

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第33卷 第9期 Vol.33 No.9 2013

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33卷 第9期 2013年5月 (半月刊)

## 目 次

### 前沿理论与学科综述

- 可持续发展研究的学科动向 ..... 茶 娜, 邬建国, 于润冰 (2637)  
代谢异速生长理论及其在微生物生态学领域的应用 ..... 贺纪正, 曹 鹏, 郑袁明 (2645)  
植物内生菌促进宿主氮吸收与代谢研究进展 ..... 杨 波, 陈 晏, 李 霞, 等 (2656)  
中国园林生态学发展综述 ..... 于艺婧, 马锦义, 袁韵珏 (2665)

### 个体与基础生态

- 基于最小限制水分范围评价不同耕作方式对土壤有机碳的影响 ..... 陈学文, 王 农, 时秀焕, 等 (2676)  
草原土壤有机碳含量的控制因素 ..... 陶 贞, 次旦朗杰, 张胜华, 等 (2684)  
外源钙离子与南方菟丝子寄生对喜旱莲子草茎形态结构的影响 ..... 车秀霞, 陈惠萍, 严巧娣, 等 (2695)  
毛竹出笋后快速生长期茎秆色素含量与反射光谱的相关性 ..... 刘 琳, 王玉魁, 王星星, 等 (2703)  
巴郎山异型柳叶片功能性状及性状间关系对海拔的响应 ..... 冯秋红, 程瑞梅, 史作民, 等 (2712)  
外源磷或有机质对板蓝根吸收转运砷的影响 ..... 高宁大, 耿丽平, 赵全利, 等 (2719)  
不同猎物饲喂对南方小花蝽捕食量和喜好性的影响 ..... 张昌容, 郅军锐, 莫利锋 (2728)  
捕食风险对东方田鼠功能反应格局的作用 ..... 陶双伦, 杨锡福, 姚小燕, 等 (2734)  
基于线粒体细胞色素 c 氧化酶亚基 I 基因序列的帘蛤科贝类分子系统发育研究 .....  
..... 程汉良, 彭永兴, 董志国, 等 (2744)

### 不同实验生态环境对海刺猬遮蔽行为的影响

常亚青, 李云霞, 罗世滨, 等 (2754)

### 种群、群落和生态系统

- 基于 RS 与 GIS 的赣江上游流域生态系统服务价值变化 ..... 陈美球, 赵宝萍, 罗志军, 等 (2761)  
长江口及邻近海域富营养化指标响应变量参照状态的确定 ..... 郑丙辉, 朱延忠, 刘录三, 等 (2768)  
长江口及邻近海域富营养化指标原因变量参照状态的确定 ..... 郑丙辉, 周 娟, 刘录三, 等 (2780)  
鸭绿江口及邻近海域生物群落的胁迫响应 ..... 宋 伦, 王年斌, 杨国军, 等 (2790)  
杭州西溪湿地大型底栖动物群落特征及与环境因子的关系 ..... 陆 强, 陈慧丽, 邵晓阳, 等 (2803)  
生物土壤结皮对荒漠土壤线虫群落的影响 ..... 刘艳梅, 李新荣, 赵 昕, 等 (2816)  
大棚模拟条件下角倍蚜春季迁飞数量动态及其与气象因子的关系 ..... 李 杨, 杨子祥, 陈晓鸣, 等 (2825)  
宁南山区植被恢复对土壤团聚体水稳定及有机碳粒径分布的影响 ..... 程 曼, 朱秋莲, 刘 雷, 等 (2835)  
1958—2008 年太白山太白红杉林碳循环模拟 ..... 李 亮, 何晓军, 胡理乐, 等 (2845)  
不同干扰对黄土区典型草原物种多样性和生物量的影响 ..... 陈芙蓉, 程积民, 刘 伟, 等 (2856)  
乌拉山自然保护区白桦种群的年龄结构和点格局分析 ..... 胡尔查, 王晓江, 张文军, 等 (2867)  
西南干旱对哀牢山常绿阔叶林凋落物及叶面积指数的影响 ..... 杞金华, 章永江, 张一平, 等 (2877)  
阿尔泰山小东沟林区乔木物种丰富度空间分布规律 ..... 井学辉, 曹 磊, 藏润国 (2886)

## 景观、区域和全球生态

太湖流域生态风险评价 ..... 许 妍,高俊峰,郭建科 (2896)

基于 GIS 的关中-天水经济区土地生态系统固碳释氧价值评价 ..... 周自翔,李 璞,冯雪铭 (2907)

## 资源与产业生态

淹水条件下控释氮肥对污染红壤中重金属有效性的影响 ..... 梁佩筠,许 超,吴启堂,等 (2919)

## 研究简报

高温强光对小麦叶绿体 Deg1 蛋白酶和 D1 蛋白的影响及水杨酸的调节作用 ..... 郑静静,赵会杰,胡巍巍,等 (2930)

不同 CO<sub>2</sub> 浓度变化下干旱对冬小麦叶面积指数的影响差异 ..... 李小涵,武建军,吕爱锋,等 (2936)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 308 \* zh \* P \* ¥ 90.00 \* 1510 \* 32 \* 2013-05



**封面图说:** 肥美的当雄草原——高寒草甸是在寒冷的环境条件下,发育在高原和高山的一种草地类型。其植被组成主要是多年生草本植物,冬季往往有冰雪覆盖,土壤主要为高山草甸土。当雄草原位于藏北高原,藏南与藏北的交界地带,海拔高度为 5200—4300m,受海洋性气候影响,呈现高原亚干旱气候,年平均降水量 293—430mm。主要有小嵩草草甸、藏北嵩草草甸和沼泽草甸等,覆盖度为 60%—90%,其中小嵩草草甸分布面积最大,连片分布于广阔的高原面上。高寒草甸草层低,草质良好,是畜牧业优良的夏季牧场。

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

DOI: 10.5846/stxb201202080165

李小涵,武建军,吕爱锋,刘明.不同CO<sub>2</sub>浓度变化下干旱对冬小麦叶面积指数的影响差异.生态学报,2013,33(9):2936-2943.  
Li X H, Wu J J, Lü A F, Liu M. The difference of drought impacts on winter wheat leaf area index under different CO<sub>2</sub> concentration. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(9): 2936-2943.

## 不同CO<sub>2</sub>浓度变化下干旱对冬小麦叶面积指数的影响差异

李小涵<sup>1,2</sup>, 武建军<sup>1,2,\*</sup>, 吕爱锋<sup>3</sup>, 刘明<sup>1,2</sup>

(1. 北京师范大学减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 2. 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;  
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:**叶面积指数是作物生长状况的一个重要表征参数,也是研究陆地生态系统的一个重要的参数。当今世界温室气体排放逐年上升,气候变暖趋势明显,对气候变化敏感的农业将受到影响。在全球变化的背景下,采用农业技术转移决策支持系统(DSSAT)系统,通过在黄淮海平原典型站点模拟3种CO<sub>2</sub>浓度条件下冬小麦在水分充足和水分亏缺2种情境下的生长过程,分析不同CO<sub>2</sub>浓度下水分亏缺对冬小麦叶面积指数的影响差异。研究发现,CO<sub>2</sub>浓度升高对叶面积指数增长有促进作用,且在干旱情况下对叶面积指数的正效应比湿润情况下更为明显,在CO<sub>2</sub>浓度倍增条件下,发生水分亏缺的作物叶面积指数数倍增长。研究结论有助于分析CO<sub>2</sub>浓度变化对农作物生长过程的影响,为农田水分管理提供依据,又为估算叶面积指数提出了一种模型的方法。

**关键词:**CO<sub>2</sub>浓度; 叶面积指数; 冬小麦; 干旱; DSSAT

## The difference of drought impacts on winter wheat leaf area index under different CO<sub>2</sub> concentration

LI Xiaohan<sup>1,2</sup>, WU Jianjun<sup>1,2,\*</sup>, LÜ Aifeng<sup>3</sup>, LIU Ming<sup>1,2</sup>

1 Academy of Disaster Reduction and Emergency Management MOCA/MOE, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

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

3 Institute of Geographic Science and Natural Resource Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract:** The leaf area index (LAI) controls a variety of biophysical and physiological processes of vegetation canopy, such as photosynthesis, respiration, transpiration, carbon cycle, precipitation interception and energy exchange, thus it is an important parameter for characterizing crop growth as well as studying terrestrial ecosystems. In recent years, with the continuous increase of greenhouse gas emissions, the whole globe has gone through an intensifying warming trend. Up to now, a large number of agricultural experiments, such as Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment, (FACE) and Open-Top-Chamber (OTC), show that elevated CO<sub>2</sub> concentration will cause reduced plant transpiration rate, strengthened stomatal resistance and a significant increase in water use efficiency. Agriculture, which is quite sensitive to climate change, will be significantly affected under the context of global warming. In this paper, the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) developed by the U. S. Department of Agriculture is used to simulate the growth process of winter wheat under three different CO<sub>2</sub> concentrations combined with water deficiency and adequacy status. The observed experimental data over 2007—2008 is from Gucheng Ecology and Agricultural Experiment Station, Chinese Academy of Meteorological

基金项目:国家自然科学基金项目(NSFC41171403);国家科技支撑计划课题(2012BAH29B02);长江学者和创新团队发展计划资助(PCSIRT)

收稿日期:2012-02-08; 修订日期:2012-10-26

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

Sciences. Using DSSAT, the impacts of environmental CO<sub>2</sub> concentration change on crop LAI are analyzed. The results indicate that elevated CO<sub>2</sub> concentration will strengthen the leaf area index growth, with more significant positive effects on LAI under drought condition (water supply: 150mm) than under the wet condition (water supply: 620mm). At current CO<sub>2</sub> level, crop LAI under water deficiency condition is significantly less than that under wet condition; when the CO<sub>2</sub> concentration is increased by 20%, the difference of LAI under dry and wet conditions declined slightly; when the CO<sub>2</sub> concentration is doubled, the maximum of LAI under wet conditions increased by 0.31 and LAI under the water deficiency increased by 0.82, which leads to the conclusion that crop LAI under water deficit condition increased several times at doubled CO<sub>2</sub> level. Contrast to both concentrations of water deficit and sufficient, when CO<sub>2</sub> concentration doubled, it is significantly alleviate the adverse effects of leaf area index in the water deficit condition. Over time series, the change of LAI is very small when CO<sub>2</sub> concentration changed before returning green stage (about 130 days after planting). However, the influences of CO<sub>2</sub> concentration change on crop LAI become significant after returning green stage. Also, there is another study which shows that the combination of elevated CO<sub>2</sub> concentration and drought stress can increase the air and canopy temperature, offsetting the fertilizer effect of elevated CO<sub>2</sub> concentration. The study facilitates the analysis of the impacts of CO<sub>2</sub> concentration changes on crop growth process, which can provide the basis for the agricultural water management and propose a model approach for estimating LAI.

**Key Words:** CO<sub>2</sub> concentration; leaf area index; winter wheat; drought; DSSAT

农业干旱是指因土壤供水不足导致农作物正常生长发育受阻的生态逆境现象,一般由降水和蒸发蒸散失衡引起。土壤含水量的降低和作物缺水枯萎、产量降低等都是作物遭受干旱胁迫的反应<sup>[1]</sup>。据测算,每年因干旱造成的全球经济损失高达 60—80 亿美元,远远超过了其它气象灾害<sup>[2]</sup>。近 50 年由于全球气候的变化使得全球干旱发生情况有了显著的变化。自 20 世纪 70 年代以来,全球陆地上极端干旱的面积增加了一倍多,中国农业干旱成灾面积也有明显增加的趋势,旱灾发生次数和发生强度上也呈上升态势<sup>[3-4]</sup>。

工业革命以来至今,大气中 CO<sub>2</sub> 浓度已经从 280 μmol/mol 上升到 379 μmol/mol,过去 50a 的年平均增速为 1 μmol/mol。IPCC 的报告指出在 2050 年全球 CO<sub>2</sub> 浓度将上升至 460—650 μmol/mol。世界粮食组织的报告表明,未来数十年中 CO<sub>2</sub> 浓度的升高和气候环境的改变将对土壤水分和粮食生产造成影响,在半干旱区尤为明显。气候变化对干旱的影响已经有很多研究和发现<sup>[5-9]</sup>,而 CO<sub>2</sub> 浓度上升条件下干旱的影响研究还非常欠缺。因此,在全球变化的背景下,研究 CO<sub>2</sub> 浓度升高对农业干旱的影响机理及其影响程度对干旱管理和水资源管理有很重要的意义。

目前研究 CO<sub>2</sub> 浓度变化对作物生理特性和生长的影响主要有两类方法:农田实验方法、作物生长模型模拟方法。农学实验方法常用的有(FACE)实验、(OTC)试验方法、田间的阳光生长室。农学实验依然是当今干旱研究的重要手段,可以较准确地反映干旱对作物生长影响的各个方面,实验结果较为可靠,在实验区范围内具有较强的推广性。但是农学实验一般需要一个或多个生长季,耗时较长,并且在大尺度上开展难度较大,具有明显的时空局限性。所以不少学者开始利用作物生长模型研究 CO<sub>2</sub> 浓度改变对农业干旱的影响。其中典型的就包括美国的农业技术转移决策支持系统(DSSAT)、侵蚀和生产力影响计算模型(EPIC)等。

作物生长模拟模型利用统计学和动力学的方法描述了作物生长的机理,模拟并解释作物生长、发育、产量、质量和环境、管理措施或遗传变异的关系。模型模拟的方法主要是通过校准和验证过的作物生长模型来模拟 CO<sub>2</sub> 浓度改变前后的作物生长过程,从而分析 CO<sub>2</sub> 浓度对农业生产的影响。这种方法在试验成本、模拟尺度和参数设置的灵活性方面显著优于 FACE 等农田实验。从 20 世纪 90 年代开始就有很多学者利用作物生长模型模拟的方法来进行这种研究<sup>[10-13]</sup>。在气候变化对农业的影响评价中,用的最多是 DSSAT 系统中的 CERES 系列模型,它可以模拟大气-土壤-作物之间的水分平衡<sup>[14-15]</sup>,可以通过计算每日的 C 同化率、光合作用的光响应、以及干物质在各个器官的分配等模拟 CO<sub>2</sub> 浓度改变下谷物的生长和发育过程,分析 CO<sub>2</sub> 浓度改

变对农业生产造成的影响<sup>[16-18]</sup>。在提高农业管理以及应对未来气候变化的政策制定研究中存在极大的应用价值<sup>[19-20]</sup>。

叶面积指数是表征植被生长状态的重要指数,它不仅反映生物量的变化也反映了产量的变化趋势,且整个生长期叶面积指数对水分变化比较敏感。因此,本文选择叶面积指数为描述干旱影响的指标,通过CERES-Wheat作物生长模型模拟河北固城的冬小麦模拟在发生水分亏缺和供水充足2种情况水分条件下,3种不同CO<sub>2</sub>浓度条件下的作物生长发育过程,得到生长期连续的叶面积指数,定量刻画不同水分条件和不同CO<sub>2</sub>浓度条件下叶面积指数的变化,以期为全球变化背景下农业水分管理和干旱监测提供支撑。

本文分为3个部分进行描述。第1部分数据与方法,主要介绍数据来源、研究区概况以及模型模拟方法。第2部分结果分析,分析干旱和无干旱胁迫下CO<sub>2</sub>浓度变化对叶面积指数的影响。第3部分是结论与讨论。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据

本研究采用了2007—2008年中国气象科学研究院固城生态与农业实验站的实验观测数据,气象试验站实验选用的冬小麦品种为超优626(冬性),观测量包括:千粒重、土壤容重、田间持水量、凋萎系数等土壤基本属性数据;分层观测的土壤湿度数据;最高温、最低温、降雨量、风速、相对湿度、太阳辐射(或日照时数)等日值气象数据;地上生物量、叶面积、植株高度、根重、叶片含水率、气孔导度等作物生长状态参数以及作物产量数据。研究区的作物生长环境概况如表1所示。

表1 站点信息

Table 1 Summary description of growing condition in model in the present study

站点地理信息 Site, geographic position	年 Year	两种灌溉 Irrigation/mm	太阳辐射 SRAD ( MJ/m <sup>2</sup> )	土壤类型 Soil type	土壤沙砾比 The ratio of sand to gravel
河北固城 115.77N 39.27E	2007	150, 600	1135	粉砂 Silt	1/36

### 1.2 DSSAT系统

DSSAT系统是美国农业部开发的农业技术推广决策支持系统,是在IBSNAT(international Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer)计划的资助下开发出来的。IBSNAT计划的总部设在夏威夷大学,它的主要目标之一是以系统分析的方法帮助提高发展中国家的农业生产管理能力,并为农户的经济可持续进行自然资源的有效利用和环境保护作出有益的成果。DSSAT是IBSNAT的主要研究成果之一,该模型基本囊括了美国众多著名的作物模型,如CERES系列和CROPGRO系列模型。

本文采用的(CERES-Wheat)模型是由美国密西根州立大学和乔治亚大学研制的作物机理模型,模型建立之初的目的是要通过对遗传因子与气象要素的相互作用的数学描述来预报叶片数和叶片大小。模型可以模拟CO<sub>2</sub>浓度对光合作用、水分利用效率、水分胁迫和N循环的影响。DSSAT系统被应用于区域甚至全球农作物生产研究,是研究全球变化对农业影响的重要工具<sup>[21]</sup>。

利用实验站点的实测数据和当地逐日气象数据校准小麦的遗传品种参数。其中气象数据包括日最高温度、日最低温度、日照时长、降雨等。遗传参数通过DSSAT模型中的遗传参数计算模块GENAL确定。利用校准后的CERES-Wheat模型可以很好的模拟不同CO<sub>2</sub>浓度条件下黄淮海平原定兴地区的冬小麦生长发育过程,获取作物生长期连续的叶面积指数。

### 1.3 农田水分控制实验

根据研究目的,水分控制实验可以设置在作物整个生长期或者特定的生长阶段。

在冬小麦生长期进行水分控制,共设置5个梯度,以土壤湿度占田间持水量的比例为级别划分依据,分别为A>80%;B 60%—80%;C 40%—60%;D <40%;E 自然降水。每个级别共设3个重复,以获得作物生长过程中发育过程状态和产量指标与水分条件的定量关系。根据本文研究需要,只使用了A和E两种级别设置

下获得的实验结果。

观测指标主要包括:

- (1) 土壤属性 土壤容重、田间持水量、凋萎系数、分层观测的土壤湿度数据等;
- (2) 作物生长期各层土壤的水分状态;
- (3) 气象数据 最高温、最低温、降雨量、风速、相对湿度、太阳辐射(或日照时数)等日值气象数据;
- (4) 作物生长状态 地上生物量、叶面积、植株高度、根重、叶片含水率、气孔导度等;
- (5) 作物产量数据 苗产、千粒重、穗粒数等。

实验时间为 2007 年和 2008 年。

#### 1.4 模型校准与验证

模型利用 2007 年的农田水分控制实验所测得的产量数据与模型模拟的产量数据进行校准与验证。本文引入一致性指数  $d$  和相关系数  $r$  来检验模拟值和实测值的吻合度。

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P'_i| + |O'_i|)^2} \right]$$

式中,  $p_i$  为模拟值,  $o_i$  为观测值,  $n$  为样本数。经检验模型模拟的产量和实测产量的相关系数为 0.97, 一致性指数为 0.97, 能够很好的满足实验要求(图 1)。

校准后的参数如表 2 所示。

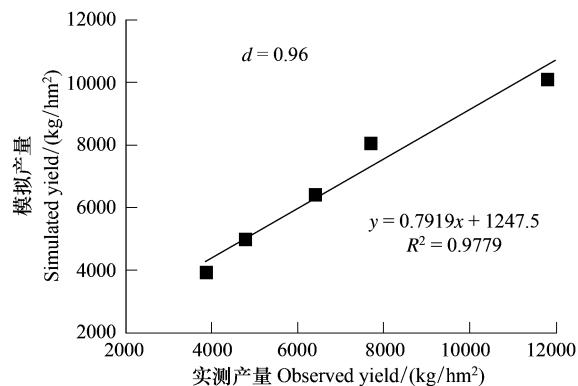


图 1 2007 年不同水分条件产量模拟值与实测值的关系

Fig. 1 Observed and simulated yield of chaoyou 626 under different water station

表 2 冬小麦作物品种遗传参数

Table 2 The value of genetic parameter on winter wheat

作物 Crop	品种 Cultivar	参数 Parameter	P1V	P1D	P5	G1	G2	G3	PH
冬小麦 Winter wheat	超优-626(冬性) Chao You 626	范围 Range	5—60	25—120	350—600	17—30	20—55	1.0—1.5	60—90
		最优值 Optimal value	60	40	400	30	50	1.5	85

P1V: 完成春化所需最佳温度的天数 Days at optimum vernalizing temperature required to complete vernalization; P1D: 光照时间比阈值(20 小时)少 10 h 的情况下, 物候发展速率比 20 h 情况下降低的比例 Percentage reduction in development rate in a photoperiod 10 hour shorter than the threshold relative to that at the threshold; P5: 灌浆阶段的持续时间 Grain filling (excluding lag) phase duration (°C · d); G1: 开花期冠层最大穗粒数 Kernel number per unit canopy weight at anthesis (#/g); G2: 最佳条件下的标准内核大小(mg) Standard kernel size under optimum conditions (mg); G3: 成熟时单株作物的干重 Standard, non-stressed dry weight (total, including grain) of a single tiller at maturity (g); PHINT: 每增长一片叶子所需要的时间间隔(以 GDD 为单位) Interval between successive leaf tip appearances (°C · d).

#### 1.5 模拟过程

为了研究不同 CO<sub>2</sub> 浓度下水分亏缺对作物生长影响的差异, 本文共设定了 2 种水分供应条件(充足灌溉、水分亏缺)和 3 种空气中 CO<sub>2</sub> 浓度条件。模型设置的水分条件如表 3 所示, 其中水分亏缺条件依据水分控制 E(即自然降雨操作), 生长期共获得 150mm 有效降水, 水分充足的灌溉条件依据水分控制实验操作 A(当土壤湿度占田间持水量的 80% 的时候进行灌溉), 有效灌溉量为 620mm, 灌溉策略如表 3。

根据当前的 CO<sub>2</sub>, IPCC 预报的 2050 年的大气 CO<sub>2</sub> 浓度和倍增的 CO<sub>2</sub> 浓度设定 3 种 CO<sub>2</sub> 浓度, 加上两种灌溉策略, 共设置为以下 6 种情景, 如表 4 所示。

表3 两种灌溉策略

Table 3 Irrigation strategy

灌溉措施 Irrigation strategy	10月21日 /mm	3月14日 起身水 /mm	4月9日 /mm	4月21日 /mm	5月9开花水 /mm	5月20 /mm	总计灌溉/mm Total amount of irrigation
水分充足 Water enough	120	100	100	100	100	100	620
雨养 Rainfed	80	0	22.5	37.5	0	0	150

表4 6种情景模式

Table 4 Six scenarios

情景代码 Scenarios Code	CO <sub>2</sub> 浓度/(μmol/mol) Carbon dioxide concentration	水分供应状况/mm Water supply condition	情景代码 Scenarios Code	CO <sub>2</sub> 浓度/(μmol/mol) Carbon dioxide concentration	水分供应状况/mm Water supply condition
WWN	375	620	WSN	375	150
WWF	450	620	WSF	450	150
WWD	700	620	WSD	700	150

WWN: CO<sub>2</sub> 浓度为 375, 生长季水分供应为 620mm; WWF 为 CO<sub>2</sub> 浓度为 450, 生长季水分供应为 620mm; WWD: CO<sub>2</sub> 浓度为 700, 生长季节供水为 620mm

## 2 结果分析

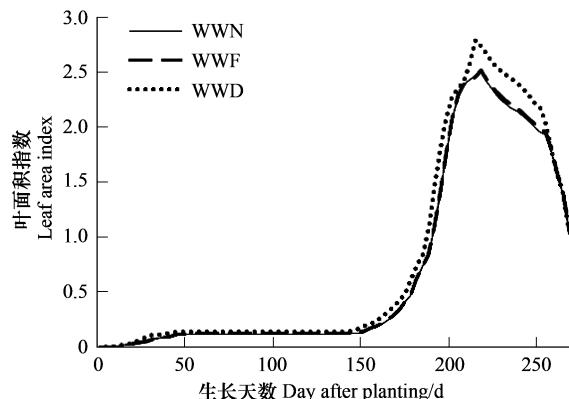
### 2.1 无干旱胁迫条件下 CO<sub>2</sub> 浓度变化的影响

由图 2 所示当 CO<sub>2</sub> 浓度上升 20%, 即浓度由 375 μmol/mol 增加到 450 μmol/mol 时, 在无干旱胁迫情况下, 生长季期间叶面积指数最大值增加了 1.6%; CO<sub>2</sub> 浓度倍增时, 生长季叶面积指数最大值增加了 12.0%。CO<sub>2</sub> 浓度增加 20% 和 100% 两种情况下, 对叶面积指数的影响都是从翌年 4 月份, 即生长季开始后的 150d 左右才开始发生明显变化。

出现这种现象的原因和冬小麦的生长特性有关, 冬小麦 10 月中旬左右播种, 之后进入漫长的越冬期, 在越冬期间, 地上生物量基本没有明显变化, 叶面积指数也没有显著变化, 而到了次年的 3 月中旬(生长季开始后的 150d 左右), 大部分冬小麦进入返青期, 温度、水分条件较为适宜冬小麦的生长, 地上生物量增长迅速, 改变 CO<sub>2</sub> 浓度对叶面积指数的影响也开始明显。

### 2.2 干旱胁迫条件下 CO<sub>2</sub> 浓度变化对叶面积指数的影响

如图 3 所示, 在雨养条件下(雨养条件即为水分亏缺条件), 整个生长期叶面积指数最大值增加了 3.2 倍。雨养条件下, 改变 CO<sub>2</sub> 浓度的值, 叶面积指数会从生长季初期就开始明显变化。叶面积指数在整个生长季的变化也是在生长季开始 180d 后增长迅速, 但是在 CO<sub>2</sub> 浓度倍增的条件下, 叶面积指数是在生长季开始 150d 后迅速增长。这与干旱对作物的生理生态影响和 CO<sub>2</sub> 浓度变化对作物的生理生态影响有关, 当作物发生干旱时, 作物的根冠比开始增大, 地上生量的增长速度降低, 叶面积的增长受到影响。而 CO<sub>2</sub> 浓度升高提高水分利用效率, 使得光合作用率增强, 地上生物量的增长起到了正面刺激作用。所以 CO<sub>2</sub> 浓度倍增, 返青期来临时, 叶面积指数开始明显增加。

图2 无干旱胁迫条件下3种CO<sub>2</sub>浓度情况下叶面积指数对比Fig. 2 Leaf Area Index under three kinds of CO<sub>2</sub> concentrations without water stress

WWN: CO<sub>2</sub> 浓度为 375, 生长季水分供应为 620mm; WWF 为 CO<sub>2</sub> 浓度为 450, 生长季水分供应为 620mm; WWD: CO<sub>2</sub> 浓度为 700, 生长季节供水为 620mm

### 2.3 对比干旱胁迫和无干旱胁迫两种条件下改变 CO<sub>2</sub> 浓度对作物的影响差异

本文利用经过校准和验证的 CERES-Wheat 模型研究作物对干旱和 CO<sub>2</sub> 浓度变化的响应,发现 CO<sub>2</sub> 浓度升高后,整个生长期叶面积指数和地上生物量都较当前 CO<sub>2</sub> 浓度条件下的叶面积指数和地上生物量值高,根冠比增大。叶面积指数有不同程度的增长,这与农田实验的结论是一致的。在水分充足的条件下 CO<sub>2</sub> 浓度增加,叶面积指数增加了 0.31,而当水分亏缺时 CO<sub>2</sub> 浓度倍增条件下叶面积指数增加了 0.82。在水分充足的状况下,尽管 CO<sub>2</sub> 浓度增加,光合作用同时受光照强度、酸碱度、温度和矿质元素以及作物本身生理特性影响,光合作用率不会无限制升高。但是在水分亏缺状况下,CO<sub>2</sub> 浓度对它的影响变得非常敏感。而在未来气候条件下,我们还要考虑温度变化带来的综合影响,以确定 CO<sub>2</sub> 浓度变化对作物生产的影响。

CO<sub>2</sub> 浓度增加对叶面积指数有明显的正效应,尤其在浓度倍增的时候结果更明显。而对比湿润和供水不足两种情况下,在发生水分胁迫的时候这种效应也更加的明显。对比发生干旱胁迫和不发生干旱胁迫两种情景,在当前的 CO<sub>2</sub> 浓度下,无干旱胁迫条件下的叶面积指数最大值是发生干旱胁迫时的叶面积指数的 11 倍,而当 CO<sub>2</sub> 浓度上升到 700 μmol/mol 时,无干旱胁迫条件下的生长期叶面积指数的最大值是发生干旱胁迫条件下生长期叶面积指数的最大值的 3.2 倍(图 4)。

### 3 结论与讨论

叶面积指数(LAI)控制着植被冠层的多种生物物理和生理过程,如光合、呼吸、蒸腾、碳循环、降水截获、能量交换等<sup>[22-23]</sup>,是表征干旱对农作物影响的重要指标之一。迄今为止,大量的农学实验如 FACE 实验和 OTC 实验等研究表明 CO<sub>2</sub> 浓度升高引起植物蒸腾速率降低,气孔阻力增大,水分利用效率显著增加<sup>[24-26]</sup>,高 CO<sub>2</sub> 浓度对于干旱胁迫所造成的氧化损伤具有一定的改善作用,因此,CO<sub>2</sub> 浓度升高可能对增强植物的抗干旱能力有利。而 CO<sub>2</sub> 浓度升高引起作物的光合作用速率发生变化,合成有机质能力提高。在目前大气浓度下,占 90% 以上的 C3 植物的光合作用因 CO<sub>2</sub> 浓度不足而不能达到最大值,对许多植物的提高 CO<sub>2</sub> 浓度可以显著的增高光合作用和叶面积指数<sup>[27]</sup>。但是由于 Pi(磷酸根离子)的再生能力是有限的,而不能无限制的增加。对比发生水分亏缺和不发生水分亏缺两种情况,发生水分亏缺时植物的叶面积指数明显减小,CO<sub>2</sub> 浓度倍增后,发生干旱胁迫较之不发生干旱胁迫情况下的叶面积指数增加更为显著。

另外也有学者研究表明 CO<sub>2</sub> 浓度升高和干旱胁迫共同作用可以使得空气和冠层温度升高,加速作物的发育,抵消 CO<sub>2</sub> 浓度升高的肥效效应<sup>[28-29]</sup>。但是 CO<sub>2</sub> 浓度升高对叶面积指数的具体影响证据还很少。

华北平原是中国小麦的主产区之一,华北平原冬小麦区温光资源优越,但生长期降水量一般<300mm,不能满足冬小麦正常 400—550mm 的需水量,生产上的主要矛盾仍然是缺水,而 50% 的耕地要依赖自然降雨。因此本文利用校准和验证过的 CERES-Wheat 作物生长模型模拟冬小麦在 3 种 CO<sub>2</sub> 浓度和供水充足和供水不足两种水分供应条件下的生长过程,分析了研究区特定自然气候、土壤等条件下,CO<sub>2</sub> 浓度升高后叶面积指数的变化规律,及冬小麦在湿润和水分亏缺两种水分供应情况下其叶面积指数的变化规律,探索叶面积指数在

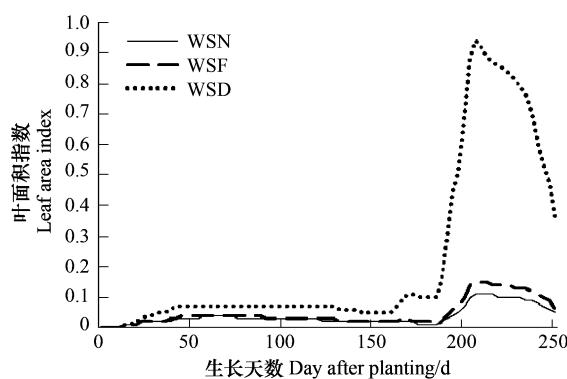


图 3 雨养条件下 3 种 CO<sub>2</sub> 浓度情况下叶面积指数对比

Fig. 3 Leaf Area Index under three kinds of CO<sub>2</sub> concentration with water stress

未来气候条件下,我们还要考虑温度变化带来的综合影响,以确定 CO<sub>2</sub> 浓度变化对作物生产的影响。

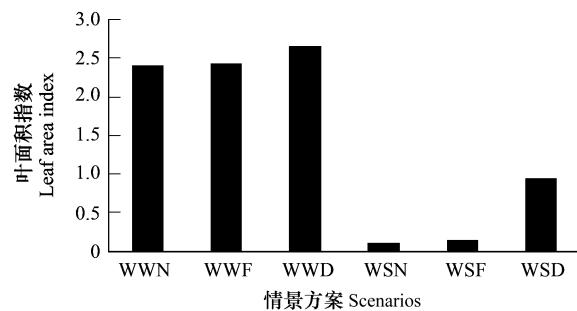


图 4 不同情景下的叶面积指数最高值对比

Fig. 4 Difference of maximum of LAI under six scenarios

$\text{CO}_2$  浓度改变条件下对干旱的响应。得出以下结论：

(1)由图2图3可以看出,在返青拔节前改变 $\text{CO}_2$ 浓度,叶面积指数改变很小,从生长季开始130d后, $\text{CO}_2$ 浓度改变对作物叶面积指数的影响开始显著。在当前环境 $\text{CO}_2$ 浓度条件下,发生水分亏缺时的叶面积指数要明显小于没有水分亏缺的叶面积指数,当 $\text{CO}_2$ 浓度增长20%时,发生水分亏缺和不发生水分亏缺的叶面积指数差距略有减小。从作物生长发育角度分析,出现这种现象的原因和作物的生长发育特性有关,返青拔节前,冬小麦地上生物量和叶面积指数较小, $\text{CO}_2$ 浓度和光合作用对作物生长的影响较小。冬小麦返青拔节后,对 $\text{CO}_2$ 浓度的变化开始敏感。而此时冬小麦对水分的敏感性也增强,建议在返青期来临之前增加水分供给。

(2)干旱引起作物生长发育受阻,叶面积指数减小,而本研究发现在研究区温度不变的情况下, $\text{CO}_2$ 浓度升高对作物的影响是显著的,不管是干旱还是湿润情况条件,叶面积指数都有增加,干旱情况下的增加更加明显(图2,图3),这表明 $\text{CO}_2$ 浓度的增加对干旱的不利影响具有缓解作用。

根据以上结论得出在返青期开始增加灌溉量将会大大的增加作物的产量。此外模型估算叶面积指数的方法也可以为数据同化提供参考。

未来气候变化趋势明显,联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)称未来气候变化将影响土壤水分和粮食生产,特别在半干旱区的影响尤为明显。 $\text{CO}_2$ 浓度升高将增加大气温度,并且改变降水格局。在后续的研究中将加入温度因素就 $\text{CO}_2$ 变化对作物生长的其它表征指标(比如地上地下生物量比、水分利用效率、农田水量平衡、产量等)进行研究和验证。

#### References:

- [1] Liu Z M, Zhang B, Yan M, Li T Q. Some Research Advances And trends on soil moisture and drought monitoring by remote sensing. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(4): 576-581.
- [2] Ding Y H. China Meteorological Disaster Ceremony (Comprehensive Volume). Beijing: Meteorological Press, 2008. 34-36.
- [3] Li K R, Yin S M, Sha W Y. Characters of time-space of recent drought in China. Geographical Research, 1996, 15(3): 6-15.
- [4] Cai Y L, Sensitivity and adaptation of Chinese agriculture under global climate change. Acta Geographic Sinica, 1996, 51(3): 202-212.
- [5] Shi Y F, Zhang X S. The impact of climate change on the surface water resources in arid area of Northwest China and future trend. Science in China, Ser. B, 1995, 25(9): 968-977.
- [6] XIAO G J, ZHANG Q, WANG J. Impact of global climate change on agro-ecosystem: A review. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(8): 1877-1885.
- [7] Zhang Q, Deng Z Y, Zhao Y D, Qiao J. The impacts of global climatic change on the agriculture in northwest China. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 1210-1218.
- [8] Liu D X, Dong A X, Lu D R. Climatic change of northwest China and its influence on agricultural production in recent 43 years. Agricultural Research in Arid Areas, 2005, 23 (2): 195-201.
- [9] Dai A G. Drought under global warming: a review. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2011, 2(1): 45-65.
- [10] Cure J D, Acock B. Crop response to carbon dioxide doubling: a literature survey. Agriculture and Forest Meteorology, 1986, 38(1/3): 127-145.
- [11] Ewert F, Rodriguez D, Jamieson P d, Semenov M A, Mitchell R A C, Goudriaan J, Portera J R, Kimball B A, Pinter Jr P J, Manderscheid R, Weigel H J, Fangmeier A, Fereres E, Villalobos F. Effects of elevated  $\text{CO}_2$  and drought on wheat: testing crop simulation models for different experimental and climatic conditions. Agriculture Ecosystems and Environment 2002, 93(1/3): 249-266.
- [12] Francesco N, Tubiello. Testing CERES-Wheat with Free-Air Carbon Dioxide Enrichment (FACE) Experiment Data:  $\text{CO}_2$  and Water Interactions. Agronomy Journal, 1999, 99(2): 247-55.
- [13] Hoogenboom G, White J W, Messina C D. From genome to crop: integration through simulation modeling. Field Crops Research, 2004, 90(1): 145-163.
- [14] Ritchie J T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. Water Resources Research, 1972, 8(5): 1204-1213.
- [15] Penning de Vries F, Teng P, Metselaar K. Systems Approaches for Agricultural Development. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1993. 77-93.
- [16] Jones J W, Hoogenboom G, porter C H, Boote K J, Batchelor W D, Hunt L A, Wilkens PW, Singh U, Gijsman A J, Ritchie J T. The DSSAT

- cropping system model. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3-4) : 235-265.
- [17] Attri S D, Rathore L S, Sivalumar M V K, Dash S K. Challenges and Opportunities in Agrometeorology. Berlin: Springer, 2011. 321-331.
- [18] Mitrica B, Mateescu E, Dragota C, Busuioc A, Grigorescu I. Geophysical Research Abstracts. Austria: EGU General Assembly 2012, 2012; 8155.
- [19] Timsina J, Humphreys E. Applications of CERES-Rice and CERES-Wheat in Research, Policy and Climate Change Studies in Asia; A Review. International Journal of Agricultural Research, 2010, vol5(8) : 586-610.
- [20] Panda R K, Beher S K, Kashyap P S. Effective management of irrigation water for wheat under stressed conditions. Agricultural water management, 2003, 63(1) : 37-56.
- [21] Satya P, Ryosuke S. National spatial crop yield simulation using GIS-based crop production model. Ecological Modelling, 2001, 136 (2-3) : 113-129.
- [22] Zou J, Yan G J. Optical methods for in situ measuring leaf area index of forest canopy: A review. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21 (11) : 2971-2979.
- [23] Wang X Q, Ma L Y, Jia Z K, Xu C Y. Research and application advances in leaf area index (LAI). Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(5) : 537-541.
- [24] Ren H X, Chen X, Wu D X. Effects of Elevated CO<sub>2</sub> on Photosynthesis and Antioxidative Ability of Broad Bean Plants Grown under Drought Condition. Acta Agronomica Sinica, 2001, 27(06) : 730-736.
- [25] Li G M, Shi Y, Chen X. Effects of elevated carbon dioxide and ozone on the growth and secondary metabolism of spring wheat. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6) : 1283-1288.
- [26] Wall G W, Brooks T J, Adam N R, Cousins A B, Kimball B A, Pinter Jr P J, LaMorte R L, Triggs J, Ottman M J, Leavitt S W, Matthias A D, Williams D. G, Webber A N. Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> improved Sorghum plant water status by ameliorating the adverse effects of drought. New Phytologist, 2001, 152(2) : 231-248.
- [27] Fang J Y. Global Ecology: Climate change and ecological response. Beijing: Higher Education Press, 2000. 25-28.
- [28] Pinter Jr P J, Kimball B A, Wall G W, LaMorte R L, Hunsaker DJ, Adamsen F J, Frumau K F A, Vugts H F, Hendrey G R, Lewin K F, Nagy J, Johnson H B, Wechsung F, Leavitt S W, Thompson T L, Matthias A D, Brooks T J. Free-air carbon dioxide enrichment (FACE): blower effects on wheat canopy microclimate and plant development. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 103(4) : 19-333.
- [29] Curtis P S. A meta-analysis of leaf gas exchange and nitrogen in trees grown under elevated carbon dioxide. Plant Cell and Environment, 1996, 19 (2) : 127-137.

#### 参考文献:

- [1] 刘志明, 张柏, 晏明, 李铁强. 土壤水分与干旱遥感研究的进展与趋势. 地球科学进展, 2003, 18(4) : 576-581.
- [2] 丁一汇, 中国气象灾害大典(综合卷). 北京: 气象出版社, 2008. 34-36.
- [3] 李克让, 尹恩明, 沙万英. 中国现代干旱灾害的时空特征. 地理研究, 1996, 15(3) : 6-15.
- [4] 蔡运龙. 全球气候变化下中国农业的脆弱性与适应对策. 地理学报, 1996, 51(3) : 202-212.
- [5] 施雅风, 张祥松. 气候变化对西北干旱区地表水资源的影响和未来趋势. 中国科学(B辑), 1995, 25(09) : 968-977.
- [6] 肖国举, 张强, 王静. 全球气候变化对农业生态系统的影响研究进展. 应用生态学报, 2007, 18(8) : 1877-1885.
- [7] 张强, 邓振墉, 赵映东, 乔娟. 全球气候变化对我国西北地区农业的影响. 生态学报, 2008, 28(3) : 1210-1218.
- [22] 邹杰, 阎广建. 森林冠层地面叶面积指数光学测量方法研究进展. 应用生态学报, 2010, 21(11) : 2971-2979.
- [23] 王希群, 马履一, 贾忠奎, 徐程扬. 叶面积指数的研究和应用进展. 生态学杂志, 2005, 24 (5) : 537-541.
- [24] 任红旭, 陈雄, 吴冬秀. CO<sub>2</sub> 浓度升高对干旱胁迫下蚕豆光合作用和抗氧化能力的影响. 作物学报, 2001, 27(06) : 730-736.
- [25] 李果梅, 史奕, 陈欣. 二氧化碳和臭氧浓度升高对春小麦生长及次生代谢的影响, 应用生态学报, 2008, 19(6) : 1283-1288.
- [27] 方精云. 全球生态学: 气候变化与生态响应. 北京: 高等教育出版社, 2000. 25-28.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 9 May, 2013 (Semimonthly)

## CONTENTS

### Frontiers and Comprehensive Review

- Analysis of subject trends in research on sustainable development ..... CHA Na, WU Jianguo, YU Runbing (2637)  
Metabolic scaling theory and its application in microbial ecology ..... HE Jizheng, CAO Peng, ZHENG Yuanming (2645)  
Research progress on endophyte-promoted plant nitrogen assimilation and metabolism ..... YANG Bo, CHEN Yan, LI Xia, et al (2656)

Review on the development of landscape architecture ecology in China ..... YU Yijing, MA Jinyi, YUAN Yunjue (2665)

### Autecology & Fundamentals

- Evaluating tillage practices impacts on soil organic carbon based on least limiting water range ..... CHEN Xuewen, WANG Nong, SHI Xiuhuan, et al (2676)  
Controls over soil organic carbon content in grasslands ..... TAO Zhen, CI Dan Langjie, ZHANG Shenghua, et al (2684)  
Antagonistic interactive effects of exogenous calcium ions and parasitic *Cuscuta australis* on the morphology and structure of *Alternanthera philoxeroides* stems ..... CHE Xiuxia, CHEN Huijing, YAN Qiaodi, et al (2695)  
Correlation between pigment content and reflectance spectrum of *Phyllostachys pubescens* stems during its rapid growth stage ..... LIU Lin, WANG Yukui, WANG Xingxing, et al (2703)  
Response of leaf functional traits and the relationships among them to altitude of *Salix dissa* in Balang Mountain ..... FENG Qiuhong, CHENG Ruimei, SHI Zuomin, et al (2712)  
Effects of phosphate and organic matter applications on arsenic uptake by and translocation in *Isatis indigotica* ..... GAO Ningda, GENG Liping, ZHAO Quanli, et al (2719)  
Effect of different preys on the predation and prey preference of *Orius similis* ..... ZHANG Changrong, ZHI Junrui, MO Lifeng (2728)  
Effects of predation risk on the patterns of functional responses in reed vole foraging ..... TAO Shuanglun, YANG Xifu, YAO Xiaoyan, et al (2734)  
Phylogenetic analysis of Veneridae (Mollusca: Bivalvia) based on the mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I gene fragment ..... CHENG Hanliang, PENG Yongxing, DONG Zhiguo, et al (2744)  
Effects of different ecological environments in the laboratory on the covering behavior of the sea urchin *Glyptocidaris crenularis* ..... CHANG Yaqing, LI Yunxia, LUO Shabin, et al (2754)

### Population, Community and Ecosystem

- The ecosystem services value change in the upper reaches of Ganjiang River Based on RS and GIS ..... CHEN Meiqiu, ZHAO Baoping, LUO Zhijun, et al (2761)  
The reference condition for Eutrophication Indicator in the Yangtze River Estuary and adjacent waters — response variables ..... ZHENG Binghui, ZHU Yanzhong, LIU Lusan, et al (2768)  
The reference condition for eutrophication Indicator in the Yangtze River Estuary and adjacent waters — Causal Variables ..... ZHENG Binghui, ZHOU Juan, LIU Lusan, et al (2780)  
The stress response of biological communities in China's Yalu River Estuary and neighboring waters ..... SONG Lun, WANG Nianbin, YANG Guojun, et al (2790)  
Ecological characteristics of macrobenthic communities and its relationships with environmental factors in Hangzhou Xixi Wetland ..... LU Qiang, CHEN Huili, SHAO Xiaoyang, et al (2803)  
Effects of biological soil crusts on desert soil nematode communities ..... LIU Yanmei, LI Xinrong, ZHAO Xin, et al (2816)  
Associations between weather factors and the spring migration of the horned gall aphid, *Schlechtendalia chinensis* ..... LI Yang, YANG Zixiang, CHEN Xiaoming, et al (2825)  
Effects of vegetation on soil aggregate stability and organic carbon sequestration in the Ningxia Loess Hilly Region of northwest China ..... CHENG Man, ZHU Qulian, LIU Lei, et al (2835)

---

Simulation of the carbon cycle of <i>Larix chinensis</i> forest during 1958 and 2008 at Taibai Mountain, China .....	LI Liang, HE Xiaojun, HU Lile, et al (2845)
Effects of different disturbances on diversity and biomass of communities in the typical steppe of loess region .....	CHEN Furong, CHENG Jimin, LIU Wei, et al (2856)
Age structure and point pattern of <i>Butula platyphylla</i> in Wulashan Natural Reserve of Inner Mongolia .....	HU Ercha, WANG Xiaojiang, ZHANG Wenjun, et al (2867)
The impacts of the Southwest China drought on the litterfall and leaf area index of an evergreen broadleaf forest on Ailao Mountain .....	QI Jinhua, ZHANG Yongjiang, ZHANG Yiping, et al (2877)
Spatial distribution of tree species richness in Xiaodonggou forest region of the Altai Mountains, Northwest China .....	JING Xuehui, CAO Lei, ZANG Runguo (2886)
<b>Landscape, Regional and Global Ecology</b>	
The ecological risk assessment of Taihu Lake watershed .....	XU Yan, GAO Junfeng, GUO Jianke (2896)
The value of fixing carbon and releasing oxygen in the Guanzhong-Tianshui economic region using GIS .....	ZHOU Zixiang, LI Jing, FENG Xueming (2907)
<b>Resource and Industrial Ecology</b>	
Effect of different controlled-release nitrogen fertilizers on availability of heavy metals in contaminated red soils under waterlogged conditions .....	LIANG Peijun, XU Chao, WU Qitang, et al (2919)
<b>Research Notes</b>	
Effect of heat and high irradiation stress on Deg1 protease and D1 protein in wheat chloroplasts and the regulating role of salicylic acid .....	ZHENG Jingjing, ZHAO Huijie, HU Weiwei, et al (2930)
The difference of drought impacts on winter wheat leaf area index under different CO <sub>2</sub> concentration .....	LI Xiaohan, WU Jianjun, LÜ Aifeng, et al (2936)

# 《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于1981年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科研工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科研人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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

本期责任编辑 欧阳志云

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33卷 第9期 (2013年5月)

## ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 9 (May, 2013)

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 王如松  
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:100717

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

订 购 国外发行  
E-mail:journal@cspg.net  
全国各地邮局  
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 许 可 证  
京海工商广字第8013号

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 WANG Rusong  
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

