

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 17 期 Vol.31 No.17 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 (SHENTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 17 期 2011 年 9 月 (半月刊)

目 次

海洋生态资本理论框架下海洋生物资源的存量评估	任大川, 陈尚, 夏涛, 等 (4805)
内生真菌对羽茅生长及光合特性的影响	贾彤, 任安芝, 王帅, 等 (4811)
基于遥感图像处理技术胡杨叶气孔密度的估算及其生态意义	蒋圣淇, 赵传燕, 赵阳, 等 (4818)
水文变异下的黄河流域生态流量	张强, 李剑锋, 陈晓宏, 等 (4826)
黄河三角洲重度退化滨海湿地碱蓬的生态修复效果	管博, 于君宝, 陆兆华, 等 (4835)
浙江省某 PCBs 废物储存点对其邻近滩涂生态系统的毒性风险	何闪英, 陈昆柏 (4841)
鄱阳湖苔草湿地甲烷释放特征	胡启武, 朱丽丽, 幸瑞新, 等 (4851)
三峡库区银鱼生长特点及资源分析	邵晓阳, 黎道峰, 潘路, 等 (4858)
低温应激对吉富罗非鱼血清生化指标及肝脏 HSP70 基因表达的影响	刘波, 王美垚, 谢骏, 等 (4866)
Cd ²⁺ 对角突臂尾轮虫和曲腿龟甲轮虫的急性毒性和生命表统计学参数的影响	许丹丹, 席贻龙, 马杰, 等 (4874)
圈养梅花鹿 BDNF 基因多态性与日常行为性状的关联分析	吕慎金, 杨燕, 魏万红 (4881)
华北平原玉米田生态系统光合作用特征及影响因素	同小娟, 李俊, 刘渡 (4889)
长期施肥对麦田大型土壤动物群落结构的影响	谷艳芳, 张莉, 丁圣彦, 等 (4900)
蚯蚓对湿地植物光合特性及净化污水能力的影响	徐德福, 李映雪, 王让会, 等 (4907)
三种农药对红裸须摇蚊毒力和羧酸酯酶活性的影响	方国飞 (4914)
六星黑点豹蠹蛾成虫生殖行为特征与性趋向	刘金龙, 宗世祥, 张金桐, 等 (4919)
除草剂胁迫对空心莲子草叶甲种群的影响及应对策略	刘雨芳, 彭梅芳, 王成超, 等 (4928)
荒漠植物准噶尔无叶豆结实、结籽格局及其生态适应意义	施翔, 王建成, 张道远, 等 (4935)
限水灌溉冬小麦冠层氮分布与转运特征及其对供氮的响应	蒿宝珍, 姜丽娜, 方保停, 等 (4941)
准噶尔盆地梭梭、白梭梭植物构型特征	王丽娟, 孙栋元, 赵成义, 等 (4952)
基于地表温度-植被指数关系的地表温度降尺度方法研究	聂建亮, 武建军, 杨曦, 等 (4961)
岩溶区不同植被类型下的土壤氮同位素分异特征	汪智军, 梁轩, 贺秋芳, 等 (4970)
施氮量对麻疯树幼苗生长及叶片光合特性的影响	尹丽, 胡庭兴, 刘永安, 等 (4977)
黄土丘陵区燕沟流域典型植物叶片 C、N、P 化学计量特征季节变化	王凯博, 上官周平 (4985)
克隆整合提高淹水胁迫下狗牙根根部的活性氧清除能力	李兆佳, 喻杰, 樊大勇, 等 (4992)
低覆盖度固沙林的乔木分布格局与防风效果	杨文斌, 董慧龙, 卢琦, 等 (5000)
东灵山林区不同森林植被水源涵养功能评价	莫菲, 李叙勇, 贺淑霞, 等 (5009)
11 种温带树种粗木质残体分解初期结构性成分和呼吸速率的变化	张利敏, 王传宽, 唐艳 (5017)
连栽第 1 和第 2 代杉木人工林养分循环的比较	田大伦, 沈燕, 康文星, 等 (5025)
最优化设计连续的自然保护带	王宜成 (5033)
基于自然地理特征的长江口水域分区	刘录三, 郑丙辉, 孟伟, 等 (5042)
煤电一体化开发对锡林郭勒盟环境经济的影响	吴迪, 代方舟, 严岩, 等 (5055)
专论与综述	
生态条件的多样性变化对蜜蜂生存的影响	侯春生, 张学锋 (5061)
研究简报	
胶州湾潮间带大型底栖动物次级生产力的时空变化	张崇良, 徐宾铎, 任一平, 等 (5071)
湿地公园研究体系构建	王立龙, 陆林 (5081)
基于生态足迹的半干旱草原区生态承载力与可持续发展研究——以内蒙古锡林郭勒盟为例	杨艳, 牛建明, 张庆, 等 (5096)
学术信息与动态	
恢复与重建自然与文化的和谐——2011 生态恢复学会国际会议简介	彭少麟, 陈蕾伊, 侯玉平, 等 (5105)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 302 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 37 * 2011-09



封面图说: 相当数量的降雪与低温严寒是冰川发育的主要因素, 地球上的冰川除南北两极外, 只有在高海拔的寒冷山地才能存在。喜马拉雅山造山运动使中国成为了世界上中低纬度冰川最为发育的国家, 喜马拉雅山地区雪峰连绵、冰川广布, 共有现代冰川 17000 多条, 是世界冰川发育的中心之一。

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

聂建亮, 武建军, 杨曦, 刘明, 张洁, 周磊. 基于地表温度-植被指数关系的地表温度降尺度方法研究. 生态学报, 2011, 31(17): 4961-4969.
Nie J L, Wu J J, Yang X, Liu M, Zhang J, Zhou L. Downscaling land surface temperature based on relationship between surface temperature and vegetation index. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(17): 4961-4969.

基于地表温度-植被指数关系的地表温度 降尺度方法研究

聂建亮^{1,2,3}, 武建军^{2,*}, 杨曦², 刘明², 张洁², 周磊²

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 民政部/教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875;
3. 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

摘要: 地表温度(Land Surface Temperature, *LST*)在空间上和时间上均存在很大的差异性。而通过卫星遥感技术来监测地表温度存在着空间分辨率和时间分辨率上的矛盾: 空间分辨率高的卫星时间分辨率低, 反之亦然。为了解决这个矛盾, 首先利用TsHARP (An algorithm for sharpening thermal imagery) 温度降尺度方法将 $LST_{MODIS, 1km}$ (1km MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) 地表温度) 图像(2004年9月9日上午)降尺度为 $LST_{MODIS, 500m}$ (500m MODIS 地表温度) 图像。为了对降尺度 $LST_{MODIS, 500m}$ 图像进行验证, 对研究区内同一天(2004年9月9日上午)的ETM 图像的第6波段的辐亮度值升尺度到500m后, 再利用Sobrino ETM(Enhanced Thematic Mapper) 温度反演方法反演得到 $LST_{ETM, 500m}$ (500m ETM 地表温度) 图像, 将 $LST_{ETM, 500m}$ 图像作为当日地表温度的实测值, 对降尺度 $LST_{MODIS, 500m}$ 图像的降尺度效果进行验证。对比结果表明降尺度 $LST_{MODIS, 500m}$ 图像更加精细刻画 $LST_{MODIS, 1km}$ 图像在空间上的分布格局; 定量对比3种降尺度 $LST_{MODIS, 500m}$ 和 $LST_{ETM, 500m}$ 的RMSE 分别为0.786、1.002、0.754°C, 降尺度结果达到预期效果。

关键词: 降尺度; MODIS; 地表温度; 归一化植被指数

Downscaling land surface temperature based on relationship between surface temperature and vegetation index

NIE Jianliang^{1,2,3}, WU Jianjun^{2,*}, YANG Xi², LIU Ming², ZHANG Jie², ZHOU Lei²

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3 College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Land surface temperature (*LST*) plays a very important role in obtaining the thermal information of land surface. *LST* has been widely used to detect the agricultural drought, monitor evapotranspiration, and estimate net radiation, sensible and latent heat flux, surface urban heat island intensity, precipitable water, urban-induced surface moisture and surface runoff. However, due to technical constraints of remotely sensed *LST* data, there is a trade-off between spatial and temporal resolution: a high temporal resolution is associated with a low spatial resolution and vice versa. Improvement in the spatial resolution of *LST* image will be greatly important when the revisit time of satellite remains the same. To solve this disadvantage, the aims of this study include the following aspects: firstly, to improve the original low spatial resolution of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) *LST* image data (1km) to 500m resolution by applying three relationships between NDVI and *LST* in TsHARP (An algorithm for sharpening thermal imagery) method; secondly, to

基金项目: 国家 863 计划项目(2006AA12Z142, 2006AA120108)

收稿日期: 2010-07-16; 修订日期: 2010-10-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wjj@bnu.edu.cn

assess the accuracy of each downscaling model based on qualitative and quantitative analysis with synchronous Enhanced Thematic Mapper (ETM) *LST* data; thirdly, to examine whether the TsHARP downscaling method is applicable and valid in special and particular land cover types in China. The northwest of Shandong province and south of Hebei province in China were selected as the research area. Then we utilized the TsHARP method to downscale original 1km *LST* image (taken on 9th, September 2004, provided by MODIS sensor) to 500m *LST* image, given that MODIS can offer very high temporal resolution image. In order to validate the simulated 500m *LST* image, we compared the simulated *LST*_{MODIS,500m} image with the synchronous 500m ETM *LST* image generated from 500m ETM band 6 radiance by Sobrino technique, and the 500m ETM band 6 radiance image was upscaled from the original 120m ETM band 6 radiance image. Qualitative comparison results show that *LST*_{MODIS,500m} images visually capture more spatial details than *LST*_{MODIS,1km} and resemble more that of *LST*_{ETM,500m}. In the downscaled 500m MODIS *LST* image, boundaries between different land covers are highlighted. When compared to 500m ETM *LST*, statistical results indicate that the Mean Absolute Error (MAE) in 500m MODIS *LST* generated by the downscaling techniques ranged from 0.536°C to 0.752°C. Quantitative comparisons of the three downscaled *LST*_{MODIS,500m} images and *LST*_{ETM,500m} image show that Root Mean Square Error (RMSE) are 0.786°C, 1.002°C and 0.754°C, respectively, with method 3 (i.e. vegetation fraction is linearly correlated to 4th power of *LST*) corresponding to both the lowest MAE (0.536°C) and RMSE (0.754°C). The variance (*S*²) of method 2 (i.e. vegetation fraction is linearly correlated to *LST*) is the highest, which shows that method 2 captures more spatial details of *LST*_{ETM,500m}. Considering the mean values of different methods, the mean of method 2 is also the most consistent one to the mean of the *LST*_{ETM,500m}. As for the *LST* accuracy, an RMSE of 0.754°C or 1.002°C is regarded as reasonable and acceptable, given the change in the spatial resolution of the MODIS *LST* and the potential sources of error due to different sensor properties. Above all, all of the three methods were found to substantially achieve good performance and produce 500m *LST* results with the high accuracy and improve the spatial pattern of the 1km MODIS *LST*. The downscaling techniques were proved effective and applicable in our study area.

Key Words: downscaling; MODIS; *LST*; *NDVI*

地表温度是反映地表状况的一个非常重要的参数,可以用于监测干旱对植被的胁迫^[1],估计蒸散^[2-4],估计地球净辐射、感热和潜热通量,监测城市热岛效应^[5],以及监测土壤的干湿状况^[6]等。各种传感器热红外波段反演得到的地表温度产品的时间与空间分辨率存在一定的相互制约关系,如果能够在保证地表温度产品时间分辨率不变的前提下,提高其空间分辨率,对于地表温度产品的推广使用将具有重要的理论和实践意义。

尺度转换是指将某一尺度上所获得的信息和知识扩展到其他尺度上的过程^[7]。目前基于像元的尺度转换方法主要可以分为3大类:数理统计方法、数据融合方法和分类转换方法^[8]。数理统计回归分析主要用于尺度上推的转换,通过在不同尺度影像之间建立基于某一特征量(如地物面积和*NDVI*指数等)的函数关系,从而进行尺度转换^[9-10]。数据融合主要用于尺度下推的转换,通过将一个尺度影像信息融入另一尺度影像来达到尺度转换目的,许多研究学者通过分层PCA方法实现了尺度转换^[11-12];Stathopoulou等^[13]利用高分辨率的TM地表温度图像信息融入到低分辨率的AVHRR地表温度图像中,将AVHRR地表温度图像的空间分辨率提高到120m。分类转换方法需要先将各个尺度上的影像分出大类,再对各大类选择各自所需的特征影像进行转换,尺度分类转换方法主要有贝叶斯估计法和Dempster-Shafer推理法等^[8]。地表温度的降尺度,即确定低空间分辨率像元中的亚像元地表温度值,融合高空间分辨率图像信息到低空间分辨率图像,使得低空间分辨率图像获得高空间分辨率图像的细节信息^[14]。Munehikia等^[15]将降尺度分为3类:(1)为了显示的清晰度降尺度,(2)通过单独的运算空间和光谱信息降尺度,(3)降尺度时保留图像辐射信息的完整性。如果降尺度的结果要应用于其它模型的运算,那么保留图像的辐射信息是至关重要的。由于本研究希望降尺度后的温度图像能够应用于其它模型的计算,因此本文中使用的降尺度方法,采用了图像数据融合方法的一种:

TsHARP 方法^[16]。

由于目前对于 TsHARP 方法降尺度的过程主要是利用原始高分辨率影像升尺度后再对其进行降尺度处理,最后利用原始高分辨率影像对降尺度结果进行验证,原始影像在升尺度或重采样过程中会产生新的误差,因此会对降尺度的结果和验证的结果均产生较大的干扰,降尺度结果和验证结果缺乏一定的说服力;另外,如果对原始的地表温度图像进行直接降尺度处理,降尺度结果的精度如何?该降尺度方法是否在中国独特的地表覆盖条件下仍然适用?针对上述问题,本文借助 TsHARP 方法直接对原始的 MODIS 地表温度图像进行降尺度,由于 ETM 的地表温度产品的分辨率明显高于 MODIS 的地表温度产品,并且用 Sobrino^[17]提出的单通道算法反演得到的 ETM 地表温度图像的误差很小(误差 1.5K 以内),ETM 和 MODIS 成像时间也非常相近(ETM 为当地时间 10:40 左右,MODIS 为 11:00 左右),在较短的时间间隔和天气状况良好的情况下(本文中使用的 ETM 和 MODIS 的图像质量都很好),因此可以把 ETM 地表温度产品作为当日地表温度的实测值,对降尺度 $LST_{MODIS, 500m}$ 图像的降尺度效果进行验证。

1 研究区概况

本文选择的研究区属于华北平原的一部分,为了避免地形高程对植被指数的影响,选择了平均海拔 100m 以下的区域。研究区包括山东省西北部和河北省南部,位于东经 114°10'—117°21',北纬 36°17'—37°59',如图 1 所示;研究区属暖温带大陆性气候,四季变化明显,为干旱易发区,年均温 8—15℃,积温为 4000—4800℃,年降水量 600—800mm。土地覆盖类型主要为耕地和建筑用地,大部分地区农业熟制为两年三熟和一年两熟。

2 数据及研究方法

2.1 数据及数据处理

本文使用到的数据主要包括 Landsat-7 ETM 和 MODIS 两种传感器的数据(表 1)。

表 1 本文研究使用到的数据列表

Table 1 Data sets used in the thesis

数据集名称 Name of data sets	来源 Source	范围 Range	时间 Time
Landsat-7 ETM	http://glcfapp.umiacs.umd.edu	轨道号 122/34	2004-09-09
MODIS 每日反射率产品	NASA EOS Data Gateway	轨道号 h27v05	2004-09-09
MODIS 每日地表温度产品	NASA EOS Data Gateway	轨道号 h27v05	2004-09-09
MODIS 土地覆盖产品	NASA EOS Data Gateway	轨道号 h27v05	2004
MODIS 大气水汽产品	NASA EOS Data Gateway	轨道号 h27v05	2004-09-09

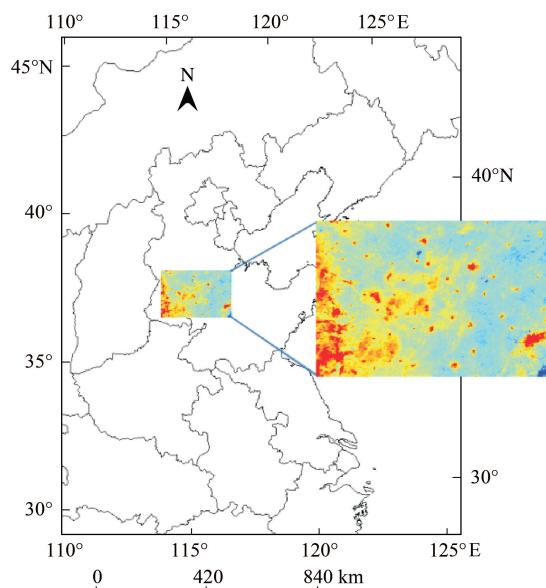


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Map of research area

其中左侧彩色图像为研究区对应的 1km MODIS LST 图像,右侧为研究区放大图像

研究中使用到的 Landsat-7 ETM 数据来自美国马里兰大学数据共享网,成像时间是 2004 年 9 月 9 日 10:40 左右,轨道号 122/34。影像只有局部区域有较少云层覆盖,质量比较好,能够满足本研究的需求。对下载后的 Level 1 数据经过辐射定标,利用双线性重采样方法将 ETM band 6 60m 分辨率图像升尺度到 500m,采用 Sobrino^[17]提出的单通道算法反演得到 ETM 500m 地表温度图像,该方法需要参数少,获取方法简单,且精度较高(误差 1.5K 以内)。

研究中使用的 MODIS 遥感数据来自于美国 NASA EOS Data Gateway 的 MODIS 产品,包括 2004 年 9 月 9 日上午研究区 500m 分辨率反射率产品(MOD09GA),1km 分辨率每日地表温度产品(MOD11A1),1km 分辨率 MODIS 土地覆盖产品(MOD12Q1),1km 分辨率 MODIS 大气水汽产品(MOD05)(反演 ETM 地表温度产品过程中所需的参数)。以上产品经过几何校正、大气校正等处理,可以用于科学实验。反射率产品共有 7 个波段,本文利用反射率数据计算了归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI):

$$NDVI = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (1)$$

式中, ρ_1, ρ_2 分别是 MODIS 传感器的第 1 波段(620—670nm), 第 2 波段(841—876nm)。MODIS 产品原始的投影为正弦投影, 本文中利用 NASA 研发的 MODIS reprojection tool (MRT) 将投影转为 Albers equal area 投影(中央经线东经 110°, 两条标准纬线为北纬 25° 和北纬 47°)。

2.2 TsHARP 温度降尺度方法

基于地表温度和植被指数的负相关关系, Kustas 等^[18] 提出了一种温度锐化的 DisTrad 方法, 同时 Anderson 等^[19] 利用 DisTrad 估算了美国中部地区的蒸散, 发现精度有较大提高。Agam 等^[16] 对 DisTrad 进行了改进, 提出了 TsHARP 算法, 该算法的基本假设是: 地表温度-植被指数之间的关系在各个尺度上基本一致, 土壤湿度的空间变化是最主要的影响因素。该方法的过程如下^[20](以 MODIS 为例):

(1) 计算原始分辨率的 NDVI(500m) 和 LST(1km)。以下公式中将 500m 的 NDVI, LST 简写为 $NDVI_{500}, T_{500}$; 将 1km 的 NDVI, LST 简写为 $NDVI_{1000}, T_{1000}$ 。

(2) 将 $NDVI_{500}$ 重采样得到 $NDVI_{1000}$, 利用 1km MODIS 土地覆盖产品提取土地覆盖类型均一区域, 保证了选择的像元比较均一。利用提取的均一土地覆盖区域切割 $NDVI_{1000}$ 和 T_{1000} 图像。

(3) 在选出来的 $NDVI_{1000}$ 和 T_{1000} 像元之间, 建立 $NDVI_{1000}$ 与 T_{1000} 的关系, 即:

$$\hat{T}_{1000}(NDVI_{1000}) = a + bNDVI_{1000} + cNDVI_{1000}^2 \quad (2)$$

(4) 可以认为, 由于土壤湿度空间变异造成的误差为:

$$\Delta \hat{T}_{1000} = T_{1000} - \hat{T}_{1000} \quad (3)$$

(5) 基于假设, 上式对 500m 分辨率的 NDVI 和 LST 仍然适用, 同时考虑到土壤湿度空间变异造成的误差, 对 1000m 像元内的第 i 个 500m 亚像元($i=1, 2, 3, 4$), 估算 T_{500} 的公式可以写为:

$$\hat{T}_{500}(i) = \hat{T}_{1000}(NDVI_{500}(i)) + \Delta \hat{T}_{1000} \quad (4)$$

在建立 NDVI 和 LST 的关系时, 两者之间的关系并不为确定的二次关系, 本文对 LST 和 NDVI 可能存在的其它关系进行一定推导, 并将这些关系都利用到降尺度方法中, 以比较这些关系的优劣, 从理论上讲, 地表温度与植被覆盖度之间的关系为:

$$T_s = [(1-f)T_{BS} + fT_V^4]^{1/4} \quad (5)$$

式中, T_{BS} 与 T_V 分别是图像中纯裸土与纯植被的温度, T_s 为整个像元的温度, f 为像元的植被覆盖度。从式(5)可以看出, 理论上的 T_s^4-f 线性关系最明显。同时也有研究指出, T_s-f 的线性关系也存在。

在计算植被覆盖度时, 常用的公式是:

$$f = 1 - \left(\frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^{0.625} \quad (6)$$

当建立 T_s^4-f 或 T_s-f 的线性关系时, 则有:

$$T_s(NDVI) = a_0 + a_1 \left[1 - \left(\frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^{0.625} \right] \quad (7)$$

$$T_s^4(NDVI) = a_0 + a_1 \left[1 - \left(\frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^{0.625} \right]^4 \quad (8)$$

对于一幅固定区域的影像,其 $NDVI$ 的最大、最小值是一定的,因此上式可以简化为:

$$T_s(NDVI) = a'_0 - a'_1(NDVI_{max} - NDVI)^{0.625} \quad (9)$$

$$T_s^4(NDVI) = a'_0 - a'_1(NDVI_{max} - NDVI)^{0.625} \quad (10)$$

其中

$$a'_0 = a_0 + a_1 \quad (11)$$

$$a'_1 = a_1(NDVI_{max} - NDVI_{min})^{-0.625} \quad (12)$$

为了试验一种普适的关系,令 $NDVI_{max} = 1$, $NDVI_{min} = 0$,则式(9)和式(10)式可以简化成:

$$T_s(NDVI) = a'_0 - a'_1(1 - NDVI)^{0.625} \quad (13)$$

$$T_s^4(NDVI) = a'_0 - a'_1(1 - NDVI)^{0.625} \quad (14)$$

综上,在 TsHARP 算法中的第 3 步,共建立 T_s 和 $NDVI$ 之间的 3 种关系,对应 3 种降尺度方法:

$$\text{方法 1} \quad T_s(NDVI) = a + bNDVI + cNDVI^2 \quad (15)$$

$$\text{方法 2} \quad T_s(NDVI) = a'_0 - a'_1(1 - NDVI)^{0.625} \quad (16)$$

$$\text{方法 3} \quad T_s^4(NDVI) = a'_0 - a'_1(1 - NDVI)^{0.625} \quad (17)$$

TsHARP 算法流程图(图 2):

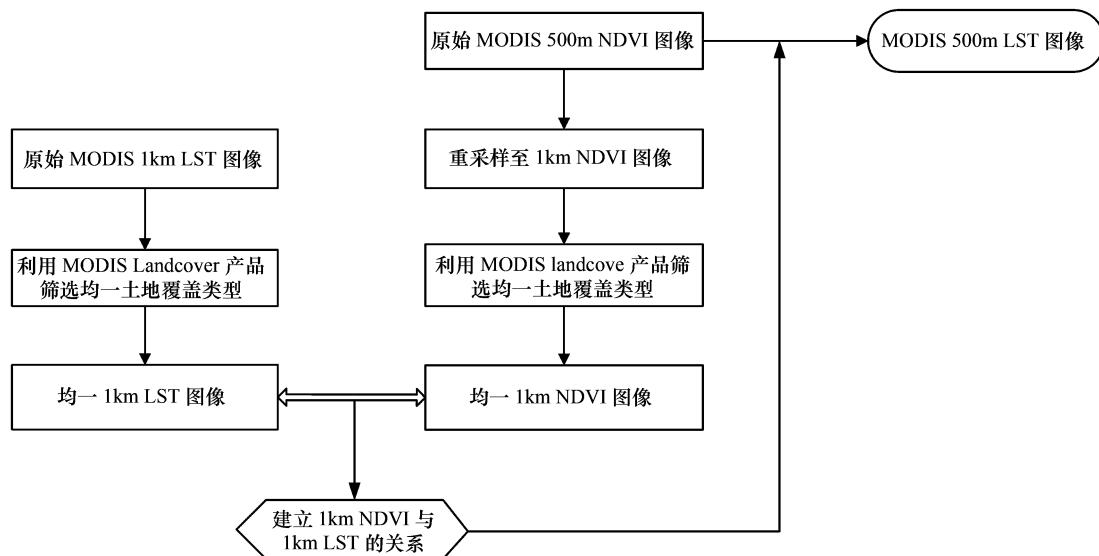


图 2 TsHARP 算法流程图

Fig. 2 The process of TsHARP model

3 结果与讨论

利用升尺度 $LST_{ETM,500m}$ 图像对降尺度的 $LST_{MODIS,500m}$ 图像进行对比验证,其中升尺度的 $LST_{ETM,500m}$ 作为真实的地表温度观测值,以检验降尺度结果的精度,确保降尺度结果的准确可靠性。采用的验证方法分为直观的视觉验证和定量统计验证。

3.1 温度降尺度结果对比

从图 3 中看出,从定性的角度讲,降尺度 $LST_{MODIS,500m}$ 图像较好的保持了原始 $LST_{MODIS,1km}$ 图像的地表温度在空间上的分布格局,图像的高温和低温区吻合的较好。在不同土地覆盖类型之间,与原始图像相比,降尺度图像更加精细刻画了地表温度的空间差异性;同一种土地覆盖类型内部的空间差异性在降尺度图像上也很明显。由于获取的当天的 ETM 数据空间范围只是研究区内的一部分,为了利用升尺度的 $LST_{ETM,500m}$ 图像对降尺度的 $LST_{MODIS,500m}$ 图像进行对比验证,从研究区内选择出一块大小适中的验证区,图 4 为验证区对应的 $LST_{ETM,500m}$ 和降尺度 $LST_{MODIS,500m}$ 图像,从图 4 中可以看出,验证区内的降尺度 $LST_{MODIS,500m}$ 图像可以捕捉到大部

分 $LST_{ETM,500m}$ 图像在空间上的地表温度的信息。为了更加充分的验证降尺度的效果,下面对图 4 中的四幅图像进行更进一步的定量统计分析。

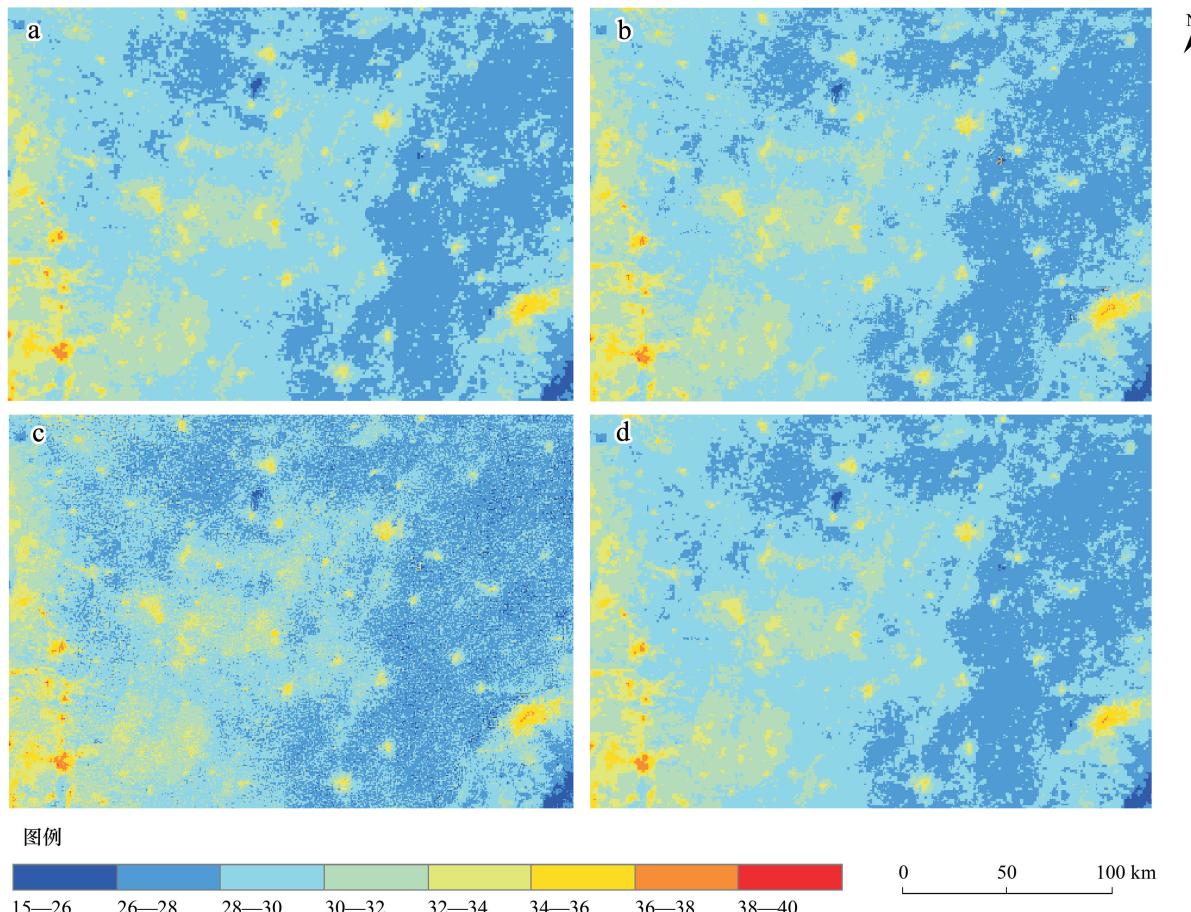


图3 研究区原始1km MODIS LST (a) 研究区方法1降尺度500m MODIS LST (b) 研究区方法2降尺度500m MODIS LST (c) 研究区方法3降尺度500m MODIS LST (d)

Fig. 3 Original 1km MODIS LST of research area (a) Downscaled 500m MODIS LST of research area by method 1 (b) Downscaled 500m MODIS LST of research area by method 2 (c) Downscaled 500m MODIS LST of research area by method 3 (d)

3.2 温度降尺度结果定量验证

为了定量评价降尺度方法的精度,对验证区 $LST_{ETM,500m}$ 和降尺度的 $LST_{MODIS,500m}$ 图像进行了一系列的统计分析。统计量包括均值(Mean),标准差(S^2),拟合曲线系数(拟合 $LST_{ETM,500m}$ 和降尺度的 $LST_{MODIS,500m}$ 图像, a 截距, b 斜率, R^2 决定系数),平均绝对偏差(MAE),均方根偏差(RMSE)。除了这些定量的统计参数外,对于 $LST_{ETM,500m}$ 和降尺度的 $LST_{MODIS,500m}$ 图像还做了散点图(图 5),这些图很直观地显示它们之间的相关性强度。统计的结果列于表 2 中。从表 2 中可以看出所有降尺度 $LST_{MODIS,500m}$ 的均值均接近于 $LST_{ETM,500m}$,说明所有降尺度方法的结果与实际的地表温度产生的总体偏差较小,其中方法 1 的均值最接近于 $LST_{ETM,500m}$ 的均值。方法 2 的 S^2 值最大,并且最接近于 $LST_{ETM,500m}$ 的 S^2 值,说明方法 2 很好的再现了 $LST_{ETM,500m}$ 在空间上的分布格局,产生了较大的地表温度空间变异。另外,从线性拟合的参数 a 和 b 可以看出降尺度的 $LST_{MODIS,500m}$ 总体上低于 $LST_{ETM,500m}$ 值,印证了 3 种方法对应的 $LST_{MODIS,500m}$ 均值均低于 $LST_{ETM,500m}$ 的均值,这一点也可以从散点图中得到说明。从 MAE 中可以看出,方法 3 的 MAE 最小,说明该方法对应的降尺度图像与 $LST_{ETM,500m}$ 的平均差值为 0.536°C,降尺度的结果非常接近于实际的地表温度值,降尺度的效果令人满意。另外,方法 3 的 RMSE 为 0.754°C,在所有方法中,方法 3 产生的 RMSE 最小。MAE 和 RMSE 差异的主要原因为 RMSE 对于极端值的

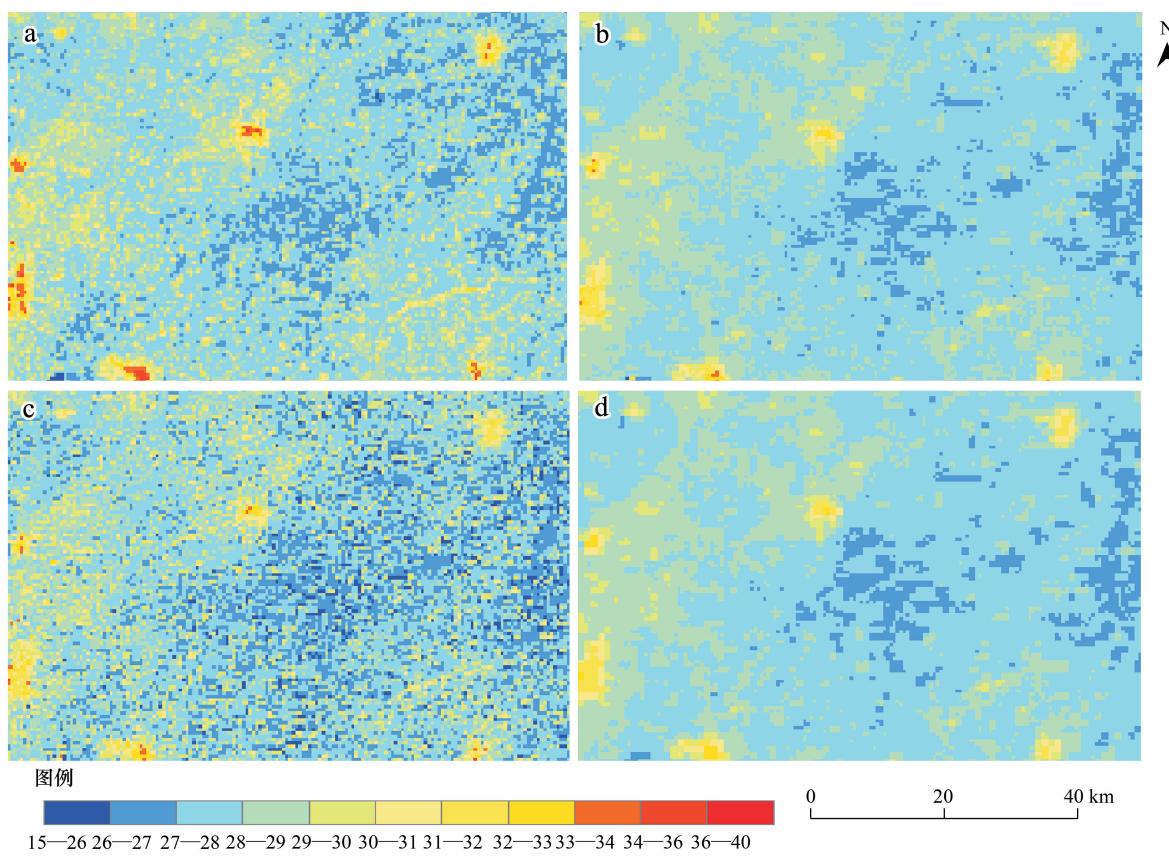


图 4 验证区 500m ETM LST (a) 验证区方法 1 降尺度 500m MODIS LST (b) 验证区方法 2 降尺度 500m MODIS LST (c) 验证区方法 3 降尺度 500m MODIS LST (d)

Fig. 4 500m ETM LST of validation area (a) Downscaled 500m MODIS LST of validation area by method 1 (b) Downscaled 500m MODIS LST of validation area by method 2 (c) Downscaled 500m MODIS LST of validation area by method 3 (d)

反应更加的敏感^[21]。方法 2 的 R^2 值一般(0.363),为 3 种方法中最小的。尽管 R^2 被广泛的应用,作者并未对该系数做过多的解释,因为当被用来进行真实值和模拟值之间的对比时, R^2 值往往是一个令人容易产生误解的系数^[22]。综合上述对各个统计参数的讨论,每一种方法对应的一些统计量表现的精度相对较高,一些相对较低,很难对该 3 种方法之间的优劣做出排序,但是总体上讲,3 种方法的各个统计参数反应出的降尺度结果都是很令人满意的,各种方法产生的降尺度 $LST_{MODIS,500m}$ 与实际的地表温度之间的差异很小,一致性较好,相互吻合程度较高。

表 2 MODIS LST 降尺度方法的统计度量

Table 2 Statistical measures of MODIS LST downscaling methods

降尺度方法 Downscaling method	像元个数 Pixel number	500m ETM 地表温度均值/℃ Mean of 500m ETM LST	500m MODIS 地表温度均值/℃ Mean of 500m MODIS LST	500m ETM 地表温度方差 Variance of 500m ETM LST	
Method 1	19380	27.997	27.862	1.042	
Method 2	19380	27.997	27.802	1.042	
Method 3	19380	27.997	27.814	1.042	
500m MODIS 地表温度方差 Variance of 500m MODIS LST	平均绝对误差 Mean absolute error	均方根误差 Root mean square error	截距 Intercept	斜率 Slope	
0.732	0.574	0.786	14.681	0.471	0.449
1.152	0.752	1.002	9.144	0.666	0.363
0.711	0.536	0.754	14.182	0.487	0.509

1km MODIS 地表温度的均值为 27.831 ℃, 方差为 0.715

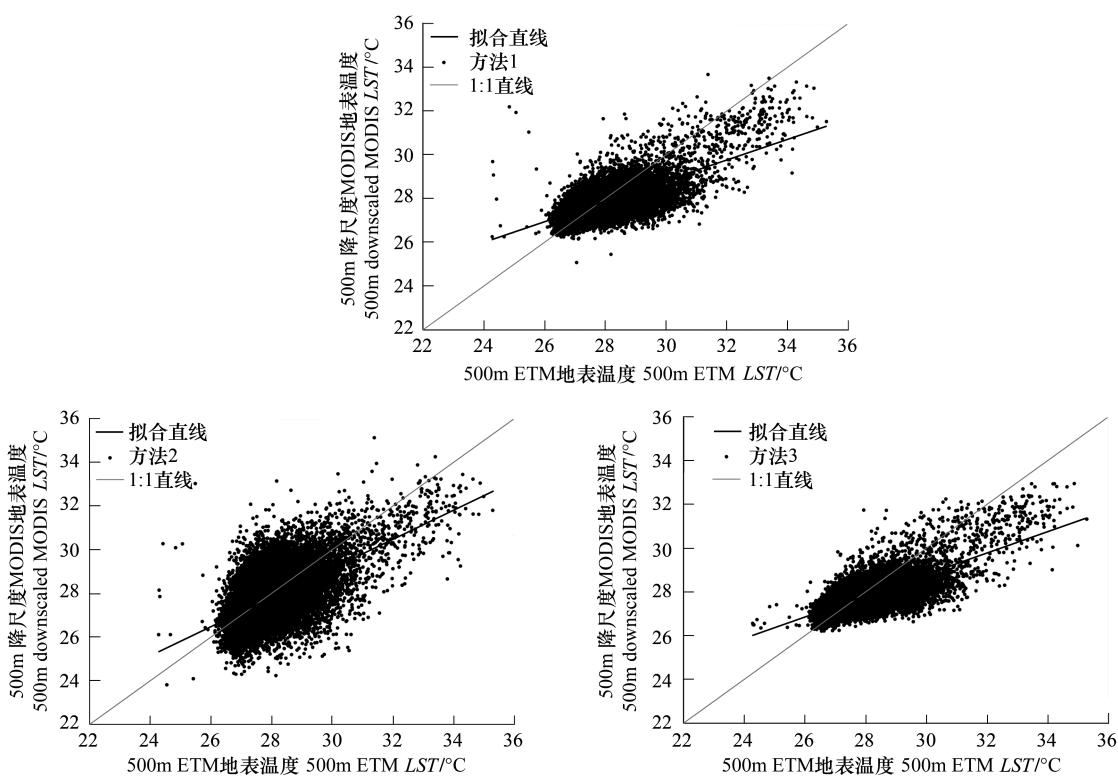


图5 500m ETM LST 和降尺度 500m MODIS LST 散点图

Fig.5 Scatter plots of 500m ETM LST versus downscaled 500m MODIS LST generated by the downscaling methods. The perfect agreement gray line (1:1) is also plotted

4 结论

本文首先利用3种不同转换关系的TsHARP方法将MODIS LST从1km降尺度到500m,对降尺度 $LST_{MODIS,500m}$ 图像和原始 $LST_{MODIS,1km}$ 图像,降尺度 $LST_{MODIS,500m}$ 图像和 $LST_{ETM,500m}$ 进行视觉上的定性对比后,再用 $LST_{ETM,500m}$ 作为地表温度真实值对降尺度 $LST_{MODIS,500m}$ 图像的降尺度效果进行定量统计验证,分析3种不同的TsHARP降尺度方法的降尺度效果及其精度。

对降尺度图像 $LST_{MODIS,500m}$ 和原始的 $LST_{MODIS,1km}$ 进行视觉上的分析对比,发现在不同土地覆盖类型之间,与原始图像相比,降尺度图像更加精细刻画了地表温度的空间差异性,体现了更多的空间细节,同一种土地覆盖类型内部的空间差异性在降尺度图像上也更明显。同样,降尺度 $LST_{MODIS,500m}$ 图像可以捕捉到大部分 $LST_{ETM,500m}$ 图像在空间上的地表温度的信息。用 $LST_{ETM,500m}$ 作为地表温度真实值对降尺度 $LST_{MODIS,500m}$ 图像的降尺度效果进行定量统计验证表明,所有降尺度 $LST_{MODIS,500m}$ 的均值均接近于 $LST_{ETM,500m}$ 均值,方法2的 S^2 值最大,并且最接近于 $LST_{ETM,500m}$ 的 S^2 值,说明方法2很好地再现了 $LST_{ETM,500m}$ 在空间上的分布格局,产生了较大的地表温度空间变异,方法3的MAE和RMSE最小,分别为0.536°C和0.754°C,降尺度的结果非常接近于实际的地表温度值,降尺度的效果令人满意。总体上讲,3种方法的各个统计参数反应出的降尺度结果都是较令人满意的,3种方法产生的降尺度 $LST_{MODIS,500m}$ 与实际的地表温度之间的差异很小,相互吻合程度较高,降尺度图像均可以应用于其它的模型的运算。

References:

- [1] Quattrochi D A, Luvall J C. Thermal Remote Sensing in Land Surface Processes. Boca Raton: CRC Press, 2004.
- [2] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, Holtslag A A M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. Journal of Hydrology, 1998, 212-213: 198-212.

- [3] Bastiaanssen W G M, Pelgrum H, Wang J, Ma Y, Moreno J F, Roerink G J, van der Wal T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Part 2. Validation. *Journal of Hydrology*, 1998, 212-213: 213-229.
- [4] Su Z B, Yacob A, Wen J, Roerink G, He Y B, Gao B H, Boogaard H, van Diepen C. Assessing relative soil moisture with remote sensing data: theory, experimental validation, and application to drought monitoring over the North China Plain. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003, 28 (1/3) : 89-101.
- [5] Weng Q H, Lu D S. A sub-pixel analysis of urbanization effect on land surface temperature and its interplay with impervious surface and vegetation coverage in Indianapolis, United States. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2008, 10(1) : 68-83.
- [6] Yang X, Wu J J, Yan F, Zhang J. Assessment of regional soil moisture status based on characteristics of surface temperature/vegetation index space. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3) : 1205-1216.
- [7] Wu J G. *Landscape Ecology*. Beijing: Higher Education Press, 2000: 11-12.
- [8] Peng X J, Deng R R, Liu X P. A review of scale transformation in remote sensing. *Geography and Geo-Information Science*, 2004, 20(5) : 6-14.
- [9] Aman A, Randriamanantena H P, Podaire A, Frouin R. Upscale integration of normalized difference vegetation index: the problem of spatial heterogeneity. *Geosciences and Remote Sensing*, 1992, 30(2) : 326-338.
- [10] Mayaux P, Lambin E F. Estimation of tropical forest area from coarse spatial resolution data: a two-step correction function for proportional errors due to spatial aggregation. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 53(1) : 1-15.
- [11] Constantini M, Farina A, Zirilli F. The fusion of different resolution SAR image. *Proceedings of the IEEE*, 1997, 85(1) : 139-146.
- [12] Shettigara V K. A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multispectral images using a higher resolution data set. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1992, 58(5) : 561-567.
- [13] Stathopoulou M, Cartalis C. Downscaling AVHRR land surface temperatures for improved surface urban heat island intensity estimation. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(12) : 2592-2605.
- [14] Liang S L. *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*. New Jersey: Wiley and Sons, 2004: 431-471.
- [15] Munechika C K, Warnick J S, Salvaggio C, Schott J R. Resolution enhancement of multispectral image data to improve classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1993, 59(1) : 67-72.
- [16] Agam N, Kustas W P, Anderson M C, Li F Q, Neale C M U. A vegetation index based technique for spatial sharpening of thermal imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 107(4) : 545-558.
- [17] Sobrino J A, El Kharraz J, Li Z L. Surface temperature and water vapour retrieval from MODIS data. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(24) : 5161-5182.
- [18] Kustas W P, Norman J M, Anderson M C, French A N. Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index-radiometric temperature relationship. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85(4) : 429-440.
- [19] Anderson M C, Norman J M, Mecikalski J R, Torn R D, Kustas W P, Basara J B. A multi-scale remote sensing model for disaggregating regional fluxes to micrometeorological scales. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5(2) : 343-363.
- [20] Yang X. Study of remote sensing drought monitoring and its scale effect based on land surface temperature-vegetation index space. Beijing: Beijing Normal University, 2009.
- [21] Fox D G. Judging air quality model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1981, 62(5) : 599-609.
- [22] Willmott C J. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1982, 63 (11) : 1309-1313.

参考文献:

- [6] 杨曦, 武建军, 同峰, 张洁. 基于地表温度-植被指数特征空间的区域土壤干湿状况. *生态学报*, 2009, 29(3) : 1205-1216.
- [7] 邬建国. *景观生态学——格局、过程、尺度与等级*. 北京: 高等教育出版社, 2000: 11-12.
- [8] 彭晓鹏, 邓孺孺, 刘小平. 遥感尺度转换研究进展. *地理与地理信息科学*, 2004, 20(5) : 6-14.
- [20] 杨曦. 基于地表温度-植被指数特征空间的干旱遥感监测方法及尺度效应分析. 北京: 北京师范大学, 2009.

CONTENTS

Marine ecological capital: valuation of standing stock of marine living resources	REN Dachuan, CHEN Shang, XIA Tao, et al (4805)
Effect of Endophytic fungi on growth and photosynthetic characteristics of <i>Achnatherum sibiricum</i>	JIA Tong, REN Anzhi, WANG Shuai, et al (4811)
Based on image processing technology estimating leaves stomatal density of <i>Populus euphratica</i> and analysis of its ecological significance	JIAN Shengqi, ZHAO Chuanyan, ZHAO Yang, et al (4818)
Evaluation of the ecological instream flow in the Yellow River basin with hydrological alterations	ZHANG Qiang, LI Jianfeng, CHEN Xiaohong, et al (4826)
The ecological effects of <i>Suaeda salsa</i> on repairing heavily degraded coastal saline-alkaline wetlands in the Yellow River Delta	GUAN Bo, YU Junbao, LU Zhaohua, et al (4835)
Toxicity risks to the closed tidal flat ecosystem of a PCBs waste savepoint at the coast of Zhejiang	HE Shanying, CHEN Kunbai (4841)
Methane emission from a <i>Carex</i> -dominated wetland in Poyang Lake	HU Qiuwu, ZHU Lili, XING Ruixin, et al (4851)
The study on Ice-fish Resources in the Three Gorges Reservoir	SHAO Xiaoyang, LI Daofeng, TAN Lu, et al (4858)
Effects of acute cold stress on serum biochemical and immune parameters and liver HSP70 gene expression in GIFT strain of Nile tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>)	LIU Bo, WANG Meiyao, XIE Jun, et al (4866)
Acute toxicity and effect of Cd ²⁺ on life table demography of <i>Brachionus angularis</i> and <i>Keratella valga</i>	XU Dandan, XI Yilong, MA Jie, et al (4874)
The association of BDNF gene polymorphisms with normal behavior traits in house-hold sika deer (<i>Cervus nippon</i>)	LÜ Shenjin, YANG Yan, WEI Wanrong (4881)
Characteristics and controlling factors of photosynthesis in a maize ecosystem on the North China Plain	TONG Xiaojuan, LI Jun, LIU Du (4889)
The soil macrofaunal community structure under a long-term fertilization in wheat field	GU Yanfang, ZHANG Li, DING Shengyan, et al (4900)
Effect of earthworms on the photosynthetic characteristics of wetland plants and their capacity to purify wastewater	XU Defu, LI Yingxue, WANG Ranghui, et al (4907)
Toxicity of three pesticides and their effects on carboxylesterase activity of <i>Propsiolocerus akamusi</i>	FANG Guofei (4914)
Reproductive behavior character and sexual tendency of the adult <i>Zeuzera leuconotum</i> Butler (Lepidoptera: Cossidae)	LIU Jinlong, ZONG Shixiang, ZHANG Jintong, et al (4919)
Effects of herbicides stress on the population of alligator weed flea beetles, <i>Agasicles hygrophila</i> (Col.: Chrysomelidae) and corresponding strategies	LIU Yufang, PENG Meifang, WANG Chengchao, et al (4928)
Patterns of fruit and seed production and ecological significance in desert species <i>Eremosparton songoricum</i> (FABACEAE)	SHI Xiang, WANG Jiancheng, ZHANG Daoyuan, et al (4935)
Effect of different nitrogen supply on the temporal and spatial distribution and remobilization of canopy nitrogen in winter wheat under limited irrigation condition	HAO Baozhen, JIANG Lina, FANG Baoting, et al (4941)
Plant architecture characteristics of <i>Haloxylon ammodendron</i> and <i>Haloxylon persicum</i> in Zhungar Basin	WANG Lijuan, SUN Dongyuan, ZHAO Chengyi, et al (4952)
Downscaling land surface temperature based on relationship between surface temperature and vegetation index	NIE Jianliang, WU Jianjun, YANG Xi, et al (4961)
Differential characteristics of soil δ ¹⁵ N under varying vegetation in karst areas	WANG Zhijun, LIANG Xuan, HE Qiufang, et al (4970)
Effect of nitrogen application rate on growth and leaf photosynthetic characteristics of <i>Jatropha curcas</i> L. seedlings	YIN Li, HU Tingxing, LIU Yongan, et al (4977)
Seasonal variations in leaf C, N, and P stoichiometry of typical plants in the Yangtze watershed in the loess hilly gully region	WANG Kaibo, SHANGGUAN Zhouping (4985)
Clonal integration enhances the ability to scavenge reactive oxygen species in root of <i>Cynodon dactylon</i> subjected to submergence	LI Zhaojia, YU Jie, FAN Dayong, et al (4992)
Pattern of over-covered sand-fixing woodland and its windbreak effect	YANG Wenbin, DONG Huilong, LU Qi, et al (5000)
Evaluation of soil and water conservation capacity of different forest types in Dongling Mountain	MO Fei, LI Xuyong, HE Shuxia, et al (5009)
Changes in structural components and respiration rates of coarse woody debris at the initial decomposition stage for 11 temperate tree species	ZHANG Limin, WANG Chuankuan, TANG Yan (5009)
Characteristics of nutrient cycling in first and second rotations of Chinese fir plantations	TIAN Dalun, SHEN Yan, KANG Wenxing, et al (5025)
The optimal design of a connected nature reserve network	WANG Yicheng (5033)
Sub-areas compartmentalization of Changjiang Estuary based on the natural geographical characteristics	LIU Lusan, ZHENG Binghui, MENG Wei, et al (5042)
The environmental and economic influence of coal-electricity integration exploitation in the Xilingol League	WU Di, DAI Fangzhou, YAN Yan, et al (5055)
Review and Monograph	
The influence of diversity changes of ecological conditions on the survival of honey bees	HOU Chunsheng, ZHANG Xuefeng (5061)
Scientific Note	
The spatio-temporal change in the secondary production of macrozoobenthos in the intertidal zone of Jiaozhou Bay	ZHANG Chongliang, XU Binduo, REN Yiping, et al (5071)
The studying system construction of wetland parks	WANG Lilong, LU Lin (5081)
Ecological footprint analysis of a semi-arid grassland region facilitates assessment of its ecological carrying capacity: a case study of Xilingole League	YANG Yan, NIU Jianming, ZHANG Qing, et al (5096)

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 17 期 (2011 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 17 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	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: 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 70.00 元