

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

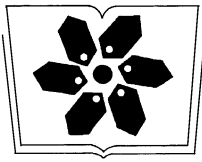
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第7期 Vol.33 No.7 **2013**

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 33 卷 第 7 期 2013 年 4 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 线虫转型发育和寄主识别的化学通讯研究进展..... 张 宾,胡春祥,石 进,等 (2003)
- 生物物种资源监测原则与指标及抽样设计方法..... 徐海根,丁 晖,吴 军,等 (2013)

个体与基础生态

- 呼伦贝尔草原人为火空间分布格局..... 张正祥,张洪岩,李冬雪,等 (2023)
- 青藏高原草地地下生物量与环境因子的关系..... 杨秀静,黄 玫,王军邦,等 (2032)
- 1961—2010 年桂林气温和地温的变化特征 陈 超,周广胜 (2043)
- 黄泥河自然保护区狗冬季卧息地选择..... 朱洪强,葛志勇,刘 庚,等 (2054)
- 青藏高原草地植物叶解剖特征..... 李全发,王宝娟,安丽华,等 (2062)
- 青藏高原高寒草甸夏季植被特征及对模拟增温的短期响应..... 徐满厚,薛 娴 (2071)
- 高温影响番茄小孢子发育的细胞学研究..... 彭 真,程 琳,何艳军,等 (2084)
- 黄土丘陵半干旱区柠条林株高生长过程新模型..... 赵 龙,王振凤,郭忠升,等 (2093)
- 柝属 7 种植物种子的发芽抑制物质研究..... 李庆梅,刘 艳,刘广全,等 (2104)
- 水分胁迫和杀真菌剂对黄顶菊生长和抗旱性的影响..... 陈冬青,皇甫超河,刘红梅,等 (2113)
- 铜尾矿废弃地与相邻生境土壤种子库特征的比较..... 沈章军,欧祖兰,田胜尼,等 (2121)
- 云雾山典型草原火烧不同恢复年限土壤化学性质变化..... 李 媛,程积民,魏 琳,等 (2131)
- 根系分区交替灌溉条件下水肥供应对番茄果实硝酸盐含量的影响..... 周振江,牛晓丽,李 瑞,等 (2139)
- 喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响..... 李 娟,廖洪凯,龙 健,等 (2147)
- 自生固氮菌活化土壤无机磷研究..... 张 亮,杨宇虹,李 倩,等 (2157)
- 德国鳶尾对 Cd 胁迫的生理生态响应及积累特性 张呈祥,陈为峰 (2165)
- 施污土壤重金属有效态分布及生物有效性..... 铁 梅,宋琳琳,惠秀娟,等 (2173)
- 基于叶面积指数改进的直角双曲线模型在玉米农田生态系统中的应用..... 孙敬松,周广胜 (2182)
- 中稻田三种飞虱的捕食性天敌优势种及农药对天敌的影响..... 林 源,周夏芝,毕守东,等 (2189)

种群、群落和生态系统

- 珠江口超微型浮游植物时空分布及其与环境因子的关系..... 张 霞,黄小平,施 震,等 (2200)
- 输水前后塔里木河下游物种多样性与水因子的关系..... 陈永金,刘加珍,陈亚宁,等 (2212)
- 南海西北部陆架区鱼类的种类组成与群落格局..... 王雪辉,林昭进,杜飞雁,等 (2225)
- 滇西北高原碧塔湖滨沼泽植物群落分布与演替 韩大勇,杨永兴,杨 杨 (2236)
- 石羊河下游白刺灌丛演替过程中群落结构及数量特征..... 靳虎甲,马全林,何明珠,等 (2248)

资源与产业生态

- 土壤深松和补灌对小麦干物质生产及水分利用率的影响..... 郑成岩,于振文,张永丽,等 (2260)

豆科绿肥及施氮量对旱地麦田土壤主要肥力性状的影响..... 张达斌,姚鹏伟,李 婧,等 (2272)

沟壑全覆盖种植方式对旱地玉米生长及水分利用效率的影响..... 李 荣,侯贤清,贾志宽,等 (2282)

城乡与社会生态

北京北护城河河岸带的温湿度调节效应 吴芳芳,张 娜,陈晓燕 (2292)

西安太阳总辐射时空变化特征及对城市发展的响应..... 张宏利,张纳伟锐,刘敏茹,等 (2304)

研究简报

安徽琅琊山大型真菌区系多样性..... 柴新义,许雪峰,汪美英,等 (2314)

中国生态学会 2013 年学术年会征稿通知 (2320)

第七届现代生态学讲座、第四届国际青年生态学者论坛通知 (I)

中、美生态学会联合招聘国际期刊主编 (i)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 318 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-04



封面图说: 金灿灿的小麦熟了——小麦是世界上最早栽培的农作物之一,是一种在世界各地广泛种植的禾本科植物,起源于中东地区。全世界大概有 43 个国家,近 35%—40% 的人口以小麦为主要粮食。小麦是禾谷类作物中抗寒能力较强的越冬作物,具有一定的耐旱和耐盐碱能力。中国的小麦分布于全国各地,主要集中于东北平原、华北平原和长江中下游一带。小麦秋季播种、冬季生长、春季开花、夏季结实。子粒含有丰富的淀粉、较多的蛋白质、少量的脂肪,还有多种矿物质元素和维生素 B,是一种营养丰富、经济价值较高的粮食。

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/stxb201112191930

张亮, 杨宇虹, 李倩, 吴叶宽, 黄建国. 自生固氮菌活化土壤无机磷研究. 生态学报, 2013, 33(7): 2157-2164.

Zhang L, Yang Y H, Li Q, Wu Y K, Huang J G. Mobilization of inorganic phosphorus from soils by five azotobacters. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(7): 2157-2164.

自生固氮菌活化土壤无机磷研究

张 亮¹, 杨宇虹², 李 倩¹, 吴叶宽¹, 黄建国^{1,*}

(1. 西南大学 资源环境学院, 北碚 400716; 2. 云南省烟草农业研究院, 玉溪 653100)

摘要:以土壤为磷源,通过液体培养试验研究了 5 株自生固氮菌(*Azotobacter* sp.)对土壤无机磷的活化利用。结果表明,自生固氮菌能释放大量的氢离子,使液体培养基的 pH 大幅度降低,氢离子的浓度至少提高 58 倍以上。自生固氮菌分泌有机酸的种类与数量因菌株不同而异,这些有机酸包括甲酸、乙酸、草酸、丁二酸、柠檬酸、苹果酸和乳酸等,其中均能分泌草酸和苹果酸。在接种自生固氮菌的液体培养基中,全磷含量显著高于不接种的液体培养基,土壤无机磷总量则显著降低。由于土壤是培养基磷的唯一来源,故自生固氮菌促进了土壤无机磷的溶解释放。相关分析表明,培养基的 pH 值与土壤无机磷总量呈极显著正相关($r = 0.959^{**}$, $n = 6$),与液体培养基中的无机磷和全磷呈显著或极显著负相关($r = -0.850^*$; $r = -0.918^{**}$, $n = 6$),说明自生固氮菌分泌的氢离子可能是溶解土壤无机磷的原因之一。接种自生固氮菌显著降低土壤钙磷,土壤中的铁磷、铝磷和闭蓄态磷的降幅因菌株不同而异,其原因可能与有机酸分泌的数量和种类有关。

关键词:自生固氮菌;土壤;磷

Mobilization of inorganic phosphorus from soils by five azotobacters

ZHANG Liang¹, YANG Yuhong², LI Qian¹, WU Yekuan¹, HUANG Jianguo^{1,*}

1 College of Resources of Environment, Southwest University, Beibei, Chongqing 400716, China

2 Yunnan Academy of Tobacco Agricultural Sciences, Yuxi 653100, China

Abstract: Phosphorus (P) is one of the most important essential elements for plant growth and function. However, both the concentration and the availability of P are very low in most soils. The chemical P supplemented through fertilization is rapidly adsorbed by soil minerals or transformed by soil microbial organisms resulting in a 10%—20% of P use efficiency. Studies have found that *Azotobacter* sp., which can fix nitrogen from the atmosphere to contribute plant nitrogen nutrition, also has the capacity to mobilize soil P for plant use. As a result, the improvement of plant P use efficiency through some specific soil *Azotobacter* to mobilize soil P has attracted much attention around the whole world. However, less information is available to illustrate the mechanisms how *Azotobacter* sp. could directly mobilize P from the soil. Five strains of *Azotobacter* sp., which isolated from a gray brown purple soil in Chongqing, southern China and coded as N 01, N 02, N 03, N 04 and N 05, respectively, were grown a liquid medium to study their capacity to mobilize soil phosphorus (P). The medium contained 1L H₂O, 10 g mannitol, 0.2 g KCl, 0.2 g MgSO₄ · 7H₂O, 0.2 g NaCl, 0.2 g CaSO₄ · 7H₂O and 5.0 g CaCO₃. Compared to the non-*Azotobacter* control, concentrations of proton in the liquid media under all five *Azotobacter* treatments were increased by 58 times leading a significant pH decrease after 7 days of incubation. All *Azotobacter* strains exuded oxalic acid and malic acid, but varied their capacity to exude succinic acid, formic acid, acetic acid, citric acid and lactic acid. Total P in the liquid medium was significantly higher whilst inorganic P was significantly lower in the soil in the *Azotobacter* treatments than in the non-*Azotobacter* treatment. pH in the liquid medium positively correlated with soil total

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金 XDJK(2010D002);国家烟草专卖局(110201102008)资助

收稿日期:2011-12-19; 修订日期:2012-08-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huang99@swu.edu.cn

inorganic P ($r=0.959^{**}$, $n=6$), but negative correlated correlations with both inorganic P and total phosphorus in the liquid medium ($r=-0.850^{*}$ or -0.918^{**} , $n=6$). Meanwhile, soil Ca-P was significantly reduced by all *Azotobacter* treatments, while Al-P, Fe-P and occluded P were decreased depending on the *Azotobacter* strain used in this study. On one hand, our results suggest that the capacity of exuding organic acids and hence mobilizing soil P by *Azotobacter* may be species dependent. On the other hand, our results showed that the pH decrease in the liquid medium might be one of the most important mechanisms to mobilize soil Ca-P and/or Mg-P while the organic acids might contribute directly in the mobilization of soil P through the complexation and acidic solution. As a result, our results demonstrated an alternative pathway to enhance plant P nutrition through *Azotobacter* and could offer a potential effective practice to increase crop productivity by intercropping or growing cereal crops with legumes, in which the latter could not only provide nitrogen, but also P, to meet the growth requirements of both nitrogen and P for the cereal crops. Nevertheless, more research on the capacity of *Azotobacter* to mobilize soil P and associated nitrogen and P benefits to its host plants and neighbouring plants are further required.

Key Words: azotobacter; soil; phosphorus

磷是植物生长必须的大量营养元素之一。大多数土壤的含磷量较低,且以难溶状态存在^[1]。磷肥施入土壤之后易形成难溶性的磷酸盐并迅速被土壤矿物吸附固定或微生物固持,其当季利用率通常只有施用量的10%—20%^[2],活化利用土壤中的难溶性磷对于改善植物磷素营养有重要意义。微生物不同程度的参与土壤磷的活化,它们对土壤难溶性磷的溶解作用日益引起人们重视^[3]。

目前,有关微生物活化土壤难溶性磷的研究多局限在芽孢杆菌(*Bacillaceae*)、真菌和放线菌^[4]。前苏联蒙金娜于1935年最早从土壤中分离出1株解磷的巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*),具有分解核酸和卵磷脂的能力^[5]。Sundara等利用磷酸三钙为磷源,经过14 d的培养后发现芽孢杆菌和埃希氏菌的溶磷能力最强^[6]。此外,某些真菌也具有溶解无机磷能力,它们主要是青霉属(*Penicillium*)和AM菌根菌(Arbuscular mycorrhizal fungus);放线菌主要是链霉菌(*Streptomyces*)^[7]。进一步的研究发现,溶磷微生物一般都能分泌有机酸,如甲酸、乙酸、柠檬酸和丁二酸等。在这些有机酸中,甲酸和乙酸的电离常数最大,能电离出氢离子,溶解氟磷灰石、氯磷灰石、羟磷灰石等磷酸钙盐,释放磷酸根^[8-9];高碳有机酸能与铁铝形成稳定络合物,进而溶解高磷铁矿石、粉红磷铁矿、水铝矿等铁铝磷酸盐^[10-11]。就自生固氮菌而言,它们不仅具有固氮作用而且还能溶解磷酸盐,改善土壤供磷能力^[12],但溶磷机理尚待深入探讨。从多方面研究自生固氮菌的生物学功能,可更全面地了解它们的生态作用,更好地为农林生产服务。

1 材料与方法

1.1 材料准备

自生固氮菌(*Azotobacter* sp.)保存于西南大学资源环境学院微生物实验室,从重庆市北碚灰棕紫泥菜地土壤中分离获取,菌种均已进行固氮酶活性的测定。取其中的5株为供试菌株,代号分为N 01、N 02、N 03、N 04和N 05。先将自生固氮菌固体培养基蒸汽灭菌($(121\pm 1)^{\circ}\text{C}$, 30 min),冷却后接种供试菌株, $(30\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 斜面培养4 d备用。正常培养基组成为:蒸馏水1000 mL、琼脂20 g、葡萄糖10 g、 KH_2PO_4 0.2 g、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.2 g、NaCl 0.2 g、 $\text{CaSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.2 g、 CaCO_3 5.0 g、pH值7.0—7.2。然后,再接种到盛有50 mL(KCl代替 KH_2PO_4)的自生固氮菌液体培养基中,摇床培养($(28\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 、60 r/min)3 d,获得菌悬液备用。

供试土壤为侏罗纪紫色砂泥岩发育的灰棕紫泥。蒸汽灭菌后的土壤pH值6.15、有机质15.0 g/kg、全氮1.07 g/kg、全磷0.89 g/kg、全钾16.3 g/kg、铝磷94.3 mg/kg、铁磷65.9 mg/kg、闭蓄态磷130.8 mg/kg、钙磷274.0 mg/kg、有机磷320.8 mg/kg、有效磷20.0 mg/kg、速效钾92.6 mg/kg。风干土壤,磨细过100目筛,取1.0000 g土壤置于两端开口的直径为1 cm的塑料管中部,然后两端塞入玻璃纤维,将土壤夹在中间,再用孔径为0.22 μm 的微孔滤膜密封两端,121 $^{\circ}\text{C}$ 蒸汽灭菌150 min。在振荡培养自生固氮菌时,将盛有土壤的塑料

管放入液体培养基中,水分子、无机离子和有机酸等均可自由进出,但土壤又不会穿过滤膜而进入溶液,自生固氮菌也不能穿过滤膜进入土壤中。

试验中有机酸标准品为色谱纯,其余试剂均为分析纯。精确称取草酸、柠檬酸、苹果酸、丁二酸、乳酸、甲酸、乙酸各 100 mg,用流动相溶解并定溶于 100 mL 容量瓶中,配置成 1.0 g/L 的有机酸的标准混合溶液,再用流动相将标准溶液分别稀释至 0.01、0.02、0.04、0.06、0.08 和 0.10 g/L。

1.2 试验设计

取 250 mL 三角瓶,加入 50 mL KCl 代替 KH_2PO_4 的供试培养基,蒸汽灭菌($(121\pm 1)^\circ\text{C}$, 30 min),冷却。接入 1 mL 1.1 中制备的菌悬液,再加 1 个装有土壤的灭菌塑料管;不接种的液体培养基为对照,余同接种处理,重复 6 次。摇瓶培养($(28\pm 1)^\circ\text{C}$ 、60 r/min)7 d,备测有关项。

1.3 测定项目与方法

将液体培养基摇匀,用 PHS-3C 精密酸度计测定 pH 值;取 10 mL 液体培养基用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消化,钼蓝比色法测定消化液的含磷量;另取 20 mL 将液体培养基于 10000 r/min 离心 8 min,钼蓝比色法测定上清液的无机磷含量。

利用高效液相色谱仪(日本 HITACHI 公司生产)测定液体培养基中的有机酸含量。色谱条件为:Diode Array L-7455 紫外检测器, Ion-300 有机酸分析专用柱(Phenomenex, Torrance, CA, USA),流动相为 2.5 mmol/L 硫酸,流速为 0.5 mL/min,进样量为 20 μL 样液(样液先经硫酸酸化),紫外检测波长为 210 nm,柱温为 35°C ,压力为 450 P。测定的有机酸包括草酸、柠檬酸、苹果酸、乳酸、丁二酸、甲酸、乙酸,其出峰时间(min)依次是 9.57、11.52、13.31、14.53、15.95、17.47、20.72(图 1)。

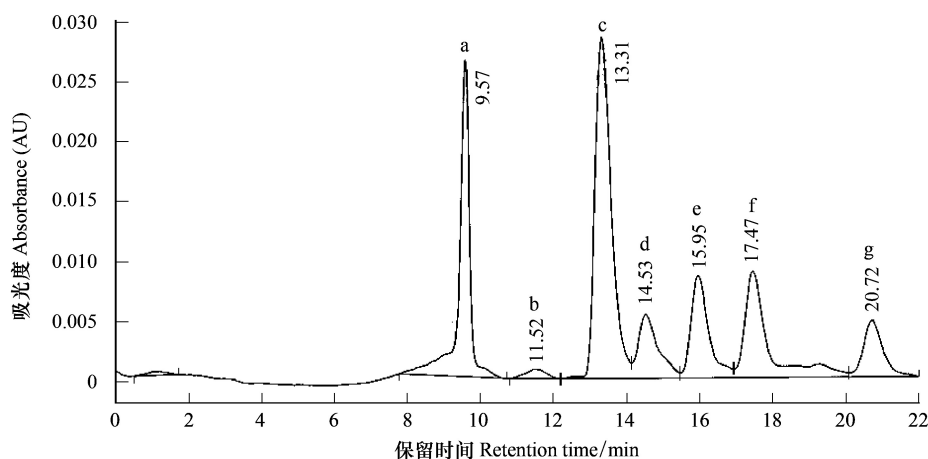


图 1 有机酸的标准色谱图

Fig. 1 Standard chromatogram of organic acids

a. 草酸; b. 柠檬酸; c. 苹果酸; d. 乳酸; e. 丁二酸; f. 甲酸; g. 乙酸

从塑料管中取出土壤,风干后用 Olsen 法提取,钼蓝比色法测定土壤中的有效磷含量^[13];土壤无机磷组分测定:采用张守敬和 Jackson 提出的方法^[14]。该方法将土壤无机磷分为:1 mol/L NH_4Cl 浸提疏松态磷,0.5 mol/L NH_4F 浸提 Al-P,0.1 mol/L NaOH 浸提 Fe-P,0.3 mol/L 柠檬酸钠+1.0 g $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ +0.5 mol/L NaOH 浸提的闭蓄态磷(O-P),0.5 mol/L (1/2 H_2SO_4) 浸提 Ca-P。

1.4 数据处理

用 Excel2003 对试验数据进行基本计算,SPSS18.0 进行统计分析,不同处理间的差异显著性用单因素方差分析进行比较,使用 Pearson 法进行双因素相关分析。

2 结果

2.1 自生固氮菌对培养基 pH 值的影响

图 2 可见,培养 7 d 之后,液体培养基的 pH 值显著低于对照(不接种),但菌株不同,液体培养基的 pH 值

降幅也不一样。接种 N 02 之后,液体培养基的 pH 值为 3.45,降幅最大;接种 N 04,液体培养基的 pH 值为 5.45,降幅最小;其余菌株培养基的 pH 值介于 3.50 和 4.00 之间。

2.2 自生固氮菌的有机酸分泌

表 1 可见,在液体培养基中检测到甲酸、乙酸、草酸、乳酸、丁二酸、柠檬酸、苹果酸等 7 种有机酸。在不接种的液体培养基中(对照),检测到草酸、苹果酸和丁二酸,但含量极低,可忽略不计。值得注意的是,自生固氮菌不同菌株分泌有机酸的种类和数量也不一样。在接种自生固氮菌的液体培养基中,草酸和苹果酸的含量显著高于对照,说明自生固氮菌均能分泌草酸和苹果酸,其中草酸分泌量普遍最高;此外,大多数自生固氮菌能分泌丁二酸和甲酸(N 04 除外),N 01、N 03、N 05 能分泌乙酸;N 02、N 03、N 05 能分泌柠檬酸;N 02 和 N 04 能分泌乳酸。从 5 种有机酸的总量看,N 03 的分泌量最高,N 01 次之,N 02 和 N 05 居第三,N 04 最低。

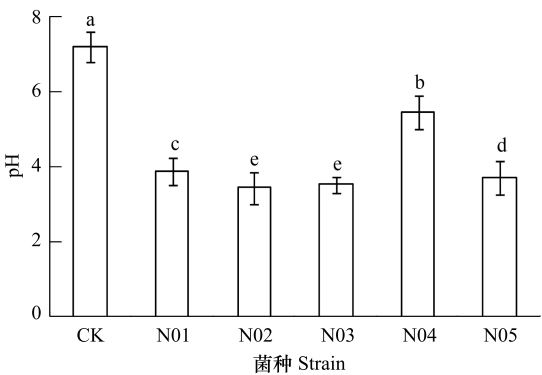


图 2 液体培养基中 pH 变化
Fig. 2 The changes in pH in liquid culture mediums

表 1 液体培养基中有机酸的含量

Table 1 Contents of organic acids in liquid culture mediums/(mg/L)								
菌株 Strain	草酸 Oxalic acid	苹果酸 Malic acid	丁二酸 Succinic acid	甲酸 Formic acid	乙酸 Acetic acid	柠檬酸 Citric acid	乳酸 Lactic acid	总量 Total content
CK	9.91d	8.83d	5.46c	ND	ND	ND	ND	24.20d
N 01	77.50ab	38.54a	12.41a.	12.22a	15.21a	ND	ND	155.88ab
N 02	48.75b	19.39b	9.22b	8.78b	ND	22.01a	10.26a	118.41b
N 03	84.87a	34.88a	12.23a	10.92a	5.03b	26.18a	ND	174.11a
N 04	17.07c	17.77c	ND	ND	ND	ND	7.56a	42.40c
N 05	42.83b	21.50b	10.03ab	9.08b	2.01c	18.62a	ND	104.07b

在同一列中,有不同字母者表示差异显著($P<0.05$);ND 表示未检测出

2.3 培养基中磷的形态与含量

表 2 可见,培养 7 d 之后,液体培养基中的无机磷含量因菌株不同而异。在接种 N 02、N 03 和 N 05 的液体培养基中,无机磷含量显著高于对照组,分别比对照提高 28.54% (N 02)、21.12% (N 03) 和 15.73% (N 05);其余菌株培养基中的无机磷含量与对照相似,变化于 4.58—4.82 mg/L 之间。

表 2 自生固氮菌培养液中的磷形态与含量

Table 2 Phosphorus forms and contents in the liquid culture mediums grown with <i>Azotobacter</i> sp. /(mg/L)			
菌株 Strain	无机磷 Inorganic phosphorus	有机磷 organic phosphorus	全磷 Total phosphorus
CK	4.45c	2.12c	6.57c
N 01	4.82bc	4.03a	8.85ab
N 02	5.72a	4.17a	9.89a
N 03	5.39a	4.09a	9.48a
N 04	4.58bc	3.66ab	8.24ab
N 05	5.15b	4.03a	9.18ab

在接种自生固氮菌的液体培养基中,全磷含量均显著高于对照,比对照提高 25.42%—50.53%,但接种不同菌株之间无显著差异,变化于 8.24—9.89 mg/L 之间(表 2)。

培养基中的全磷减无机磷等于有机磷,少量是自生固氮分泌的有机磷,大部分存在于自生固氮菌细胞中(简称自生固氮菌细胞磷)。全部接种菌株的液体培养基中有机磷含量均显著高于对照,比对照提高

72.64%—96.70% (表 2)。

2.4 土壤有效磷

图 3 可见,土壤有效磷的含量因自生固氮菌菌株不同而异。与不接种相比,N 01 和 N 05 显著增加土壤有效磷含量,培养 7 d 后分别增加了 28.01% 和 22.06%,其余菌株土壤中的有效磷与对照相似。

2.5 土壤无机磷的组分与含量

培养 7 d 之后,土壤无机磷组分及含量见表 3。在液体培养基中接种自生固氮菌,土壤铝磷、铁磷、钙磷和闭蓄态磷不同程度地降低。其中,除 N 04 之外,4 株自生固氮菌显著降低土壤中的铝磷,降幅变化于 22.03%—29.19% 之间。除 N 04 和 N 05 之外,3 株自生固氮菌显著降低土壤中的铁磷,降幅变化于 6.52%—9.60% 之间。除 N 04 之外,4 株自生固氮菌显著降低土壤中的闭蓄态磷,降幅变化于 16.94%—24.39% 之间。全部接种菌株显著降低土壤中的钙磷,降幅变化于 8.15%—17.89% 之间。从土壤无机磷总量看,自生固氮菌均能显著降低土壤中的无机磷总量,降幅变化于 8.11%—19.54% 之间。此外,菌株不同,土壤无机磷各组分的降幅也不一样。就土壤无机磷总量而言,N 02 降幅最大,N 04 降幅最低,其余菌株介于二者之间。

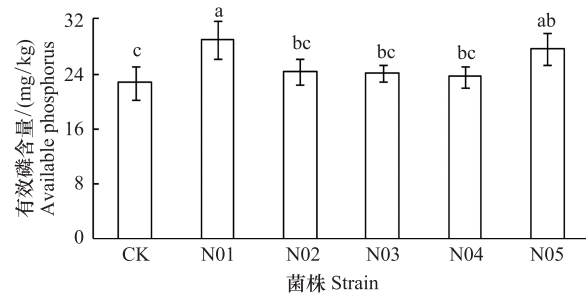


图 3 土壤中有效磷含量变化

Fig. 3 The changes in available phosphorus in soils

表 3 土壤中无机磷组分的变化

Table 3 The changes in inorganic phosphorus fractions in soil / (mg/kg)

菌株 Strain	铝磷 Al-P	铁磷 Fe-P	闭蓄态磷 O-P	钙磷 Ca-P	无机磷总量 Total inorganic P
CK	91.25a	63.00a	125.15a	267.22a	546.62a
N 01	71.15b	57.73b	102.26bc	224.66c	455.80c
N 02	68.82b	56.95b	94.63c	219.41c	439.81d
N 03	65.08b	58.89b	98.02bc	236.64bc	458.63c
N 04	79.72ab	59.63ab	117.52ab	245.43b	502.30b
N 05	64.61b	59.74ab	103.95bc	232.99bc	461.29c

2.6 各因素的相关分析

表 4 可见,培养液中的 pH 值与培养液中的无机磷和全磷呈显著或极显著负相关($r = -0.850^*$ 和 $r = -0.918^{**}$, $n=6$),与土壤无机磷总量呈极显著正相关($r = 0.959^{**}$, $n=6$);自生固氮菌的草酸分泌量与有机酸分泌总量呈极显著正相关($r = 0.991^{**}$, $n=6$)。

表 4 试验各因素的相关系数

Table 4 Correlation coefficients among experimental factors

	培养液无机磷 CMIP	培养液全磷 CMTTP	无机磷总量 Total inorganic P	草酸 Oxalic acid	有机酸总浓度 TOA	pH
培养液无机磷 CMIP	1.000					
培养液全磷 CMTTP	0.884 *	1.000				
无机磷总量 Total inorganic P	-0.836 *	-0.973 **	1.000			
草酸 Oxalic acid	0.573	0.702	-0.772	1.000		
有机酸总浓度 TOA	0.668	0.728	-0.842 *	0.991 **	1.000	
pH	-0.850 *	-0.918 **	0.959 **	-0.835 *	-0.900 *	1.000

CMIP: Culture mediums inorganic P; CMTTP: Culture mediums total P; TOA: Total organic acids; *, ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上相关性达到显著水平

3 讨论

液体培养基中的全磷包括无机磷和有机磷,后者主要存在于自生固氮菌细胞中(简称自生固氮菌细胞磷)。在部分自生固氮菌液体培养基中,无机磷显著增加;在全部自生固氮菌液体培养基中,自生固氮菌细胞磷和培养液中的全磷含量均显著高于对照。与此同时,土壤无机磷总量(铁磷、铝磷、闭蓄态磷、钙磷四者之和)则显著降低。由于土壤磷是培养基磷的唯一来源,说明自生固氮菌可促进土壤无机磷的溶解释放,以无机磷或自生固氮菌细胞磷的形式存在于液体培养基中。值得注意的是,在全部自生固氮菌的液体培养基中,土壤钙磷显著降低。由于氢离子的释放有利于钙镁磷酸盐的溶解^[15-16],这说明自生固氮菌能分泌大量的氢离子,也是自生固氮菌活化无机磷能力较强的原因之一。此外,自生固氮菌因菌株不同,土壤中的闭蓄态磷、铁磷、铝磷发生不同程度的降低,说明自生固氮菌活化土壤不同形态的无机磷因菌株不同而异。在接种 N 01 和 N 05 的处理中,土壤有效磷含量显著增加;而在接种其余菌株的处理之中,土壤有效磷含量无显著变化,进一步说明自生固氮菌菌株不同活化释放无机磷的能力也不一样。

磷细菌能够分泌草酸、苹果酸、乳酸、乙酸、柠檬酸等多种有机酸,不同菌株之间差异很大^[17];有研究者认为解磷细菌的溶磷能力与培养液中的介质有关,磷细菌通过 NH_4^+ 的同化作用释放出质子,降低 pH 值,从而引起磷酸盐的溶解^[18]。Wallander 曾报道,溶磷微生物通过呼吸作用释放 CO_2 ,能降低培养液中的 pH 值,从而释放出磷酸根离子^[19]。Whitelaw 等^[20]发现磷细菌溶解难溶性磷酸盐时,是培养液中氢离子和有机酸共同作用的结果。Hameeda 等^[21]研究表明,微生物溶解无机磷的能力与其产生葡萄糖酸的量有一定的关系,解无机磷能力强的菌株,其相应的产生葡萄糖酸的量也多,并且还发现在培养过程中 pH 值是降低的。在本试验中,全部菌株均能分泌草酸和柠檬酸。此外,大多数自生固氮菌能分泌丁二酸和甲酸(N 04 除外),因菌株不同分泌乙酸、柠檬酸和乳酸的情况而异,这说明不同的菌株溶磷机理可能有所差异。需要指出的是,草酸分泌量与有机酸分泌总量呈极显著正相关($r = 0.991^{**}$, $n = 6$),自生固氮菌的草酸分泌量普遍最高。由于草酸($\text{HOOC}-\text{COOH}$)中的两个羧基的电子互相吸引,产生共轭作用,其酸度约是甲酸的 100 倍,乙酸的 1000 倍;乙酸也属于较强的有机酸,其电离常数为 1.8×10^{-5} (25℃),大于碳酸(4.3×10^{-7})100 倍,推测草酸在活化土壤无机磷的过程中可能起重要作用。

供试自生固氮菌菌株显著降低液体培养基中的 pH 值,至少降低了 1.76 个单位,即氢离子浓度增加约 58 倍。但是,接种自生固氮菌之后,液体培养基中的有机酸最高仅增加 7.19 倍(N 03),推测自生固氮菌分泌氢离子的数量可能远远超过所有有机酸离解产生的氢离子。有研究表明,豆科植物在低磷环境中能向周围土壤中分泌氢离子和有机酸,进而溶解土壤中的难溶性磷,改善植物的磷素营养^[22]。相关分析表明,培养液中的 pH 值与培养液中的无机磷和全磷呈显著或极显著负相关($r = -0.850^*$ 和 $r = -0.918^{**}$, $n = 6$),这说明培养液中 pH 值的降低是导致土壤无机磷向培养液中释放磷酸根的直接原因;并且培养基的 pH 值与土壤无机磷总量呈极显著正相关($r = 0.959^{**}$, $n = 6$),溶解钙镁磷酸盐的机理可能与自生固氮菌细胞的质子分泌有关。因为在酸性条件下,钙镁磷酸盐溶解度提高。这可能是部分豆科植物改善土壤磷素营养的原因之一。与此同时,铝磷、铁磷和闭蓄态磷的溶解可能与高碳有机酸的分泌密切相关。因为柠檬酸和草酸络合 Fe^{3+} 和 Al^{3+} 的能力极强,并且 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 分别和柠檬酸、草酸的 $\log K_{\text{稳}}$ 最低为 7.26,最高达到 25.00^[23]。其中, $[\text{Al}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]^{3-}$ 和 $[\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]^{3-}$ 的稳定常数分别为 2.0×10^{16} 和 3.9×10^{16} 。所以,草酸能络合铁铝磷酸盐和铁铝氧化物胶膜中的 Al^{3+} 、 Fe^{3+} ,导致铁铝磷酸盐和闭蓄态磷释放,提高生物有效性^[24]。考虑到试验中自生固氮菌的草酸分泌量占有有机酸分泌总量的比重大,推测草酸的分泌在活化土壤无机磷的过程中可能起着至关重要的作用。有学者研究表明,磷细菌在生长过程中分泌到介质中的草酸、柠檬酸和苹果酸是溶解铝磷和铁磷的主要原因^[25-26]。并且,有研究表明,直接向含有难溶性磷酸盐的红壤中加入草酸、苹果酸等有机酸,发现培养液中的可溶性磷含量显著增加^[27],这直接说明有机酸对难溶性磷酸盐有活化作用。试验中自生固氮菌与大多数磷细菌一样,都能分泌有机酸,产生相似溶磷机理。除此之外,自生固氮菌还能直接分泌氢离子,直接溶解钙镁磷酸盐。因此,自生固氮菌兼具分泌氢离子和多种有机酸的能力,以多种方式活化土壤不同形态的无机磷,促进周围植物

的生长。这一点也得到了证实,有学者曾将自生固氮菌接种到杨柴根际的土壤中,对其有明显的促生作用,同时提高了土壤有效磷的活性^[28]。

总之,自生固氮菌除固氮活性之外,还具有活化土壤无机磷的作用。因菌株不同,它们以不同的方式活化土壤中的铝磷、铁磷、闭蓄态磷、钙磷,导致自生固氮菌的溶磷机理出现了多样性。

References:

- [1] Liang J F, Yu H W, Ye G P, Jiang P K. Influence of organophosphate on growth and phosphorus-dissolving of phosphobacteria. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2007, 19(8): 89-90.
- [2] Kang Y J, Hu J, Shan J, He F, Piao Z, Yin S X. Solubilization capacity of insoluble phosphates and it's mechanism by two phosphate solubilizing fungi (PSF). *Microbiology*, 2006, 33(5): 22-27.
- [3] Zhang Y L, Lu X L, Yang C D. A preliminary study on the isolation and characterization of inorganic phosphate-solubilizing bacteria in soil of alpine grasslands in Eastern Qilian Mountains. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(4): 560-564.
- [4] Li J F, Zhang S Q, Shi S L, Huo P H. Ventilation conditions on phosphorus-dissolving Rhizobia. *Grassland and Turf*, 2010, 30(1): 28-32.
- [5] Xi L Q, Feng R Z. Research of plant phosphate-solubilizing microorganisms. *Jouranl of Tarim University*, 2006, 18(4): 57-61.
- [6] Sundara Rao W V B, Sinha M K. Phosphate dissolving microorganisms in the soil and rhizosphere. *India Journal of Agricultural Science*, 1963, 33(4): 272-278.
- [7] Jones D L, Oburger E. Solubilization of phosphorus by soil microorganisms. *Soil Biology*, 2011, 100(2): 169-198.
- [8] Guñazú L B, Andrés J A, Del Papa M F, Pistorio M, Rosas S B. Response of alfalfa (*Medicago sativa* L.) to single and mixed inoculation with phosphate-solubilizing bacteria and *Sinorhizobium meliloti*. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46(2): 185-190.
- [9] Adeleke R A, Cloete T E, Bertrand A, Khasa D P. Mobilisation of potassium and phosphorus from iron ore by ectomycorrhizal fungi. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2010, 26(10): 1901-1913.
- [10] Hu H Q, Tang C X, Rengel Z. Role of phenolics and organic acids in phosphorus mobilization in calcareous and acidic soils. *Journal of Plant Nutrition*, 2005, 28(8): 1427-1439.
- [11] Fankem H, Nwaga D, Deubel A, Dieng L, Merbach W, Etoa F X. Occurrence and functioning of phosphate solubilizing microorganisms from oil palm tree (*Elaeis guineensis*) rhizosphere in Cameroon. *African Journal of Biotechnology*, 2006, 5(24): 2450-2460.
- [12] Kumar V, Behl R K, Narula N. Establishment of phosphate-solubilizing strains of *Azotobacter chroococcum* in the rhizosphere and their effect on wheat cultivars under green house conditions. *Microbiological Research*, 2001, 156(1): 87-93.
- [13] Yang J H, Wang C L, Dai H L. *Soil Agro-Chemistry Analysis and Environmental Monitoring*. Beijing: China Land Press, 2008.
- [14] Bao S D. *Soil and Agro-Chemistry Analysis*. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [15] Grierson P F. Organic acids in the rhizosphere of *Banksia integrifolia* L. f.. *Plant and Soil*, 1992, 144(2): 259-265.
- [16] Hinsinger P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and Soil*, 2001, 237(2): 173-195.
- [17] Bian W Y, He Z L, Huang C Y. Increasing transformation and bioavailability of specifically sorbed P by P efficient microorganisms (PEM). *Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences*, 2000, 26(4): 461-464.
- [18] Asea P E A, Kucey R M N, Stewart J W B. Inorganic phosphate solubilization by two *Penicillium* species in solution culture and soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1988, 20(4): 459-464.
- [19] Wallander H. Uptake of P from apatite by *Pinus sylvestris* seedlings colonised by different ectomycorrhizal fungi. *Plant and Soil*, 2000, 218(1/2): 249-256.
- [20] Whitelaw M A, Harden T J, Helyar K R. Phosphate solubilisation in solution culture by the soil fungus *Penicillium radicum*. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(5): 655-665.
- [21] Hameeda B, Harish Kumar Reddy Y, Rupela O P, Kumar G N, Reddy G. Effect of carbon substrates on rock phosphate solubilization by bacteria from composts and macrofauna. *Current Microbiology*, 2006, 53(4): 298-302.
- [22] Shen J B, Yuan L X, Zhang J L, Li H G, Bai Z H, Chen X P, Zhang W F, Zhang F S. Phosphorus dynamics: from soil to plant. *Plant Physiology*, 2011, 156(3): 997-1005.
- [23] Li Y Y, Zeng Z J, Li X F, Yu Y X, Huang Q C. Mobilization of sparingly soluble phosphate by *Secale cereale* L. and its corresponded mechanisms. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2008, 28(4): 724-729.
- [24] Zhang A Q, He L Y, Zhao H E, Guo Z H, Cui X M. Effect of organic acids on inorganic phosphorus transformation in soils and its readily available phosphate. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8): 4061-4069.

- [25] Hinsinger P, Gobran G R, Gregory P J, Wenzel W W. Rhizosphere geometry and heterogeneity arising from root-mediated physical and chemical processes. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 293-303.
- [26] Scervino J M, Mesa M P, Mónica I D, Recchi M, Moreno N S, Godeas A. Soil fungal isolates produce different organic acid patterns involved in phosphate salts solubilization. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46(7): 755-763.
- [27] Gong S G, Wang X X, Zhang T L, Li Q M, Zhou J. Release of inorganic phosphorus from red soils induced by low molecular weight organic acids. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(4): 692-697.
- [28] Zhao Z Q. Isolation of Nitrogen Fixing Bacteria and Study on Effects of Inoculation with *Heysarum fruticosum* var *mongolicum* in Erdos [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2008.

参考文献:

- [1] 梁锦锋, 于红卫, 叶国平, 姜培坤. 有机磷化物对磷细菌生长和解磷的影响. *江西农业学报*, 2007, 19(8): 89-90.
- [2] 康贻军, 胡健, 单君, 何芳, 朴哲, 殷士学. 两株解磷真菌的解磷能力及其解磷机理的初步研究. *微生物学通报*, 2006, 33(5): 22-27.
- [3] 张宇龙, 卢小良, 杨成德. 东祁连山高寒草地土壤无机磷溶解菌分离及溶磷能力初探. *草地学报*, 2011, 19(4): 560-564.
- [4] 李剑峰, 张淑卿, 师尚礼, 霍平慧. 解磷根瘤菌液体培养基类型、浓度及透气条件的比较. *草原与草坪*, 2010, 30(1): 28-32.
- [5] 席琳乔, 冯瑞章. 植物根际解磷菌的研究进展. *塔里木大学学报*, 2006, 18(4): 57-61.
- [13] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] 边武英, 何振立, 黄昌勇. 高效解磷菌对矿物专性吸附磷的转化及生物有效性的影响. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2000, 26(4): 461-464.
- [23] 李耀燕, 曾志军, 黎晓峰, 王永雄, 黄秋婵. 黑麦对难溶性磷酸盐的吸收及活化机制研究. *西北植物学报*, 2008, 28(4): 724-729.
- [24] 章爱群, 贺立源, 赵会娥, 郭再华, 崔雪梅. 有机酸对土壤无机态磷转化和速效磷的影响. *生态学报*, 2009, 29(8): 4061-4069.
- [27] 龚松贵, 王兴祥, 张桃林, 李清曼, 周静. 低分子量有机酸对红壤无机磷活化的作用. *土壤学报*, 2010, 47(4): 692-697.
- [28] 赵志强. 鄂尔多斯几种沙生植物根际自身固氮菌的筛选及对杨柴接种效应研究 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2008.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 7 April, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research progress on chemical communication of development and host-finding of nematodes ZHANG Bin, HU Chunxiang, SHI Jin, et al (2003)
- Principles, indicators and sampling methods for species monitoring XU Haigen, DING Hui, WU Jun, et al (2013)

Autecology & Fundamentals

- Spatial distribution pattern of human-caused fires in Hulunbeir grassland ZHANG Zhengxiang, ZHANG Hongyan, LI Dongxue, et al (2023)
- Belowground biomass in Tibetan grasslands and its environmental control factors YANG Xiuqing, HUANG Mei, WANG Junbang, et al (2032)
- Analysis on variation characteristics of air temperature and ground temperature in Guilin from 1961 to 2010 CHEN Chao, ZHOU Guangsheng (2043)
- Winter bed-site selection by roe deer (*Capreolus capreolus*) in Huangnihe Nature Reserve ZHU Hongqiang, GE Zhiyong, LIU Geng, et al (2054)
- Leaf anatomical characteristics of the plants of grasslands in the Tibetan Plateau LI Quanfa, WANG Baojuan, AN Lihua, et al (2062)
- A research on summer vegetation characteristics & short-time responses to experimental warming of alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau XU Manhou, XUE Xian (2071)
- Cytological study on microsporogenesis of *Solanum lycopersicum* var. Micro-Tom under high temperature stress PENG Zhen, CHENG Lin, HE Yanjun, et al (2084)
- A new plant height growth process model of *Caragana* forest in semi-arid loess hilly region ZHAO Long, WANG Zhenfeng, GUO Zhongsheng, et al (2093)
- Germination inhibitory substances extracted from the seed of seven species of *Quercus* LI Qingmei, LIU Yan, LIU Guangquan, et al (2104)
- Effects of water stress and fungicide on the growth and drought resistance of *Flaveria bidentis* CHEN Dongqing, HUANGFU Chaohe, LIU Hongmei, et al (2113)
- Characters of soil seed bank in copper tailings and its adjacent habitat ... SHEN Zhangjun, OU Zulan, TIAN Shengni, et al (2121)
- Changes of soil chemical properties after different burning years in typical steppe of Yunwun Mountains LI Yuan, CHENG Jimin, WEI Lin, et al (2131)
- Effects of water and fertilizers on nitrate content in tomato fruits under alternate partial root-zone irrigation ZHOU Zhenjiang, NIU Xiaoli, LI Rui, et al (2139)
- Effect of land use on the characteristics of organic carbon and labile organic carbon in soil aggregates in Karst mountain areas LI Juan, LIAO Hongkai, LONG Jian, et al (2147)
- Mobilization of inorganic phosphorus from soils by five azotobacters ZHANG Liang, YANG Yuhong, LI Qian, et al (2157)
- Physiological-ecological responses of *Iris germanica* L. to Cd stress and its accumulation of Cd ZHANG Chengxiang, CHEN Weifeng (2165)
- The available forms and bioavailability of heavy metals in soil amended with sewage sludge TIE Mei, SONG Linlin, HUI Xiujuan, et al (2173)
- LAI-based photosynthetic light response model and its application in a rainfed maize ecosystem SUN Jingsong, ZHOU Guangsheng (2182)
- The dominant species of predatory natural enemies of three kinds of planthoppers and impact of pesticides on natural enemies in paddy field LIN Yuan, ZHOU Xiazhi, BI Shoudong, et al (2189)

Population, Community and Ecosystem

- Spatial and temporal variation of picophytoplankton in the Pearl River Estuary ZHANG Xia, HUANG Xiaoping, SHI Zhen, et al (2200)

Analysis of the relationship between species diversity and hydrologic factors during an interval of intermittent water delivery at the Lower Reaches of Tarim River, China	CHEN Yongjin, LIU Jiazhen, CHEN Yaning, et al (2212)
Fish species composition and community pattern in the continental shelf of northwestern South China Sea	WANG Xuehui, LIN Zhaojin, DU Feiyan, et al (2225)
Distribution and succession of plant communities in Lake Bita coastal swamp on the plateau region, northwestern Yunnan	HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang (2236)
Analysis on community structure and quantitative characteristics of <i>Nitraria tangutorum</i> nebkhas at different succession stage in lower reaches of Shiyang River	JIN Hujia, MA Quanlin, HE Mingzhu, et al (2248)
Resource and Industrial Ecology	
Effects of subsoiling and supplemental irrigation on dry matter production and water use efficiency in wheat	ZHENG Chengyan, YU Zhenwen, ZHANG Yongli, et al (2260)
Effects of two years' incorporation of leguminous green manure on soil properties of a wheat field in dryland conditions	ZHANG Dabin, YAO Pengwei, LI Jing, et al (2272)
Effects of planting with ridge and furrow mulching on maize growth, yield and water use efficiency in dryland farming	LI Rong, HOU Xianqing, JIA Zhikuan, et al (2282)
Urban, Rural and Social Ecology	
Effects of riparian buffers of North Mort of Beijing on air temperature and relative humidity	WU Fangfang, ZHANG Na, CHEN Xiaoyan (2292)
Characteristics of spatial and temporal variations of global solar radiation in Xi'an and relevant response in urban development	ZHANG Hongli, ZHANG Naweirui, LIU Minru, et al (2304)
Research Notes	
A analysis of macrofungal flora diversity in Langyashan Nature Reserve, Anhui Province, China	CHAI Xinyi, XU Xuefeng, WANG Meiyang, et al (2314)

《生态学报》2013 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,探索自然奥秘,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,300 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 陈利顶

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 33 卷 第 7 期 (2013 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 7 (April, 2013)

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