

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第2期 Vol.33 No.2 **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 2 期 2013 年 1 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展..... 陈洪松, 聂云鹏, 王克林 (317)
- 红树林植被对大型底栖动物群落的影响 陈光程, 余 丹, 叶 勇, 等 (327)
- 淡水湖泊生态系统中砷的赋存与转化行为研究进展..... 张 楠, 韦朝阳, 杨林生 (337)
- 纳米二次离子质谱技术(NanoSIMS)在微生物生态学研究中的应用 胡行伟, 张丽梅, 贺纪正 (348)
- 城市系统碳循环: 特征、机理与理论框架 赵荣钦, 黄贤金 (358)
- 城市温室气体排放清单编制研究进展..... 李 晴, 唐立娜, 石龙宇 (367)

个体与基础生态

- 科尔沁沙地家榆林的种子散布及幼苗更新..... 杨允菲, 白云鹏, 李建东 (374)
- 环境因子对木棉种子萌发的影响 郑艳玲, 马焕成, Scheller Robert, 等 (382)
- 五花米草与短叶荳蔻落物分解过程中碳氮磷化学计量学特征 欧阳林梅, 王 纯, 王维奇, 等 (389)
- 性别、季节和体型大小对吐鲁番沙虎巢域的影响 李文蓉, 宋玉成, 时 磊 (395)
- 遮蔽行为对海刺猬摄食、生长和性腺性状的影响..... 罗世滨, 常亚青, 赵 冲, 等 (402)
- 水稻和玉米苗上饲养的稻纵卷叶螟对温度的反应 廖怀建, 黄建荣, 方源松, 等 (409)

种群、群落和生态系统

- 亚热带不同林分土壤表层有机碳组成及其稳定性 商素云, 姜培坤, 宋照亮, 等 (416)
- 禁牧条件下不同类型草地群落结构特征 张鹏莉 陈 俊 崔树娟, 等 (425)
- 高寒退化草地狼毒与赖草种群空间格局及竞争关系 任 珩, 赵成章 (435)
- 小兴安岭 4 种典型阔叶红松林土壤有机碳分解特性 宋 媛, 赵溪竹, 毛子军, 等 (443)
- 新疆富蕴地震断裂带植被恢复对土壤古菌群落的影响 林 青, 曾 军, 张 涛, 等 (454)
- 长期施肥对紫色土农田土壤动物群落的影响 朱新玉, 董志新, 况福虹, 等 (464)
- 潮虫消耗木本植物凋落物的可选择性试验 刘 燕, 廖允成 (475)
- 象山港网箱养殖对近海沉积物细菌群落的影响 裘琼芬, 张德民, 叶仙森, 等 (483)
- 2005 年夏季东太平洋中国多金属结核区小型底栖生物研究 王小谷, 周亚东, 张东声, 等 (492)
- 川西亚高山典型森林生态系统截留水文效应 孙向阳, 王根绪, 吴 勇, 等 (501)

景观、区域和全球生态

- 中国水稻生产对历史气候变化的敏感性和脆弱性 熊 伟, 杨 婕, 吴文斌, 等 (509)
- 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势 贺 伟, 布仁仓, 熊在平, 等 (519)
- 地表太阳辐射减弱和臭氧浓度增加对冬小麦生长和产量的影响 郑有飞, 胡会芳, 吴荣军, 等 (532)

资源与产业生态

- 基于环境卫星数据的黄河湿地植被生物量反演研究 高明亮, 赵文吉, 官兆宁, 等 (542)
- 黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异 陈 涛, 常庆瑞, 刘 京, 等 (554)

不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响..... 武 际,郭熙盛,鲁剑巍,等 (565)

施氮时期对高产夏玉米光合特性的影响 吕 鹏,张吉旺,刘 伟,等 (576)

城乡与社会生态

城市景观组分影响水质退化的阈值研究 刘珍环,李正国,杨 鹏,等 (586)

长株潭地区生态可持续性 戴亚南,贺新光 (595)

外源 NO 对镉胁迫下水稻幼苗抗氧化系统和微量元素积累的影响 朱涵毅,陈益军,劳佳丽,等 (603)

达里诺尔湖沉积物中无机碳的形态组成 孙园园,何 江,吕昌伟,等 (610)

绿洲土 Cd、Pb、Zn、Ni 复合污染下重金属的形态特征和生物有效性 武文飞,南忠仁,王胜利,等 (619)

柠檬酸和 EDTA 对铜污染土壤环境中吊兰生长的影响 汪楠楠,胡 珊,吴 丹,等 (631)

研究简报

海州湾生态系统服务价值评估 张秀英,钟太洋,黄贤金,等 (640)

内蒙古羊草群落、功能群、物种变化及其与气候的关系 谭丽萍,周广胜 (650)

氮磷供给比例对长白落叶松苗木磷素吸收和利用效率的影响 魏红旭,徐程扬,马履一,等 (659)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 352 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 38 * 2013-01



封面图说: 科尔沁沙地榆树——榆树疏林草原属温带典型草原地带,适应半干旱半湿润气候的隐域性沙地顶级植物群落,具有极强的适应性、稳定性,生物产量较高。在我国仅见于科尔沁沙地和浑善达克沙地。是防风固沙、保护沙区生态环境和周边土地资源的一种重要的植物群落类型,是耐旱沙生植物的重要物种基因库和荒漠野生动物的重要避难所和栖息地。这些年来,由于人类毁林开荒、过度放牧、甚至片面地建立人工林群落等的干扰,不同程度地破坏了榆树疏林的生态环境,影响了其特有的生态作用。

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

DOI: 10.5846/stxb201112051862

高明亮, 赵文吉, 宫兆宁, 赫晓慧. 基于环境卫星数据的黄河湿地植被生物量反演研究. 生态学报, 2013, 33(2): 0542-0553.

Gao M L, Zhao W J, Gong Z N, He X H. The study of vegetation biomass inversion based on the HJ satellite data in Yellow River wetland. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 0542-0553.

基于环境卫星数据的黄河湿地植被生物量反演研究

高明亮¹, 赵文吉^{1,*}, 宫兆宁¹, 赫晓慧²

(1. 首都师范大学三维信息获取与应用教育部重点实验室, 资源环境与地理信息系统北京市重点实验室,
资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 郑州大学水利与环境学院, 郑州 450001)

摘要: 回归模型拟合植被指数与生物量的定量关系是植被生物量反演的重要研究方法之一。研究在此基础上, 基于环境卫星遥感数据和同步野外实地采样数据, 以郑州黄河湿地自然保护区为试验区, 比较 MLRM(多元线性回归模型)与 SCRM(一元曲线回归模型)反演植被生物量的能力, 并估算研究区植被生物量, 生成研究区生物量分布图。结果表明, 文中所建立的 MLRM 在研究区具有较好的反演精度和预测能力。其模型显著性检验为极显著, 相关系数为 0.9791, 模型拟合精度达到 29.8 g/m², 其模型预测结果系统误差为 49.9 g/m², 均方根误差为 67.2 g/m², 预测决定系数为 0.8742, 比传统的一元回归模型具有更高的精度和可靠性。估算研究区域 2010 年 8 月湿生植被生物量约为 6.849199 t/hm², 相对误差为 4.73%。

关键词: 环境卫星; 植被指数; 生物量反演; 回归分析

The study of vegetation biomass inversion based on the HJ satellite data in Yellow River wetland

GAO Mingliang¹, ZHAO Wenji^{1,*}, GONG Zhaoning¹, HE Xiaohui²

1 Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application of Ministry of Education, Key Laboratory of Resources Environment and GIS of Beijing Municipal, College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China

2 College of Water Conservancy and Environmental Engineering, Zhengzhou University, Henan, Zhengzhou 450001, China

Abstract: Wetland vegetation is the important component of the wetland ecological system, and its biomass is one of the major indexes to measure the primary productivity. Remote sensing technology can be used effectively to extract information of wetland vegetation, which directly reflects their growth and development. Hence the research is very significant for the environment monitoring and protection of wetland ecosystems. This paper discusses the quantitative relationship between vegetation spectrum index and dry biomass of vegetation, based on the remote sensing data from China HJ-1A satellite and synchronous field sampling data, choosing the Zhengzhou Yellow River Wetland Nature Reserve as the study area.

The methods based on vegetation indexes in this study are mainly used in vegetation biomass inversion in a large area, and have conducted quite successful algorithms and models. While a single vegetation index as input factor has a high accuracy and sensitivity in fitting the vegetation biomass model, its prediction result encounter larger errors and cannot accurately reflect true information of vegetation biomass. Authors in this paper puts variety of vegetation indexes together as the comprehensive input factors, and estimates vegetation biomass in wetland by using regression analysis method. Therefore, it improves largely the precision and reliability of vegetation biomass inversion based on multiple vegetation indexes. In this paper, the biomass of vegetation is abstracted as a phenomenon, while different kinds of vegetation indexes

基金项目: 国际科技合作项目(2010DFA92400); 国家青年科学基金项目(41101095); 国家青年科学基金项目(41101404); 北京市教委科技计划面上项目(KM201110028013); 国家基础测绘项目(11221010065)

收稿日期: 2011-12-05; **修订日期:** 2012-05-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhwenji1215@163.com

are considered as different influencing factors. The relationships between them are conceptualized into different mathematical models. Authors inspect the precision of inversion by comparing the estimate results from the two kinds of methods after their using the SCRM (single curve regression model) biomass method and MLRM (multiple linear regression model) biomass method respectively. Results showed that the MLRM have good precision and prediction ability, which can be well applied to estimate the wetland vegetation. The model test is significant (hitting a level of 0.000), while the model correlation coefficient is 0.9791, fitting accuracy reaches 29.8 g/m^2 . The model prediction results has a system error of 49.9 g/m^2 , the determine coefficient is 0.8742, the RMS error is 67.2 g/m^2 , estimation of dry vegetation biomass total to 6.849199 t/hm^2 in study area, with the actual biomass estimated dry biomass has a difference of $0.323\ 749 \text{ t/hm}^2$, the result is $6.525\ 450 \text{ t/hm}^2$, and the relative error is 4.73%, which shows an accurate estimation on the biomass of wetland vegetation by using vegetation indexes extracted from HJ-1A remote sensing data, combined with field sampling data.

Wetland is one of the three large ecological systems globally, which takes a key role on the plant biodiversity protection. And it has a great environmental function and lots ecological benefits as the most productive ecological system. Method of the MLRM has a better precision and forecasting ability by comparing that of SCRM in vegetation biomass inversion when used to estimating wetland vegetation biomass. As a new method of the vegetation detection and estimation based on remote sensing technology, it has a large application value to the ecological resource management and wetland ecological environment protection.

Key Words: HJ satellite; vegetation index; biomass inversion; regression analysis

湿生植被是湿地生态系统的重要组成部分,其生物量是衡量湿地生态系统初级生产力的主要指标之一^[1]。同时,植被是湿地生态系统运行的能量基础和物质来源,是度量植被结构和功能变化的重要指标。利用现代遥感技术可以快速、有效地提取湿地的植被生物量信息,直观地反映湿地植被的生长状态和发展变化,对湿地生态环境监测和保护具有重要意义。

基于植被指数的植被生物量反演是目前大面积生物量估算的主要方法。童庆禧等^[2]开展了湿地植被成像光谱研究,对鄱阳湖湿地进行植被光谱识别分类与生物量制图;Zheng 等^[3-6]曾对植被指数反演 LAI(叶面积指数)展开过相关研究,结果表明 LAI 与多种植被指数具有良好的相关性,并得到不同植被指数反演 LAI 的估算模型;李仁东^[7]等基于 Landsat ETM 数据估算鄱阳湖湿地植被生物量,研究不同植被指数及遥感影像第一主成分与实地采样生物量数据的相关性,并建立相关性模型估算鄱阳湖 2000 年 4 月的植被生物量;吴涛^[8]、陈鹏飞^[9]等分别用一元回归方法估算辽东湾双台子河口湿地翅碱蓬和呼伦贝尔草地地上生物量;Foody^[10-12]等分别基于 TM、HJ-1A 及 SPOT 影像数据结合线性回归模型估算森林生物量;Susan 等^[13-16]多位国内外研究者都曾基于不同的遥感数据,采用不同的回归分析方法得到植被指数与不同植被生物量之间的关系模型,并且形成了比较成熟的计算体系,即采用一元线性或曲线模型来拟合不同植被指数与生物量之间的关系,并对估算结果进行精度评价,从而估算研究区域的植被生物总量或者生成研究区域的植被生物量空间分布图;Aur lie^[17]等研究基于分类树算法的湿地监测方法,认为不同季节应采用不同的植被指数作为指示因子;王立海^[18]等采用引入地形因子的增强型 B-P 神经网络建立了森林生物量非线性遥感模型,生成了总体精度为 88.04% 的研究区域森林生物量定量分布图。姚延娟^[19]等研究遥感模型多参数反演的相互影响机理,分析了反演过程中参与反演的未知参数的个数、参与反演的每个参数的敏感性及各参数敏感性之间的相关性。用单一植被指数作为输入因子,在拟合中覆盖度植被生物量时,具有较高的精度和灵敏度,而在植被覆盖不均匀的区域,其预测结果存在较大误差,不能准确地反映真实的生物量信息。研究在此基础上综合多种植被光谱指数作为输入因子,采用 MLRM 拟合生物量分布,在一定程度上提高了基于植被光谱指数的生物量估算方法的精度和可靠性。

1 数据获取与方法

1.1 研究区域概况

郑州黄河湿地自然保护区位于黄河中下游交界区域,水域辽阔,滩涂广布,湿地类型多样,是我国中部地区湿地生物多样性分布的重要地区和河流湿地中最具代表性的地区之一,也是我国鸟类重要的繁殖地、越冬地和我国候鸟迁徙的三大重要通道之一。保护区地理坐标在北纬 $34^{\circ}48'$ — $35^{\circ}06'$,东经 $112^{\circ}48'$ — $114^{\circ}14'$ 之间属暖温带大陆性季风气候区,年平均气温 14.2°C ,年平均日照为 2366 h,平均无霜期 227 d,年均降水量为 616 mm,年均蒸发量 1664.2 mm。保护区内植被种类丰富,有维管束植物 80 科 284 属 598 种。其中木本植物有 38 种,草本植物 560 种。主要植被类型有水生植被、沙生植被、盐生植被、防护林和果木林植被等。

研究区域位于郑州黄河湿地自然保护区范围内,地处郑州市北部、新乡市及焦作市南部,以黄河大堤作为南北边界(图 1)。地理坐标在北纬 $34^{\circ}54'$ — $35^{\circ}05'$,东经 $113^{\circ}15'$ — $114^{\circ}06'$ 之间,总面积为 47374 hm^2 。研究区域植被分布较均匀,由黄河沿岸至滩区混杂分布着香蒲等挺水植物群落,茅草、艾蒿、马唐、狗尾草等常见草本植物群落(多为丛生),及柽柳等小型灌木。研究对象为香蒲、芦苇、水蜈蚣、水蓼等典型湿生挺水植物以及马塘、狗尾草等为主的植物群落,约占研究区域植被的 80%—90%,为研究区域的优势种群。

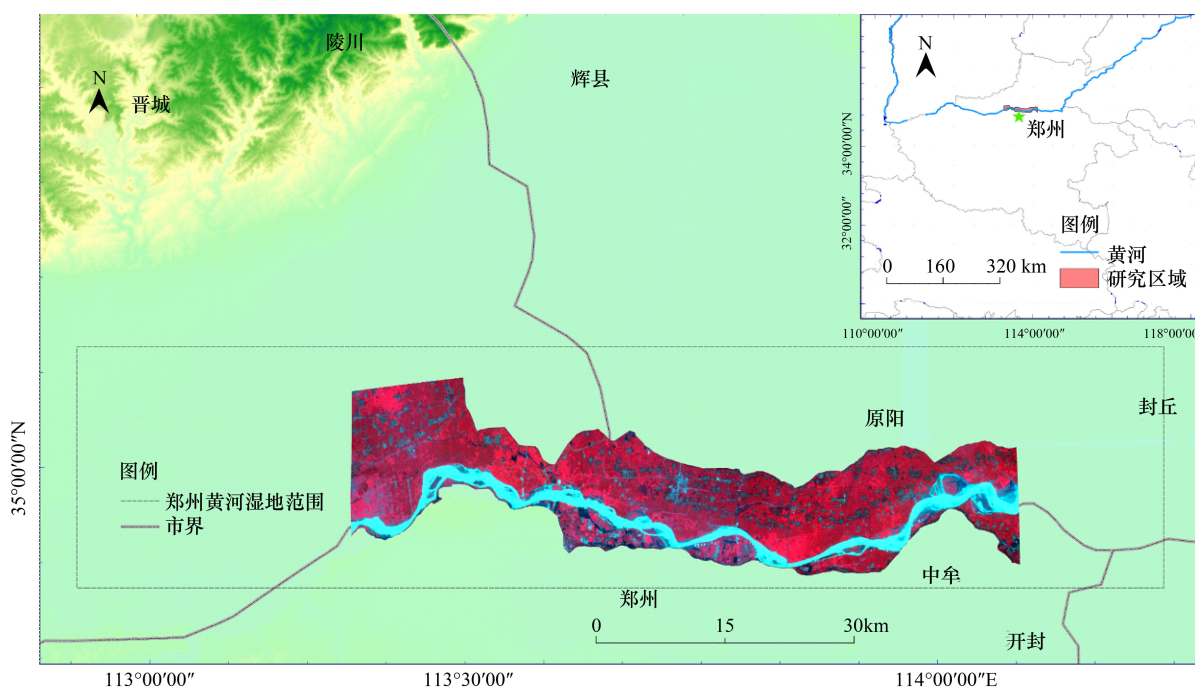


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of study area schematic plot

1.2 数据获取

1.2.1 遥感影像数据

研究的基础数据选用 2010 年 8 月 16 日获取的 HJ-1A 卫星 CCD2 多光谱影像,在选取同步影像时,考虑到数据质量和云层遮盖影响,与地面采样有 4d 的时差。影像覆盖山西省东南部、河北省南部、河南省北部及山东省西部区域。

HJ-1A 卫星 CCD 相机星下点空间分辨率为 30 m,扫描幅宽 360 km(单台),光谱范围覆盖包括蓝色波段($0.43\text{—}0.52\text{ }\mu\text{m}$)、绿色波段($0.52\text{—}0.60\text{ }\mu\text{m}$)、红色波段($0.63\text{—}0.69\text{ }\mu\text{m}$)以及近红外波段($0.76\text{—}0.90\text{ }\mu\text{m}$),可以满足植被指数提取和相关研究的要求。HJ-1A 卫星具高时空分辨率,建有配套地面系统,可以快速高效地实现数据接收、处理和分发,同时具有应急快速处理能力和快速存取能力。研究充分利用国产卫星数据特征优势,对推广国产卫星数据产品应用具有重要意义^[20]。

1.2.2 样点布设及地面实测数据

地面生物量采集于 2010 年 8 月 20 日进行,野外实地调查采样数据将用于反演模型的拟合及其精度和预测能力的检验。根据研究区植被生长密度分割结果,考虑到植被分布特征,沿南北方向设若干列 30 m×30 m 的样区,每个样区内根据植被株丛分布划定若干 1 m×1 m 有代表性的样点,最终共选取样区 45 个。涉及的植被类型以香蒲、芦苇水蜈蚣等挺水植物以及马塘、狗尾草等植物群落为主,占到样本总量的 90% 左右,是具有代表性的优势种群。样区分布见图 2。

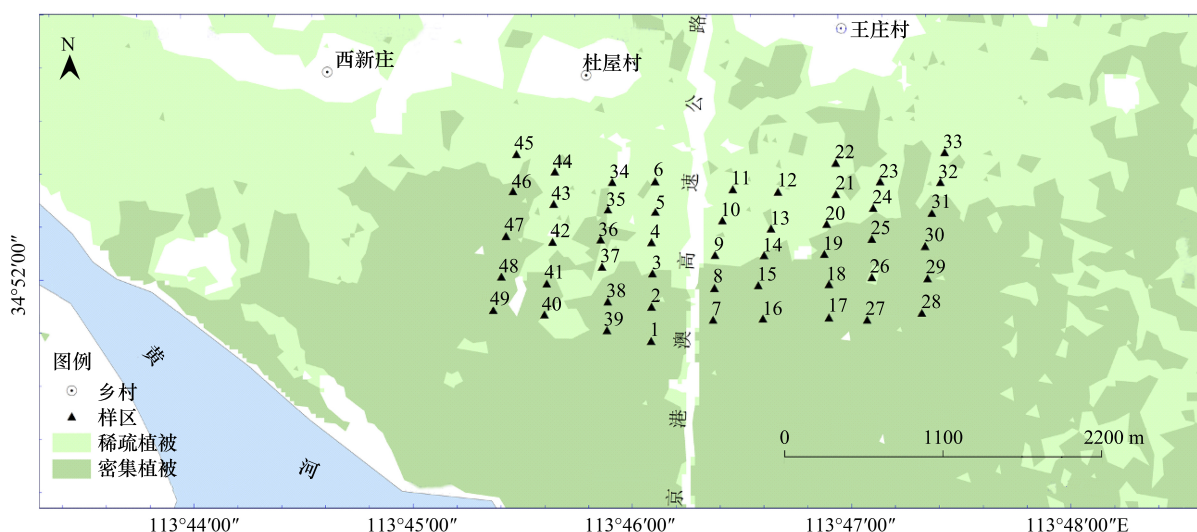


图 2 实地样区位置分布图

Fig. 2 The distribution of sample districts

在每个样点区域内齐地剪取地上生物量,然后将同一个样区所有样点的采样混合后进行称重,并作记录,记录内容包括样区编号、中心点 GPS 坐标、植被种类、样本鲜重、距河岸距离、高程、株高、盖度等。然后将每个样区内采集的样本分别取 100 g 放入自封袋中并标记样区号,带回实验室恒温烘干并记录净重,计算出含水率 μ_i 。最后通过公式(1)将样点鲜重换算成为样点净重(干重)。最终每个样区植被生物量记录结果为样区干生物量单位面积均值(g/m^2):

$$W_i = \frac{w_{i1} + w_{i2} + w_{i3}}{n} \times (1 - \mu_i) \quad (1)$$

式中, w_{i1} 、 w_{i2} 、 w_{i3} 为第 i 个样区内 n 个样本植被的鲜重, μ_i 为第 i 个样区样本植被含水率, W_i 为该样区样本植被生物量净重(干重)。

将所有样点的记录数据按照样区均匀分布的原则划分为两个组。选取 1—33 号样区 33 个样本组数据结合其植被指数用于拟合生物量模型,剩余的 34—45 号 12 个样区样本组数据用于对模型预测精度进行检验。

1.3 数据处理方法及流程

1.3.1 数据处理

本次研究的数据处理包括遥感数据的处理及地面实地采样数据的处理两部分。首先根据绝对辐射定标系数对影像进行辐射定标,将各波段 DN(像元亮度值)值转为表观辐射亮度;鉴于影像获取时研究区上空晴朗无云,选取改进的暗像元法^[21]大气校正模型计算并获得大气校正参数,综合表观辐射量度图像和大气校正参数建模,得到反射率图像;然后采用多项式法对影像进行几何校正,误差控制在 0.5 个像元以内;最后沿黄河大堤对影像进行裁剪,得到研究区域影像。

遥感影像上的植被信息,主要是通过绿色植物叶片和植被冠层的光谱特性及其变化差异而反映的。不同光谱波段所获得的植被信息与植被的不同要素或某种特征状态有各种不同的相关性。因此,在建立遥感生物

量方程时,选定适合该区域该季节的遥感指示因子就显得极为重要。

研究选取 EVI、GNDVI、MSAVI、MTVI2、NDVI、OSAVI、RVI 和 SAVI 共 8 种常用植被光谱指数(表 1)作为研究对象。考虑到研究区优势种群占到植被总量的 90%,且群落分布较为均匀,故认为植被指数图像中,一个混合像元的值代表地面一个样区内(30 m×30 m)混合植被指数。由于采样点数据是矢量结构,故各样本点的植被指数值取其所在植被指数图像上对应像元值。配合生物量统计结果为每个样区单位面积(1 m×1 m)混合植被干生物量的均值,以保证反演结果的可靠性。

表 1 本研究中用到的植被光谱指数
Table 1 Spectral vegetation index used in this study

植被指数 Vegetation index	中文全称 Full name in Chinese	公式 Expression	参考文献 References
归一化差值植被指数 NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	$(R_{\text{nir}} - R_{\text{red}})/(R_{\text{nir}} + R_{\text{red}})$	[22]
土壤调整植被指数 SAVI	Soil-Adjusted Vegetation Indices	$1.5(R_{\text{nir}} - R_{\text{red}})/(R_{\text{nir}} + R_{\text{red}} + 0.5)$	[23]
优化土壤调整植被 指数 OSAVI	Optimization of Soil-Adjusted Vegetation	$1.05(R_{\text{nir}} - R_{\text{red}})/(R_{\text{nir}} + R_{\text{red}} + 1.05)$	[24]
修正土壤调整植被 指数 MSAVI	Modified Soil Adjusted Vegetation Index	$\frac{[2R_{\text{nir}} + 1 - \sqrt{(2R_{\text{nir}} + 1)^2 - 8(R_{\text{nir}} - R_{\text{red}})}]}{2}$	[25]
归一化绿度植被 指数 GNDVI	Green Normalized Difference Vegetation Index	$(R_{\text{nir}} - R_{\text{green}})/(R_{\text{nir}} + R_{\text{green}})$	[26]
修正三角植被指数 2 MTVI2	Modified Triangular Vegetation Index 2	$\frac{1.5[1.2(R_{\text{nir}} - R_{\text{green}}) - 2.5(R_{\text{red}} - R_{\text{green}})]}{\sqrt{2(R_{\text{nir}} + 1)^2 - (6R_{\text{nir}} - 5\sqrt{R_{\text{red}}})} - 0.5}$	[27]
增强型植被指数 EVI	Enhanced Vegetation Index	$\frac{1.1(R_{\text{nir}} - R_{\text{red}})}{(R_{\text{nir}} + 9.5R_{\text{red}} - 2R_{\text{blue}} + 0.5)}$	[28]
比值植被指数 RVI	Ratio Vegetation Index	$R_{\text{nir}}/R_{\text{red}}$	

1.3.2 SCRM 数学模型

采用回归拟合方法估算生物量,将单一植被指数作为自变量采用回归拟合的方法得到一个线性或者非线性方程(如 SCRM)的方法已被广泛应用。SCRM(一元曲线回归模型)多用于拟合植被指数与生物量之间的曲线相关关系,主要采用指数模型或者高次方程,虽然模型拟合精度有所提高,但由于数学算法本身的原因,在植被覆盖不均匀区域,反演结果会出现较大误差。实际研究中常用多项式方程作为生物量 SCRM 的基本模型(公式(2))。

$$Y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_mx^m + \varepsilon \tag{2}$$

式中,Y 为植被干生物量,x 为植被指数, $a_0,a_1,\cdots,a_m$ 为回归系数, ε 为剩余误差。

研究采用函数逼近的方法来确定公式(2)中植被指数的次数,首先从一次多项式开始,直至多项式的剩余误差平方和小于某个给定的任意值为止。

1.3.3 MLRM 数学模型

这里引用的 MLRM(多元线性回归模型)最早是为解决实际经济问题而定义的。在实际经济问题中,一个变量往往受到多个变量的影响,如家庭经济支出,后被引申到地理科学及数据统计领域^[29]。事实上,一种现象常常是与多个因素相联系的,由多个自变量的最优组合共同来预测或估计因变量,比只用一个自变量进行预测或估计更有效,更符合实际。实际应用中,为了保证模型具有优良的解释能力和预测效果,须遵循 MLRM 的变量选择准则。

用于拟合生物量 MLRM 数学模型的建立是研究探讨的核心。设 y 为因变量 $x_1, x_2, \dots, x_k$ 为自变量, 并且自变量与因变量之间为线性关系时, 则多元线性回归模型为:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + \varepsilon \quad (3)$$

公式(3)称为回归方程, 式中 b_0 为常数项, $b_1, b_2, \dots, b_k$ 为回归系数, ε 为随机误差。这里 y 对应于生物量, x 对应于不同植被指数。 $b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_kx_k + \varepsilon$ 设有 n 组样本点数据, 其中 x_{ij} 表示 x_j 在第 i 次的观测值, 于是有:

$$\begin{cases} y_1 = b_0 + b_1x_{11} + b_2x_{12} + \dots + b_kx_{1k} + \varepsilon_1 \\ y_2 = b_0 + b_2x_{21} + b_2x_{22} + \dots + b_kx_{2k} + \varepsilon_2 \\ \dots \\ y_n = b_0 + b_1x_{n1} + b_2x_{n2} + \dots + b_kx_{nk} + \varepsilon_n \end{cases} \quad (4)$$

式中, $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$ 为 $k+1$ 个待定参数, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ 为 n 个相互独立的且服从同一正态分布 $\varepsilon \sim N(0, \delta^2)$ 的随机变量。这里 x_{ij} 表示某一植被指数 x_j 在第 i 个样本点的值, $y_1, y_2, \dots, y_n$ 为各样本点实测生物量。公式(4)称为多元(k 元)线性回归的数学模型。

$$\text{将公式(4)写成矩阵形式, 设 } X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}, Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)', b = (b_0, b_2, \dots, b_k)',$$

$\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)'$, 则公式(4)变为:

$$Y = bX + \varepsilon' \quad (5)$$

式中, Y 为因变量矩阵, 这里对应于实测生物量矩阵; X 为自变量矩阵, 这里对应于各样本点植被指数; b 为系数矩阵; ε' 为随机误差。公式(5)称为生物量 MLRM 的矩阵形式。

研究表明, 处于生长状态的植被干生物量与多种植被指数存在相关关系^[30-33]。在进行生物量反演模型构建时, 综合考虑多种植被指数的最优组合来预测或估算生物量, 比只用一种植被指数进行预测或估计更准确, 更具有实际意义。

研究将植被生物量抽象为一种现象, 将各种植被指数抽象为多个不同影响因子, 将植被生物量与植被指数的相关关系抽象成一种数学模型, 并尝试采用 MLRM 拟合方法来解释它们的这种相关关系。

1.3.4 技术流程

研究处理流程主要包括 3 个部分: 基础遥感数据的预处理及植被光谱指数提取; 地面采样数据的处理筛选; 模型拟合及精度评价。主要技术流程见图 3。其中, 遥感数据预处理包括影像的辐射定标、大气校正、几何校正及影像裁剪, 之后提取植被指数; 地面采样数据通过换算为生物量干重单位面积均值; 采用 MLRM 方法及 SCRM 方法分别对植被指数和生物量进行拟合, 得到拟合模型并对其进行精度评价。然后通过对比选出最优的拟合模型, 估算研究区域植被总量, 并绘制研究区域 2010 年 8 月植被生物量空间分布图。

SCRM 和 MLRM 拟合结果精度评价指标选用相关系数法及实测生物量方法。相关系数法包括求解相关系数(预测决定系数) r 、精度(或系统误差)SE 及均方根误差 RMSE(公式(6)——(8))。实际生物量法是通过研究区地物进行解译分类, 聚类得到不同密度植被的面积, 乘以各相应区域的样方单位面积实测平均生物量, 然后进行求和得到研究区总的干生物量(公式(9)), 将其结果与反演模型估算总生物量结果进行对比, 计算其相对误差。

$$r_{xy} = \frac{L_{xy}}{(L_{xx} + L_{yy})} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

$$SE = \sum_{i=1}^n \frac{|y'_i - y_i|}{n} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n}} \quad (8)$$

$$G_z = \sum_{i=1}^n m_j S_j \quad (9)$$

式中, x_i 为第 i 个样本点植被指数, y_i 为第 i 个样本点实测生物量数值, y'_i 为第 i 个样本点预测生物量数值, m_j 为各不同植被覆盖度区域实测单位面积平均生物量, S_j 为相应区域的面积。

需要说明的是: 相关系数 r 反映某一植被指数与生物量之间的相关关系, 其取值范围为 $(-1, +1)$ 。 $|r|$ 越大, 表明变量之间的线性相关程度越高, 反之相关程度越低。当相关系数小于 0 时, 称为负相关; 大于 0 时, 称为正相关; 等于 0 时, 称为零相关。

研究采用多种检验指标对 MLRM 拟合结果进行精度检验, 在保证模型精度的基础上, 进一步提高模型的预测能力, 并用实地采样数据对其预测能力进行检验。

2 生物量反演及精度检验

2.1 生物量反演

SCRM 方法拟合生物量采用回归分析法, 利用 (2)

式对生物量进行拟合, 在要求误差平方和 ($\sum (\varepsilon_i)^2$) 为最小的前提下, 用最小二乘法求解参数。各植被指数拟合生物量结果见表 2。

输入植被指数的筛选是 MLRM 建立的关键。其遵循的准则为: (1) 所选用植被指数与生物量呈密切相关性; (2) 所选用植被指数之间具有一定的互斥性, 其相互间相关程度不应高于与生物量之间的相关程度; (3) 生物量实地采样值具有完整的统计数据, 其预测值容易确定。

将 33 个样本点的光谱指数进行变量相关性分析及筛选, 结果表明 EVI、GNDVI、MSAVI、MTVI2、NDVI 及 RI 符合互斥原则, 且与生物量具有较好的相关关系, 被选入 MLRM 作为模型拟合自变量; 而 SAVI、OSAVI 因与 NDVI 存在较强线性关系被剔除。在要求误差平方和 ($\sum (\varepsilon_i)^2$) 为最小的前提下, 用最小二乘法求解 b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 、 b_5 和 b_6 , 得到 6 种植被指数对生物量的多元线性回归拟合结果:

$$Y = 3766.331 - 1726.392(\text{EVI}) + 21132.720(\text{GNDVI}) - 74581.519(\text{MSAVI}) + 8929.203(\text{MTVI2}) + 69708.711(\text{NDVI}) - 389.162(\text{RI}) \quad (10)$$

2.2 精度检验

SCRM 及 MLRM 拟合结果精度和预测能力检验采用相关系数法 (公式 (6) — (8)) 及实际生物量方法 (公式 (9)), 分别选取模型拟合变量输入组 33 个、模型预测能力检验组 12 个样本点的实际采样值作为参考进行精度检验。SCRM 及 MLRM 拟合生物量数据结果见附表 (共 45 组)。SCRM 及 MLRM 拟合模型精度及预测能力检验分别见表 2 和表 3。

表 2 中可以看出, NDVI、OSAVI 等拟合的曲线模型达到较高的精度, 但是预测能力检验略有降低, 预测能力分析结果见图 4。可以看出预测生物量分布呈现不同程度的离散, 特别是生物量值实测较高的地方出现了明显偏离, 因此不能很好地反演生物量分布。

表 2 和表 3 的对比中可知, MLRM 拟合生物量精度及预测能力检验结果均优于 SCRM 拟合生物量精度及

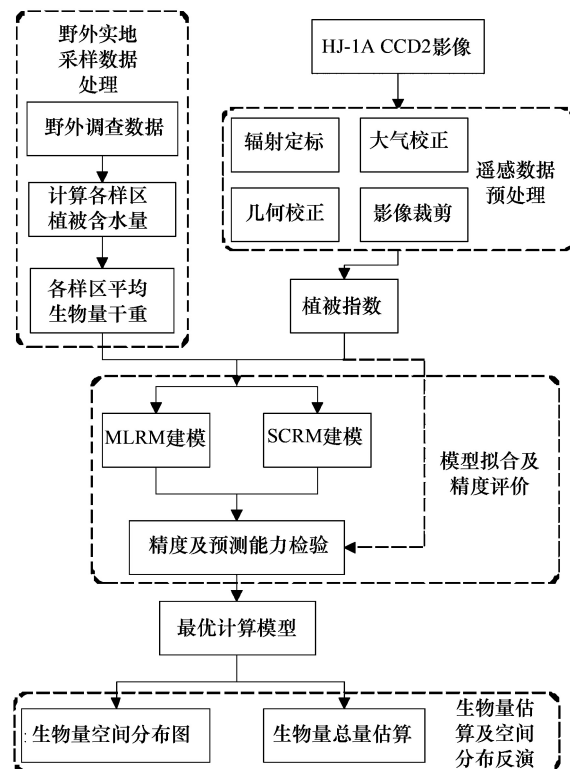


图 3 整体技术流程图

Fig. 3 Total technique flowcharts

预测能力检验结果,模型相关系数为 0.9791,拟合精度达到 29.8 g/m²,预测决定系数达 0.8742,误差为 49.9 g/m²。图 5 中各样本点数据均落在 1:1 等值线周围,表明 MLRM 对湿地生物量反演结果有较好预测能力。

表 2 SCRM 拟合结果及精度检验
Table 2 Comparison between Results of SCRM

回归模型 Model	显著性 Significance	模型相关系数 Coefficient	模型精度/(g/m ²) Accuracy	预测误差/(g/m ²) Forecast error	预测决定系数 Coefficient of determination
$Y=1.885e^{42.944(EVI)}$	0.000	0.9282	42.9	71.0	0.7553
$Y=19.665e^{46.955(GNDVI)}$	0.000	0.8193	49.0	72.3	0.6841
$Y=110277.853(MSAVI)^{7.443}$	0.000	0.9591	39.6	67.0	0.8015
$Y=333.925(MTVI2)^{9.591}$	0.000	0.4849	80.7	77.0	0.6675
$Y=391985.711(NDVI)^{5.862}$	0.000	0.9622	30.3	59.7	0.8267
$Y=0.573 \times 115578836.730(OSAVI)$	0.000	0.9621	31.1	46.0	0.8197
$Y=1.005 \times (RVI)^{9.372}$	0.000	0.8874	44.9	67.1	0.7664
$Y=0.576 \times 1532553.215(SAVI)$	0.000	0.9619	33.7	60.3	0.8247

显著性 0.000 表示显著水平为极显著,表明植被指数与生物量的相关程度

表 3 MLRM 拟合结果及精度检验
Table 3 Accuracy check results of MLRM

显著性 Significance	模型相关系数 Coefficient	模型精度 Accuracy/(g/m ²)	预测误差 Forecast error/(g/m ²)	预测决定系数 Coefficient of determination
0.000	0.9791	29.8	49.9	0.8642

显著性 0.000 表示显著水平为极显著,表明植被指数与生物量的相关程度

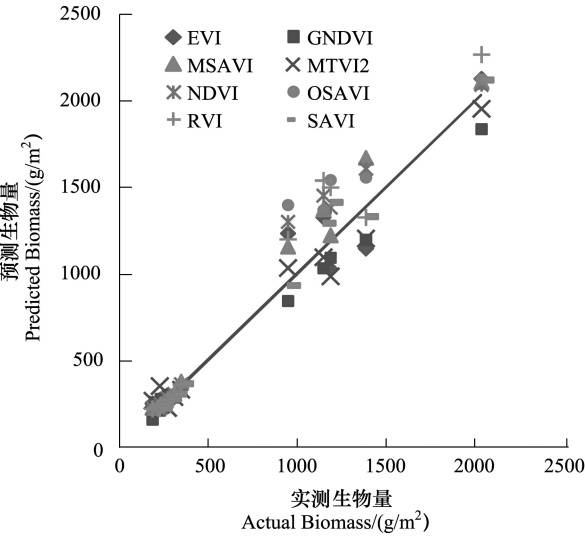


图 4 不同 SCRM 拟合生物量预测结果对比图

Fig. 4 Comparison of predicted results between different models

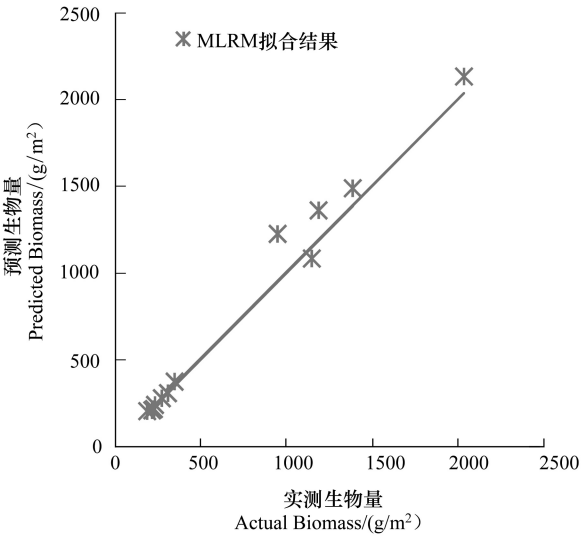


图 5 MLRM 拟合生物量预测结果图

Fig. 5 Comparison between predicted and actual biomass by MLRM

MLRM 拟合结果建模进行生物量反演,得到研究区植被生物量为 6.849 199 t/hm²,反演得到生物量空间分布见图 6。通过对研究区地物解译聚类将植被覆盖区域按植被生长密度分割为不同区域,采用实际生物量方法估算的生物量为 6.525 450 t/hm²,两者相差 0.323 749 t/hm²,相对误差为 4.73%。

与图 7 地物分类结果进行对比,图 6 中黄河北岸村落周边的混合像元被很好地识别出来,村落的轮廓线清晰,道路纵横交错;此外,近年来黄河水量减少,增加了许多河心滩,其上生满了绿色植被,部分区域目测生物量覆盖甚至超过陆地表面,这在图 6 中也有所体现;MLRM 拟合结果很好地区分开黄河南岸的丘陵地带植

被和裸地,以及水田和旱地;这些均与实地调查情况相吻合。由此可见,基于 MLRM 和植被光谱指数及实地采样数据可以较为准确估算湿地生物量分布。

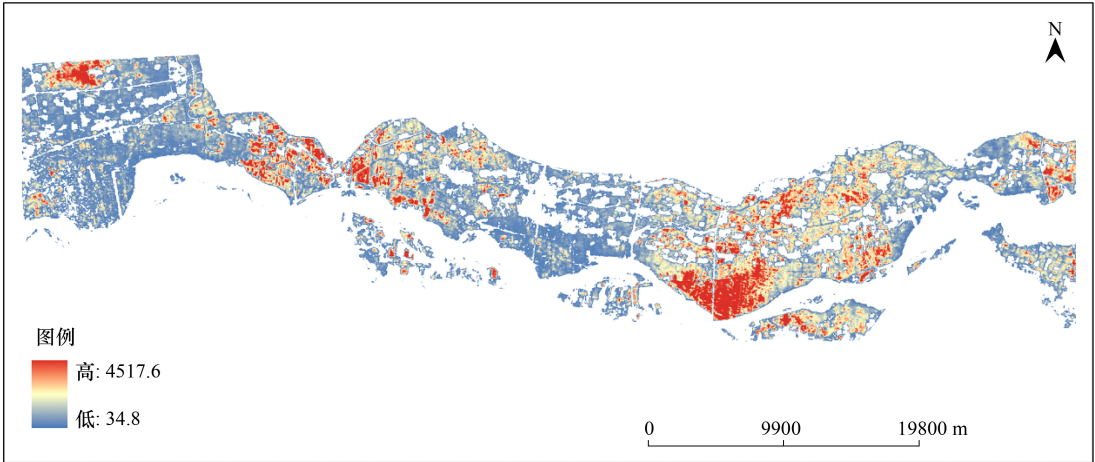


图 6 MLRM 反演生物量空间分布图
Fig.6 Spatial distribution of biomass estimation by MLRM

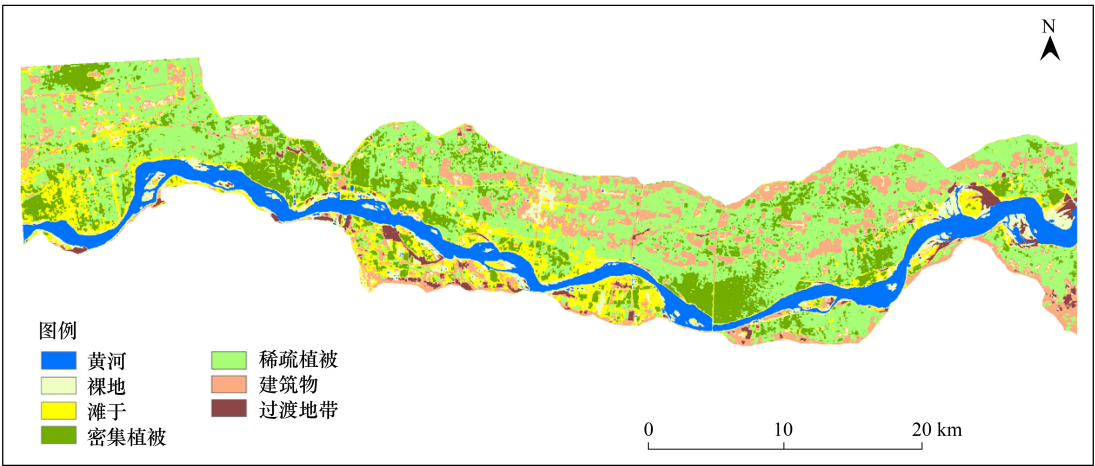


图 7 研究区地表覆盖分类结果图
Fig.7 The classification of the land cover

3 结论与讨论

利用遥感技术反演湿地植被生物量,有利于对湿地植被资源进行实时监测和精准管理。本研究基于 HJ-1A 卫星 CCD2 影像和多种回归模型以郑州黄河湿地自然保护区为例对生物量进行反演计算。结论及讨论如下:

- (1) 基于环境减灾卫星数据提取植被指数,结合野外实地采样数据可以估算湿生植被生物量是可行的,同时为湿地植被监测及生态资源管理提供了一个有力工具,对于推动国产卫星数据在资源环境领域的应用具有重要意义。
- (2) 对于研究区湿地植被干生物量,MLRM 拟合结果具有较好的精度和预测能力,能够较好地用于估算湿地植被生物量。其模型显著性检验为极显著,模型相关系数为 0.9791,拟合精度达到 29.8 g/m²;其模型预测结果系统误差为 49.9 g/m²,预测决定系数为 0.8742,均方根误差为 67.2 g/m²,比传统的一元回归模型具有更高的精度和可靠性。估算研究区域 2010 年 8 月湿生植被生物量为 6.849 199 t/hm²,与实际生物量法估算生物量结果相差 0.323 749 t/hm²,相对误差为 4.73%。

(3) 经过选取不同样本组数据进行实验,本研究提出的采用 MLRM 拟合生物量方程方法所得到的结果与实际采样对比结果各项误差指标变化不大,表明本研究提出的方法具有一定的可复制性。

(4) 混合像元的存在是影响反演精度的主要因素之一。为解决这一问题,根据研究区植被分布特点,选择分布相对均匀且有代表性的地块作为样区,调查组成混合像元的典型地物的比例^[34-35],并按照这一原则抽取样方。

湿地是人类最重要的环境资本之一,也是自然界富有生物多样性和较高生产力的生态系统,湿地的水陆过渡性使环境要素在湿地中的耦合和交汇作用复杂化,它对自然环境的反馈作用是多方面的。MLRM 用作估算湿地植被生物量,具有超越传统一元回归模型的精度和预测能力,作为一种基于遥感技术的可靠的植被生物量检测和反演手段,对生态资源管理和湿地生态环境保护具有重要意义。

References:

- [1] Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 607-613.
- [2] Tong Q X, Zheng L F, Wang J N, Wang X J, Dong W D, Hu Y M, Dang S X. Study on imaging spectrometer remote sensing information for wetland vegetation. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(1): 50-57.
- [3] Zheng D L, Radamacherb J, Chen J Q, Crow T, Bresee M, Moine J L, Ryu S R. Estimating above ground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(3): 402-411.
- [4] de Jong S M S, Pebesma E J, Lacaze B. Above-ground biomass assessment of mediterranean forests using airborne imaging spectrometry: the DAIS Payne experiment. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(7): 1505-1520.
- [5] Fang X Q, Zhang W C. The application of remotely sensed data to the estimation of the leaf area index. *Remote Sensing For Land and Resources*, 2003, (3): 58-62.
- [6] Liu Y B, Ju W M, Zhu G L, Chen J M, Xing B L, Zhu J F, Zhou Y L. Retrieval of leaf area index for different grasslands in Inner Mongolia prairie using remote sensing data. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5159-5170.
- [7] Li R D, Liu J Y. An estimation of wetland vegetation biomass in the Poyang Lake using Landsat ETM Data. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(5): 532-540.
- [8] Wu T, Zhao D Z, Kang J C, Zhang F S, Cheng L. Suaeda salsa dynamic remote monitoring and biomass remote sensing inversion in Shuangtaizi River estuary. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(1): 24-29.
- [9] Chen P F, Wang J L, Liao X Y, Yin F, Chen B R, Liu R. Using data of HJ-1A/B satellite for Hulunbeier Grassland aboveground biomass estimation. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(7): 1122-1131.
- [10] Foody G M, Boyd D S, Cutler M E J. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85(4): 463-474.
- [11] Guo Z F, Chi H, Sun G Q. Estimating forest aboveground biomass using HJ-1 Satellite CCD and ICESat GLAS waveform data. *Science in China: Earth Sciences*, 2010, 53(1): 16-25.
- [12] Soenen S A, Peddle D R, Hall R J, Coburn C A, Hall F G. Estimating aboveground forest biomass from canopy reflectance model inversion in mountainous terrain. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(7): 1325-1337.
- [13] Barati S, Rayegani B, Saati M, Sharifi A, Nasri M. Comparison the accuracies of different spectral indices for estimation of vegetation cover fraction in sparse vegetated areas. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 2011, 14(1): 49-56.
- [14] Iryna Dronova, Peng G, Lin W. Object-based analysis and change detection of major wetland cover types and their classification uncertainty during the low water period at Poyang Lake, China. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 3220-3236.
- [15] Newnham G J, Verbesselt J, Grant I F, Anderson S A J. Relative greenness index for assessing curing of grassland fuel. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(6): 1456-1463.
- [16] Chen L F, Gao Y H, Cheng Y, Wei Z, Xiao Q, Liu Q H, Yu T, Liu Q J, Gu X F, Tian G L. Biomass estimation and uncertainty analysis based on CBERS-02 CCD camera data and field measurement. *Science in China Ser E: Engineering and Materials Science*, 2005, 48(2): 116-128.
- [17] Davranche A, Lefebvre G, Poulin B. Wetland monitoring using classification trees and SPOT-5 seasonal time series. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(6): 552-562.
- [18] Wang L H, Xing Y Q. Remote sensing estimation of natural forest biomass based on an artificial neural network. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 261-266.
- [19] Yao Y J, Liu Q, Liu Q H, Li X W. Research on the mutual effect of the parameters on inversion of canopy reflectance model. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(1): 1-8.

- [20] Zhou Z, He L, Liu L M. Feasibility study for retrieval of chlorophyll-a concentration in Donghu Lake using HJ-1 A/B CCD data. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2011, (3): 11-14.
- [21] Zheng W, Zeng Z Y. Dark-object methods for atmospheric correction of remote sensing image. *Remote Sensing For Land and Resources*, 2005, (1): 8-11.
- [22] Deering D W, Haas R H, Rouse J W, Schell J A. Monitoring the Vernal Advancement of Retrogradation of Natural Vegetation. NASA/GSFC, Type III, Final Report. Greenbelt, 1974.
- [23] Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 1988, 25(3): 295-309.
- [24] Rondeaux G, Steven M, Baret F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55(2): 95-107.
- [25] Qi J, Chehbouni A, Huete A R, Kerr Y H, Sorooshian S. A modified soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48(2): 119-126.
- [26] Gitelson A A, Kaufman Y J, Merzlyak M N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 289-298.
- [27] Haboudane D, Miller J R, Pattey E, Zarco-Tejada P J, Ian Strachan B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(3): 337-352.
- [28] Huete A, Justice C, Liu H. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 49(3): 224-234.
- [29] Xu J H. *Mathematical Methods in Contemporary Geography*. Beijing: Higher Education Press, 2002: 47-60.
- [30] Li X, Yeh Anthony, Liu K, Wang S G. Inventory of mangrove wetlands in the pearl river estuary of China using remote sensing. *Journal of Geographical Sciences*, 2006, 16(2): 155-164.
- [31] Xiu C Y, Xu B, Jin Y X, Li J Y, Zhu X H. On grass yield remote sensing estimation models of China's northern farming-pastoral Ecotone. *Proceedings of 2010 International Conference on Remote Sensing (ICRS 2010)*, 2010, (2): 465-470.
- [32] Guo Y C, He Y, Li X. Remote sensing inversion of vegetation coverage and optimization of vegetation index based on MODIS data in arid area. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2011, (2): 115-118.
- [33] Tao S, Wang P X. Retrieval of district evapotranspiration using remotely sensed biomass products // *Environmental Science and Information Application Technology*. Wuhan: IEEE, 2009: 466-469.
- [34] Zhou H, Wang B, Zhang L M. New scheme for decomposition of mixed pixels of remote sensing images. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, 24(6): 463-466.
- [35] Liu L F, Wang B, Zhang L M. Decomposition of mixed pixels based on bayesian self-organizing map and gaussian mixture model. *Pattern Recognition Letters*, 2009, 30(9): 820-826.

参考文献:

- [1] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. *生态学报*, 1999, 19(5): 607-613.
- [2] 童庆禧, 郑兰芬, 王晋年, 王向军, 董卫东, 胡远满, 党顺行. 湿地植被成像光谱遥感研究. *遥感学报*, 1997, 1(1): 50-57.
- [5] 方秀琴, 张万昌. 叶面积指数(LAI)的遥感定量方法综述. *国土资源遥感*, 2003, (3): 58-62.
- [6] 柳艺博, 居为民, 朱高龙, 陈镜明, 邢白灵, 朱敬芳, 周艳莲. 内蒙古不同类型草地叶面积指数遥感估算. *生态学报*, 2011, 31(18): 5159-5170.
- [7] 李仁东, 刘纪远. 应用 Landsat ETM 数据估算鄱阳湖湿生植被生物量. *地理学报*, 2001, 56(5): 532-540.
- [8] 吴涛, 赵冬至, 康建成, 张丰收, 程璐. 辽东湾双台子河口湿地翅碱蓬 (*Suaeda salsa*) 生物量遥感反演研究. *生态环境学报*, 2011, 20(1): 24-29.
- [9] 陈鹏飞, 王卷乐, 廖秀英, 尹芳, 陈宝瑞, 刘睿. 基于环境减灾卫星遥感数据的呼伦贝尔草地上生物量反演研究. *自然资源学报*, 2010, 25(7): 1122-1131.
- [18] 王立海, 邢艳秋. 基于人工神经网络的天然林生物量遥感估测. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 261-266.
- [19] 姚延娟, 刘强, 柳钦火, 李小文. 遥感模型多参数反演相互影响机理的研究. *遥感学报*, 2008, 12(1): 1-8.
- [20] 周正, 何连, 刘良明. 基于 HJ-1A/B CCD 数据的东湖叶绿素 a 浓度反演可行性研究. *测绘通报*, 2011, (3): 11-14.
- [21] 郑伟, 曾志远. 遥感图像大气校正的黑暗像元法. *国土资源遥感*, 2005, (1): 8-11.
- [29] 徐建华. *现代地理学中的数学方法*. 北京: 高等教育出版社, 2002: 47-60.
- [32] 郭玉川, 何英, 李霞. 基于 MODIS 的干旱区植被覆盖度反演及植被指数优选. *国土资源遥感*, 2011, (2): 115-118.
- [34] 周昊, 王斌, 张立明. 一种新的遥感图像混合像元分解方法. *红外与毫米波学报*, 2005, 24(6): 463-466.

附表 拟合生物量数据与实测数据/(g/m²)
Accessories table Comparison between fitting results and actual data

样点编号 Sample point No.	实测生 物量值 Actual biomass	EVI 拟合 结果 Fitting result of EVI	GNDVI 拟合 结果 Fitting result of GNDVI	MSAVI 拟合 结果 Fitting result of MSAVI	MTVI2 拟合 结果 Fitting result of MTVI2	NDVI 拟合 结果 Fitting result of NDVI	OSAVI 拟合 结果 Fitting result of OSAVI	RI 拟合 结果 Fitting result of RI	SAVI 拟合 结果 Fitting result of SAVI	MLRM 拟合 结果 Fitting result of MLRM
1	250	252. 2	285. 4	275. 8	225. 5	274. 9	271. 2	269. 3	271. 4	274. 4
2	301. 8	267. 3	304. 9	289. 7	235. 6	289. 3	286. 1	283. 9	286. 5	294. 1
3	429. 7	360. 9	321. 2	362. 5	338. 1	363. 5	366. 4	360. 9	367	374. 1
4	291. 7	247	286. 7	278. 3	221. 1	277. 4	273. 9	271. 7	274	277. 8
5	349. 6	316. 5	316. 8	330. 7	273. 1	330. 9	330. 6	326. 5	331. 1	341. 3
6	345. 2	295	314. 1	321. 6	267. 4	321. 6	320. 3	316. 6	320. 7	332
7	226. 2	201. 8	251. 6	221. 1	202. 6	220. 3	216	216. 5	216. 2	211. 2
8	140. 4	190. 8	160. 5	197. 7	154. 7	197	192. 6	194. 3	192. 9	185
9	249. 4	259. 1	282. 8	275. 2	248. 3	274. 3	270. 6	268. 5	270. 7	270. 5
10	167. 4	179. 4	225. 6	206. 2	159	205. 5	201. 8	202. 9	202. 1	199. 2
11	435. 6	379. 4	326. 5	386. 4	317. 4	388	394. 5	387. 6	395	403. 4
12	930. 1	1326. 2	1065. 4	1703. 5	876. 1	1100. 1	1483. 8	1713. 4	989. 1	1373. 7
13	2087	2124. 6	2409. 9	2593. 1	1726. 1	2154. 5	2365. 6	2324. 6	2623. 6	2841. 9
14	235. 6	206	267. 9	235. 5	194. 7	234. 8	230. 6	230. 6	231	232. 3
15	150. 6	201. 4	223. 2	208. 3	162. 2	207. 5	203	204. 2	203. 3	196. 7
16	597. 7	569. 4	367. 5	487. 7	394. 3	494	524. 8	512. 8	525. 3	512. 7
17	639. 9	525. 4	467. 5	485. 7	260. 8	490. 4	516. 9	503. 5	516. 6	532. 8
18	455. 4	526	433. 4	481. 7	364. 1	487. 6	519. 7	506. 8	519. 6	503. 3
19	719. 9	600. 4	516. 8	527. 9	424. 4	534. 7	568. 4	553. 9	568. 8	655. 2
20	242. 5	301. 2	276. 7	270. 6	307. 3	269. 4	266. 2	263. 8	266	250. 9
21	143. 7	217. 6	171. 5	200. 6	306. 9	199. 6	195. 7	196. 7	195. 7	186. 3
22	127. 4	215	255. 5	197. 4	260. 3	196. 6	193. 8	194. 7	193. 8	180. 7
23	906. 4	1019. 9	852. 1	1028. 5	699. 5	1192. 5	1568. 9	1534. 9	1268. 2	1139. 2
24	906	1001. 2	652. 1	716. 7	583. 9	737. 4	840. 3	819. 6	842. 2	748. 3
25	877. 4	676. 9	550. 6	599. 1	413. 8	610. 3	663. 7	646. 9	664. 8	846. 3
26	866. 8	632. 6	439. 7	549. 6	416. 5	558. 2	596. 4	582. 6	597. 8	788. 8
27	749. 6	609. 2	436. 3	530. 7	444. 6	538. 4	572	558. 9	573. 2	663. 7
28	120. 4	195. 6	119. 5	189. 3	351. 6	188. 1	185. 2	186. 2	185	177. 5
29	116. 1	124. 8	116. 5	122. 5	204. 5	122. 3	123	126. 5	123	117. 4
30	148. 3	208. 9	199. 2	204. 3	385. 2	203. 1	199. 6	200	199. 4	196
31	101. 2	83. 8	96. 5	76. 6	107. 1	77. 5	82	86. 6	82. 1	96. 1
32	114	107. 7	110. 1	98. 3	164. 1	98. 9	101. 2	105. 6	101. 3	108. 7
33	95. 2	93. 8	95. 1	88. 7	122. 9	89. 3	92. 7	97. 1	92. 7	89. 6
34	237. 5	237. 5	238. 2	275. 9	245. 7	242	244. 7	240. 3	239. 7	237. 1
35	1189. 6	1189. 6	1026. 7	1093	1223	985. 6	1383. 2	1543. 4	1499. 9	1359. 4
36	231. 7	231. 7	246. 4	207. 9	226. 8	350. 7	225. 7	221. 5	221. 4	213. 3
37	191. 6	191. 6	248. 9	155. 6	223. 5	265. 6	222. 3	218. 2	218. 2	201. 5
38	1149. 6	1149. 6	1327. 6	1032. 1	1372. 6	1096. 7	1453. 3	1368. 6	1540. 7	1081. 5
39	277. 3	277. 3	272. 6	299. 4	299. 2	223	278. 4	274. 9	272. 7	275. 2
40	313	313	287. 5	283. 9	305. 1	286. 7	304. 8	304. 7	300. 9	304. 8
41	351. 8	351. 8	357. 1	333. 7	376. 9	328. 9	360. 9	363. 9	358. 5	371. 6
42	2035. 3	2035. 3	2129. 6	1838. 1	2111	1955. 9	2094. 3	2126. 2	2269. 8	2131. 6
43	221	221	244. 8	249	227. 6	241. 8	226. 6	223. 8	223. 3	206. 2
44	1387. 7	1387. 7	1146. 5	1198. 4	1672	1205	1609. 1	1557. 6	1326. 6	1486. 7
45	950. 7	950. 7	1234. 6	842. 9	1157. 6	1034. 1	1301. 8	1998. 6	1200. 1	1223. 6

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33 ,No.2 January ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms in karst regions; a review CHEN Hongsong, NIE Yunpeng, WANG Kelin (317)
- Impacts of mangrove vegetation on macro-benthic faunal communities CHEN Guangcheng, YU Dan, YE Yong, et al (327)
- Advance in research on the occurrence and transformation of arsenic in the freshwater lake ecosystem ZHANG Nan, WEI Chaoyang, YANG Linsheng (337)
- Application of nano-scale secondary ion mass spectrometry to microbial ecology study HU Hangwei, ZHANG Limei, HE Jizheng (348)
- Carbon cycle of urban system; characteristics, mechanism and theoretical framework ZHAO Rongqin, HUANG Xianjin (358)
- Research and compilation of urban greenhouse gas emission inventory LI Qing, TANG Lina, SHI Longyu (367)

Autecology & Fundamentals

- Seed dispersal and seedling recruitment of *Ulmus pumila* woodland in the Keerqin Sandy Land, China YANG Yunfei, BAI Yunpeng, LI Jiandong (374)
- Influence of environmental factors on seed germination of *Bombax malabaricum* DC. ZHENG Yanling, MA Huancheng, Scheller Robert, et al (382)
- Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics during the decomposition of *Spartina alterniflora* and *Cyperus malaccensis* var. *brevifolius* litters OUYANG Linmei, WANG Chun, WANG Weiqi, et al (389)
- Home range of *Teratoscincus roborowskii* (Gekkonidae): influence of sex, season, and body size LI Wenrong, SONG Yucheng, SHI Lei (395)
- Effects of the covering behavior on food consumption, growth and gonad traits of the sea urchin *Glyptocidaris crenularis* LUO Shibin, CHANG Yaqing, ZHAO Chong, et al (402)
- Biological response of the rice leaffolder *Cnaphalocrocis medinalis* (Güenée) reared on rice and maize seedling to temperature LIAO Huaijian, HUANG Jianrong, FANG Yuansong, et al (409)

Population, Community and Ecosystem

- Composition and stability of organic carbon in the top soil under different forest types in subtropical China SHANG Suyun, JIANG Peikun, SONG Zhaoliang, et al (416)
- The community characteristics of different types of grassland under grazing prohibition condition ZHANG Pengli, CHEN Jun, CUI Shujuan, et al (425)
- Spatial pattern and competition relationship of *Stellera chamaejasme* and *Aneurolepidium dasystachys* population in degraded alpine grassland REN Heng, ZHAO Chengzhang (435)
- SOC decomposition of four typical broad-leaved Korean pine communities in Xiaoxing' an Mountain SONG Yuan, ZHAO Xizhu, MAO Zijun, et al (443)
- The influence of vegetation restoration on soil archaeal communities in Fuyun earthquake fault zone of Xinjiang LIN Qing, ZENG Jun, ZHANG Tao, et al (454)
- Effects of fertilization regimes on soil faunal communities in cropland of purple soil, China ZHU Xinyu, DONG Zhixin, KUANG Fuhong, et al (464)
- Woody plant leaf litter consumption by the woodlouse *Porcellio scaber* with a choice test LIU Yan, LIAO Yuncheng (475)
- The bacterial community of coastal sediments influenced by cage culture in Xiangshan Bay, Zhejiang, China QIU Qiongfeng, ZHANG Demin, YE Xiansen, et al (483)
- A study of meiofauna in the COMRA's contracted area during the summer of 2005 WANG Xiaogu, ZHOU Yadong, ZHANG Dongsheng, et al (492)
- Hydrologic regime of interception for typical forest ecosystem at subalpine of Western Sichuan, China SUN Xiangyang, WANG Genxu, WU Yong, et al (501)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Sensitivity and vulnerability of China's rice production to observed climate change XIONG Wei, YANG Jie, WU Wenbin, et al (509)

Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005	HE Wei, BU Rencang, XIONG Zaiping, et al (519)
Combined effects of elevated O ₃ and reduced solar irradiance on growth and yield of field-grown winter wheat	ZHENG Youfei, HU Huifang, WU Rongjun, et al (532)
Resource and Industrial Ecology	
The study of vegetation biomass inversion based on the HJ satellite data in Yellow River wetland	GAO Mingliang, ZHAO Wenji, GONG Zhaoning, et al (542)
Temporal and spatial variability of soil available nutrients in arable Lands of Heyang County in South Loess Plateau	CHEN Tao, CHANG Qingrui, LIU Jing, et al (554)
Decomposition characteristics of wheat straw and effects on soil biological properties and nutrient status under different rice cultivation	WU Ji, GUO Xisheng, LU Jianwei, et al (565)
Effects of nitrogen application stages on photosynthetic characteristics of summer maize in high yield conditions	LÜ Peng, ZHANG Jiwang, LIU Wei, et al (576)
Urban, Rural and Social Ecology	
The degradation threshold of water quality associated with urban landscape component	LIU Zhenhuan, LI Zhengguo, YANG Peng, et al (586)
Ecological sustainability in Chang-Zhu-Tan region; a prediction study	DAI Yanan, HE Xinguang (595)
The effect of exogenous nitric oxide on activities of antioxidant enzymes and microelements accumulation of two rice genotypes seedlings under cadmium stress	ZHU Hanyi, CHEN Yijun, LAO Jiali, et al (603)
Forms composition of inorganic carbon in sediments from Dali Lake	SUN Yuanyuan, HE Jiang, LÜ Changwei, et al (610)
Fractionation character and bioavailability of Cd, Pb, Zn and Ni combined pollution in oasis soil	WU Wenfei, NAN Zhongren, WANG Shengli, et al (619)
Effects of CA and EDTA on growth of <i>Chlorophytum comosum</i> in copper-contaminated soil	WANG Nannan, HU Shan, WU Dan, et al (631)
Research Notes	
Values of marine ecosystem services in Haizhou Bay	ZHANG Xiuying, ZHONG Taiyang, HUANG Xianjin, et al (640)
Variations of <i>Leymus chinensis</i> community, functional groups, plant species and their relationships with climate factors	TAN Liping, ZHOU Guangsheng (650)
The effect of N:P supply ratio on P uptake and utilization efficiencies in <i>Larix olgensis</i> Henry. seedlings	WEI Hongxu, XU Chengyang, MA Lüyi, et al (659)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,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,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

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 2 期 (2013 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 2 (January, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元