

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 22 期 Vol.32 No.22 2012

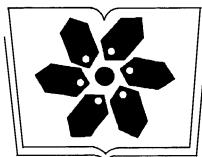
中国生态学学会

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 (SHENTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 22 期 2012 年 11 月 (半月刊)

目 次

CO ₂ 浓度和温度升高对噬藻体 PP 增殖的联合作用	牛晓莹, 程凯, 荣茜茜, 等	(6917)
1956—2009 年内蒙古苏尼特左旗荒漠草原的降水格局	陈军, 王玉辉	(6925)
两个污水处理系统的能值与经济综合分析	李敏, 张小洪, 李远伟, 等	(6936)
退化草地阿尔泰针茅种群个体空间格局及关联性	赵成章, 任珩	(6946)
地表覆盖栽培对雷竹林凋落物养分及其化学计量特征的影响	刘亚迪, 范少辉, 蔡春菊, 等	(6955)
福州酸雨区次生林中台湾相思与银合欢叶片的 12 种元素含量	郝兴华, 洪伟, 吴承祯, 等	(6964)
“雨花露”水蜜桃主要害虫与其捕食性天敌的关系	柯磊, 施晓丽, 邹运鼎, 等	(6972)
大兴安岭林区 10 小时时滞可燃物湿度的模拟	胡天宇, 周广胜, 贾丙瑞	(6984)
陕北风沙区不同植被覆盖下的土壤养分特征	李文斌, 李新平	(6991)
南方型杨树人工林土壤呼吸及其组分分析	唐罗忠, 葛晓敏, 吴麟, 等	(7000)
黄河下游土壤水盐对生态输水的响应及其与植被生长的关系	鱼腾飞, 冯起, 刘蔚, 等	(7009)
树木胸径大小对树干液流变化格局的偏度和时滞效应	梅婷婷, 赵平, 倪广艳, 等	(7018)
外来植物紫茎泽兰入侵对土壤理化性质及丛枝菌根真菌(AMF)群落的影响	于文清, 刘万学, 桂富荣, 等	(7027)
基于 Landsat TM 的热带精细地物信息提取的模型与方法——以海南岛为例	王树东, 张立福, 陈小平, 等	(7036)
雪被去除对川西高山冷杉林冬季土壤水解酶活性的影响	杨玉莲, 吴福忠, 杨万勤, 等	(7045)
不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响	王唯逍, 刘小军, 田永超, 等	(7053)
木蹄层孔菌不同居群间生长特性、木质素降解酶与 SRAP 标记遗传多样性	曹宇, 徐晔, 王秋玉	(7061)
加拿大一枝黄花入侵对土壤动物群落结构的影响	陈雯, 李涛, 郑荣泉, 等	(7072)
间作对玉米品质、产量及土壤微生物数量和酶活性的影响	张向前, 黄国勤, 卞新民, 等	(7082)
接种 AM 真菌对玉米和油菜种间竞争及土壤无机磷组分的影响	张宇亭, 朱敏, 线岩相洼, 等	(7091)
大亚湾冬季不同粒级浮游生物的氮稳定同位素特征及其与生物量的关系	柯志新, 黄良民, 徐军, 等	(7102)
太湖水华期间有毒和无毒微囊藻种群丰度的动态变化	李大命, 叶琳琳, 于洋, 等	(7109)
锌胁迫对小球藻抗氧化酶和类金属硫蛋白的影响	杨洪, 黄志勇	(7117)
基于国家生态足迹账户计算方法的福建省生态足迹研究	邱寿丰, 朱远	(7124)
能源活动 CO ₂ 排放不同核算方法比较和减排策略选择	杨喜爱, 崔胜辉, 林剑艺, 等	(7135)
基于生境等价分析法的胶州湾围填海造地生态损害评估	李京梅, 刘铁鹰	(7146)
县级生态资产评估——以河北丰宁县为例	王红岩, 高志海, 李增元, 等	(7156)
专论与综述		
丛枝菌根提高宿主植物抗旱性分子机制研究进展	李涛, 杜娟, 郝志鹏, 等	(7169)
城市土壤碳循环与碳固持研究综述	罗上华, 毛齐正, 马克明, 等	(7177)
基于遥感的光合有效辐射吸收比率(FPAR)估算方法综述	董泰锋, 蒙继华, 吴炳方	(7190)
光衰减及其相关环境因子对沉水植物生长影响研究进展	吴明丽, 李叙勇	(7202)
浮游动物化学计量学稳定性特征研究进展	苏强	(7213)
研究简报		
2010 年两个航次獐子岛海域浮游纤毛虫丰度和生物量	于莹, 张武昌, 张光涛, 等	(7220)
基于熵值法的我国野生动物资源可持续发展研究	杨锡涛, 周学红, 张伟	(7230)
残落物添加对农林复合系统土壤有机碳矿化和土壤微生物量的影响	王意锟, 方升佐, 田野, 等	(7239)
人工湿地不同季节与单元之间根际微生物多样性	陈永华, 吴晓英, 张珍妮, 等	(7247)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2012-11		



封面图说: 水杉农田防护林中的小麦熟了——水杉曾广泛分布于北半球, 第四纪冰期以后, 水杉属的其他种类全部灭绝, 水杉却在中国川、鄂、湘边境地带得以幸存, 成为旷世奇珍, 野生的水杉是国家一级保护植物。由于水杉耐水, 适应力强, 生长极为迅速, 其树干通直挺拔, 高大秀颀, 树冠呈圆锥形, 姿态优美, 自发现后被人们在中国南方广泛种植, 不仅成为了湖边、道路两旁的绿化观赏植物, 更成为了农田防护林的重要树种。此图中整齐划一的水杉防护林像忠实的哨兵一样, 为苏北农村即将成熟的麦田站岗。

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

DOI: 10.5846/stxb20110211562

董泰锋, 蒙继华, 吴炳方. 基于遥感的光合有效辐射吸收比率(FPAR)估算方法综述. 生态学报, 2012, 32(22): 7190-7201.

Dong T F, Meng J H, Wu B F. Overview on methods of deriving fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR) using remote sensing. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7190-7201.

基于遥感的光合有效辐射吸收比率(FPAR) 估算方法综述

董泰锋, 蒙继华, 吴炳方*

(中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

摘要:光合有效辐射吸收比率(FPAR)是反映植被生长过程的重要生理参数, 是陆地生态系统模型的关键参数, 是反映全球气候变化的重要因子。基于遥感的 FPAR 估算方法是获取区域乃至全球尺度 FPAR 的有效方法。目前, 主要形成了植被指数法和机理法两类方法, 植被指数法是建立 FPAR 与植被指数的经验统计模型, 简单、计算效率高; 机理法则从物理模型上进行 FPAR 的求解与反演, 机理明晰、可行性强。然而, 由于 FPAR 本身的复杂性以及环境因素、遥感数据质量的影响, 导致了估算方法面临诸多不确定性问题。为了解决这些不确定性问题以及满足生态过程深入研究的需求, 将进一步注重 FPAR 的机理研究、先验知识的获取与积累, 构建长时间序列 FPAR 以及高时空的 FPAR 算法研究。

关键词: 遥感; FPAR; 植被指数; 冠层反射率模型; 展望

overview on methods of deriving fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR) using remote sensing

DONG Taifeng, MENG Jihua, WU Bingfang*

Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (FPAR) is an important biophysical factor for monitoring vegetation growth, as well as a critical parameter in the terrestrial ecosystem modeling and a key indicator for studying global climate change. Remote sensing technology has been proved to be an effective tool in estimating FPAR at regional and global scales, because satellite data can provide a spatially and periodic, comprehensive view of vegetation growing status. Many methods have been developed in estimating FPAR with remote sensing, which can be generally grouped into two categories. The first category of approaches are the empirical statistics models based on the relationships between vegetation indices, derived from reflectance at canopy level, and FPAR. These models are easy to use with high efficiency and much more suitable for detecting within-field spatial variability, yet they may lead to inaccurate results when applied over another place or broad scale with different land cover types. Another category of approaches for FPAR retrieval are to invert canopy reflectance models based on the BRDF (Bi-Directional Reflectance Distribution Functions) models such as the radiative transfer model and geometrical optics model, which describe the transfer and interaction of radiation inside the canopy based on physical mechanism between FPAR and vegetation canopy reflectance. These models have strong applicability and are taken as the algorithm bases among most widely used FPAR products. However, the inversion process is ill-posed due to the complexity of these physical models; the parameters and prior knowledge required by these models are hard to acquire over large areas. At the same time, other methods such as the method based on the concept of effective

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项资助(XDA01020304);国家重点基础研究发展计划("973"项目)(2010CB950900)

收稿日期:2011-10-21; 修订日期:2012-02-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wubf@irsca.ac.cn

FPAR, which is FPAR absorbed by chlorophyll, and the method based on the airborne lidar data which is useful to characterize spatial variability of canopy structure, bring significant improvement to the two categories of methods. Due to the complexity of FPAR itself and its influencing factors, as well as the quality of remote sensing data, plenty of uncertainties existed in satellite based FPAR estimation. For statistical model, most vegetation indices are easily affected by soil background, saturation problem, atmospheric condition, and so on. These factors bring much uncertainty in the relationship between FPAR and vegetation indices. For physical models, problems including top-of-atmosphere radiance uncertainties and errors in land cover mapping are hard or even impossible to avoid. In order to deal with these uncertainties and meet the requirements of further research for terrestrial ecological process, future research focuses on FRAR retrieval based on satellite will be: further research on theoretical mechanism of FPAR estimation, seeking to minimize noise effects on vegetation indices for more accurate estimation of FPAR, improvement of the inversion methods for physically-bases models, acquisition and accumulation of prior knowledge in FPAR estimation based on systematic observation network, construction of long-term FPAR dataset based on multi-source remote sensing data, and algorithm for deriving FPAR with both high spatial and high temporal resolutions.

Key Words: remote sensing; FPAR; vegetation indices; canopy reflectance model; progress

光合有效辐射吸收比率(FAPAR/FPAR)是指被植被冠层绿色部分吸收的光合有效辐射(PAR)占总PAR的比率,是直接反映植被冠层对光能的截获、吸收能力的重要参数。FPAR是影响大气-陆面生物圈之间能量与水分交换过程的一个关键变量^[1],在陆地生态过程研究中,Monteith^[2]所建立的光能利用率模型便是关于FPAR与PAR的函数,这为大量陆地生态过程模型的发展提供了理论基础^[3-4],是作物生长过程的健康指标^[5-7],是反映作物干旱的重要指标^[8-10],是进行土地覆盖监测的有效辅助因子^[11-12]。因此,FPAR被全球气候观测系统GCOS^[13]以及FAO陆地生态系统观测系统(GTOS)^[14]确定为影响反映全球气候变化下的关键气候参量之一。准确、定量地获取FPAR,对进行陆地生态系统过程研究、作物产量估算^[15-16]有着重要的意义。

目前,FPAR存在着两种不同的获取途径:一种是地面定位观测方法,主要依靠SUNSCAN、ACCUPAR、TRAC等之类的冠层分析系统、传感器进行冠层间的PAR观测而得到FPAR^[17-18],该方法可以准确地、实时地获取冠层信息,却只局限于点上信息,并不具有空间异质性;另一种方法则借助遥感建立FPAR的估算模型,这主要是由于遥感在区域乃至全球尺度上具有良好时空性,因此,遥感成为获取区域乃至全球尺度FPAR的可行性手段。本文重点回顾近些年来国内外学者所发展的各种基于遥感的FPAR估算方法,主要包括以植被指数为手段的经验性统计与半机理方法,以冠层反射率模型为基础的机理估算方法在内的两类估算方法,也包括了从植被生理上研究叶绿素含量对于FPAR的影响等估算方法;并就各类方法进行归纳与总结,分析其优点及不足,尤其是所存在的不确定性问题,探讨FPAR遥感估算方法的趋势,同时希望能在此过程中寻求新的突破点,进一步增强模型的可行性、普适性,提高估算精度。

1 估算方法现状

1.1 基于植被指数方法的FPAR遥感估算研究进展

1.1.1 植被指数方法的研究进展

在植被光谱特征中,可见光波段与近红外波段对于光能辐射的表现极为突出^[19]。其中,可见光主要反映植被叶片中色素的分布情况,并且植被的叶绿素在红波段表现出强烈吸收辐射能力,因此红波段呈现出明显的吸收波谷,表征对于PAR的最大吸收能力;而近红外波段主要反映的是植被叶片结构,由于反射及透射能相近,辐射吸收较少,则形成较强的反射能力。因此,以数学组合形式,构建以红波段、近红波段等为主的植被指数,可以反映出植被冠层对可见光的吸收变化情况。目前运用于FPAR估算的植被指数大概有12种以上,主要包括NDVI^[20-26]、PVI^[25-27]、RVI^[20,26,28]、WDVI^[7,29]、SAVI^[25,30-31]、SAVI2^[26]、TSAVI^[25-27]、DVI^[31]、RDVI^[26,31]、CRVI^[26]、EVI^[17,28,32-33]、MTVI2^[34]、OSAVI^[35]、VARI^[36]等。从某种程度上讲,植被指数与FPAR是

等效的^[37]。

虽然运用于 FPAR 估算的植被指数种类较多,但也存在着共同点,可以归纳为两点:第一,基于植被指数的 FPAR 估算主要依托于两种不同途径,一种是通过实地观测获取 FPAR,并由冠层光谱或是遥感数据运算得到植被指数,进一步建立两者的统计关系,其主要特点是较为直接地反映了 FPAR 与植被指数的关系,属于统计方法,如 Wiegand 等^[27]利用统计方法进行玉米的 FPAR 与 SPOT 对应的 NDVI、PVI、GVI 以及 TSAVI 的分析中发现,FPAR 与 NDVI、PVI 存在非常好的相关性,其相关性均能达到 0.9 以上;陈雪洋等^[28]则以我国自主研发运用的 HJ-1 卫星数据,结合在山东禹城的同步地面 FPAR 观测数据,开展 FPAR 的统计模型研究,研究表明基于 HJ-1 星数据的 NDVI、RVI、SAVI、EVI 均可以运用于 FPAR 的估算,其平均误差为 3.8%;另一种是借助于冠层反射率模型,考虑不同的情景下,冠层反射率所产生的变化,从而影响植被指数与 FPAR 的关系,该方法有助于深入开展 FPAR 与植被指数的不确定性研究,这在一定程度上属于半机理方法,如 Goward 与 Huemmrich^[24]通过 SAIL 模型模拟获取日均 FPAR 与 NDVI 存在着很好的相关性($R^2 = 0.99$), $FPAR_{day} = 102.4NDVI - 8.0$;Myneni 与 Williams^[22]通过三维辐射模型模拟得到 FPAR 的估算公式 $fAPAR = 1.16 \times NDVI - 0.14$;第二,植被指数与 FPAR 关系主要以近线性关系为主,但也存在指数函数、幂函数等关系,并且对于不同植被类型、生长期,其相关性存在差异。Wiegand 等^[27]发现玉米、棉花的 FPAR 与 NDVI 成指数关系,而与 PVI 则成线性关系,同时相对于 PVI,NDVI 更适合于作物 FPAR 的估算。Ridaq 等^[26]在对蚕豆、豌豆两种豆类进行 FPAR 连续观测的基础上,分析在叶面积最大值前后,9 个植被指数(RVI、NDVI、SAVI2、TSAVI、RDVI、PVI、GVI3 STVI 以及 CRVI)与 FPAR 变化关系。研究表明,在达到 LAI 最大值前,九种植被指数均与 FPAR 呈现出幂函数或是指数函数关系;而在达到 LAI 最大值后,更多是呈现出线性关系。Jenkinis 等^[18]发现在作物返青时期,NDVI 与 FPAR 更多是线性关系,但在叶片枯黄时期则表现出非线性关系。此外,基于植被指数的线性拉伸方式的 FPAR 估算方法,也很好地表现了 FPAR 与植被指数的线性关系。在该关系中,FPAR 是关于植被指数、植被的最大、最小植被指数以及最大、最小 FPAR 间线性组合函数^[38-41]。其中, Sellers 等^[38]在对 NOAA NDVI 时间序列数据重构的基础上,利用该方法生产出了第一张全球尺度分辨率为 1° 的 FPAR 数据;朱文泉^[42]针对 NDVI 高估 FPAR 而 RVI 低估 FPAR 的缺点,综合 NDVI、RVI 的优点建立 FPAR 与 NDVI、RVI 的统计公式;Donohue 等^[43]利用该方法建立长时间序列的 FPAR 数据,其中利用三角法对 AVHRR NDVI 数据寻找出影响植被指数的土壤背景与暗点(饱和现象),进行土壤线与暗点的位移,这在一定程度上减小了 NDVI 对土壤背景与饱和现象的敏感性;Baret 等^[44]从改进的 Beer-laws 公式出发,推导了 FPAR 与最大 NDVI、最小 NDVI 以及消光指数的非线性关系。

1.1.2 植被指数方法的不确定性问题

然而,由于大气环境、植被种类以及遥感数据质量等因素,综合地影响着植被指数与 FPAR 关系,从而导致诸多不确定性问题。Myneni 等^[22]的研究表明 NDVI 与 FPAR 的关系对土壤背景,大气环境、地表二向反射率、冠层异质性等均存在着敏感性。因此,开展对植被指数与 FPAR 的不确定性分析成为植被指数法的重要研究内容。总体上,植被指数与 FPAR 的不确定性归纳为:

第一、土壤背景与饱和现象是影响植被指数与 FPAR 关系的重要瓶颈。Epiphanio 等^[30]在进行不同太阳高度角和观测角下 NDVI、SAVI 与 FPAR 关系的不确定性分析中认为 NDVI 对红波段更为敏感,SAVI 则对近红外波段敏感,因此,在 LAI 较高情况下,SAVI 相对于 NDVI 更能克服饱和现象带来的误差;Baret 等^[25]发现在 FPAR 低于 0.5 时,NDVI、PVI 容易受到土壤背景的影响而引进不确定性,而 SAVI、TSAVI 较好地克服了土壤背景的影响而适合于 LAI 较低情况下 FPAR 的估算,并且在未知叶倾角的情况下 SAVI、TSAVI 要比 NDVI、PVI 的估算精度更好;Huemmrich^[45]则结合实测的十种树种的信息,利用 SAIL 进行 FPAR 模拟与分析,在 LAI 较低下,包括土壤反射率在内的植被背景虽然对 FPAR 的影响较小,但却是冠层反射率变化的主要影响因素。Jean-Louis 等^[31]则通过 SAIL 模型模拟各波段反射率,在分析 NDVI、RVI 等受到土壤背景以及几何观测信息的影响下,建立重归一化植被指数 RDVI 与 FPAR 的统计方法,其效果与 SAVI 较为一致, RDVI 与 SAVI 一样

可以有效地减缓植被背景、饱和现象的影响;而 Liu 等^[35]在进行玉米覆盖度的研究中发现,与 NDVI、SAVI、OSAVI、MSAVI 以及 MSAVI 相比,MTVI2 与覆盖度的相关性更好,可以减缓土壤背景的影响,并且适用于 FPAR 的估算^[34]。研究也表明 EVI 较 NDVI 可以较好地减少土壤背景以及大气的影响^[17],而 Green NDVI 则可以弥补 FPAR 与 NDVI 饱和现象所带来的不确定性^[46],两者都可以较好地运用于 FPAR 的估算。

第二、地表双向反射因子对太阳高度角、观测方位角极为敏感,从而影响 FPAR 与 VI 的关系。Pinter 等^[23]获取不同太阳高度角下紫花苜蓿的 FPAR 与冠层光谱,分析得出 FPAR 与 NDVI、SAVI 均随太阳高度角的变化而变化的结论。Myneni 等^[22]通过冠层辐射传输模型模拟 NDVI 与 FPAR 的关系发现,在太阳方位角小于 60°,观测方位角小于 30°、土壤亮度中等以及气溶胶厚度在 550 nm 小于 0.65 下成立;Goward 与 Huemmrich^[24]综合地进行 FPAR 与 NDVI 的敏感性分析,NDVI 与日 FPAR 均受到观测方位角、太阳方位角的影响,并在观测方位角低于 40°、太阳方位角低于 60°时候,NDVI 与日总 FPAR 更表现为线性关系。

第三、植被结构形态也是影响 FPAR 与 VI 的关系的重要因素,其中叶倾角的表现较为明显。Cristiano 等^[36]以两种不同叶取向的 C3 草本为研究对象,在进行不同水分与氮养分处理下的 FPAR 与 OSAVI、GNDVI、VARI 以及红边参数(REP)等植被指数的关系分析中发现,不同叶片类型对 VI 与 FPAR 的关系影响是不一样的,而不同的养分处理所产生的敏感性也是不同,并认为 Green NDVI 是估算 FPAR 的最佳植被指数;Clevers 等^[29]利用 PROSAIL 模型进行 FPAR 与 NDVI、WDVI 的敏感性分析发现,叶倾角分布函数(LAD)显著地影响 FPAR 与 WDVI 的关系,同时相对于 LAD 与太阳高度角,土壤背景与叶绿素含量则是影响 FPAR 与 NDVI 的主要因素。

植被指数方法由于简单、参数少、运算效率高的优点,得到广泛地运用,是目前光能利用率模型中获取 FPAR 的主要途径,是开展区域尺度 FPAR 估算的主要手段。然而,植被指数由于环境条件、遥感数据质量的限制,存在以下 4 点不足:第一,植被指数通过光谱组合反映植被生理生态上的特征,并未能在机理上全面地解释、模拟 PAR 在冠层、冠层与地表间变化的过程;第二,由于太阳高度角、观测角等因素的影响,植被指数容易受到影响而引进了不确定性,从而降低了 FPAR 与植被指数关系的可信度;第三、在植被生长初期,植被覆盖度较低,植被指数容易受到土壤背景的影响,而在植被生长旺盛期,FPAR 与 VI 容易产生饱和问题,这两个问题目前并不能彻底解决,一直影响到 FPAR 估算精度;第四,植被指数估算法多为统计方法,其关系随着不同的时间、区域、不同类型植被而有所不同,从而造成了植被指数方法的明显区域性。

1.2 基于机理方法的 FPAR 遥感估算研究进展

在植被指数方法得到广泛运用的同时,众多学者也从机理上出发利用遥感进行 FPAR 的估算方法研究。在实际中,冠层反射率是光辐射与植被间相互作用过程的结果,而为了能利用遥感定量化描述该变化过程,大量的研究尝试着把该过程进行抽象化而形成冠层反射率模型。FPAR 正是 PAR 与植被冠层间相互作用而使部分 PAR 被植被吸收的结果。因此,借助于冠层反射率模型,可以从机理上很好地求解 FPAR。同时,植被冠层对光辐射的吸收、反射、穿透是一个能量平衡的过程。因此,能量平衡原理是进行 FPAR 机理研究的基本出发点,结合不同类别的冠层反射率模型,机理法可以分成两种方法,一种是辐射传输方程法,另一种是孔隙率法。

1.2.1 辐射传输方程法

从太阳的辐射传输过程角度上看,一般把 FPAR 看成是 4 部分,第一部分是冠层对于直接太阳辐射的吸收,第二部分是冠层对天空光的吸收,第三、第四部分是冠层对受土壤背景与冠层间的影响所产生的直射与散射光的吸收^[47]。从而可以基于辐射传输方程理论构建 FPAR 的遥感反演方法。然而,在辐射传输模型中,FPAR 并不是模型的输入参数,而是仅次于 LAI、叶绿素含量等所衍生的二级植被生理参数^[19,48]。因此,需要利用辐射传输模型进行 FPAR 的求解。在辐射传输模型进行 FPAR 的反演过程中,包括辐射模型的正向模拟与构建优化目标函数进行 FPAR 反演在内的两个过程。其中,模型的正向模拟是利用辐射传输模型在不同情景下进行冠层反射率的模拟;而优化目标函数的构建主要构建最大化或是最小化目标函数,获取模拟方向性反

射率与测量数据的最佳吻合^[49],从而达到反演的目的。

目前已经包括了 MODIS、JRC、CYCLOPES、GLOBCARBON 等在内的多种 FPAR 产品数据集^[50],其估算方法均属于辐射传输方程方法。可见,该类方法是进行 FPAR 反演的重要方法。

Myneni 等^[51-53]以 3D 辐射传输模型为研究手段,进行 MODIS 的 LAI/FPAR 产品预算法研究。在该算法中,把全球植被覆盖分成了六大类,根据各类植被类型特点选择合适的先验模型参数,用于冠层反射率模型的驱动以及 FPAR 的求解,并以查找表(look-up-table, LUT)的形式建立起冠层反射率与 FPAR 关系,最后构建代价函数进行 FPAR 的反演。同时,以植被指数方法作为备用算法,主要运用于机理方法无法实现反演的象元的 FPAR 反演,达到对机理法的有益补充。而在该机理算法中主要把 FPAR 分成两部分,其表达式如下:

$$a_{\lambda}(\Omega_0) = a_{bs,\lambda}(\Omega_0) + a_{s,\lambda} \frac{\rho_{eff}(\lambda)}{1 - \rho_{eff}(\lambda) \times r_{s,\lambda}} t_{bs,\lambda}(\Omega_0) \quad (1)$$

式中, $\rho_{eff}(\lambda)$ 为有效反射率, $r_{s,\lambda}$ 是黑色土壤下的波段吸收。公式左边前一部分是对直射光的吸收量,而后部分表示冠层与土壤间所产生的多次作用的吸收量。

该算法随后运用于 POLDER、LASUR、TM 以及 SeaWiFS 等多种传感器数据的验证。最终运用于 MODIS 的 LAI/FPAR 产品的生产^[53-54]中,并且相关学者也纷纷对该产品开展全球范围内的地面验证研究,以促进该产品的改进,如 Fensholt 等^[55]对位于大西洋海岸的荒漠草原区的 FPAR 产品验证结果表明,FPAR 与地面实测存在较好的相关性,并随着植被生长季的变化($R^2 = 0.81—0.98$),但总体精度上要高估近 8%—20% 范围内;Steinberg 等^[56]对美国阿拉斯加州阔叶林地区的 FPAR 开展两种不同尺度的数据验证:地面观测数据与 ETM 反演的较高分辨率 FPAR 数据,结果也表明了 MODIS 均存在着高估的现象,而这可能源自于波段反射率不确定性、分类误差等原因所造成的结果;Li 等^[57]对 2008 年呼伦贝尔草地生长季内的 MODIS FPAR 产品进行验证,结果表明针狼草与羊草各高估 13.7%、18.7%。这说明 MODIS 的 FPAR 产品依然存在较多的不确定性问题。同时,该算法也运用于 MISR、POLDER 等多角度数据 FPAR 的反演^[54,58-59],其中多角度信息可以更好地获取冠层或是地表信息,在一定程度上弥补冠层反射率以及植被覆盖分类精度的不确定性,从而减少 FPAR 估算的误差,而 Ganguly 等^[60]利用该算法进行 AVHRR 数据的 FPAR 产品研究,有助于长时间序列 FPAR 数据集的构建。

Gobron 等^[61]结合 MERIS 与辐射传输模型发展了 MGVI 指数,该指数主要是关于蓝光、红光以及近红外的冠层反射率的函数,其中的各波段反射率无需通过大气纠正,而是通过相关参数把表观反射率转换为冠层反射率。目前,该指数已经运用于 ETM、MERIS、GLI(Adeos-II)、VEGTATION、SeaWiFS 以及 MODIS 等传感器的 FPAR 的估算,从而形成了 JRC FPAR 算法以及系列产品^[6,9,62-64];

同时,PROSAIL 模型^[65]成为研究 FPAR 的一个常用冠层反射率模型。Baret 等^[66]在 PROSAIL 大量模拟冠层反射率的基础上,利用神经网络算法建立冠层反射率与 FPAR 关系,并运用于 FPAR 的反演,形成 CYCLOPES 全球 FPAR 产品,其结果与 MODIS 的 FPAR 产品具有较好的季节一致性,并与实测数据具有较小的误差($RMSE = 0.1$)^[67];Bacour 等^[48]则利用相似的方法进行基于 MERIS 数据的 FPAR 反演,并与 MODIS 的 FPAR 产品、MGVI-FPAR 产品进行比较,三者间存在较好的一致性,与 VALERI 地面观测数据的标准误差为 0.09。Verger 等^[68]则在该算法基础上,以 CHIRS/PROBA 多角度高光谱数据进行 Barax 试验区不同作物 LAI、FPAR 等多种参数反演,其结果显示,相对于植被指数法,所反演的结果更趋于合理、正确;Verhoef 等^[65]在大气辐射模型 MODTRAN、冠层反射率模型 4SAIL2、叶片反射率模型 PROSPECT 以及 Hapke 模型的基础上,建立了土壤-叶片-冠层-大气间辐射传输耦合模型,直接建立表观反射率与 FPAR 的关系,随后运用于芬兰的 Sodankyla 地区的 FPAR 与反照率的反演。该方法有助于遥感定量化的进一步发展,它耦合了大气、冠层、叶片以及土壤等多重机理模型^[69-70],减少了大气纠正过程,直接建立表观反射率与植被参数的关系,在一定程度上减少反演过程中所来的不确定性。

然而,由于在冠层反射率模型的求解过程中,往往只能是利用较少的参数求解方程矩阵中较多变量,从而

造成反演结果是一个病态的求解过程^[71],而容易给反演结果产生不确定性,甚至带来错误。虽然数据最优法、LUT 方法、神经网络方法、贝叶斯、遗传算法等多种重要的方法^[72]得到快速的发展与运用,但仍然存在较大不确定性。

1.2.2 孔隙率法

由于植被实际上是一个布满孔隙的透明实体,对光能起到拦截的作用,并且这些孔隙在冠层不同部位的分布是不同且具有明显的差异,从而产生了孔隙率的概念^[73]。孔隙率模型在几何光学模型中是解决多次散射问题的核心,也是进行 FPAR 求解的一个关键步骤。因此,孔隙率原理与能量平衡原理相结合成为 FPAR 估算的另外一种主要方法-孔隙率法。

陈镜明等^[74]从 FPAR 的基本公式与孔隙率原理出发,推导出 FPAR 的计算公式,其表达式如下:

$$f_{\text{APAR}} = (1 - \rho_1) - (1 - \rho_2) \times e^{-G(\theta_s)\beta L_e / \cos(\theta_s)} \quad (2)$$

式中, ρ_1 是冠层双向反射率, ρ_2 是背景反射率, L_e 是有效 LAI, θ_s 是太阳天顶角, $G(\theta_s)$ 是太阳天顶角处的消光系数, β 是多次散射因子。从公式中可见, FPAR 是关于冠层反射率、土壤反射以及冠层孔隙率、LAI 的函数;算法同时考虑到了冠层背景对冠层反射率的影响,有效地提高了 FPAR 估算的机理性。在 GLOBACARBON 中,该算法成功运用于 FPAR 产品开发^[75],其中土壤背景来源于 FAO 所提供的土壤反射率,而有效 LAI 来源于 GLOBACARBON 的 LAI 产品。

陈良富^[76]也从能量平衡与空隙率原理角度,提出了 FPAR 关于空袭率(ρ_{gap})、冠层开放度(K_{open})、冠层反射率(α)以及土壤反射率(α_b)的估算方法,其表达式如下:

$$f_{\text{APAR}} = (1 - \rho_{\text{gap}}) - \alpha + p_{\text{gap}} \alpha_b (1 - K_{\text{open}}) \quad (3)$$

在该方法中考虑到土壤背景的影响,但忽略了 PAR 与冠层、土壤背景间的多次散射作用,随后该方法运用于江西千烟洲的 FPAR 以及 NPP 的估算;李丽等^[73]在此基础上考虑了土壤背景对反照率的贡献,以环境星数据为数据源进行怀来试验场及周围的玉米的 FPAR 估算,结果与实测值较为一致(RMSE=0.04)。陶欣等^[77]在孔隙率模型的基础上,综合了几何光学模型与辐射传输模型的理论,构建基于土壤反射率、植被结构、太阳天顶角等因素在内的 FPAR 机理模型,模型中主要考虑到了透射率、背景土壤对光子的多次散射作用,并以 CHRIS-PROBA 多角度遥感数据进行黑河流域的 FPAR 反演,反演结果与实测值相比较(RMSE=0.0422),说明了模型的可行性。

然而基于孔隙率的 FPAR 估算模型中涉及到地表反照率、LAI、聚集指数、孔隙率、开放率等较多输入参数,而这些参数在目前的遥感估算方法中仍然存在较多的不确定性,因此,想要高精度的估算 FPAR,还需要准确的参数作为支撑。

除了上述辐射传输方程法与孔隙率法外,从其它角度出发的机理方法也得到一定的发展。周郴等^[78]利用 MonteCarb 方法模拟光子在植被冠层中的辐射传输过程,统计跑出冠层的光子概率,从而得到 FPAR 的求解结果,并揭示了 FPAR 与太阳方位角、植被冠层结构的关系。Huemmrich^[79]则在结合几何光学模型与 SAIL 模型的基础上发展了 GeoSail 模型,并进行 FPAR 的求解,FPAR 是关于光照冠层(C)、光照背景(S)以及 PAR 在森林冠层中的透过率的函数,该方法较好地适用于森林 FPAR 的反演。

1.2.3 基于机理方法的 FPAR 遥感估算的不确定性问题

与植被指数方法一样,机理法同样存在较多的不确定性。这主要体现在这几个方面:第一,植被覆盖类型的确定是进行 FPAR 反演的关键^[80],在 MODIS 的 FPAR 产品中,由于遥感数据的分辨率较低而导致混合像元的存在,从而影响分类精度^[52,59],其中的阔叶林与针叶林的混淆一直影响着 FPAR 的反演精度,Hu 等^[58]分别进行了 MODIS LAI/FPAR、MISR 产品的验证,发现在 6 种不同植被覆盖类型中,由于阔叶作物与阔叶林分的分类精度较低而影响到该两种植被的 FPAR 精度;第二,由于 MODIS、SeaSWIFT、MIRS 数据受到云的影响或是大气纠正的不确定性影响,可能给 FPAR 的估算结果带来较大的误差^[81-82],而传感器所获取的辐亮度(TOA)的不确定性会给 MERIS FPAR 产品带来近 5%—10% 的不确定性^[63]。Wang 等^[81]在尝试利用不同的

波段组合进行 FPAR 的估算中发现,由于蓝波段容易受到了大气因素的影响,因此,有蓝波段参与反演的波段组合容易造成结果的不稳定性;第三,太阳天顶角也是影响反演与验证结果的主要因素,其中在植被覆盖度较低下,均受土壤背景与太阳天顶角的制约,而太阳天顶角的敏感性更强^[83];第四,植被结构也是一个重要的影响因素,Fensholt 等^[55]在大西洋海岸的荒漠草原区进行 MODIS LAI/FPAR 产品验证时,发现 3 种不同叶倾角分布函数(LAD)的草地与 FPAR 存在较大敏感性,这说明了 LAD 是影响草地 PAR 吸收的重要影响因素;第五,传感器之间的差异造成了 FPAR 估算结果存在一定的差异性。McLlamm 等^[50]对 MODIS、CYCLOPES、JRC 以及 GLOBCARBON 四种 FPAR 产品在落叶阔叶林与耕地的分析中,发现由于所采用的算法以及输入参量的不同,其中 MODIS 与 GLOBCARBON 的估算结果偏高,而 CYCLOPES 与 JRC 则偏低。

虽然机理法清晰解释了 FPAR 的物理过程,可行性强,但同时存在明显的缺点,其一,模型结构复杂而且参数多,这给模型应用带来了困难;其二,由于模型对现实的简化而造成相关参量是建立在大量的假定上,如土壤背景考虑为朗波体,SAIL 模型更多是把冠层看成是一层的浑浊体;第三,模型中所需要的参数往往并不能全部得到,从而使 FPAR 估算是一个病态的反演过程,这为反演结果带来一定的不确定性。

1.3 FPAR 遥感估算的深入研究进展

随着植被指数法与机理模型法的逐步成熟,相关学者对于 FPAR 进行了更为深入的研究,其中最为重要一点是深入考虑了 FPAR 的构成以及植被生理上对 FPAR 的影响,从而进一步解释了 FPAR 的响应机制。

在实际情况中,冠层主要由绿色叶片与非绿色(如树干、枝等)两部分所组成^[84-86],一部分是以叶片中叶绿素等所吸收的 PAR(Green FPAR),该部分是真正参与光合作用,对生物量的累积起着关键的作用的;另一部分是干枯的树叶,虽然能对冠层所截获的部分 PAR 进行吸收,但并未对生物量的积累起到相应的作用^[24,32,45]。Roux 等^[87]认为冠层反射率中部分信息来源于非绿色部分的作用,从而影响 FPAR 的估算而导致高估。Huemmrich 等^[88]则认为森林树干中的细枝会致使 NDVI 高估 FPAR 近 30%。Bella 等^[89]在开展衰老叶片对 FPAR 的影响分析中发现,衰老叶片对 NDVI 产生明显的影响,而绿色部分 NDVI 一直与 FPAR 存在着良好的相关性。此外,相应的研究表明了叶绿素所吸收的 PAR($FPAR_{chl}$)与冠层所吸收的 PAR($FPAR_{canopy}$)存在较大的差别^[84-85,90-91];Zhang 等^[84-85,90]结合 PROSPECT+SAIL 进行了 $FPAR_{canopy}$ 、 $FPAR_{leaf}$ 与 $FPAR_{chl}$ 的模拟,说明了估算 $FPAR_{chl}$ 将会提高 GPP/NPP 的估算精度,并发现 EVI 更适合于 $FPAR_{chl}$ 的估算。高彦华^[91]也从理论上证明基于叶绿素的 FPAR 估算方法是可行的,提出了基于叶绿素的有效 FPAR 估算方法;

同时,研究表明散射 PAR 对光合作用有重要意义^[92]。因此,FPAR 也对应着直射 FPAR 与散射 FPAR,Goward 与 Huemmrich^[24]在通过 SAIL 冠层模型模拟冠层反射率与 FPAR 的研究中发现,FPAR 不仅会随着散射 PAR 的增加而增加,同时 NDVI 值也随着散射 PAR 的增加而增加 6%。这说明散射 PAR 的加强在一定程度上有利于提高冠层光能的截获能力^[92]。李丽^[73]依据冠层孔隙度、开放度原理,分别构建了 FPAR 与散射 FPAR 估算方法,并在怀来遥感实验场得到了较好的验证。

此外,Thomas 等^[93]结合高光谱数据反演叶绿素含量、激光雷达(LIDAR)数据反演林分高度等信息,进行 FPAR 的相关研究,说明了 FPAR 与 LIDAR 所获取的结果有着很好的相关性。Cook 等^[10]也从孔隙度原理出发,讨论了利用 LIDAR、利用 FPAR 等相关参量的反演的可行性。这主要是由于激光雷达 LIDAR 能够很好地反演林分立体结构,不失为拓展森林 FPAR 研究新思路。

2 结论与展望

综上所述,虽然基于遥感的 FPAR 估算方法得到了快速的发展,但由于估算方法存在诸多不确定性,影响到了估算方法的运行化以及最终产品的运用。随着全球变化研究的深入、遥感科学的进一步定量化及计算机技术的快速发展,FPAR 的遥感估算研究未来将会围绕以下 4 个方面展开研究:

1) FPAR 的遥感估算方法需要在机理上进一步明确。首先,目前的 FPAR 通常包括枯枝落叶等在内的非绿色部分等所吸收的 PAR 部分,从而影响到植被生产力的估算精度,因此,如何利用遥感进行植被的非绿色部分与绿色部分的区分并进行 FPAR 估算成为研究难点之一;其次,目前 FPAR 的估算方法总体只停留在冠

层尺度上,而研究表明上,叶绿素浓度等是影响 FPAR 变化的一个重要因素,因此,发展基于叶绿素的 FPAR 方法对于生态过程研究具有更深的科学意义;最后,散射 PAR 对于植被生产力总量累积是一个不可忽视的因素,因此,深入地开展散射 FPAR 的遥感估算方法研究对于碳估算具有更为重要的意义;

2)在植被指数方法中,未来该方法依然是 FPAR 估算的重要方法,但其重点是进一步深入地进行植被指数受植被背景、饱和现象的机理研究,改进与发展相应的植被指数,减少植被背景、饱和现象以及大气影响、尺度效应等所产生的负面影响,从而提高植被指数法的应用范围;在机理方法中,由于其反演过程是一个病态过程,虽然目前在已有先验知识基础上,发展了众多的数学反演算法,但在一定程度上是属于以数学为支持反演方法研究,缺乏生态学意义。因此,未来应该在目前反演方法的基础上,结合生态学方法,丰富模型的先验知识,改进反演结果以及意义,从而有效的推进遥感与生态学的交叉,满足不同用户的需求;

3)由于缺乏充足、全面的地面观测数据,这在一定程度上影响开展 FPAR 产品的科学验证以及算法改进,最后影响 FPAR 产品的运用。因此,开展包括机载、航空及地面的不同尺度的地面观测网络的建设,丰富而有效的先验知识不仅有助于改善 FPAR 反演算法与提高反演精度,也为进行 FPAR 的区域性以及全球尺度 FPAR 的验证提供了有效的数据来源;同时,加强多源、多角度遥感信息的挖掘研究,对于进一步丰富先验知识(如冠层结构信息,冠层背景)的获取具有重要的意义,其中,激光雷达等数据的加入,会有助于进一步拓宽森林 FPAR 的研究思路;

4)随着对全球变化的深入研究,众多学者对于高时空的 FPAR 数据产品提出了更为迫切的需求。虽然目前包括 MODIS、JRC、GLOBACARBON、LAF 等在内的多种 FPAR 产品,但尺度问题依然是遥感所面临的重要科学问题之一,这成为目前构建长时间 FPAR 数据产品的重要瓶颈之一;同时,在空间分辨上,目前众多 FPAR 产品依然难以满足于区域性的应用,而随着的生态过程的深入研究,高分辨率的 FPAR 成为生态模型中的重要输入参数。因此,在未来,构建长时间序列的 FPAR 数据产品,发展高分辨率的 FPAR 产品成为 FPAR 研究工作中重点与难点。而这些更多依托于遥感尺度问题研究以及高分辨卫星数据的运用。

References:

- [1] Bicheron P, Leroy M. A method of biophysical parameter retrieval at global scale by inversion of a vegetation reflectance model. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 67(3): 251-266.
- [2] Monteith J L, Moss C J. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 1977, 281(980): 277-294.
- [3] Hilker T, Coops N C, Wulder M A, Black T A, Guy R D. The use of remote sensing in light use efficiency based models of gross primary production: a review of current status and future requirements. *Science of the Total Environment*, 2008, 404(2/3): 411-423.
- [4] Verstraete M M, Gobron N, Aussedat O, Robustelli M, Pinty B, Widlowski J L, Taberner M. An automatic procedure to identify key vegetation phenology events using the JRC-FAPAR products. *Advances in Space Research*, 2008, 41(11): 1773-1783.
- [5] Jiang D, Wang N B, Yang X H, Liu H H. Dynamic properties of absorbed photosynthetic active radiation and its relation to crop yield. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2002, 18(1): 51-54.
- [6] Gobron N, Pinty B, Aussedat O, Chen J M, Cohen W B, Fensholt R, Gond V, Huemmrich K F, Lavergne T, Mélin F, Privette J L, Sandholt I, Taberner M, Turner D P, Verstraete M M, Widlowski J L. Evaluation of fraction of absorbed photosynthetically active radiation products for different canopy radiation transfer regimes: methodology and results using Joint Research Center products derived from SeaWiFS against ground-based estimations. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2006, 111(D13): doi: 10.1029/2005jd006511.
- [7] Clevers J G P W. A simplified approach for yield prediction of sugar beet based on optical remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 61(2): 221-228.
- [8] Rossi S, Weisseiner C, Laguardia G, Kurnik B, Robustelli M, Niemeyer S, Gobron N. Potential of MERIS fAPAR for Drought Detection. Proc. of the '2nd MERIS (A) ATSR User Workshop', Frascati, Italy 22-26 September 2008 (ESA SP-666, November 2008), 2008.
- [9] Gobron N, Pinty B, Mélin F, Taberner M, Verstraete M M, Robustelli M, Widlowski J L. Evaluation of the MERIS/ENVISAT FAPAR product. *Advances in Space Research*, 2007, 39(1): 105-115.
- [10] Cook B D, Bolstad P V, Næsset E, Anderson R S, Garrigues S, Morisette J T, Nickeson J, Davis K J. Using LiDAR and quickbird data to model plant production and quantify uncertainties associated with wetland detection and land cover generalizations. *Remote Sensing of Environment*, 2009,

- 113(11): 2366-2379.
- [11] Chen F, Tang J M, Niu Z. Estimating the impact of urbanization on LAI and fPAR in the Baltimore-Washington corridor area. Canadian Journal of Remote Sensing, 2008, 34(S2): S326-S337.
- [12] Linderman M, Zeng Y, Rowhani P. Climate and land-use effects on interannual fAPAR variability from MODIS 250 m data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2010, 76(7): 807-816.
- [13] GCOS. Satellite-Based Products for Climate, Supplemental Details to the Satellite-Based Component of the Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC, GCOS-107(WMO/TD No. 1338). 2006, 90-90.
- [14] A Framework for Terrestrial Climate-Related Observations and The Development of Standards for the Terrestrial Essential Climate Variables: Proposed Workplan. 2010.
- [15] Wu B F, Zeng Y, Huang J L. Overview of LAI/FPAR Retrieval from Remotely Sensed Data. Advances in Earth Science, 2004, 19(4): 585-590.
- [16] Zhang J H, Fu C B. A study on relationships between remote sensing information and plant photosynthetic parameters in estimating biomass model. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1999, 28(2): 128-132.
- [17] Nakaji T, Ide R, Oguma H, Saigusa N, Fujinuma Y. Utility of spectral vegetation index for estimation of gross CO₂ flux under varied sky conditions. Remote Sensing of Environment, 2007, 109(3): 274-284.
- [18] Jenkins J P, Richardson A D, Braswell B H, Ollinger S V, Hollinger D Y, Smith M L. Refining light-use efficiency calculations for a deciduous forest canopy using simultaneous tower-based carbon flux and radiometric measurements. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 143(1/2): 64-79.
- [19] Zhao Y S. The Principle and Method of Analysis of Remote Sensing Application. Beijing: Science Press, 2003.
- [20] Yang F, Zhang B, Song K S, Wang Z M, You J C, Liu D W, Xu J P. Hyperspectral estimation of corn fraction of photosynthetically active radiation. Agricultural Sciences in China, 2007, 6(10): 1173-1181.
- [21] Friedl M A, Davis F W, Michaelsen J, Moritz M A. Scaling and uncertainty in the relationship between the NDVI and land surface biophysical variables: an analysis using a scene simulation model and data from FIFE. Remote Sensing of Environment, 1995, 54(3): 233-246.
- [22] Myneni R B, Williams D L. On the Relationship between FAPAR and NDVI. Remote Sensing of Environment, 1994, 49(3): 200-211.
- [23] Pinter P J Jr. Solar angle independence in the relationship between absorbed PAR and remotely sensed data for alfalfa. Remote Sensing of Environment, 1993, 46(1): 19-25.
- [24] Goward S N, Huemmrich K F. Vegetation canopy PAR absorptance and the normalized difference vegetation index: an assessment using the SAIL model. Remote Sensing of Environment, 1992, 39(2): 119-140.
- [25] Baret F, Guyot G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote Sensing of Environment, 1991, 35(2/3): 161-173.
- [26] Ridao E, Conde J R, Minguez M I. Estimating fAPAR from nine vegetation indices for irrigated and nonirrigated faba bean and semileafless pea canopies. Remote Sensing of Environment, 1998, 66(1): 87-100.
- [27] Wiegand C L, Richardson A J, Escobar D E, Gerbermann A H. Vegetation indices in crop assessments. Remote Sensing of Environment, 1991, 35(2/3): 105-119.
- [28] Chen X Y, Meng J H, Wu B F, Zhu J J, Du X, Zhang F F, Niu L M. Monitoring corn FPAR based on HJ-1 CCD. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(13): 241-245.
- [29] Clevers J G P W, van Leeuwen H J C, Verhoef W. Estimating the fraction APAR by means of vegetation indices: A sensitivity analysis with a combined prospect-sail model. Remote Sensing Reviews, 1994, 9(3): 203-220.
- [30] Epiphanio J C N, Huete A R. Dependence of NDVI and SAVI on sun/sensor geometry and its effect on fAPAR relationships in Alfalfa. Remote Sensing of Environment, 1995, 51(3): 351-360.
- [31] Roujean J L, Breon F M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. Remote Sensing of Environment, 1995, 51(3): 375-384.
- [32] Xiao X M. Light Absorption by leaf chlorophyll and maximum light use efficiency. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(7): 1933-1935.
- [33] King D A, Turner D P, Ritts W D. Parameterization of a diagnostic carbon cycle model for continental scale application. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(7): 1653-1664.
- [34] Liu J G, Pattey E, Miller J R, McNairn H, Smith A, Hu B X. Estimating crop stresses, aboveground dry biomass and yield of corn using multi-temporal optical data combined with a radiation use efficiency model. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(6): 1167-1177.
- [35] Liu J G, Miller J R, Haboudane D, Pattey E, Hochheim K. Crop fraction estimation from *casi* hyperspectral data using linear spectral unmixing

- and vegetation indices. Canadian Journal of Remote Sensing, 2008, 34(S1) : S124-S138.
- [36] Cristiano P M, Posse G, Di Bella C M, Jaimes F R. Uncertainties in fPAR estimation of grass canopies under different stress situations and differences in architecture. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(15) : 4095-4109.
- [37] Pinty B, Lavergne T, Widlowski J L, Gobron N, Verstraete M M. On the need to observe vegetation canopies in the near-infrared to estimate visible light absorption. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(1) : 10-23.
- [38] Sellers P J, Tucker C J, Collatz G J, Los S O, Justice C O, Dazlich D A, Randall D A. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part II: the generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. Journal of Climate, 1996, 9(4) : 706-737.
- [39] Los S O, Justice C O, Tucker C J. A global 1° by 1° NDVI data set for climate studies derived from the GIMMS continental NDVI data. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(17) : 3493-3518.
- [40] Field C B, Randerson J T, Malmström C M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. Remote Sensing of Environment, 1995, 51(1) : 74-88.
- [41] Olofsson P, Eklundh L. Estimation of absorbed PAR across Scandinavia from satellite measurements. Part II: modeling and evaluating the fractional absorption. Remote Sensing of Environment, 2007, 110(2) : 240-251.
- [42] Zhu W Q. Estimation of Net Primary Productivity of Chinese Terrestrial Vegetation Based on Remote Sensing and its Relationship with Global Climate Change [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2005.
- [43] Donohue R J, Roderick M L, McVicar T R. Deriving consistent long-term vegetation information from AVHRR reflectance data using a cover-triangle-based framework. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(6) : 2938-2949.
- [44] Baret F, Guyot G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote Sensing of Environment, 1991, 35(2/3) : 161-173.
- [45] Huemmerich K F, Goward S N. Vegetation canopy PAR absorptance and NDVI: an assessment for ten tree species with the SAIL model. Remote Sensing of Environment, 1997, 61(2) : 254-269.
- [46] Vina A, Gitelson A A. New developments in the remote estimation of the fraction of absorbed photosynthetically active radiation in crops. Geophysical Research Letters, 2005, 32: L17403, doi: 10.1029/2005gl023647.
- [47] Gao X, Huete A R, Ni W G, Miura T. Optical-biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. Remote Sensing of Environment, 2000, 74(3) : 609-620.
- [48] Bacour C, Baret F, Béal D, Weiss M, Pavageau K. Neural network estimation of LAI , $fAPAR$, $fCover$ and $LAI \times C_{ab}$, from top of canopy MERIS reflectance data: principles and validation. Remote Sensing of Environment, 2006, 105(4) : 313-325.
- [49] Liu Q H, Xin X Z, Tang P, Liao J J, Wu B F. Research on the Quantitative Remote Sensing Model, Application and Uncertainties. Beijng: Science Press, 2010.
- [50] McCallum L, Wagner W, Schmullius C, Shvidenko A; Obersteiner M; Fritz S; Nilsson S. Comparison of four global FAPAR datasets over Northern Eurasia for the year 2000. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(5) : 941-949.
- [51] Myneni R B, Ramakrishna R, Nemani R, Running S W. Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(6) : 1380-1393.
- [52] Tian Y H, Zhang Y, Knyazikhin Y, Myneni R B, Glassy J M, Dedieu G, Running S W. Prototyping of MODIS LAI and FPAR algorithm with LASUR and LANDSAT data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5) : 2387-2401.
- [53] Myneni R B, Hoffman S, Knyazikhin Y, Privette J L, Glassy J, Tian Y, Wang Y, Song X, Zhang Y, Smith G R, Lotsch A, Friedl M, Morisette J T, Votava P, Nemani R R, Running S W. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1/2) : 214-231.
- [54] Knyazikhin Y, Martonchik J V, Myneni R B, Diner D J, Running S W. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1998, 103 (D24) : 32257-32275.
- [55] Fensholt R, Sandholt I, Rasmussen M S. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(3/4) : 490-507.
- [56] Steinberg D C, Goetz S J, Hyer E J. Validation of MODIS FPAR products in boreal forests of Alaska. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(7) : 1818-1828.
- [57] Li G, Wang D L, Liu S M, Fan W J, Zhang H, Xin X P, Zhang H B. Validation of Modis Fapar Products in Hulunber Grassland of China. New York: IEEE, 2010.
- [58] Hu J N, Tan B, Shabanov N, Crean K A, Martonchik J V, Diner D J, Knyazikhin Y, Myneni R B. Performance of the MISR LAI and FPAR

- algorithm: a case study in Africa. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 88(3): 324-340.
- [59] Zhang Y, Tian Y H, Knyazikhin Y, Martonchik J V, Diner D J, Leroy M, Myneni R B. Prototyping of MISR LAI and FPAR algorithm with POLDER data over Africa. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2402-2418.
- [60] Ganguly S, Schull M A, Samanta A, Shabanov N V, Milesi C, Nemani R R, Knyazikhin Y, Myneni R B. Generating vegetation leaf area index earth system data record from multiple sensors. Part 1: Theory. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(12): 4333-4343.
- [61] Gobron N, Pinty B, Verstraete M, Govaerts Y. The MERIS Global Vegetation Index (MGVI): description and preliminary application. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(9): 1917-1927.
- [62] Gobron N, Aussedat O, Pinty B. MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer JRC-FAPAR Algorithm Theoretical Basis Document. EN: Institute for Environment and Sustainability. 2006 [2011-10-21]. http://ies.jrc.ec.europa.eu/uploads/fileadmin/Documentation/Reports/Global_Vegetation_Monitoring/EUR_2006-2007/EUR_22164_EN.pdf
- [63] Gobron N, Pinty B, Aussedat O, Taberner M, Faber O, Mélin F, Lavergne T, Robustelli M, Snoeij P. Uncertainty estimates for the FAPAR operational products derived from MERIS-Impact of top-of-atmosphere radiance uncertainties and validation with field data. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(4): 1871-1883.
- [64] Gobron N, Taberner M. Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper JRC-FAPAR Algorithm Theoretical Basis Document. 2008. [2011-10-21]. <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/111111111/4791>
- [65] Verhoef W, Bach H. Coupled soil-leaf-canopy and atmosphere radiative transfer modeling to simulate hyperspectral multi-angular surface reflectance and TOA radiance data. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 109(2): 166-182.
- [66] Baret F, Hagolle O, Geiger B, Bicheron P, Miras B, Huc M, Berthelot B, Niño F, Weiss M, Samain O, Roujean J L, Leroy M. LAI, fAPAR and fCover CYCLOPES global products derived from VEGETATION: Part 1: Principles of the algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 110(3): 275-286.
- [67] Weiss M, Baret F, Garrigues S, Lacaze R. LAI and fAPAR CYCLOPES global products derived from VEGETATION. Part 2: validation and comparison with MODIS collection 4 products. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 110(3): 317-331.
- [68] Verger A, Baret F, Camacho F. Optimal modalities for radiative transfer-neural network estimation of canopy biophysical characteristics: evaluation over an agricultural area with CHRIS/PROBA observations. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 415-426.
- [69] Verhoef W, Bach H. Simulation of hyperspectral and directional radiance images using coupled biophysical and atmospheric radiative transfer models. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87(1): 23-41.
- [70] Prieto-Blanco A, North P R J, Barnsley M J, Fox N. Satellite-driven modelling of Net Primary Productivity (NPP): theoretical analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(1): 137-147.
- [71] Li X W, Wang J D, Hu B X, Strahler A H. T. On utilization of a prior knowledge in inversion of remote sensing model. *Science in China (Series D)*, 41(6): 580-586.
- [72] Combal B, Baret F, Weiss M, Trubuil A, Macé D, Pragnère A, Myneni R, Knyazikhin Y, Wang L. Retrieval of canopy biophysical variables from bidirectional reflectance: using prior information to solve the ill-posed inverse problem. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(1): 1-15.
- [73] Li L. PAR and FPAR Retrieval base on Multi-source remote sensing Data [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [74] Chen J M. Canopy architecture and remote sensing of the fraction of photosynthetically active radiation absorbed by boreal conifer forests. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(6): 1353-1368.
- [75] Plummer S, Arino O, Simon M, Steffen W. Establishing a Earth Observation product service for the terrestrial carbon community: the Globcarbon Initiative. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11(1): 97-111.
- [76] Chen L F, Gao Y H, Li L, Liu Q H, Gu X F. Forest NPP estimation based on MODIS data under cloudless condition. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(3): 331-338.
- [77] Tao X, Fan W J, Wang D C, Yan B Y, Xu X R. Remote sensing retrieval of FAPAR: model and analysis. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7): 741-747.
- [78] Zhou B, Chen L F, Shu X B. The Monte Carlo Study on FPAR. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(3): 385-391.
- [79] Meliá J. Evaluation of the Land-SAF FAPAR prototype along one year of MSG BRDF data: Algorithm, Product description, and inter-comparison against equivalent satellite products and ground-truth. Valencia: EOLAB, 2006-1-30 [2011-10-21]. <http://www.eumetsat.int/Home/Main/Publications/>
- [80] Lotsch A, Tian Y, Friedl M A, Mynenya R B. Land cover mapping in support of LAI and FPAR retrievals from EOS-MODIS and MISR: classification methods and sensitivities to errors. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(10): 1997-2016.
- [81] Wang Y J, Tian Y H, Zhang Y, Ei-Saleous N, Knyazikhin Y, Vermote E, Myneni R B. Investigation of product accuracy as a function of input

- and model uncertainties: case study with SeaWiFS and MODIS LAI/FPAR algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 78(3): 299-313.
- [82] Hu J N, Su Y, Tan B, Huang D, Yang W Z, Schull M, Bull M A, Martonchik J V, Diner D J, Knyazikhin Y, Myneni R B. Analysis of the MISR LAI/FPAR product for spatial and temporal coverage, accuracy and consistency. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 107(1/2): 334-347.
- [83] Shabanov N V, Wang Y, Buermann W, Dong J, Hoffman S, Smith G R, Tian Y, Knyazikhin Y, Myneni R B. Effect of foliage spatial heterogeneity in the MODIS LAI and FPAR algorithm over broadleaf forests. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85(4): 410-423.
- [84] Zhang Q Y, Xiao X M, Braswell B, Linder E, Baret F, Moore B III. Estimating light absorption by chlorophyll, leaf and canopy in a deciduous broadleaf forest using MODIS data and a radiative transfer model. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 99(3): 357-371.
- [85] Zhang Q Y, Xiao X M, Braswell B, Linder E, Ollinger S, Smith M L, Jenkins J P, Baret F, Richardson A D, Moore B III, Minocha R. Characterization of seasonal variation of forest canopy in a temperate deciduous broadleaf forest, using daily MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105(3): 189-203.
- [86] Schottker B, Phinn S, Schmidt M. How does the global Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR) product relate to regionally developed land cover and vegetation products in a semi-arid Australian savanna? *Journal of Applied Remote Sensing*, 2010, 4, doi: 10.1117/1.3463721.
- [87] Le Roux X, Gauthier H, Bégué A, Sinoquet H. Radiation absorption and use by humid savanna grassland: assessment using remote sensing and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 85(1/2): 117-132.
- [88] Huemmrich K F, Goward S N. Vegetation canopy PAR absorptance and NDVI: an assessment for ten tree species with the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 61(2): 254-269.
- [89] Di Bellat C M, Paruelo J M, Becerra J E, Bacour C, Baretd F. Effect of senescent leaves on NDVI-based estimates of fAPAR: experimental and modelling evidences. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(23): 5415-5427.
- [90] Zhang Q Y, Middleton E M, Margolis H A, Drolet G G, Barr A A, Black T A. Can a satellite-derived estimate of the fraction of PAR absorbed by chlorophyll (FAPAR_{chl}) improve predictions of light-use efficiency and ecosystem photosynthesis for a boreal aspen forest? *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(4): 880-888.
- [91] Gao Y H, Chen L H, Liu Q H, Gu X F, Tian G L. Research on remote sensing model for FPAR absorbed by chlorophyll. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(5): 798-803.
- [92] Gu L, Baldocchi D, Verma S B, Black T A, Vesala T, Falge E M, Dowty P R. Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D6): 4050, doi: 10.1029/2001JD001242.
- [93] Thomas V, Finch D A, McCaughey J H, Noland T, Rich L, Treitz P. Spatial modelling of the fraction of photosynthetically active radiation absorbed by a boreal mixedwood forest using a lidar-hyperspectral approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140(1/4): 287-307.

参考文献:

- [5] 江东, 王乃斌, 杨小唤, 刘红辉. 吸收光合有效辐射的时序变化特征及与作物产量的响应关系. *农业系统科学与综合研究*, 2002, 18(1): 51-54.
- [15] 吴炳方, 曾源, 黄进良. 遥感提取植物生理参数 LAI/FPAR 的研究进展与应用. *地球科学进展*, 2004, 19(4): 585-590.
- [16] 张佳华, 符淙斌. 生物量估测模型中遥感信息与植被光合参数的关系研究. *测绘学报*, 1999, 28(2): 128-132.
- [19] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2003.
- [28] 陈雪洋, 蒙继华, 吴炳方, 朱建军, 杜鑫, 张飞飞, 纽立明. 基于 HJ-1 CCD 的夏玉米 FPAR 遥感监测模型. *农业工程学报*, 2010, 26(13): 241-245.
- [42] 朱文泉. 中国陆地生态系统植被净初级生产力遥感估算及其与气候变化关系的研究 [D]. 北京: 北京师范大学, 2005.
- [49] 柳钦火, 辛晓洲, 唐婷, 廖静娟, 吴炳方. 定量遥感模型、应用及不确定性研究. 北京: 科学出版社, 2010.
- [71] 李小文, 王锦地, 胡宝新, Strahler A H. 先验知识在遥感反演中的作用. *中国科学 (D 辑)*, 1998, 28(1): 67-72.
- [73] 李丽. 基于多源遥感数据的 PAR 及 FPAR 反演算法研究 [D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2010.
- [77] 陶欣, 范闻捷, 王大成, 闫彬彦, 徐希孺. 植被 FAPAR 的遥感模型与反演研究. *地球科学进展*, 2009, 24(7): 741-747.
- [78] 周彬, 陈良富, 舒晓波. FPAR 的 Monte Carlo 模拟研究. *遥感学报*, 2008, 12(3): 385-391.
- [91] 高彦华, 陈良富, 柳钦火, 顾行发, 田国良. 叶绿素吸收的光合有效辐射比率的遥感估算模型研究. *遥感学报*, 2006, 10(5): 798-803.

CONTENTS

The combined effects of elevated CO ₂ and elevated temperature on proliferation of cyanophage PP	NIU Xiaoying, CHENG Kai, RONG Qianqian, et al (6917)
Precipitation pattern of desert steppe in Inner Mongolia, Sunite Left Banner: 1956—2009	CHEN Jun, WANG Yuhui (6925)
Energy and economic evaluations of two sewage treatment systems	LI Min, ZHANG Xiaohong, LI Yuanwei, et al (6936)
Individual spatial pattern and spatial association of <i>Stipa krylovii</i> population in Alpine Degraded Grassland	ZHAO Chengzhang, REN Heng (6946)
Litter characteristics of nutrient and stoichiometry for <i>Phyllostachys praecox</i> over soil-surface mulching	LIU Yadi, FAN Shaohui, CAI Chunju, et al (6955)
Characteristics of leaf element concentrations of twelve nutrients in <i>Acacia confusa</i> and <i>Leucaena glauca</i> in secondary forests of acid rain region in Fuzhou	HAO Xinghua, HONG Wei, WU Chengzhen, et al (6964)
Relationships between main insect pests and their predatory natural enemies in “Yuhualu” juicy peach orchard	KE Lei, SHI Xiaoli, ZOU Yunding, et al (6972)
Simulating 10-hour time-lag fuel moisture in Daxinganling	HU Tianyu, ZHOU Guangsheng, JIA Bingrui (6984)
Soil nutrient characteristics under different vegetations in the windy and sandy region of northern Shaanxi	LI Wenbin, LI Xinping (6991)
Partitioning of autotrophic and heterotrophic soil respiration in southern type poplar plantations	TANG Luozhong, GE Xiaomin, WU Lin, et al (7000)
Soil water and salinity in response to water deliveries and the relationship with plant growth at the lower reaches of Heihe River, Northwestern China	YU Tengfei, FENG Qi, LIU Wei, et al (7009)
Effect of stem diameter at breast height on skewness of sap flow pattern and time lag	MEI Tingting, ZHAO Ping, NI Guangyan, et al (7018)
Invasion of exotic <i>Ageratina adenophora</i> Sprengel. alters soil physical and chemical characteristics and arbuscular mycorrhizal fungus community	YU Wenqing, LIU Wanxue, GUI Furong, et al (7027)
Models and methods for information extraction of complex ground objects based on LandSat TM images of Hainan Island, China	WANG Shudong, ZHANG Lifu, CHEN Xiaoping, et al (7036)
Effects of snow pack removal on soil hydrolase enzyme activities in an alpine <i>Abies faxoniana</i> forest of western Sichuan	YANG Yulian, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (7045)
Effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice	WANG Weixiao, LIU Xiaojun, TIAN Yongchao, et al (7053)
Growth characteristics, lignin degradation enzyme and genetic diversity of <i>Fomes fomentarius</i> by SRAP marker among populations	CAO Yu, XU Ye, WANG Qiuyu (7061)
Effects of the invasion by <i>Solidago canadensis</i> L. on the community structure of soil animals	CHEN Wen, LI Tao, ZHENG Rongquan, et al (7072)
Effects of intercropping on quality and yield of maize grain, microorganism quantity, and enzyme activities in soils	ZHANG Xiangqian, HUANG Guoqin, BIAN Xinmin, et al (7082)
Influence of mycorrhizal inoculation on competition between plant species and inorganic phosphate forms	ZHANG Yuting, ZHU Min, XIAN Yanxiangwa, et al (7091)
The stable nitrogen isotope of size-fractionated plankton and its relationship with biomass during winter in Daya Bay	KE Zhixin, HUNG Liangmin, XU Jun, et al (7102)
Dynamics of toxic and non-toxic <i>Microcystis</i> spp. during bloom in the large shallow hyper-eutrophic Lake Taihu	LI Daming, YE Linlin, YU Yang, et al (7109)
Activities of antioxidant enzymes and Zn-MT-like proteins induced in <i>Chlorella vulgaris</i> exposed to Zn ²⁺	YANG Hong, HUANG Zhiyong (7117)
Ecological footprint in fujian based on calculation methodology for the national footprint accounts	QIU Shoufeng, ZHU Yuan (7124)
The comparison of CO ₂ emission accounting methods for energy use and mitigation strategy: a case study of China	YANG Xiai, CUI Shenghui, LIN Jianyi, et al (7135)
Ecological damage assessment of jiaozhou bay reclamation based on habitat equivalency analysis	LI Jingmei, LIU Tieying (7146)
The value assessment of county-level ecological assets: a case in Fengning County, Hebei Province	WANG Hongyan, GAO Zhihai, LI Zengyuan, et al (7156)
Review and Monograph	
Molecular basis for enhancement of plant drought tolerance by arbuscular mycorrhizal symbiosis: a mini-review	LI Tao, DU Juan, HAO Zhipeng, et al (7169)
A review of carbon cycling and sequestration in urban soils	LUO Shanghai, MAO Qizheng, MA Keming, et al (7177)
overview on methods of deriving fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR) using remote sensing	DONG Taifeng, MENG Jihua, WU Bingfang (7190)
Research progress on influencing of light attenuation and the associated environmental factors on the growth of submersed aquatic vegetation	WU Mingli, LI Xuyong (7202)
The framework of stoichiometry homeostasis in zooplankton elemental composition	SU Qiang (7213)
Scientific Note	
Abundance and biomass of planktonic ciliates in the sea area around Zhangzi Island, Northern Yellow Sea in July and August 2010	YU Ying, ZHANG Wuchang, ZHANG Guangtao, et al (7220)
Research of wildlife resources sustainable development based on entropy method in China	YANG Xitao, ZHOU Xuehong, ZHANG Wei (7230)
Influence of residue composition and addition frequencies on carbon mineralization and microbial biomass in the soils of agroforestry systems	WANG Yikun, FANG Shengzuo, TIAN Ye, et al (7239)
Seasonal changes in microbial diversity in different cells of a wetland system constructed for municipal sewage treatment	CHEN Yonghua, WU Xiaofu, ZHANG Zhenni, et al (7247)

《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

(SHENTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 22 期 (2012 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 22 (November, 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

主 编 冯宗炜
主 管 中国科学技术协会
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

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:1000717

印 刷 北京北林印刷厂
行 书 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

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

广 告 经 营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

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

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

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

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@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q
22>

9 771000093125