

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

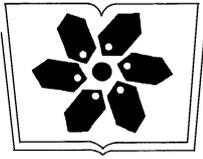
Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 22 期 Vol.31 No.22 2011

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 22 期 2011 年 11 月 (半月刊)

目 次

叶冠尺度野鸭湖湿地植物群落含水量的高光谱估算模型	林 川, 官兆宁, 赵文吉 (6645)
中国水稻潜在分布及其气候特征	段居琦, 周广胜 (6659)
大豆异黄酮浸种对盐胁迫大豆幼苗的生理效应	武玉妹, 周 强, 於丙军 (6669)
黑河中游荒漠绿洲过渡带多枝柽柳对地下水位变化的生理生态响应与适应	张 佩, 袁国富, 庄 伟, 等 (6677)
高寒退化草地甘肃臭草种群分布格局及其对土壤水分的响应	赵成章, 高福元, 石福习, 等 (6688)
基于生态足迹思想的皂市水利枢纽工程生态补偿标准研究	肖建红, 陈绍金, 于庆东, 等 (6696)
基于 MODIS 黄河三角洲湿地 NPP 与 NDVI 相关性的时空变化特征	蒋蕊竹, 李秀启, 朱永安, 等 (6708)
高分辨率影像支持的群落尺度沼泽湿地分类制图	李 娜, 周德民, 赵魁义 (6717)
土壤食细菌线虫对拟南芥根系生长的影响及机理	成艳红, 陈小云, 刘满强, 等 (6727)
基于网络 K 函数的西双版纳人工林空间格局及动态	杨珏婕, 刘世梁, 赵清贺, 等 (6734)
树轮灰度与树轮密度的对比分析及其对气候要素的响应	张同文, 袁玉江, 喻树龙, 等 (6743)
冀北山地阴坡优势树种的树体分维结构	田 超, 刘 阳, 杨新兵, 等 (6753)
帽峰山常绿阔叶林辐射通量特征	陈 进, 陈步峰, 潘勇军, 等 (6766)
不同类型拌种剂对花生及其根际微生物的影响	刘登望, 周 山, 刘升锐, 等 (6777)
一种自优化 RBF 神经网络的叶绿素 a 浓度时序预测模型	仝玉华, 周洪亮, 黄浙丰, 等 (6788)
不同种源麻栎种子和苗木性状地理变异趋势面分析	刘志龙, 虞木奎, 马 跃, 等 (6796)
黄土丘陵区植物叶片与细根功能性状关系及其变化	施 宇, 温仲明, 龚时慧 (6805)
干旱区五种木本植物枝叶水分状况与其抗旱性能	谭永芹, 柏新富, 朱建军, 等 (6815)
火灾对马尾松林地土壤特性的影响	薛 立, 陈红跃, 杨振意, 等 (6824)
江苏省太湖流域产业结构的水环境污染效应	王 磊, 张 磊, 段学军, 等 (6832)
高温对两种卡帕藻的酶活性、色素含量与叶绿素荧光的影响	赵素芬, 何培民 (6845)
江苏省典型干旱过程特征	包云轩, 孟翠丽, 申双和, 等 (6853)
黄土高原半干旱草地地表能量通量及闭合率	岳 平, 张 强, 杨金虎, 等 (6866)
光质对烟叶光合特性、类胡萝卜素和表面提取物含量的影响	陈 伟, 蒋 卫, 邱雪柏, 等 (6877)
铜陵铜尾矿废弃地生物土壤结皮中的蓝藻多样性	刘 梅, 赵秀侠, 詹 婧, 等 (6886)
圈养马麝刻板行为表达频次及影响因素	孟秀祥, 贡保草, 薛达元, 等 (6896)
田湾核电站海域浮游动物生态特征	吴建新, 阎斌伦, 冯志华, 等 (6902)
马鞍列岛多种生境中鱼类群聚的昼夜变化	汪振华, 王 凯, 章守宇 (6912)
基于认知水平的非使用价值支付动机研究	钟满秀, 许丽忠, 杨 净 (6926)
综述	
植物盐胁迫应答蛋白质组学分析	张 恒, 郑宝江, 宋保华, 等 (6936)
沉积物氮形态与测定方法研究进展	刘 波, 周 锋, 王国祥, 等 (6947)
野生鸟类传染性疾病预防研究进展	刘冬平, 肖文发, 陆 军, 等 (6959)
鱼类通过鱼道内水流速度障碍能力的评估方法	石小涛, 陈求稳, 黄应平, 等 (6967)
专论	
IPBES 的建立、前景及应对策略	吴 军, 徐海根, 丁 晖 (6973)
研究简报	
柠条人工林幼林与成林细根动态比较研究	陈建文, 王孟本, 史建伟 (6978)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 344 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 35 * 2011-11



封面图说: 滩涂芦苇及野鸭群——中国的海岸湿地, 尤其是长江入海口以北的海岸线, 多为泥质性海滩, 地势宽阔低洼, 动植物资源丰富, 生态类型独特, 为迁徙的鸟提供了丰富的食物和休息、庇护的良好环境, 成为东北亚内陆和环西太平洋鸟类迁徙的重要中转站和越冬、繁殖地。一到迁徙季节, 成千上万的各种鸟类飞临这里, 尤其是雁鸭类数量庞大, 十分壮观。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

蒋蕊竹,李秀启,朱永安,张治国. 基于 MODIS 黄河三角洲湿地 NPP 与 NDVI 相关性的时空变化特征. 生态学报, 2011, 31(22): 6708-6716.
Jiang R Z, Li X Q, Zhu Y A, Zhang Z G. Spatial-temporal variation of NPP and NDVI correlation in wetland of Yellow River Delta based on MODIS data. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(22): 6708-6716.

基于 MODIS 黄河三角洲湿地 NPP 与 NDVI 相关性的时空变化特征

蒋蕊竹¹, 李秀启², 朱永安², 张治国^{1,*}

(1. 山东大学生命科学学院, 济南 250100; 2. 山东省淡水水产研究所, 济南 250117)

摘要:应用 EOS/MODIS 卫星遥感资料, 分析 2001—2006 年黄河三角洲地区植被净初级生产 NPP 及 NDVI 时空变化特征, 在到海岸线不同距离的区域内, 讨论了年植被净初级生产力 (aNPP) 与年均归一化植被指数 (ANDVI) 的相关性, 并建立一元回归分析模型。可以看出, 黄河三角洲湿地生态系统分布自海向陆具有明显的空间异质性, 滩涂湿地分布于沿海地区, 生产力高, 该地区 aNPP 值高且与 ANDVI 呈显著正相关; 其他区域由于是盐碱荒地或农业生态系统, 因土壤盐分含量高而系统生产力低, 或农耕地受人类干扰严重, 一年总的生产力下降, 而导致这些区域 ANDVI 与 aNPP 呈负相关。利用 NDVI 进行黄河三角洲生产力监测的可行区域, 在距离海岸线小于 6 km 的范围内, 所研究的 6a 回归模型均通过 $\alpha=0.01$ 的显著水平的 F 检验, 模型的 R^2 值为 0.86—0.97。同时, 在生产力无法估测的区域, 可以使用 NDVI 有效管理黄河三角洲生态系统, 提高其生产力水平。

关键词: MODIS; NPP; NDVI; 黄河三角洲; 空间分布

Spatial-temporal variation of NPP and NDVI correlation in wetland of Yellow River Delta based on MODIS data

JIANG Ruizhu¹, LI Xiuqi², ZHU Yongan², ZHANG Zhiguo^{1,*}

1 Life School of Shandong University, Jinan, 250100, China

2 Fresh Water Fishery Research Institute of Shandong Province, Jinan 250117, China

Abstract: Study of vegetation productivity and carbon sequestration of wetland ecosystem is a main research topic of global carbon cycle and global change. The ecosystem productivity study of Yellow River Delta, a wetland delta with fastest reclamation speed in China and in the world, is therefore extremely important. Due to human activities have affected all of ecological systems, to find an expeditious way to assess the ecosystem health becomes the major topic of current study. Net primary productivity (NPP) is a key component of terrestrial carbon cycle, and it is defined as the accumulative organic matters by green plants per unit of time and space. NPP, the direct reflection of plant community productivity for a certain natural environment, is the basis of matter and energy cycles of terrestrial ecosystem. The Normalized Difference Vegetation Index has been used for many years to measure and monitor plant growth, vegetation cover, and biomass production from multispectral satellite data. It is an indicator of vegetation growth and its spatial distribution has a close relationship with climate conditions. We use MODIS NPP and NDVI data to analyze the characteristics of spatial-temporal variation of NPP and NDVI in Yellow River Delta between 2001 and 2006. Distribution of NDVI shows that soil water-salt distribution is the main controlling factor of plant growth in the delta. The distribution of primary productivity has been obviously affected by human activities. We further built a new coastal regression model. As the changeable different regions which have different distances from the coastline and which have different lengths, we discuss the correlation between annual NPP (aNPP) and

基金项目: 国家海洋公益性行业科研专项资金资助 (200805070)

收稿日期: 2010-08-01; 修订日期: 2011-08-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zgzhang@sdu.edu.cn

average annual NDVI (ANDVI). Results suggest that distribution of wetland ecosystems in the Yellow River Delta has obvious spatial heterogeneity from sea to land, along with the ecosystem succession. Mud flat along the coastline is a place for developing ecosystem with a large amount of pioneer plants, which has high productivity and their aNPP is positively related to ANDVI. Saline-alkali land has a low lever of aNPP because of higher concentration of salts; Agricultural land is a developed mature ecosystem in which the nutrition circulates only inside the ecosystem and affected mostly by human activities. Thus there is no directly relationship between aNPP and ANDVI in saline-alkali land and agriculture land, Consequently, we preliminarily discussed the feasible regions in the Yellow River Delta that can use MODIS NDVI to monitor their productivity. In the region where the distance to coastline is less than 6km, all of six simple regression models for each year passed the significant F -test ($\alpha=0.01$, R^2 0.86 — 0.97). Finally, to understand the time differentiation characteristics of correlation coefficient between ANDVI and aNPP, we calculated the percentage size and the average aNPP with different ANDVI value range. We figured out that resource competition may be one of the fact making the correlation coefficient difference. Therefore, we can use NDVI to effectively monitor and manage the ecosystems and to increase their productivity. Based on the research of the ecosystem productivity of Yellow River Delta, we can effectively understand the regularity for change of productivity during the rapid economic development period, which can further guide the administration of local ecosystems.

Key Words: MODIS; NPP; NDVI; Yellow River Delta; spatial distribution

人类活动影响了所有的生态系统,因而寻找快捷的方法评估生态系统的健康状况成为目前研究的焦点之一^[1]。植被作为陆地生态系统的重要组成部分,在地面和大气之间的能量和物质的交换发挥着重要的作用。植被净初级生产力(Net Primary Productivity,简称 NPP)是指植物在单位时间单位面积上由光合作用产生的有机物质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分,它是生态系统中物质与能量运转研究的基础,直接反映植物群落在自然环境条件下的生产能力。自 1995 年联合国气候变化框架公约(UNFCCC)将湿地保护列为一项增加碳汇功能的措施之后,湿地生态系统植被生产力和固碳潜力的研究成为全球碳循环和全球变化的重要研究内容^[2-4]。卫星图像的广泛获得和图像处理软件的应用,生态学家在景观和区域尺度上可能相对比较容易地使用遥感技术进行生态学问题的研究。随着遥感(RS)和地理信息系统(GIS)的不断发展,应用模型对 NPP 的研究在近年得到了迅速的发展,从最初的 MIAMI 模型、Chikugo 模型,到基于卫星遥感数据的 NPP 模型。MOD17A3 是基于 MODIS(TERRA 卫星)遥感参数,通过 BIOME-BGC 模型计算出全球陆地植被净初级生产力年际变化的资料(aNPP),目前已在全球不同区域对植被生长状况、生物量的估算、环境监测和全球变化等研究中得到验证和广泛应用^[5-6]。国内也有大量研究者在内蒙古草原,东北地区,广东省,北京永定河等不同大小区域验证了在我国使用 MOD17A3 数据研究生产力变化的可靠性^[7-10]。

归一化植被指数 NDVI 是根据叶绿素对不同波长电磁波的反射率不同,在卫星遥感信息的基础上构造出的可有效的反应地面植被的生长状况的遥感参数,人们对 NDVI 与绿色植物组织的生物量和叶面积指数之间的关系进行了大量的实验性研究^[11-12],早在 1991 年,Burke 等已经利用 NDVI 来分析和估计美国大平原的初级生产力。由于植被指数对地面植被叶绿素变化的敏感性和较高的时空分辨率,因此可以很灵敏地反映 NPP 的动态变化。同气候生产潜力模型、生态系统过程模型和光能利用率模型相比,采用统计回归的方法计算 NPP 的变化动态,其优势在于所需要的参数少,计算简便,可适用于区域 NPP 的估算。气候生产潜力模型、生态系统过程模型和光能利用率模型估测方法需要的参数多,有的参数在某些区域极难获取,比如每日气象数据、土壤呼吸率等,有很多参数在不同区域其值也存在显著差异,需要大量的野外工作,并且很多模型是基于全球尺度的,对于小区域的计算不能满足精度要求^[7]。植被指数可以较好的反映草地 NPP 的年际变化和不同草地的 NPP 差异,但是由于植被指数本身的局限性,使得其对于高盖度植被模拟较好,而对于低盖度草地以及在冬春季易受土壤背景、植被类型和云雪的影响,估测结果有较大误差。

黄河三角洲是我国乃至世界造陆速度最快的河口三角洲之一,土地利用/土地覆盖变化迅速。该区具有我国暖温带最广阔、最完整的河口新生湿地生态系统,是中国湿地生态系统的重点保护区域。同时,由于人口增长导致的对自然资源掠夺式开发,石油工业开采造成的环境污染以及黄河断流等自然灾害,黄河三角洲的生态系统发生重大改变。本文在探讨 EOS/MODIS 卫星遥感的 NDVI 与 aNPP 的空间分布规律的基础上,确定两者间相关关系的时空变化模式,明确两者相关关系的空间范围,在分析年际 aNPP 与 NDVI 变化情形的基础上,研究利用 NDVI 进行黄河三角洲生产力估测的可行性,为建立基于 NDVI 的简捷而又具有较高精度的黄河三角洲地区自然植被净第一性生产力估算模型提供基础。黄河三角洲生产力变化的研究,可以有效总结和把握其经济社会快速发展时期的生产力变化规律,并以此来指导黄河三角洲当地的生态系统管理,对黄河三角洲生产力进行研究有着重要的科学意义和实践意义。

1 研究区概况

黄河三角洲地处渤海湾和莱州湾的交界地,主要分布于山东省东营市和滨州市境内,是由古代、近代和现代的 3 个三角洲组成的联合体。本文研究区所选定现代黄河三角洲是 1934 年以来至今仍在继续形成的以垦利县渔洼为顶点的扇面,西起挑河,南到宋春荣沟,陆上面积约为 3000km²。地势西高东低,低平缓和,平均海拔高度为 0m。

该区位于 117°31′—119°18′E 和 36°55′—38°16′N 之间,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均温度为 11.7—14.1℃,年总降水量 430—750mm,70% 分布在夏季。区内光照充足,气温适中,雨热同期,四季分明。研究区属北温带落叶阔叶林带,森林覆盖率约为 4%,植被类型单一,自然植被为草甸植被,尤以盐生草甸占显著地位,群落优势种主要有白茅(*Imperata cylindrica* var. *major*)、芦苇(*Phragmites australis*)、獐茅(*Aeluropus littoralis* var. *sinensis*)、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)等,内陆地区尤其是黄河沿岸已被大量农耕地取代。

2 数据处理

2.1 数据来源

NPP 以及 NDVI 数据为美国国家航空航天局(NASA)的 EOS/MODIS (TERRA 卫星)提供的 2001—2006 年的遥感数据产品(MOD17A3 和 MOD13A3)。MOD17A3 是通过 BIOME-BGC 模型计算出全球陆地植被净初级生产力(NPP)年际变化的资料,空间分辨率为 1km^[13]。MODIS-NPP 的数据是全年 365d 每日光合作用产生的有机物质总量(Photosynthesis,简称 PsnNet)的加和扣除全年自养呼吸后剩余的部分,称为全年植被净初级生产力(annual Net Primary Productivity,简称 aNPP)。同时,MOD17A3 提供了质量控制信息(Npp_QC_1km),用以检测数据的质量,即 NPP 象元的可靠性。

MOD13A3 提供全球陆地植被每月的植被指数,包括归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index,简称 NDVI),空间分辨率为 1km。MOD13A3 产品的有效值范围是-2000—10000,即为 NDVI×10000 所得的数值。此外,还利用土地分类产品 MOD12Q1 校准该研究区的植被分类结果。利用 MRT (Modis Reprojection Tool <https://lpdaac.usgs.gov/>) 软件将原始 hdf 数据转换成分辨率为 0.008359°×0.008359°经纬度网格数据,黄河三角洲研究区共计有 3732 个栅格。

2.2 海岸线的划分及海岸距离的确定

将研究区海陆交界处的栅格点定义为海岸线,规定各栅格点到海岸线的距离为该栅格点的海岸距离,黄河三角洲研究区栅格点的海岸距离在 0—43km 之间。 $U_{i,j}$ 表示其栅格点的海岸距离大于等于 i km 小于 j km 的黄河三角洲区域,此时,称 i 与 j 分别为区域 $U_{i,j}$ 的海岸近距与海岸远距, $j-i$ 称为区域 $U_{i,j}$ 的宽度。

2.3 MODIS 数据处理

MODIS-NPP:MOD17A3 产品提供全年 NPP 的总值,收集 2001—2006 年黄河三角洲地区 MOD17A3 产品 NPP 以及 NPP_QC 数据,分别代表该地区 2001—2006 年每年的 aNPP 及 NPP_QC_1km 数据。

MODIS-NDVI:收集 2001—2006 年黄河三角洲地区月平均 NDVI 数据,即 MNDVI,求取每年 12 个月份的 NDVI 平均值 ANDVI,分别代表该地区 2001—2006 年每年的 ANDVI。

$$\text{ANDVI} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \text{MNDVI}_i$$

式中,ANDVI 为 1a 内 MNDVI 的平均值,以 ANDVI 作为 NDVI,探讨它与黄河三角洲年植被净第一性生产力 aNPP 的关系。

2.4 相关性分析

设距离海岸 i 到 j 公里的黄河三角洲区域 $U_{i,j}$ 内共有 n 个栅格点,这些栅格点处的 ANDVI 与 aNPP 分别记为 x_k 和 y_k ($k=1,2,\dots,n$)。为了研究区域 $U_{i,j}$ 内 ANDVI 与 aNPP 的相关性,选用相关系数作为评价的定量化指标。相关系数的计算公式为:

$$r_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{X})(y_k - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{X})^2 \cdot \sum_{k=1}^n (y_k - \bar{Y})^2}}$$

式中, $r_{i,j}$ 表示区域 $U_{i,j}$ 内 ANDVI 与 aNPP 的相关系数; n 为样本数; $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k$, $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_k$ 。

2.5 一元线性回归分析

为了进一步分析 NPP 随 NDVI 的变化情况,建立了 NDVI 与 NPP 的一元线性回归模型,并进行显著性检测,探讨利用 NDVI 进行黄河三角洲生产力监测研究的可行性。

3 结果

3.1 aNPP 质量控制数据

2001—2006 年黄河三角洲每年的质量控制(QC)数据相同,如图 1 所示。

MODIS NPP 标准产品的质量控制信息用一个 8 位的二进制数据来描述,包括 MODLAND、Sensor、DeadDetector、CloudState、SCF_QC 五类,其中 SCF_QC 为 8 位二进制的前 3 位,提供模型算法反演结果的质量。255 是填充数据,这些象元地区为城市、盐生地、内陆淡水或一些植被贫瘠之地,导致 NPP 无法估算。象元值 32、33 换算成 8 位二进制数分别为 00100000 与 00100001,SCF_QC 数据均为 001 虽然不属于最好的 0 级数据类型,但为好的 1 级数据,具有很好的适用性。虽然这些象元地区 FPAR 以及叶面积指数(LAI)数据出现饱和现象,不过既然是全年植被净初级生产力,全年过程中 FPAR/LAI 数据出现饱和现象是可以理解的。由此可见,该地区 MODIS NPP 数据具有相当可靠性用于相关研究。

3.2 ANDVI 与 aNPP 空间分异

2001—2006 年黄河三角洲平均 ANDVI 与 aNPP 空间变化如图 2,图 3 所示。

黄河三角洲 ANDVI 的高值区主要分布在黄河沿岸和黄河故道,海岸线沿岸为 ANDVI 较低的区域。随着海岸距离的增大 ANDVI 减小,随着距黄河距离的减小 ANDVI 减小。黄河三角洲 aNPP 高值主要分布于北部的自然保护区,而 ANDVI 高值区——黄河沿岸和黄河故道区,aNPP 值反而较低。因北部的自然保护区人类活动较小,植被覆被为天然植被,其 aNPP 值较高。

ANDVI 和 aNPP 空间分异与海岸线的关系如图 4 所示,黄河三角洲包含海岸线的区域 $U_{0,j}$,随着海岸远距 j 的增加,区域宽度增加,ANDVI 的平均值不断增大。宽度为 1km 的区域 $U_{i,i+1}$,随着海岸距离 i 的增加,ANDVI 的平均值总体上也不断增大,由最低的 0.1084 增加到 0.3974。ANDVI 的变化范围在 0.0003 到

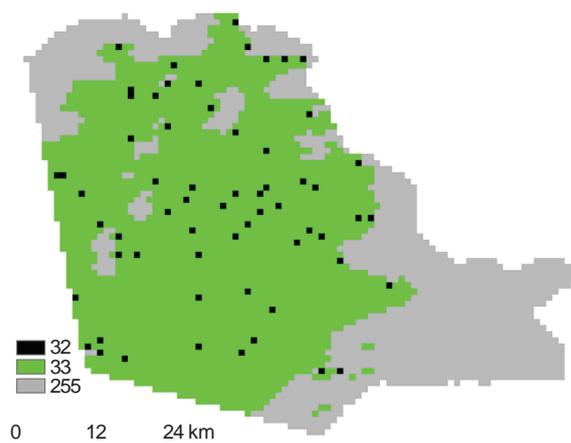


图 1 黄河三角洲 NPP_QC_1km 分布

Fig. 1 The spatial distribution of NPP_QC_1km in Yellow River Delta

0.5184 之间。

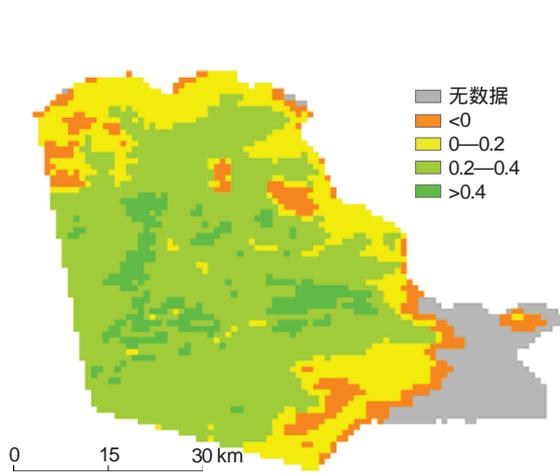


图2 黄河三角洲 ANDVI 分布图

Fig. 2 The spatial distribution of ANDVI in Yellow River Delta

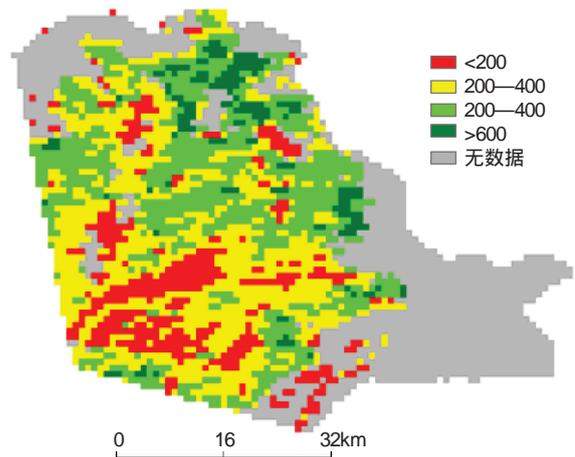


图3 黄河三角洲 aNPP 分布

Fig. 3 The spatial distribution of aNPP in Yellow River Delta

aNPP 空间分异与海岸线的关系如图 5 所示,黄河三角洲包含海岸线的区域 $U_{0,j}$,随着海岸远距 j 的增加,区域宽度增加,aNPP 的平均值先不断增大再逐渐减小。宽度为 1km 的区域 $U_{i,i+1}$,随着海岸距离 i 的增加,aNPP 的平均值也先增大后减小。aNPP 的变化范围在 0 到 $681 \text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间。

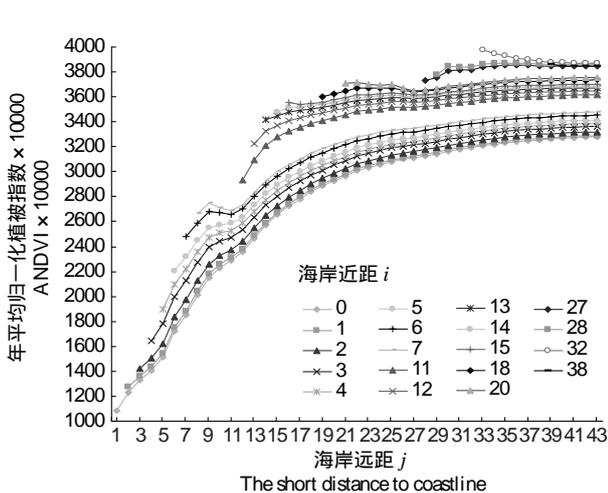


图4 j-ANDVI 关系图

Fig. 4 j-ANDVI diagram

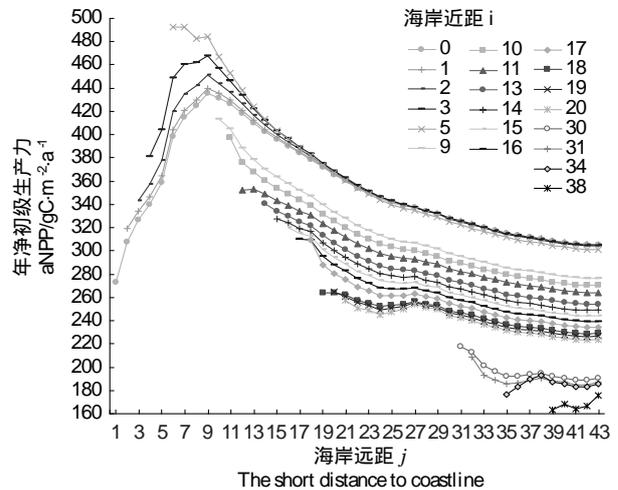


图5 j-aNPP 关系图

Fig. 5 j-aNPP diagram

3.3 ANDVI 与 aNPP 的相关性的空间依赖性

黄河三角洲区域 $U_{i,j}$ 内的 ANDVI 与 aNPP 的相关系数 $r_{i,j}(i,j=1,2,\dots,43)$,分别选定海岸远距 j ,给出相关系数 $r_{i,j}$ 随海岸近距 i 变化的 $i-r_{i,j}$ 关系图(图 6)。

可以看出黄河三角洲海岸线到距离海岸 6 km 以内的区域 $U_{0,6}$ 内,相关系数 R 值 $r_{i,6}$ 在 0.9 左右 ($i=0,1,2,\dots,5$),相关系数 R 值最高且非常稳定。当黄河三角洲区域 $U_{i,j}$ 的海岸远距 j 取值介于 7 km 到 12 km 之间时:所有 R 值均大于 0, ($i < j=7,8,\dots,12$);固定区域 $U_{i,j}$ 的海岸远距 j ($j=7,8,\dots,12$),当海岸近距 i 逐渐增大时,区域 $U_{i,j}$ 的宽度 $j-i$ 减小, R 值总体减小,且减小速度快,区域 $U_{i,j}$ 的宽度 $j-i$ 减小到 1—2 km 时,部分 R 值出现不规则的变化,急增或急减。当黄河三角洲区域 $U_{i,j}$ 的海岸远距 j 取值介于 13 km 到 43km 之间时: R 值

有负值出现,海岸远距 j 取值介于为 18 km 到 43 km 之间时,所有 R 值均小于0,且最小可达-0.87;固定 $U_{i,j}$ 的海岸远距 j ($j=13,14,\dots,43$),当海岸近距 i 逐渐增大时,区域 $U_{i,j}$ 的宽度 $j-i$ 减小, R 值变化趋势近乎相同,总体减小,且减小速度缓慢。具体来说,海岸近距 i 在 7 km 至 9 km 时, R 值基本不变,海岸近距 i 在 27 km 至 36 km 时, R 值有很缓慢及很小的回升,其他情况 R 值均为缓慢减小,区域 $U_{i,j}$ 的宽度 $j-i$ 减小到 1—2 km 时,部分 R 值也会出现不规律的变化。

距离海岸线小于等于 6 km 的黄河三角洲区域 $U_{0,6}$ 内,ANDVI 与 aNPP 的相关系数 R 值最高且非常稳定,可将此区域划分为特定区域,进一步研究 ANDVI 与 aNPP 之间的一元回归模型。距离海岸线 7 km 到 12 km 之间的区域 $U_{7,12}$ 内,随着区域到海岸距离的增加,ANDVI 与 aNPP 的相关性急剧下降,在这宽度只有 6 km 的区域内, R 值就降到 0。距离海岸线 13 km 到 43 km 之间的区域 $U_{13,43}$ 内,随着区域到海岸距离的增加,ANDVI 与 aNPP 的相关系数 R 值趋于稳定,变化不大,但负相关性逐渐明显。因此,在区域 $U_{7,12}$ 与 $U_{13,43}$ 内,都无法建立 ANDVI 与 aNPP 的一元线性回归模型。

3.4 沿海地区 ANDVI 与 NPP 关系的时间分异

根据 3.3 的结果,划定黄河三角洲海岸线到海岸距离 6 km 以内全部区域划分为沿海区域。使用沿海区域 265 个样本点对应的 2001—2006 年黄河三角洲 ANDVI 与 aNPP 的数值,进一步建立 2001—2006 年黄河三角洲沿海地区 ANDVI 与 aNPP 的一元线性回归模型。2001—2006 年,各年黄河三角洲沿海地区 ANDVI—aNPP 一元线性回归模型分析如表 1 所示。

表 1 黄河三角洲沿海地区植被 ANDVI 与 aNPP 回归分析模型效果分析

Table 1 The linear regression model and corresponding analysis of ANDVI and aNPP along the coast region in Yellow River Delta

年份 Year	回归方程式 The linear regression model	R^2 Correlation coefficient	样本数 Sample size	F
2001	aNPP = 1687.3ANDVI + 158.89	0.8645	258	757.45
2002	aNPP = 2080.6ANDVI + 97.126	0.9672	239	3439.62
2003	aNPP = 1981.4ANDVI + 128.72	0.9498	246	2250.36
2004	aNPP = 1876.9ANDVI + 133.35	0.9363	255	1798.48
2005	aNPP = 1751.0ANDVI + 150.71	0.9428	262	2078.62
2006	aNPP = 1712.5ANDVI + 112.38	0.9724	243	4190.32

表 1 中,ANDVI 的数值范围是 0—1;NPP 的单位是 $\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;样本数为删除数值异常的点之后建立该年份回归模型所使用的样本数; F 为各年回归模型的 F 检测值。由表 1 可知:各年黄河三角洲沿海区域 ANDVI—aNPP 一元线性回归模型,均通过显著性水平 $\alpha=0.01$ 的 F 检测, R^2 高达 0.97,最低也达 0.86,模型有很好的拟合效果。因此,使用 ANDVI 估测黄河三角洲沿海地区的 aNPP 某种程度上来说是可行的。

3.5 沿海地区 ANDVI 与 aNPP 关系的时间分异性分析

根据 3.3 回归方程的结果可以看出,不同年份 ANDVI 与 aNPP 回归方程的回归系数(即方程的斜率)与回归常数(即方程的截距)具有一定的差异。根据线性方程的特点,回归常数的大小可以反映 NDVI 低值区 aNPP 的数值情况,而 ANDVI 高值区 aNPP 的大小可以体现在回归系数上,系数越大,高值区的 ANDVI 对应的 aNPP 的数值越大。由此,将 ANDVI 根据其数值大小分成 4 级,分别统计了每年各级分布比例,以及该级别内

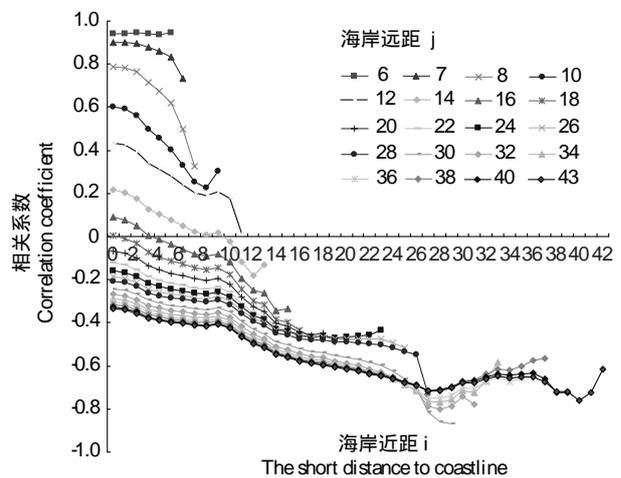


图 6 $i-r_{i,j}$ 关系图

Fig. 6 $i-r_{i,j}$ diagram

aNPP 的平均值,如表 2 所示。

表 2 中,ANDVI 低值区即 ANDVI 小于 0.1 时,aNPP 的平均值与回归常数的变化趋势基本相同。2001、2005 年最高,2003、2004 次之,2002、2006 年最低。由 3.1 可知,ANDVI 低值区距海岸线最近,该区土壤盐分含量极高,若沿海地区的年降水量减少,极可能导致植被生产力降低。ANDVI 高值区 aNPP 变化情况较为复杂,根据每年 ANDVI 最大值以及高值区所占比例可知,从 2001 年开始到 2005 年沿海地区植被盖度逐渐增强,2006 年有所下降。2002 年到 2003 年之间的变化尤为显著,这可能也是 2002 年回归系数较大的原因。2002 年沿海地区植被盖度最低,物种密度较小,个体之间资源竞争关系不显著,因此在环境资源充分利用的情况下,个体生长速率极快,相对回归系数也就较高。2002 年以后,每年的植被盖度都比前一年有所增加,因此物种密度增加,资源竞争关系明显,植被的生长率下降,回归系数也逐年减少。2006 年 ANDVI 比 05 年减少的可能是由于人类活动的影响,开发了沿海地区部分土地。

表 2 不同年份黄河三角洲沿海地区植被 ANDVI 分级比较

Table 2 The segmented comparison of ANDVI along the coast region in Yellow River Delta in different years

ANDVI 梯度范围 ANDVI range for gradient	年份 Year					
	2001		2002		2003	
	百分比/% Percentage	$\overline{\text{aNPP}}$	百分比/% Percentage	$\overline{\text{aNPP}}$	百分比/% Percentage	$\overline{\text{aNPP}}$
0.0—0.1	21	247.0	22	223.9	22	235.6
0.1—0.2	45	432.1	54	425.8	42	440.0
0.2—0.3	34	550.9	24	581.0	32	610.6
0.3—0.4	0	0.0	0	0.0	4	722.6
NDVI _{max}	0.2894		0.2941		0.3427	
ANDVI 梯度范围 ANDVI range for gradient	年份 Year					
	2004		2005		2006	
	百分比/% Percentage	$\overline{\text{aNPP}}$	百分比/% Percentage	$\overline{\text{aNPP}}$	百分比/% Percentage	$\overline{\text{aNPP}}$
0.0—0.1	22	233.5	27	245.1	23	201.6
0.1—0.2	39	430.2	34	436.0	40	381.6
0.2—0.3	28	600.0	26	597.2	27	548.1
0.3—0.4	11	696.8	13	699.9	10	642.0
NDVI _{max}	0.3547		0.3696		0.3442	

4 结论

应用卫星遥感数据进行生态系统结构与功能的研究在显著地增加,统计结果表明,发表在《Ecological Application》杂志的有近十分之一的文章是利用遥感数据开展研究工作的^[14]。由于系统相关参数分布的非线性、生境的异质性和随机性,解决 NPP 建模中的空间尺度效应问题,需要注意 NPP 模型构建过程中不同因素之间的相互作用、模型的假设条件、模型的非线性反应,模型的灵敏性变化以及与现代非线性理论相结合外,还应注重 NPP 估算模型的物理机制研究,从产生空间尺度效应的本质入手,建立具有普适性的空间尺度转换模型。

影响黄河三角洲植被分布的主要因素是土壤盐分与土壤水分,黄河三角洲土壤盐分分布的主要特点以黄河为界向两侧呈带状分布,盐分逐渐增大,随着距海岸线的距离增大土壤盐分减小;局部有斑状的高值或低值区分布,这主要是由于局部中小地形所控制而引起水盐的再分配而造成,ANDVI 的空间分布表现出和土壤盐分相对一致空间分异特征。

黄河三角洲自海向陆依次分布着滩涂湿地、盐碱荒地和农耕地 3 个主要生态系统。沿海地区主要为滩涂湿地生态系统,优势物种为芦苇及碱蓬,由于受人类活动干扰较少,该系统将逐渐向该地区的气候顶极生态系统——暖温带落叶阔叶林生态系统演替,该系统处于自然演替的初级阶段,因此系统的生产力较高,沿海地区

的 aNPP 平均值高,且 ANDVI 与 aNPP 的相关系数高。盐碱荒地土壤盐分重,适生植物很少,并且在自然力作用下,土壤脱盐速度很慢,系统功能低,进展演替缓慢,系统的生产力也降低,aNPP 大幅降低,导致 ANDVI 与 aNPP 的相关系数迅速下降;农耕地受人类干扰严重,虽然生产力较高,但由于农业季节变化,1a 内植被覆被变化频繁,作物收割后的生产力会明显降低^[15],而 aNPP 不同于每天即时测量的生产力 NPP,为 1a 内生产力的加和,在计算 ANDVI 时,会在一句内取最大植被指数以消除太阳高度角、卫星视角及云的影响,因此 ANDVI 不能有效反应人类活动对植被覆被干扰大的区域的植被覆盖情况,所以 ANDVI 与 aNPP 的相关性呈现负相关的情况,黄河沿岸和黄河故道区其主要植被覆被类型为农业用地,所以该区域内 aNPP 较低。加之,由于内陆地区人类不合理利用土地资源,使作物或者相关植被种群密度过高,黄河三角洲植被类型单一,草甸为主,不能有效利用空间资源,导致资源竞争关系明显,每一个物种不能充分利用资源,其生长状况就较之沿海地区有所下降。因此,ANDVI 与 aNPP 相关系数分布特征与 aNPP 的空间分布特征相似,aNPP 的大小影响了 ANDVI 与 aNPP 的相关性,黄河三角洲生态系统分布具有明显的时空特异性,滩涂湿地分布于沿海地区,生产力高,因此该地区 aNPP 数值很高且 ANDVI 与 aNPP 相关性极强;中间地带为盐碱荒地,因土壤盐分重,系统功能低和生产力都很低;内陆的农耕地受人类干扰严重,由于农业季节变化,1a 总的生产力下降,导致 ANDVI 与 aNPP 的相关性呈现负相关的情况。当然,ANDVI 所反映的植物覆盖度可以推测该地区植被生长状况,尤其是资源竞争情况,ANDVI 数值低的沿海地区,资源得到充分利用,因此生产力较高;而内陆地区 ANDVI 数值过高,物种之间资源竞争关系明显,生产力随之降低。不过 NDVI 的推测只适用于植被类型较为单一的研究区域,因为群落垂直结构简单,较易判断其资源竞争状况。

利用 MODIS 数据研究黄河三角洲地区,能较好的满足空间分布的精度要求,符合该地区的实际情况。利用 ANDVI 及 aNPP 建立的黄河三角洲沿海地区生产力估测模型均通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平 F 检测并达到很好的拟合,说明利用 MODIS 遥感数据实时监测沿海地区的生产力变化是可行的。可以利用 NDVI 数值及时规划管理黄河三角洲植被密度分布格局,合理密植作物,提高生态系统的生产力。

References:

- [1] Euskirchen E S, Chen J Q, Li H, Gustafson E J, Crow T R. Modeling landscape net ecosystem productivity (LandNEP) under alternative management regimes. *Ecological Modelling*, 2002, 154(1/2): 75-91.
- [2] Ahl D E, Gower S T, Mackay D S, Burrows S N, Norman J M, Diak G R. The effects of aggregated land cover data on estimating NPP in northern Wisconsin. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(1): 1-14.
- [3] Simic A, Chen J M, Liu J, Csillag F. Spatial scaling of net primary productivity using subpixel information. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(1/2): 246-258.
- [4] Zelic A, Chen J M, Liu J, Csillag F. Algorithms for spatial scaling of net primary productivity using subpixel information//2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium and the 24th Canadian Symposium on Remote Sensing Proceeding. Toronto: University of Toronto, 2002.
- [5] Matsushita B, Tamura M. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in East Asia. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 81(1): 58-66.
- [6] Silvestri S, Marani M, Settle J, Benvenuto F, Marani A. Salt marsh vegetation radiometry data analysis and scaling. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(3): 473-482.
- [7] Wang H, Li X B, Long H L, Gai Y Q, Wei D D. Monitoring the effects of land use and cover changes on net primary production: a case study in China's Yongding River basin. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(12): 2654-2665.
- [8] Zhu W Q, Pan Y Z, Long Z H, Chen Y H, Li J, Hu H B. Estimating net primary productivity of terrestrial vegetation based on GIS and RS: a case study in Inner Mongolia, China *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(3): 528-531.
- [9] Cai R, Xu R S, Chen Y, Miao L, Wang J. Analysis of temporal-spatial characteristics of vegetation NPP in Guangdong Province. *China Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2009, 31(2): 9-11.
- [10] Guo Z X, Wang Z M, Zhang B, Liu D W, Yang G, Song K S, Li F. Analysis of temporal-spatial characteristics and factors influencing vegetation

- NPP in Northeast China from 2000 to 2006. *Resources Science*, 2008, 30(8): 1226-1235.
- [11] Reich P B, Turner D P, Bolstad P. An approach to spatially distributed modeling of net primary production (NPP) at the landscape scale and its application in validation of EOS NPP products. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70(1): 69-81.
- [12] Turner D P, Gower S T, Cohen W B, Gregory M, Maier-sperger T K. Effects of spatial variability in light use efficiency on satellite-based NPP monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(3): 397-405.
- [13] Zhao M S, Heinseh F A, Nemani R R, Running S W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(2): 164-176.
- [14] Fassnacht K S, Cohen W B, Spies T A. Key issues in making and using satellite-based maps in ecology: a primer. *Forest Ecology and Management*, 2006, 222(1/3): 167-181.
- [15] Burke I C, Kittel T G F, Lauenroth W K, Snook P, Yonker C M, Pantro W J. Regional analysis of the central Great Plain. *BioScience*, 1991, 41(10): 685-692.

参考文献:

- [8] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 陈云浩, 李京, 扈海波. 基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 NPP 估算——以中国内蒙古为例. *遥感学报*, 2004, 9(3): 528-531
- [9] 蔡睿, 徐瑞松, 陈彧, 苗莉, 王洁. 广东省植被 NPP 时空特征变化分析. *农机化研究*, 2009, 31(2): 9-11
- [10] 国志兴, 王宗明, 张柏, 刘殿伟, 杨桃, 宋开山, 李方. 2000—2006 年东北地区植被 NPP 的时空特征及影响因素分析. *资源科学*, 2008, 30(8): 1226-1235.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 22 November, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Hyperspectral estimation models for plant community water content at both leaf and canopy levels in Wild Duck Lake wetland	6645
..... LIN Chuan, GONG Zhaoning, ZHAO Wenji (6645)	
Potential distribution of rice in china and its climate characteristics	6659
..... DUAN Juqi, ZHOU Guangsheng (6659)	
Effects of seed soaking with soybean isoflavones on soybean seedlings under salt stress	6669
..... WU Yumei, ZHOU Qiang, YU Bingjun (6669)	
Ecophysiological responses and adaptation of <i>Tamarix ramosissima</i> to changes in groundwater depth in the Heihe river basin	6677
..... ZHANG Pei, YUAN Guofu, ZHUANG Wei, et al (6677)	
<i>Melica przewalskyi</i> population spatial pattern and response to soil moisture in degraded alpine grassland	6688
..... ZHAO Chengzhang, GAO Fuyuan, SHI Fuxi, et al (6688)	
A study on ecological compensation standard for Zaoshi Water Conservancy Project based on the idea of ecological footprint	6696
..... XIAO Jianhong, CHEN Shaojin, YU Qingdong, et al (6696)	
Spatial-temporal variation of NPP and NDVI correlation in wetland of Yellow River Delta based on MODIS data	6708
..... JIANG Ruizhu, LI Xiuqi, ZHU Yongan, et al (6708)	
Marshclassification mapping at a community scale using high-resolution imagery	6717
..... LI Na, ZHOU Demin, ZHAO Kuiyi (6717)	
The impact of bacterial-feeding nematodes on root growth of <i>Arabidopsis thaliana</i> L. and the possible mechanisms	6727
..... CHENG Yanhong, CHEN Xiaoyun, LIU Manqiang, et al (6727)	
Spatial and dynamic analysis of plantations in Xishuangbanna using network <i>K</i> -function	6734
..... YANG Juejie, LIU Shiliang, ZHAO Qinghe, et al (6734)	
Contrastive analysis and climatic response of tree-ring gray values and tree-ring densities	6743
..... ZHANG Tongwen, YUAN Yujiang, YU Shulong, et al (6743)	
Fractal structure of dominant tree species in north-facing slope of mountain of northern Hebei	6753
..... TIAN Chao, LIU Yang, YANG Xinbing, et al (6753)	
Characteristics of radiation fluxes of an evergreen broad-leaved forest in Maofeng Mountain, Guangzhou, China	6766
..... CHEN Jin, CHEN Bufeng, PAN Yongjun, et al (6766)	
Effects of seed-dressing agents on groundnut and rhizosphere microbes	6777
..... LIU Dengwang, ZHOU Shan, LIU Shengrui, et al (6777)	
Time series prediction of the concentration of chlorophyll-a based on RBF neural network with parameters self-optimizing	6788
..... TONG Yuhua, ZHOU Hongliang, HUANG Zhefeng, et al (6788)	
A trend surface analysis of geographic variation in the traits of seeds and seedlings from different <i>Quercus acutissima</i> provenances	6796
..... LIU Zhilong, YU Mukui, MA Yue, et al (6796)	
Comparisons of relationships between leaf and fine root traits in hilly area of the Loess Plateau, Yanhe River basin, Shaanxi Province, China	6805
..... SHI Yu, WEN Zhongming, GONG Shihui (6805)	
An analysis on the water status in twigs and its relations to the drought resistance in Five woody plants living in arid zone	6815
..... TAN Yongqin, BAI Xinfu, ZHU Jianjun, et al (6815)	
The effect of fire on soil properties in a <i>Pinus massoniana</i> stand	6824
..... XUE Li, CHEN Hongyue, YANG Zhenyi, et al (6824)	
Water-environment effects of industry structure in Taihu Lake Basin in Jiangsu Province	6832
..... WANG Lei, ZHANG Lei, DUAN Xuejun, et al (6832)	
Effect of high temperature on enzymic activity, pigment content and chlorophyll fluorescence of two <i>Kappaphycus</i> species	6845
..... ZHAO Sufen, HE Peimin (6845)	
Analysis on characteristics of a typical drought event in Jiangsu Province	6853
..... BAO Yunxuan, MENG Cuili, SHEN Shuanghe, et al (6853)	
Surface heat flux and energy budget for semi-arid grassland on the Loess Plateau	6866
..... YUE Ping, ZHANG Qiang, YANG Jinhui, et al (6866)	
Effects of light quality on photosynthetic characteristics and on the carotenoid and cuticular extract content in tobacco leaves	6877
..... CHEN Wei, JIANG Wei, QIU Xuebai, et al (6877)	
Cyanobacterial diversity in biological soil crusts on wastelands of copper mine tailings	6886
..... LIU Mei, ZHAO Xiuxia, ZHAN Jing, et al (6886)	
Stereotypic behavior frequency and the influencing factors in captive Alpine musk deer (<i>Moschus sifanicus</i>)	6896
..... MENG Xiuxiang, GONG Baocao, XUE Dayuan, et al (6896)	
Zooplankton ecology near the Tianwan Nuclear Power Station	6902
..... WU Jianxin, YAN Binlun, FENG Zhihua, et al (6902)	
Diel variations of fish assemblages in multiple habitats of Ma'an archipelago, Shengsi, China	6912
..... WANG Zhenhua, WANG Kai, ZHANG Shouyu (6912)	
A novel cognitive-based approach to motivation for non-use value	6926
..... ZHONG Manxiu, XU Lizhong, YANG Jing (6926)	
Review	
Salt-responsive proteomics in plants	6936
..... ZHANG Heng, ZHENG Baojiang, SONG Baohua, et al (6936)	
Research progress on forms of nitrogen and determination in the sediments	6947
..... LIU Bo, ZHOU Feng, WANG Guoxiang, et al (6947)	
Review of research progress of infectious diseases in wild birds	6959
..... LIU Dongping, XIAO Wenfa, LU Jun, et al (6959)	
Review on the methods to quantify fish's ability to cross velocity barriers in fish passage	6967
..... SHI Xiaotao, CHEN Qiwen, HUANG Yingping, et al (6967)	
Monograph	
Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services: foundation, prospect and response strategy	6973
..... WU Jun, XU Haigen, DING Hui (6973)	
Scientific Note	
A comparative study of the spatial-temporal patterns of fine roots between young and mature <i>Caragana korshinskii</i> plantations	6978
..... CHEN Jianwen, WANG Mengben, SHI Jianwei (6978)	

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

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

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

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 31 卷 第 22 期 (2011 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 31 No. 22 2011

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

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
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

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

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
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@espg.net

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@espg.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

Domestic All Local Post Offices in China
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