磷、磷酸盐、化学需氧量的测定参照《水质分析方法国家标准汇编》(1996,ISBN:7506612801)中提供的方法进行。

1.2.2 DNA 的提取

水样经 300 目的无菌纱布过滤除去大型颗粒和杂质,取 300ml,使用真空泵将水样经 0.22um 的硝酸纤维素膜过滤,将滤纸剪碎后,参照《分子克隆实验指南》CTAB 法提取 DNA。

1.2.3 变性梯度凝胶电泳(DGGE)

对 DNA 浓度定量,以提取的水样微生物 DNA 为模板,用引物对 U968-GC-F (5' CGCCCGGG GCGCGCCCCGGCGGGGCGGGGCAGGGGG GAA CGCGAAGAACCTTAC3') 和 L1401-R (5' CGGTGTG-TACAAGACCC3') 扩增 16SrDNA 的 V6-V8 区,94℃ 5min, (94℃ 30s, 55℃ 30s, 72℃ 1min) 30 cycles, 72℃ 10min,4℃ 保存。PCR 产物定量到 400 ng 进行变性梯度凝胶电泳,120V 17h,60℃ 保温,聚丙烯酰胺凝胶的浓度为 8%,变性浓度为 45%—65%。电泳结束后,进行硝酸银染色,然后利用 UVP 扫描仪进行扫描成像。

1.2.4 克隆测序

对胶上的主要条带利用 PAGE 胶回收试剂盒 (BIOMIGA) 进行胶回收,然后利用引物 B968 (5' AACGCGAAGAACCTTAC3'), L1401-R 进行条带扩增,对目的条带利用琼脂糖胶回收试剂盒 (TIANGEN) 回收,回收产物利用 DNA Ligation Kit Ver.2.1 (TAKARA) 进行 PMD18 T-vector 的连接和转

化,验证的阳性克隆送去 Invitrogen 北京分公司进行测序。

1.3 数据分析

统计数据利用 SPSS 处理, DGGE 图谱利用 Quantity one 对主要条带进行灰度分析,导出相应的灰度值,用于微生物多样性指数和均匀度指数的计算。测序结果已上传到 NCBI 数据库中,GenBank 编号为:KF305475-KF305491。

2 结果与分析

2.1 人工湿地处理后的水质评价和主要污染物的检测

对造纸厂排污口 (PWK) 和人工湿地出水口 (CSK) 两处水样的主要水质指标进行了测定,结果见表 1。结果表明人工湿地对污染物有较好的去除作用,水质有所改善。

表 1 人工湿地处理前后水样理化因素的测定

Table 1 The physicochemical characteristic of wastewater samples before or after treatment with artificial wetland

样品 Sample	常规指标 Conventional index			污染物含量/(mg/L) Concentration of pollutants				
	DO	PH	S	TN	NH ₄ ⁺ -N	TP	PO ₃ -P	COD
造纸厂排污口 PWK	2.35	6.76	1.23	3.20±0.09	5.86 ±1.16	1.49±0.08	0.093 ±0.010	141±4.6
人工湿地出水口 CSK	5.84	7.71	0.61	0.93± 0.10	1.36 ±0.10	0.98 ±0.09	0.063±0.010	47±3.6
去除率 Removal rate/%					70.83	76.79	34.55	32.26

2.2 人工湿地处理后对微生物群落结构的影响分析

2.2.1 人工湿地处理后微生物群落多样性分析

利用 DGGE 技术对造纸厂排污口 (PWK) 和人工湿地出水口 (CSK) 两处水样的微生物群落的结构进行了分析,每个采样点设两个重复样,如图 1 所示,PWK 样本有 12 条明显的条带 (P1-12),CSK 样本有 6 条明显的条带 (P2, C1-5),通过比较各条带的位置发现两者之间仅有 P2 条带位置相同,人工湿地处理后微生物群落图谱改变。

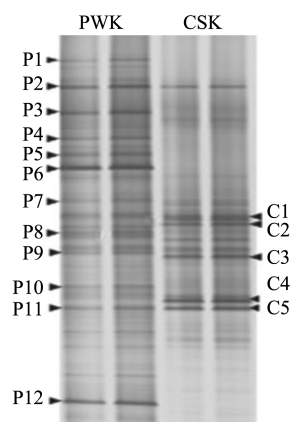


图 1 人工湿地处理前后水中微生物的图谱分析

Fig.1 The profile of microbe in the wastewater before and after treatment with artificial wetland

进一步对造纸厂排污口 (PWK) 和人工湿地出水口 (CSK) 两处水样的微生物群落进行分析如表 2,与排污口相比,出水口中微生物 Shannon-Wiener's 指

数、物种多度和均匀度降低,微生物结构趋于简单化,这些结果提示人工湿地处理后污染物的种类减少,导致参与污染物降解的微生物种类减少。

表 2 人工湿地处理后的微生物多样性、物种多度和均匀度分析

Table 2 Analysis of the Shannon-Wiener's index, Species richness and Evenness of microbial communities before and after treatment with artificial wetland

样品 Sample	多样性 H	物种多度 S	均匀度 E
PWK	3.7694	51	0.9587
CSK	3.1240	28	0.9375

2.2.2 人工湿地处理后微生物种群的分析

主要条带经克隆测序序列比对,分析发现 17 种微生物中,12 个属于变形菌门。人工湿地处理前的造纸污水中以 γ 变形菌和衣原体为主要菌群,处理后主要以 α 变形菌为主, γ 变形菌比例降低 (如图 2),人工湿地处理后微生物种群分布发生改变。

2.2.3 人工湿地处理后微生物种群的功能分析

已鉴定的微生物根据功能主要分为三类:致病作用 (Pathogen)、固氮作用 (N_2 fixation) 和降解作用 (Degradation)。如图 3 所示,在造纸厂排污口 (PWK),微生物主要以致病菌和降解菌为主;而在人工湿地出水口中,环境友好的固氮菌为主要优势菌,具有致病作用的细菌比例明显下降。

经鉴定发现在造纸污水中存在较多的污染物降解菌和致病菌,而在出水口中这类微生物的比重

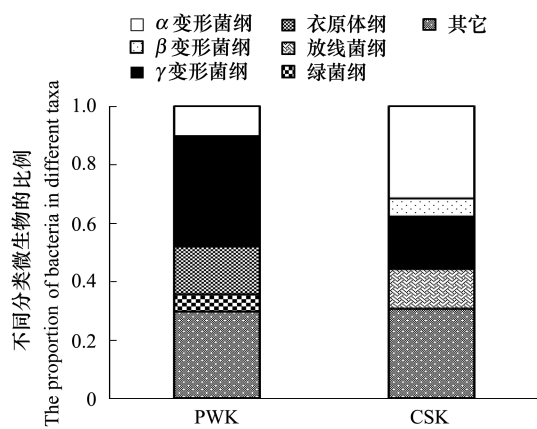


图2 人工湿地处理前后的微生物种群分布比例情况
Fig.2 The percentage of different classes of microbe in the sample PWK and CSK

较低。在造纸厂排污口处中, *Thioalkalivibrio* 为硫氧化细菌,参与反硝化过程^[15]; *Dehalococcoides* 可以在氯乙烯和三氯乙烯污染的环境中大量富集^[16],为脱氯细菌,在欧洲六氯苯污染的河流中,发挥了重要的脱氯作用^[17]; *Hyphomicrobium* 可降解氯甲烷^[18-19],农药甲胺磷^[20]。其中的致病菌和人类疾病的发生关系密切, *Legionella* 具有耐受青霉素的特性,是第一种被发现的细胞内的细菌病原体,可以引起一种高致死性肺炎^[21]; *Klebsiella* 可以引起呼吸疾病、肝脓肿、肠道疾病和骨髓炎等^[22-25]; *Parachlamydia* 可以引起角膜炎和肺炎^[26-27]。

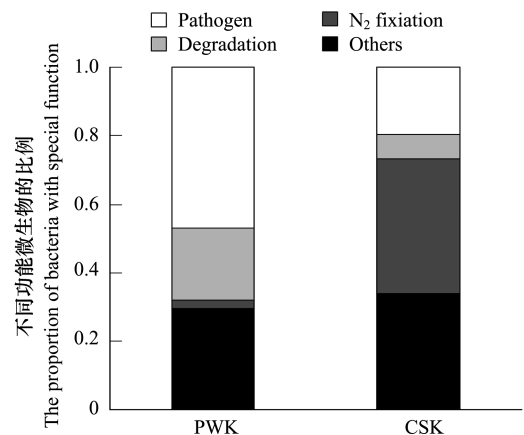


图3 人工湿地处理前后的不同功能细菌分布比例情况
Fig.3 The percentage of different bacteria according to their function in the sample PWK and CSK

在人工湿地出水口处, *Mesorhizobium*, *Rhizobium* 为植物共生固氮菌^[28-30],广泛存在于土壤中,与豆科植物共生,形成根瘤,有利于植物固氮。 *Variovorax* 存在于微量污染的环境中,以可溶性有机物为碳源,通过环羟基化降解农药高香草酸^[31],选择性除草剂利谷隆^[32],三氯乙烯^[33],它们可以与植物和其他微生物相互作用,促进生态修复过程^[34]。 *Rhodobacter* 是一种革兰氏阴性菌,它们广泛的存在于淡水和高盐环境下,代谢功能复杂。 *Cryobacterium* 主要从冰川和冰川土壤中分离得到^[35],功能研究较少。

表3 测序微生物序列与 NCBI 数据库比对分析

Table 3 Analysis of the sequencing microbes compared with NCBI database						
位置 Site	条带 Band	NCBI 序列号 Accession	种属 Genus	相似度/% Similarity	参与过程 Process	与人类疾病的关系 Human diseases
PWK	P1	NR_041321	<i>Legionella</i>	88		肺炎, 呼吸道疾病
	P2	NR_074791	<i>Klebsiella</i>	99		肺炎, 败血症等
	P3	NR_074231	<i>Legionella</i>	91		肺炎, 呼吸道疾病
	P4	NR_074271	<i>Protochlamydia</i>	94		人眼、泌尿生殖道、呼吸道、肠道疾病
	P5	NR_074972	<i>Thioalkalivibrio</i>	91	参与反硝化过程	人眼、泌尿生殖道、呼吸道、肠道疾病
	P6	NR_074271	<i>Parachlamydia</i>	91		
	P7	NR_102515	<i>Dehalococcoides</i>	82	脱氯作用	急性呼吸道传染病
	P8	NR_044952	<i>Legionella</i>	96		
	P9	NR_044955	<i>Legionella</i>	97		
	P10	NR_044955	<i>Legionella</i>	97		
	P11	NR_026426	<i>Mesorhizobium</i>	99		
	P12	NR_025082	<i>Hyphomicrobium</i>	96		
CSK	C1	NR_074646	<i>Variovorax</i>	99	处理苯酚的废水	
	C2	NR_074504	<i>Rhizobium</i>	97	共生固氮	

续表

位置 Site	条带 Band	NCBI 序列号 Accession	种属 Genus	相似度/% Similarity	参与过程 Process	与人类疾病的关系 Human diseases
	C3	NR_044216	<i>Rhizobium</i>	99	固氮	
	C4	NR_042564	<i>Rhodobacter</i>	96	广泛存在水环境	
	C5	NR_042170	<i>Cryobacterium</i>	97	利用多种碳、氮	

3 结论与讨论

随着环境保护的迅速发展,人工湿地以其独到的优越性受到了越来越多的关注,已经普遍地应用于各种污水的处理。本研究中的人工湿地位于辽宁省锦州凌海市金城造纸厂污水处理区,植物以中国北方用于处理污水的适用物种芦苇、茭白和香蒲为主,它们根系发达,耐污能力强,去污效果好,适应当地环境。本研究结果显示人工湿地可以改善造纸污水的水质,对 TN 和 TP 都有较好的去除率,COD 降低 66.59%,说明该潜流人工湿地对于造纸污水中污染物的去除有很好的效果。这与湿地植物的交替种植,植物根系的吸附、分解和转化作用有关。在主要污染物中 TN 的去除率最高,与湿地中的微生物在氮的转化和去除过程中的硝化/反硝化作用有关^[36,37],人工湿地基质中形成了有效的降解污染物的微生物菌群。

微生物群落研究表明,在造纸污水中含有与污染物降解有关的微生物,如 *Dehalococcoides* 和 *Hyphomicrobium*,提示污水中有机污染物的存在。而且在造纸污水中致病性细菌达 50% 以上,如 *Legionella*、*Klebsiella*、*Parachlamydia*。特别是 *Legionella* 大量存在,可以引起致死性的肺炎,该病菌与 1976 年在美国发生的肺炎大爆发密切相关^[38]。它们排入环境中不仅污染水体,而且对食物链中营养级较高的动物危害较大,甚至可以造成人类传染性疾病大规模爆发,这些微生物种类与工业类型,生产工艺有很大关系,它们并不包含在常规的生活污水微生物监测种类中,如总大肠菌群、粪大肠菌群、粪链球菌、大肠杆菌、产气荚膜梭菌、沙门氏菌等^[39]。所以,在工业病原微生物的监测方面还需要大量的研究。

在经过人工湿地处理后,微生物群落的结构发生了很大的变化,主要微生物由 γ 变形菌和衣原体变为 α 变形菌,处理后水样中大量致病菌被去除了。

微生物的去除由人工湿地中化学、物理及生物作用共同完成的^[40]。夏季温度适宜,系统中植物的生理生化活性较高,植物根系对于微生物的沉积和去除有很大作用。沉积作用是人工湿地中病原微生物去除的最主要途径^[41]。该人工湿地的基质为砾石,已有研究表明较小粒径的砾石滤料可以在滤池中截留住微生物。污水进入人工湿地后,水中含有的微生物会粘附于悬浮固体颗粒或悬浮于水体中,通过与基质相互作用与水体分离。分离的微生物的聚集形成生物膜,其中具有降解能力的微生物在其中发挥降解功能,这也是砾石滤池去除污染物的主要途径。存活的微生物可能从固体基质中释放,滞留在生物膜上或基质间隙水中,或者重新返回水体^[42]。沿着污水流经湿地的径迹,污染物的种类和浓度不断降低,污水中原有的微生物经过吸附解吸过程不断与周围其他微生物发生竞争作用。在竞争过程中,由于原有环境的改变,不适应环境的微生物多数会死亡,被周围适应环境的微生物替代。所以,水体中微生物的组成可以反映水质的状况。人工湿地处理造纸污水后水中多为环境友好的固氮菌和小部分致病菌,这也表明水质有所改善。

工业污染物种类繁多,常规的理化指标不能反映所有的污染物情况,而且需要投入巨大的资金和精力,有时具有局限性,而微生物群落结构的研究在一定程度上可以弥补这一不足,环境中的微生物组成可以与理化指标共同反映水质状况。本研究的结论也证实了这一点。

本研究主要对人工湿地处理造纸污水中微生物群落的影响进行了研究,还有必要开展对其他工业污水中的微生物群落的研究,扩展微生物在评价污水处理系统对污染物和致病菌的双重去除作用^[43]。值得重视的是,人工湿地处理后的水中依然存在可以引起呼吸疾病、肝脓肿、肠道疾病的致病菌,如 *Klebsiella* 细菌,它们提醒人们应该关注工业污水排放过程中的致病微生物的监测和致病微生物的排放

控制,这样可以防止污水在环境中引起生态风险。

References:

- [1] Stottmeister U, Wiessner A, Kusch P, Kappelmeyer U, Kastner M, Bederski O, Muller R A, Moormann H. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnol Adv*, 2003, 22(1/2):93-117.
- [2] Lim P E, Mak K Y, Mohamed N, Noor A M. Removal and speciation of heavy metals along the treatment path of wastewater in subsurface-flow constructed wetlands. *Water Sci Technol*, 2003, 48(5):307-313.
- [3] Lian J J, Xu S G, Zhang Y M, Han C W. Molybdenum(VI) removal by using constructed wetlands with different filter media and plants. *Water Sci Technol*, 2013, 67(8):1859-1866.
- [4] Richter A Y, Weaver R W. Treatment of domestic wastewater by subsurface flow constructed wetlands filled with gravel and tire chip media. *Environ Technol*, 2003, 24(12):1561-1567.
- [5] Mburu N, Tebitendwa S M, van Bruggen J J, Rousseau D P, Lens P N. Performance comparison and economics analysis of waste stabilization ponds and horizontal subsurface flow constructed wetlands treating domestic wastewater: A case study of the Juja sewage treatment works. *J Environ Manage*, 2013, 128C: 220-225.
- [6] He J T, Wu S B. Application Prospect of Constructed Wetland for Pulp and Paper Wastewater Treatment. *Paper science & technology*, 2006, 25(1):41-44.
- [7] Fan L W, Lu Z X, Hai R T. Treatment of Purp and Paper Wastewater by Constructed Wetland Technic. *China Pulp and Paper*, 2010, 29(11):37-42.
- [8] Ding C, Yang T Y, Yu Q, Li Z X, Yang C S. Treatment of 1, 2-dichlorobenzene in wastewater by using horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Huan Jing Ke Xue*, 2011, 32(9): 2582-2587.
- [9] Casas-Zapata J C, Rios K, Florville-Alejandro T R, Morato J, Penuela G. Influence of chlorothalonil on the removal of organic matter in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *J Environ Sci Health B*, 2013, 48(2):122-132.
- [10] Langergraber G. Are constructed treatment wetlands sustainable sanitation solutions? *Water Sci Technol*, 2013, 67(10): 2133-2140.
- [11] Zhao Y J, Cheng P, Pei X, Zhang H, Yan C, Wang S B. Performance of hybrid vertical up- and downflow subsurface flow constructed wetlands in treating synthetic high-strength wastewater. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2013, 20(7): 4886-4894.
- [12] Huang J, Zhao X F. Progress of Study on Microorganisms in the Constructed Wetland for Wastewater Treatment. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2012, 2:151-156.
- [13] Samso R, Garcia J. Bacteria distribution and dynamics in constructed wetlands based on modelling results. *Sci Total Environ*, 2013, 461-462C: 430-440.
- [14] Hench K R, Sexstone A J, Bissonnette G K. Heterotrophic community-level physiological profiles of domestic wastewater following treatment by small constructed subsurface flow wetlands. *Water Environ Res*, 2004, 76(5):468-473.
- [15] Sorokin D Y, Kuenen J G, Jetten M S. Denitrification at extremely high pH values by the alkaliphilic, obligately chemolithoautotrophic, sulfur-oxidizing bacterium *Thioalkalivibrio denitrificans* strain ALJD. *Arch Microbiol*, 2001, 175(2):94-101.
- [16] Duhamel M, Mo K, Edwards E A. Characterization of a highly enriched dehalococcoides-containing culture that grows on vinyl chloride and trichloroethene. *Appl Environ Microbiol*, 2004, 70(9):5538-5545.
- [17] Tas N, van Eekert M H, Wagner A, Schraa G, de Vos W M, Smidt H. Role of "Dehalococcoides" spp. in the anaerobic transformation of hexachlorobenzene in European rivers. *Appl Environ Microbiol*, 2011, 77(13):4437-4445.
- [18] McAnulla C, Woodall C A, McDonald I R, Studer A, Vuilleumier S, Leisinger T, Murrell J C. Chloromethane utilization gene cluster from *Hyphomicrobium chloromethanicum* strain CM2 (T) and development of functional gene probes to detect halomethane-degrading bacteria. *Appl Environ Microbiol*, 2001, 67(1):307-316.
- [19] Duine J A, Frank J, Westerling J. Purification and properties of methanol dehydrogenase from *Hyphomicrobium* x. *Biochim Biophys Acta*, 1978, 524(2):277-287.
- [20] Wang L, Wen Y, Guo X, Wang G, Li S, Jiang J. Degradation of methamidophos by *Hyphomicrobium* species MAP-1 and the biochemical degradation pathway. *Biodegradation*, 2010, 21(4): 513-523.
- [21] Diederer B M. *Legionella* spp. and Legionnaires' disease. *J Infect*, 2008, 56(1):1-12.
- [22] Lee I A, Kim D H. *Klebsiella pneumoniae* increases the risk of inflammation and colitis in a murine model of intestinal bowel disease. *Scand J Gastroenterol*, 2011, 46(6):684-693.
- [23] Eisenberg G M, Flippin H F, Kayser H L, Nadel J, Sathavara S, Spivack A, Weiss W. *Klebsiella* in respiratory disease. *Ann Intern Med*, 1956, 45(6):1010-1026.
- [24] Kanhutu K N, Post J J, Clezy K R, Foo H Y. Community-acquired *Klebsiella pneumoniae* liver abscesses — an "emerging disease" in Australia. *Med J Aust*, 2011, 194(7):374.
- [25] Hiran S, Vishwanathan K A. *Klebsiella pneumoniae* — an emerging bacterial cause of osteomyelitis in sickle cell disease. *J Assoc Physicians India*, 1999, 47(6):637-638.
- [26] Richter M, Matheis F, Gonczi E, Aaby S, Spiess B, Greub G. *Parachlamydia acanthamoebae* in domestic cats with and without corneal disease. *Vet Ophthalmol*, 2010, 13(4):235-237.
- [27] Greub G, Boyadjiev I, La Scola B, Raoult D, Martin C.

- Serological hint suggesting that Parachlamydiaceae are agents of pneumonia in polytraumatized intensive care patients. *Ann N Y Acad Sci*, 2003, 990: 311-319.
- [28] Kaneko T, Nakamura Y, Sato S, Asamizu E, Kato T, Sasamoto S, Watanabe A, Idesawa K, Ishikawa A, Kawashima K *et al*. Complete genome structure of the nitrogen-fixing symbiotic bacterium *Mesorhizobium loti*. *DNA Res*, 2000, 7(6):331-338.
- [29] Tighe S W, de Lajudie P, Dipietro K, Lindstrom K, Nick G, Jarvis B D. Analysis of cellular fatty acids and phenotypic relationships of *Agrobacterium*, *Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium*, *Rhizobium* and *Sinorhizobium* species using the Sherlock Microbial Identification System. *Int J Syst Evol Microbiol*, 2000, 50 (2): 787-801.
- [30] Spaink H P. Root nodulation and infection factors produced by rhizobial bacteria. *Annu Rev Microbiol*, 2000, 54: 257-288.
- [31] Allison N, Turner J E, Wait R. Degradation of homovanillate by a strain of *Variovorax paradoxus* via ring hydroxylation. *FEMS Microbiol Lett*, 1995, 134(2):213-219.
- [32] Dejonghe W, Berteloot E, Goris J, Boon N, Crul K, Maertens S, Hofte M, De Vos P, Verstraete W, Top E M. Synergistic degradation of linuron by a bacterial consortium and isolation of a single linuron-degrading *variovorax* strain. *Appl Environ Microbiol*, 2003, 69(3):1532-1541.
- [33] Futamata H, Nagano Y, Watanabe K, Hiraishi A. Unique kinetic properties of phenol-degrading *variovorax* strains responsible for efficient trichloroethylene degradation in a chemostat enrichment culture. *Appl Environ Microbiol*, 2005, 71(2):904-911.
- [34] Satola B, Wubbeler J H, Steinbuchel A. Metabolic characteristics of the species *Variovorax paradoxus*. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2013, 97(2):541-560.
- [35] Zhang D C, Wang H X, Cui H L, Yang Y, Liu H C, Dong X Z, Zhou P J. *Cryobacterium psychrotolerans* sp. nov., a novel psychrotolerant bacterium isolated from the China No. 1 glacier. *Int J Syst Evol Microbiol*, 2007, 57(4):866-869.
- [36] Guo R M, Liu H H, Zhou L G, Pan D Y, Sun H B. Structure of Microorganisms in a Constructed Wetland and Nitrogen Removal. *Jiangsu Environmental Science and Technology*, 2006, 19(5): 14-16.
- [37] Dai Y Y, Yang X P, Zhou L X. Effect of Reed Rhizosphere on Nitrogen and COD Removal Efficiency in Subsurface Flow Constructed Wetlands. *Environmental Science*, 2008, 29(12): 3387-3392.
- [38] Griffith M E, Lindquist D S, Benson R F, Thacker W L, Brenner D J, Wilkinson H W. First isolation of *Legionella gormanii* from human disease. *J Clin Microbiol*, 1988, 26(2):380-381.
- [39] Song Z W, Sun Q, Xu A L, Qian S C, Liu L L, Feng M X. Dynamic distribution and correlation analysis of indicator-and pathogenic microorganisms in a surface-flow constructed wetland. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(1):91-97.
- [40] Hench K R, Bissonnette G K, Sexstone A J, Coleman J G, Garbutt K, Skousen J G. Fate of physical, chemical, and microbial contaminants in domestic wastewater following treatment by small constructed wetlands. *Water Res*, 2003, 37(4): 921-927.
- [41] George I, Petit M, Theate C, Servais P. Use of rapid enzymatic assays to study the distribution of faecal coliforms in the Seine river (France). *Water Sci Technol*, 2001, 43(12):77-80.
- [42] Hendricks C W. Increased recovery rate of salmonellae from stream bottom sediments versus surface waters. *Appl Microbiol*, 1971, 21(2):379-380.
- [43] McCarthy G, Lawlor P G, Harrington C, Gardiner G E. Microbial removal from the separated liquid fraction of anaerobically digested pig manure in meso-scale integrated constructed wetlands. *Bioresour Technol*, 2011, 102(20):9425-9431.

参考文献:

- [6] 贺进涛, 武书彬. 人工湿地处理造纸废水的应用前景. *造纸科学与技术*, 2006, 25(1):41-44.
- [7] 范立维, 卢泽湘, 海热提. 造纸废水的人工湿地处理工艺分析. *中国造纸*, 2010, 29(11):37-42.
- [12] 黄健, 赵晓芬. 微生物在人工湿地污水处理中的研究进展. *海洋湖沼通报*, 2012, 02:151-156.
- [36] 郭如美, 刘汉湖, 周立刚, 潘道永, 孙红波. 潜流式人工湿地微生物群落结构及脱氮效果的研究. *江苏环境科技*, 2006, 19(5):14-16.
- [37] 戴媛媛, 杨新萍, 周立祥. 芦苇根际微环境对潜流人工湿地氮与 COD 去除性能的影响. *环境科学*, 2008, 29(12): 3387-3392.
- [39] 宋志文, 孙群, 徐爱玲, 钱生财, 刘伶俐, 冯梦雪. 人工湿地中指示与病原微生物动态分布及相关性分析. *生态学杂志*, 2013, 32(1):91-97.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.8 Apr., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Growth rates of marine planktonic ciliates; a review ZHANG Wuchang, LI Haibo, FENG Meiping, et al (1897)
- Research status and prospects on functions of urban forests in regulating the air particulate matter
..... WANG Xiaolei, WANG Cheng (1910)
- A review of snow-living Collembola ZHANG Bing, NI Zhen, CHANG Liang, et al (1922)

Autecology & Fundamentals

- Photosynthetic responses to changes in CO₂ concentration and soil moisture in leaves of *Securinega suffruticosa* from shell ridge
islands in the Yellow River Delta, China ZHANG Shuyong, XIA Jiangbao, ZHANG Guangcan, et al (1937)
- Quantities and spectral characteristics of DOM released from leaf and litterfall in *Castanopsis carlesii* forest and *Cunninghamia
lanceolata* plantation KANG Genli, YANG Yusheng, SI Youtao, et al (1946)
- Seasonal dynamics of leaf area index using different methods in the Korean pine plantation
..... WANG Baoqi, LIU Zhili, QI Yujiao, et al (1956)
- Influence of environmental changes on stoichiometric traits of nitrogen and phosphorus for *Larix gmelinii* trees
..... PING Chuan, WANG Chuankuan, et al (1965)
- Soil water in deep layers under different land use patterns on the Loess Tableland ... CHENG Liping, LIU Wenzhao, LI Zhi (1975)
- Water parameters of the branch of *Larrea tridentata* under different soil drought stress
..... ZHANG Xiangning, SUN Xiangyang, WANG Baoping, et al (1984)
- Effects of shading treatments on photosynthetic characteristics of *Juniperus sabina* Ant. seedlings
..... ZHAO Shun, HUANG Qiuxian, LI Yuling, et al (1994)
- Root distribution in typical sites of Lijiang ecotone and their relationship to soil properties
..... LI Qingshan, WANG Dongmei, XIN Zhongbao, et al (2003)
- The survival and above/below ground growth of *Haloxylon ammodendron* seedling
..... TIAN Yuan, TASHPOLAT · Tiyp, LI Yan, et al (2012)
- Effects of simulated acid rain on the physiological and ecological characteristics of *Rhododendron hybridum*
..... TAO Qiaojing, FU Tao, XIANG Xina, et al (2020)
- Karst cave bacterial calcium carbonate precipitation: the Shijiangjun Cave in Guizhou, China
..... JIANG Jianjian, LIU Ziqi, HE Qiufang, et al (2028)
- Migration of the 7th generation of brown planthopper in northeastern Guangxi Zhuang Autonomous Region, and analysis of source
areas QI Huihui, ZHANG Yunhui, JIANG Chunxian, et al (2039)

Population, Community and Ecosystem

- The dynamics and determinants of population size and spatial distribution of Common Cranes wintering in Poyang Lake
..... SHAN Jihong, MA Jianzhang, LI Yankuo, et al (2050)
- Effects of snow pack on wintertime soil nitrogen transformation in two subalpine forests of western Sichuan
..... YIN Rui, XU Zhengfeng, WU Fuzhong, et al (2061)
- Numerical classification, ordination and species diversity along elevation gradients of the forest community in Xiaolinling
..... CHEN Yun, WANG Hailiang, HAN Junwang, et al (2068)
- Phytoplankton community structures revealed by pigment signatures in Norwegian and Greenland Seas in summer 2012
..... WANG Xiaoying, ZHANG Fang, LI Juanying, et al (2076)
- Analysis of differences in insect communities at different altitudes in *Zanthoxylum bungeanum* gardens, Yunnan, China
..... GAO Xin, ZHANG Limin, ZHANG Xiaoming, et al (2085)
- The bacterial community changes after papermaking wastewater treatment with artificial wetland
..... GUO Jianguo, ZHAO Longhao, XU Dan, et al (2095)

- Ecological water requirement estimation of the rump lake in an extreme arid region of East Juyanhai
..... ZHANG Hua, ZHANG Lan, ZHAO Chuanyan (2102)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Spatial distribution patterns of species richness and hotspots of protected plants in Qinling Mountain
..... ZHANG Yinbo, GUO Liulin, WANG Wei, et al (2109)
- Impacts of solar radiation on net ecosystem carbon exchange in a mixed plantation in the Xiaolangdi Area
..... LIU Jia, TONG Xiaojuan, ZHANG Jinsong, et al (2118)
- Carbon density and distribution of *Pinus tabulaeformis* plantation ecosystem in Hilly Loess Plateau
..... YANG Yujiao, CHEN Yunming, CAO Yang (2128)
- Dynamics of carbon storage at different aged *Koelreuteria paniclata* tree in Xiangtan Mn mining wasteland
..... TIAN Dalun, Li Xionghua, LUO Zhaozhui, et al (2137)

Resource and Industrial Ecology

- Contamination status of Pb and Cd and health risk assessment on vegetables in a mining area in southern Hunan
..... WU Yanming, LV Gaoming, ZHOU Hang, on storage at different age (2146)

Urban, Rural and Social Ecology

- Life cycle assessment and environmental & economic benefits research of important building external insulation materials in Beijing ...
..... ZHU Lianbin, KONG Xiangrong, WU Xian (2155)
- Effects of urban imperious surface on the habitat and ecophysiology characteristics of *Ginkgo biloba*
..... SONG Yingshi, LI Feng, WANG Xiaoke, et al (2164)

《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 杨永兴

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 8 期 (2014 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 8 (April, 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

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元

