

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第16期 Vol.32 No.16 **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 16 期 2012 年 8 月 (半月刊)

目 次

基于生物多样性保护的兴安落叶松与白桦最佳混交比例——以阿尔山林区为例·····	李 菁, 骆有庆, 石 娟 (4943)
中国能源消费碳排放的时空特征·····	舒娱琴 (4950)
黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因素·····	姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河 (4961)
新疆艾比湖流域土壤有机质的空间分布特征及其影响因素·····	王合玲, 张辉国, 秦 璐, 等 (4969)
雅鲁藏布江山南宽谷风沙化土地土壤养分和粒度特征·····	李海东, 沈渭寿, 邹长新, 等 (4981)
一株溶藻细菌对海洋原甲藻的溶藻效应·····	史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 等 (4993)
种形态对黑藻和竹叶眼子菜有机酸含量的影响·····	钟正燕, 王宏镔, 王海娟, 等 (5002)
七项河流附着硅藻指数在东江的适用性评估·····	邓培雁, 雷远达, 刘 威, 等 (5014)
杭州湾滨海湿地不同植被类型沉积物磷形态变化特征·····	梁 威, 邵学新, 吴 明, 等 (5025)
剪形臂尾轮虫形态的时空变化及其与生态因子间的关系·····	葛雅丽, 席貽龙, 马 杰, 等 (5034)
太湖流域河流水质状况对景观背景的响应·····	周 文, 刘茂松, 徐 驰, 等 (5043)
荒漠植物白刺属 4 个物种的生殖分配比较·····	李清河, 辛智鸣, 高婷婷, 等 (5054)
臭氧浓度升高对香樟叶片光合色素及抗过氧化的影响及其氮素响应·····	牛俊峰, 张巍巍, 李 丽, 等 (5062)
不同密度下凤仙花重要形态性状与花朵数的关系·····	田旭平, 常 洁, 李娟娟, 等 (5071)
五种高速公路边坡绿化植物的生理特性及抗旱性综合评价·····	谭雪红, 高艳鹏, 郭小平, 等 (5076)
散孔材与环孔材树种枝干、叶水力学特性的比较研究·····	左力翔, 李俊辉, 李秧秧, 等 (5087)
北京城区行道树国槐叶面尘分布及重金属污染特征·····	戴斯迪, 马克明, 宝 乐 (5095)
南亚热带米老排人工林碳贮量及其分配特征·····	刘 恩, 刘世荣 (5103)
植物生活史型定量划分及其权重配置方法——以四棱豆生活史型划分为例·····	赵则海 (5110)
半干旱区湿地-干草原交错带边界判定及其变化·····	王 晓, 张克斌, 杨晓晖, 等 (5121)
氮肥运筹对晚播冬小麦氮素和干物质积累与转运的影响·····	吴光磊, 郭立月, 崔正勇, 等 (5128)
氮肥形态对冬小麦根际土壤氮素生理群活性及无机氮含量的影响·····	熊淑萍, 车芳芳, 马新明, 等 (5138)
基于数字相机的冬小麦物候和碳交换监测·····	周 磊, 何洪林, 孙晓敏, 等 (5146)
黄土高原半湿润区气候变化对冬小麦生长发育及产量的影响·····	姚玉璧, 王润元, 杨金虎, 等 (5154)
基于土地破坏的矿区生态风险评价: 理论与方法·····	常 青, 邱 瑶, 谢苗苗, 等 (5164)
基于生态位的山地农村居民点适宜度评价·····	秦天天, 齐 伟, 李云强, 等 (5175)
氯虫苯甲酰胺对黑肩绿盲蝽实验种群的影响·····	杨 洪, 王 召, 金道超 (5184)
6 种植物次生物质对斜纹夜蛾解毒酶活性的影响·····	王瑞龙, 孙玉林, 梁笑婷, 等 (5191)
云南元江芒果园桔小实蝇成虫日活动规律及空间分布格局·····	叶文丰, 李 林, 孙来亮, 等 (5199)
重庆市蝴蝶多样性环境健康指示作用和环境监测评价体系构建·····	邓合黎, 马 琦, 李爱民 (5208)
专论与综述	
生态系统服务竞争与协同研究进展·····	李 鹏, 姜鲁光, 封志明, 等 (5219)
中国沿海无柄蔓足类研究进展·····	严 涛, 黎祖福, 胡煜峰, 等 (5230)
冰雪灾害对森林的影响·····	郭淑红, 薛 立 (5242)
不同干扰因素对森林和湿地温室气体通量影响的研究进展·····	杨 平, 全 川 (5254)
采石场废弃地的生态重建研究进展·····	杨振意, 薛 立, 许建新 (5264)
研究简报	
基于地统计学和 CFI 样地的浙江省森林碳空间分布研究·····	张 峰, 杜 群, 葛宏立, 等 (5275)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 344 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2012-08



封面图说: 秋色藏野驴群——秋天已经降临在海拔 4200 多米的黄河源区, 红色的西伯利亚蓼(生于盐碱荒地或砂质含盐碱土壤)铺满大地, 间有的高原苔草也泛出了金黄, 行走在上面的藏野驴们顾不上欣赏这美丽的秋色, 只是抓紧时间, 在严冬到来之前取食, 添肥增膘以求渡过青藏高原即将到来的漫长冬天。

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

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 16 August, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

The optimum mixture ratio of larch and birch in terms of biodiversity conservation; a case study in Aershan forest area	LI Jing, LUO Youqing, SHI Juan (4943)
Spatiotemporal characteristics of carbon emissions from energy consumption in China	SHU Yuqin (4950)
Spatial patterns of soil moisture at transect scale in the Loess Plateau of China	YAO Xueling, FU Bojie, LÜ Yihe (4961)
The characteristics of the spatial distribution of soil organic matter and factors influencing it in Ebinur Lake Basin of Xinjiang Autonomous Region, China	WANG Heling, ZHANG Huiguo, QIN Lu, et al (4969)
Soil nutrients content and grain size fraction of aeolian sandy land in the Shannan Wide Valley of the Yarlung Zangbo River, China	LI Haidong, SHEN Weishou, ZOU Changxin, et al (4981)
Algicidal activity against <i>Proocentrum micans</i> by a marine bacterium isolated from a HABs area, South China	SHI Rongjun, HUANG Honghui, QI Zhanhui, et al (4993)
Effects of arsenic speciations on contents of main organic acids in <i>Hydrilla verticillata</i> and <i>Potamogeton malaianus</i>	ZHONG Zhengyan, WANG Hongbin, WANG Haijuan, et al (5002)
Exploration of benthic diatom indices to evaluate water quality in rivers in the Dongjiang basin	DENG Peiyan, LEI Yuanda, LIU Wei, et al (5014)
Phosphorus fraction in the sediments from different vegetation type in Hangzhou bay coastal wetlands	LIANG Wei, SHAO Xuexin, WU Ming, et al (5025)
Spatio-temporal variation of morphometric characteristics of <i>Brachionus forficula</i> in relation to ecological factors	GE Yali, XI Yilong, MA Jie, et al (5034)
Response of river water quality to background characteristics of landscapes in Taihu Lake basin	ZHOU Wen, LIU Maosong, XU Chi, et al (5043)
Reproductive allocation in four desert species of the genus <i>Nitraria</i> L.	LI Qinghe, XIN Zhiming, GAO Tingting, et al (5054)
Effects of elevated ozone on foliar chlorophyll content and antioxidant capacity in leaves of <i>Cinnamomum camphora</i> under enhanced nitrogen loads	NIU Junfeng, ZHANG Weiwei, LI Li, et al (5062)
Correlation analysis between floret numbers and important traits of <i>Impatiens balsamina</i> under different planting density	TIAN Xuping, CHANG Jie, LI Juanjuan, et al (5071)
Physiological characteristics and comprehensive evaluation of drought resistance in five plants used for roadside ecological restoration	TAN Xuehong, GAO Yanpeng, GUO Xiaoping, et al (5076)
Comparison of hydraulic traits in branches and leaves of diffuse- and ring-porous species	ZUO Lixiang, LI Junhui, LI Yangyang, et al (5087)
Distribution and heavy metal character of foliar dust on roadside tree <i>Sophora japonica</i> of urban area in Beijing	DAI Sidi, MA Keming, BAO Le (5095)
The research of carbon storage and distribution feature of the <i>Mytilaria laosensis</i> plantation in south sub-tropical area	LIU En, LIU Shirong (5103)
The novel methods of quantitative classification of plant life cycle forms and weight collocation; taking classification of life cycle forms of <i>Psophocarpus tetragonolobus</i> as an example	ZHAO Zehai (5110)
Research on boundary definition and changes of wetland-dry grassland ...	WANG Xiao, ZHANG Kebin, YANG Xiaohui, et al (5121)
Differential effects of nitrogen managements on nitrogen, dry matter accumulation and transportation in late-sowing winter wheat	WU Guanglei, GUO Liyue, CUI Zhengyong, et al (5128)
Effects of nitrogen form on the activity of nitrogen bacteria group and inorganic nitrogen in rhizosphere soil of winter wheat	XIONG Shuping, CHE Fangfang, MA Xinming, et al (5138)
Using digital repeat photography to model winter wheat phenology and photosynthetic CO ₂ uptake	ZHOU Lei, HE Honglin, SUN Xiaomin, et al (5146)
Impacts of climate change on growth and yield of winter wheat in the semi-humid region of the Loess Plateau	YAO Yubi, WANG Runyuan, YANG Jinhu, et al (5154)
Theory and method of ecological risk assessment for mining areas based on the land destruction	CHANG Qing, QIU Yao, XIE Miaomiao, et al (5164)
Suitability evaluation of rural residential land based on niche theory in mountainous area	QIN Tiantian, QI Wei, LI Yunqiang, et al (5175)
Effects of chlorantraniliprole on experimental populations of <i>Cyrtorhinus lividipennis</i> (Reuter) (Hemiptera: Miridae)	YANG Hong, WANG Zhao, JIN Daochao (5184)
Effects of six plant secondary metabolites on activities of detoxification enzymes in <i>Spodoptera litura</i>	WANG Ruilong, SUN Yulin, LIANG Xiaoting, et al (5191)
Daily activity and spatial distribution pattern of the oriental fruit fly, <i>Bactrocera dorsalis</i> (Diptera: Tephritidae) in mango orchard, Yuanjiang, Yunnan	YE Wenfeng, LI Lin, SUN Lailiang, et al (5199)
The establishment of the indication on environmental health of butterfly and of the environmental monitoring evaluation system in Chongqing	DENG Heli, MA Qi, LI Aimin (5208)
Review and Monograph	
Research progress on trade-offs and synergies of ecosystem services; an overview	LI Peng, JIANG Luguang, FENG Zhiming, et al (5219)
A review on the balanomorph barnacles in the coastal waters of China	YAN Tao, LI Zufu, HU Yufeng, et al (5230)
Effects of ice-snow damage on forests	GUO Shuhong, XUE Li (5242)
Greenhouse gas flux from forests and wetlands; a review of the effects of disturbance	YANG Ping, TONG Chuan (5254)
Advances in ecology restoration of abandoned quarries	YANG Zhenyi, XUE Li, XU Jianxin (5264)
Scientific Note	
Spatial distribution of forest carbon in Zhejiang Province with geostatistics based on CFI sample plots	ZHANG Feng, DU Qun, GE Hongli, et al (5275)

DOI: 10.5846/stxb201110271606

周磊, 何洪林, 孙晓敏, 张黎, 于贵瑞, 任小丽, 闵程程, 赵风华. 基于数字相机的冬小麦物候和碳交换监测. 生态学报, 2012, 32(16): 5146-5153.

Zhou L, He H L, Sun X M, Zhang L, Yu G R, Ren X L, Min C C, Zhao F H. Using digital repeat photography to model winter wheat phenology and photosynthetic CO₂ uptake. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(16): 5146-5153.

基于数字相机的冬小麦物候和碳交换监测

周 磊^{1,2}, 何洪林^{1,*}, 孙晓敏¹, 张 黎¹, 于贵瑞¹, 任小丽^{1,2}, 闵程程¹, 赵风华¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 利用数字相机自动、连续监测植被冠层物候变化, 逐渐引起人们的广泛关注。依托中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX), 探讨了数字相机在监测冬小麦生长状况及生态系统碳交换方面的作用, 得到如下结果: (1) 利用数字相机图像提取的比值绿度指数 G/R 能较好地反映冬小麦冠层物候变化, 通过分析比值绿度指数 G/R 的时间序列, 得到了较为准确的冬小麦关键生育日期 (与人工观测数据比较, 误差 < 3 d), 表明数字相机可以作为物候监测的一种有效手段; (2) 数字相机图像获取的比值绿度指数能较好地模拟冬小麦总生态系统碳交换量 GEE , R^2 为 0.66, 叶片最大光合同化速率与比值绿度指数 G/R 变化趋势基本一致。表明利用数字相机技术在一定程度上能够表征作物生理生态过程。从而为我国开展不同陆地生态系统自动连续物候监测, 深入研究不同生态系统物候和碳循环的关系提供支持。

关键词: 数字相机; 涡度相关; 冬小麦; 物候参数; CO₂ 通量

Using digital repeat photography to model winter wheat phenology and photosynthetic CO₂ uptake

ZHOU Lei^{1,2}, HE Honglin^{1,*}, SUN Xiaomin¹, ZHANG Li¹, YU Guirui¹, REN Xiaoli^{1,2}, MIN Chengcheng¹, ZHAO Fenghua¹

1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, 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: Continuous and automatic monitoring of canopy phenology is of increasing scientific interest as a tool to investigate the multiple implications of vegetation dynamics on ecosystem carbon fluxes. For this purpose, we initiated research on winter wheat ecosystem northern China in 2011, belonging to Chinese Terrestrial Ecosystem Flux Observation and Research Network (ChinaFLUX), and evaluated the applicability of digital camera imagery for monitoring and modeling crop phenology and physiology. A standard, commercially available webcam was mounted at the top of the eddy covariance tower at the YuCheng ChinaFLUX site. Images were collected in growing season every 30 min from 9:30 a. m to 5:00 p. m each day. Red, green, and blue color channel brightness data for a region-of-interest (ROI) were extracted from each image (ROI is the subset of image, can better describe the target's characters. The size of ROI for winter wheat is 380 * 260 pixels). Since a temporal series of original brightness data can't capture the changes at different canopy development stages, we compared different indices (ratio greenness index, excess greenness index, and relative greenness index) composed of different channel brightness data. Ratio greenness index (G/R), can reflect the size of leaf area index and variations in chlorophyll content of winter wheat, proved to be the index best describing the green-up signals of the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41071251); 科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题” (XDA05050600); 中国陆地生态系统碳-氮-水通量的相互关系及其环境影响机制 (973 项目) (2010CB833504)

收稿日期: 2011-10-27; **修订日期:** 2012-04-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hehl@igsrr.ac.cn

vegetation, was calculated by dividing green channel brightness by red channel brightness, and extracted from chronically digital images. Phenological date was defined as the date on which the curvature of G/R reaches its peak and compared to field-measured phenological date. The results confirmed that G/R was useful to monitor canopy phenology. We further investigated the relationship between G/R and carbon exchange capacity (i. e., gross ecosystem exchange [GEE]) of vegetation using eddy covariance CO_2 flux data. A strong relationship (GEE ; $r^2 = 0.66$) between ratio greenness and photosynthesis was observed for winter wheat. At the same time, we used the daily NEE and PAR data collected from Eddy covariance technique, employed the Michaelis-Menten equation, and obtained the curve of A_{max} . The result demonstrated a positive relationship between G/R and A_{max} , and suggested that G/R is able to reflect the plant phenological activity in physiological level. We concluded that digital camera images not only provide a reliable measure of plant phenology at high tempo-spatial resolutions, but also act as a complementary role of CO_2 flux measurements, and improve our knowledge of ecosystem processes. Digital cameras have been installed at eight typical terrestrial ecosystem sites of ChinaFLUX for phenological observations, constituting of the Chinese Digital Camera Phenology Observation Network. This platform will provide an unprecedented opportunity to obtain an improved understanding of vegetation responses to climate change in China. With high tempo-spatial resolution phenological data, we can bring insights into the process of biologically mediated carbon sources and sinks, and better understand the uncertainties of the role of terrestrial ecosystems in the global carbon cycle.

Key Words: digital camera; eddy covariance; agro-ecosystem; phenological date; CO_2 flux

植被物候被视为“大自然的语言”和全球变化的“诊断指纹”^[1-2],不仅是全球植被和陆面过程模型的重要参数^[3],还是表征陆地生态系统对气候变化响应与适应的综合性指标^[4-5]。传统的人工物候观测方法具有客观、准确的特点,但需花费大量人力、物力,且无法准确监测复杂地形条件下的植被状况。遥感物候观测具有多时相、覆盖范围广、空间连续等优点^[6-7],但空间分辨率较低,获得的物候与地面观测值存在一定的偏差^[8]。随着数字图像处理技术的提高,数字相机作为“近地面”遥感的新方法^[9],结合了人工观测和遥感观测的优点,可自动连续地拍摄高时空分辨率图像^[10],成为记录植被物候变化的一种新手段^[11-14]。

与此同时,涡度相关技术以其快速、连续、非破坏性的独特优势,被认为是现今唯一能直接测量生物圈与大气间能量和物质交换通量的标准方法,已广泛应用在全球多个农田、森林、草地生态系统的碳通量观测研究中,推动了陆地生态系统碳循环研究的发展^[15-17]。

近年来,植被物候与生态系统碳循环两者之间的关系成为当前生态学和全球变化领域研究的热点^[18],人们逐渐开始利用数字相机技术开展物候监测及碳循环研究,并在全球多个森林、农田、草地生态系统中取得了一系列进展。Adamsen 利用数字相机监测冬小麦的成熟过程,建立了植被绿度指数与叶绿素含量的相关关系,并利用绿度指数反演了冬小麦叶绿素含量^[11]。Kurc 利用数字相机监测干旱区草地物候起始期,探讨水分在物候事件中的触发作用,发现绿度指数与净碳交换量(NEE)存在密切关联^[19]。Ahrends 和 Richardson 利用数字相机获得的绿度指数,准确描述了森林物候期年际变化,并发现其与生态系统总初级生产力(GPP)有较强的相关性。表明数字相机在生态系统尺度不仅能提供较为准确的植被物候信息,还可作为碳通量观测的补充手段^[9, 20-21]。在联网观测方面,美国和日本相继建立了数字相机物候观测网络^[22-23]。Graham 利用安装在北美洲公共设施(机场、铁路、公园)的数字相机,选取其中具有空间代表性的 30 台,检测其是否具有判断物候期的能力,并与遥感物候期进行比较,结果表明:尽管数字图像存在一些噪音,但仍可有效进行大尺度物候监测^[24]。国内学者利用数字相机也开展了生态学研究,大多集中在农田作物叶片氮素含量诊断、叶面积无损测量、盖度估算等方面^[25-29],并取得了一系列进展。但这些研究目前主要依靠人工方式获取图像数据,无法提取植被长期、连续的动态变化信息,从而限制了数字相机技术在我国生态学研究中的应用。

本文以禹城农田生态系统为例,在野外条件下利用数字相机进行长期、连续、自动、高频的原位监测,并结

合涡度相关观测技术,系统开展生态系统物候监测及碳循环研究。主要目的包括:(1)利用数字相机技术评价冬小麦物候动态,提取关键生育日期;(2)结合涡度相关观测技术,定量分析绿度指数与生态系统碳通量组分的关系。从而为数字相机在中国陆地生态系统物候监测、碳循环研究中的应用及建立 ChinaFLUX 相机物候观测网提供技术支撑。

1 材料和方法

1.1 实验站点概况

试验在中国科学院禹城综合试验站(36°27'N,116°38'E,海拔 20m)进行。该站位于山东省禹城市,地处黄河中下游冲积平原,地势平坦,属暖温带半湿润季风气候。近 30a 平均气温为 13.1℃、降水量为 528mm。土壤多为潮土和盐化潮土。冬小麦的生育期一般为 10 月上旬至翌年 6 月上旬^[16],主要的生育日期见表 1。

表 1 冬小麦生育期
Table 1 The life cycle of winter wheat

作物 Crop		生育期 The life cycle							
冬小麦	播种期	出苗期	三叶期	分蘖期	返青期	拔节期	抽穗期	蜡熟期	收获期

1.2 涡度相关碳通量观测数据

开路式涡度相关通量观测系统位于大片农田的中心,高度为 2m,主要由三维超声风速计(Model CAST3, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA)和红外 CO₂/H₂O 分析仪(Model LI-7500, Li-Cor Inc., Nebraska, USA)组成,可测定冠层上方的三维风速、温度、湿度和 CO₂ 浓度。上述仪器与数据采集系统 CR5000(Model CR5000, Campbell Scientific)相连,昼夜连续采集,得到 10Hz 的原始观测数据,每 30min 输出一组平均值^[17]。

利用 ChinaFLUX 通量数据处理系统,对通量观测数据进行坐标轴旋转、WPL 校正、储存项计算及降水剔除,去除地形因素、水热因素、冠层空气储存及降水对通量观测数据的影响^[15, 30],然后进行异常值剔除和夜间数据处理,最后利用非线性回归方法对 NEE 缺失数据进行插补,并将 NEE 拆分为总生态系统碳交换量(GEE: gross ecosystem exchange)和生态系统呼吸(R_{eco})^[31],得到每日平均值。

1.3 数字相机安装及图像处理方法

本研究使用的仪器是商业网络摄像头(model 214; Axis Communications, Lund, Sweden),其红(R)、绿(G)、蓝(B)通道的峰值灵敏度分别在波长 620nm, 540nm, 470nm 处。2010 年 3 月将相机及防护罩(VTDBH24K 0216-011; Axis Communications, Lund, Sweden)一起安装在通量塔 5m 高度处,防护罩保护相机免受雨水、尘土的影响。相机垂直向下拍摄,拍摄面积约为 30m²。图像数据通过无线网络传输以 JPEG 格式(分辨率:384×288, 3 个通道 8-bit RGB 彩色信息)自动存储于台站服务器。图像采样时间为每天 8:30 开始持续拍摄 8h,每隔半小时拍摄 1 张。其中,冬小麦图像拍摄时间为 2011 年 1 月 7 日至 2011 年 6 月 19 日共 170 d,数据缺失率为 10%。网络维修等原因导致数据缺失。

图像数据处理利用 MATLAB(R2009a; The Math Works, Natick, Mass.)软件完成,为保证图像质量,并可与其他结果比较,本研究未对图像进行增强处理(空间域滤波增强、频域滤波增强等^[12])。由于研究对象在空间分布上的异质性,需要确定最能表现图像内容的关键区域即感兴趣区域(ROI)。图像处理过程如下:(1)依时间序列读入图像确定 ROI。冬小麦长势较为均一,采用整幅图像作为 ROI(图 1a);(2)利用式 1 提取每幅图像 3 个波段(红(R)、绿(G)、蓝(B))的平均亮度值(DN);(3)计算 ROI 内各波段的相对亮度值。为消除短时间内由于环境条件的改变引起亮度值较大变异,利用式 2,3 计算 ROI 内的总亮度值(DN_{total})及每个波段的相对亮度值(channel%),为后期数据处理提供基础。

$$DN_{channel} = (SumDN)_{channel} / N_{channel} \tag{1}$$

$$DN_{total} = DN_{green} + DN_{red} + DN_{blue} \tag{2}$$

$$channel\% = DN_{channel} / DN_{total} \tag{3}$$

式中, $(SumDN)_{channel}$ 表示图像中某一波段的所有像素亮度值之和, $N_{channel}$ 表示 ROI 内的像素数量, DN_{green} 、 DN_{red} 、 DN_{blue} 、 DN_{total} 分别表示绿、红、蓝波段的平均及图像总亮度值, $DN_{channel}$ 表示图像中某一波段的平均亮度值。

1.4 物候期确定方法

传统物候是指基于物种或个体尺度的特定生命周期(如萌芽、抽枝、展叶、开花、结果及落叶、休眠等)的规律性现象,是一个间断地、不连续的过程。本文中物候是指群落物候节律是基于群落尺度的动态连续过程,主要表现为群落结构和外貌随着季节的更迭发生的变化。通常情况下,人们利用 logistic 曲线拟合时间和表示物候变化的参数($DN_{channel}$ 或 $channel\%$),并通过拟合曲线斜率的变化确定物候始期和末期。逻辑斯蒂生长曲线虽可解释植被冠层物候某一阶段(生长或衰败阶段)的时间变化规律^[32],但不利于分析整个生长季物候变化。为更好地表征物候变化的时间和速率,本文采用双逻辑斯蒂曲线对时间与表征物候变化的参数进行拟合^[9]:

$$g(x) = a + \frac{b}{[1 + \exp(c - dx)] \times [1 + \exp(e - fx)]} \quad (4)$$

式中, $g(x)$ 为表征物候期的参数,为了减少光照、雨雪、云、雾或防水罩外侧冷凝水汽对亮度值的影响^[20],本研究采用最大合成法(每日最大值)获得表征物候变化的参数^[33]。 x 为儒略日(DOY), a , b , c , d 为拟合参数,参数 a 表示 $g(x)$ 的最小值(如休眠季节),参数 b 表示 $g(x)$ 的振幅,参数 c 、 d 控制着植被生长阶段变化的时间和速率,参数 e 、 f 控制着植被衰老阶段变化的时间和速率。

本研究利用式 5 计算拟合曲线的曲率最大值确定关键物候参数。其中,在植物生长阶段得到的两个极值点,分别对应返青期和成熟期;在衰老阶段中得到的两个极值点,分别对应衰老期与休眠期^[34]。

$$\rho = \left| \frac{g(x)''}{(1 + g(x)')^2} \right|^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

式中, $g(x)' = \frac{dg(x)}{dx}$ 为 x 关于 $g(x)$ 的一阶导数,

$g(x)'' = \frac{d^2g(x)}{dx^2}$ 为 x 关于 $g(x)$ 的二阶导数。

2 结果与分析

2.1 冬小麦物候变化定性描述

本研究利用获取的连续完整时间序列图像定性研究冬小麦的群体物候变化(图 1)。图像结果显示:越冬期间地上部分图像颜色以黄色为主,冬小麦处于休眠状态;随气温回暖,麦田半数以上的麦苗心叶(春生一叶)达到 1—2cm,图像颜色虽以黄色为主,却能观察到呈条带状的绿色(图 1a),冬小麦进入返青期;105 d 左右图像黄色完全被绿色取代(图 1b),冬小麦基本覆盖地表;之后绿色继续增强,冬小麦进入快速生长阶段;第 163 天绿色逐渐被黄色取代(图 1c),冬小麦进入成熟期;待冬小麦收割后,图像颜色再次反映土壤颜色。

2.2 冬小麦绿度指数选择及关键生育日期确定

为有效提取图像中绿色植被信息,利用植被与土壤背景物在 R、G、B 波段吸收、反射特征的差异(植被叶绿素在 R、B 波段形成“吸收谷”,在 G 波段形成“反射峰”;土壤背景物无明显吸收、反射特征),对 R、G、B 波



图 1 利用数字相机得到冬小麦图像

Fig. 1 Sample webcam images of winter wheat showing a(65 d); b(105 d); c(163 d); ROI 为感兴趣区域

段进行不同组合,增大植被与土壤背景物的差别,从而获得表征植被状态与结构变化的绿度指数。通常有以下3种方式计算绿度指数:(1)绿波段亮度值除以红波段亮度值(式6),即比值绿度指数(G/R)^[11, 25, 35]; (2)绿波段亮度值除以所有波段亮度值之和(式3),即相对绿度指数($G\%$)^[20]; (3)两倍绿波段亮度值减去红波段和蓝波段之和(式7),即绝对绿度指数($2G_RB$)^[9, 12, 13]。根据不同的植被状况,应选取适当的绿度指数方法,从而最大获取植被状态与结构变化信息。

本研究中绿度指数的选取原则:参数在整个生长季中变化明显,且能包含较多的信息。

$$G/R = DN_{\text{green}}/DN_{\text{red}} \quad (6)$$

$$2G_RB = 2 \times DN_{\text{green}} - (DN_{\text{red}} + DN_{\text{blue}}) \quad (7)$$

本研究中关键生育日期是指冬小麦返青期、拔节期。其中,冬小麦返青期是促使晚弱苗升级、控制旺苗徒长、调节群体大小和决定成穗率高低的关键时期,拔节孕穗期是决定冬小麦成穗率和结实率、争取壮秆大穗的关键时期,这两个物候期是决定农作物产量的关键时期。

图2展示了冬小麦生长季图像中ROI平均亮度值(R、G、B波段)的时间序列。结果表明:3个波段变化规律各异,均不能较好描述冬小麦生长状况。其中,红波段变化趋势较明显,在生长季初期相对稳定,第60天左右开始下降,在110 d左右达到最小,之后逐渐上升形成低谷;整个生长季绿、蓝波段没有明显季节变化。随冬小麦的生长,红、蓝、绿波段亮度值并未发生显著变化,因此需考虑波段变换选择合适的绿度指数,获取植被状况变化信息。

图2中冬小麦蓝、绿波段变化规律相近,波段之间简单线性相减无法有效表征植被生长状态,故排除绝对绿度指数 $2G_RB$ 。从图2中看出,3个波段相对亮度值差异明显。尤其是相对绿度指数 $G\%$ 在冬季(1—2月)保持稳定,随植被生长出现较明显的升高(3月初)和下降(6月份)趋势。比值绿度指数 G/R 也较好地反映了植被生长和衰老过程(图2),但振幅大于 $G\%$ (振幅越大越能清晰地描述植被细小变化)。进一步分析冬小麦生长季 G/R 的时间序列(图2),可以发现 G/R 在越冬期间(1—2月)有缓慢下降趋势(去除异常点),可能是由于土壤水分增加,引起土壤表面反射率降低导致亮度值下降;第60天左右 G/R 出现较明显上升过程,此时冬小麦开始返青;第110天左右 G/R 达到最大,冬小麦基本覆盖地表; G/R 峰值维持一段时间后,在第150天左右开始急速下降,冬小麦进入衰老期。所以本研究选用 G/R 表征冬小麦群落物候变化状况,确定关键生育日期。

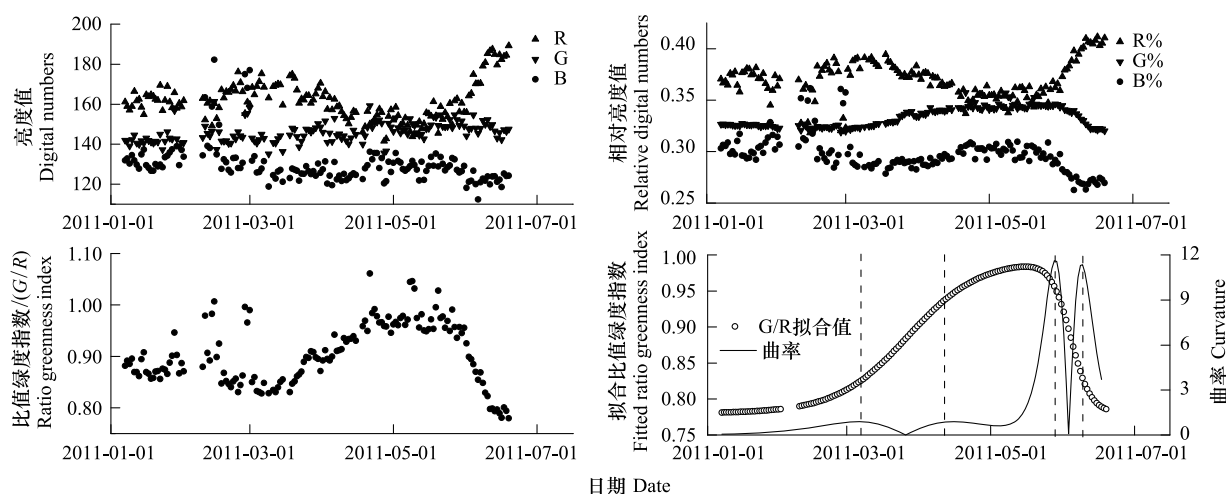


图2 冬小麦亮度值、相对亮度值、比值绿度指数的时间序列变化及关键生育日期的确定

Fig. 2 Times series of brightness numbers, the relative brightness, ratio greenness index and determination of phenological date for winter wheat

利用式4对冬小麦生长季(3月1日—6月19日)每天的 G/R 进行拟合,得到拟合方程(式8, $R^2=0.90$),并利用式5计算拟合曲线的曲率(图2),获得4个极值点(分别为第64天、105天、148天、160天)(图2中虚

线的位置),分别对应冬小麦生长阶段的返青期和拔节期,衰老阶段的蜡熟期和收割期。同时将模拟的返青期、拔节期、收割期与人工观测值进行比较(无蜡熟期人工观测资料),发现误差均小于3 d(表2),精度较高,表明 G/R 能定量表征冬小麦的生长状况^[11]。其中2011年冬小麦返青期较往年平均值推迟2 d(往年返青期为第60天),可能是由于人工管理(灌溉、施肥等)的干预,温度成为影响作物物候期的重要因子^[36]。而2011年气温偏低,积温为44.4℃·d,较多年平均值(103.6℃·d)偏低60个℃·d,导致冬小麦返青期较往年推迟。

$$y = 0.78 + 0.213 / ((1 + \exp(-36.89 + 0.238 \times x)) \times (1 + \exp(5.658 - 0.066 \times x))) \quad (8)$$

表2 两种不同方法得到的冬小麦关键生育日期比较

Table 2 Comparison of phenological date derived from digital camera images and observers

项目 Item	返青期 Green returned stage	拔节期 Jointing stage	收获期 Harvest time
人工观测 Field-measured	2011-03-03	2011-04-12	2011-06-12
数字相机观测 Digital camera measured	2011-03-05	2011-04-15	2011-06-09

2.3 比值绿度指数与生态系统总碳交换量的关系

分析了比值绿度指数 G/R 与涡度相关观测获取的生态系统总碳交换量 (GEE) 两者之间的关系。利用生长季内每日 GEE 与 G/R 数据(剔除生长季内由于降水引起的 G/R 6个异常值点,共103个点),建立了两者的拟合方程(式9, $R^2=0.66$)。结果表明:整个生长季中,冬小麦比值绿度指数 G/R 与 GEE 形成近似镜像图像(图3),呈现较好的相关性。但在生长季的不同物候期,两者相关性有较大差异。其中在生长季初期(3月1日—3月10日),冬小麦刚萌生新叶,光合作用虽逐渐增强,但 G/R 却未发生明显变化,导致 G/R 和 GEE 的相关性并不显著($R^2=0.025$);进入返青期以后,冬小麦

叶绿素含量增多及叶面积指数增大,光合作用显著增强, G/R 和 GEE 均发生较明显变化,两者呈现较好的负相关($R^2=0.63$)。主要由于数字相机红、绿波段的中心波长分别为620nm、540nm,对应于植被叶绿素的吸收、反射波段,而土壤在这两个波段没有较明显的吸收现象^[37],对图像进行 G/R 变换后,增大了绿色植被与土壤或枯落物的差别,突出了绿色植被的吸收特征^[38],在一定程度上表征了植被叶面积与叶绿素的变化状况^[11,39]。通常叶面积指数大小及叶绿素含量的季节变异与叶片光合能力季节变异紧密相关^[40],随着植物的生长,叶面积指数增大,叶绿素含量增加,叶片的最大光合同化速率(A_{max})也相应增大。利用涡度相关技术获取的冬小麦生长季每日 NEE 及 PAR 数据,根据 Michaelis-Menten 方程获得了冬小麦生长季 A_{max} 变化曲线(图4)。 A_{max} 由生长季初期的 $3\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 到生长旺盛期的 $93\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,在衰老期迅速下降达到 $1\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,呈现先上升后下降趋势。该曲线与同期获取的比值绿度指数 G/R 具有较好的一致性(图4,对 A_{max} 及 G/R 的时间序列进行滑动平均,步长为11 d),表明 G/R 在一定程度上能较好地表征冬小麦的光合作用强度,利用数字相机技术开展冬小麦物候及碳交换量监测具有合理性^[41]。

$$GEE_i = -63.93 \times (G/R)_i + 49.36 \quad (9)$$

式中, GEE_i 分别表示第 i 天的平均 GEE ; i 为儒略日(DOY)

3 结论

利用数字相机获取图像数据,通过提取图像的 R、G、B 亮度值并对不同波段进行组合,得到了表征作物冠层状态的比值绿度指数 G/R 。利用双逻辑斯蒂曲线拟合比值绿度指数时间序列得到生长季植被冠层物候变化情况,进一步提取了冬小麦返青期、拔节期,并与人工观测数据相比误差小于3 d。表明数字相机技术适用

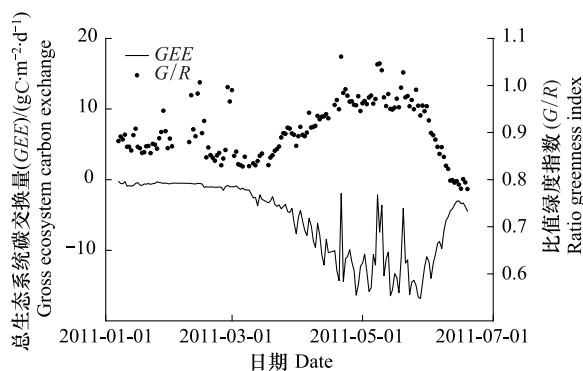


图3 冬小麦 G/R 与 GEE 时间序列变化

Fig. 3 Time series comparison between G/R and GEE

于禹城试验站开展物候监测,实现了对植被生长状况及天气变化(雨、雪等)情况的实时监测,为生态系统研究补充了新的数据源,弥补了人工物候观测的不足。

结合禹城农田涡度相关数据,通过建立比值绿度指数 G/R 与生态系统碳交换量 (GEE) 的线性回归方程,得到了冬小麦 G/R 与 GEE 的统计关系, R^2 达到 0.66。叶片最大光合速率与 G/R 在生长季变化趋势基本一致。表明利用数字相机技术在一定程度上能够表征作物生理生态过程。从而为我国开展不同陆地生态系统自动连续物候监测,深入研究不同生态系统物候和碳循环的关系,提供支持。

致谢: 感谢中国科学院禹城农业综合试验站的工作人员对仪器安装及维护过程给予的帮助。

References:

- [1] Zhu K Z, Wan M W, Phenology. Beijing: Science Press. 1973:1-1.
- [2] Root T L, Price J T, Hall K R, Schneider S H, Rosenzweig C, Pounds J A. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 2003, 421(6918): 57-60.
- [3] White M A, Thornton P E, Running S W. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, 11(2): 217-234.
- [4] Ganguly S, Friedl M A, Tan B, Zhang X Y, Verma M. Land surface phenology from MODIS: characterization of the collection 5 global land cover dynamics product. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(8): 1805-1816.
- [5] Khanduri V P, Sharma C M, Singh S P. The effects of climate change on plant phenology. *Environmentalist*, 2008, 28(2): 143-147.
- [6] Reed B C, Brown J F, Vanderzee D, Loveland T R, Merchant J W, Ohlen D O. Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science*, 1994, 5(5): 703-714.
- [7] Schwartz M D. Green-wave phenology. *Nature*, 1998, 394(6696): 839-840.
- [8] Reed B C, Schwartz M D, Xiao X M. Remote Sensing Phenology: Status and the Way Forward // Asko Noormets. *Phenology of Ecosystem Processes*. New York: Springer, 2009: 231-246.
- [9] Richardson A D, Hollinger D Y, Dail D B, Lee J T, Munger J W, O'Keefe J. Influence of spring phenology on seasonal and annual carbon balance in two contrasting New England forests. *Tree Physiology*, 2009, 29(3): 321-331.
- [10] Migliavacca M, Galvagno M, Cremonese E, Rossini M, Meroni M, Sonnentag O, Cogliati S, Manca G, Diotri F, Busetto L, Cescatti A, Colombo R, Fava F, di Cella U M, Pari E, Siniscalco C, Richardson A D. Using digital repeat photography and eddy covariance data to model grassland phenology and photosynthetic CO_2 uptake. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(10): 1325-1337.
- [11] Adamsen F J, Pinter P J, Barnes E M, LaMorte R L, Wall G W, Leavitt S W, Kimball B A. Measuring wheat senescence with a digital camera. *Crop Science*, 1999, 39(3): 719-724.
- [12] Richardson A D, Jenkins J P, Braswell B H, Hollinger D Y, Ollinger S V, Smith M L. Use of digital webcam images to track spring green-up in a deciduous broadleaf forest. *Oecologia*, 2007, 152(2): 323-334.
- [13] Crimmins M A, Crimmins T M. Monitoring plant phenology using digital repeat photography. *Environmental Management*, 2008, 41(6): 949-958.
- [14] Ide R, Oguma H. Use of digital cameras for phenological observations. *Ecological Informatics*, 2010, 5(5): 339-347.
- [15] Yu G R, Sun X M. Theory and Methodology for Flux Measurement in Terrestrial Ecosystem. Beijing: Higher Education Press, 2006:46-46.
- [16] Qin Z, Yu Q, Xu S H, Hu B M, Sun X M, Liu E M, Wang J S, Yu G R, Zhu Z L. Water, heat fluxes and water use efficiency measurement and modeling above a farmland in the North China Plain. *Science in China Series D*, 2005, 48(Suppl): 183-192.
- [17] Li J, Yu Q, Sun X M, Tong X J, Ren Ch Y, Wang J, Liu En M, Zhu Zh L, Yu G R. Carbon dioxide exchange and the mechanism of environmental control in a farmland ecosystem in North China Plain. *Science in China Series D*, 2006, 49(Suppl): 226-240.
- [18] Ge Q S, Dai J H, Zheng J Y. The Progress of phenology studies and challenges to modern phenology research in China. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2010, 25(3): 310-316.
- [19] Kure S A, Benton L M. Digital image-derived greenness links deep soil moisture to carbon uptake in a creosotebush-dominated shrubland. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(5): 585-594.
- [20] Ahrends H E, Brugger R, Stöckli R, Schenk J, Michna P, Jeanneret F, Wanner H, Eugster W. Quantitative phenological observations of a mixed beech forest in northern Switzerland with digital photography. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2008, 113 (G04004), doi: 10.1029/2007JG000650.
- [21] Ahrends H E, Etzold S, Kutsch W L, Stoeckli R, Bruegger R, Jeanneret F, Wanner H, Buchmann N, Eugster W. Tree phenology and carbon

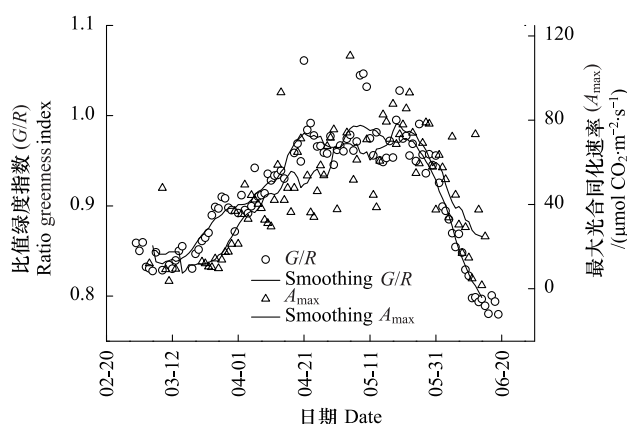


图4 比值绿度指数 (G/R) 与最大光合速率 (A_{max}) 的季节变异

Fig. 4 Seasonal variation in greenness index and daily A_{max}

- dioxide fluxes: use of digital photography for process-based interpretation the ecosystem scale. *Climate Research*, 2009, 39(3): 261-274.
- [22] Phenological Eyes Network. http://pen.agbi.tsukuba.ac.jp/index_e.html.
- [23] Phenocam-Image Gallery. <http://phenocam.sr.unh.edu/>.
- [24] Graham E A, Riordan E C, Yuen E M, Estrin D, Rundel P W. Public Internet-connected cameras used as a cross-continental ground-based plant phenology monitoring system. *Global Change Biology*, 2010, 16(11): 3014-3023.
- [25] Jia L L, Chen X P, Zhang F S, Buerkert A, Römhild V. Use of digital camera to assess nitrogen status of winter wheat in the northern China plain. *Journal of Plant Nutrition*, 2004, 27(3): 441-450.
- [26] Tan F, Gao Y P. Investigation of the method for non-destructive measurement of leaf area based on image. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(5): 170-173.
- [27] Song Z W, Wen X Y, Zhang Z P, Cai W T, Chen F. The color characteristics of digital image of winter wheat under different irrigation and N fertilization. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(4): 350-355.
- [28] Shan C G, Liao S H, Gong Y, Liang Z X, Wang P. Application of digital image processing for determination of vertical distribution of biomass in the canopy of winter wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(3): 419-424.
- [29] Zhang L Z, Wang D W, Zhang Y C, Cheng Y S, Li H J, Hu C S. Diagnosis of N nutrient status of corn using digital image processing technique. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(6): 1340-1314.
- [30] Li C, He H L, Liu M, Su W, Fu Y L, Zhang L M, Wen X F, Yu G R. The design and application of CO₂ flux data processing system at ChinaFLUX. *Geo-Information Science*, 2008, 10(5): 557-565.
- [31] Liu M, He H L, Yu G R, Sun X M, Zhu X D, Zhang L, Zhao X Q, Wang H M, Shi P L, Han S J. Impacts of uncertainty in data processing on estimation of CO₂ flux components. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(9): 2389-2396.
- [32] Fisher J I, Mustard J F, Vadeboncoeur M A. Green leaf phenology at Landsat resolution: scaling from the field to the satellite. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100(2): 265-279.
- [33] Holben B N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1417-1434.
- [34] Gu L H, Wilfred M P, Dennis D B, Andrew Black T, Andrew E S, Shashi BV, Timo V, Steve C W. Phenology of vegetation photosystem // Schwartz M D, ed. *Phenology: An integrative Environmental Science*, New York: Springer, 2003:35-58.
- [35] Graham E A, Hamilton M P, Mishler B D, Rundel P W, Hansen M H. Use of a networked digital camera to estimate net CO₂ uptake of a desiccation-tolerant moss. *International Journal of Plant Sciences*, 2006, 167(4): 751-758.
- [36] Li R P, Zhou G S, Zhang H L. Research advances in plant phenology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(3): 541-544.
- [37] Tong Q X, Zhang B, Zheng L F. *Hyperspectral Remote Sensing*. Beijing: Higher Education Press, 2006:24-24.
- [38] Woebbecke D M, Meyer G E, Von Bargen K, Mortensen D A. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. *Transactions of the ASAE*, 1995, 38(1): 259-269.
- [39] Liu J G, Pattey E. Retrieval of leaf area index from top-of-canopy digital photography over agricultural crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(11): 1485-1490.
- [40] Muraoka H, Koizumi H. Photosynthetic and structural characteristics of canopy and shrub trees in a cool-temperate deciduous broadleaved forest: Implication to the ecosystem carbon gain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 134(1/4): 39-59.
- [41] Nagai S, Maeda T, Gamo M, Muraoka H, Suzuki R, Nasahara K N. Using digital camera images to detect canopy condition of deciduous broad-leaved trees. *Plant Ecology and Diversity*, 2011, 4(1): 79-89.

参考文献:

- [1] 竺可桢, 宛敏渭. 物候学. 北京: 科学出版社, 1973:1-1.
- [15] 于贵瑞, 孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法. 北京: 高等教育出版社, 2006:46-46.
- [16] 秦钟, 于强, 许守华, 胡秉民, 孙晓敏, 刘恩民, 王吉顺, 于贵瑞, 朱治林. 华北平原农田水热通量与作物水分利用效率的特征与模拟. *中国科学 D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 183-192.
- [17] 李俊, 于强, 孙晓敏, 同小娟, 任传友, 王婧, 刘恩民, 朱治林, 于贵瑞. 华北平原农田生态系统碳交换及其环境调控机制. *中国科学 D 辑*, 2006, 36(增刊 II): 210-223.
- [18] 葛全胜, 戴君虎, 郑景云. 物候学研究进展及中国现代物候学面临的挑战. *中国科学院院刊*, 2010, 25(3): 310-316.
- [26] 谭峰, 高艳萍. 基于图像的植物叶面积无损测量方法研究. *农业工程学报*, 2008, 24(5): 170-173.
- [27] 宋振伟, 文新亚, 张志鹏, 蔡万涛, 陈阜. 基于数字图像技术的冬小麦不同施氮和灌溉处理颜色特征分析. *中国农学通报*, 2010, 26(14): 350-355.
- [28] 单成刚, 廖树华, 龚宇, 梁振兴, 王璞. 应用数字图像技术估测冬小麦冠层生物量垂直分布特征的研究. *作物学报*, 2007, 33(3): 419-424.
- [29] 张立周, 王殿武, 张玉铭, 程一松, 李红军, 胡春胜. 数字图像技术在夏玉米氮素营养诊断中的应用. *中国生态农业学报*, 2010, 18(6): 1340-1314.
- [30] 李春, 何洪林, 刘敏, 苏文, 伏玉玲, 张雷明, 温学发, 于贵瑞. ChinaFLUX CO₂ 通量数据处理系统与应用. *地球信息科学*, 2008, 10(5): 557-565.
- [31] 刘敏, 何洪林, 于贵瑞, 孙晓敏, 朱旭东, 张黎, 赵新泉, 王辉民, 石培礼, 韩士杰. 数据处理方法不确定性对 CO₂ 通量组分估算的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(9): 2389-2396.
- [36] 李荣平, 周广胜, 张慧玲. 植物物候研究进展. *应用生态学报*, 2006, 17(3): 541-544.
- [37] 童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光谱遥感——原理、技术与应用. 北京: 高等教育出版社, 2006: 24-24.

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,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,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 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 16 期 (2012 年 8 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 16 (August, 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 1000717, 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:1000717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 1000717, 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