

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第11期

Vol.33 No.11

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

京津冀与长三角区域大气 NO₂ 污染特征 王英, 李令军, 刘阳 (3685)

2008~2011年夏季京津冀区域背景大气污染变化分析 杨俊益, 辛金元, 吉东生, 朱彬 (3693)

沧州市大气污染特征观测研究 王永宏, 胡波, 王跃思, 刘伟, 张武 (3705)

华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源 李月梅, 潘月鹏, 王跃思, 王英锋, 李杏茹 (3712)

广州市交通主干道空气中苯系物的测量 叶丛雷, 谢品华, 秦敏, 凌六一, 郑尼娜, 刘文彬, 黄祖照 (3718)

基于实时交通信息的道路机动车动态排放清单模拟研究 黄成, 刘娟, 陈长虹, 张健, 刘登国, 朱景瑜, 黄伟明, 巢渊 (3725)

柴油轿车燃用煤基 F-T 合成油的排放特性 胡志远, 程亮, 谭丕强, 楼狄明 (3733)

九龙江口滨海湿地生源要素空间分布特征 余小青, 杨军, 刘乐冕, 田原, 余正, 王昌付 (3739)

南四湖水体氮、磷营养盐时空分布特征及营养状态评价 舒凤月, 刘玉配, 赵颖, 吴艳鹏, 李爱华 (3748)

天目湖流域湿地对氮磷输出影响研究 李兆富, 刘红玉, 李恒鹏 (3753)

北京市新建城区不透水地表径流 N、P 输出形态特征研究 李立青, 吕书丛, 朱仁肖, 刘泽权, 单保庆 (3760)

云阳宗海湖的分布与来源 张玉玺, 向小平, 张英, 陈玺, 刘景涛, 王金翠, 张媛静, 孙继朝 (3768)

南方某城市地表水体中粪源性污染指示微生物的分布特征研究 孙傅, 沙婧, 刘彦华 (3778)

三峡库区大宁河藻细胞昼夜垂直迁移研究 张永生, 郑丙辉, 姜霞, 郑浩, 钟娜, 陈春宵 (3787)

江淮农村生态型排水系统构建及截污作用研究 单保庆, 李楠, 唐文忠 (3797)

人工湿地植物床-沟壕系统水质净化效果 汪仲琼, 张荣斌, 陈庆华, 魏宏斌, 王为东 (3804)

潜流人工湿地演变对废水中有机物、氮及磷去除的影响 魏泽军, 谢建平, 黄玉明 (3812)

人工湿地处理含盐生活污水的特性研究 高峰, 杨朝晖, 李晨, 金卫红, 邓一兵 (3820)

催化湿式氧化法降解水中的 β -萘酚 刘杰, 于超英, 赵培庆, 陈革新 (3826)

ZVI/EDDS/Air 体系降解水中 2,4-二氯酚的研究 孙倩, 周海燕, 曹梦华, 吴琳娜, 王琳玲, 陈静, 陆晓华 (3833)

微波改性 MWNTs/TiO₂ 复合材料对 1,2,3-三氯苯的光催化降解研究 施周, 张茜, 张伟, 徐舜开, 张骅 (3840)

腐殖酸对生物炭去除水中 Cr(VI) 的影响机制研究 丁文川, 田秀美, 王定勇, 曾晓岚, 徐茜, 陈健康, 艾小雨 (3847)

臭氧氧化-活性污泥法处理含 PVA 工业废水的试验研究 邢晓琼, 黄程兰, 刘敏, 陈滢 (3854)

复合底物对颗粒化 EBPR 系统除磷特性的影响及优化试验研究 徐少娟, 孙培德, 郑雄柳, 董毅 (3859)

进水比例对水解反应器出水水质的影响研究 梁康强, 熊娅, 戚茂荣, 林秀军, 朱民, 宋英豪 (3868)

厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场渗滤液水质水量变化规律的研究 韩智勇, 刘丹, 李启彬, 陈馨 (3873)

我国城市污水处理回用调查研究 郭宇杰, 王学超, 周振民 (3881)

快雌醇和壬基酚在土壤中的吸附-解吸特征 姜鲁, 王继华, 李建忠, 辛佳, 李森, 刘翔 (3885)

黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探 马昕昕, 许明祥, 杨凯 (3893)

半干旱黄土丘陵区土壤结皮的地表水文效应 卫伟, 温智, 陈利顶, 陈瑾, 吴东平 (3901)

广西大石围巨型漏斗土壤中多环芳烃与环境因素 孔祥胜, 祁士华, 蒋忠诚, 黄保健 (3905)

酸性条件下黄铁矿氧化机制的研究 王楠, 易筱筠, 党志, 刘云 (3916)

淋洗条件下砂土和粉土水盐运移过程的监测研究 付腾飞, 贾永刚, 郭磊, 刘晓磊 (3922)

空气注射修复苯污染地下水模拟研究 樊艳玲, 姜林, 张丹, 钟茂生, 贾晓洋 (3927)

不同终点检测 5 种双酚 A 类化合物对 MCF-7 的细胞毒性 张帅帅, 刘堰, 刘树深, 朱祥伟 (3935)

上海世博园后滩湿地糙足类群落特征及其对环境因子的响应 陈立婧, 吴艳芳, 景钰湘, 王聪, 张饮江 (3941)

耐盐石油烃降解菌的筛选鉴定及其特性研究 吴涛, 谢文军, 依艳丽, 李小彬, 王君, 胡相明 (3949)

高效降酚菌株 *Ochrobactrum* sp. CH10 生长动力学和苯酚降解特性的研究 陈晓华, 魏刚, 刘思远, 孙江曼, 王芳芳, 李昊源, 刘宇军 (3956)

四溴双酚 A 好氧降解菌的筛选及其降解特性研究 钱艳园, 刘莉莉, 于晓娟, 丁丛, 王志平, 施玉衡, 李晨君 (3962)

长期施用有机和无机肥对黑土 *nirS* 型反硝化菌种群结构和丰度的影响 尹昌, 范分良, 李兆君, 宋阿琳, 朱平, 彭畅, 梁永超 (3967)

三氯乙烯在不同土壤中的吸附特性及其影响因素研究 何龙, 邱兆富, 吕树光, 逯志昌, 王治立, 隋倩, 林匡飞, 刘勇弟 (3976)

多菌灵在农田土壤中的降解及其影响因子研究 肖文丹, 杨肖娥, 李廷强 (3983)

硫化物对垃圾焚烧污泥焚烧飞灰高温过程中重金属挥发的影响 刘敬勇, 孙水裕 (3990)

关于医疗垃圾飞灰中二噁英在惰性气氛下的低温热脱附研究 纪莎莎, 李晓东, 徐旭, 陈彤 (3999)

第七届环境模拟与污染控制学术研讨会论文

稻田气溶胶 NH₃ 和气体 NO_x 排放在线测定研究 龚巍巍, 栾胜基 (4006)

一种可同时检测挥发性氯代烷烃和氯代烯烃的电子鼻的研制 文晓刚, 刘锐, 蔡强, 万梅, 汤灵容, 陈吕军 (4012)

基于被动采样技术的垃圾焚烧厂及周边大气中 PAHs 分布研究 孙少艾, 李洋, 周轶, 王海蛟, 孙英 (4018)

涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别 丁晓雯, 沈珍瑶 (4025)

人工湿地不同区域基质磷含量的差异分析 曹雪莹, 种云霄, 余光伟, 仲海涛 (4033)

基于 RT-qPCR 选择性检测水中活性病原菌 林怡雯, 李丹, 吴舒旭, 何苗, 杨天 (4040)

消毒副产物生成的温度影响和动力学模型 张小璐, 杨宏伟, 王小任, 付静, 解跃峰 (4046)

一种厌氧微定量研究新方法 张仲良, 吴静, 蒋剑凯, 姜洁, 李怀志 (4052)

梧桐树叶作为反硝化碳源的研究 熊剑锋, 徐华, 阎宁, 张永明 (4057)

降解嗜盐菌 AD-3 的筛选、降解特性及加氧酶基因的研究 崔长征, 冯天才, 于亚琦, 董斐, 杨昕梅, 冯耀宇, 刘勇弟, 林汉平 (4062)

《环境科学》征订启事 (3711) 《环境科学》征稿简则 (3767) 信息 (3998, 4039, 4045, 4056) 专辑征稿通知 (4051)

梧桐树叶作为反硝化碳源的研究

熊剑锋, 徐华, 阎宁, 张永明*

(上海师范大学生命与环境科学学院环境工程系, 上海 200234)

摘要: 以梧桐树叶浸出液作为碳源进行反硝化实验. 首先探讨了树叶中有机酸在浸渍过程中的释放规律及其影响因素. 经过分析, 树叶中释放的有机酸成分主要是延胡索酸, 其它还有柠檬酸、草酸和苹果酸等. 采用梧桐树叶浸出液作为反硝化碳源时, 平均硝酸盐去除速率为 $2.19 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}$, 而以甲醇、乙酸和葡萄糖为碳源时, 它们的硝酸盐去除速率分别为 2.29 、 2.26 和 $1.87 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}$. 其速率略低于甲醇和乙酸, 而远高于葡萄糖. 实验结果表明在反硝化过程中, 去除 1 mg 硝酸盐需要 7.5 mg 当量梧桐树叶浸出液的 COD, 并且没有亚硝酸盐的积累.

关键词: 反硝化; 碳源; 梧桐树叶; 硝酸盐

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)11-4057-05

Leaves of *Platanus orientalis* as the Carbon Source for Denitrification

XIONG Jian-feng, XU Hua, YAN Ning, ZHANG Yong-ming

(Department of Environmental Engineering, School of Life and Environmental Science, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: Leaching solution from *Platanus orientalis* fallen leaves was used as the carbon source for denitrification, and organic acid releasing regularity and influencing factors during the dipping process were discussed. The main organic acid was fumarate, and others were citric acid, oxalic acid and malic acid according to the analysis by HPLC. The average nitrate removal rate was $2.19 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}$, when the leaching solution was used as the carbon source during denitrification, while the rates were 2.29 , 2.26 and $1.87 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}$ respectively with methanol, acetic acid and glucose as the carbon source. The rate with the leaching solution was slightly lower than those with methanol and acetic acid, but higher than that with glucose. The experimental results indicated that 7.5 mg equivalent of COD from the leaching solution of *Platanus orientalis* fallen leaves were met for 1 mg nitrate reduction and there was no nitrite accumulation during the denitrification.

Key words: denitrification; carbon source; *Platanus orientalis* leaves; nitrate

由于工农业的迅速发展, 尤其是化肥的普遍使用导致大量氮氧化物在自然环境中积累, 造成地表水体严重富营养化, 因此氮素的去除成为地表水修复、生活污水和工业废水处理中一个重要的问题, 而反硝化降解硝态氮是氮素去除的关键步骤^[1~3], 但硝态氮的去除受到一些因素的影响, 主要包括温度, pH 值, 溶解氧等, 而最重要的因素是作为电子供体的有机碳源^[4].

不少反硝化的研究大多以甲醇、乙酸或葡萄糖作为有机碳源来实现硝酸盐的去除^[5~7]. 但由于甲醇、乙酸和葡萄糖等传统有机碳源的价格问题, 广泛应用显然是不经济的, 因此难以普遍推广应用. 基于这些原因, 不少学者采用一些天然物质如棉花^[8,9]、麦秆^[10~12]、腐朽木^[13]、甘草^[14,15]作为固体碳源来实现氮素的去除. 但棉花、麦秸秆等物质具有更高的经济价值, 因此采用废弃物作为有机碳源具有更加实际的意义. 其中, 园林废弃物(如植物落叶)就具有潜在的利用价值. 我国城市产生的园林废弃物数量巨大, 据统计, 北京市每年仅城区产生的

园林废弃物就超过 170 万 t ^[16]. 对这些废弃物传统的处理方法主要有填埋法和焚烧法. 填埋意味着营养元素的流失和浪费, 且占用土地资源. 焚烧虽具有高温无害化和快速的体积削减作用, 但是投资和运行费用高^[17,18], 且还有二次污染的问题. 梧桐树是我国常见的城市园林行道树, 其每年的落叶量成为主要的园林废弃物之一, 且数量巨大. 梧桐树叶中含有大量的有机酸, 如将其用于反硝化的碳源, 不仅可以用于去除富营养化水体中的氮素, 而且对综合利用园林废弃物具有重要的意义.

本研究以梧桐树落叶的浸出液作为有机碳源进行反硝化实验, 分析该树叶中有机酸在浸渍过程中的释放规律及影响因素, 通过反硝化实验来探讨其作为有机碳源的可行性, 并与甲醇、乙酸和葡萄糖

收稿日期: 2012-02-13; 修订日期: 2012-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(50978164, 50678102); 上海市教育委员会创新基金重点项目(ZZ0982); 高等学校博士学科点专项科研基金(20113127110002)

作者简介: 熊剑锋(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为地表水修复, E-mail: 898270246@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: zhym@shnu.edu.cn

进行对比,以期为开发利用梧桐树落叶进行一些有意义的尝试.

1 材料与方 法

1.1 实验材料

实验所用树叶为城市行道梧桐树落叶,洗净后自然风干.

1.2 梧桐树叶的浸渍

称取 10 g 风干后的梧桐树落叶,将其剪成约 3 cm × 3 cm 的小块,置于不同体积的去离子水中,分别在不同温度和不同 pH 条件下,每间隔一定时间取样分析水中的 COD 和 pH 值,并在浸渍 24 h 后分析水中的有机酸成分.在考察不同 pH 值对浸渍过程影响时,用 0.1 mol·L⁻¹ 的 NaOH 溶液调节溶液的 pH 值.

1.3 反硝化污泥的培养

污泥取自上海龙华水质净化厂的二沉池污泥.为了进行对比,分别以甲醇、乙酸和葡萄糖作为反硝化的碳源.将它们分别溶解于自来水中,同时加入硝酸钠作为氮源、磷酸二氢钾作为磷源.培养时,培养液的 COD 浓度均为 200 mg·L⁻¹、NO₃⁻-N 浓度为 20 mg·L⁻¹ 左右、总磷含量为 4 mg·L⁻¹. 首先,用它们驯化反硝化污泥.实验时,取 1 L 污泥,置于 3 L 的锥形瓶中,随后在锥形瓶中分别加入以甲醇、乙酸和葡萄糖为碳源的培养液 500 mL,使其 SV 为 30%. 反硝化污泥驯化过程中,密闭锥形瓶以隔绝空气的进入,并每 2 d 更换一次上清液,经过 1 个月的驯化,得到 3 种分别以甲醇、乙酸和葡萄糖为碳源驯化的反硝化污泥,此时 TN 去除率高于 90%,出水 COD 低于 30 mg·L⁻¹.

1.4 反硝化的比较研究

以甲醇、乙酸和葡萄糖作为反硝化碳源时,在去离子水中分别加入甲醇、乙酸和葡萄糖,同时均加入 NaNO₃ 和 KH₂PO₄,使总氮浓度在 20 mg·L⁻¹ 左右,其中 N:P = 5:1,并加入无机盐及微量元素.将配制好的 3 组各 150 mL 溶液分别加入到各自为碳源所培养的 100 mL 反硝化污泥中,通入氮气 50 min,使其 DO 值低于 0.1 mg·L⁻¹,随后置于摇床进行反硝化.摇床转速 120 r·min⁻¹,温度 35℃.实验时每间隔一定时间取样分析硝酸盐的浓度.

无机盐成分为:CaCl₂·2H₂O 0.02 g·L⁻¹、MgSO₄ 0.1 g·L⁻¹、FeSO₄·7H₂O 0.01 g·L⁻¹、MnSO₄·H₂O 0.001 2 g·L⁻¹.

微量元素配方为:NiCl₂·6H₂O 0.024 g·L⁻¹、

CoCl₂·6H₂O 0.19 g·L⁻¹、CuSO₄·5H₂O、ZnSO₄·7H₂O 0.15 g·L⁻¹、H₃BO₃ 0.006 g·L⁻¹、Na₂MoO₄·2H₂O 0.024 g·L⁻¹,微量元素投加量为 1 mL·L⁻¹ 溶液.

在以梧桐树叶浸出液为碳源时,通过稀释使溶液的 COD 浓度为 200 mg·L⁻¹ 左右,同时按 C:N:P = 100:5:1 的比例加入 NaNO₃ 和 KH₂PO₄. 同样通入氮气 5 min,使溶液中的 DO 值低于 0.1 mg·L⁻¹. 随后将该溶液分成 3 份,分别加入到上述 3 种反硝化污泥中进行反硝化实验.为了比较碳源对硝酸盐去除的影响,配制一组未加任何碳源的含有硝酸盐和磷酸盐的溶液(N:P = 5:1),分别加入到同样的 3 种反硝化污泥中进行反硝化实验.

为了比较以梧桐树叶浸出液作为碳源在反硝化过程中 COD 与硝酸盐的比例对硝酸盐去除速率,以及不同比例对硝酸盐去除规律的影响,还配制不同 COD/N 比例的溶液进行反硝化实验,并测定在此过程中硝酸盐和亚硝酸盐的去除规律.

1.5 分析方法与仪器

COD 分析采用重铬酸钾滴定法 GB 11914-8^[19],用 JK205-A 型 COD 恒温加热器(济南精密科学仪表有限公司)进行消解;pH 测试采用型号为 LP-3000 便携式 pH 计(上海艾旺工贸有限公司),氨氮,硝态氮,亚硝态氮,总氮的分析采用荷兰产型号为 SKALAR SAN + + 2000 的流动分析仪进行检测.

有机酸分析:梧桐树叶浸出液先用 0.22 μm 滤膜过滤,采用 Agilent1100 高效液相色谱分析梧桐树叶浸出液中的有机酸成分,使用 UV 检测器,检测波长 210 nm,色谱柱型号为 Transgenomic COREGel 87H3,调整柱温 35℃,流动相(0.008 mol·L⁻¹ 硫酸溶液),流速 0.5 mL·min⁻¹.为了鉴别不同有机酸的出峰时间,另配制了草酸(H₂C₂O₄)、柠檬酸(C₆H₈O₇)、延胡索酸(C₄H₄O₄)和苹果酸(C₄H₆O₅)的标准样品进行对比,以鉴别梧桐树叶浸出液中有有机酸的组成.

2 结果与讨论

2.1 有机酸的释放规律

将 10 g 梧桐树叶浸没于 1 L 去离子水中,在 16℃ 条件下其 COD 增长规律如图 1 所示.从中可以看出,水体中单位质量梧桐树叶所释放的 COD 在最初的 12 h 内增加较快.这是由于梧桐树叶中的一些有机物以 COD 的形式释放出来.至 24 h 时,COD

的增加速率逐渐减缓,此时,单位质量梧桐树叶释放量达到 $69 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 72 h 时释放量达到了 $79 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. 此时水体中的 COD 浓度达到 $700 \sim 800 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 从图 1 中还可以看出在 12 h 时, COD 的释放量达到了 87%.

与此同时,溶液的 pH 值呈现下降趋势,从最初的 6.7 下降至 5.2. 由此推测梧桐树叶在浸渍过程中 COD 的升高是由于树叶中的有机酸类物质的释放,导致 COD 浓度升高. 这些释放的有机酸将有可能被微生物利用而成为反硝化的有机碳源. 据报道, Song 等^[20]对东北落叶松凋落物成分分析中发现,树叶中含有草酸、丙二酸、反丁烯二酸、丁二酸、顺丁烯二酸、苹果酸、棕榈酸、柠檬酸等.

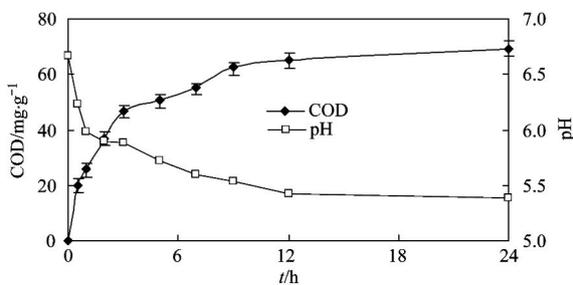


图 1 梧桐树叶中有机酸的释放

Fig. 1 Organic acid released from leaves of *Platanus orientalis*

2.2 梧桐树叶浸出液组成

利用高效液相色谱对梧桐树叶浸出液进行分析,并与相应的标样进行比对,发现其中的主要成分为有机酸类物质. 图 2 是梧桐树叶浸出液在高效液相色谱测试过程中的图谱,从中可以看出,梧桐树叶浸出液含有大量的有机酸,主要含有草酸 ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$)、柠檬酸 ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$)、苹果酸 ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_5$)、延胡索酸 ($\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4$) 等,其中延胡索酸占有较大比例. 这些有机酸分子结构相对简单,容易被微生物利用. 这一结果与宋金凤等^[21]报道的东北落叶松的成分有所不同,但可以说明图 1 中 pH 的下降是

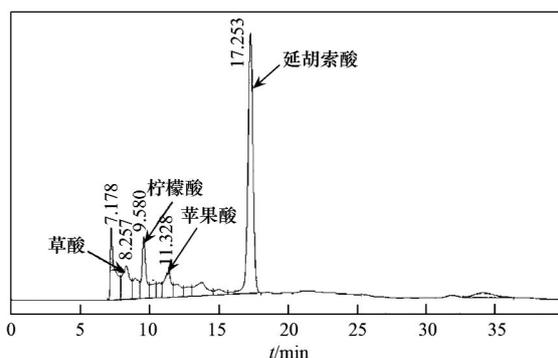


图 2 梧桐树叶浸出液色谱分析

Fig. 2 Chromatograph of leaching liquid from *P. orientalis* leaves

由于有机酸的释放而导致的.

2.3 影响有机酸释放的因素

2.3.1 温度的影响

图 3(a)所示是在 1 L 溶液中加入 10 g 梧桐树叶,在不同温度条件下有机酸释放的规律. 从中可以看出,随着温度的升高,单位质量梧桐树叶所释放 COD 的升高速率和增加量有所提高. 这是由于温度的提高,导致分子运动加剧,从而有利于有机酸的释放. 但相对来说,在上述实验温度条件下,提高的幅度并不大. 因此,在实际应用过程中,在任何温度条件下,都可以通过浸渍梧桐树叶使其释放出有机酸.

2.3.2 pH 的影响

图 3(b)所示是水温 18°C 左右和不同 pH 条件下,将 10 g 梧桐树叶加入到 1 L 去离子水中时有机酸的释放规律. 从中可以看出, pH 从 6.5 ~ 8 时,随着 pH 升高, COD 增长速率和增长量呈下降趋势. 这说明,碱性溶液会减缓梧桐树叶有机酸的释放速率和释放量. 与图 1 相比,自然 pH 条件下,梧桐树叶中有机酸的释放量比预先调节 pH 时要大. 这表明,在实际应用过程,可以不必调节溶液的 pH 值.

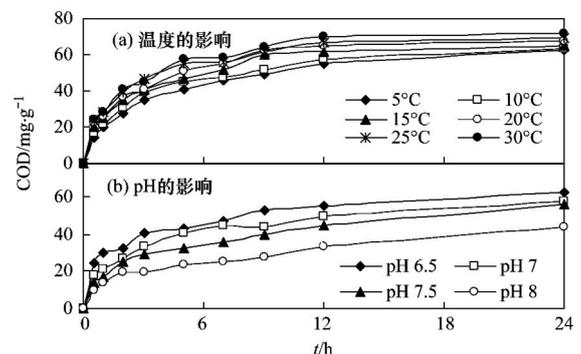


图 3 温度和 pH 对有机酸释放的影响

Fig. 3 Effects of temperature and pH on organic acid release

2.4 以梧桐树叶浸出液作为反硝化的碳源

2.4.1 与甲醇、乙酸和葡萄糖作为碳源进行反硝化的比较

梧桐树叶作为碳源分别在以甲醇、乙酸和葡萄糖为碳源驯化的反硝化污泥中进行反硝化的实验结果如图 4 所示. 作为对比,以甲醇、乙酸和葡萄糖为碳源的反硝化结果示于图 4. 从中可以看出,无论以哪种有机碳源驯化的污泥进行反硝化,当没有外加碳源时,硝酸盐几乎没有去除. 以梧桐树叶浸出液作为有机碳源并分别在以 3 种污泥驯化的反硝化污泥中进行反硝化时,其硝酸盐平均去除速率为 $2.19 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}$,而甲醇、乙酸和葡萄糖为碳源时,它们反硝化速率分别为 2.29 、 2.26 和 $1.87 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}$. 由此可

以看出,以梧桐树叶浸出液为碳源时,其对硝酸盐去除速率略小于甲醇和乙酸,而明显大于葡萄糖.因此将其作为反硝化碳源的效果优于葡萄糖.这是因为甲醇属于一元含碳有机物,根据相关文献,较容易在厌氧条件下被反硝化菌利用作为反硝化碳源^[22,23],乙酸作为二元碳源,其被微生物利用的速率相对于甲醇会差一些,而葡萄糖作为一种六碳的单糖,其作为反硝化碳源的利用速率最为缓慢.因为葡萄糖首先是转换成丙酮酸,丙酮酸在乙酰辅酶A的作用下不完全氧化,转变成乙醇,再进一步降解,被微生物利用^[24].这说明,作为有机碳源,相对分子质量越小,越容易被微生物利用,从而有利于反硝化的进行.从梧桐树叶浸出的有机物的主要成分是延胡索酸,且延胡索酸的相对分子质量(160)小于葡萄糖(180).

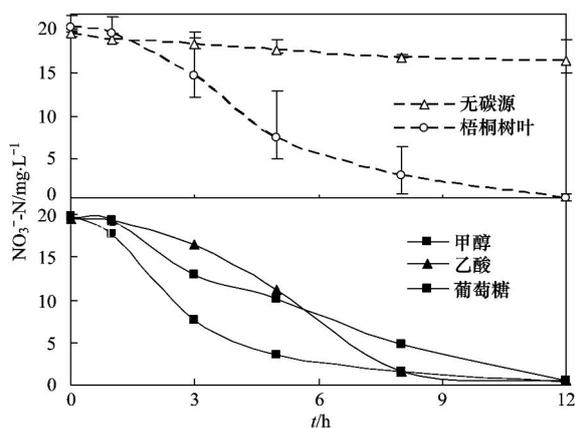


图4 不同碳源进行反硝化的比较

Fig. 4 Comparison of different carbon sources on denitrification

2.4.2 不同碳氮比对硝酸盐去除的影响

分别配制含有不同 COD 浓度的梧桐树叶浸出液,所对应的 COD 浓度分别为 50、100、150、250 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,加入浓度同样为 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硝酸盐,使溶液的 COD 与硝酸盐氮之比分别为 2.5、5、7.5 和 10,并将没有碳源的溶液作为对比,在不同的碳氮比条件下进行反硝化,其结果如图 5 所示.从中可以看出,当 COD/N 比为 0 时,硝酸盐几乎没有得到去除,当 COD/N 由 2.5 逐步升高至 7.5 时,经过 24 h 的反硝化,硝酸盐几乎全部去除,再将 COD/N 增加到 12.5 时,硝酸盐的去除率则没有明显增加.由此可知,去除 1 mg 的 NO_3^- -N 约需要 7.5 mg COD 当量的梧桐树叶浸出液.

根据报道,完全反硝化 1 mg 硝态氮需要约 5.25 mg COD 当量的甲醇^[25]、4.85 mg COD 当量的葡萄糖、3.52 mg COD 当量的乙酸^[26].相比甲醇、

乙酸和葡萄糖,虽然去除单位硝酸盐氮需要更多当量的梧桐树叶浸出液的 COD,但梧桐树叶作为一种园林废弃物,将其用于废水处理或地表水修复过程中的有机碳源进行反硝化具有较好的经济性.

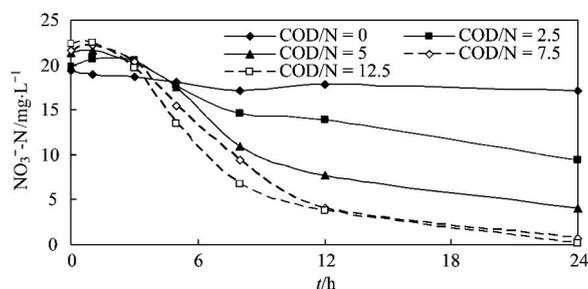


图5 COD/N对硝酸盐去除的影响

Fig. 5 Effects of COD/N on nitrate removal

2.4.3 COD/N 与亚硝酸盐形成的关系

图 6 所示是硝酸盐在去除过程中,亚硝酸盐的变化情况.从中可以看出,硝酸盐在降解过程中,由于溶解氧控制在 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,无论 COD/N 的比例如何,首先会有部分硝酸盐转变为亚硝酸盐,当有碳源存在时,亚硝酸盐又逐步降解,并且 COD/N 越大,亚硝酸盐在最初的 1 h 内增长越快,随后亚硝酸盐降解越快.而当没有碳源时,亚硝酸盐形成后则不再降解.这一结果说明,采用梧桐树叶浸出液作为有机碳源时,可以有效地使硝酸盐得到降解,且不会有亚硝酸盐的积累,其降解过程与传统的碳源葡萄糖类似^[5].

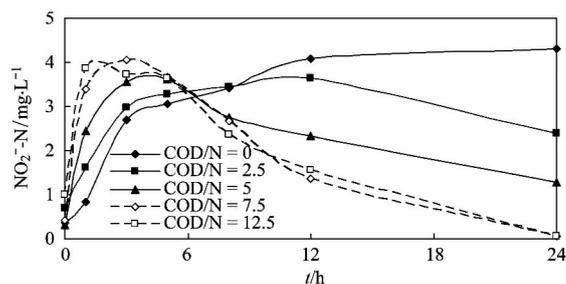


图6 不同碳氮比条件下亚硝酸盐的变化过程

Fig. 6 Nitrite change under different ratios of carbon and nitrogen

3 结论

(1) 梧桐树叶经过浸渍,其中的有机酸在 12 h 内可以释放出 87%,所释放的有机酸主要为延胡索酸($\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4$),其他还包括草酸($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$),柠檬酸($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$),苹果酸($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_5$).

(2) 适当提高水温可以稍微加速有机物的释放速率,较高的 pH 值对有机物的释放会有所抑制.

(3) 以梧桐树叶浸出液作为电子供体进行反硝

化时,其硝酸盐平均去除速率为 $2.19 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}$,相应地甲醇、乙酸和葡萄糖为碳源时,硝酸盐去除速率分别为 2.29 、 2.26 和 $1.87 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}$,其速率略低于甲醇和乙酸,而高于葡萄糖. 在反硝化过程中,去除 1 mg 硝酸盐需要 7.5 mg COD 当量的梧桐树叶浸出液,并且没有亚硝酸盐的积累.

参考文献:

- [1] Almasri M N, Kaluarachchi J J. Assessment and management of long-term nitrate pollution of ground water in agriculture-dominated watersheds[J]. Journal of Hydrology, 2004, **295**(1-4): 225-245.
- [2] Zayed G, Winter J. Removal of organic pollutants and of nitrate from wastewater from the dairy industry by denitrification[J]. Applied Microbiology Biotechnology, 1998, **49**(4): 469-474.
- [3] Chevron F, Defines C, Dubourguier H C. Denitrification of high nitrate and ammonia waters using fixed biofilms reactors on natural supports[J]. Environmental Technology, 1997, **18**(2): 171-178.
- [4] Lee C Y, Shin H S, Chae S R, et al. Nutrient removal using anaerobically fermented leachate of food waste in the BNR process[J]. Water Science and Technology, 2003, **47**(1): 159-165.
- [5] Akunna J C, Bizeau C, Moletta R. Nitrate and nitrite reductions with anaerobic sludge using various carbon sources: glucose, glycerol, acetic acid, lactic acid and methanol[J]. Water Research, 1993, **27**(8): 1303-1312.
- [6] Fass S, Ganaye V, Urbain V, et al. Volatile fatty acids as organic carbon sources in denitrification[J]. Environmental Technology, 1994, **15**(5): 459-467.
- [7] Xu Y T. Volatile fatty acids carbon source for biological denitrification[J]. Environmental Science, 1996, **8**(3): 257-269.
- [8] Volokita M, Abeliovich A, Soares M I M. Denitrification of groundwater using cotton as energy source[J]. Water Science and Technology, 1996, **34**(1-2): 379-385.
- [9] 金赞芳, 陈英旭, 小仓纪雄. 以棉花为碳源去除地下水硝酸盐的研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, **23**(3): 512-515.
- [10] Soares M I M, Abeliovich A. Wheat straw as substrate for water denitrification[J]. Water Research, 1998, **32**(12): 3790-3794.
- [11] 邵留, 徐祖信, 金伟, 等. 以稻草为碳源和生物膜载体去除水中的硝酸盐[J]. 环境科学, 2009, **30**(5): 1414-1419.
- [12] 徐锁洪, 施巍. 以稻壳为载体培养反硝化菌及硝酸盐氮的去除[J]. 大连铁道学院学报, 2001, **22**(4): 98-101.
- [13] 孙雅丽, 张国臣, 阎中, 等. 以腐朽木为碳源去除废水中硝酸盐氮的研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(6): 1494-1498.
- [14] Ovez B. Batch biological denitrification using *Arundo donax*, *Glycyrrhiza glabra*, and *Gracilaria verrucosa* as carbon source[J]. Process Biochemistry, 2006, **41**(6): 1289-1295.
- [15] Ovez B, Ozgen S, Yuksel M. Biological denitrification in drinking water using *Glycyrrhiza glabra* and *Arundo donax* as the carbon source[J]. Process Biochemistry, 2006, **41**(7): 1539-1544.
- [16] 于鑫, 孙向阳, 徐佳, 等. 北京市园林绿化废弃物现状调查及再利用对策探讨[J]. 山东林业科技, 2009, (4): 5-11.
- [17] 梁晶, 吕子文, 方海兰. 园林绿色废弃物堆肥处理的国外现状与我国的出路[J]. 中国园林, 2009, (4): 1-6.
- [18] 吕子文, 方海兰, 黄彩娣. 美国园林废弃物的处置及对我国的启示[J]. 中国园林, 2007, (8): 90-94.
- [19] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [20] Song J F, Cui X Y. Analysis of organic acids in selected forest litters of Northeast China[J]. Journal of Forestry Research, 2003, **14**(4): 285-289.
- [21] 宋金凤, 崔晓阳, 刘永. 毛细管气相色谱法测定森林凋落物中的有机酸[J]. 林业科学, 2004, **40**(4): 185-188.
- [22] Purtschert I, Gujer W. Population dynamics by methanol addition in denitrifying wastewater treatment plants[J]. Water Science Technology, 1999, **39**(1): 43-50.
- [23] Foglar L, Briski F. Wastewater denitrification process-the influence of methanol and kinetic analysis[J]. Process Biochemistry, 2003, **39**(1): 95-103.
- [24] 徐亚同. 不同碳源对生物反硝化的影响[J]. 环境科学, 1994, **15**(2): 29-32.
- [25] Christensson M, Lie E, Welander T. A comparison between ethanol and methanol as carbon sources for denitrification[J]. Water Science Technology 1994, **30**(6): 83-90.
- [26] 杨敏, 孙永利, 郑兴灿, 等. 不同外加碳源的反硝化效能与技术经济性分析[J]. 城镇给排水, 2010, **36**(11): 125-128.

CONTENTS

Characteristics of Atmospheric NO ₂ in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and the Yangtze River Delta Analyzed by Satellite and Ground Observations	WANG Ying, LI Ling-jun, LIU Yang (3685)
Variation Analysis of Background Atmospheric Pollutants in North China During the Summer of 2008 to 2011	YANG Jun-yi, XIN Jin-yuan, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3693)
Characteristics of Atmospheric Pollutants in Cangzhou	WANG Yong-hong, HU Bo, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3705)
Chemical Characteristics and Sources of Trace Metals in Precipitation Collected from a Typical Industrial City in Northern China	LI Yue-mei, PAN Yue-peng, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3712)
BTX Monitoring Nearby Main Road Traffic in Guangzhou	YE Cong-lei, XIE Pin-hua, QIN Min, <i>et al.</i> (3718)
Dynamic Road Vehicle Emission Inventory Simulation Study Based on Real Time Traffic Information	HUANG Cheng, LIU Juan, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (3725)
Emission Characteristics of a Diesel Car Fueled with Coal Based Fischer-Tropsch (F-T) Diesel and Fossil Diesel Blends	HU Zhi-yuan, CHENG Liang, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (3733)
Spatial Variations of Biogenic Elements in Coastal Wetland Sediments of the Jiulong River Estuary	YU Xiao-qing, YANG Jun, LIU Le-mian, <i>et al.</i> (3739)
Spatio-Temporal Distribution of TN and TP in Water and Evaluation of Eutrophic State of Lake Nansi	SHU Feng-yue, LIU Yu-pei, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (3748)
Impact on Nitrogen and Phosphorous Export of Wetlands in Tianmu Lake Watershed	LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Heng-peng (3753)
Nitrogen and Phosphorus Composition in Urban Runoff from the New Development Area in Beijing	LI Li-qing, LÜ Shu-cong, ZHU Ren-xiao, <i>et al.</i> (3760)
Distribution and Sources of Arsenic in Yangzonghai Lake, China	ZHANG Yu-xi, XIANG Xiao-ping, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3768)
Occurrence of Fecal Indicator Bacteria in Urban Surface Water: A Case Study in Southern China	SUN Fu, SHA Jing, LIU Yan-hua (3778)
Vertical Migration of Algal Cells in the Daning River Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3787)
Construct of Yangtze-Huai River Rural Areas Ecological Drainage System and Its Retention Effect on Pollutants	SHAN Bao-qing, LI Nan, TANG Wen-zhong (3797)
Water Treatment Efficiency of Constructed Wetland Plant-Bed/Ditch Systems	WANG Zhong-qiong, ZHANG Rong-bin, CHEN Qing-hua, <i>et al.</i> (3804)
Effect of the Subsurface Constructed Wetland Evolution into Free Surface Flow Constructed Wetland on the Removal of Organic Matter, Nitrogen, and Phosphorus in Wastewater	WEI Ze-jun, XIE Jian-ping, HUANG Yu-ming (3812)
Treatment Characteristics of Saline Domestic Wastewater by Constructed Wetland	GAO Feng, YANG Zhao-hui, LI Chen, <i>et al.</i> (3820)
Degradation of β -Naphthol by Catalytic Wet Air Oxidation	LIU Jie, YU Chao-ying, ZHAO Pei-qing, <i>et al.</i> (3826)
Degradation of 2,4-Dichlorophenol in Aqueous Solution by ZVI/EDDS/Air System	SUN Qian, ZHOU Hai-yan, CAO Meng-hua, <i>et al.</i> (3833)
Study on Photocatalytic Degradation of 1,2,3-Trichlorobenzene Using the Microwaved MWNTs/TiO ₂ Composite	SHI Zhou, ZHANG Qian, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3840)
Mechanism of Cr(VI) Removal from Aqueous Solution Using Biochar Promoted by Humic Acid	DING Wen-chuan, TIAN Xiu-mei, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3847)
Research on the Treatment of Wastewater Containing PVA by Ozonation-Activated Sludge Process	XING Xiao-qiong, HUANG Cheng-lan, LIU Min, <i>et al.</i> (3854)
Effects of Composite Substrates on the Phosphorus Removal in Granule-based EBPR System and Its Optimization Experiment	XU Shao-juan, SUN Pei-de, ZHENG Xiong-liu, <i>et al.</i> (3859)
Research of Input Water Ratio's Impact on the Quality of Effluent Water from Hydrolysis Reactor	LIANG Kang-qiang, XIONG Ya, QI Mao-rong, <i>et al.</i> (3868)
Evolution of Leachate Quantity and Quality in the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin, <i>et al.</i> (3873)
National Survey of Urban Sewage Reuse in China	GUO Yu-jie, WANG Xue-chao, ZHOU Zhen-min (3881)
Sorption and Desorption of 17 α -Ethinyl Estradiol and 4-n-Nonylphenol in Soil	JIANG Lu, WANG Ji-hua, LI Jian-zhong, <i>et al.</i> (3885)
Soil Organic Carbon Mineralization of Black Locust Forest in the Deep Soil Layer of the Hilly Region of the Loess Plateau, China	MA Xin-xin, XU Ming-xiang, YANG Kai (3893)
Effects of Soil Crusts on Surface Hydrology in the Semiarid Loess Hilly Area	WEI Wei, WEN Zhi, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3901)
Environmental Factors on Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils from Dashiwei Karst Giant Doline (Tiankeng) in Guangxi, China	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, JIANG Zhong-cheng, <i>et al.</i> (3905)
Investigation on Mechanism of Pyrite Oxidation in Acidic Solutions	WANG Nan, YI Xiao-yun, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3916)
Monitoring of Water and Salt Transport in Silt and Sandy Soil During the Leaching Process	FU Teng-fei, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (3922)
Simulation on Remediation of Benzene Contaminated Groundwater by Air Sparging	FAN Yan-ling, JIANG Lin, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3927)
Detecting the Cytotoxicities of Five Bisphenol A Analogues to the MCF-7 Human Breast Carcinoma Cell Line Through Different Endpoints	ZHANG Shuai-shuai, LIU Yan, LIU Shu-shen, <i>et al.</i> (3935)
Response of Copepod Community Characteristics to Environmental Factors in the Backshore Wetland of Expo Garden, Shanghai	CHEN Li-jing, WU Yan-fang, JING Yu-xiang, <i>et al.</i> (3941)
Isolation, Identification and Characterization of Halotolerant Petroleum-degrading Bacteria	WU Tao, XIE Wen-jun, YI Yan-li, <i>et al.</i> (3949)
Growth Kinetics and Phenol Degradation of Highly Efficient Phenol-degrading <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10	CHEN Xiao-hua, WEI Gang, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (3956)
Isolation of Aerobic Degrading Strains for TBBPA and the Properties of Biodegradation	QIAN Yan-yuan, LIU Li-li, YU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3962)
Influences of Long-term Application of Organic and Inorganic Fertilizers on the Composition and Abundance of <i>nirS</i> -type Denitrifiers in Black Soil	YIN Chang, FAN Fen-liang, LI Zhao-jun, <i>et al.</i> (3967)
Characteristics and Influencing Factors of Trichloroethylene Adsorption in Different Soil Types	HE Long, QIU Zhao-fu, LÜ Shu-guang, <i>et al.</i> (3976)
Degradation of Carbandazim in Paddy Soil and the Influencing Factors	XIAO Wen-dan, YANG Xiao-e, LI Ting-qiang (3983)
Effects of Sulphur Compounds on the Volatile Characteristics of Heavy Metals in Fly Ash from the MSW and Sewage Sludge Co-combustion Plant During the Disposal Process with Higher Temperature	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3990)
Low-temperature Thermal Treatment of Dioxin in Medical Waste Fly Ash Under Inert Atmosphere	JI Sha-sha, LI Xiao-dong, XU-Xu, <i>et al.</i> (3999)
Hourly Measurement on Aerosol NH ₃ and Gas NO _x Emission in the Rice Field	GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (4006)
Implementation of an Electronic Nose for Rapid Detection of Volatile Chloralkane and Chloroalkene	WEN Xiao-gang, LIU Rui, CAI Qiang, <i>et al.</i> (4012)
Pilot Study on PAHs of the Atmosphere Around the Refuse Incineration Plant Based on the Technology of Passive Sampling	SUN Shao-ai, LI Yang, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (4018)
Spatial Distribution and Pollution Source Identification of Agricultural Non-Point Source Pollution in Fujiang Watershed	DING Xiao-wen, SHEN Zhen-yao (4025)
Difference of P Content in Different Area Substrate of Constructed Wetland	CAO Xue-ying, CHONG Yun-xiao, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (4033)
Selective Detection of Viable Pathogenic Bacteria in Water Using Reverse Transcription Quantitative PCR	LIN Yi-wen, LI Dan, WU Shu-xu, <i>et al.</i> (4040)
Formation of Disinfection By-products; Temperature Effect and Kinetic Modeling	ZHANG Xiao-lu, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (4046)
A Novel Quantitative Approach to Study Dynamic Anaerobic Process at Micro Scale	ZHANG Zhong-liang, WU Jing, JIANG Jian-kai, <i>et al.</i> (4052)
Leaves of <i>Platanus orientalis</i> as the Carbon Source for Denitrification	XIONG Jian-feng, XU Hua, YAN Ning, <i>et al.</i> (4057)
Isolation, Characterization of an Anthracene Degrading Bacterium <i>Marteella</i> sp. AD-3 and Cloning of Dioxygenase Gene	CUI Chang-zheng, FENG Tian-cai, YU Ya-qi, <i>et al.</i> (4062)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年11月15日 33卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 11 Nov. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人