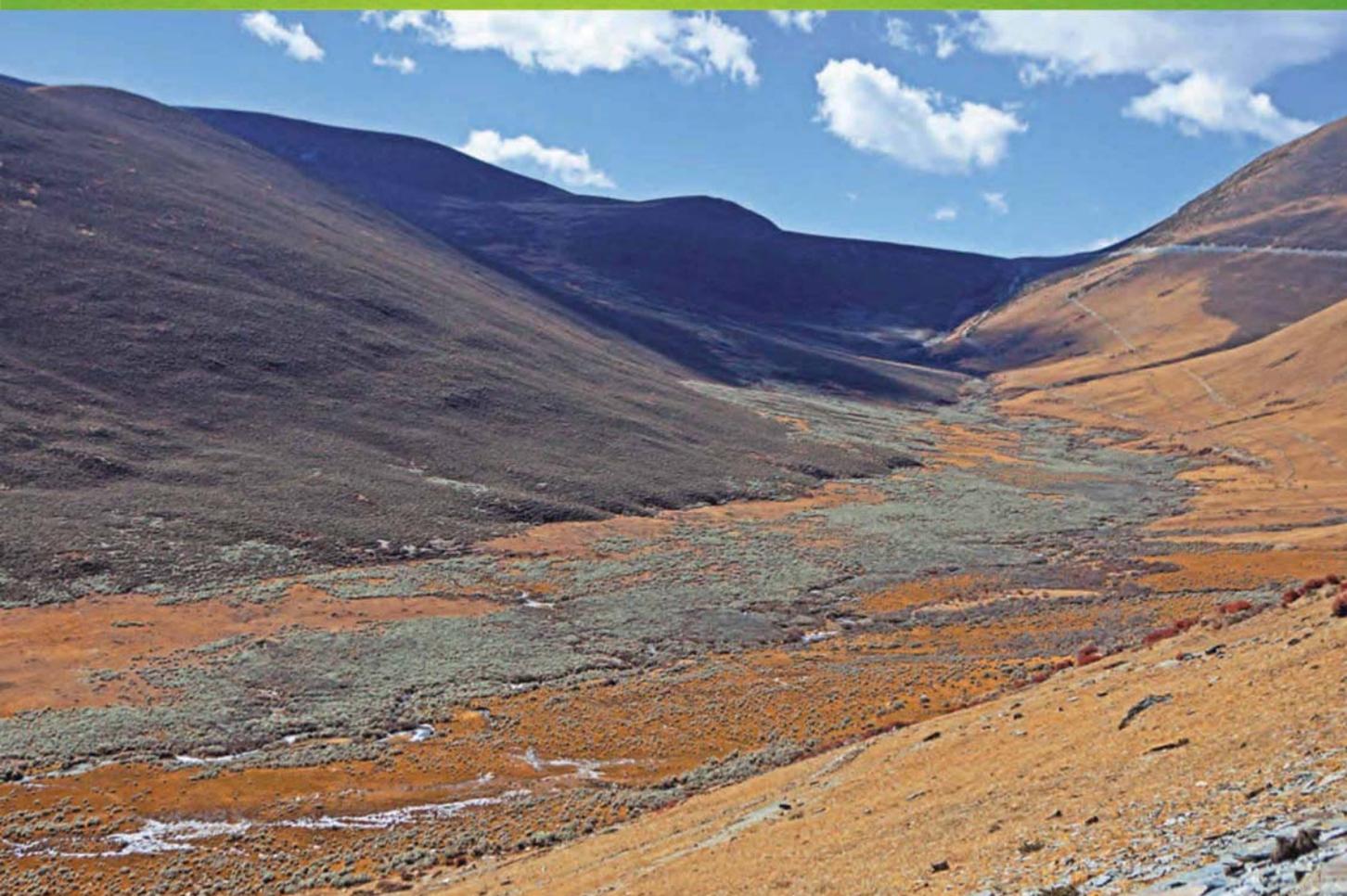


ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica

中国生态学会 2013 年学术年会专辑



第 33 卷 第 18 期 Vol.33 No.18 **2013**

中国生态学会  
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 18 期      2013 年 9 月 (半月刊)

## 目 次

### 中国生态学会 2013 年学术年会专辑 卷首语

美国农业生态学发展综述 .....	黄国勤, Patrick E. McCullough (5449)
水足迹研究进展 .....	马 晶, 彭 建 (5458)
江西省主要作物(稻、棉、油)生态经济系统综合分析评价 .....	孙卫民, 欧一智, 黄国勤 (5467)
植物干旱胁迫下水分代谢、碳饥饿与死亡机理 .....	董 蕾, 李吉跃 (5477)
生态化学计量学特征及其应用研究进展 .....	曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等 (5484)
三峡库区紫色土植被恢复过程的土壤团粒组成及分形特征 .....	王轶浩, 耿养会, 黄仲华 (5493)
城市不同地表覆盖类型对土壤呼吸的影响 .....	付芝红, 呼延佼奇, 李 锋, 等 (5500)
华南地区 3 种具有不同入侵性的近缘植物对低温胁迫的敏感性 .....	王宇涛, 李春妹, 李韶山 (5509)
沙丘稀有种准噶尔无叶豆花部综合特征与传粉适应性 .....	施 翔, 刘会良, 张道远, 等 (5516)
水浮莲对水稻竞争效应、产量与土壤养分的影响 .....	申时才, 徐高峰, 张付斗, 等 (5523)
珍稀药用植物白及光合与蒸腾生理生态及抗旱特性 .....	吴明开, 刘 海, 沈志君, 等 (5531)
不同温度及二氧化碳浓度下培养的龙须菜光合生理特性对阳光紫外辐射的响应 .....	杨雨玲, 李 伟, 陈伟洲, 等 (5538)
土壤氧气可获得性对双季稻田温室气体排放通量的影响 .....	秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等 (5546)
免耕稻田氮肥运筹对土壤 NH <sub>3</sub> 挥发及氮肥利用率的影响 .....	马玉华, 刘 兵, 张枝盛, 等 (5556)
香梨两种树形净光合速率特征及影响因素 .....	孙桂丽, 徐 敏, 李 疆, 等 (5565)
沙埋对沙米幼苗生长、存活及光合蒸腾特性的影响 .....	赵哈林, 曲 浩, 周瑞莲, 等 (5574)
半干旱区旱地春小麦全膜覆土穴播对土壤水热效应及产量的影响 .....	王红丽, 宋尚有, 张绪成, 等 (5580)
基于 Le Bissonnais 法的石漠化区桑树地埂土壤团聚体稳定性研究 .....	汪三树, 黄先智, 史东梅, 等 (5589)
不同施肥对雷竹林径流及渗漏水中氮形态流失的影响 .....	陈裴裴, 吴家森, 郑小龙, 等 (5599)
黄土丘陵区不同植被土壤氮素转化微生物生理群特征及差异 .....	邢肖毅, 黄懿梅, 安韶山, 等 (5608)
黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响 .....	赵 彤, 闫 浩, 蒋跃利, 等 (5615)
林地覆盖对雷竹林土壤微生物特征及其与土壤养分制约性关系的影响 .....	郭子武, 俞文仙, 陈双林, 等 (5623)
降雨对草地土壤呼吸季节变异性的影响 .....	王 旭, 闫玉春, 闫瑞瑞, 等 (5631)
基于土芯法的亚热带常绿阔叶林细根空间变异与取样数量估计 .....	黄超超, 黄锦学, 熊德成, 等 (5636)
4 种高大树木的叶片性状及 WUE 随树高的变化 .....	何春霞, 李吉跃, 孟 平, 等 (5644)
干旱荒漠区银白杨树干液流动态 .....	张 俊, 李晓飞, 李建贵, 等 (5655)
模拟增温和不同凋落物基质质量对凋落物分解速率的影响 .....	刘瑞鹏, 毛子军, 李兴欢, 等 (5661)
金沙江干热河谷植物叶片元素含量在地表凋落物周转中的作用 .....	闫帮国, 纪中华, 何光熊, 等 (5668)
温带 12 个树种新老树枝非结构性碳水化合物浓度比较 .....	张海燕, 王传宽, 王兴昌 (5675)
断根结合生长素和钾肥施用对烤烟生长及糖碱比、有机钾指数的影响 .....	吴彦辉, 薛立新, 许自成, 等 (5686)
光周期和高脂食物对雌性高山姬鼠能量代谢和产热的影响 .....	高文荣, 朱万龙, 孟丽华, 等 (5696)
绿原酸对凡纳滨对虾抗氧化系统及抗低盐度胁迫的影响 .....	王 芸, 李 正, 李 健, 等 (5704)

基于盐分梯度的荒漠植物多样性与群落、种间联接响应 .....	张雪妮, 吕光辉, 杨晓东, 等 (5714)
广西马山岩溶植被年龄序列的群落特征 .....	温远光, 雷丽群, 朱宏光, 等 (5723)
戴云山黄山松群落与环境的关联 .....	刘金福, 朱德煌, 兰思仁, 等 (5731)
四川盆地亚热带常绿阔叶林不同物候期凋落物分解与土壤动物群落结构的关系 .....	王文君, 杨万勤, 谭波, 等 (5737)
中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤活性有机碳含量及季节动态 .....	范跃新, 杨玉盛, 杨智杰, 等 (5751)
塔克拉玛干沙漠腹地人工植被及土壤 C N P 的化学计量特征 .....	李从娟, 雷加强, 徐新文, 等 (5760)
鄱阳湖小天鹅越冬种群数量与行为学特征 .....	戴年华, 邵明勤, 蒋丽红, 等 (5768)
营养盐加富和鱼类添加对浮游植物群落演替和多样性的影响 .....	陈纯, 李思嘉, 肖利娟, 等 (5777)
西藏达则错盐湖沉积背景与有机沉积结构 .....	刘沙沙, 贾沁贤, 刘喜方, 等 (5785)
西藏草地多项供给及调节服务相互作用的时空演变规律 .....	潘影, 徐增让, 余成群, 等 (5794)
太湖水体溶解性氨基酸的空间分布特征 .....	姚昕, 朱广伟, 高光, 等 (5802)
基于遥感和 GIS 的巢湖流域生态功能分区研究 .....	王传辉, 吴立, 王心源, 等 (5808)
近 20 年来东北三省春玉米物候期变化趋势及其对温度的时空响应 .....	李正国, 杨鹏, 唐华俊, 等 (5818)
鄱阳湖湿地景观恢复的物种选择及其对环境因子的响应 .....	谢冬明, 金国花, 周杨明, 等 (5828)
珠三角河网浮游植物生物量的时空特征 .....	王超, 李新辉, 赖子尼, 等 (5835)
南京市景观时空动态变化及其驱动力 .....	贾宝全, 王成, 邱尔发 (5848)
川西亚高山-高山土壤表层有机碳及活性组分沿海拔梯度的变化 .....	秦纪洪 王琴 孙辉 (5858)
城市森林碳汇及其抵消能源碳排放效果——以广州为例 .....	周健, 肖荣波, 庄长伟, 等 (5865)
基于机器学习模型的沙漠腹地地下水含盐量变化过程及模拟研究 .....	范敬龙, 刘海龙, 雷加强, 等 (5874)
干旱区典型绿洲城市发展与水资源潜力协调度分析 .....	夏富强, 唐宏, 杨德刚, 等 (5883)
海岸带区域综合承载力评估指标体系的构建与应用——以南通市为例 .....	魏超, 叶属峰, 过仲阳, 等 (5893)
中街山列岛海洋保护区鱼类物种多样性 .....	梁君, 徐汉祥, 王伟定 (5905)
丰水期长江感潮河口段网采浮游植物的分布与长期变化 .....	江志兵, 刘晶晶, 李宏亮, 等 (5917)
基于生态网络的城市代谢结构模拟研究——以大连市为例 .....	刘耕源, 杨志峰, 陈彬, 等 (5926)
保护区及周边居民对野猪容忍性的影响因素——以黑龙江凤凰山国家级自然保护区为例 .....	徐飞, 蔡体久, 琚存勇, 等 (5935)
三江源牧户参与草地生态保护的意愿 .....	李惠梅, 张安录, 王珊, 等 (5943)
沈阳市降雨径流初期冲刷效应 .....	李春林, 刘森, 胡远满, 等 (5952)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 514 \* zh \* P \* ¥ 90.00 \* 1510 \* 59 \* 2013-09



**封面图说:** 川西高山地带土壤及植被——青藏高原东缘川西的高山地带坡面上为草地, 沟谷地带由于低平且水分较充足, 生长有很多灌丛。川西地区大约在海拔 4000m 左右为林线, 以下则分布有亚高山森林。亚高山森林是以冷、云杉属为建群种或优势种的暗针叶林为主体的森林植被。作为高海拔低温生态系统, 高山-亚高山地带土壤碳被认为是我国重要的土壤碳库。有研究表明, 易氧化有机碳含量与海拔高度呈显著正相关, 显示高海拔有利于土壤碳的固存。因而, 这里的表层土壤总有机碳含量随着海拔的升高而增加。

**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/stxb201304070625

申时才, 徐高峰, 张付斗, 金桂梅, 李天林, 张玉华. 水浮莲对水稻竞争效应、产量与土壤养分的影响. 生态学报, 2013, 33(18): 5523-5530.

Shen S C, Xu G F, Zhang F D, Jin G M, Li T L, Zhang Y H. Competitive effect of *Pistia stratiotes* to rice and its impacts on rice yield and soil nutrients. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5523-5530.

## 水浮莲对水稻竞争效应、产量与土壤养分的影响

申时才, 徐高峰, 张付斗\*, 金桂梅, 李天林, 张玉华

(云南省农科学院农业环境资源研究所, 昆明 650205)

**摘要:** 为了解入侵植物水浮莲在稻田生产中的扩散规律和对水稻农业性状的影响, 通过田间水稻田实验, 按照 de Wit 取代试验方法和添加系列设计方法研究水浮莲与水稻(云稻 2 号)混种对植株形态和生物量影响、种间竞争效应、水稻产量以及对土壤养分的影响。结果表明, 混种条件下水浮莲母株株高、分蘖数、生物量和开花株数均受到水稻的明显抑制, 受到的抑制率显著高于其对水稻的抑制率。水浮莲的种间竞争大于种内竞争( $RY$  小于 1.0)而水稻的种内竞争大于种间竞争( $RY$  大于 1.0), 水浮莲混种比例大于和等于 1:1 时( $RYT$  大于 1.0)与水稻不存在竞争作用, 而小于 1:1 时( $RYT$  小于 1.0)其存在着竞争作用, 水浮莲对水稻的竞争能力( $CB$  小于 0)小于水稻。混种条件下水稻有效穗数和产量有明显提高, 增产比例为 3.54%—13.38%。生长过程中水浮莲对土壤钾、磷元素消耗大于水稻, 而有机质和氮元素消耗小于水稻; 混种条件下水稻明显降低水浮莲对土壤养分消耗, 且二者在土壤养分上没有竞争关系。所有这些表明, 入侵稻田的水浮莲与水稻生长过程中其形态、生物量等方面都处于劣势, 而且一定的水浮莲密度有利于抑制水浮莲对土壤养分的消耗和促进水稻生长繁殖及其产量的提高, 因此为满足饲料利用和环境净化, 建议在正常耕作稻田中可对水浮莲进行适当的应用。

**关键词:** 水浮莲; 水稻; 竞争效应; 产量; 土壤养分

## Competitive effect of *Pistia stratiotes* to rice and its impacts on rice yield and soil nutrients

SHEN Shicai, XU Gaofeng, ZHANG Fudou\*, JIN Guimei, LI Tianlin, ZHANG Yuhua

Agricultural Environment and Resource Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China

**Abstract:** To explore the spreading pattern of the invasive plant *Pistia stratiotes* and its effects on agronomic features of rice, paddy field experiments were conducted to measure the impacts of *P. stratiotes* on plant morphology, biomass, competitive effect, grain yield, and soil nutrients under mixed cultivation of rice (Yundao 2) with *P. stratiotes*, utilizing replacement and additive de Wit series. The results showed that in mixed culture, mother ramet plant height, tiller number, biomass, and flowering plant number of *P. stratiotes* were obviously suppressed, and the inhibition rates were significantly higher than those of rice. The relative yield ( $RY$ ) of *P. stratiotes* and rice was clearly lower and higher than 1.0, respectively, showing that the interspecific competition impacts on *P. stratiotes* were greater than impacts of intraspecific competition, whereas intraspecific competition was higher than interspecific competition in the case of rice. The relative yield total ( $RYT$ ) of *P. stratiotes* and rice was significantly higher than 1.0 for a ratio of *P. stratiotes* to rice of greater than 1:1, demonstrating no significant competition. However, there was serious competition between two plants for a *P. stratiotes*: rice ratio lower than 1:1. The competitive balance ( $CB$ ) index of *P. stratiotes* and rice was significantly less than zero, indicating that *P. stratiotes* had less competitive ability than rice. In mixed culture, rice grain yield was increased by 3.54%—13.38%, which resulted from increased effective panicle number compared with monoculture (CK). During the growth of *P. stratiotes* and rice, *P. stratiotes* consumed more soil potassium and phosphorus than rice, whereas its

**基金项目:** 国家科技部国际合作“中国-东盟重大农业外来有害生物与防控平台”(2011DFB30040); 农业部公益性行业(农业)科研专项(200903004)资助

收稿日期: 2013-04-07; 修订日期: 2013-07-01

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fdzh@vip.sina.com

consumption of soil organic matter and nitrogen was less than rice; soil nutrients absorbed by *P. stratiotes* was obviously reduced when growing in mixed culture with rice, and there was no competition for soil nutrient utilization between *P. stratiotes* and rice. All results suggested that morphological and biomass characteristics of *P. stratiotes* put it at a disadvantage when grown with rice. Moreover, a suitable density of *P. stratiotes* would prevent its excessive consumption of soil nutrients and at the same time increase growth, reproduction and grain yield of rice. Thus *P. stratiotes* could be properly grown and applied in cultivated rice fields for the purpose of fodder use and environment purification.

**Key Words:** *Pistia stratiotes*; rice; competitive effect; grain yield; soil nutrients

水稻是我国的主要粮食作物之一,确保水稻的稳产高产对农村生计和国家粮食安全具有十分重要的作用<sup>[1]</sup>。水稻产量增长和品质除受水稻品种、气候环境和土壤生态环境的影响外<sup>[2-5]</sup>,还受到稻田有害生物病虫害的危害和防治影响<sup>[6-8]</sup>。水稻农业生产中,一些恶性杂草尤其是外来入侵植物可通过争肥、争光、争空间等严重制约和影响到水稻产量与品质。一些研究表明,世界性恶性入侵植物空心莲子草能降低水稻株高、有效茎蘖数、每穗实粒数、减产 9%—53%<sup>[9-11]</sup>,稗能降低水稻分蘖数约 50%、减产 50%以上<sup>[2, 12]</sup>。然而,关于稻田其他入侵植物对水稻产量的影响、与水稻种间竞争效应及其对土壤养分影响方面的研究鲜见报道。

水浮莲(*Pistia stratiotes* L.)是天南星科大藻属的一种多年生漂浮水生草本植物,原产于美洲,现已广泛分布于热带、亚热带地区,在中国也有大量分布<sup>[13-14]</sup>。水浮莲生长和繁殖速度快<sup>[15]</sup>,极易形成单一的优势群落,侵占阻塞河流、湖泊和水田<sup>[16]</sup>,为一些有害昆虫提供栖息地和危害其他生物<sup>[17]</sup>,因此被列入世界恶性入侵杂草之一<sup>[13]</sup>。水浮莲能吸收水生环境中大量的富营养化元素 N、P、K 等<sup>[18]</sup>,重金属污染 Cd、Pb、Cu、Mn 等<sup>[19-20]</sup>,对垃圾污水和有害有毒物质具有极强的净化和清除作用<sup>[21-22]</sup>,因此在水体净化和生态环境保护方面受到普遍欢迎和应用,但这也给水浮莲的传播、扩张和暴发创造了良好条件。2013 年申时才等<sup>[23]</sup>在水稻田单种水浮莲研究表明水浮莲以克隆繁殖为主,不同密度条件下水浮莲形态、分蘖、生物量等存在明显差异,随种植密度增加对土壤养分吸收逐渐降低,但关于水浮莲与水稻的竞争规律和对水稻产量的影响尚未进行过研究。

本实验采用完全随机实验设计,按照 de Wit<sup>[24]</sup>取代试验方法和添加系列<sup>[25]</sup>设计方法研究水浮莲与水稻混种条件对植株形态和生物量影响、种间竞争效应、水稻产量以及对土壤养分的影响,一方面可揭示水浮莲与水稻的种间竞争机制,另一方面为水浮莲入侵水稻田的管理提供科学依据。

## 1 实验地概况与研究方法

### 1.1 实验地点概况

实验点位于昆明北郊云南省农业科学院田间水稻种植基地(104°56'E, 26°45'N, 海拔 1 968 m)。实验地水稻田土壤肥力均等,其中 0—10 cm 土层土壤理化性质为:有机质 81.78 g/kg,全氮 2.21 g/kg,全磷 1.23 g/kg,全钾 2.01 g/kg,碱解氮 121.37 mg/kg,速效磷 71.32 mg/kg,速效钾 693.88 mg/kg, pH 值 7.45。排水灌溉系统良好,水源充足,温度为 11—31 ℃。

### 1.2 实验材料

供试水稻为云稻 2 号,云南省农业科学院粮食作物研究所水稻研究中心提供。水浮莲(*Pistia stratiotes* L.)取自云南省玉溪市新平县嘎洒镇水稻田(23°99' N, 101°63' E, 海拔 529 m)。近 10 多年来,水浮莲在当地大面积入侵水稻田和沟渠,被村民采集作牲口饲料。

### 1.3 试验设计和数据收集

结合田间常见的水稻种植密度,对水浮莲和水稻种间竞争效应采取随机试验设计,在单位面积总植物密度一定的条件下,按 de Wit<sup>[24]</sup>取代试验方法设置水浮莲和稻混种的株比例为 6:0、5:1、3:1、1:1、1:3、1:5、0:6,每个小区的种植密度为 360 株/m<sup>2</sup>。针对水浮莲对水稻产量和土壤养分影响采取李博<sup>[25]</sup>研究杂草与作物竞争的添加系列设计方法,采用水稻密度固定为 60 株/m<sup>2</sup>,水浮莲密度增加按照 0、30、60、120、180、240 株/m<sup>2</sup>;各混种比例下水浮莲对应密度的单种处理作为对照。所有实验采取完全随机设计,每个处理重复 4 次,共计 72 个处理。每个小区面积为 1 m×1 m,各小区间隔 0.35 m,每个小区用塑料薄膜打埂防止水体外溢。实验开始前 1 个星期灌水,实验过程中始终保持水面与土壤表层之间的距离为 2—3 cm。2012 年 5 月 3 日,从云南省玉溪市新平县嘎洒镇水稻田采集水浮莲幼苗,选择初始大小基本一致(株高 1.6 cm、叶片数为 4.3 和分蘖数为 0)的完整植株,用自来水冲洗干净,去除杂质、附生物。5 月 5 日,把选择好的水浮莲幼苗和培育好的一致水稻苗(株高 5.6 cm、3—4 叶期和分蘖数为 0)按照设计密度移栽于小区中,各植物均匀分布。

实验过程中严格管理小区用水保证水源不外溢和无相互串水,适时清除其他杂草,保证植株的正常生长。2012 年 9 月 25 日,等到水稻种子成熟后收获所有植物,在每个小区中随机抽取水浮莲基株和水稻基株各 25 个。用直尺(精确度 1 mm)测定水浮莲母株株高和根长,水稻基株株高和根长;记录水浮莲和水稻基株分蘖数、开花株数、结籽株数和种子数。然后,分别将选取

植物挖出,用自来水将根系洗净后在烘箱 75 °C 烘干至恒质量,用电子天平(型号 SPS202F80104042,精确度 0.0001 g)称重根、茎叶、种子生物量。

根据水浮莲、水稻的根长和生长部位,把小区土壤分为 0—15 cm 和 15—30 cm 2 个土层。然后,分别抽取各土层土壤样品送检,由云南省农业科学院农业环境资源研究所分析检测中心完成有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾的测定和分析。

#### 1.4 数据处理与分析

采用相对产量( $RY$ )<sup>[24]</sup>、相对产量总和( $RYT$ )<sup>[26]</sup>和竞争平衡指数( $CB$ )<sup>[27]</sup>来测度物种间资源竞争利用效能和竞争影响,计算公式如下,计算中生物量为基株干物质产量。

$$RY_a = Y_{ab}/Y_a \text{ 或 } RY_b = Y_{ba}/Y_b$$

$$RYT = (RY_{ab} + RY_{ba})/2$$

$$CB_a = \ln(RY_a/RY_b)$$

式中,a、b 代表两物种名称; $RY_a$ 、 $RY_b$  分别为物种 a 和物种 b 在混种时的相对产量; $Y_a$ 、 $Y_b$  分别为物种 a 和物种 b 在单种时的基株产量(或单位面积产量); $Y_{ab}$ 、 $Y_{ba}$  分别为物种 a 和物种 b 在混种时的基株产量。

$RY$  值表明不同种所经历竞争的类型; $RY=1.0$  表明种内和种间竞争水平相当; $RY>1.0$  表示种内竞争大于种间竞争; $RY<1.0$  表示种间竞争大于种内竞争。 $RYT<1.0$  表明 2 物种间具有竞争力; $RYT>1.0$  表明 2 物种之间没有竞争作用; $RYT=1.0$  表明 2 物种需要相同的资源,且一种可以通过竞争将另一种排出去。 $CB_a>0$  说明物种 a 的竞争能力比物种 b 强; $CB_a=0$  说明物种 a 和物种 b 竞争能力相等; $CB_a<0$  说明物种 a 的竞争能力比物种 b 弱; $CB_a$  越大说明物种 a 的竞争能力越强。

水浮莲与水稻混种条件下株高、根长、分蘖数、生物量、土壤养分、产量影响等采用 DPS v9.01 版软件单因素方差分析(One-Way ANOVA)和 Duncan's 新复极差法进行分析,种间竞争影响采用单一样本  $t$  测验(one samples  $t$  test)分别比较  $RY$ 、 $RYT$  与 1、 $CB$  与 0 的差异性。

## 2 结果和分析

### 2.1 水浮莲与水稻混种对形态和生物量的影响

研究表明,水浮莲与水稻混种对其株高、分蘖数、生物量和有性繁殖等具有明显的差异(表 1)。水浮莲母株株高单种时显著大于混种,随水稻密度比例增加而逐渐降低;水稻基株株高单种时显著小于混种,随水浮莲密度比例升高而逐渐增加;各混种比例下水稻对水浮莲株高的抑制率明显大于其受到的抑制率。水浮莲母株根长单种时显著小于多数混种,比例 1:1 时最大为 19.29 cm,然后总体上随水稻混种比例升高和减少而逐渐降低;水稻基株根长单种时显著小于混种,随水浮莲密度比例升高而逐渐增加;各混种比例下水稻对水浮莲根长的抑制率明显大于其受到的抑制率。分蘖数方面,单种和混种时水稻基株分蘖数明显高于水浮莲;水浮莲基株分蘖数单种时显著大于混种,比例 1:1 时最小为 1.25,然后随水稻混种比例升高和减少而逐渐增加;水稻基株分蘖数单种时显著小于混种,随水浮莲密度比例升高而逐渐增加;各混种比例下水稻对水浮莲分蘖数的抑制率明显大于其受到的抑制率。

表 1 混种条件下水浮莲与水稻的形态特征和生物量(平均值±标准差)

Table 1 Morphological characteristics and biomass of *P. stratiotes* and rice in mixed culture (mean ± SD)

项目 Item		水浮莲与水稻混种比例 Mixture ratios						
		6:0	5:1	3:1	1:1	1:3	1:5	0:6
株高	水浮莲母株 Mother ramet	4.77±0.10a	3.71±0.03bc	3.79±0.06b	3.71±0.02c	3.69±0.03c	3.56±0.05d	-
Height/cm	水稻基株 Genet	-	86.55±0.49a	81.89±1.54b	86.34±3.17a	76.39±0.95c	76.83±1.34c	70.93±1.09d
根长	水浮莲母株 Mother ramet	17.40±0.37c	17.43±0.52c	18.59±0.53b	19.29±0.21a	17.49±0.19c	18.01±0.21b	-
Root length/cm	水稻基株 Genet	-	48.39±1.05b	49.51±0.51a	48.61±0.32ab	35.28±0.76c	35.06±0.54c	34.10±0.32d
分蘖数	水浮莲基株 Genet	3.13±0.15a	2.26±0.04c	1.62±0.02d	1.25±0.06e	1.67±0.04d	2.51±0.06b	-
Tiller number	水稻基株 Genet	-	10.12±0.10a	8.33±0.03b	7.61±0.03c	6.16±0.08d	5.21±0.09e	5.02±0.08f
开花/结籽株数 Flowering/ panicles number	水浮莲基株 Genet	3.34±0.05a	2.85±0.06c	2.01±0.06d	1.82±0.04e	2.06±0.06d	2.94±0.06b	-
panicles number	水稻基株 Genet	-	7.23±0.16a	5.67±0.11b	4.99±0.06c	3.06±0.07d	2.68±0.03e	2.44±0.04f
种子数	水浮莲基株 Genet	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	-
Seed number	水稻基株 Genet	-	515.14±30.58a	468.37±21.98b	349.89±25.10c	222.62±17.01d	194.41±11.12d	142.38±12.68e
总生物量	水浮莲基株 Genet	2.57±0.03a	1.33±0.04c	0.90±0.04d	0.78±0.03e	1.55±0.08b	1.57±0.05b	-
Total biomass/g	水稻基株 Genet	-	26.10±0.24a	20.08±0.21b	16.37±0.35c	12.10±0.12d	11.03±0.12e	9.35±0.12f

同一行不同小写字母表示差异显著,相同字母表示差异不显著,显著水平为 5%

生物量方面,水浮莲基株总生物量单种时显著大于混种,比例 1:1 时最小为 0.78 g,然后随水稻混种比例升高和减少而逐渐增加;水稻基株总生物量单种时显著小于混种,随水浮莲密度比例升高而逐渐增加;各混种比例下水稻对水浮莲生物量的抑制率明显大于其受到的抑制率。有性繁殖方面,水浮莲出现了只开花不结籽或种子无法成熟的情况;水浮莲基株开花株数单种时显著大于混种,比例 1:1 时最小为 1.82,然后随水稻混种比例升高和减少而逐渐增加;水稻基株结籽株数和种子数单种时显著小于混种,随水浮莲密度比例升高而逐渐增加;各混种比例下水稻对水浮莲开花株数的抑制率明显大于其受到的抑制率。

## 2.2 水浮莲与水稻混种的竞争效应

研究表明,水浮莲相对产量(*RY*)混种比例 1:1 时最低,随水浮莲比例升高和降低而显著增加,水稻相对产量(*RY*)随水稻混种比例升高而显著降低;水浮莲的相对产量(*RY*)均显著小于 1.0 和水稻的相对产量(*RY*)均显著大于 1.0(表 2),表明水浮莲种间竞争大于种内竞争而水稻的种内竞争大于种间竞争。水浮莲与水稻混种比例大于或等于 1:1 时相对产量总和(*RYT*)显著大于 1.0,混种比例小于 1:1 时相对产量总和(*RYT*)显著小于 1.0,表明水浮莲比例较高时水浮莲和水稻不存在竞争作用,而当水稻比例较高时(水浮莲:水稻=1:3)其存在着竞争作用。水浮莲对水稻的竞争平衡指数,混种条件下水浮莲对水稻的竞争指数(*CB*)显著小于 0,表明水浮莲对水稻的竞争力小于水稻。

表 2 混种条件下水浮莲与水稻的相对产量、相对产量总和与竞争平衡指数(平均值±标准差)

Table 2 Relative yield, relative yield total and competitive balance index of *P. stratiotes* and rice in mixed culture (mean±SD)

水浮莲与水稻混种比例 Mixture ratios	水浮莲相对产量 Relative yield ( <i>RYa</i> )	水稻相对产量 Relative yield ( <i>RYb</i> )	相对产量总和 Relative yield total ( <i>RYT</i> )	竞争平衡指数 Competitive balance index ( <i>CBa</i> )
5:1	0.52±0.01b**	2.79±0.16a**	1.66±0.08a**	-1.68±0.03c**
3:1	0.35±0.02c**	2.15±0.14b**	1.25±0.07b**	-1.82±0.04d**
1:1	0.31±0.01d**	1.75±0.03c**	1.03±0.02c**	-1.73±0.04c**
1:3	0.61±0.03a**	1.29±0.06d**	0.95±0.04d*	-0.75±0.02b**
1:5	0.61±0.02a**	1.18±0.01e*	0.89±0.01e**	-0.66±0.03a**

同一列数值后小写字母相同表示在 5%水平上差异不显著,反之则显著;用 *t* 测验检验各值与 1.0 和 0 差异显著性, \* 和 \*\* 分别表示 0.05 和 0.01 水平显著

## 2.3 水浮莲与水稻混种对水稻产量的影响

由表 3 可见,与单种时相比水稻产量在混种条件下有明显提高,除水浮莲密度 240 株与对照组不显著外,其余各处理与对照组差异显著,最高产量为水浮莲密度 60 株时每 1 hm<sup>2</sup> 达到 5954.95 kg,最低为对照组每 1 hm<sup>2</sup> 只有 5253.31 kg。与对照组相比,每 1 hm<sup>2</sup> 水稻增产比例为 3.54%—13.38%,水浮莲密度 60 株为最大,此后随水浮莲密度增加和降低而逐渐降低。对产量构成因素进行分析可知,水稻的每穗实粒数、结实率、千粒重在对照组与各处理及各处理间的差异均不显著;水稻每 1 m<sup>2</sup> 有效穗数除水浮莲密度 240 株与对照组不显著外,其余各处理与对照组差异显著,有效穗数增长比例为 1.11%—19.37%。所有这些表明,水浮莲与水稻混种时通过增加水稻有效穗数而提高水稻产量。

表 3 混种条件下水浮莲对水稻产量和产量构成因素的影响(平均值±标准差)

Table 3 Grain yield and yield component effects of *P. stratiotes* on rice in mixed culture (mean±SD)

水浮莲密度 Density /(株/m <sup>2</sup> )	每 1 平方米有效穗数 No. of effective panicles per m <sup>2</sup>	每穗实粒数 No. of grains per panicle	结实率 Seed setting rate/%	千粒重 1000-grain weight/g	产量 Yield /(kg/hm <sup>2</sup> )	产量增量 Yield increased /%
0	383.31±12.40b	71.37±6.33a	84.28±1.25a	19.19±0.43ab	5253.31±251.39c	-
30	434.56±17.79a	68.47±3.74a	84.75±0.87a	19.07±0.51ab	5678.52±240.62ab	8.65±0.45b
60	457.56±16.65a	68.49±3.24a	84.23±0.88a	19.01±0.30ab	5954.95±281.91a	13.38±0.82a
120	437.45±17.29a	68.41±5.40a	84.81±1.88a	19.11±0.46ab	5726.96±215.68ab	9.44±0.61b
180	431.28±15.27a	69.86±3.18a	84.66±2.21a	18.89±0.32b	5675.22±129.62ab	8.49±0.45b
240	387.55±13.79b	71.39±4.51a	84.37±2.03a	19.66±0.51a	5426.57±111.42bc	3.54±0.21c

## 2.4 水浮莲与水稻混种对土壤养分的影响

研究表明,水浮莲单种时土壤有机质、氮、磷、钾,除碱解氮外所有处理的土壤含量均显著小于其空白对照(表 4),其中水浮莲对有机质和速效钾消耗是最大的,与空白对照处理消耗量差异分别达到 18.66—34.09 g/kg 和 664.93—683.67 mg/kg,表明水浮莲生长需消耗大量的土壤养分。随水浮莲单种密度增加,土壤有机质、氮、磷和钾含量绝大多数处理显著地提高,表明种植密度越低对土壤养分消耗越大,这与水浮莲单独种植的分蘖能力和生物量积累相关。试验中,单种时随水浮莲种植密度降低其分蘖数和分蘖植株生物量显著提高,水浮莲密度 30 株时分蘖数和总生物量为最大,每基株平均分别为 38.16 和 43.25 g;

表 4 单种和混种条件下水浮莲与水稻对土壤养分的影响(平均值±标准差)  
 Table 4 Impacts of *P. stratiotes* and rice on soil nutrients in single and mixed culture (mean ± SD)

土层深 Depth of soil/cm	水浮莲密度 Density/(株/m <sup>2</sup> )					
	0	30	60	120	180	240
有机质 Organic matter / (g/kg)						
单种水浮莲土层 0—15 Single growing soil layer 0—15	81.78±1.49a	47.69±2.45d	58.49±1.79c	61.87±0.86b	62.75±1.38b	63.12±0.97b
混种水浮莲土层 0—15 Mixed growing soil layer 0—15	81.78±1.49a	67.67±2.28b	64.75±2.15bc	63.97±1.64c	63.64±3.59c	63.44±2.37c
混种水稻土层 15—30 Mixed growing soil layer 15—30	81.78±1.49a	37.21±2.11b	35.95±3.29bc	33.96±2.74bc	33.06±1.61c	33.82±0.97bc
全氮 Total nitrogen / (g/kg)						
单种水浮莲土层 0—15 Single growing soil layer 0—15	2.21±0.04a	1.10±0.14e	1.49±0.09d	1.52±0.06c	1.58±0.02c	1.61±0.02b
混种水浮莲土层 0—15 Mixed growing soil layer 0—15	2.21±0.04a	1.65±0.17b	1.58±0.19b	1.61±0.17b	1.62±0.23b	1.62±0.06b
混种水稻土层 15—30 Mixed growing soil layer 15—30	2.21±0.04a	0.81±0.14b	0.69±0.10bc	0.59±0.06cd	0.54±0.08d	0.55±0.08cd
全磷 Total phosphorous/ (g/kg)						
单种水浮莲土层 0—15 Single growing soil layer 0—15	1.23±0.02a	0.69±0.03e	0.89±0.03d	0.96±0.04c	1.01±0.03b	1.05±0.04b
混种水浮莲土层 0—15 Mixed growing soil layer 0—15	1.23±0.02a	1.09±0.04b	1.06±0.13b	1.07±0.07b	1.03±0.11b	1.05±0.08b
混种水稻土层 15—30 Mixed growing soil layer 15—30	1.23±0.02a	0.82±0.03b	0.83±0.08b	0.86±0.13b	0.89±0.11b	0.93±0.07b
全钾 Total potassium/ (g/kg)						
单种水浮莲土层 0—15 Single growing soil layer 0—15	2.01±0.07a	0.15±0.02e	0.21±0.02e	0.61±0.04d	0.98±0.28c	1.25±0.04b
混种水浮莲土层 0—15 Mixed growing soil layer 0—15	2.01±0.07a	1.49±0.32b	1.35±0.24b	1.30±0.23b	1.27±0.09b	1.27±0.08b
混种水稻土层 15—30 Mixed growing soil layer 15—30	2.01±0.07a	1.19±0.16b	1.20±0.08b	1.22±0.04b	1.18±0.07b	1.20±0.14b
碱解氮 Available nitrogen/ (mg/kg)						
单种水浮莲土层 0—15 Single growing soil layer 0—15	121.37±1.53a	99.96±2.44d	112.23±0.51c	98.43±1.37d	115.75±1.92b	119.12±1.02a
混种水浮莲土层 0—15 Mixed growing soil layer 0—15	121.37±1.53a	121.14±3.69a	117.98±3.44a	118.16±2.08a	117.82±2.81a	120.24±3.26a
混种水稻土层 15—30 Mixed growing soil layer 15—30	121.37±1.53a	31.26±3.91b	29.43±2.25b	28.66±2.35b	28.23±2.42b	27.89±3.35b
速效磷 Available phosphorous / (mg/kg)						
单种水浮莲土层 0—15 Single growing soil layer 0—15	71.32±0.65a	27.64±0.53e	30.87±0.88d	36.31±0.52c	41.57±0.51b	42.43±0.91b
混种水浮莲土层 0—15 Mixed growing soil layer 0—15	71.32±0.65a	59.14±2.67b	58.17±3.17b	59.43±2.59b	58.75±2.03b	57.91±2.38b
混种水稻土层 15—30 Mixed growing soil layer 15—30	71.32±0.65a	37.34±0.54b	37.95±1.78b	37.56±2.63b	37.94±1.99b	37.44±3.44b
速效钾 Available potassium/ (mg/kg)						
单种水浮莲土层 0—15 Single growing soil layer 0—15	693.88±6.70a	10.21±0.89d	14.08±0.05d	23.99±0.52c	28.45±0.77b	28.95±0.67b
混种水浮莲土层 0—15 Mixed growing soil layer 0—15	693.88±6.70a	217.75±8.68b	213.35±1.40b	209.71±10.67b	203.62±11.90b	204.26±11.53b
混种水稻土层 15—30 Mixed growing soil layer 15—30	693.88±6.70a	442.73±17.84b	438.04±17.97b	457.13±11.53b	458.62±16.33b	458.37±20.92b

而水浮莲 240 株时分蘖数和总生物量为最小,分别为 6.03 和 14.71 g。混种条件下除碱解氮外,水浮莲所有处理土壤有机质、氮、磷、钾含量均显著小于其空白对照(表 4),其中对有机质和速效钾消耗为最大,与空白对照处理消耗量差异分别达到 14.11—18.34 g/kg 和 476.13—490.26 mg/kg;总体上随水浮莲混种密度增加土壤有机质、氮、磷、钾含量逐渐降低,但绝大多数各处理间的差异不显著,这与水浮莲单种时的变化趋势相反,说明混种水稻降低水浮莲对土壤养分消耗,但其种植密度对土壤养分消耗的影响较小。对比同等密度下水浮莲单种与混种时对土壤养分吸收表明,水稻混种时对水浮莲土壤养分消耗抑制率为:有机质 1.71%—58.61%,全氮 1.67%—49.55%,全磷 0.00%—74.07%,全钾 2.63%—72.04%,碱解氮 36.83%—98.93%,速效磷 53.58%—72.12%,速效钾 26.32%—30.36%。

混种时所有处理水稻土壤有机质、氮、磷、钾含量均显著小于其空白对照(表 4),其中水稻对有机质和速效钾消耗是最大的,与空白对照处理消耗量差异分别为 44.57—48.72 g/kg 和 235.26—255.84 mg/kg,表明水稻生长需要消耗大量的土壤养分。土壤有机质、氮、磷和钾含量在绝大多数各处理间的差异并不显著,表明水浮莲种植密度对水稻吸收土壤养分的影响很小,主要原因是水浮莲和稻根长差别大而形成 2 个不同深度的土层,且各土层间相互影响小。对比单种水浮莲和混种水稻土壤养分含量,水浮莲土壤钾、磷含量明显低于水稻土,而有机质、氮含量明显高于水稻土,表明水浮莲生长过程中需消耗土壤中更多的钾、磷元素,而水稻则消耗土壤中更多的有机质和氮元素。

### 3 讨论与结论

在生物入侵过程中,外来入侵植物通常凭借较强的表现可塑性、竞争能力和对土壤理化性质改变等<sup>[28-31]</sup>快速适应入侵环境和形成对本地物种的危害。种间竞争关系中的形态特征和生物量是最直接和重要的指标,与本地物种相比入侵种通常具有一些较强的形态可塑性和较高的生物量<sup>[32]</sup>。然而,本研究中入侵植物水浮莲与作物水稻相比,在形态特征和生物量上都处于明显的劣势。申时才等<sup>[23]</sup>研究发现单独种植水浮莲时随初始种植密度增加水浮莲种内竞争强度逐渐增大。本研究从生物量对比发现,与水稻混种时水浮莲同时存在较强的种内和种间竞争而大大削减其竞争力。各混种比例下,水浮莲相对产量均显著小于 1.0 和水稻相对产量均显著大于 1.0,说明水浮莲种间竞争大于种内竞争而水稻的种内竞争大于种间竞争。水浮莲与水稻混种比例大于或等于 1:1 时相对产量总和显著大于 1.0,混种比例小于 1:1 时相对产量总和显著小于 1.0,说明水浮莲比例较高时水浮莲和稻不存在竞争作用,而当水稻比例较高时(水浮莲:水稻=1:3)其存在着竞争作用。从竞争平衡指数看,混种条件下水浮莲对水稻的竞争指数显著小于 0,用 *t* 测验检验各值与 0 的差异达到显著水平,说明水浮莲对水稻的竞争力小于水稻。

水浮莲与水稻都属于喜光单子叶水生植物,但在形态特征方面具有明显区别。水浮莲植株矮小,分蘖能力强<sup>[23]</sup>,很少或只有在温度适宜条件下才能进行有性繁殖<sup>[15]</sup>;而水稻植株高大,分蘖能力适中,有性繁殖能力极强。水浮莲和稻混种时占据不同生态位,水稻茎秆高大而有利于光照争夺。混种早期水浮莲繁殖速度较快,随水稻生长而稻底光照条件逐步减弱水浮莲繁殖速度逐渐减弱,尤其是到后期由于光照条件越来越差水浮莲出现个体变小、老叶和新生繁殖体逐渐死亡,这与单种水浮莲的情况一致<sup>[23]</sup>。混种条件下水浮莲母株株高随水浮莲混种比例减少而逐渐降低;水浮莲母株根长在混种比例 1:1 为最大,然后总体上随水稻混种比例升高和减少而逐渐降低;水浮莲基株分蘖数、开花株数和总生物量在混种比例 1:1 为最小,然后随水稻混种比例升高和减少而逐渐增加。水稻基株株高、分蘖数、结籽株数、种子量和总生物量随水浮莲与水稻混种比例升高而逐渐增加。从水浮莲和稻竞争的相互抑制率看,水稻混种对水浮莲的抑制率显著大于其受到的抑制率。水浮莲混种有利于促进水稻产量增加,增产比例为 3.54%—13.38%,主要原因是水浮莲显著增加水稻产量构成因素中的有效穗数。混种过程中水浮莲与水稻没有争肥现象,水浮莲根系短,其吸收利用的肥料大部分来自灌溉水和表土层。而且,生长后期随水浮莲新生个体和根部叶片的逐步死亡腐烂还会增加土壤中养分含量,从而不仅不会阻碍水稻生长和降低产量,还有增加水稻产量的趋势。

水浮莲生长迅速、根系庞大、叶片含水率达 87%—91%<sup>[33]</sup>,可通过吸收和积累生存环境中的大量养分<sup>[18, 34-35]</sup>。本研究发现,水浮莲和稻生长都需要消耗大量的土壤养分,其中消耗最大的是有机质和速效钾;水浮莲对土壤钾、磷元素的消耗大于水稻,而有机质和氮元素的消耗小于水稻。单种时,随水浮莲密度增加绝大多数处理的土壤有机质、氮、磷和钾含量显著地提高,说明越低的种植密度对土壤养分消耗越大,这与申时才等<sup>[23]</sup>的前期研究结果一致。水浮莲单种时随种植密度降低水浮莲幼苗分蘖数、开花株数、总生物量和分蘖生物量(总、叶、花、根)逐渐升高,而水浮莲母株生物量、母株叶生物量和母株花生物量逐渐降低,说明在固定生长空间内随种植密度增加水浮莲种内竞争强度逐渐增大而会削弱其生长与繁殖能力<sup>[23]</sup>。本研究中,土壤养分的这种变化趋势可能是低密度下随水浮莲净增生物量的快速和大量积累而吸收土壤中的大量养分造成的。混种时,总体上随水浮莲种植密度增加土壤有机质、氮、磷、钾含量逐渐降低,但绝大多数各处理间的差异不显著,这与水浮莲单种时变化趋势相反,说明水稻混种降低水浮莲对土壤养分消耗,但其种植密度对土壤养分消耗的影响较小。混种时水稻土壤有机质、氮、磷和钾含量与对照组差异显著,但各处理间的差异不显著,说明水浮莲与水稻在土壤养分上不存在竞争关系,主要是由于水浮莲和稻根长差异形成不同深度的土壤根系造成的。

总之,本研究表明无论是形态特征还是生物量方面,水浮莲与水稻相比都完全处于劣势。水稻混种可抑制水浮莲生长繁殖,降低对土壤养分消耗;而水浮莲混种对水稻吸收利用土壤养分的影响小,对水稻生长繁殖有促进作用和增产趋势。在正常耕作水稻田中,适当的水浮莲种植可满足饲料需求,对水稻影响小,但需防止其通过稻田水流进入沟渠、湖泊。关于水浮莲与

稻混种对稻田杂草群落的影响、化感作用、生理特征等有待于进一步深入研究,以便为水稻套种或稻田入侵水浮莲的合理利用和管理提供更加全面和深入的基础理论。

致谢:感谢加拿大西三一大学(Trinity Western University, Canada)生物学系 David Roy Clements 博士对英文摘要的润色。

## References:

- [ 1 ] Chen H Z, Zhu D F. The rice production and ecosystem in the world. *Hybrid Rice*, 2003, 18(5): 1-4.
- [ 2 ] Han H H, Zhou Y J, Chen X, Yu L Q. Inhibitory effects of mixed-planting of rice varieties with different weed-tolerant potentials on *Echinochloa crus-galli*. *Chinese Journal of Rice Science*, 2007, 21(3): 319-322.
- [ 3 ] Deng F, Wang L, Liu L, Liu D Y, Ren W J, Yang W Y. Effects of cultivation methods on dry matter production and yield of rice under different ecological conditions. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(10): 1930-1942.
- [ 4 ] Wang W X, Liu X J, Tian Y C, Yao X, Cao W X, Zhu Y. Effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(22): 7053-7060.
- [ 5 ] Wang X, Dai T B, Jiang D, Jing Q, Cao W X. Yield-formation and source sink characteristics of rice genotypes under two different eco-environments. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(4): 615-619.
- [ 6 ] Zhu W D, Zhang H J, Tu S X, Wei S H, Li L. Effects of *Monochoria vaginalis* on growth and yield properties of rice and its control economic threshold estimation. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(9): 1204-1209.
- [ 7 ] Ottis B V, Talbert R E. Barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) control and rice density effects on rice yield components. *Weed Technology*, 2007, 21(1): 110-118.
- [ 8 ] Xiang H M, Zhang J E, Luo M Z, Zhao B L, Quan G M. Effects of intercropping rice with *Oenanthе javanica* on diseases, pests, and weeds hazards and yield of rice. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(1): 58-63.
- [ 9 ] Zhang J X, Li C H, Lou Y L, Deng Y Y, Qiu C Y. Studies on the transplanting rice yield loss caused by weed *Alternanthera philoxeroides* and its economic threshold. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2004, 20(1): 95-98.
- [ 10 ] Yu L Q, Fujii Y, Zhou Y J, Zhang J P, Lu Y L, Xuan S N. Response of aquatic *Alternanthera philoxeroides* to environmental factors and its competition with rice. *Chinese Journal of Rice Science*, 2007, 21(2): 209-214.
- [ 11 ] Liu Y F, Peng M F, Zeng Q G, Su W J, Wang C C, Liu W H, Wan F H. Growth characteristics of alligator weed (*Alternanthera philoxeroides*) in rice ecosystems and effects on rice growth and development. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(8): 1043-1047.
- [ 12 ] Gong Q W, Li P, Li L F, Li L. Effects of transplanted Barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) on growth and yield of rice. *Chinese Journal of Rice Science*, 1995, 9(2): 103-107.
- [ 13 ] Holm L G, Plucknett D L, Pancho J V, Herberger J P. *The World's Worst Weeds: Distribution and Biology*. Honolulu: University Press of Hawaii, 1977: 609.
- [ 14 ] Shen S C, Zhang F D, Xu G F, Li T L, Wu D, Zhang Y H. Occurrence and infestation of invasive weed in crop field in Yunnan. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 25(2): 554-561.
- [ 15 ] Dray F A J R, Center T D. Seed production by *Pistia stratiotes* L. (water lettuce) in the United States. *Aquatic Botany*, 1989, 33(1/2): 155-160.
- [ 16 ] Adebayo A A, Briski E, Kalaci O, Hernandez M, Ghabooli S, Beric B, Chan F T, Zhan A, Fifield E, Leadley T, MacIsaac H J. Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and water lettuce (*Pistia stratiotes*) in the Great Lakes; Playing with fire?. *Aquatic Invasions*, 2011, 6(1): 91-96.
- [ 17 ] Kengne I M, Brissaud F, Akoa A, Eteme R A, Nya J, Ndikeyfor A, Fonkou T. Mosquito development in a macrophyte-based wastewater treatment plant in Cameroon (Central Africa). *Ecological Engineering*, 2003, 21(1): 53-61.
- [ 18 ] Lin Y F, Jing S R, Wang T W, Lee D Y. Effects of macrophytes and external carbon sources on nitrate removal from groundwater in constructed wetlands. *Environmental Pollution*, 2002, 119(3): 413-420.
- [ 19 ] Mufarrege M M, Hadad H R, Maine M A. Response of *Pistia stratiotes* to heavy metals (Cr, Ni, and Zn) and phosphorous. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2010, 58(1): 53-61.
- [ 20 ] Rahman M A, Hasegawa H. Aquatic arsenic: Phytoremediation using floating macrophytes. *Chemosphere*, 2011, 83(5): 633-646.
- [ 21 ] Zimmles Y, Kirzhner F, Malkovskaja A. Application of *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes* for treatment of urban sewage in Israel. *Journal of Environmental Management*, 2006, 81(4): 420-428.
- [ 22 ] Abida B. Concurrent removal and accumulation of Fe<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> and Cu<sup>2+</sup> from waste water using aquatic macrophytes. *Der Pharma Chemica*, 2009, 1(1): 219-224.
- [ 23 ] Shen S C, Xu G F, Zhang F D, Jin G M, Li T L, Zhang Y H. Morphological and growth responses of *Pistia stratiotes* to different densities and its impact on soil nutrients. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(6): 1041-1047.
- [ 24 ] de Wit C T. On competition. *Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen*, 1960, 66(8): 1-82.
- [ 25 ] Li B. *Plant Competition-Experiments on Interaction between Crop and Grass*. Beijing: Higher Education Press, 2001: 40-71.
- [ 26 ] Fowler N. Competition and coexistence in a North Carolina grassland. III. Mixtures of Component Species. *Journal of Ecology*, 1982, 70(1):

77-92.

- [27] Wilson J B. Shoot competition and root competition. *The Journal of Applied Ecology*, 1988, 25(1): 279-296.
- [28] Shen S C, Xu G F, Li T L, Zhang F D, Zhang Y H. Comparative study of compensatory response and morphological plasticity of five invasive plants. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, 32(1): 173-179.
- [29] Keddy P, Nielsen K, Weiher E, Lawson R. Relative competitive performance of 63 species of terrestrial herbaceous plants. *Journal of Vegetation Science*, 2002, 13(1): 5-16.
- [30] Haubensak K A, Parker I M. Soil changes accompanying invasion of the exotic shrub *Cytisus scoparius* in glacial outwash prairies of western Washington. *Plant Ecology*, 2004, 175(1): 71-79.
- [31] Belnap J, Phillips S L. Soil biota in an ungrazed grassland: response to annual grass (*Bromus tectorum*) invasion. *Ecological Applications*, 2001, 11(5): 1261-1275.
- [32] Jiang Z L, Liu W X, Wan F H, Li Z Y. Measurements of plant competition ability and their applications: A review. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(6): 985-992.
- [33] Zhao N, Yang B, Bao C J, Su Q W. Effect of different methods on *Pistia stratiotes* moisture determination. *Guangzhou Chemical Industry and Technology*, 2012, 40(2): 103-104.
- [34] Gofur M, Erkin R, Sultan A, Abdurkerim R. Practice of purifying city wastewater by water lettuce (*Pistia stratiotes* L.). *China Environmental Science*, 2002, 22(3): 268-271.
- [35] Lou M, Liao B H, Liu H Y, Zou Y Z. Study of three aquatic floating plants to treat the water eutrophication. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(3): 194-195.

#### 参考文献:

- [1] 陈惠哲, 朱德峰. 全球水稻生产与稻作生态系统概况. *杂交水稻*, 2003, 18(5): 1-4.
- [2] 韩豪华, 周勇军, 陈欣, 余柳青. 抗草潜力不同的水稻品种混合种植对稗草的抑制作用. *中国水稻科学*, 2007, 21(3): 319-322.
- [3] 邓飞, 王丽, 刘利, 刘代银, 任万军, 杨文钰. 不同生态条件下栽培方式对水稻干物质生产和产量的影响. *作物学报*, 2012, 38(10): 1930-1942.
- [4] 王唯道, 刘小军, 田永超, 姚霞, 曹卫星, 朱艳. 不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响. *生态学报*, 2012, 32(22): 7053-7060.
- [5] 王勋, 戴廷波, 姜东, 荆奇, 曹卫星. 不同生态环境下水稻基因型产量形成与源库特性的比较研究. *应用生态学报*, 2005, 16(4): 615-619.
- [6] 朱文达, 张宏军, 涂书新, 魏守辉, 李林. 鸭舌草对水稻生长和产量性状的影响及其防治经济阈值的研究. *中国生态农业学报*, 2012, 20(9): 1204-1209.
- [8] 向慧敏, 章家恩, 罗明珠, 赵本良, 全国明. 水稻与水芹间作栽培对水稻病虫害和产量的影响. *生态与农村环境学报*, 2013, 29(1): 58-63.
- [9] 张俊喜, 李慈厚, 娄远来, 邓渊钰, 仇彩云. 空心莲子草对移栽水稻的为害损失及经济阈值研究. *上海农业学报*, 2004, 20(1): 95-98.
- [10] 余柳青, Fujii Y, 周勇军, 张建萍, 陆永良, 玄松南. 水生生物型空心莲子草 (*Alternanthera philoxeroides*) 对环境因子的反应及与水稻的竞争. *中国水稻科学*, 2007, 21(2): 209-214.
- [11] 刘雨芳, 彭梅芳, 曾强国, 苏文杰, 王成超, 刘文海, 万方浩. 空心莲子草在稻田生态系统中的生长特性及对水稻生长发育的影响. *中国生态农业学报*, 2012, 20(8): 1043-1047.
- [12] 龚庆维, 李璞, 李联芳, 李玲. 夹萼稗对水稻生长和产量的影响. *中国水稻科学*, 1995, 9(2): 103-107.
- [14] 申时才, 张付斗, 徐高峰, 李天林, 吴迪, 张玉华. 云南外来入侵农田杂草发生与危害特点. *西南农业学报*, 2012, 25(2): 554-561.
- [23] 申时才, 徐高峰, 张付斗, 金桂梅, 李天林, 张玉华. 不同密度水浮莲的形态和生长反应及其对土壤养分的影响. *生态环境学报*, 2013, 22(6): 1041-1047.
- [25] 李博. 植物竞争-作物与杂草相互作用的实验研究. 北京: 高等教育出版社, 2001: 40-71.
- [28] 申时才, 徐高峰, 李天林, 张付斗, 张玉华. 5种入侵植物补偿反应及其形态可塑性比较. *西北植物学报*, 2012, 32(1): 173-179.
- [32] 蒋智林, 刘万学, 万方浩, 李正跃. 植物竞争能力测度方法及其应用评价. *生态学杂志*, 2008, 27(6): 985-992.
- [33] 赵宁, 杨斌, 包崇杰, 苏勤伟. 不同水分测定方法对水浮莲水分测定结果的影响. *广州化工*, 2012, 40(2): 103-104.
- [34] 吾甫尔·米吉提, 艾尔肯·热合曼, 苏里坦·阿巴拜克力, 阿不都克里木·热合. 利用水浮莲 (*Pistia stratiotes* L.) 净化城市污水的实践. *中国环境科学*, 2002, 22(3): 268-271.
- [35] 娄敏, 廖柏寒, 刘红玉, 邹雅竹. 3种水生漂浮植物处理富营养化水体的研究. *中国生态农业学报*, 2005, 13(3): 194-195.

**ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33 ,No.18 Sep. ,2013 ( Semimonthly )**  
**CONTENTS**

Development of agroecology in USA .....	HUANG Guoqin, McCullough Patrick E. (5449)
Research progress on water footprint .....	MA Jing, PENG Jian (5458)
Analysis and evaluation of the eco-economic systems of the main crops (rice, cotton and rapeseed) in Jiangxi Province, China .....	SUN Weimin, OU Yizhi, HUANG Guoqin (5467)
Relationship among drought, hydraulic metabolic, carbon starvation and vegetation mortality .....	DONG Lei, LI Jiyue (5477)
Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications .....	ZENG Dongping, JIANG Liling, ZENG Congsheng, et al (5484)
Composition and fractal features of purple soil aggregates during the vegetation restoration processes in the Three Gorges Reservoir Region .....	WANG Yihao, GENG Yanghui, HUANG Zhonghua (5493)
Impacts of different surface covers on soil respiration in urban areas .....	FU Zhihong, HUYAN Jiaoqi, LI Feng, et al (5500)
Chilling sensitivities of three closely related plants with different invasiveness in South China .....	WANG Yutao, LI Chunmei, LI Shaoshan (5509)
The flower syndrome and pollination adaptation of desert rare species <i>Eremosparton songoricum</i> (litv.) Vass.(Fabaceae) .....	SHI Xiang, LIU Huiliang, ZHANG Daoyuan, et al (5516)
Competitive effect of <i>Pistia stratiotes</i> to rice and its impacts on rice yield and soil nutrients .....	SHEN Shicai, XU Gaofeng, ZHANG Fudou, et al (5523)
Photosynthetic physiological ecology characteristics of rare medicinal plants <i>Bletilla striata</i> .....	WU Mingkai, LIU Hai, SHEN Zhijun, et al (5531)
Photosynthetic responses to Solar UV radiation of <i>Gracilaria lemaneiformis</i> cultured under different temperatures and CO <sub>2</sub> concentrations .....	YANG Yuling, LI Wei, CHEN Weizhou, et al (5538)
The effect of soil oxygen availability on greenhouse gases emission in a double rice field .....	QIN Xiaobo, LI Yu'e, WAN Yunfan, et al (5546)
Effects of nitrogen management on NH <sub>3</sub> volatilization and nitrogen use efficiency under no-tillage paddy fields .....	MA Yuhua, LIU Bing, ZHANG Zhisheng, et al (5556)
Study on characteristics of net photosynthetic rate of two kinds of tree shape and Impact Factors in Korla fragrant pear .....	SUN Guili, XU Min, LI Jiang, et al (5565)
Effects of sand burial on growth, survival, photosynthetic and transpiration properties of <i>Agriophyllum squarrosum</i> seedlings .....	ZHAO Halin, QU Hao, ZHOU Ruilian, et al (5574)
Effects of using plastic film as mulch combined with bunch planting on soil temperature, moisture and yield of spring wheat in a semi-arid area in drylands of Gansu, China .....	WANG Hongli, SONG Shangyou, ZHANG Xucheng, et al (5580)
Study on soil aggregates stability of mulberry ridge in Rocky Desertification based on Le Bissonnais method .....	WANG Sanshu, HUANG Xianzhi, SHI Dongmei, et al (5589)
Effects of fertilization on nitrogen loss with different forms via runoff and seepage under <i>Phyllostachy praecox</i> stands .....	CHEN Peipei, WU Jiasen, ZHENG Xiaolong, et al (5599)
Characteristics of physiological groups of soil nitrogen-transforming microbes in different vegetation types in the Loess Gully region, China .....	XING Xiaoyi, HUANG Yimei, AN Shaoshan, et al (5608)
Effects of vegetation types on soil microbial biomass C, N, P on the Loess Hilly Area .....	ZHAO Tong, YAN Hao, JIANG Yueli, et al (5615)
Influence of mulching management on soil microbe and its relationship with soil nutrient in <i>Phyllostachys praecox</i> stand .....	GUO Ziwu, YU Wenxian, CHEN Shuanglin, et al (5623)
Effect of rainfall on the seasonal variation of soil respiration in Hulunber Meadow Steppe .....	WANG Xu, YAN Yuchun, YAN Ruirui, et al (5631)
Spatial heterogeneity of fine roots in a subtropical evergreen broad-leaved forest and their sampling strategy based on soil coring method .....	HUANG Chaochao, HUANG Jinxue, XIONG Decheng, et al (5636)
Changes of leaf traits and WUE with crown height of four tall tree species .....	HE Chunxia, LI Jiyue, MENG Ping, et al (5644)
Sap flow dynamics of <i>Populus alba</i> L.× <i>P.talassica</i> plantation in arid desert area .....	ZHANG Jun, LI Xiaofei, LI Jianguo, et al (5655)
Effects of simulated temperature increase and vary little quality on litter decomposition .....	LIU Ruipeng, MAO Zijun, LI Xinghuan, et al (5661)
The effects of leaf stoichiometric characters on litter turnover in an arid-hot valley of Jinsha River, China .....	YAN Bangguo, JI Zhonghua, HE Guangxiong, et al (5668)
Comparison of concentrations of non-structural carbohydrates between new twigs and old branches for 12 temperate species .....	ZHANG Haiyan, WANG Chuankuan, WANG Xingchang (5675)
Combined effects of root cutting, auxin application, and potassium fertilizer on growth, sugar, nicotine ratio, and organic potassium index of flue-cured tobacco .....	WU Yanhui, XUE Lixin, XU Zicheng, et al (5686)
Effects of photoperiod and high fat diet on energy intake and thermogenesis in female <i>Apodemus chevrieri</i> .....	GAO Wenrong, ZHU Wanlong, MENG Lihua, et al (5696)
Effects of dietary chlorogenic acid supplementation on antioxidant system and anti-low salinity of <i>Litopenaeus vannamei</i> .....	WANG Yun, LI Zheng, LI Jian, et al (5704)

- Responses of desert plant diversity, community and interspecific association to soil salinity gradient ..... ZHANG Xueni, LÜ Guanghui, YANG Xiaodong, et al (5714)
- Community characteristics in a chronosequence of karst vegetation in Mashan county, Guangxi ..... WEN Yuanguang, LEI Liqun, ZHU Hongguang, et al (5723)
- Association between environment and community of *Pinus taiwanensis* in Daiyun Mountain ..... LIU Jinfu, ZHU Dehuang, LAN Siren, et al (5731)
- The dynamics of soil fauna community during litter decomposition at different phenological stages in the subtropical evergreen broad-leaved forests in Sichuan basin ..... WANG Wenjun, YANG Wanqin, TAN Bo, et al (5737)
- Seasonal dynamics and content of soil labile organic carbon of mid-subtropical evergreen broadleaved forest during natural succession ..... FAN Yuexin, YANG Yusheng, YANG Zhijie, et al (5751)
- The stoichiometric characteristics of C, N, P for artificial plants and soil in the hinterland of Taklimakan Desert ..... LI Congjuan, LEI Jiaqiang, XU Xinwen, et al (5760)
- A preliminary investigation on the population and behavior of the Tundra Swan (*Cygnus columbianus*) in Poyang Lake ..... DAI Nianhua, SHAO Mingqin, JIANG Lihong, et al (5768)
- Effects of nutrient enrichment and fish stocking on succession and diversity of phytoplankton community ..... CHEN Chun, LI Sijia, XIAO Lijuan, HAN Boping (5777)
- The depositional environment and organic sediment component of Dagze Co, a saline lake in Tibet, China ..... LIU Shasha, JIA Qinxian, LIU Xifang, et al (5785)
- Spatiotemporal variation of interacting relationships among multiple provisioning and regulating services of Tibet grassland ecosystem ..... PAN Ying, XU Zengrang, YU Chengqun, et al (5794)
- Spatial distribution of dissolved amino acids in Lake Taihu, China ..... YAO Xin, ZHU Guangwei, GAO Guang, et al (5802)
- RS- and GIS-based study on ecological function regionalization in the Chaohu Lake Basin, Anhui Province, China ..... WANG Chuanhui, WU Li, WANG Xinyuan, et al (5808)
- Trends of spring maize phenophases and spatio-temporal responses to temperature in three provinces of Northeast China during the past 20 years ..... LI Zhengguo, YANG Peng, TANG Huajun, et al (5818)
- Species selection for landscape rehabilitation and their response to environmental factors in Poyang Lake wetlands ..... XIE Dongming, JIN Guohua, ZHOU Yangming, et al (5828)
- Temporal and spatial pattern of the phytoplankton biomass in the Pearl River Delta ..... WANG Chao, LI Xinhui, LAI Zini, et al (5835)
- Spatio-temporal dynamics of land use/land cover and its driving forces in Nanjing from 1995 to 2008 ..... JIA Baoquan, WANG Cheng, QIU Erfa (5848)
- Changes of organic carbon and its labile fractions in topsoil with altitude in subalpine-alpine area of southwestern China ..... QIN Jihong, WANG Qin, SUN Hui (5858)
- The carbon sink of urban forests and efficacy on offsetting energy carbon emissions from city in Guangzhou ..... ZHOU Jian, XIAO Rongbo, ZHUANG Changwei, et al (5865)
- Groundwater salt content change and its simulation based on machine learning model in hinterlands of Taklimakan Desert ..... FAN Jinglong, LIU Hailong, LEI Jiaqiang, et al (5874)
- Analysis of coordination degree between urban development and water resources potentials in arid oasis city ..... XIA Fuqiang, TANG Hong, YANG Degang, et al (5883)
- Constructing an assessment indices system to analyze integrated regional carrying capacity in the coastal zones: a case in Nantong ..... WEI Chao, YE Shufeng, GUO Zhongyang, et al (5893)
- Fish species diversity in Zhongjieshan Islands Marine Protected Area (MPA) ..... LIANG Jun, XU Hanxiang, WANG Weiding (5905)
- Distribution and long-term changes of net-phytoplankton in the tidal freshwater estuary of Changjiang during wet season ..... JIANG Zhibing, LIU Jingjing, LI Hongliang, et al (5917)
- Study of urban metabolic structure based on ecological network: a case study of Dalian ..... LIU Gengyuan, YANG Zhifeng, CHEN Bin, et al (5926)
- Factors influencing of residents' tolerance towards wild boar in and near nature reserve: Taking the Heilongjiang Fenghuangshan Nature Reserve as the example ..... XU Fei, CAI Tiju, JU Cunyong, et al (5935)
- Herdsmen's willingness to participate in ecological protection in Sanjiangyuan Region, China ..... LI Huimei, ZHANG Anlu, WANG Shan, et al (5943)
- Analysis of first flush in rainfall runoff in Shenyang urban city ..... LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, et al (5952)

# 《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,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

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

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,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 18 期 (2013 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA  
(Semimonthly, Started in 1981)  
Vol. 33 No. 18 (September, 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

主 编 王如松  
主 管 中国科学技术协会  
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

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 WANG Rusong  
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 90.00 元