

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

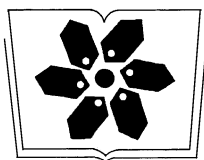
## Acta Ecologica Sinica



第32卷 第7期 Vol.32 No.7 **2012**

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 32 卷 第 7 期      2012 年 4 月    (半月刊)

## 目 次

城市生态景观研究的基础理论框架与技术构架 .....	孙然好, 许忠良, 陈利顶, 等 (1979)
拟南芥芥子酸酯对 UV-B 辐射的响应 .....	李 敏, 王 垠, 牟晓飞, 等 (1987)
蛋白核小球藻对 Pb( II ) 和 Cd( II ) 的生物吸附及其影响因素 .....	姜 晶, 李 亮, 李海鹏, 等 (1995)
梨枣在果实生长期对土壤水势的响应 .....	韩立新, 汪有科, 张琳琳 (2004)
产业生态系统资源代谢分析方法 .....	施晓清, 杨建新, 王如松, 等 (2012)
基于物质流和生态足迹的可持续发展指标体系构建——以安徽省铜陵市为例 .....	..... 赵卉卉, 王 远, 谷学明, 等 (2025)
河北省县域农田生态系统供给功能的健康评价 .....	白琳红, 王 卫, 张 玉 (2033)
温郁金内生真菌 <i>Chaetomium globosum</i> L18 对植物病原菌的抑菌谱及拮抗机理 .....	..... 王艳红, 吴晓民, 朱艳萍, 等 (2040)
基于稳定碳同位素技术的华北低丘山区核桃-小麦复合系统种间水分利用研究 .....	..... 何春霞, 孟 平, 张劲松, 等 (2047)
云贵高原喀斯特坡耕地土壤微生物量 C、N、P 空间分布 .....	张利青, 彭晚霞, 宋同清, 等 (2056)
水稻根系通气组织与根系泌氧及根际硝化作用的关系 .....	李奕林 (2066)
苹果绵蚜对不同苹果品种春梢生长期生理指标的影响 .....	王西存, 于 毅, 周洪旭, 等 (2075)
磷高效转基因大豆对根际微生物群落的影响 .....	金凌波, 周 峰, 姚 涓, 等 (2082)
基于 MODIS-EVI 数据和 Symlet11 小波识别东北地区水稻主要物候期 .....	..... 徐岩岩, 张佳华, YANG Limin (2091)
基于降水利用比较分析的四川省种植制度优化 .....	王明田, 曲辉辉, 杨晓光, 等 (2099)
气候变暖对东北玉米低温冷害分布规律的影响 .....	高晓容, 王春乙, 张继权 (2110)
施肥对巢湖流域稻季氨挥发损失的影响 .....	朱小红, 马中文, 马友华, 等 (2119)
丛枝菌根真菌对枳根净离子流及锌污染下枳苗矿质营养的影响 .....	肖家欣, 杨 慧, 张绍铃 (2127)
不同 R:FR 值对菊花叶片气孔特征和气孔导度的影响 .....	杨再强, 张 静, 江晓东, 等 (2135)
神农架海拔梯度上 4 种典型森林凋落物现存量及其养分循环动态 .....	刘 蕾, 申国珍, 陈芳清, 等 (2142)
黄土高原刺槐人工林地表凋落物对土壤呼吸的贡献 .....	周小刚, 郭胜利, 车升国, 等 (2150)
贵州雷公山秃杉种群生活史特征与空间分布格局 .....	陈志阳, 杨 宁, 姚先铭, 等 (2158)
LAS 测算森林冠层上方温度结构参数的可行性 .....	郑 宁, 张劲松, 孟 平, 等 (2166)
基于 RS/GIS 的重庆缙云山自然保护区植被及碳储量密度空间分布研究 .....	..... 徐少君, 曾 波, 苏晓磊, 等 (2174)

模拟氮沉降增加对寒温带针叶林土壤 CO<sub>2</sub> 排放的初期影响 ..... 温都如娜,方华军,于贵瑞,等 (2185)

桂江流域附生硅藻群落特征及影响因素..... 邓培雁,雷远达,刘 威,等 (2196)

小浪底水库排沙对黄河鲤鱼的急性胁迫..... 孙麓垠,白音包力皋,牛翠娟,等 (2204)

上海池塘养殖环境成本——基于双边界二分式 CVM 法的实证研究 ..... 唐克勇,杨正勇,杨怀宇,等 (2212)

稻纵卷叶螟绒茧蜂对寄主的搜索行为 ..... 周 慧,张 扬,吴伟坚 (2223)

农林复合系统中灌木篱墙对异色瓢虫种群分布的影响..... 严 飞,周在豹,王 朔,等 (2230)

苹果脱乙酰几丁质发酵液诱导苹果叶片对斑点落叶病的早期抗性反应.....  
..... 王荣娟,姚允聪,戚亚平,等 (2239)

专论与综述

气候变化影响下海岸带脆弱性评估研究进展..... 王 宁,张利权,袁 琳,等 (2248)

外来红树植物无瓣海桑引种及其生态影响 ..... 彭友贵,徐正春,刘敏超 (2259)

问题讨论

城市污泥生物好氧发酵对有机污染物的降解及其影响因素..... 余 杰,郑国砥,高 定,等 (2271)

4 种绿化树种盆栽土壤微生物对柴油污染响应及对 PAHs 的修复 ..... 闫文德,梁小翠,郑 威,等 (2279)

研究简报

云南会泽铅锌矿废弃矿渣堆常见植物内生真菌多样性..... 李东伟,徐红梅,梅 涛,等 (2288)

南方根结线虫对不同砧木嫁接番茄苗活性氧清除系统的影响 ..... 梁 朋,陈振德,罗庆熙 (2294)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 322 \* zh \* P \* ¥ 70.00 \* 1510 \* 37 \* 2012-04



**封面图说:** 站立的仓鼠——仓鼠为小型啮齿类动物,栖息于荒漠、荒漠草原等地带的洞穴之中。白天他们往往会躲在洞穴中睡觉和休息,以避开天敌的攻击,偶尔也会出来走动,站立起来警惕地四处张望。喜欢把食物藏在腮的两边,然后再走到安全的地方吐出来,由此得仓鼠之名。它们的门齿会不停的生长,所以它们的上下门齿必须不断啃食硬东西来磨牙,一方面避免门齿长得太长,妨碍咀嚼,一方面保持门牙的锐利。仓鼠以杂草种子、昆虫等为食。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com



DOI: 10.5846/stxb201108131186

徐岩岩, 张佳华, Limin Yang. 基于 MODIS-EVI 数据和 Symlet11 小波识别东北地区水稻主要物候期. 生态学报, 2012, 32(7): 2091-2098.

Xu Y Y, Zhang J H, Yang L M. Detecting major phenological stages of rice using MODIS-EVI data and Symlet11 wavelet in Northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(7): 2091-2098.

# 基于 MODIS-EVI 数据和 Symlet11 小波识别 东北地区水稻主要物候期

徐岩岩<sup>1</sup>, 张佳华<sup>1,\*</sup>, YANG Limin<sup>2</sup>

(1. 中国气象科学研究院遥感与气候信息开放实验室, 北京, 100081;

2. U. S. Geological Survey, Center for Earth Resources Observation and Science, SD, USA)

**摘要:**作物物候信号能够反映温度和降水等变化对植被生长的影响, 是进行农作物动态分析和田间管理的重要依据。基于 2008 年 EOS-MODIS 多时相卫星遥感数据, 研究了我国东北地区水稻的主要物候期的识别方法。首先提取研究区 24 个农业气象观测站所在位置的 MODIS-EVI (Enhanced Vegetation Index, 增强型植被指数) 指数的时间序列; 同时利用小波滤波消除时间序列上的噪音, 小波滤波选用函数包含 Daubechies (7—20), Coiflet (3—5) 和 Symlet (7—15) 共 26 种类型。然后根据水稻移栽期、抽穗期和成熟期在 EVI 时间序列上的表现特征来识别水稻主要物候期。最后与东北地区 24 个站点水稻物候观测资料对比并分析误差。结果表明, Symlet11 小波滤波的效果最好, 其移栽期识别结果的误差绝大部分在  $\pm 16$  d, 抽穗期和成熟期识别结果的误差在  $\pm 8$  d。表明通过此方法可以较好地识别东北水稻主要物候期, 并可进一步应用到整个东北地区水稻的物候空间分布和时间变化特征研究上。

**关键词:**水稻; 物候; MODIS; 小波滤波; 东北地区

## Detecting major phenological stages of rice using MODIS-EVI data and Symlet11 wavelet in Northeast China

XU Yanyan<sup>1</sup>, ZHANG Jiahua<sup>1,\*</sup>, YANG Limin<sup>2</sup>

1 Laboratory for Remote Sensing and Climatic Information Sciences, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

2 U. S. Geological Survey, Center for Earth Resources Observation and Science, SD, USA

**Abstract:** Plant phenology refers to the emergence of an annual cycle of natural phenomena in plants affected by climate and other environmental factors. Information of crop phenology can directly reflect the effect of temperature and precipitation on the crop, which is essential for evaluating crop growth, productivity and crop management. Remote sensing technique is an important method to detect vegetation phenology with high spatial-temporal scales. Vegetation index generated by infrared and near-infrared band based on satellite remotely sensed data can reflect the status of vegetation growth and coverage more accurately. The Northeast China includes Liaoning, Jilin and Heilongjiang provinces, which rice area accounts for about 10% of total rice area and its rice yield accounts for 11% of total rice yield in China. Rice planting in Northeast China plays an important role in China's food safety. In this study, we developed a method for detecting phenological stages of rice in Northeast China based on the EOS-MODIS multi-temporal remote sensing data, including MOD09A1 and MCD12Q1 in 2008. The rice crop phenological stages were detected by using EOS-MODIS Enhanced Vegetation Index (EVI) data, and

**基金项目:**全球变化研究国家重大科学研究计划课题 (2010CB951302); 公益类行业 (气象) 专项 (GYHY201106027); 农业科技成果转化项目 (2011GB24910007)

收稿日期: 2011-08-13; 修订日期: 2012-02-01

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangjh@cams.cma.gov.cn

compared with the observed rice phenological stages in 24 selected agro-meteorological sites in Northeast China. The method consists of four procedures: (1) calculating the EVI value and extracting time profile from the location where 24 selected sites through MODIS-EVI data; (2) filtering the noise in EVI time profile by wavelet transform with twenty six types of wavelets; (3) identifying the rice planting date, heading date and ripening date by the variation characteristics in the smoothed EVI time profile; (4) comparing the result calculated by this method with the observed data from the 24 agro-meteorological sites in study area in 2008 and calculating the root mean square error (RMSE), then choosing the best type of wavelets. Due to the temporal resolution of the MODIS/Terra is 8 days, there will be missing data in the EVI time profile. The cubic spline interpolated (CSI) method (more smoother and stabler) was applied to repair the missing data, which can reflect the missing data more authentic. The twenty six types of wavelet: Daubechies(7—20), Coiflet(3—5) and Symlet(7—15) were used when filtering EVI time profile. The results showed that, the case using Symlet11 shows a remarkably good result in determining phenological stages, which is compared with the observed data. Most of the RMSE in planting date were less than 16 days. Most of the RMSE in heading date and ripening date were less than 8 days. It was shown that the Symlet11 filtering is the best method, which can be used to detect rice phenology in Northeast China. Furthermore, the Symlet11 filtering can be used to analyze variations and distribution of rice phenology with high-spatial scale in the whole Northeast China.

**Key Words:** rice; phenology; MODIS; wavelet filtering; Northeast China

植物物候是指植物受气候和其他环境因子的影响出现的以年为周期的自然现象,包括植物的发芽、展叶、开花、叶变色、落叶等,是植物长期适应环境的周期性变化而形成的生长发育规律<sup>[1]</sup>。它不但能直观地表现季节的交替,还能反应出植物对自然环境变化的适应性<sup>[2-4]</sup>。农作物作为陆地生态系统的一部分,研究农作物物候变化规律对预报农时、作物估产和气候变化的影响等具有重要价值。

传统的物候观测方法是基于站点的目测观察法,受到空间的限制比较大,遥感的发展为物候的大面积观测成为可能。基于卫星遥感数据的近红外波段和红外波段生成的植被指数(如 NDVI、EVI 等)可较准确地反映植被生长和覆盖状况<sup>[5]</sup>,为基于遥感监测植物物候提供了条件。国内外学者通过遥感数据监测物候变化已经进行了大量的研究,陈效述等<sup>[6]</sup>基于 NOAA-NDVI(Normalized Difference Vegetation Index,归一化差值植被指数)曲线的年型聚类分析和空间聚类分析,得出我国暖温带落叶阔叶林地区 1982—1999 年植被物候季节初日和生长季节长度的时空格局。辛景峰等<sup>[7]</sup>基于冬小麦在 NOAA-NDVI 等采用条件时间内差平滑法对数据进行平滑,并根据时间序列上的表现特征提取并分析了冬小麦的主要物候期特征。王宏等<sup>[8]</sup>基于 NOAA/AVHRR NDVI 和 MSAVI 指数利用阈值法和滑动平均法监测了中国北方植被生长规律。Nicolas 等<sup>[9]</sup>基于 NOAA/AVHRR NDVI 和 SPOT-VGT 数据在剔除了融雪影响的前提下,根据植被在其时间序列上的表现特征分析了欧亚大陆北方地区的物候时空变化。

相比与 NOAA 数据,MODIS 数据的光谱通道和观测角度得到了改进,在空间分辨率和时间分辨率上都有较大的提高,并且改进了大气校正和去云等功能<sup>[10]</sup>,越来越多的学者采用 MODIS 数据进行物候的提取。张明伟等<sup>[11]</sup>基于 MODIS 数据提取了华北地区冬小麦和夏玉米的物候期,并描述了分布格局。Zhang 等<sup>[12]</sup>提出采用 Logistic 模型对 MODIS 植被指数进行拟合来提取植被物候。Verbesselt 等<sup>[13]</sup>采用谐波季节性模型从 MODIS-NDVI 时间序列提取植被物候,并研究其季节性变化和趋势。Kang 等<sup>[14]</sup>基于 MODIS-LAI 产品提取了朝鲜半岛的温带混交林的始叶期。

本文在前人研究的基础上,针对东北地区水稻物候提出了一种新的提取方法。首先选取了 26 种小波滤波类型,然后运用小波滤波方法对 MODIS-EVI 时间序列进行滤波,根据水稻各物候期在 EVI 时间序列上的表现特征进行提取;同时基于东北地区 24 个农作物物候观测站点的观测资料,验证了 26 种小波函数对水稻物候提取的精度,从众多小波函数中确定了精度最高的一种。为进一步分析整个东北地区物候的空间分布和时

间变化及作物物候对气候变化的响应提供方法。

## 1 研究区域概况

东北地区包括黑龙江、吉林、辽宁三省,土地总面积 78.73 万 km<sup>2</sup>,占全国的 8.2%;而东北地区耕地面积大,约占全国耕地面积的 20%。东北地区土壤多为黑土,含有较高的有机质,土层深厚,土壤肥沃,规模化生产水平高。该区属于大陆性季风气候,四季分明、雨热同期,日照充足,昼夜温差较大,这种独特的气候和土壤条件为水稻高产优质提供了条件。2006 年水稻种植面积达 322 万 hm<sup>2</sup>,占全国的 10%,总产占全国水稻总产的 11%。东北稻区已成为世界上最大的以种植早、中熟粳稻为主的优质粳稻产区,在我国水稻生产中占有重要的地位<sup>[15]</sup>。

## 2 研究数据和方法

### 2.1 研究数据

#### 2.1.1 卫星遥感数据

卫星遥感数据使用 2008 年的 MODIS 数据,数据名称是“MODIS/Terra surface reflectance 8-day Global 500 m SIN GRID v005”,简称 MOD09A1,下载地址(<https://lpdaac.usgs.gov/>)。MOD09A1 数据是 500 m 地表反射率 8 d 合成产品,包含 7 个波段,时间分辨率为 8 d。该产品对大气和气溶胶的散射进行了系统地校正了,并最大程度地降低了云及其阴影影响(<http://modis-sr.ltdri.org>)。

#### 2.1.2 土地利用和统计数据

本文采用 MODIS2008 年的 MCD12Q1 土地利用图,空间分辨率为 500 m,下载地址(<https://lpdaac.usgs.gov/>)。MODIS 土地覆盖类型产品是根据 1a 的 Terra 和 Aqua 观测所得的数据经过处理来描述土地覆盖的类型。该土地覆盖数据集中包含了 5 种分类方案,分别为国际地圈生物圈计划(IGBP)全球植被分类方案、马里兰大学(UMD)植被分类方案、MODIS 提取叶面积指数/光合有效辐射分量(LAI/fPAR)方案、MODIS 提取净第一生产力(NPP)方案、植被功能型(PFT)分类方案(<http://www-modis.bu.edu/landcover/userguide/c/>)。本文选择了第 5 种植被功能型(PFT)分类方案,土地类型分为:水、常绿林、落叶林、灌木、草地、谷物作物、阔叶作物、城市、雪冰和稀疏植被区。东北地区水稻物候观测数据来源于中国气象局气象资料中心 2008 年的农作物生长发育数据,该数据包括东北 24 个种植水稻的农业气象站点的水稻各个生育期、生育期普遍开始时间及发育程度资料。站点分布见图 1。

### 2.2 数据处理

#### 2.2.1 植被指数

本文采用增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index,简写 EVI)进行分析,EVI 和叶面积(LAI)指数线性相关;与 NDVI 相比,其在高生物量地区有更高的敏感性。同时,当湿度较高时,EVI 比 NDVI 的效果要好很多,在雨季时 EVI 比 NDVI 更好地监测水稻变化<sup>[16]</sup>。因此研究选取 EVI 作为识别水稻植被变化的依据,其计算方法见公式:

$$EVI = 2.5 \times \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + 6.0 \times \rho_R - 7.5 \times \rho_B + 1} = 2.5 \times \frac{B_2 - B_1}{B_2 + 6.0 \times B_1 - 7.5 \times B_3 + 1} \quad (1)$$

式(1)中, $\rho_{NIR}$  为近红外波段即 MODIS 数据的第 2 波段(841—876 nm), $\rho_R$  为可见光红波段即 MODIS 数据的第 1 波段(620—670 nm), $\rho_B$  为可见光蓝波段即 MODIS 数据的第 3 波段(459—479 nm)。

#### 2.2.2 像元 EVI 数据提取

在东北地区已知种植水稻的 24 个站点,结合 MODIS 土地利用图,提取站点周围 5×5 个像元内种植类型为谷类作物的像元 EVI 值,并将这些像元 EVI 的平均值作为该站点 EVI 值。

#### 2.2.3 数据插值

由于 MODIS 反射率的数据是每 8 d 测定 1 次,为了较好填补中间空缺的数值,本文采用 3 次样条插值。它的光滑程度较高,保证了插值函数二阶导数的连续性,同时 3 次样条插值的数值较稳定<sup>[17]</sup>。3 次样条插值

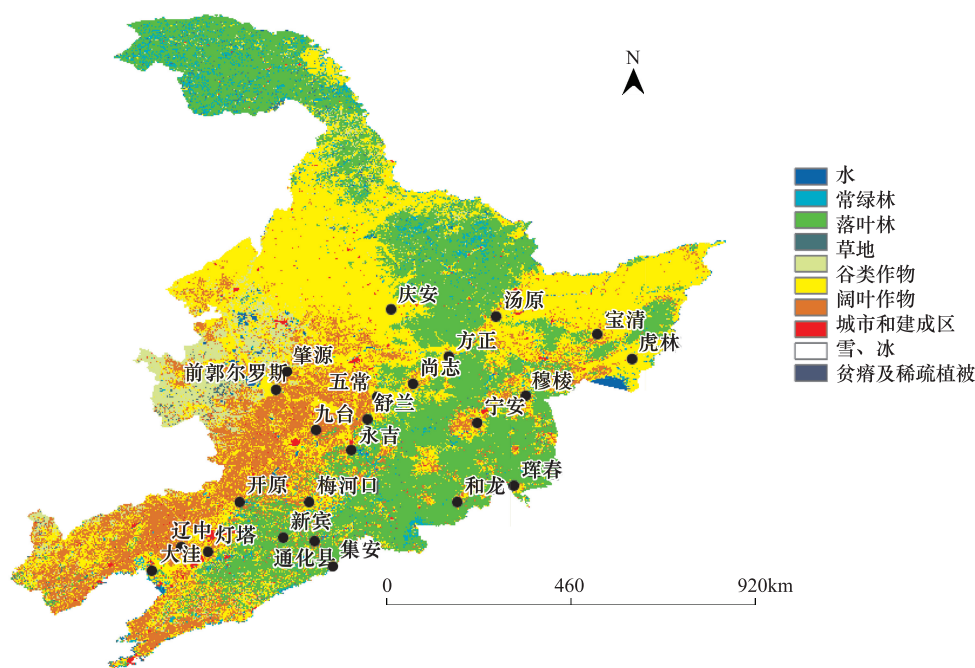


图1 东北土地利用类型和24个农业气象站点分布图

Fig. 1 Land use types and 24 Agro-meteorological sites location in Northeast China

较线性插值可更好地反映数值的真实数据。

#### 2.2.4 小波分析去除 EVI 时间序列噪音

小波分析广泛应用于去除时间序列噪音<sup>[18-20]</sup>。连续小波变换公式表示为:

$$c(\text{scale}, \text{position}) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \varphi(\text{scale}, \text{position}, t) dt \quad (2)$$

式(2)中,  $c$  是连续小波变换后产生的小波系数, 它是缩放因子 (scale) 和位置 (position) 的函数。连续小波变换的计算量很大, 为了减少计算量, 采用双尺度小波变换, 又称为离散小波变换, 缩放因子和平移参数都选  $2^j$  ( $j > 0$  的整数) 的倍数。

离散小波变换运算的第一步是将小波分为低频部分和离散部分。进行滤波时保留低频部分, 去除离散部分, 低频部分代表了时间序列的主要特征, 第二步再对低频部分进行相似运算, 依次进行直到所需要的尺度<sup>[21]</sup>。本研究利用离散小波变换对 EVI 的时间序列进行滤波, 用以去除 EVI 曲线的噪音。根据统计资料, 东北水稻的生育期长度一般为 90—160 d。为了较好地反应 EVI 时间序列的变化, 进行两次滤波, 其中缩放因子和平移参数分别设置为  $2^5$  ( $=32$ ) 和  $2^6$  ( $=64$ ), 最后将两次的滤波结果进行平均, 最终得到平滑的 EVI 时间序列。小波滤波可以去除噪音并且可以很好的保留时间序列的局部特性。选用的小波函数为: Daubechies (7—20), Coiflet (3—5) 和 Symlet (7—15), 总共 26 种小波类型。图 2 为庆安站点经过 Symlet11 小波滤波的 EVI 时间序列图。

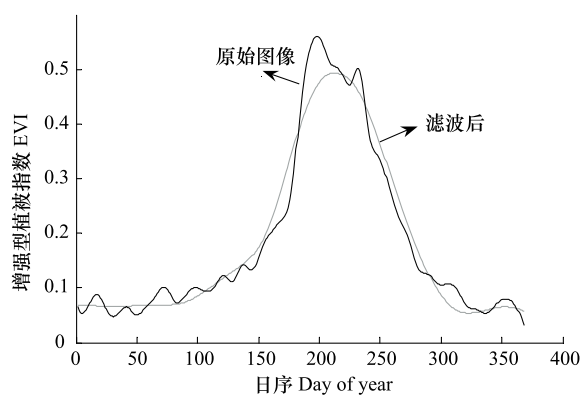


图2 庆安站点(46.88°N, 127.48°E)经过 Symlet11 小波滤波的 EVI 时间序列图

Fig. 2 The EVI time series after Symlet11 wavelet low \ pass filter at Qing'an site



2.3 水稻关键物候期识别算法

2.3.1 抽穗期

首先确定水稻抽穗期。水稻在幼穗分化后进入生殖生长阶段,并在抽穗前完成最后一片叶的生长,此时 LAI 达到最大,之后叶片逐渐衰老枯死<sup>[22]</sup>,对应 EVI 曲线上 EVI 指数的最大值即为水稻抽穗期。

2.3.2 移栽期

水稻移栽后,稻田开始出现秧苗,并在短时间内返青<sup>[23]</sup>,EVI 开始略有增加,根据这一特点可以确定移栽期。具体通过下面的方法:(1)确定最小点(即 EVI 的一阶导数为 0,且由负变正)和拐点(二阶导数为 0,且由负变正;由于移栽期后 EVI 迅速增加,为了获得更好的识别效果,EVI 二阶导数的数值由 0 改为  $10^{-4}$ );(2)选择这两个点靠后的点为移栽期(在移栽期生物量比其他生育期要小很多,仅通过一个特殊点来判断 EVI 曲线上微小的变化存在一些困难,所以通过两个点的对比来确定移栽期)。

2.3.3 成熟期

水稻进入乳熟期后籽粒淀粉不断积累,干、鲜重持续增加,蜡熟期时谷壳开始变黄;同时,由于籽粒灌浆对同化物的竞争,水稻叶片逐渐衰老枯黄,叶绿素含量迅速下降<sup>[24]</sup>,LAI 随之明显减小,也是 EVI 指数下降速率最大的时期,把此作为识别水稻成熟期的依据。在 EVI 曲线上表现为 EVI 曲线的二阶导数为 0,并且从负变为正,且这个点位于已经确定的抽穗期的后 40 d 左右。3 个主要生育期在 EVI 时间序列图上的变化特征见图 3。

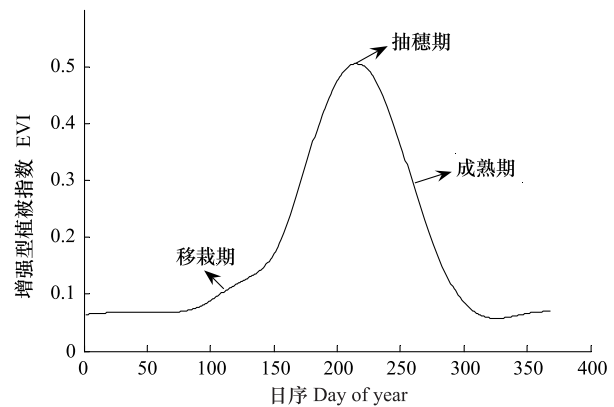


图 3 水稻主要物候期在经过小波低通滤波平滑处理后在 EVI 时间序列上的特征示意图

Fig. 3 The EVI time series chart for the rice phenological stages after Symlet11 wavelet low-pass filter at Qing'an site

3 结果与分析

在对 EVI 时间序列进行小波滤波后,根据上述算法,即可实现对水稻的移栽期、抽穗期和成熟期识别。为了验证利用多时相 MODIS 数据对水稻关键生长发育期的识别效果,根据算法得出的结果与中国气象局气象资料中心提供的东北 24 个站点的水稻物候观测数据进行比较,并基于均方根误差 (root mean square error, RMSE) 的计算结果(假设气象台站的观测数据为真值),选出了效果较好的 10 种小波类型(表 1)。通过对比,发现 Symlet11 小波效果最好,均方根误差相对较小,稳定性较高。

表 1 不同小波滤波提取的物候期与观测值的均方根误差比较

Table 1 Comparison of RMSE between phenological stages estimated by different wavelets and observational data

小波类型 Wavelet type	移栽期 Planting stage/d	抽穗期 Heading stage/d	成熟期 Ripening stage/d
Daubechies8	14.6	7.7	8.6
Daubechies9	12.0	8.5	10.0
Daubechies12	14.7	8.1	11.0
Daubechies16	12.6	8.1	9.8
Daubechies19	16.1	8.9	13.0
Symlet7	14.8	7.2	13.0
Symlet11	12.4	8.4	7.7
Symlet13	14.2	8.1	7.9
Symlet15	12.9	8.0	8.4
Coiflet5	16.8	8.1	14.0



利用 Symlet11 小波对 EVI 时间序列进行滤波平滑,根据水稻物候期识别算法提取水稻物候期。图 4 和图 5 是 Symlet11 小波滤波后提取的水稻物候期与站点观测资料的对比结果。从图 4 中可以看出,移栽期的误差绝大部分都在 $\pm 16$  d,而抽穗期和成熟期绝大部分在 $\pm 8$  d。图 5 中可以看出,提取的珲春水稻移栽期、集安和通化县的水稻抽穗期误差较大,其他站点各生育期提取结果的误差都在一个合理的范围之内。分析相关误差可能来源:(1)由于 MODIS 数据的时间分辨率为 8 d,其中的缺值采用了 3 次样条插值,会引起一定的误差;(2)本研究所用的遥感数据很到程度上去除了云、大气及气溶胶的影响,但未能完全去除,会造成一定的影响;(3)混合像元可能的影响,由于空间分辨率的限制,一个像元中不全是水稻,会造成 EVI 值的一定偏差。上述原因一定程度上会引起水稻物候观测值和算法提取值的偏差。

整体上,此方法可提取水稻的主要物候期,并将误差控制在一个合理的范围内。基于 Symlet11 小波滤波方法并结合水稻分布图,本文给出了 2008 年东北水稻抽穗期空间分布示意图(图 6)。图 6 看出,东北水稻抽穗期大部分集中在第 210—230 天(儒略历)之间,与实际观测相符。

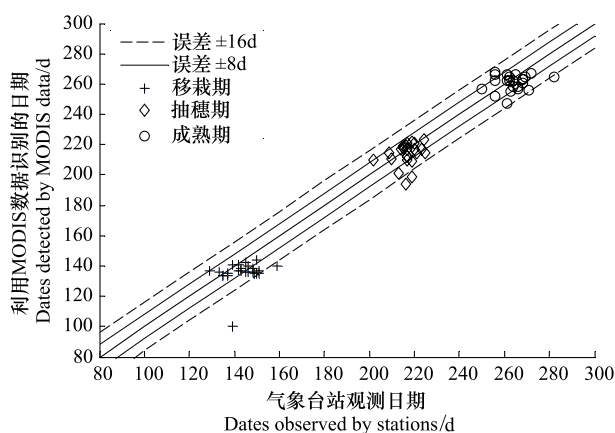


图 4 Symlet11 小波进行滤波后提取水稻物候期与站点观测资料对比分布图

Fig. 4 Comparison between rice phenological stages after Symlet11 wavelet low-pass filter and observational data

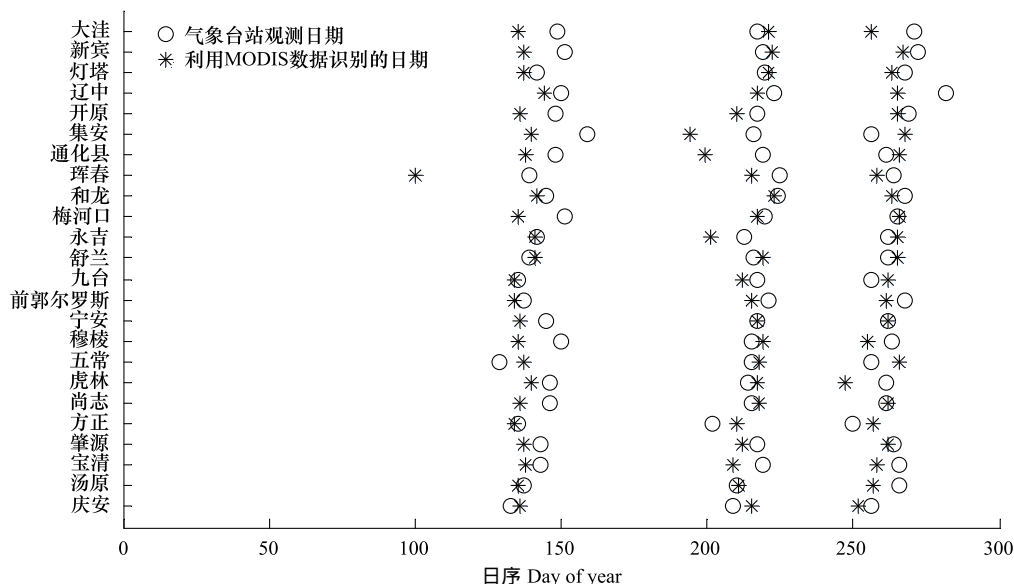


图 5 Symlet11 小波进行滤波后提取水稻物候期与 24 个站点观测统计资料的对比

Fig. 5 Comparison between rice phenological stages after Symlet11 wavelet low-pass filter and observational data at 24 sites

#### 4 结论

本文通过提取 MODIS 卫星遥感数据 8d 合成的 EVI 时间序列,在对其经过小波滤波平滑后,根据识别算法较好地提取了东北地区水稻的移栽期、抽穗期和成熟期等物候信息。其中滤波时选用的 26 种类型的小波函数中 Symlet11 小波的滤波效果最好,通过与农业气象台站的地面水稻物候统计资料比较,移栽期识别结果的误差绝大部分在 $\pm 16$  d,抽穗期和成熟期识别结果的误差绝大部分在 $\pm 8$  d,所以从整体而言结果是可靠的。本文确定的基于 MODIS-EVI 时间序列,采用 Symlet11 小波滤波来提取东北地区水稻物候的方法,可为下一步分析整个东北地区水稻主要物候期的空间分布和变化趋势以及作物物候变化对气候变化的响应提供科学

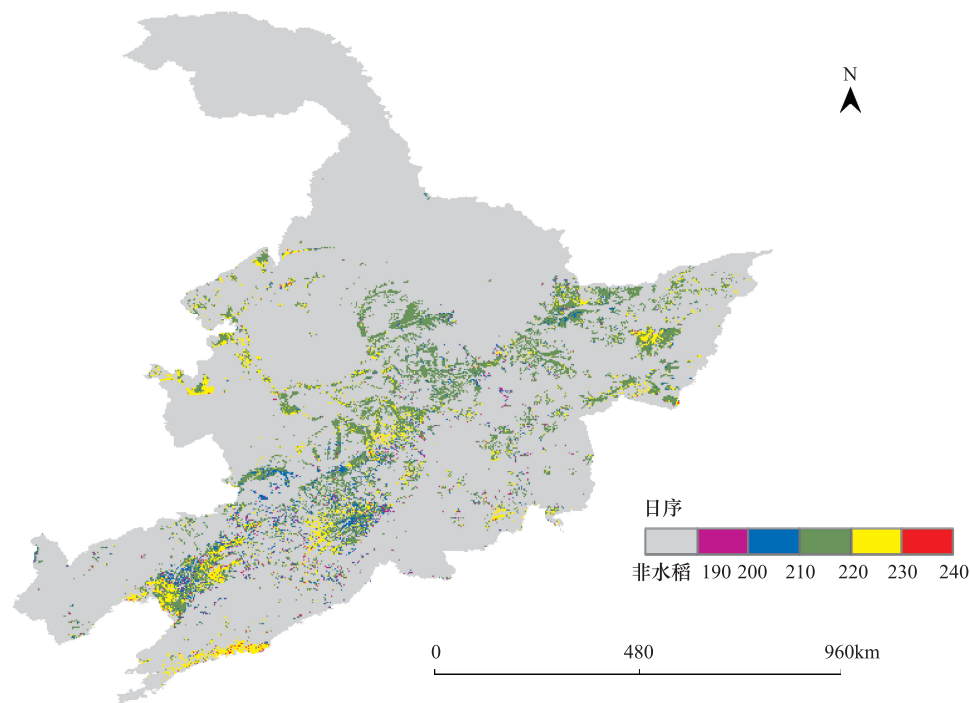


图6 东北地区水稻抽穗期空间分布图

Fig. 6 Spatial distribution of rice heading date in Northeast China

依据。

#### References:

- [ 1 ] Zhang F C. Phenology. Beijing: China Meteorological Press, 1985: 1-20.
- [ 2 ] Zhu K Z, Wei M W. Phenology. Beijing: Science Press, 1980: 2-9.
- [ 3 ] Lu P L, Yu Q, He Q T. Responses of plant phenology to climatic change. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 923-929.
- [ 4 ] Wang L, Chen H L, Li Q, Yu W D. Research advances in plant phenology and climate. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 20(2): 447-454.
- [ 5 ] Zhang J H, Li L, Yao F M. Progress in retrieving vegetation water content under different vegetation coverage condition based on remote sensing spectral information. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(6): 1638-1642.
- [ 6 ] Chen X Q, Yu R. Spatial and temporal variations of the vegetation growing season in warm-temperate eastern China during 1982 to 1999. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(1): 41-51.
- [ 7 ] Xin J F, Yu Z R, Driessen P M. Monitoring phenological key stages of winter wheat with NOAA NDVI data. *Journal of Remote Sensing*, 2001, 5(6): 442-447.
- [ 8 ] Wang H, Li X B, Li X, Ying G, Fu N. The variability of vegetation growing season in the northern China based on NOAA NDVI and MSAVI from 1982 to 1999. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2): 504-515.
- [ 9 ] Delbart N, Le Toan T, Kergoat L, Fedotova V. Remote sensing of spring phenology in boreal regions: a free of snow-effect method using NOAA-AVHRR and SPOT-VGT data (1982—2004). *Remote Sensing of Environment*, 2006, 101(1): 52-62.
- [ 10 ] Zhao Y S. Theory and Method of Analysis of Remote Sensing Application. Beijing: Science Press, 2003: 81-94.
- [ 11 ] Zhang M W. Study on the Method of Crop Phenology Detection and Crop Types Discrimination Based on MODIS Data [ D ]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006.
- [ 12 ] Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, Strahler A H, Hodges J C F, Gao F, Reed B C, Huete A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(3): 471-475.
- [ 13 ] Verbesselt J, Hyndman R, Zeileis A, Culvenor D. Phenological change detection while accounting for abrupt and gradual trends in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 114(12): 2970-2980.
- [ 14 ] Kang S Y, Running S W, Lim J H, Zhao M S, Park C R, Loehman R. A regional phenology model for detecting onset of greenness in temperate mixed forests, Korea: an application of MODIS leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(2): 232-242.

- [15] Xie L Y, Feng Y X. Rice Production in North China and Use of Climate Resources. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2009: 1-3.
- [16] Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E P, Gao X, Ferreira L G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1/2): 195-213.
- [17] Zhang Y H, Xi M C, Chen X Q. Numerical Methods and Algorithms. Beijing: Science Press, 2006: 33-40.
- [18] Khan V M, Vulfand R M, Zavialov P O. Long-term variability of air temperature in the Aral Sea region. *Journal of Marine Systems*, 2004, 47(1/4): 25-33.
- [19] Fang H T, Huang D S. Noise reduction in Lidar signal based on discrete wavelet transform. *Optics Communications*, 2004, 233(1/3): 67-76.
- [20] Li Z T, Kafatos M. Interannual variability of vegetation in the United States and its relation to El Niño/Southern Oscillation. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 71(3): 239-247.
- [21] Zheng Z Z. Wavelet Transform and Its Application of MATLAB Tools. Beijing: Earthquake Press, 2001: 2-6.
- [22] Wang S A. Crop Cultivation Theory. Beijing: China Agricultural Press, 1995: 103-106.
- [23] Lin S. Chinese Rice. Beijing: Agriculture Press, 1986: 470-475.
- [24] Wang L Q, Wang J Z. Rice Cultivation in Northeast. Changchun: Jilin People's Press, 1964: 61-63.

#### 参考文献:

- [1] 张福春. 物候. 北京: 气象出版社, 1985: 1-20.
- [2] 竺可桢, 宛敏渭. 物候学. 北京: 科学出版社, 1980: 2-9.
- [3] 陆佩玲, 于强, 贺庆棠. 植物物候对气候变化的响应. *生态学报*, 2006, 26(3): 923-929.
- [4] 王连喜, 陈怀亮, 李琪, 余卫东. 植物物候与气候研究进展. *生态学报*, 2010, 20(2): 447-454.
- [5] 张佳华, 李莉, 姚凤梅. 遥感光谱信息提取不同覆盖下植被水分信号的研究进展. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(6): 1638-1642.
- [6] 陈效述, 喻蓉. 1982—1999 年我国东部暖温带植被生长季节的时空变化. *地理学报*, 2007, 62(1): 41-51.
- [7] 辛景峰, 宇振荣, Driessen P M. 利用 NOAA NDVI 数据集监测冬小麦生育期的研究. *遥感学报*, 2001, 5(6): 442-447.
- [8] 王宏, 李晓兵, 李霞, 莺歌, 符娜. 基于 NOAA NDVI 和 MSAVI 研究中国北方植被生长季变化. *生态学报*, 2007, 27(2): 504-515.
- [10] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2003: 82-94.
- [11] 张明伟. 基于 MODIS 数据的作物物候期监测及作物类型识别模式研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2006.
- [15] 谢立勇, 冯永祥. 北方水稻生产与气候资源利用. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2009: 1-3.
- [17] 张韵华, 奚梅成, 陈效群. 数值计算方法与算法. 北京: 科学出版社, 2006: 33-40.
- [21] 郑治真. 小波变换及其 MATLAB 工具的应用. 北京: 地震出版社, 2001: 3-6.
- [22] 王树安. 作物栽培学各论 (北方本). 北京: 中国农业出版社, 1995: 103-106.
- [23] 林山. 中国稻作学. 北京: 农业出版社, 1986: 470-475.
- [24] 王良泉, 王家治. 东北水稻栽培. 长春: 吉林人民出版社, 1964: 61-63.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 7 April, 2012 (Semimonthly)

## CONTENTS

Theoretical framework and key techniques of urban ecological landscape research .....	SUN Ranhao, XU Zhongliang, CHEN Liding, et al (1979)
Response of sinapate esters in <i>Arabidopsis thaliana</i> to UV-B radiation .....	LI Min, WANG Yin, MU Xiaofei, et al (1987)
Biosorption of lead ( II ) and cadmium ( II ) from aqueous solution by <i>Chlorella pyrenoidsa</i> and its influential factors .....	JIANG Jing, LI Liang, LI Haipeng, et al (1995)
Response of pear jujube trees on fruit development period to different soil water potential levels .....	HAN Lixin, WANG Youke, ZHANG Linlin (2004)
An approach for analyzing resources metabolism of industrial ecosystems .....	SHI Xiaoqing, YANG Jianxin, WANG Rusong, et al (2012)
Establishment of environmental sustainability assessment indicators based on material flow and ecological footprint model in Tongling City of Anhui Province .....	ZHAO Huihui, WANG Yuan, GU Xueming, et al (2025)
Health status evaluation of the farmland supply function at county level in Hebei Province .....	BAI Linhong, WANG Wei, ZHANG Yu (2033)
Inhibition effects and mechanisms of the endophytic fungus <i>Chaetomium globosum</i> L18 from <i>Curcuma wenyujin</i> .....	WANG Yanhong, WU Xiaomin, ZHU Yanping, et al (2040)
Water use of walnut-wheat intercropping system based on stable carbon isotope technique in the low hilly area of North China .....	HE Chunxia, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (2047)
Spatial heterogeneity of soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in sloping farmland in a karst region on the Yunnan-Guizhou Plateau .....	ZHANG Liqing, PENG Wanxia, SONG Tongqing, et al (2056)
Relationship among rice root aerenchyma, root radial oxygen loss and rhizosphere nitrification .....	LI Yilin (2066)
Effects of <i>Eriosoma lanigerum</i> (Hausmann) on physiological indices of different apple cultivars .....	WANG Xicun, YU Yi, ZHOU Hongxu, et al (2075)
Effects of P-efficient transgenic soybean on rhizosphere microbial community .....	JIN Lingbo, ZHOU Feng, YAO Juan, et al (2082)
Detecting major phenological stages of rice using MODIS-EVI data and Symlet11 wavelet in Northeast China .....	XU Yanyan, ZHANG Jiahua, YANG Limin (2091)
Cropping system optimization based on the comparative analysis of precipitation utilization in Sichuan Province .....	WANG Mingtian, QU Huihui, YANG Xiaoguang, et al (2099)
The impacts of global climatic change on chilling damage distributions of maize in Northeast China .....	GAO Xiaorong, WANG Chunyi, ZHANG Jiquan (2110)
Effect of fertilization on ammonia volatilization from paddy fields in Chao Lake Basin .....	ZHU Xiaohong, MA Zhongwen, MA Youhua, et al (2119)
Effects of arbuscular mycorrhizal fungus on net ion fluxes in the roots of trifoliate orange ( <i>Poncirus trifoliata</i> ) and mineral nutrition in seedlings under zinc contamination .....	XIAO Jiaxin, YANG Hui, ZHANG Shaoling (2127)
The effect of red:far red ratio on the stomata characters and stomata conductance of <i>Chrysanthemum</i> leaves .....	YANG Zaiqiang, ZHANG Jing, JIANG Xiaodong, et al (2135)
Dynamic characteristics of litterfall and nutrient return of four typical forests along the altitudinal gradients in Mt. Shennongjia, China .....	LIU Lei, SHEN Guozhen, CHEN Fangqing, et al (2142)
Aboveground litter contribution to soil respiration in a black locust plantation in the Loess Plateau .....	ZHOU Xiaogang, GUO Shenli, CHE Shengguo, et al (2150)
Life history and spatial distribution of a <i>Taiwania flousiana</i> population in Leigong Mountain, Guizhou Province, China .....	CHEN Zhiyang, YANG Ning, YAO Xianming, et al (2158)
The feasibility of using LAS measurements of the turbulence structure parameters of temperature above a forest canopy .....	ZHENG Ning, ZHANG Jinsong, MENG Ping, et al (2166)
Spatial distribution of vegetation and carbon density in Jinyun Mountain Nature Reserve based on RS/GIS .....	XU Shaojun, ZENG Bo, SU Xiaolei, et al (2174)
Early nitrogen deposition effects on CO <sub>2</sub> efflux from a cold-temperate coniferous forest soil .....	WENDU Runa, FANG Huajun, YU Guirui, et al (2185)
Epilithic diatom assemblages distribution in Gui River basin, in relation to chemical and physiographical factors .....	DENG Peiyan, LEI Yuanda, LIU Wei, et al (2196)
Acute stress caused by sand discharging on Yellow River Carp ( <i>Cyprinus carpio</i> ) in Xiaolangdi Reservoir .....	SUN Luyin, Baiyinbaoligao, NIU Cuijuan, et al (2204)
Environmental cost of pond aquaculture in Shanghai: an empirical analysis based on double-bounded dichotomous CVM method .....	TANG Keyong, YANG Zhengyong, YANG Huaiyu, et al (2212)
Host searching behaviour of <i>Apanteles cypris</i> Nixon (Hymenoptera: Braconidae) ...	ZHOU Hui, ZHANG Yang, WU Weijian (2223)
The effect of hedgerows on the distribution of <i>Harmonia axyridis</i> Pallas in agroforestry systems .....	YAN Fei, ZHOU Zaibao, WANG Shuo, et al (2230)
Induction of early resistance response to <i>Alternaria alternata</i> f. sp. <i>mali</i> in apple leaves with apple and chitosan fermentation broth ...	WANG Rongjuan, YAO Yuncong, QI Yaping, et al (2239)
<b>Review and Monograph</b>	
Research into vulnerability assessment for coastal zones in the context of climate change .....	WANG Ning, ZHANG Liquan, YUAN Lin, et al (2248)
Introduction and ecological effects of an exotic mangrove species <i>Sonneratia apetala</i> .....	PENG Yougui, XU Zhengchun, LIU Minchao (2259)
<b>Discussion</b>	
Degradation of organic contaminants with biological aerobic fermentation in sewage sludge dewatering and its influencing factors .....	YU Jie, ZHENG Guodi, GAO Ding, et al (2271)
Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using four greening tree species .....	YAN Wende, LIANG Xiaocui, ZHENG Wei, et al (2279)
<b>Scientific Note</b>	
Diversity of endophytic fungi from six dominant plant species in a Pb-Zn mine wasteland in China .....	LI Dongwei, XU Hongmei, MEI Tao, et al (2288)
Effects of <i>Meloidogyne incognita</i> on scavenging system of reactive oxygen species in tomato seedlings grafted with different rootstocks ...	LIANG Peng, CHEN Zhende, LUO Qingxi (2294)



# 《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 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

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 32 卷 第 7 期 (2012 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 7 2012

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	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
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:1000717	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 70.00 元