

中国百种杰出学术期刊  
中国精品科技期刊  
中国科协优秀期刊  
中国科学院优秀科技期刊  
新中国 60 年有影响力的期刊  
国家期刊奖

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 31 卷 第 1 期  
Vol.31 No.1  
**2011**



中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 1 期      2011 年 1 月      (半月刊)

## 目 次

青藏高原东缘林线杜鹃-岷江冷杉原始林的空间格局 .....	缪 宁,刘世荣,史作民,等 ( 1 )
季风常绿阔叶林不同恢复阶段藤本植物的物种多样性比较 .....	李帅锋,苏建荣,刘万德,等 ( 10 )
越冬和复苏时期太湖水体蓝藻群落结构的时空变化 .....	顾婷婷,孔繁翔,谭 啸,等 ( 21 )
海南新村湾海草床主要鱼类及大型无脊椎动物的食源 .....	樊敏玲,黄小平,张大文,等 ( 31 )
广西涠洲岛造礁珊瑚种群结构的空间分布 .....	梁 文,张春华,叶祖超,等 ( 39 )
宽窄行栽植模式下三倍体毛白杨根系分布特征及其与根系吸水的关系 .....	席本野,王 烨,贾黎明,等 ( 47 )
干旱河谷-山地森林交错带土壤水分与养分特征 .....	刘 彬,罗承德,张 健,等 ( 58 )
信号分子水杨酸减缓干旱胁迫对紫御谷光合和膜脂过氧化的副效应 .....	易小林,杨丙贤,宗学风,等 ( 67 )
UV-B 辐射对南方红豆杉生活史型和紫杉烷类含量的影响 .....	于景华,李德文,庞海河,等 ( 75 )
模拟氮沉降对石栎和苦槠幼苗土壤呼吸的影响 .....	李 凯,江 洪,由美娜,等 ( 82 )
环渤海湾地区连作苹果园土壤中酚酸类物质变化 .....	孙海兵,毛志泉,朱树华 ( 90 )
不同施肥方法对马来沉香和土沉香苗期根系生长的影响 .....	王 冉,李吉跃,张方秋,等 ( 98 )
秋华柳和枫杨幼苗对镉的积累和耐受性 .....	贾中民,魏 虹,孙晓灿,等 (107)
祁连山北坡退化林地植被群落的自然恢复过程及土壤特征变化 .....	赵成章,石福习,董小刚,等 (115)
中国北方农牧交错带 C3 草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 与温度的关系及其对水分利用效率的指示 .....	刘贤赵,王国安,李嘉竹,等 (123)
不同退耕模式细根(草根)分解过程中 C 动态及土壤活性有机碳的变化 .....	荣 丽,李守剑,李贤伟,等 (137)
黑龙江省完达山东部林区东北虎猎物生物量 .....	周绍春,张明海,孙海义 (145)
生态保护项目对大熊猫栖息地的影响 .....	张玉波,王梦君,李俊清 (154)
石灰和 EM 处理条件下土壤动物群落在落叶分解中的变化 .....	高梅香,张雪萍 (164)
基于 EPG 的麦长管蚜、麦二叉蚜和禾谷缢管蚜取食行为比较 .....	苗 进,武予清,郁振兴,等 (175)
对映-贝壳杉烷型二萜类化合物对土壤纤毛虫群落的毒性效应 .....	宁应之,杜海峰,王红军 (183)
红脂大小蠹种群空间格局地统计学分析及抽样技术 .....	潘 杰,王 涛,宗世祥,等 (195)
山西不同生态型大豆种质资源蛋白亚基的变异 .....	王燕平,李贵全,郭数进,等 (203)
施肥和覆膜垄沟种植对旱地小麦产量及水氮利用的影响 .....	李廷亮,谢英荷,任苗苗,等 (212)
近 40a 甘肃省气候生产潜力时空变化特征 .....	罗永忠,成自勇,郭小芹 (221)
基于 GIS 的农村住区生态重要性空间评价及其分区管制——以兴国县长冈乡为例 .....	谢花林,李秀彬 (230)
农户收入差异对生活用能及生态环境的影响——以江汉平原为例 .....	杨 振 (239)
河北省耕地生态经济系统能值指标空间分布差异及其动因 .....	王 千,金晓斌,周寅康,等 (247)
土地利用对石漠化地区土壤团聚体有机碳分布及保护的影响 .....	罗友进,魏朝富,李 渝,等 (257)
<b>专论与综述</b>	
景观格局-土壤侵蚀研究中景观指数的意义解释及局限性 .....	刘 宇,吕一河,傅伯杰 (267)
美国煤矿废弃地的生态修复 .....	张成梁,B. Larry Li (276)
农田土壤食物网管理的原理与方法 .....	陈云峰,胡 诚,李双来,等 (286)
<b>学术信息与动态</b>	
旱地、荒漠和荒漠化:探寻恢复之路——第三届国际荒漠化会议述评 .....	吕一河,傅伯杰 (293)

# 对映-贝壳杉烷型二萜类化合物对土壤纤毛虫群落的毒性效应

宁应之<sup>1,\*</sup>, 杜海峰<sup>1</sup>, 邹涛<sup>2</sup>, 王红军<sup>1</sup>

(1. 西北师范大学生命科学学院, 兰州 730070; 2. 黄石理工学院化学与材料工程学院, 黄石 435003)

**摘要:**选取小陇山自然保护区麻沿林区的土壤纤毛虫并通过盆栽实验从纤毛虫的群落结构、丰度和食性三方面研究了对映-贝壳杉烷型二萜类化合物对纤毛虫群落的毒性作用。纤毛虫群落结构采用“非浸没式培养法”进行分析,物种鉴定采用活体观察和蛋白银染色法,同时采用直接计数法分析土壤纤毛虫的丰度。共鉴定到纤毛虫 88 种,隶属于 3 纲 11 目 29 科 42 属,其中对照组 75 种;分析表明二萜化合物可导致土壤纤毛虫群落结构的衰退演替;双因子方差分析显示纤毛虫物种数在二萜化合物各浓度处理组间呈现极显著差异 ( $F_{5,9} = 137.776, P < 0.01$ ),并在不同时间处理组间呈显著差异 ( $F_{5,9} = 2.607, P < 0.05$ );线性回归分析显示土壤纤毛虫总物种数随着二萜类化合物浓度的升高有下降趋势,具有良好的直线线性关系 ( $R^2 = 0.9521$ )。当二萜类化合物浓度超过 32.5 mg/kg 时土壤纤毛虫优势种由膨胀肾形虫、长篮环虫、大口薄咽虫和长圆膜袋虫演替为膨胀肾形虫、长篮环虫、苔藓膜袋虫、水藓薄咽虫和大弹跳虫,且 C/P 系数从小于 1 变为大于 1,当施药浓度超过 62.5 mg/kg 时,优势种演替为大弹跳虫、小尖毛虫、有肋薄咽虫和一种前口虫。同时,分析还显示肾形目对二萜化合物有较高的耐受能力,下毛目、前口目和篮口目对二萜类化合物有一定的耐受能力。对纤毛虫食性研究发现二萜类化合物对纤毛虫的影响还与纤毛虫的食性有关,尤其对肉食性纤毛虫危害最大。比较分析显示,在相同暴露时间,不同施药浓度下土壤纤毛虫丰度与对照组相比均有极明显的降低,而同一施药浓度,随着暴露时间逐渐延长,纤毛虫的数量逐渐回升,但即使土壤中二萜类化合物残留浓度很低,也对纤毛虫群落有显著的抑制作用。非参数多个独立样本检验分析结果表明各浓度组间纤毛虫的丰度存在极显著差异。结果表明,不同浓度的对映-贝壳杉烷型二萜类化合物对土壤纤毛虫群落结构在种类组成和丰度方面均成具有强烈的扰动作用。

**关键词:**对映-贝壳杉烷型二萜类化合物;土壤纤毛虫群落;衰退演替;毒性效应;小陇山国家级自然保护区

## Toxic effects of *ent*-kaurane diterpenoids on soil ciliate communities

NING Yingzhi<sup>1,\*</sup>, DU Haifeng<sup>1</sup>, ZOU Tao<sup>2</sup>, WANG Hongjun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Life Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

<sup>2</sup> School of Chemical and Materials Engineering, Huangshi Institute of Technology, Huangshi 435003, China

**Abstract:** Soil ciliates are an important component of microfauna and play a crucial role in the functioning of microbial food webs by mediating the flux of both substances and energy in many soil ecosystems. As they respond to the changes of environmental conditions more quickly than other organisms, they have increasingly been used as a robust bio-indicator in bioassessment of soil environments. In order to obtain a better understanding on the toxicity of *ent*-kaurane diterpenoids to the soil ciliates, the effects of this toxin on the community structure, abundance and feeding habit of soil ciliates were detected. The bioassay of *ent*-kaurane diterpenoids on soil ciliate communities was conducted using a pot simulation test in the Mayan Forest Region of the National Nature Reserve of Xiaolongshan. The *ent*-kaurane diterpenoids were mixed with the soil at arrange of concentrations: 0, 2.5, 12.5, 22.5, 32.5, 42.5, 52.5, 62.5, 72.5 and 82.5 mg/kg dry soil. Three replicates were carried out for each treatment. The pots were treated in a greenhouse for 60 days, during which the ciliate community structures were evaluated using the non-flooded Petri dish method and the abundance of ciliates were estimated using direct counting method. Ciliate species were identified using living observation and silver impregnation. The residue

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30870273; 30470208)

收稿日期:2010-05-28; 修订日期:2010-12-11

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ningyz@nwnu.edu.cn

concentrations of *ent*-kaurane diterpenoids and the abundance of ciliates were measured at the time interval of 1, 3, 8, 15, 30 and 60 days. A total of 88 species were identified, belonging to 42 genera, 29 families, 11 orders and 3 classes, of which 75 taxa were found in the samples of control. Analyses using two-factor ANOVA showed that the effects of *ent*-kaurane diterpenoids on the numbers of ciliate species represented significant differences among the treatments with a arrange of toxin concentrations ( $F_{5,9} = 137.776, P < 0.01$ ) and that the samples within different exposure time ( $F_{5,9} = 2.607, P < 0.05$ ). The regression analyses demonstrated that species number of ciliates decreased with increasing concentrations of diterpenoids. This finding suggested that the toxin diterpenoids may resulted in a degraded succession in community structure of soil ciliates. Both dominant species and C/P quotient were changed at the concentrations of *ent*-kaurane diterpenoids more than 32.5mg/kg, i. e., the ciliate communities were dominated by *Colpoda inflata*, *Cyrtolophosis elongata*, *Leptopharynx eurystoma* and *Cyclidium oblongum*, followed by *Colpoda inflata*, *Cyrtolophosis elongata*, *Cyclidium muscicola*, *Leptopharynx sphagnetorum* and *Halteria grandinella*, and the C/P quotient were changed into the values more than one that indicates the community structures were strongly disturbed. However, *Halteria grandinella*, *Oxytricha minor*, *Leptopharynx costatus* and *Frontonia* sp. dominated the communities at the concentrations of *ent*-kaurane diterpenoids more than 62.5mg/kg. The analyses of the ciliate feeding habits suggest that the diterpenoids represented a significant inhibition on carnivores. Furthermore, it was also shown that Colpodida presented high tolerance to *ent*-kaurane diterpenoids, compared to Hypotrichida, Prostomatida and Nassulida. Otherwise, the abundances of soil ciliates definitely decreased at different concentrations of diterpenoids within the same exposure time compared with the control, while the cell number of ciliates represented an increased trend with extending exposure time at same toxin concentration. The growth of ciliates can be inhibited even at considerably low residual concentrations of diterpenoids. *K*-independent sample of nonparametric tests indicated that there were significant differences in the abundance of ciliates among the treatments at different toxin concentrations. These findings suggest that the community structures of soil ciliates were strongly disturbed at different concentrations of diterpenoids in terms of both species composition and abundance.

**Key Words:** *ent*-kaurane diterpenoids; soil ciliate communities; degraded succession; toxic effects; National Nature Reserve of Xiaolongshan

二萜类化合物(Diterpenoids)多以树脂、内酯或苷等形式存在于自然界,以其结构多样,并具有较强的抗癌、抗炎活性越来越受到研究人员的重视。对二萜类化合物成分的研究较多地集中在唇形科香茶菜属植物提取物中<sup>[1]</sup>。由苏镜娉<sup>[2]</sup>研究报道的溪黄草甲素(Rabdoserrin A)、溪黄草丁素(Kamebakaurene)在体外对Hela细胞具有很强的杀伤作用。在药用功能方面,国内主要是对二萜类化合物的生物活性、抗肿瘤作用机理及其他抗病机理的研究<sup>[3-7]</sup>。不过,这些研究主要在离体细胞上进行的,而从个体以及群落水平上研究鲜有报道。目前,国内外医学、植物化学工作者正致力于植物中提取新的二萜化合物,通过各种化学反应对二萜成分进行部分结构改造,寻找高效低毒的新药<sup>[8]</sup>。

纤毛虫是土壤原生动物的主要类群,已发现的约有800种<sup>[9]</sup>。纤毛虫是土壤微生物链的必要组成部分,它们以土壤中的细菌、鞭毛虫、变形虫和其它纤毛虫为食物,还有一些特殊种类取食土壤中的真菌,与土壤生态系统的物质循环和初级生产等重要过程有着密切联系<sup>[10]</sup>。某些土壤纤毛虫选择性地摄食细菌与真菌,并分泌抑制细菌与真菌生长的次生产物。因而,在土壤细菌与真菌引起的植物疾病的生物防治方面存在潜能。纤毛虫对环境条件变化高度敏感,研究其群落结构、数量及多样性的动态变化,可评价、监测生物及非生物环境污染<sup>[11]</sup>。Wiger和Petz等研究发现农药林丹(六氯化苯)对土壤纤毛虫有着急性致毒效应,即使很低的浓度也会导致纤毛虫形状改变,并能明显抑制DNA、RNA和蛋白质的合成,且纤毛虫的数量和种群结构长期仍难以恢复<sup>[12-13]</sup>。徐润林等<sup>[14]</sup>对李坑垃圾填埋场垃圾渗滤液淋灌的土壤中的原生动物群落进行研究发现即使是较低浓度的垃圾渗滤液,也对土壤原生动物群落造成了较大的伤害。陈素芳等<sup>[15]</sup>对薇甘菊施加不同浓度

除莠剂森草净前后两个月内土壤中原生动物群落的种类组成及数量动态变化进行了研究,发现除莠剂森草净对土壤纤毛虫丰度有抑制作用。郭非凡等<sup>[16]</sup>对添加不同浓度梯度的 DDT、林丹(Lindane)对土壤原生动物丰度的破坏性进行了研究,发现受典型 POPs 物质污染的土壤,即使 POPs 含量很低,也对土壤纤毛虫的抑制作用非常显著。土壤纤毛虫作为环境指示生物的研究才刚刚起步,随着研究的深入土壤纤毛虫在环境监测中必将发挥重要作用。

香茶菜属植物作为多年生落叶植物,每年大量的二萜化合物都会随着植株枯萎被释放到土壤中,如此丰富且种类繁多的二萜次生代谢产物必将在其自然生境中发挥着重要的生态作用(如化感作用),目前的相关报道较少<sup>[7]</sup>。二萜类化合物在土壤生态系统中的对土壤纤毛虫群落影响的研究未见报道。本研究结果将为我国土壤纤毛虫生物多样性和土壤纤毛虫实验生态学研究提供基础资料,为二萜类化合物对土壤生态环境的影响方面的研究和受污生态环境的修复方面研究提供基础资料。同时,也为二萜类化合物药物应用于临床提供基础资料和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器和试剂

LRH-250-G 光照培养箱;OLYMPUS BH-2 型生物显微镜(Japan);RE-52AAA 型旋转蒸发器(上海嘉鹏科技有限公司);Fabr-Nr 型电子分析天平;Agilent Chemstation for Uv-visible Spectroscopy(Japan)。

二萜类化合物粗提物(主要成分 Wangzaozin A,一种对映-贝壳杉烷型二萜类化合物)提取方法参见王瀚等<sup>[17]</sup>,Wangzaozin A 标准品由西北师范大学细胞实验室提供;无水乙醇,95%乙醇,二甲基亚砜等均为国产分析纯;实验用水(18MΩ·cm)由 Millipore Milli-Q 超纯水系统制备。

### 1.2 采样与样品预处理

采样时间为 2006 年 10 月 3 日—4 日。采样时测量土壤温度,并记录土壤类型。土样带回实验室后,先测定土壤湿度、pH 和土壤含水率,测定方法见<sup>[18]</sup>。然后倒入白瓷盘中,自然风干,此过程需防止外界空气中的纤毛虫包囊进入土样中。

### 1.3 定性和定量研究

定性研究采用“非淹没培养皿法(non-flooded Petri dish method)”<sup>[19]</sup>。即每份土样称取 10—50 g 于直径为 10—15 cm 培养皿中,加蒸馏水,使土壤充分湿润但不淹没,于光照培养箱中在(25±1)℃左右的温度下培养。每份土样重复培养若干次,直到未出现新见物种为止。培养后第 4 天开始镜检鉴定物种,鉴定技术包括活体观察和固定染色,固定染色技术参考 Wilber<sup>[20]</sup>的方法,鉴定资料参见文献<sup>[21-28]</sup>。定量研究采用直接计数法,即取 0.4 g 土壤,加土壤浸出液 2—3 mL 充分摇匀并避免土壤颗粒粘附于容器壁上,直接取土壤悬浮液在显微镜下计数,直到将全部悬浮液检查完为止<sup>[18]</sup>。

### 1.4 优势类群和优势种的划分及 C/P 系数计算

对鉴定到的各级分类单元进行统计,将物种数最多和次多的目定义为优势类群和次优势类群,将单种的目定义为偶见类群。对培养中各物种的出现频次进行统计,将出现频次最高的物种定义为优势种。肾形目纤毛虫(*r*-selected species)种类数(*C*)与包括下毛类、寡毛类、异毛类在内的多膜类纤毛虫(*k*-selected species)种类数(*P*)的比率即为 C/P 系数(C/P quotient),它可以在一定程度上衡量土壤纤毛虫所在生境环境的状况,在普通的生境中 C/P 系数小于或等于 1,而在不可预测的极端生境中 C/P 系数大于 1<sup>[29-30]</sup>。

### 1.5 土样中二萜类化合物的提取

分别于第 1、3、8、15、30 和 60 天称取添加不同浓度二萜类化合物后的土壤 300 g,分别置于盛有 250 mL 无水乙醇的广口瓶中,密封浸泡一个星期,每天充分搅拌 2 次。然后分别对 6 种浓缩液进行过滤,在 50℃下对总提取液减压旋转蒸发浓缩至 10 mL,挥干溶剂,得褐色浸膏,最后均以无水乙醇溶解定容至 10 mL,密封冷藏待测<sup>[31]</sup>。

### 1.6 标准品溶液的制备与标准曲线的绘制

精密称取 Wangzaozin A(60℃下减压干燥 6 h)标准品 5.05 mg,用 95%乙醇溶解,定容至 50 mL 容量瓶

中,即得对照品溶液;分别量取 0.1、0.5、1、2、3、4、5 mL 置于 10 mL 容量瓶用 95% 乙醇定容至刻度,获浓度分别为 1.01、5.05、10.10、20.20、30.30、40.40 和 50.50 mg/L 的 Wangzaozin A 标准液。测定波长的选择:取浓度为 30.30 mg/L 标准品溶液,以 95% 乙醇为空白溶媒,在 200—700 nm 范围内扫描,237 nm 处有最高吸收峰,测定其吸光度  $A$ ,并确定测试波长为 237 nm。取系列浓度标准品溶液,以 95% 乙醇为空白溶媒,在 237 nm 处测定其吸光度  $A$ 。标准曲线如图 1 所示。然后以浓度  $C$ (mg/L) 为自变量,以吸光度  $A$  为变量做直线回归分析,可看出浓度在 1.01—50.50 mg/L 范围内吸光度和浓度呈良好线性关系( $R^2 = 0.998$ )。

### 1.7 样品含量的测定

取准备好的 6 种提取液经膜孔直径为 0.45  $\mu\text{m}$  的微孔膜过滤,分别精密量取 1 mL 用 95% 乙醇定容至 10 mL,以同样方法在 237 nm 处测定其吸光度  $A$ ,按回归方程计算提取物总二萜化合物含量。

### 1.8 盆栽模拟试验

试验所用土壤取自小陇山国家级自然保护区麻沿林区。花盆用直径为 22 cm,高为 20 cm 的塑料盆,每盆装土 5.0 kg。试验所用的土壤经过 9 目空筛,摊于干净的塑料布上,二萜类化合物经微量二甲基亚砜助溶,加蒸馏水稀释后喷洒到土壤中,拌匀,待二甲基亚砜充分挥发后,装盆。分别设 2.5、12.5、22.5、32.5、42.5、52.5、62.5、72.5、82.5 mg/kg 共 9 个浓度梯度,同时设空白作为对照,每个处理设 3 个重复。分别于第 1、3、8、15、30 天和第 60 天取土样进行纤毛虫观察和二萜类化合物残留量的测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 毒性试验

图 2 显示的是土样中二萜类化合物浓度随时间的变化。可见,土壤中二萜类化合物浓度随暴露时间的延长而显著降低。在前 3 d 二萜类化合物在土壤中降解速度非常快,从第 3 天之后浓度变化变慢,浓度变化趋势趋于平缓。当暴露时间达到 60 d 时,试验组测得的最高浓度仅为初始浓度的 2.15%。

### 2.2 二萜化合物对土壤纤毛虫群落的影响

#### 2.2.1 二萜化合物对土壤纤毛虫物种的影响

试验土样中共鉴定到纤毛虫 88 种,隶属于 3 纲、11 目、29 科、42 属。其中对照组 75 种,各试验组共观察到纤毛虫物种数依处理浓度由低到高依次为 70、56、58、52、49、42、37、34 和 28 种。当施药浓度超过 62.5 mg/kg 时,纤毛虫物种数已不足对照组的一半,施药浓度为 82.5 mg/kg 时,纤毛虫物种数仅为对照组的 37.33%,表明二萜类化合物使纤毛虫物种数减少,群落结构简单化。不同浓度二萜类化合物土样中纤毛虫物种及其分布见表 1,结果显示不同种类的纤毛虫对二萜类化合物的敏感性有所不同,一些敏感种类如锐利楯纤虫 (*Aspidisca lynceus*)、近亲殖口虫 (*Gonostomum affine*)、矛形圆纤虫 (*Strongylidium lanceolatum*)、绿全列虫 (*Holosticha viridis*) 等在 2.5 mg/kg 很低浓度的中即可消失;而一些耐污种类,如苔藓织毛虫 (*Histiculus*

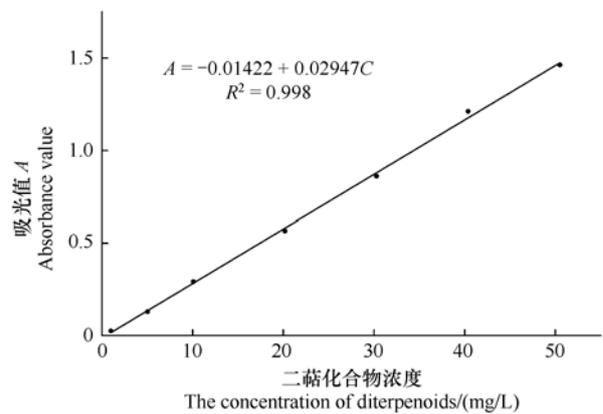


图 1 二萜类化合物标准曲线

Fig. 1 Standard curve of diterpenoids

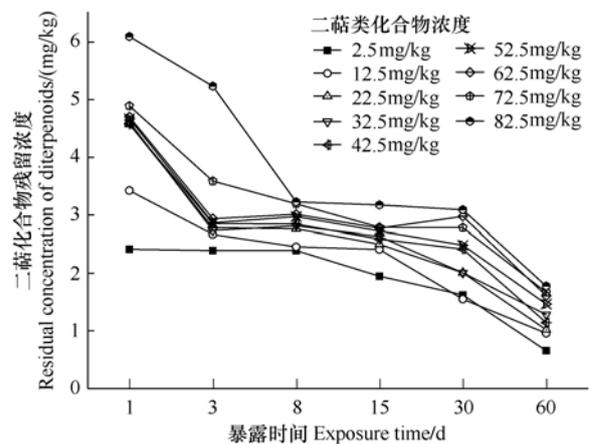


图 2 不同处理土样中二萜类化合物的残留量

Fig. 2 The residues of Diterpenoids in the soil sample with different treatment

muscorum)、小尖毛虫(*Oxytricha minor*)、一种前口虫(*Frontonia* sp.)、大弹跳虫(*Halteria grandinella*)、苔藓膜袋虫(*Cyclidium muscicola*)、齿脊肾形虫(*Colpoda steini*)在 82.5 mg/kg 高浓度下,仍然存活。

表 1 不同浓度二萜类化合物土样中纤毛虫物种及其分布

Table 1 Species and distribution of soil ciliate in soil samples with different Diterpenoids

物种 Species	二萜类化合物浓度 Concentration of Diterpenoids/(mg/kg)									
	0	2.5	12.5	22.5	32.5	42.5	52.5	62.5	72.5	82.5
腔裸口虫 <i>Holophrya atra</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
筒裸口虫 <i>Holophrya simplex</i>	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
胃形斜口虫 <i>Enchelys gasterosteus</i>	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0
易变斜口虫 <i>Enchelys mutans</i>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
斜齿虫属一种 <i>Enchelyodon</i> sp.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
智利管叶虫 <i>Trachelophyllum chilense</i>	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0
卑怯管叶虫 <i>Trachelophyllum pusillum</i>	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0
非洲管叶虫 <i>Trachelophyllum africanum</i>	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0
管形虫属 1 种 <i>Phialina</i> sp.	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
琴刀口虫 <i>Spathidium cithara</i>	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0
棍刀口虫 <i>Spathidium claviforme</i>	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0
艾塔斯刀口 <i>Spathidium etoschense</i>	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0
苔藓刀口虫 <i>Spathidium muscicola</i>	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1
浮雕刀口虫 <i>Spathidium scalpriforme</i>	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0
刀刀口虫 <i>Spathidium spathula</i>	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0
刀口虫属一种 <i>Spathidium</i> sp.	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
三列纳米比亚拱虫形刀口 <i>Arcuospathidium namibiense tristicha</i>	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0
美洲长颈虫 <i>Dileptus americanus</i>	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0
肋裂口虫 <i>Amphileptus pleurosigma</i>	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
僧帽肾形虫 <i>Colpoda cucullus</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
土壤肾形虫 <i>Colpoda edaphoni</i>	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
迅捷肾形虫 <i>Colpoda fastigata</i>	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0
背沟肾形虫 <i>Colpoda henneguyi</i>	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0
膨胀肾形虫 <i>Colpoda inflata</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
不规则肾形虫 <i>Colpoda irregularis</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
莫氏肾形虫 <i>Colpoda maupasi</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
前突肾形虫 <i>Colpoda penardi</i>	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
肾状肾形虫 <i>Colpoda reniformis</i>	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1
齿脊肾形虫 <i>Colpoda steini</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
贪食阔庭虫 <i>Bresslaueria vorax</i>	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1
吻吴氏虫 <i>Woodruffia rostrata</i>	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0
沫项匙口虫 <i>Platyophrya spumacola</i>	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0
贪食匙口虫 <i>Platyophrya vorax</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
尖锐密粒虫 <i>Grossglockneria acuta</i>	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0
袋篮环虫 <i>Cyrtolophosis bursaria</i>	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0
长篮环虫 <i>Cyrtolophosis elongata</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
大篮环虫 <i>Cyrtolophosis major</i>	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0

续表

物种 Species	二萜类化合物浓度 Concentration of Diterpenoids/(mg/kg)									
	0	2.5	12.5	22.5	32.5	42.5	52.5	62.5	72.5	82.5
粘液篮环虫 <i>Cyrtolophosis mucicola</i>	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0
绣花篮口虫 <i>Nassula picta</i>	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1
篮口虫属一种 <i>Nassula</i> sp.	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
活泼拟小胸虫 <i>pseudomicrothorax agilis</i>	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0
旋转单镰虫 <i>Drepanomonas revoluta</i>	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
有肋薄咽虫 <i>Leptopharynx costatus</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
大口薄咽虫 <i>Leptopharynx eurystoma</i>	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
水藓薄咽虫 <i>Leptopharynx sphagnetorum</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
巴维利亚斜管虫 <i>Chilodonella bavariensis</i>	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0
帽斜管虫 <i>Chilodonella capucina</i>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
钩刺斜管虫 <i>Chilodonella uncinata</i>	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1
闪烁目虫 <i>Glaucoma scintillans</i>	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
前口虫属一种 <i>Frontonia</i> sp.	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1
珍珠映毛虫 <i>Cinetochilum margaritaceum</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
苔藓嗜腐虫 <i>Saprophilus muscorum</i>	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
蝶形康纤虫 <i>Cohnilembus vexillarius</i>	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
银灰膜袋虫 <i>Cyclidium glaucoma</i>	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0
颗粒膜袋虫 <i>Cyclidium granulosum</i>	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0
苔藓膜袋虫 <i>Cyclidium muscicola</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
长圆膜袋虫 <i>Cyclidium oblongum</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
善变膜袋虫 <i>Cyclidium versatile</i>	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
条纹钟虫 <i>Vorticella striata</i>	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1
透明赭虫 <i>Blepharisma hyalinum</i>	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
单核赭虫 <i>Blepharisma steini</i>	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0
赭虫属一种 <i>Blepharisma</i> sp.	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0
细长扭头虫 <i>Metopus haesi</i>	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0
大弹跳虫 <i>Halteria grandinella</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
苔藓圆纤虫 <i>Strongylidium muscorum</i>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
矛形圆纤虫 <i>Strongylidium lanceolatum</i>	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
苔藓全列虫 <i>Holosticha muscorum</i>	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
乙状全列虫 <i>Holosticha sigmoidea</i>	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
绿全列虫 <i>Holosticha viridis</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
尾瘦尾虫 <i>Uroleptus caudatus</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
差异瘦尾虫 <i>Uroleptus dispar</i>	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0
蛇形瘦尾虫 <i>Uroleptus halseyi</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
苔藓瘦尾虫 <i>Uroleptus muscorum</i>	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0
瘦尾虫属一种 <i>Uroleptus</i> sp.	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
近亲殖口虫 <i>Gonostomum affine</i>	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
伪尖毛虫 <i>Oxytricha fallax</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
小矛尖毛虫 <i>Oxytricha lanceolata</i>	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0
长颗粒尖毛虫 <i>Oxytricha longigranulosa</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
小尖毛虫 <i>Oxytricha minor</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
腐生尖毛虫 <i>Oxytricha saprobia</i>	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0
似尖毛虫 <i>Oxytricha similis</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
膜状急纤虫 <i>Tachysoma pellionella</i>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

续表

物种 Species	二萜类化合物浓度 Concentration of Diterpenoids/(mg/kg)									
	0	2.5	12.5	22.5	32.5	42.5	52.5	62.5	72.5	82.5
苔藓织毛虫 <i>Histiculus muscorum</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
似织毛虫 <i>Histiculus similis</i>	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
尖锐片尾虫 <i>Urosoma acuminata</i>	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
活泼状似片尾虫 <i>Urosomoida agiliformis</i>	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0
锐利楯纤虫 <i>Aspidisca lynceus</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
粘游仆虫 <i>Euplotes muscicola</i>	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1
总计	75	70	56	58	52	49	42	37	34	28
C/P quotient	0.71	0.91	0.72	0.71	0.81	1.15	1.08	1.10	1.43	1.13

\* 1 表示该浓度下存在该种,0 表示该浓度下不存在该种

图 3 中显示的是不同浓度二萜化合物下土壤纤毛虫物种数随时间的变化,双因子方差分析显示纤毛虫物种数浓度组间差异极显著 ( $F_{5,9} = 137.776, P < 0.01$ ), 时间组间显著差异 ( $F_{5,9} = 2.607, P < 0.05$ )。以土样中共观察到土壤纤毛虫总物种数为自变量,以二萜类化合物浓度为变量做线性回归分析,结果见图 3 中右上图,可见,土壤纤毛虫总物种数随着二萜类化合物浓度的升高有下降趋势,具有良好的直线线性关系 ( $R^2 = 0.9521$ )。

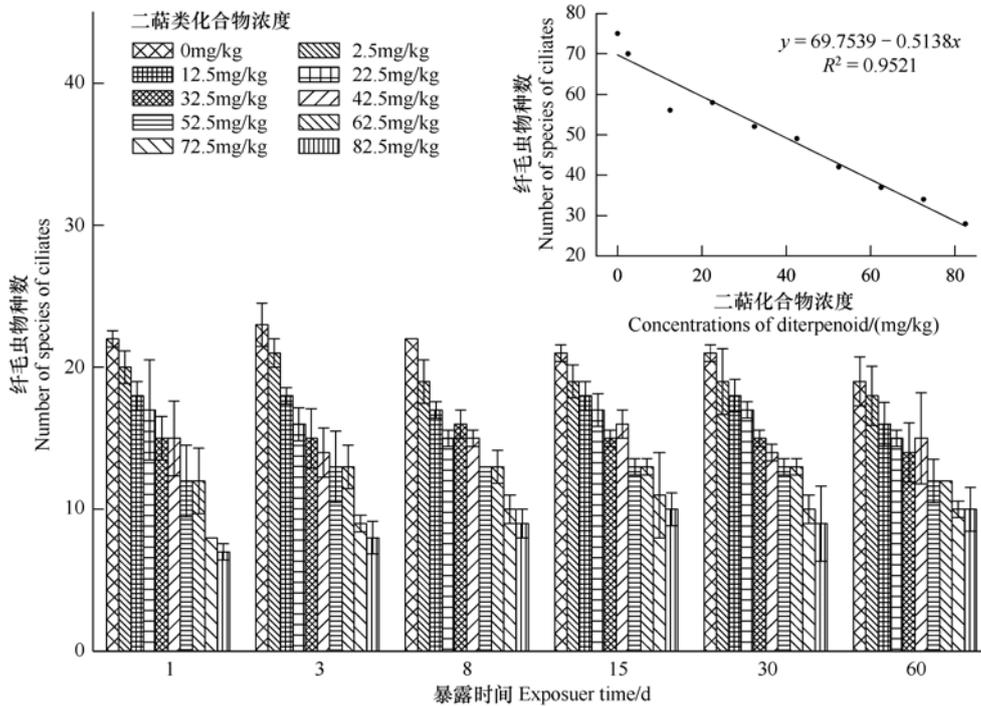


图 3 不同浓度二萜类化合物土样中纤毛虫物种数动态变化

Fig. 3 Dynamics changes of number of ciliates species in soil sample with different concentrations of Diterpenoids

### 2.2.2 土壤纤毛虫优势种的变化

对照组中纤毛虫优势种为膨胀肾形虫 (*Colpoda inflata*)、长篮环虫 (*Cyrtolophosis elongata*)、大口薄咽虫 (*Leptopharynx eurystoma*) 和长圆膜袋虫 (*Cyclidium oblongum*), 施药浓度为 2.5、12.5、22.5 mg/kg 等较低浓度时优势种没有变化。当施药浓度分别增至 32.5、42.5、52.5 mg/kg 时,长篮环虫、大口薄咽虫和长圆膜袋虫的数量明显减少,而个体体积相对较小的水藓薄咽虫 (*Leptopharynx sphagnetorum*) 和苔藓膜袋虫 (*Cyclidium muscicola*) 数量增多,优势种演替为膨胀肾形虫、长篮环虫、大弹跳虫 (*Halteria grandinella*)、水藓薄咽虫和苔藓

膜袋虫。再次增加施药浓度分别至 62.5、72.5、82.5 mg/kg 时,优势种又演替为大弹跳虫、小尖毛虫 (*Oxytricha minor*)、有肋薄咽虫 (*Leptopharynx costatus*) 和一种前口虫 (*Frontonia* sp.), 此时肾形虫种类相对较多, 但是其出现频次低, 不再是优势种。

### 2.2.3 土壤纤毛虫群落组成的变化

不同二萜化合物浓度处理下土壤纤毛虫群落结构见图 4, 随着浓度的升高 11 个目的物种数都在下降, 但是在 82.5 mg/kg 下, 肾形目 (Colpodida) 所占比例相对于对照的 22.67% 和低浓度 (2.5 mg/kg) 的 27.14% 上升到 32.14%; 下毛目 (Hypotrichida) 相对对照的 25.33% 和低浓度 (2.5 mg/kg) 的 24.29% 变为 25.00%。篮口目 (Nassulida)、管口目 (Cyrtophorida)、膜口目 (Hymenostomatida) 和寡毛目 (Oligotrichida) 所占比例都略有提高。纤毛虫群落由对照的下毛目为优势类群, 肾形目和前口目 (Prostomatida) 为次优势类群, 转变为高浓度 (>32.5 mg/kg) 下肾形目为优势类群, 下毛目、前口目和篮口目为次优势类群, 管口目、侧口目 (Pleurostomatida) 和寡毛目属于罕见类群。说明肾形目对二萜化合物有较高的耐受能力。下毛目、前口目和篮口目对二萜类化合物有一定的耐受能力。

### 2.3 二萜化合物对土壤纤毛虫丰度和食性的影响

如图 5 所示, 在相同暴露时间, 不同施药浓度下土壤纤毛虫丰度与对照组相比均有极明显的降低。第 1 天降幅最大, 在试验最高施药浓度下土壤纤毛虫丰度仅为对照组的 10.93%。第 60 天时, 降幅最小, 最高施药浓度下土壤纤毛虫丰度达到了对照组的 45.71%。而同一施药浓度, 随着暴露时间逐渐延长, 纤毛虫的丰度变化虽存在一定的起伏, 这可能是受其它环境因子 (如气温等) 影响的结果, 但整体的趋势是随着暴露时间的延长, 纤毛虫的丰度逐渐回升。第 60 天时, 试验最低施药浓度和最高施药浓度土壤纤毛虫丰度分别为对照组 86.79% 和 45.71%, 而此时土壤中二萜类化合物的残留浓度分别为 0.656 mg/kg 和 1.776 mg/kg (图 5), 表明即使土壤中残留有很小浓度的二萜类化合物, 也会对土壤纤毛虫产生很强的抑制效应。就试验每次取样的土壤纤毛虫个体数量测定的结果来看, 随着二萜类化合物浓度的增大, 纤毛虫的丰度减小, 通过对试验数据进行多个独立样本的非参数分析表明, 各浓度组间纤毛虫的丰度存在极显著差异 (表 2)。

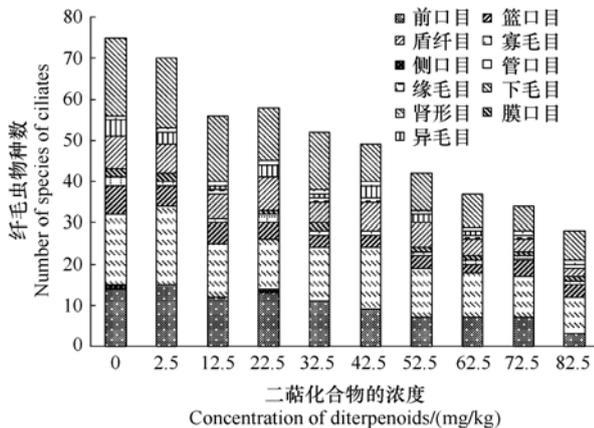


图 4 不同浓度二萜类化合物的土壤纤毛虫群落结构

Fig. 4 Community structure of soil ciliates with different concentrations of Diterpenoids

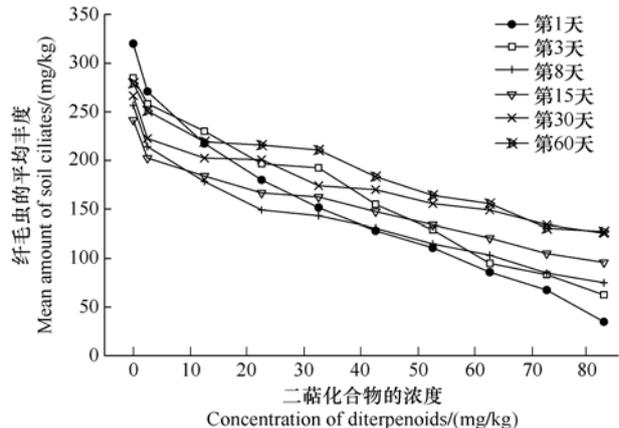


图 5 不同浓度二萜类化合物土样中纤毛虫的平均数量

Fig. 5 Mean amount of soil ciliates in soil sample with different concentrations of Diterpenoids

试验发现在最高浓度 (82.5 mg/kg) 二萜类化合物土壤中观察到的 28 种纤毛虫, 除腔裸口虫 (*Holophrya atra*)、一种斜齿虫 (*Enchelyodon* sp.)、苔藓刀口虫 (*Spathidium muscicola*) 为肉食性、贪食阔庭虫 (*Bresslaua vorax*)、贪食匙口虫 (*Platyophrya vorax*)、苔藓织毛虫 (*Histiculus muscorum*)、似织毛虫 (*Histiculus similis*)、绣花篮口虫 (*Nassula picta*)、一种前口虫 (*Frontonia* sp.) 为杂食性外, 其余 19 种均为食菌性的。其中杂食性和食菌性的种类共 25 种, 占总数的 89.29%; 肉食性种类仅占 10.71%。

## 2.4 C/P 系数的变化

C/P 系数可以在一定程度上反映土壤纤毛虫所在生境环境条件的状况。在本研究中,对照组 C/P 系数为 0.708;施药浓度小于或等于 32.5 mg/kg 时,C/P 系数小于 1;当施药浓度超过 32.5 mg/kg 时 C/P 系数大于 1 (表 1),表明纤毛虫群落结构发生显著改变,此时土壤已不适合纤毛虫生长繁殖,说明在高浓度 (>32.5 mg/kg) 二萜类化合物破坏了土壤纤毛虫生长的土壤环境。

## 3 讨论

### 3.1 二萜类化合物对纤毛虫群落结构的影响

已有的研究表明不同种类的有机物对纤毛虫群落结构的影响是不同的。有机物的浓度不同,其影响也不一样<sup>[13]</sup>。二萜类化合物进入土壤中,改变了纤毛虫生活的土壤环境,这种改变对群落的伤害很难克服。群落对环境的变化和扰动的反应是通过组成群落的生物种群来实现的。一个群落包含更多的生物种类,而且每个种类包含的个体数目比较均匀的分布时它们之间就容易形成一个更为复杂的相互关系,这样群落对于环境的变化、干扰或来自于群落外某些种群的波动有一个相对强大的反馈系统,使群落有更大的缓冲能力<sup>[15]</sup>。事实上,即使对于一个相当稳定、复杂的群落,改变群落结构以适应新的环境也不是在短时间内可以完成的<sup>[32]</sup>。对于单细胞生物的纤毛虫群落来说,二萜化合物在土壤中的影响非常显著,试验中 C/P 由对照组和较低浓度试验 ( $\leq 32.5$  mg/kg) 组的小于 1 到高浓度试验组 (>32.5 mg/kg) 的大于 1,也说明了纤毛虫群落结构发生显著改变,此时的土壤环境受到高浓度二萜化合物的影响已不适合纤毛虫生长繁殖。

群落结构的复杂性和各种群数量大小,一方面是受到环境因子的影响,另一方面也决定于生物群落对于环境的适应能力。群落结构越复杂,它们对环境的适应能力越强,反之适应能力则降低。二萜类化合物对纤毛虫有较大的毒害作用,能够明显减少其物种数。如图 4 所示,纤毛虫物种数在不同二萜类化合物浓度下均有减少,并随着施药浓度的增大呈下降趋势,即浓度越大,纤毛虫种类减少得越多,群落结构变得越简单。纤毛虫群落结构出现衰退演替,必然会间接影响土壤中生存的其他微生物群落,进而影响到整个土壤生态系统的稳定和活力。实验结果显示不同种类的纤毛虫对二萜类化合物的敏感性有所不同,这种敏感性差异造成土壤纤毛虫群落特异单一化。在试验过程中,随着进入试验体系的二萜类化合物浓度的增加,纤毛虫物种数减少而耐受种类的个体数量增多。这些耐受种在条件极其恶劣的情况下仍能存活,当适应环境后就大量的繁殖,从而个体数量增多,致使整个受污群落的优势种也发生了变化,对于一些稳定的优势种可以作为某种或某些特定污染物的指示生物<sup>[33]</sup>,本试验中的优势种能否作为二萜类污染物的指示生物还需进一步研究。

### 3.2 二萜类化合物对纤毛虫丰度的影响

二萜类化合物除了对纤毛虫群落结构的产生影响外,还对纤毛虫的丰度产生影响。本研究定量分析的结果显示,即使是较低浓度的二萜类化合物,也对土壤纤毛虫的丰度造成了较大的影响。在浓度为 2.5 mg/kg 二萜类化合物的土样中,第 1 天时纤毛虫平均数量为对照组的 84.38%,第 60 天时,为对照组的 86.79%;超过 62.5 mg/kg 浓度的土样中,第 60 天时纤毛虫平均数量不足对照组的 50%。可见二萜类化合物对纤毛虫的丰度有抑制作用,而且随着二萜类化合物浓度的升高其抑制作用增强,但是在同一浓度下随着时间的延长纤毛虫丰度略回升,这主要是随着时间的延长土壤中二萜类化合物浓度会下降,进而对纤毛虫丰度的抑制作用减弱造成的。

整个试验中,体积小的纤毛虫数量占优势。这与 Finlay<sup>[34]</sup>的观点相一致,即土壤中生物有机体的丰度与其体积大小呈反比关系。实验对照组中,纤毛虫的丰度较一些文献报道的少的多<sup>[14,16,35]</sup>,主要原因是土壤样品均是在自然干燥后进行花盆试验的,且采用的直接记数法。宁应之等<sup>[36]</sup>的研究表明直接记数结果比培养

表 2 土样中纤毛虫数量的非参数多个独立样本检验的分析结果

Table 2 *K* Independent Sample test analysis of nonparametric tests on the amount of soil ciliates

暴露时间 Exposure time/d	二萜类化合物 Diterpenoids/(mg/kg)	
	<i>H</i>	<i>P</i>
1	28.608	0.001
3	26.229	0.002
7	26.804	0.002
15	27.003	0.001
30	26.986	0.001
60	28.192	0.001

记数结果要小 100—1000 倍。

### 3.4 二萜类化合物对土壤纤毛虫的食性影响

尽管纤毛虫的生存和分布还受到许多因素的影响,但食物类型和多寡也是一个重要的因素。在土壤中,细菌是丰度最大的生物类群,为土壤纤毛虫提供了丰富的食源<sup>[37]</sup>。根据宁应之等<sup>[37]</sup>的研究,土壤中纤毛虫的食性较复杂,如前口目和侧口目都是肉食性的,主要捕食鞭毛虫、肉足虫、其它纤毛虫及轮虫,肾形目中一部分摄食细菌,另一部分摄食真菌。腹毛目的一部分种类仅摄食细菌,另一部分种类为肉食者,还有一部分种类为杂食者。这样以细菌为食的种类较其它食性的原生动物的更容易得到食物,因而有利于土壤中食细菌的纤毛虫大量生存。本试验在最高浓度(82.5 mg/kg)二萜类化合物土壤中纤毛虫,其中杂食性和食菌性占总数的 89.29%,肉食性种类仅占 10.71%。可见,二萜类化合物对纤毛虫的影响还与纤毛虫的食性有关,尤其对肉食性纤毛虫危害最大。

## 4 结论

**4.1** 模拟生态试验研究共鉴定到纤毛虫 88 种,其中对照组 75 种,实验组随添加的二萜类化合物浓度升高,纤毛虫种类数减少,群落结构简单化,出现衰退演替;二萜类化合物对肉食性纤毛虫危害最大;回归分析表明纤毛虫物种数随二萜类化合物浓度升高呈下降趋势。当施药浓度超过 32.5 mg/kg 时土壤纤毛虫优势种和 C/P 系数发生变化,此时优势种演替为膨胀肾形虫(*Colpoda inflata*)、长篮环虫(*Cyrtolophosis elongata*)、水藓薄咽虫(*Leptopharynx sphagnetorum*)和苔藓膜袋虫(*Cyclidium muscicola*)、大弹跳虫(*Halteria grandinella*)、小尖毛虫(*Oxytricha minor*)、有肋薄咽虫(*Leptopharynx costatus*)和一种前口虫(*Frontonia* sp.);C/P 系数大于 1,表明二萜类化合物使土壤纤毛虫群落结构遭到了相当大的破坏。

**4.2** 定量研究发现,在相同暴露时间,不同施药浓度下土壤纤毛虫丰度与对照组相比均有极明显的降低。而同一施药浓度,随着暴露时间逐渐延长,纤毛虫的数量逐渐回升。二萜类化合物残留浓度测定结果表明,即使土壤中二萜类化合物残留浓度很低,也对纤毛虫群落有显著的抑制作用。非参数多个独立样本检验分析结果表明,各浓度组间的增大纤毛虫的丰度存在极显著差异。采用群落级生物作为靶生物进行毒性试验评价化学品的毒性,试验结果更具环境真实性。结果表明,不同浓度的对二萜化合物对土壤纤毛虫群落结构在种类组成和丰度方面均成具有强烈的扰动作用。

**致谢:**中国海洋大学宋微波教授、许恒龙教授和中国科学院海洋研究所徐奎栋研究员对写作给予帮助,特此致谢。

## References:

- [ 1 ] Tang M Y, Wang H W, Sun L F. The natural terpenoids with antineoplastic activities. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 1997, 17(2): 73-79.
- [ 2 ] Su J Y. Research survey of chemistry and pharmaceutical of seaweed. *Chinese Journal of Marine Drugs*, 1992, 11(2): 25.
- [ 3 ] Yang Y B, Liu S J, Wang B D, Zhu C, Zhu D Y, Kun X M, Yang Y Q. Studies on diterpenoid in *rabdosia phyllopodia* (labiateae). *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 1997, 3(1): 79-81.
- [ 4 ] Zhang C F, Li J M, Xin Q, Wang Q, Dai W J, Song Y W, Liao Y M. Pharmacognosy study on *Rabdosia amethystoides* (Benth) Hara. *Shandong Pharmaceutical Industry*, 1998, 17(4): 30-31.
- [ 5 ] Li J C, Zhang Q T, Yang L J, Su J L, Chang A W, Fu C J. Studies on the antitumor effect of rabdosia inflexus d(Thumb) kundo. *Henan Medical Research*, 2005, 14(3): 211-214.
- [ 6 ] Ding L, Zhang S D, Liu G A, Wang H, Yang D J, Wang L. The effect of Wangzaozin A, an *ent*-kaurane diterpene, on the proliferation of human cancer SGC0 7901 cells. *Journal of Northwest Normal University Edition*, 2006, 42(3): 70-73.
- [ 7 ] Ding L, Qi L L, Jing H W, Li J, Wang W, Wang T. Phytotoxic effects of leukamenin E (an *ent*-kaurene diterpenoid) on root growth and root hair development in *Lactuca sativa* seedlings. *Journal of Chemical Ecology*, 2008, 34 (11): 1492-1500.
- [ 8 ] Guo Y W, Chen P Y, Hou H X. The chemical characterization of diterpenoids isolated from *Isodon*. *Chinese Traditional and Herbal Drug*, 1992, 23(7): 380-381.
- [ 9 ] Foissner W, Agatha S, Berger H. Soil Ciliates (Protozoa, Ciliophora) from Namibia (Southwest Africa), with Emphasis on Two Contrasting

- Environments, the Etosha Region and the Namib Desert (Vol.2). Denisia: Museum of Upper Austria, 2002: 1-1459.
- [10] Clarholm M. Soil protozoa: an under-researched microbial group gaining momentum. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37: 811-817.
- [11] Song X Y, Song Y F, Sun T H, Zhang W, Zhou Q X. Bio-indicating function of soil protozoa to environmental pollution. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10): 1979-1982.
- [12] Wiger R. Variability of lindane toxicity in *Tetrahymena pyriformis* with special reference to liposomal lindane and the surfactant Tween 80. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1985, 35(4): 452-459.
- [13] Petz W, Foissner W. The effects of mancozeb and lindane on the soil microfauna of a spruce forest: a field study using a completely randomized block design. *Biology and Fertility of Soils*, 1989, 7(3): 225-231.
- [14] Xu R L, Mo Y. Effect of irrigation of landfill leachate on soil protozoan communities. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2001, 7(1): 41-44.
- [15] Chen S F, Xu R L, Wang Y J, Wang Y J, Zan Q J, Liao W B. Effect of chemical prevention and cure of *Mikania Micrantha* on soil protozoan community in Neilingding Island. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2003, 9(4): 422-428.
- [16] Guo F F, Shi Y J, Meng F Q, Meng F Q, Chen J S, Lü Y L. Ecological effects of typical POPs on soil protozoa. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 70-74.
- [17] Wang H, Ding L, Liu G A, Yang D J, Sun K. Studies on antitumor activity diterpenoids from *Isodon excisoide*. *Journal of Northwest Normal University Edition*, 2005, 41(6): 54-57.
- [18] The Writing Group of a Handbook for the Research Methods of Soil Animals. *A Handbook for the Research Methods of Soil Animals*. Beijing: Chinese Forestry Publishing House, 1998: 67.
- [19] Foissner W. Estimating the species richness of soil protozoa using the "non-flooded Petri dish method" // Lee J J, Soldo A T, eds. *Protocols in Protozoology*. Lawrence: Allen Press, 1992: B-10.1 B-10.2.
- [20] Wilbert N. Eine verbesserte Technik der Protargolimprägung für Ciliaten. *Mikrokosmos*, 1975, 6: 171-179.
- [21] Berger H. Monograph of the Oxytrichidae (Ciliophora, Hypotrichia) // Dumont H J, Wergler M J A, eds. *Monographiae Biologicae*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999: 78: 1-1080.
- [22] Foissner W. *Colpodea (Ciliophora)*. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 1993: 1-798.
- [23] Foissner W. Tropical protozoan diversity: 80 ciliates species (Protozoa, Ciliophora) in a soil sample from a tropical dry forest of Costa Rica, with description of four new genera and seven new species. *Arch Protistenkd*, 1995, 145: 37-79.
- [24] Foissner W. Soil ciliates (Protozoa; Ciliophora) from evergreen rain forests of Australia, South America and Costa Rica; diversity and description of new species. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, 25: 317-339.
- [25] Foissner W. Global soil ciliate (Protozoa, Ciliophora) diversity: a probability-based approach using large sample collectives from Africa, Australia, and Antarctica. *Biodiversity and Conservation*, 1997, 6: 1627-1638.
- [26] Foissner W. An updated compilation of world soil ciliates (Protozoa, Ciliophora), with ecological notes, new records, and descriptions of new species. *European Journal of Protistology*, 1998, 34: 195-235.
- [27] Foissner W, Agatha S, Berger H. Soil ciliates (Protozoa, Ciliophora) from Namibia (Southwest Africa), with emphasis on two contrasting environments, the Etosha Region and the Namib Desert. *Denisia*, 2002, 5: 1-1459.
- [28] Shen Y F, Ning Y Z. Protozoa // Yin W Y, Zhang R Z, Yin S G, et al. eds. *Pictorial Keys to Soil Animals of China*. Beijing: Science Press, New York, 2000: 24-42, 409-427.
- [29] Foissner W, Berger H, Xu K, Zechmeister-Boltenstern S. A huge, undescribed soil ciliate (Protozoa; Ciliophora) diversity in natural forest stands of Central Europe. *Biodiversity and Conservation*, 2005, 14: 617-701.
- [30] Bamforth, S S. Interpreting soil ciliate biodiversity. *Plant and Soil*, 1995, 170: 159-164.
- [31] Deng Y, Cai M Y, Tian Y, Hu S Q, Li L. Determination of Diterpenoids in different solvent extraction from *Rabdosia serra* (Maxim.) Hara. *Modern Food Science and Technology*, 2005, 21(2): 153-154.
- [32] Couteux M., Raubuch M., Berg M. Response of protozoan and microbial communities in various coniferous forest soils after transfer to forests with different levels of atmospheric pollution. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 27: 179-188.
- [33] Foissner W. Soil protozoa as bioindicators in ecosystems under human influence // Darbyshire J F, ed. *Soil Protozoa*. England: CAB International Wallingford Oxon, 1994: 147-193.
- [34] Finlay B J, Fenchel T. Protozoan, community structure in a fractal soil environment. *Protist*, 2001, 152: 203-218.
- [35] Cao Z P, Chen G K, Zhang K, Wu W L. Impact of soil fertility maintaining practices on protozoa abundance in high production agro-ecosystem in northern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2992-2995.
- [36] Ning Y Z, Shen Y F. Soil protozoa in typical zones of China II. ecological study. *Acta Zootaxonomica Sinica*, 1998, 44(3): 271-276.

- [37] Ning Y Z, Shen Y F. Observation of feeding habits of soil protozoa in chinese six typical zones. *Zoological Research*, 1998, 19 (5): 397-400.

#### 参考文献:

- [1] 汤敏燕, 汪洪武, 孙凌峰. 具有抗肿瘤活性的天然萜类化合物. *林产化学与工业*, 1997, 17(2): 73-79.
- [2] 苏镜娱. 海藻化学及药物研究概况. *中国海洋药物*, 1992, 11(2): 25.
- [3] 杨一兵, 刘淑卿, 王保德, 朱诚, 朱大元, 孔祥明, 杨一青. 桉叶香茶菜二萜成分研究. *应用与环境生物学报*, 1997, 3(1): 79-81.
- [4] 张春芬, 李建美, 辛勤, 王清, 戴伟娟, 宋煜伟, 寥月梅. 泰山内折香茶菜的药理研究. *山东医药工业*, 1998, 17(4): 30-31.
- [5] 李继成, 张启堂, 杨丽嘉, 苏金玲, 常爱武, 付春景. 内折香茶菜素 D 抗肿瘤作用的研究. *河南医学研究*, 2005, 14(3): 211-214.
- [6] 丁兰, 张世栋, 刘国安, 王瀚, 杨东娟, 王丽. 对映-贝壳杉烷二萜化合物 Wangzaozin A 对人胃腺癌细胞 SGC0 7901 生长的影响. *西北师范大学学报: 自然科学版*, 2006, 42(3): 70-73.
- [8] 郭跃伟, 程培元, 侯惠欣. 香茶菜属二萜的化学特征. *中草药*, 1992, 23(7): 380-381.
- [11] 宋雪英, 宋玉芳, 孙铁珩, 张薇, 周启星. 土壤原生动物对环境污染的生物指示作用. *应用生态学报*, 2004, 15(10): 1979-1982.
- [14] 徐润林, 莫燕. 垃圾渗滤液浇灌对红壤原生动物群落的影响. *应用与环境生物学报*, 2001, 7(1): 41-44.
- [15] 陈素芳, 徐润林, 王勇军, 王勇军, 咎启杰, 廖文波. 化学防除薇甘菊对内伶仃岛土壤原生动物群落的影响. *应用与环境生物学报*, 2003, 9(4): 422-428.
- [16] 郭非凡, 史雅娟, 孟凡乔, 陈京生, 吕永龙. 典型 POPs 物质对土壤原生动物丰度的影响. *生态学报*, 2006, 26(1): 70-74.
- [17] 王瀚, 丁兰, 刘国安, 杨东娟, 孙坤. 拟缺香茶菜二萜成分及细胞毒活性研究. *西北师范大学学报: 自然科学版*, 2005, 41(6): 54-57.
- [18] 《土壤动物研究方法手册》编写组. *土壤动物研究方法手册*. 北京: 中国林业出版社, 1998: 67.
- [31] 邓韵, 蔡妙颜, 田野, 胡松青, 李琳. 溪黄草不同溶剂提取物中总二萜含量的测定. *现代食品科技*, 2005, 21(2): 153-154.
- [35] 曹志平, 陈国康, 张凯, 吴文良. 不同土壤培肥措施对华北高产农田原生动物丰度的影响. *生态学报*, 2005, 25(11): 2992-2995.
- [36] 宁应之, 沈韞芬. 中国典型地带土壤原生动物: II. 生态学研究. *动物学报*, 1998, 44(3): 271-276.
- [37] 宁应之, 沈韞芬. 中国典型地带土壤原生动物食性的观察. *动物学研究*, 1998, 19(5): 397-400.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 1 January, 2011 (Semimonthly)

## CONTENTS

- Spatial pattern analysis of a *Rhododendron-Abies* virginal forest near timberline on the eastern edge of Qinghai-Tibetan Plateau, China ..... MIAO Ning, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al ( 1 )
- Changes of liana species diversity in different restoration stages of monsoonal broad-leaved evergreen forest ..... LI Shuaifeng, SU Jianrong, LIU Wandu, et al ( 10 )
- Investigation on spatio-temporal pattern of cyanobacterial community structure by T-RFLP during overwinter and recruitment period in Taihu Lake ..... GU Tingting, KONG Fanxiang, TAN Xiao, et al ( 21 )
- Food sources of fish and macro-invertebrates in a tropical seagrass bed at Xincun Bay, Southern China ..... FAN Minling, HUANG Xiaoping, ZHANG Dawen, et al ( 31 )
- Spatial pattern of Scleractinian coral Population Structure in Weizhou Island, Beihai, Guangxi ..... LIANG Wen, ZHANG Chunhua, YE Zuchao, et al ( 39 )
- Property of root distribution of triploid *Populus tomentosa* and its relation to root water uptake under the wide-and-narrow row spacing scheme ..... XI Benye, WANG Ye, JIA Liming, et al ( 47 )
- Soil nutritional properties and moisture gradient of the ecotone between dry valley and montane forest of the Minjiang River ..... LIU Bin, LUO Chengde, ZHANG Jian, et al ( 58 )
- Signal chemical salicylic acid mitigates the negative effects of drought on photosynthesis and membrane lipid peroxidation of purple majesty ..... YI Xiaolin, YANG Bingxian, ZONG Xuefeng, et al ( 67 )
- Effects of supplementary UV-B radiation on life cycle forms and the accumulation of taxanes of *Taxus chinensis* var. *mairei* ..... YU Jinghua, LI Dewen, PANG Haihe, et al ( 75 )
- Effect of simulated nitrogen deposition on the soil respiration of *Lithocarpus glabra* and *Castanopsis sclerophylla* ..... LI Kai, JIANG Hong, YOU Meina, et al ( 82 )
- Changes of phenolic acids in the soil of replanted apple orchards surrounding Bohai Gulf ..... SUN Haibing, MAO Zhiqian, ZHU Shuhua ( 90 )
- Growing dynamic root system of *Aquilaria malaccensis* and *Aquilaria sinensis* seedlings in response to different fertilizing methods ..... WANG Ran, LI Jiyue, ZHANG Fangqiu, et al ( 98 )
- Accumulation and tolerance of *Salix variegata* and *Pterocarya stenoptera* seedlings to cadmium ..... JIA Zhongmin, WEI Hong, SUN Xiaocan, et al ( 107 )
- Dynamics of vegetation structure and soil properties in the natural restoration process of degraded woodland on the northern slope of Qilian Mountains, northwestern China ..... ZHAO Chengzhang, SHI Fuxi, DONG Xiaogang, et al ( 115 )
- Relationship between temperature and  $\delta^{13}\text{C}$  values of C3 herbaceous plants and its implications of WUE in farming-pastoral zone in North China ..... LIU Xianzhao, WANG Guoan, LI Jiazhu, et al ( 123 )
- Carbon dynamics of fine root ( grass root ) decomposition and active soil organic carbon in various models of land use conversion from agricultural lands into forest lands ..... RONG Li, LI Shoujian, LI Xianwei, et al ( 137 )
- Prey biomass of the Amur tiger (*Panthera tigris altaica*) in the eastern Wanda Mountains of Heilongjiang Province, China ..... ZHOU Shaochun, ZHANG Minghai, SUN Haiyi ( 145 )
- The impact of conservation projects on giant Panda Habitat ..... ZHANG Yubo, WANG Mengjun, LI Junqing ( 154 )
- Fluctuation of soil fauna community during defoliation decomposition under lime and EM treatment ..... GAO Meixiang, ZHANG Xueping ( 164 )
- Comparative of feeding behaviors of *Sitobion avenae*, *Sitobion graminum* and *Rhopalosiphum padi* (Homoptera: Aphididae) using electrical penetration graph (EPG) ..... MIAO Jin, WU Yuqing, YU Zhenxing, et al ( 175 )
- Toxic effects of *ent*-kaurane diterpenoids on soil ciliate communities ..... NING Yingzhi, DU Haifeng, WANG Hongjun ( 183 )
- Geostatistical analysis and sampling technique on spatial distribution pattern of *Dendroctonus valens* population ..... PAN Jie, WANG Tao, ZONG Shixiang, et al ( 195 )
- Variation analysis of protein subunits of soybean germplasms of different eco-types in Shanxi ..... WANG Yanping, LI Guiquan, GUO Shujin, et al ( 203 )
- Effects of fertilization and plastic film mulched ridge-furrow cultivation on yield and water and nitrogen utilization of winter wheat on dryland ..... LI Tingliang, XIE Yinghe, REN Miaomiao, et al ( 212 )
- The changing characteristics of potential climate productivity in Gansu Province during nearly 40 years ..... LUO Yongzhong, CHENG Ziyong, GUO Xiaoqin ( 221 )
- Spatial assessment and zoning regulations of ecological importance based on GIS for rural habitation in Changgang Town, Xinguo county ..... XIE Hualin, LI Xiubin ( 230 )
- Influences of rural households' income differences on living energy consumption and eco-environment: a case study of Jiangnan Plain, China ..... YANG Zhen ( 239 )
- Spatial differences and its driving factors of energy indices on cultivated land eco-economic system in Hebei Province ..... WANG Qian, JIN Xiaobin, ZHOU Yinkang, et al ( 247 )
- Effects of land use on distribution and protection of organic carbon in soil aggregates in karst rocky desertification area ..... LUO Youjin, WEI Chaofu, LI Yu, et al ( 257 )
- Review and Monograph**
- Implication and limitation of landscape metrics in delineating relationship between landscape pattern and soil erosion ..... LIU Yu, LÜ Yihe, FU Bojie ( 267 )
- Ecological reclamation and restoration of abandoned coal mine in the United States ..... ZHANG Chengliang, B. Larry Li ( 276 )
- Managing farmland soil food web: principles and methods ..... CHEN Yunfeng, HU Cheng, LI Shuanglai, et al ( 286 )

# 2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊\*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

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

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

编辑部主任:孔红梅

执行编辑:刘天星 段 靖

生态学报  
(SHENGTAI XUEBAO)  
(半月刊 1981 年 3 月创刊)  
第 31 卷 第 1 期 (2011 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA  
(Semimonthly, Started in 1981)  
Vol. 31 No. 1 2011

**编 辑** 《生态学报》编辑部  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085  
电话:(010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

**主 编** 冯宗炜  
**主 管** 中国科学技术协会  
**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

**出 版** 科 学 出 版 社  
地址:北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

**印 刷** 北京北林印刷厂  
**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

**订 购** 全国各地邮局  
**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

**广告经营** 京海工商广字第 8013 号  
**许 可 证**

**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

**Editor-in-chief** FENG Zong-Wei  
**Supervised** by China Association for Science and Technology  
**Sponsored** by Ecological Society of China  
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS  
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

**Published** by Science Press  
Add:16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

**Printed** by Beijing Bei Lin Printing House,  
Beijing 100083, China

**Distributed** by Science Press  
Add:16 Donghuangchenggen North  
Street, Beijing 100717, China  
Tel:(010)64034563  
E-mail:journal@cspg.net

**Domestic** All Local Post Offices in China  
**Foreign** China International Book Trading  
Corporation  
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元