

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

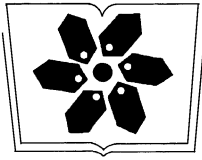
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第17期 Vol.32 No.17 **2012**

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 32 卷 第 17 期

2012 年 9 月 (半月刊)

目 次

基于生物生态因子分析的长序榆保护策略.....	高建国,章 艺,吴玉环,等 (5287)
闽江口芦苇沼泽湿地土壤产甲烷菌群落结构的垂直分布.....	余晨兴,仝 川 (5299)
涡度相关观测的能量闭合状况及其对农田蒸散测定的影响.....	刘 渡,李 俊,于 强,等 (5309)
地下滴灌下土壤水势对毛白杨纸浆林生长及生理特性的影响.....	席本野,王 焯,邸 楠,等 (5318)
绿盲蝽危害对枣树叶片生化指标的影响.....	高 勇,门兴元,于 毅,等 (5330)
湿地资源保护经济学分析——以北京野鸭湖湿地为例.....	王昌海,崔丽娟,马牧源,等 (5337)
湿地保护区周边农户生态补偿意愿比较.....	王昌海,崔丽娟,毛旭峰,等 (5345)
湿地翅碱蓬生物量遥感估算模型.....	傅 新,刘高焕,黄 翀,等 (5355)
增氮对青藏高原东缘典型高寒草甸土壤有机碳组成的影响.....	郑娇娇,方华军,程淑兰,等 (5363)
大兴安岭 2001—2010 年森林火灾碳排放的计量估算.....	胡海清,魏书精,孙 龙 (5373)
基于水分控制的切花百合生长预测模型.....	董永义,李 刚,安东升,等 (5387)
极端干旱区增雨加速泡泡刺群落土壤碳排放.....	刘殿君,吴 波,李永华,等 (5396)
黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应.....	许明祥,王 征,张 金,等 (5405)
小兴安岭 5 种林型土壤呼吸时空变异	史宝库,金光泽,汪兆洋 (5416)
疏勒河上游土壤磷和钾的分布及其影响因素.....	刘文杰,陈生云,胡凤祖,等 (5429)
COII 参与茉莉酸调控拟南芥吲哚族芥子油苷生物合成过程	石 璐,李梦莎,王丽华,等 (5438)
Gash 模型在黄土区人工刺槐林冠降雨截留研究中的应用	王艳萍,王 力,卫三平 (5445)
三峡水库消落区不同海拔高度的植物群落多样性差异.....	刘维湄,王 杰,王 勇,等 (5454)
基于 SPEI 的北京低频干旱与气候指数关系	苏宏新,李广起 (5467)
山地枣树茎直径对不同生态因子的响应.....	赵 英,汪有科,韩立新,等 (5476)
幼龄柠条细根的空间分布和季节动态	张 帆,陈建文,王孟本 (5484)
山西五鹿山白皮松群落乔灌木层的种间分离.....	王丽丽,毕润成,闫 明,等 (5494)
长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响.....	马晓霞,王莲莲,黎青慧,等 (5502)
基于归一化法的小麦干物质积累动态预测模型.....	刘 娟,熊淑萍,杨 阳,等 (5512)
上海环城林带景观美学评价及优化策略	张凯旋,凌焕然,达良俊 (5521)
旅游风景区旅游交通系统碳足迹评估——以南岳衡山为例.....	窦银娣,刘云鹏,李伯华,等 (5532)
一种城市生态系统现状评价方法及其应用.....	石惠春,刘 伟,何 剑,等 (5542)
黄海中南部细纹狮子鱼的生物学特征及资源分布的季节变化.....	周志鹏,金显仕,单秀娟,等 (5550)
蓝藻堆积和螺类牧食对苦草生长的影响.....	何 虎,何宇虹,姬娅婵,等 (5562)
黑龙江省黄鼬冬季毛被分层结构及保温功能.....	柳 宇,张 伟 (5568)
虎纹蛙选择体温和热耐受性在个体发育过程中的变化	樊晓丽,雷焕宗,林植华 (5574)
水丝蚓对太湖沉积物有机磷组成及垂向分布的影响	白秀玲,周云凯,张 雷 (5581)
专论与综述	
城市绿地生态评价研究进展.....	毛齐正,罗上华,马克明,等 (5589)
全球变化背景下生态学热点问题研究——第二届“国际青年生态学者论坛”	万 云,许丽丽,耿其芳,等 (5601)
研究简报	
雅鲁藏布江高寒河谷流动沙地适生植物种筛选和恢复效果.....	沈渭寿,李海东,林乃峰,等 (5609)
学术信息与动态	
生态系统服务时代的来临——第五届生态系统服务伙伴年会述评	吕一河,卫 伟,孙然好 (5619)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 334 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2012-09	



封面图说: 带雏鸟的白枕鹤一家——白枕鹤是一种体型略小于丹顶鹤的优美的鹤。体羽蓝灰色,腹部较深,背部较浅,脸颊两侧红色,头和颈的后部及上背为白色,雌雄相似。其虹膜暗褐色,嘴黄绿色,脚红色。白枕鹤常常栖息于开阔平原芦苇沼泽和水草沼泽地带,有时亦出现于农田和海湾地区,尤其是迁徙季节。主要以植物种子、草根、嫩叶和鱼、蛙、软体动物、昆虫等为食。繁殖区在我国北方和西伯利亚东南部。我国白枕鹤多在黑龙江、吉林、内蒙古繁殖,与丹顶鹤的繁殖区几乎重叠,为国家一级保护动物。

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

DOI: 10.5846/stxb201201110062

傅新, 刘高焕, 黄翀, 刘庆生. 湿地翅碱蓬生物量遥感估算模型. 生态学报, 2012, 32(17): 5355-5362.

Fu X, Liu G H, Huang C, Liu Q S. Remote sensing estimation models of *Suaeda salsa* biomass in the coastal wetland. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5355-5362.

湿地翅碱蓬生物量遥感估算模型

傅 新^{1,2}, 刘高焕^{1,*}, 黄 翀¹, 刘庆生¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:以黄河三角洲 HJ-1A CCD 遥感数据和滨海湿地翅碱蓬生物量实测数据为数据源, 通过对比分析参数回归模型(单变量线性和非线性回归模型, 多元线性逐步回归模型)和人工神经网络模型(BP 网络、RBF 网络、GRNN 网络), 构建黄河三角洲湿地翅碱蓬生长初期的生物量湿重遥感估算最优模型。研究表明: 基于遥感信息变量能够建立生长初期翅碱蓬生物量湿重估算模型。尽管基于 RDVI、MSAVI 和 PC2 的 3 个变量的多元线性回归模型的拟合效果较优, 但是以 SAVI、MSAVI、RVI、DVI、RDVI 和 PC2 等 7 个遥感信息变量构建的 BP 神经网络模型的精度更高, 平均相对误差为 12.73%, 估算效果最优, 能够满足较高精度的生物量湿重估算需求。翅碱蓬生长初期生物量湿重最优估算模型的建立, 为滨海地区植被生物量监测、区域翅碱蓬生物量季节动态模拟以及黄河三角洲生态系统功能评价提供技术支持与基础。

关键词:黄河三角洲; 滨海湿地; 翅碱蓬; 生物量; 遥感估算; 神经网络

Remote sensing estimation models of *Suaeda salsa* biomass in the coastal wetland

FU Xin^{1,2}, LIU Gaohuan^{1,*}, HUANG Chong¹, LIU Qingsheng¹

1 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Vegetation biomass is one of the key issues for accurate estimation of wetland ecosystems. The seasonal dynamics of vegetation biomass is vital for the study of ecosystem carbon fixation and the carbon cycle. *Suaeda salsa* is a common plant found in the Yellow River Delta (YRD) that plays an important role in coastal wetland ecosystems. Because *S. salsa* mainly grows in tidal flats, it is difficult to make long-term field observations, and so there are few systematic estimations of *S. salsa* biomass.

In this paper, different models, including parametric models and artificial intelligence models, were tested and analyzed for estimating fresh weight of *S. salsa* biomass based on remote sensing images from the Chinese environmental satellite HJ-1A CCD and measured data. According to the spatial distribution of *S. salsa* cover type, coverage and growing patterns, 20 plots of 90m×90m were randomly selected for sampling. In each plot, 5 quadrats of 1m×1m (in the four corners and center of the plot) were sampled and measured. The total biomass of each plot was calculated by the average value of those 5 quadrats. Vegetation indices were then extracted and the components of K-L transform and K-T transform were calculated from the preprocessed HJ-1A CCD images. The correlation between biomass fresh weight, dry weight and remote sensing information variables were analyzed to determine the variables that significantly related to the biomass.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41023010, 41101196)

收稿日期: 2012-01-11; 修订日期: 2012-07-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liugh@reis.ac.cn

Finally, parameter and nonparametric models were built based on these significant variables.

The parameter models used in this study include univariate linear, nonlinear regression and stepwise regression models. The non-parameter models used in this research are artificial neural network (ANN) models, including BP (Back propagation) networks, RBF (Radial Basis Function) networks and GRNN (General Regression Neural Network) networks. The optimal model was determined by comparison of the mean relative error (MRE) of regression models and ANN models. The major conclusions are: (1) there are significant correlations between several vegetation indices (RDVI, DVI, RVI, SAVI, MSAVI), the second component of the K-L transformation and *S. salsa* fresh biomass. Although there are no significant correlations between dry biomass of *S. salsa* and the remote sensing information variables, the trend of correlation is generally consistent. (2) It is feasible to build *S. salsa* fresh biomass models of the initial growing season by remote sensing information variables with regression models such as a univariate linear model of RDVI, a curve regression model of SMAVI and a multivariate stepwise regression model. However, of all the regression models, the linear regression model of three variables, RDVI, MSAVI and PC2, represents the best model for *S. salsa* fresh biomass. (3) The BP network model is the optimal model for estimation of *S. salsa* fresh biomass. The MRE of BP network model is 12.73%, which is 8.11% lower than the traditional multivariate stepwise regression model.

Key Words: Yellow River Delta; coastal wetland; *Suaeda salsa*; biomass; remote sensing model; artificial neural network (ANN)

植被生物量是生态阈值确定、固碳能力和生态功能评价的重要参数^[1-2],早期生物量估算研究主要针对林地和草地^[3-4],对湿地生物量估算的研究相对较少。湿地植被生物量及其季节动态性研究不仅是生态系统功能研究的基础,也是生态系统固碳能力、碳循环乃至预测全球变化的重要依据^[5]。作为滨海湿地的典型植被,翅碱蓬(*Suaeda salsa*)对滨海地区的碳循环具有巨大作用,同时还具有维持湿地生态系统正常演替、防风固堤等多重重要功能。由于翅碱蓬主要分布在潮滩上,受到潮汐等的影响,人类难以进入并进行长期的观测,对其研究资料相对较少,难以定量估算翅碱蓬在碳循环和生物质能积累中的作用^[1],因此准确快速的估计湿地翅碱蓬生物量就成为一个研究热点。

目前有关湿地植被生物量的估算模型主要以回归模型为主,如李旭文等利用 Landsat TM 数据,建立了 DVI 与太湖梅梁湖湾蓝藻生物量湿重之间的一元线性模型^[6],李仁东等建立了鄱阳湖湿生植被生物量采样数据与 ETM4 波段的一元线性相关模型^[7]。基于光学遥感的生物量估算多通过植被指数的回归反演,建立生物量的回归模型^[8]。在湿地植被中,芦苇生物量及相关遥感研究起步较早^[9-10],但是对湿地翅碱蓬的遥感研究相对缺乏^[11-12]。目前有关翅碱蓬生物量的研究主要有通过采集的现场光谱数据建立遥感反演回归模型,通过对采样数据的统计分析翅碱蓬生物量分配比重以及各器官生物量的季节变化等。吴涛^[12]等在研究中提出现场的光谱采集条件要求盖度大于 50%,而天然的翅碱蓬分布一般低于 50%。对于低盖度的区域,现场光谱数据建立的反演模型并不适用,基于卫星遥感数据的生物量反演模型有待进一步研究。毛培利^[13]等研究了不同生境下翅碱蓬根、茎、枝、叶和生殖器官的生物量分配比重特征,而不同生境下翅碱蓬生物量的空间分布特征有待深入研究。牟晓杰等^[14]统计分析了黄河口滨海中潮滩和低潮滩翅碱蓬不同器官的生物量季节动态,而大面积翅碱蓬生物量的季节变化及年际变化还需进一步研究。

本文在探讨翅碱蓬湿重、干重分别与植被指数、遥感数据各波段反射率、K-L 和 K-T 变换分量等的相关性的研究基础之上,利用 HJ-1A CCD 遥感数据和生物量实测数据进行翅碱蓬生物量遥感估算模型的研建,引入神经网络技术,并与传统的回归模型进行比较,提出生长初期翅碱蓬生物量遥感估算的最优模型。

1 研究区概况

现代黄河三角洲(37°30'—38°13'N,118°32'—119°18'E),地处渤海湾南岸和莱州湾西岸,位于山东省东营市境内的黄河入海口地区(图 1)。1992 年,黄河三角洲国家级自然保护区成立,包括北部的刁口河自然保

保护区(图 1A)和南部的黄河口自然保护区(图 1B),总面积 153000 hm^2 ,是以保护黄河口新生湿地生态系统和珍稀濒危鸟类为主体的自然保护区。该地区属于暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,光照充足,冷热干湿界限明显。年均气温 12.1 $^{\circ}\text{C}$,年均降水量 551.6 mm,年均蒸发量 1962 mm。总体地势平缓。主要植被类型有翅碱蓬群落、怪柳(*Tamarix chinensis*)群落、芦苇(*Phragmites australis*)群落、穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)群落、补血草(*Myriophyllum spicatum*)群落及罗布麻(*Apocynum venetum*)群落等,其中,翅碱蓬群落、怪柳群落和芦苇群落分布广泛。

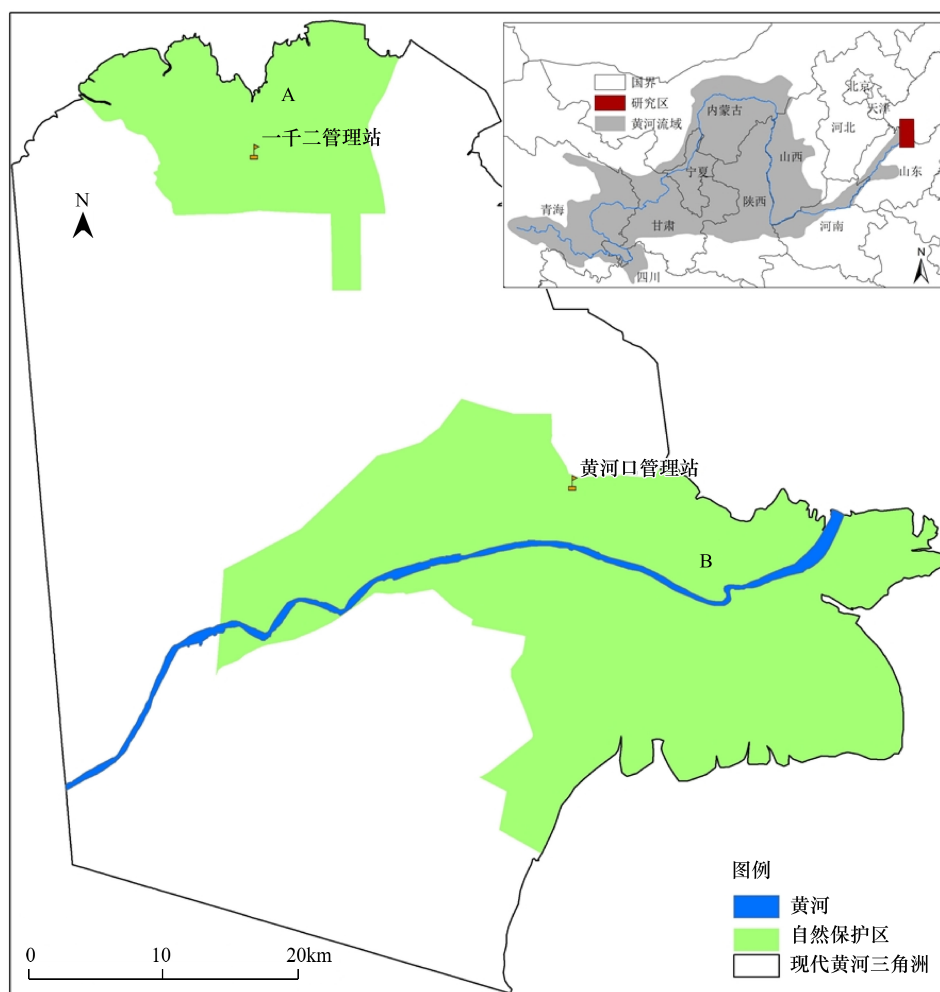


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

2 资料与方法

2.1 翅碱蓬生物样本采集与测量

2011 年 6 月中旬,在现代黄河三角洲自然保护区的一千二管理站和黄河口管理站区域的翅碱蓬湿地,按照“由海向陆、覆被类型均一性^[9]、植被长势和盖度的差异性^[13]以及样地可达性”的原则,共随机布设样地 20 个,为了减小影像校正误差与 GPS 定点误差的影响,样地大小设为 90 m×90 m。每个样地内,按规则正方形的四个顶点和中心点的方式采集 5 个小样方,小样方大小为 1 m×1 m,测得 5 个小样方的生物量,取其均值作为该样地的生物量。采集的主要指标有:样地的中心坐标值、植株高度、盖度和株数。将收集好的植被个体,去除其枯死部分后,当场用 1‰的电子天平称重,统计其湿重。而后将植被样品带回实验室,经清洗后于 105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青,再在 80 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温干燥箱内烘干至恒重,称其生物量干重。

2.2 遥感数据处理

本文使用的遥感数据为中国资源卫星中心提供的 HJ-1A CCD 数据,数据采集时间为 2010 年 6 月 14 日,轨道号为 456/68,空间分辨率为 30 m,该图像在研究区内无云覆盖,质量较好。影像的预处理包括几何校正、大气校正、裁切等。几何校正的误差控制在 0.3 个像元内,以满足分析精度的要求。为了消除大气影响,利用 6S 模型和同步气象资料,进行了大气校正和反射率的反演。影像数据经预处理后,进行信息提取,包括:各波段的反射率,植被指数(NDVI、SAVI、MSAVI、PVI、RVI、DVI、RDVI)以及 K-L 和 K-T 变换的各分量等。

2.3 研究方法

2.3.1 植被指数计算

选取该环境星 CCD 数据的光谱范围为 0.63—0.69 μm 的红光波段(第三波段)和光谱范围为 0.76—0.90 μm 的近红外波段(第四波段)的反射率进行组合,提取植被指数。相关的计算方法参经常用的植被指数计算公式^[14-15]。

2.3.2 相关性分析

相关性分析主要通过相关系数的计算和检验实现,其目的就是揭示变量之间关系的紧密程度^[16]。文中分析翅碱蓬生物量干重和湿重分别与 4 个波段反射率、7 个植被指数、6 个遥感数据的变换分量间的相关性。目的在于明确它们之间关系的紧密度,确定用于翅碱蓬生物量建模的遥感信息变量。

2.3.3 生物量建模

以相关性显著相关的遥感信息变量和实测的翅碱蓬生物量为基础,分别建立参数模型和非参数模型。通过模型精度的对比分析,从而选择最优的翅碱蓬生物量干湿重估算模型。研究中建立的参数模型主要是线性和非线性回归模型,非参数模型主要为神经网络模型,其中包括 BP(误差反向传播算法 Back propagation)网络、RBF(径向函数 Radial Basis Function)网络、GRNN(广义回归网络 General Regression Neural Network)。

研究中建立的参数模型为回归模型。以翅碱蓬生物量湿重为因变量,以与因变量相关性高且显著的遥感信息变量为自变量,分别建立单变量线性回归模型、单变量非线性回归模型、多变量逐步回归模型,对比各模型精度,选取最优的翅碱蓬生物量回归模型。

研究中建立的非参数模型为神经网络模型。非参数模型是非显式的包含可估参数,并对未知变量进行估算和预测。人工神经网络是一种较好的非参数模型,正逐渐应用于基于遥感数据的生物物理参数的估算^[17-20]。它具有的分布并行处理、非线性映射和自适应学习等特征,使其具有较高的计算效率和精确地逼近复杂的非线性函数的能力。BP、RBF 和 GRNN 是生态参数估算中常用的网络结构。以相关性分析得到的遥感信息变量为基础,构建 BP、RBF 和 GRNN 3 种网络结构模拟翅碱蓬生物量干湿重,并利用 sim 仿真函数对未参与训练的 4 组实测数据进行仿真,通过对比 3 种网络的精度,确定最优的神经网络模型。

3 结果与分析

3.1 相关性分析

翅碱蓬生物量湿重与干重分别与多种植被指数、各波段反射率、K-L 变换和 K-T 变换分量的相关性分析,主要是为了判断生物量的干湿重与遥感信息量的相关性,选取显著相关且相关系数高的遥感信息变量用于生物量估算模型的构建。

翅碱蓬生物量的湿重和干重与各遥感信息变量的相关性分析结果表明(表 1),翅碱蓬湿重与多个植被指数显著相关,在 0.01 水平上,与 RDVI 的相关系数最大,相关系数 $R = -0.796$,DVI 次之,与 NDVI 和 SAVI 的相关系数相同,均为 0.782。在 0.05 水平上,与 PVI 的相关系数为 0.588。翅碱蓬干重与各变量的相关性均不显著,但是干湿重与各植被指数相关性的趋势总体一致。植被指数是对植被状态信息的表达,与植被盖度、生长活力及生物量等密切相关。而作为湿地植被,生物量湿重更好的反映了湿地及湿地植被含水量的情况,且各植被指数与翅碱蓬生物量湿重也呈现出显著相关。

表 1 翅碱蓬生物量干湿重与植被指数的相关系数

Table 1 Correlation between biomass fresh weight, dry weight, and vegetation index

植被指数 Vegetation indices	归一化 植被指数 NDVI	土壤调节 植被指数 SAVI	修改型土壤 调节植被指数 MSAVI	比值 植被指数 RVI	差值 植被指数 DVI	重归一化 植被指数 RDVI	垂直 植被指数 PVI
湿重 Fresh weight	0.782 **	0.782 **	0.775 **	0.787 **	0.795 **	-0.796 **	0.588 *
干重 Dry weight	0.480	0.480	0.476	0.483	0.506	-0.497	0.326

* * 代表在 0.01 的水平上相关显著, * 代表在 0.05 的水平上相关显著

通过翅碱蓬生物量干湿重与变换后的遥感信息分量的相关性分析可知(表 2),湿重与 K-L 变换后的 PC2 分量的相关性最为显著,在 0.05 水平上,相关系数为 0.584。总体上来看,干湿重与两种变换各分量相关性的趋势总体上是一致的,就相关系数的大小而言,K-L 变换后各分量的关系是 PC2>PC3>PC1;K-T 变换后各分量的关系是 TC3>TC1>TC2。

表 2 翅碱蓬生物量湿重和干重与 K-L 和 K-T 变换各分量的相关系数

Table 2 Correlation between biomass fresh weight, dry weight, and components of K-L and K-T transform

各分量 Each component	K-L 变换 第一分量 PC1	K-L 变换 第二分量 PC2	K-L 变换 第三分量 PC3	K-T 变换 第一分量 TC1	K-T 变换 第二分量 TC2	K-T 变换 第三分量 TC3
湿重 Fresh weight	-0.034	0.584 *	0.460	-0.221	0.132	-0.253
干重 Dry weight	-0.081	0.397	0.303	-0.193	0.014	-0.238

* 代表在 0.05 的水平上相关显著

通过相关性分析可知,生长初期翅碱蓬生物量湿重与遥感信息变量的相关性显著。可以参与生物量湿重估算的遥感信息变量为 NDVI、SAVI、MSAVI、RVI、DVI、RDVI 和 PVI 等 7 个植被指数和 K-L 变换的第二分量 PC2。由于是生长初期,翅碱蓬平均高度为 12 cm,叶面积较小,反射率受到土壤背景的影响大,生物量干湿重与各波段反射率未表现出显著的相关性。

3.2 生物量湿重估算模型

3.2.1 参数回归模型

首先,建立单变量线性回归模型。以相关性分析得出的显著相关的 8 个遥感信息变量为自变量,以翅碱蓬生物量湿重为因变量,分别建立单变量线性回归模型。通过单变量的线性回归模型 R^2 的对比分析,说明了翅碱蓬生物量湿重可以用多个单变量的回归模型表达,其中,RDVI 为自变量的生物量湿重估算模型的 R^2 最大,拟合效果最好(式 1)。式 1 作为最优的单变量线性估算模型, $R^2=0.634$, $F=22.522$, $P=0.000$,具有统计学意义。

$$\text{Biomass} = -503.960\text{RDVI} + 1100.887 \quad (1)$$

其次,建立单变量非线性回归模型。以 8 个显著相关的遥感信息变量为自变量,以翅碱蓬生物量湿重为因变量,建立单变量非线性回归模型。选取的非线性回归模型有:对数模型、二次多项式、三次多项式、幂指数模型、指数模型、生长曲线等。对比所有单变量非线性模型,所有变量中 MSAVI 的三次多项式模型的模拟效果最好(式 2)。式 2 中, $R^2=0.673$, $F=7.533$, $P=0.005$,因此,该模型是显著的,且具有统计学意义。

$$\text{Biomass} = 3149.791 + 24289.651(\text{MSAVI}) + 68903.926(\text{MSAVI})^2 + 67218.989(\text{MSAVI})^3 \quad (2)$$

最后,建立多变量逐步回归模型。将显著相关的 8 个变量作为自变量,运用逐步回归的方法,根据自变量对模型影响的显著性大小,将其逐步引入到或剔除出回归模型,直到模型不再有可淘汰或可引入的变量为止。最终得到 2—4 个变量的方程,随着变量个数的增加, R^2 呈上升趋势,但是第四个变量的增加,精度仅增加了 0.06,并没有使模型精度显著提高,因此最终得到的最优模型为 3 个变量的方程(式 3)。式 3 中, $R^2=0.683$, $F=7.918$, $P=0.004$ 。

$$\text{Biomass} = -1233.939 - 3864.424(\text{RDVI}) - 12822.948(\text{MSAVI}) - 55.842(\text{PC2}) \quad (3)$$

对比参数回归模型中所有的单变量线性和非线性回归模型以及多变量逐步回归模型可知,3个变量的多变量逐步回归模型是参数回归模型中拟合效果最好的, $R^2=0.683$ 。

3.2.2 神经网络模型

由于在0.01水平上,NDVI和SAVI的相关系数均为0.782,考虑到研究中样本数量的有限性,参考吴涛等^[9]对翅碱蓬生物量研究中NDVI与翅碱蓬生物量的相关关系不高的结论,研究中,首先选取除NDVI之外的7个遥感信息变量进入神经网络的训练预测。

为了提高结果的精确性,首先将要输入系统的变量进行归一化处理,仿真的输出结果反算还原。训练数据集为随机选取的16组数据,分别建立了生物量湿重的BP、RBF和GRNN神经网络模型。经过反复试验,得到每种方式的最佳结果。

为验证神经网络模型的估算精度,在网络训练完,将未参与训练的4组数据利用sim仿真函数进行预测,并将预测值与真实值进行比较,比较结果如表3所示。由表3可知,神经网络模型中,BP的估算结果最优,其次为BPF。拟合效果最优的BP算法中,隐藏层和输出层的传输函数分别为“tansig”和“purelin”,训练函数为trainlm,一个隐层,隐层的神经元为10个。

表3 翅碱蓬生物量湿重实测值与各网络估算值的对比
Table 3 Comparison between biomass fresh weight and the estimated biomass with ANN

编号 Number	实测值 Measured values	误差反向传播算法 BP		径向函数 RBF		广义回归网络 GRNN	
		预测值 predicted values	相对误差 relative error	预测值 predicted values	相对误差 relative error	预测值 predicted values	相对误差 relative error
		/(g/m ²)	/%	/(g/m ²)	/%	/(g/m ²)	/%
1	566.37	671.38	18.54	833.70	47.20	785.86	38.75
2	299.56	270.46	9.71	411.72	37.44	363.91	21.48
3	225.38	208.079	7.68	274.67	21.87	150.86	33.07
4	836.04	710.84	14.98	918.44	9.86	440.49	47.31

3.3 回归模型与神经网络模型的对比分析

为了得到最优的估算模型,选择最优的多变量线性回归模型、神经网络模型BP、RBF和GRNN进行对比分析。通过平均相对误差计算可知(表4),多变量线性回归模型的平均相对误差为20.84%,BP神经网络模型的平均相对误差为12.73%,而RBF和GRNN的平均相对误差分别为31.13%和35.15%。可见,BP神经网络模型的估算效果最好,其次为多变量线性回归模型,而RBF和GRNN两种网络模型的平均相对误差均大于30%。

表4 不同生物量估算模型平均相对误差的对比
Table 4 Comparison of mean relative error of different models

	回归模型	神经网络模型		
	Regression model	Artificial neural network model		
	多变量逐步线性回归模型 Multivariate stepwise linear regression model	误差反向传播算法 BP	径向函数 RBF	广义回归网络 GRNN
平均相对误差/% The average relative error	20.84	12.73	31.13	35.15

通过对比分析可知:由于神经网络模型具有很强的线性和非线性拟合能力,且具备独特的运行特征和计算能力,使其在生物量估算方面能够获得较高的精度。但是,并不是所有的神经网络模型的模拟效果都高于传统的回归模型。本研究表明,BP神经网络模型是最优的翅碱蓬生物量湿重估算模型,多变量线性回归模型的估算效果次之。

4 结论

本文利用光学遥感影像在植被低覆盖区的反演比微波遥感适用的优势,以黄河三角洲滨海湿地生长初期的翅碱蓬生物量为研究对象,首先分析翅碱蓬生物量干湿重与遥感信息变量的相关性,选取遥感信息变量,构建多种翅碱蓬生物量湿重估算模型,最后对比分析翅碱蓬生物量湿重估算方法的精度,确定翅碱蓬生物量湿重遥感估算的最优模型。主要结论如下:

(1)生长初期的翅碱蓬生物量湿重与多个植被指数(RDVI、DVI、RVI、SAVI等)和K-L变换第二分量等遥感信息变量的相关性显著,干重与遥感信息变量相关性虽然不显著,但是相关性的趋势总体上与湿重的一致。基于遥感信息变量,能够建立生长初期的翅碱蓬生物量湿重估算模型。

(2)翅碱蓬生长初期的生物量湿重估算模型可以通过回归模型来表达。对比各回归模型,基于RDVI、MSAVI和PC2的3个变量的多元线性回归模型是构建的回归模型中拟合效果较好的。

(3)通过单变量的线性和非线性回归模型,多变量逐步回归模型和BP、RBF、GRNN神经网络模型的对比分析,BP神经网络模型的估算效果最优。

References:

- [1] Cui B S, He Q, Zhao X S. Researches on the ecological thresholds of *Suaeda salsa* to the environmental gradients of water table depth and soil salinity. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1408-1418.
- [2] Liu G H, Ma K M, Fu B J, Guan W B, Kang Y X, Zhou J Y, Liu S L. Aboveground biomass of main shrubs in dry valley of Minjiang River. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1757-1764.
- [3] Roy P S, Ravan S A. Biomass estimation using satellite remote sensing data—An investigation on possible approaches for natural forest. *Journal of Biosciences*, 1996, 21(4): 535-561.
- [4] Shi P J, Li B, Li Z H, Hu T. A Research on the production estimation by remote sensing for Large Area Grassland. *Acta Agrestia Sinica*, 1994, 2(1): 9-13.
- [5] Li B, Yang C, Lin P. *Ecology*. Beijing: Higher Education Press, 2000: 244-249.
- [6] Li X W, Ji G S, Yang J. Estimating cyanophyta biomass standing crops in Meiliang Gulf of Lake Taihu by satellite remote sensing. *Remote Sensing for Land and Resources*, 1995, (2): 23-28.
- [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] Curran P J, Dungan J L, Cholz H L. Seasonal LAI in slash pine estimated with Landsat TM. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 39(1): 3-13.
- [9] Wu T G, Wu M, Yu M K, Xiao J H. Dynamics of biomass and N, P storage of *Phragmites australis* in Hangzhou Bay wetlands. *China Environmental Science*, 2010, 30(10): 1408-1412.
- [10] Niu T, Li X, Lin H J, Zhao Z, Dong D R. The construction of the remote sensing estimation models for reed biomass in the lower reaches of the Tarim River. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2011, (4): 42-45.
- [11] 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.
- [12] Wu T, Zhao D Z, Kang J C, Suo A N, Wei B Q, Ma Y J. Research on remote sensing inversion biomass method based on the *Suaeda Salsa*'s measured spectrum. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(5): 1336-1341.
- [13] Mao P L, Chen W L, Liu Y H, Wang G M, Chen J C, Han G X, Zhang Z D, Yu J B, Liu F D. Biomass allocation in *Suaeda salsa* population in different habitats of coastal zone. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(8/9): 1214-1220.
- [14] Mou X J, Sun Z G, Wang L L, Dong H F. Characteristics of nitrogen accumulation and allocation of *Suaeda salsa* in different growth conditions of intertidal zone in Yellow River Estuary. *Wetland Science*, 2010, 8(1): 57-66.
- [15] Zhao Y S, et al. *The Principle and Method of Analysis of Remote Sensing Application*. Beijing: Science Press, 2003: 372-382.
- [16] Xue L H, Cao W X, Luo W H, Wang S H. Relationship between spectral vegetation indices and LAI in rice. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(1): 47-52.
- [17] Xu J H. *Mathematical Methods in Contemporary Geography*. Beijing: Higher Education Press, 2004: 11-12.
- [18] Wang S J, Guan D S. Remote sensing method of forest biomass estimation by artificial neural network models. *Ecology and Environment*, 2007, 16

(1): 108-111.

- [19] Wang S H, Zhang M Z, Zhao P A, Chen J X. Modelling the spatial distribution of forest carbon stocks with artificial neural network based on TM images and forest inventory data. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(4): 998-1008.
- [20] Li S C, Wu S H, Dai E F. Assessing the fragility of ecosystem using artificial neural network model. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 621-626.
- [21] 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.
- [22] Song J, Chen M, Feng G, Jia Y H, Wang B S, Zhang F S. Effect of salinity on growth, ion accumulation and the roles of ions in osmotic adjustment of two populations of *Suaeda salsa*. *Plant and Soil*, 2009, 314(1/2): 133-141.

参考文献:

- [1] 崔保山, 贺强, 赵欣胜. 水盐环境梯度下翅碱蓬 (*Suaeda salsa*) 的生态阈值. *生态学报*, 2008, 28(4): 1408-1418.
- [2] 刘国华, 马克明, 傅伯杰, 关文彬, 康永祥, 周建云, 刘世梁. 岷江干旱河谷主要灌丛类型地上生物量研究. *生态学报*, 2003, 23(9): 1757-1764.
- [4] 史培军, 李博, 李忠厚, 湖涛. 大面积草地遥感估产技术研究——以内蒙古锡林郭勒草原估产为例. *草地学报*, 1994, 2(1): 9-13.
- [5] 李博, 杨持, 林鹏. *生态学*. 北京: 高等教育出版社, 2000: 244-249.
- [6] 李旭文, 季耿善, 杨静. 太湖梅梁湖湾蓝藻生物量遥感估算. *国土资源遥感*, 1995, (2): 23-28.
- [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.
- [9] 吴统贵, 吴明, 虞木奎, 萧江华. 杭州湾滨海湿地芦苇生物量及 N、P 储量动态变化. *中国环境科学*, 2010, 30(10): 1408-1412.
- [10] 牛婷, 李霞, 林海军, 赵钊, 董道瑞. 塔里木河下游芦苇生物量遥感估算模型研建. *国土资源遥感*, 2011, (4): 42-45.
- [11] 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.
- [12] 吴涛, 赵冬至, 康建成, 索安宁, 卫宝泉, 马玉娟. 基于现场光谱的翅碱蓬生物量遥感反演方法研究. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(5): 1336-1341.
- [13] 毛培利, 成文连, 刘玉虹, 王光美, 陈景春, 韩广轩, 张志东, 于君宝, 刘福德. 滨海不同生境下盐地碱蓬生物量分配特征研究. *生态环境学报*, 2011, 20(8/9): 1214-1220.
- [14] 牟晓杰, 孙志高, 王玲玲, 董洪芳. 黄河口滨岸潮滩不同生境下翅碱蓬氮的累积与分配特征. *湿地科学*, 2010, 8(1): 57-66.
- [15] 赵英时等. *遥感应用分析原理与方法*. 北京: 科学出版社, 2003: 372-382.
- [16] 薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 王绍华. 光谱植被指数与水稻叶面积指数相关性的研究. *植物生态学报*, 2004, 28(1): 47-52.
- [17] 徐建华. *现代地理学中的数学方法*. 北京: 高等教育出版社, 2004: 11-12.
- [18] 王淑君, 管东生. 神经网络模型森林生物量遥感估测方法的研究. *生态环境*, 2007, 16(1): 108-111.
- [19] 汪少华, 张茂震, 赵平安, 陈金星. 基于 TM 影像、森林资源清查数据和人工神经网络的森林碳空间分布模拟. *生态学报*, 2011, 31(4): 998-1008.
- [20] 李双成, 吴绍洪, 戴尔阜. 生态系统响应气候变化脆弱性的人工神经网络模型评价. *生态学报*, 2005, 25(3): 621-626.

CONTENTS

Conservation strategies for <i>Ulmus elongata</i> based on the analysis of biological and ecological factors	GAO Jianguo, ZHANG Yi, WU Yuhuan, et al (5287)
Vertical distribution of methanogen community structures in <i>Phragmites australis</i> marsh soil in the Min River estuary	SHE Chenxing, TONG Chuan (5299)
Energy balance closure and its effects on evapotranspiration measurements with the eddy covariance technique in a cropland	LIU Du, LI Jun, YU Qiang, TONG Xiaojuan, et al (5309)
Effects of soil water potential on the growth and physiological characteristics of <i>Populus tomentosa</i> pulpwood plantation under subsurface drip irrigation	XI Benye, WANG Ye, DI Nan, et al (5318)
Physiological indices of leaves of jujube (<i>Zizyphus jujuba</i>) damaged by <i>Apolygus lucorum</i>	GAO Yong, MEN Xingyuan, YU Yi, et al (5330)
Economic analysis of wetland resource protection: a case study of Beijing Wild Duck Lake	WANG Changhai, CUI Lijuan, MA Muyuan, et al (5337)
Comparative studies on the farmers' willingness to accept eco-compensation in wetlands nature reserve	WANG Changhai, CUI Lijuan, MAO Xufeng, et al (5345)
Remote sensing estimation models of <i>Suaeda salsa</i> biomass in the coastal wetland	FU Xin, LIU Gaohuan, HUANG Chong, LIU Qingsheng (5355)
Effects of N addition on soil organic carbon components in an alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau	ZHENG Jiaojiao, FANG Huajun, CHENG Shulan, et al (5363)
Estimating carbon emissions from forest fires during 2001 to 2010 in Daxing'anling Mountain	HU Haiqing, WEI Shujing, SUN Long (5373)
Predicting the effects of soil water potential on the growth of cut lily	DONG Yongyi, LI Gang, AN Dongsheng, et al (5387)
Rain enrichment-accelerated carbon emissions from soil in a <i>Nitraria sphaerocarpa</i> community in hyperarid region	LIU Dianjun, WU Bo, LI Yonghua, et al (5396)
Response of soil organic carbon sequestration to the "Grain for Green Project" in the hilly Loess Plateau region	XU Mingxiang, WANG Zheng, ZHANG Jin, et al (5405)
Temporal and spatial variability in soil respiration in five temperate forests in Xiaoxing'an Mountains, China	SHI Baoku, JIN Guangze, WANG Zhaoyang (5416)
Distributions pattern of phosphorus, potassium and influencing factors in the upstream of Shule river basin	LIU Wenjie, CHEN Shengyun, HU Fengzu, et al (5429)
COI1 is involved in jasmonate-induced indolic glucosinolate biosynthesis in <i>Arabidopsis thaliana</i>	SHI Lu, LI Mengsha, WANG Lihua, et al (5438)
Modeling canopy rainfall interception of a replanted <i>Robinia pseudoacacia</i> forest in the Loess Plateau	WANG Yanping, WANG Li, WEI Sanping (5445)
The differences of plant community diversity among the different altitudes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	LIU Weiwei, WANG Jie, WANG Yong, et al (5454)
Low-frequency drought variability based on SPEI in association with climate indices in Beijing	SU Hongxin, LI Guangqi (5467)
Response of upland jujube tree trunk diameter to different ecological factors	ZHAO Ying, WANG Youke, HAN Lixin, et al (5476)
The spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots in a young <i>Caragana korshinskii</i> plantation	ZHANG Fan, CHEN Jianwen, WANG Mengben (5484)
Interspecific segregation of species in tree and shrub layers of the <i>Pinus bungeana</i> Zucc. ex Endl. community in the Wulu Mountains, Shanxi Province, China	WANG Lili, BI Runcheng, YAN Ming, et al (5494)
Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities during maize growing season	MA Xiaoxia, WANG Lianlian, LI Qinghui, et al (5502)
A model to predict dry matter accumulation dynamics in wheat based on the normalized method	LIU Juan, XIONG Shuping, YANG Yang, et al (5512)
Optimization strategies and an aesthetic evaluation of typical plant communities in the Shanghai Green Belt	ZHANG Kaixuan, LING Huanran, DA Liangjun (5521)
Carbon footprint evaluation research on the tourism transportation system at tourist attractions; a case study in Hengshan	DOU Yindi, LIU Yunpeng, LI Bohua, et al (5532)
An urban ecosystem assessment method and its application	SHI Huichun, LIU Wei, HE Jian, et al (5542)
Seasonal variations in distribution and biological characteristics of snailfish <i>Liparis tanakae</i> in the central and southern Yellow Sea	ZHOU Zhipeng, JIN Xianshi, SHAN Xiujuan, et al (5550)
Effects of cyanobacterial accumulation and snail grazing on the growth of <i>vallisneria natans</i>	HE Hu, HE Yuhong, JI Yachan, et al (5562)
The structure and thermal insulation capability of <i>Mustela sibirica manchurica</i> winter pelage in Heilongjiang Province	LIU Yu, ZHANG Wei (5568)
Ontogenetic shifts in selected body temperature and thermal tolerance of the tiger frog, <i>Hoplobatrachus chinensis</i>	FAN Xiaoli, LEI Huanzong, LIN Zhihua (5574)
The influence of tubificid worms bioturbation on organic phosphorus components and their vertical distribution in sediment of Lake Taihu	BAI Xiuling, ZHOU Yunkai, ZHANG Lei (5581)
Review and Monograph	
Research advances in ecological assessment of urban greenspace	MAO Qizheng, LUO Shanghua, MA Keming, et al (5589)
Ecological hot topics in global change on the 2 nd International Young Ecologist Forum	WAN Yun, XU Lili, GENG Qifang, et al (5601)
Scientific Note	
Screening trial for the suitable plant species growing on sand dunes in the alpine valley and its recovery status in the Yarlung Zangbo River basin of Tibet, China	SHEN Weishou, LI Haidong, LIN Naifeng, et al (5609)

《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 32 卷 第 17 期 (2012 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 17 (September, 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