

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

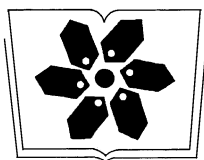
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第8期 Vol.33 No.8 **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

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 8 期 2013 年 4 月 (半月刊)

目次

城市生态系统研究专题

- 城市生态系统:演变、服务与评价——“城市生态系统研究”专题序言 王效科 (2321)
- 城市生态景观建设的指导原则和评价指标 孙然好,陈爱莲,李 芬,等 (2322)
- 城市绿色空间格局的量化方法研究进展 陶 宇,李 锋,王如松,等 (2330)
- 城市土地利用变化对生态系统服务的影响——以淮北市为例 赵 丹,李 锋,王如松 (2343)
- 基于市政综合监管信息的城市生态系统复杂性分析 董仁才,苟亚青,刘 昕 (2350)
- 原位生物技术对城市重污染河道底泥的治理效果 柳 敏,王如松,蒋 莹,等 (2358)
- 北京城区道路沉积物污染特性 任玉芬,王效科,欧阳志云,等 (2365)
- 绿地格局对城市地表热环境的调节功能 陈爱莲,孙然好,陈利顶 (2372)
- 北京城区气传花粉季节分布特征 孟 龄,王效科,欧阳志云,等 (2381)

个体与基础生态

- 三江源区高寒草甸退化对土壤水源涵养功能的影响 徐 翠,张林波,杜加强,等 (2388)
- 土壤砷植物暴露途径的土壤因子模拟 线 郁,王美娥,陈卫平 (2400)
- 不同寄主植物对马铃薯甲虫的引诱作用 李 超,程登发,郭文超,等 (2410)
- 蒙古栎、白桦根系分解及养分动态 靳贝贝,国庆喜 (2416)
- 干旱和坡向互作对栓皮栎和侧柏生长的影响 王 林,冯锦霞,王双霞,等 (2425)
- 不同郁闭度下胸高直径对杉木冠幅特征因子的影响 符利勇,孙 华,张会儒,等 (2434)
- 驯化温度与急性变温对南方鲢幼鱼皮肤呼吸代谢的影响 鲜雪梅,曹振东,付世建 (2444)

种群、群落和生态系统

- 五鹿山国家级自然保护区物种多样性海拔格局 何艳华,闫 明,张钦弟,等 (2452)
- 玉龙雪山白水 1 号冰川退缩迹地的植被演替 常 丽,何元庆,杨太保,等 (2463)
- 五花米草海向入侵对土壤有机碳组分、来源和分布的影响 王 刚,杨文斌,王国祥,等 (2474)
- 南亚热带人工针叶纯林近自然改造早期对群落特征和土壤性质的影响 何友均,梁星云,覃 林,等 (2484)
- 入侵植物黄顶菊生长、再生能力对模拟天敌危害的响应 王楠楠,皇甫超河,李玉浸,等 (2496)
- 小兴安岭白桦次生林叶面积指数的估测 刘志理,金光泽 (2505)
- 草地植物群落最优分类数的确定——以黄河三角洲为例 袁 秀,马克明,王 德 (2514)
- 多毛类底栖动物在莱州湾生态环境评价中的应用 张 莹,李少文,吕振波,等 (2522)
- 马尾松人工林火烧迹地不同恢复阶段中小型土壤节肢动物多样性 杨大星,杨茂发,徐 进,等 (2531)

景观、区域和全球生态

- 极端干旱区大气边界层厚度时间演变及其与地表能量平衡的关系 张 杰,张 强,唐从国 (2545)

基于多源遥感数据的景观格局及预测研究..... 赵永华,贾 夏,刘建朝,等 (2556)

城市化流域生态系统服务价值时空分异特征及其对土地利用程度的响应.....

..... 胡和兵,刘红玉,郝敬锋,等 (2565)

资源与产业生态

碳汇目标下农户森林经营最优决策及碳汇供给能力——基于浙江和江西两省调查.....

..... 朱 臻,沈月琴,吴伟光,等 (2577)

基于 GIS 的缓坡烟田土壤养分空间变异研究..... 刘国顺,常 栋,叶协锋,等 (2586)

春玉米最大叶面积指数的确定方法及其应用..... 麻雪艳,周广胜 (2596)

城乡与社会生态

广州市常见行道树种叶片表面形态与滞尘能力 刘 璐,管东生,陈永勤 (2604)

研究简报

桔梗种子萌发对低温、干旱及互作胁迫的响应..... 刘自刚,沈 冰,张 雁 (2615)

基质养分对寄生植物南方菟丝子生长的影响 张 静,李钧敏,闫 明 (2623)

学术信息与动态

人类活动对森林林冠的影响——第六届国际林冠学大会述评..... 宋 亮,刘文耀 (2632)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 34 * 2013-04



封面图说: 互花米草近景——互花米草是多年生高大禾本科植物,植株健壮而挺拔,平均株高约 1.5m,最高可达 3.5m,茎秆直径可达 1cm 以上。原产于大西洋沿岸,是一种适应海滩潮间带生长的耐盐、耐淹植物。我国于 1979 年开始引入,原意主要是用于保滩护堤、促淤造陆和改良土壤等。但是,近年来,互花米草迅速扩散,在一些区域里,已经完全郁闭,形成了单优种群,严重排挤了本土物种的生长,并且还在以指数增长的速度逐年增加,对海岸湿地土著物种和迁徙鸟类造成的危害日益严重,已经列为必须严格控制的有害外来入侵物种。

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/stxb201206040808

麻雪艳, 周广胜. 春玉米最大叶面积指数的确定方法及其应用. 生态学报, 2013, 33(8): 2596-2603.

Ma X Y, Zhou G S. Method of determining the maximum leaf area index of spring maize and its application. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(8): 2596-2603.

春玉米最大叶面积指数的确定方法及其应用

麻雪艳¹, 周广胜^{1,2,*}

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093)

摘要: 玉米叶面积指数达到最大时光合产物基本停止向营养器官分配, 是玉米进入生殖生长阶段的标志。对锦州农田生态系统野外观测站 2005—2011 年多品种的春玉米大田试验资料分析发现春玉米最大叶面积指数出现于吐丝后 2 周左右, 提出了春玉米叶面积指数达到最大时的积温指标, 即播种至叶面积指数最大时的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温为 $1085.3^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 和 (或) 出苗至叶面积指数最大时的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温为 $1010.4^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 。在此基础上, 采用修正的 Logistic 方程构建了春玉米相对叶面积指数动态普适模型。研究结果为准确模拟春玉米叶片生长及光合产物分配提供了依据。

关键词: 春玉米; 最大叶面积指数; 叶面积指数动态; $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温

Method of determining the maximum leaf area index of spring maize and its application

MA Xueyan¹, ZHOU Guangsheng^{1,2,*}

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

2 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

Abstract: Maize photosynthate basically stops its allocation to nutrition organs when the leaf area index reaches its maximum, which is a sign of maize entering the reproductive stage. Based on the field experiment data of spring maize with different maize varieties from Jinzhou Agricultural Ecosystem Research Station during 2005—2011, this paper found that spring maize maximum leaf area index appeared around 2 weeks after the silking stage, and put forward an indicator for determining the maximum leaf area index of spring maize, that is, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ effective accumulated temperature from the seeding to the maximum leaf area index is $1085.3^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ and (or) $1010.4^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ from the emergence to the maximum leaf area index. Thus, a universal dynamic model of spring maize relative leaf area index was developed on the basis of modified logistic equation. The results would provide reference for accurate simulation of leaf growth and photosynthate allocation of spring maize.

Key Words: spring maize; maximum leaf area index; leaf area index dynamics; $\geq 10^{\circ}\text{C}$ effective accumulated temperature

我国是仅次于美国的第二大玉米生产国, 玉米产量占世界玉米总产的 20% 左右。近年来, 我国玉米生产发展势头良好, 玉米增产对粮食产量增加的贡献率达 49.4%^[1], 已成为我国粮食增产的主力军, 在保障国家粮食安全和满足市场需求方面发挥着举足轻重的作用。《国家粮食安全中长期发展规划》制定的 2009—2020 年新增 1000 亿斤粮食目标中, 玉米要承担 53% 的增产份额, 并且到 2020 年要达到保持基本自给的目标^[2]。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2010CB951303); 公益性行业 (农业) 科研专项经费 (200903003); 中国气象局地面观测经费

收稿日期: 2012-05-04; **修订日期:** 2012-10-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gszhou@cams.cma.gov.cn

但是,目前我国玉米总产的提高主要依靠种植面积的增加,单产增幅不明显且波动较大^[1]。不断加强玉米生产是实现我国粮食生产安全稳定的重要保证,而提高玉米单产是加强玉米生产的主要方向。干物质积累是作物产量形成的物质基础^[3],较高的干物质积累是实现作物高产的必要保证^[4]。因此,明确玉米的干物质积累与分配规律对进一步提高玉米产量^[5],保障我国玉米稳产高产具有重要的现实意义。

玉米干物质积累进程大致分为苗期、穗期和粒期 3 个阶段^[6]。在不同阶段玉米干物质积累有不同的中心,相应的光合产物分配模式也不同。苗期是以根系和叶片为中心的营养生长阶段;穗期是以叶片和茎秆为中心,雄、雌穗强烈分化的营养生长与生殖生长并进阶段;粒期营养器官基本停止生长,是以果穗为中心的生殖生长阶段^[6]。玉米进入拔节期,穗分化逐步开始,是由营养生长阶段转入营养生长与生殖生长并进阶段的转折点,而对玉米何时进入生殖生长阶段结论不唯一,如抽雄期^[7]、吐丝期^[8]等,制约着玉米生长与光合产物分配的准确模拟。叶片是玉米进行光合作用的主要器官,玉米干物质积累绝大部分来自叶片^[9],叶片与各器官有很强相关生长规律^[10],可以间接反映其他器官的生长进程。据佟屏亚等^[11]对 6 个玉米品种的观测发现,“在植株开始抽穗时,至少有两片叶未展现,雌穗花丝尚未吐出;而雄花刚刚散粉,雌穗刚刚吐丝时,最后一片仍未展现;当最后一叶片展现时,才真正是雄花散粉盛期和雌花受精期,可视为玉米进入生殖生长阶段的标志。”而叶面积指数(LAI)是反映作物群落叶面积变化的重要指标,已成为光合、蒸腾及生物量形成等研究的重要参数^[12]。因此,可以利用叶面积指数达到最大作为判断玉米进入生殖生长阶段的依据。

本研究试图利用锦州农田生态系统野外观测站 2005—2011 年的多品种春玉米野外观测资料,分析研究春玉米叶面积指数变化规律,确定春玉米最大叶面积指数出现的时间及其气候特征,提出判定春玉米叶面积指数达到最大的指标,以为春玉米生长及产量的准确模拟提供参数。

1 研究地点与研究方法

1.1 研究区概况

研究地点位于锦州农田生态系统野外观测站(41°9'N, 121°12'E, 海拔 17.0m)。该区属暖温带季风性气候,多年平均气温 9.1℃,年均降水量 568.8mm,年无霜期约 180d,全年≥10℃活动积温约 3700℃·d。土壤为典型棕壤,pH 值约为 6.3,有机质 6.41—9.43 g/kg,全氮 0.69g/kg^[13],主要作物为春玉米。

1.2 气象数据

研究采用的气象数据来自于锦州农田生态系统野外观测站的小气候观测系统,包括日均气温、降水和平均相对湿度等。

1.3 叶面积指数

2005—2011 年玉米生育期内,在锦州农田生态系统野外观测站玉米样地随机选取 3 个取样点,每个取样点选取 3 个 1m×1m 样方测定玉米密度,同时选取 1—2 株玉米标准株,利用直尺量取每一株标准株玉米全部叶片的长和宽,利用式(1)计算玉米叶面积指数(LAI):

$$LAI = 0.75\rho \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n L_{ij} \times W_{ij}}{m} \quad (1)$$

式中,0.75 是玉米叶面积的校正系数, ρ 为玉米植株密度,m 为测量株数, L_{ij} 和 W_{ij} 分别为第 i 株玉米的第 j 片叶片的长度和最大宽度。

1.4 叶面积指数动态模拟

采用修正的 Logistic 方程进行春玉米叶面积指数动态模拟^[14]:

$$y = \frac{a}{1 + \exp(b + c \times t + d \times t^2)} \quad (2)$$

式中, y 为叶面积指数, t 为出苗后天数, a , b , c , d 均为参数。

1.5 数据处理与分析

利用软件 SPSS17.0 进行春玉米叶面积指数动态变化的模拟。采用软件 MATLAB7.11.0 对叶面积指数

动态变化方程求导,得到历年叶面积指数达到最大的时间。

1.6 效果检验

1.6.1 离散程度

利用标准差 σ 和变异系数 (CV) 反映数据的离散程度。标准差和变异系数越大,说明数据的离散程度越大;反之,则越小。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{2(n-1)}} \quad (3)$$

$$CV = \frac{\sigma}{|\mu|} \quad (4)$$

式中, μ 为均值。

1.6.2 模拟效果

利用决定系数 (R^2) 和均方根误差 (RMSE) 反映拟合方程的模拟效果。决定系数 (R^2) 越大说明拟合方程对实测值解释率越高,模拟效果越好;均方根误差 (RMSE) 越小,模拟值与实测值越接近,模拟效果越好。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (6)$$

式中, x_i 为实测值; y_i 为模拟值; n 为样本数; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为实测值与模拟值的平均值。

2 结果分析

2.1 春玉米最大叶面积指数出现时期的确定

表 1 给出了 2005—2011 年不同品种春玉米叶面积指数变化的 Logistic 回归方程参数及通过求导得到的叶面积指数达到最大的时间。

表 1 春玉米叶面积指数变化的 Logistic 方程参数及最大 LAI 的出现时间

Table 1 Parameters of logistic equations for spring maize LAI and the appearance time of LAI_{max}

年份 Year	方程参数 Equation parameters				LAI _{max} 出现时间 Appearance time of LAI _{max}	LAI _{max} 出现日期 Appearance date of LAI _{max}	LAI _{max} 值 Value of LAI _{max}	R^2
	a	b	c	d				
2005	6.388	6.525	-0.160	0.00083	96	08-17	4.89	0.9953 **
2006	3.680	10.900	-0.456	0.00290	79	08-10	3.68	0.9918 **
2007	5.127	6.257	-0.169	0.00093	91	08-08	4.13	0.9858 **
2008	4.907	7.460	-0.188	0.00103	91	08-11	3.70	0.9914 **
2009	5.704	12.811	-0.411	0.00283	73	07-21	5.07	0.9217 **
2010	5.878	7.648	-0.228	0.00138	83	08-07	5.02	0.9954 **
2011	15.727	6.185	-0.138	0.00086	80	08-02	5.40	0.9889 **

** 表示在 0.01 水平上显著相关

比较 2005—2011 年各品种春玉米的主要生育期与当年玉米叶面积指数最大值出现的日期可知(表 2), 叶面积指数最大值均出现于玉米吐丝后 2 周左右,与戴明宏等^[5]的研究结果较为一致。

2.3 最大叶面积指数的判定指标

由于大田试验很难做到连续性观测,且很难恰好在叶面积指数达到最大时进行观测。为此,需要找到判定叶面积指数达到最大的指标。

通过分析春玉米播种及出苗至叶面积指数最大阶段主要气象要素的累积特征发现(表 3),每年春玉米播

种至叶面积指数达到最大时的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温和出苗至叶面积指数达到最大时的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温基本恒定。2005—2011 年播种至叶面积指数最大($\text{LAI}_{\max}$)时的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温平均值为 $1085.3^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$, 出苗至 $\text{LAI}_{\max}$ 时的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温平均值为 $1010.4^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$, 二者的标准差分别为 47.51 和 66.77, 变异系数分别为 4.38% 和 6.61%, 各年的距平百分率也基本稳定在 10% 以内(图 1), 且较利用拟合方程求导所得的叶面积指数达到最大时间平均仅晚 0.7d 和 0.6d。因此, 可将播种至 $\text{LAI}_{\max}$ 时的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温为 $1085.3^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 和(或)出苗至 $\text{LAI}_{\max}$ 时的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温为 $1010.4^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 作为判定锦州春玉米叶面积指数达到最大的指标。

表 2 供试春玉米品种及主要生育期

Table 2 Varieties and their main growing periods of spring maize

年份 Year	品种 Varieties	播种 Seeding	出苗 Emergence	抽雄 Tasseling	开花 flowering	吐丝 Silking	乳熟 Milk mature	成熟 Mature
2005	运科 1 号	05-01	05-14	07-18	07-23	07-26	08-23	09-26
2006	润科 206	05-07	05-24	07-23	07-27	08-01	08-29	10-04
2007	华丹 4 号	05-03	05-10	07-16	07-20	07-23	08-15	09-24
2008	新科 10 号	04-27	05-13	07-21	07-25	07-25	08-17	09-25
2009	中科 10 号	04-27	05-10	07-16	07-18	07-20	08-14	09-22
2010	象玉 268	05-02	05-17	07-19	07-21	07-25	08-18	09-28
2011	丹玉 42	05-03	05-15	07-19	07-21	07-22	08-18	09-26

表 3 历年春玉米播种/出苗至 $\text{LAI}_{\max}$ 时主要气象要素的累积特征Table 3 Accumulated characteristics of primary meteorological elements each year from spring maize seeding/emergence to $\text{LAI}_{\max}$

气象要素 Meteorological elements		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	均值 Average	标准差 σ	变异系数 CV/%
播种至最大 LAI Seeding to $\text{LAI}_{\max}$	相对湿度	8156	6672	6512	7874	4910	6978	6081	6740	1094.38	5.63
	降水量	422.1	117.6	211.8	258.5	188	106.6	261.1	223.7	106.73	47.72
	平均温度	2259.9	2044.7	2094.6	2146.3	1895.6	2011.3	2004.0	2065.2	116.32	16.24
	$\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温	1170.2	1084.7	1114.6	1076.3	1035.6	1031.3	1084.0	1085.3	47.51	4.38
	$\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温	2240.3	2044.7	2094.6	2146.3	1895.6	2011.3	2004.0	2062.4	110.95	5.38
出苗至最大 LAI Emergence to $\text{LAI}_{\max}$	相对湿度	7425	5811	6340	6947	4262	5979	5550	6044.8	1023.67	16.93
	降水量	406.1	113.9	211.8	247.6	165.8	94.75	241.4	211.6	104.33	49.30
	平均温度	2093.5	1760.3	1960.7	1920.9	1654.0	1811.7	1802.1	1857.6	145.15	7.81
	$\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温	2004	970.3	1050.7	1010.9	924.0	981.7	1002.1	1010.4	66.77	6.61
	$\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温	2093.5	1760.3	1960.7	1920.9	1654.0	1811.7	1802.1	1857.6	145.15	7.81

2.3 相对叶面积指数动态模拟

由于玉米品种、播种期和耕作措施不同,不同年份的叶面积指数差异较大^[15],为了更好地了解叶面积指数的变化规律,采用相对叶面积指数来描述叶面积指数动态^[16-17]:

$$\text{RLAI}_i = \frac{\text{LAI}_i}{\text{LAI}_{\max}} \quad (7)$$

式中, RLAI_i 为出苗后第 i 天的相对叶面积指数, LAI_i 为出苗后第 i 天的叶面积指数, $\text{LAI}_{\max}$ 为通过式(2)模拟得到的当年玉米最大叶面积指数。

生态因子较时间能更好地衡量玉米生育进程^[18],而玉米完成某一生育阶段所需的热量通常是一定的, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温能够很好地表征玉米生长各阶段发育所需的热量^[18-19],且与玉米的生育期有很好的相关关系^[20]。因此,采用 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温表示春玉米的生育期。

以叶面积指数达到最大为转折点将春玉米出苗至成熟的整个生育期划分为两个阶段,分别将各阶段内 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的有效积温进行归一化处理,得到标准化的生育期:

$$DS_j = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^j \Delta T_i}{\sum_{i=1}^{J_{\max}} \Delta T_i} & j \leq J_{\max} \\ 1 + \frac{\sum_{i=J_{\max}+1}^j \Delta T_i}{\sum_{i=J_{\max}+1}^{J_{\text{end}}} \Delta T_i} & j > J_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中, DS_j 为出苗后第 j 天的标准化生育期, 第一阶段的 DS_j 范围为 0—1, 第二阶段的 DS_j 范围为 1—2; $J_{\max}$ 为叶面积指数达到最大时的天数; J_{end} 为成熟期天数; ΔT_i 为 $\geq 10^\circ\text{C}$ 有效温度, 计算公式如下^[21]:

$$\Delta T_i = \begin{cases} T_i - 10 & T_i \geq 10 \\ 0 & T_i < 10 \end{cases} \quad (9)$$

式中, T_i 为日均气温。由于锦州地区日均温度极少高于 30°C , 所以上式没有考虑对无效高温的订正。

将 2005—2011 年归一化后的数据采用式(2)进行拟合, 得到的拟合方程如下:

$$RLAI = \frac{0.999}{1 + \exp(5.216 - 13.831 \times DS + 5.648 \times DS^2)} \quad (10)$$

由图 2 可见, 归一化后各年实测值的离散程度大大降低, 可以采用统一方程描述, 且模拟效果非常好, 均方根误差 (RMSE) 为 9.74%, 可以解释春玉米叶面积指数变化的 93.6%。春玉米叶面积指数的变化呈现四个阶段: 缓慢增长期、快速增长期、稳定增长期和缓慢下降期, 与已有研究结果基本一致^[22], 说明利用修正的 Logistic 方程构建的基于标准化生育期的春玉米相对叶面积指数动态模型能够准确反映春玉米叶面积指数的变化特征。

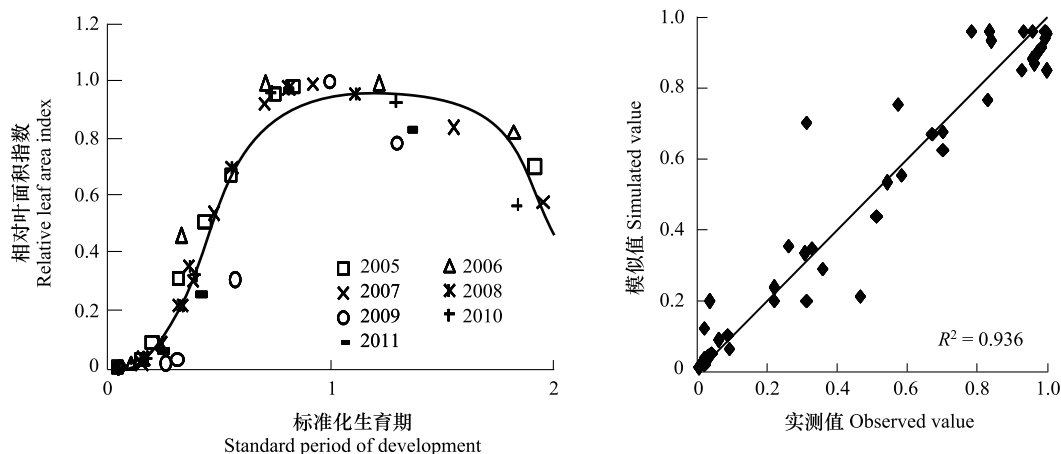


图 2 2005—2011 年春玉米相对叶面积指数动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of relative leaf area index of spring maize during 2005—2011

2.4 最大叶面积指数判定指标的应用

利用春玉米最大叶面积指数的判定指标及相对叶面积指数动态模拟方法, 可以得到春玉米的叶面积指数动态普适模型。以 2005—2011 年播种至 $\geq 10^\circ\text{C}$ 有效积温最接近 $1085.3^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 的日期作为最大叶面积指数出现日, 采用式(9)和(10)进行生育期标准化, 利用式(2)进行拟合, 结果见图 3(a)。基于相同的方法可以得到

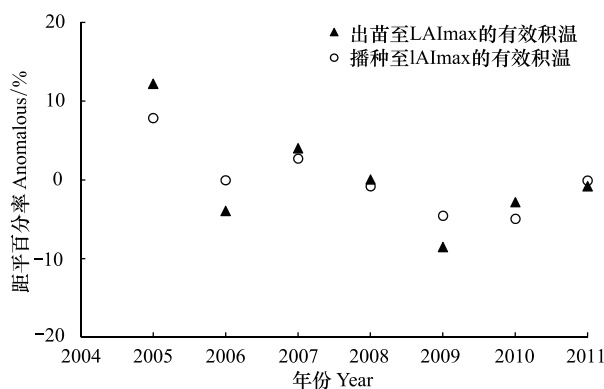


图 1 历年春玉米播种/出苗至 $LAI_{\max}$ 时的 $\geq 10^\circ\text{C}$ 有效积温距平百分率

Fig. 1 Anomalous percentage of $\geq 10^\circ\text{C}$ effective accumulated temperature each year from spring maize seeding/emergence to $LAI_{\max}$

利用出苗至 LAI_{max} 时的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温为 $1010.4^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 判定春玉米最大叶面积指数出现日期的拟合结果,见图 3(b)。可以看出,利用两种指标得到的春玉米叶面积指数动态拟合效果均非常好,均方根误差(RMSE)分别为 9.30% 和 9.03%,且可以解释春玉米叶面积指数实际变化的 94% 以上。在实际应用中,只需测定 1 次以上的叶面积指数,就可以采用相应的普适模型反推得到逐日的叶面积指数动态。

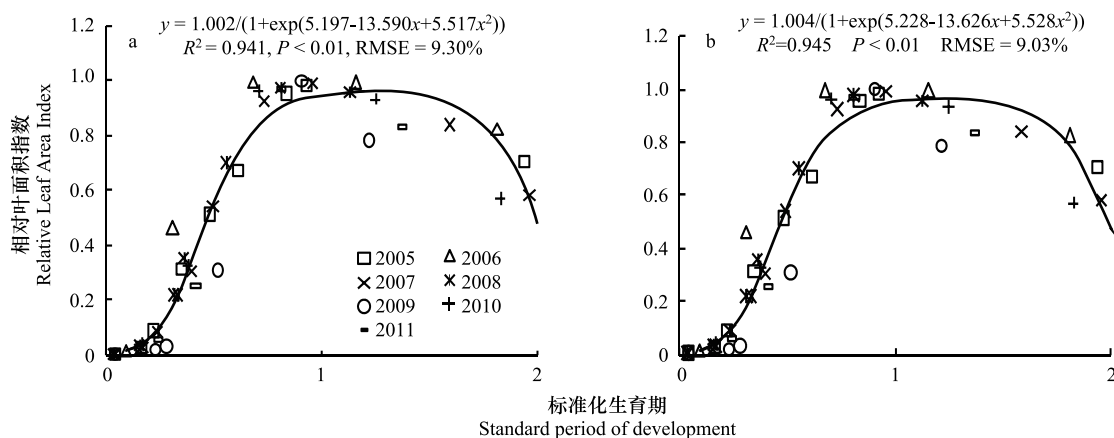


图3 基于有效积温指标的春玉米相对叶面积指数动态模拟结果

Fig.3 Simulation results of relative leaf area index dynamic of spring maize based on the effective temperature indicators

3 结论

叶面积指数达到最大是玉米进入生殖生长的标志,也是玉米光合产物分配模式的转折点,具有重要的生理意义。本研究利用锦州农田生态系统野外观测站 2005—2011 年的春玉米大田试验数据进行了春玉米叶面积指数动态模拟,得出主要结论如下:

(1) $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温可以作为春玉米发育期的判定指标。

(2) 播种至 LAI_{max} 时的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温为 $1085.3^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 和(或)出苗至 LAI_{max} 时的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温为 $1010.4^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 可以作为判定锦州春玉米叶面积指数达到最大的指标。

(3) 基于春玉米最大叶面积指数判定指标可以确定春玉米最大叶面积指数的出现时间,进而利用春玉米叶面积指数动态普适模型得到叶面积指数动态,为准确模拟叶片生长及光合产物分配提供了依据。

4 讨论

玉米光合产物分配在不同生育阶段具有不同的重心,相应的分配模式也会发生改变。目前,关于玉米何时进入生殖生长阶段,尚未有统一结论,制约着玉米生长与光合产物分配的准确模拟。佟屏亚等^[11]观测发现,当玉米最后一叶片全展时,才是玉米雌花受精期,可视为玉米由营养生长转入生殖生长的转折期标志。而叶面积指数(LAI)是反映作物群落叶面积变化的重要指标,据此,本研究提出 LAI 达到最大是玉米进入生殖生长阶段的标志,避免了利用具体生育期判断玉米进入生殖生长阶段所导致的误差。

本研究以春玉米为例,利用锦州农田生态系统野外观测站的长期野外观测资料,探讨了利用 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温指示玉米叶面积指数达到最大,进而判定玉米进入生殖生长阶段的方法。研究提出了判定春玉米叶面积指数达到最大的有效指标,所得结论与张旭东等^[16]对黄土区夏玉米的研究结果较为一致(出苗至叶面积指数最大的 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温为 $1046^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)。结合有效积温指标,本研究采用修正的 Logistic 方程构建了春玉米相对叶面积指数动态普适模型,避免了因玉米品种、播种期、播种密度及耕作措施不同导致的叶面积指数的差异,从而能更准确地反映春玉米叶面积指数在生育期内的变化规律。结合春玉米最大叶面积指数判定指标和春玉米叶面积指数动态普适模型可以确定春玉米最大叶面积指数出现日期及叶面积指数动态,为准确模拟春玉米的叶片生长及光合产物分配提供了依据。

由于春玉米长期的叶面积指数野外观测资料较少,本研究的结论仅在锦州一个点上进行了验证,但研究

涉及的时间长且包括了多个春玉米品种,具有一定的普遍意义。同时,本研究主要强调方法的探讨,希望今后能有更多的研究对该方法的普适性进行验证。

致谢:感谢中国科学院植物研究所全球变化与陆地生态系统研究组及中国气象局沈阳大气环境研究所锦州农田生态系统野外观测站提供相关资料。

References:

- [1] Hu Y K. Production status and development goals of Chinese maize. China animal husbandry Communications, 2010, (12):28-29.
- [2] Zhao J R. Analysis on main factors of sustainable increase of U. S. maize yield and Chinese maize production situation and measures to increase production// Symposium of Crop Cultivation Development seminar 2010. 2010, (12):28-29.
- [3] Li X L, Zhao M, Li C F, Ge J Z, Hou H P, Li Q, Hou L B. Effect of sowing-date and planting density on dry matter accumulation dynamic and establishment of its simulated model in maize. Ata Agronomica Sinica, 2010, 36(12): 2143-2153.
- [4] Chen G P. A review on dry matter accumulation and partition of maize. Journal of Maize Sciences, 1994, 2(1): 48-53.
- [5] Dai M H, Tao H B, Wang L N, Wang P. Effects of different nitrogen managements on dry matter accumulation, partition and transportation of spring maize(*Zea mays* L.). Acta Agriultuae Boreali-sinica, 2008, 23(1): 154-157.
- [6] Wang P. Crop Introduction. Beijing: China Agricultural University Press, 2003: 228-229.
- [7] Huang Y, Wang Y, Zhang W, Yu Y Q, Wang P. Simulating Net Primary Production of Agricultural Vegetation in China(1):Model Establishment and Sensitivity Analysis. Journal of Natural Resources, 2006, 21(5): 790-801.
- [8] Lin Z H, Xiang Y Q, Mo X G, Li J, Wang L. Normalized leaf area index model for summer maize. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(4): 74-77.
- [9] Huang H S, Shen L, Sun G, Cao Y, Bao Y, Liang X H, Wu C S, Sun F N. Study on leaf area and dry matter accumulation and distribution in super high-yield maize. Journal of Anhui Agri. Sci., 2007, 35(8):2227-2228, 2230.
- [10] Liedgens M, Richner W. Relation between maize (*Zea mays* L.) leaf area and root density observed with minirhizotrons. European Journal of Agronomy, 2001, (15) 131-141.
- [11] Tong P Y, Chen Y N. Maize Growth and Yield Model. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1997: 117-120.
- [12] 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.
- [13] Han G X, Zhou G S, Xu Z Z, Y Y, Liu J L, Shi K Q. Soil temperature and biotic factors drive the seasonal variation of soil respiration in a maize (*Zea mays* L.) agricultural ecosystem. Plant Soil, 2007, 291:15-26.
- [14] Wang X L. How to use the logistic equation reasonably in the stimulation of dry matter accumulation of crops. Chinese Journal of Agrometeorology, 1986(1):14-19.
- [15] Pocock M J O, Darren M Evans, Jane Memmott. The impact of farm management on species-specific leaf area index (LAI): Farm-scale data and predictive models. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2010, 135:279-287.
- [16] Zhang X D, Cai H J, Fu Y J, Wang J. Study on leaf area index of summer maize in loess areas. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(2): 25-29.
- [17] Ping X Y, Zhou G S, Sun J S, Xu Z Z. Dynamic simulation of photosynthate allocation in maize organs based on functional equilibrium hypothesis. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010,21(1): 129-135.
- [18] Yin X Y, Martin J K, McLaren G, Visperas R M. A nonlinear model for crop development as a function of temperature. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 77:1-16.
- [19] Yan M H, Liu X T, Zhang W, Li X J, Liu S. Spatio-temporal changes of $\geq 10^{\circ}\text{C}$ accumulated temperature in northeastern China since 1961. Chinese Geographical Science, 2011, 21(1): 17-26.
- [20] Yang Y Q, Ban X X, Chen P S, Dong X P. Study on dynamic simulation of dry matter of maize and its service application. LIAONING QIXIANG, 2000, 17(2): 18-22.
- [21] Zhang Y S, Yu Z R, Driessen P M. Growing degree-days requirement for plant and leaf development of maize (*Zea mays* L.)—An experimental and simulation study. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(4):561-565.
- [22] Wang R J, Li S Q, Wag Q J, Zheng J Y, Fan J, Li S X. Evaluation of simulation models of spring-maize leaf area and biomass in semi arid agro-ecosystems. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(1): 139-144.

参考文献:

- [1] 胡元坤. 我国玉米的生产现状和发展目标. 中国牧业通讯,2010, (12):28-29.

- [2] 赵久然. 美国玉米持续增产的主要因素及我国玉米生产形势和增产措施//中国作物学会. 2010 年作物栽培学发展学术研讨会论文集. 2010:74-80.
- [3] 李向岭, 赵明, 李从锋, 葛均筑, 侯海鹏, 李琦, 侯立白. 播期和密度对玉米干物质积累动态的影响及其模型的建立. 作物学报, 2010, 36 (12): 2143-2153.
- [4] 陈国平. 玉米的干物质生产与分配 (综述). 玉米科学, 1994, 1(1): 48-53.
- [5] 戴明宏, 陶宏斌, 王利纳, 王 璞. 不同氮肥管理对春玉米干物质生产、分配及转运的影响. 华北农学报, 2008. 23(1): 154-157.
- [6] 王璞. 农作物概论. 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 228-229.
- [7] 黄耀, 王戎, 张稳, 于永强, 王平. 中国农业植被净初级生产力模拟 (I)——模型的建立与灵敏度分析. 自然资源学报, 2006. 21(5): 790-801.
- [8] 林忠辉, 项月琴, 莫兴国, 李俊, 王玲. 夏玉米叶面积指数增长模型的研究. 中国生态农业学报, 2003, 11(4): 74-77.
- [9] 黄智鸿, 申林, 孙刚, 曹洋, 包岩, 梁煊赫, 吴春胜, 孙丰年. 超高产玉米叶面积及地上干物质积累与分配. 安徽农业科学, 2007(8): 2227-2228, 2230.
- [11] 佟屏亚, 程延年. 玉米生育和产量模型. 北京: 中国农业科技出版社, 1997: 117-120.
- [12] 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.
- [14] 王信理. 在作物干物质积累的动态模拟中如何合理运用 Logistic 方程. 农业气象, 1986(1): 14-19.
- [16] 张旭东, 蔡焕杰, 付玉娟, 王健. 黄土区夏玉米叶面积指数变化规律的研究. 干旱地区农业研究, 2006, 24(2): 25-29.
- [17] 平晓燕, 周广胜, 孙敬松, 许振柱. 基于功能平衡假说的玉米光合产物分配动态模拟. 应用生态学报, 2010, 21(1): 129-135.
- [20] 杨永岐, 班显秀, 陈鹏狮, 董秀坡. 玉米干物质动态模拟及其业务应用研究. 辽宁气象, 2000, 17(2): 18-22.
- [21] 张银锁, 宇振荣, Driessen P M. 夏玉米植株及叶片生长发育热量需求的试验与模拟研究. 应用生态学报, 2001, 12(4): 561-565.
- [22] 王瑞军, 李世清, 王全九, 郑纪勇, 樊军, 李生秀. 半干旱农田生态系统春玉米叶面积及叶生物量模拟的比较研究. 中国生态农业学报, 2008, 16(1): 139-144.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 8 April, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Special Topics in Urban Ecosystems

- Guidelines and evaluation indicators of urban ecological landscape construction SUN Ranhao, CHEN Ailian, LI Fen, et al (2322)
- Research progress in the quantitative methods of urban green space patterns TAO Yu, LI Feng, WANG Rusong, et al (2330)
- Effects of land use change on ecosystem service value: a case study in Huaibei City, China ZHAO Dan, LI Feng, WANG Rusong (2343)
- Urban ecosystem complexity: an analysis based on urban municipal supervision and management information system DONG Rencai, GOU Yaqing, LIU Xin (2350)
- A case study of the effects of *in-situ* bioremediation on the release of pollutants from contaminated sediments in a typical, polluted urban river LIU Min, WANG Rusong, JIANG Ying, et al (2358)
- The pollution characteristics of Beijing urban road sediments REN Yufen, WANG Xiaoke, OUYANG Zhiyun, et al (2365)
- Effects of urban green pattern on urban surface thermal environment CHEN Ailian, SUN Ranhao, CHEN Liding (2372)
- Seasonal dynamics of airborne pollen in Beijing Urban Area MENG Ling, WANG Xiaoke, OUYANG Zhiyun, et al (2381)

Autecology & Fundamentals

- Impact of alpine meadow degradation on soil water conservation in the source region of three rivers XU Cui, ZHANG Linbo, DU Jiaqiang, et al (2388)
- Predicting the plant exposure to soil arsenic under varying soil factors XIAN Yu, WANG Meie, CHEN Weiping (2400)
- Attraction effect of different host-plant to Colorado potato beetle *Leptinotarsa decemlineata* LI Chao, CHENG Dengfa, GUO Wenchao, et al (2410)
- Root decomposition and nutrient dynamics of *Quercus mongolica* and *Betula Platyphylla* JIN Beibei, GUO Qingxi (2416)
- The interaction of drought and slope aspect on growth of *Quercus variabilis* and *Platycladus orientalis* WANG Lin, FENG Jinxia, WANG Shuangxia, et al (2425)
- Effects of diameter at breast height on crown characteristics of Chinese Fir under different canopy density conditions FU Liyong, SUN Hua, ZHANG Huiru, et al (2434)
- Effects of temperature acclimation and acute thermal change on cutaneous respiration in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*) XIAN Xuemei, CAO Zhendong, FU Shijian (2444)

Population, Community and Ecosystem

- Altitudinal pattern of plant species diversity in the Wulu Mountain Nature Reserve, Shanxi, China HE Yanhua, YAN Ming, ZHANG Qindi, et al (2452)
- Vegetation succession on Baishui No. 1 glacier foreland, Mt. Yulong CHANG Li, HE Yuanqing, YANG Taibao, et al (2463)
- The effects of *Spartina alterniflora* seaward invasion on soil organic carbon fractions, sources and distribution WANG Gang, YANG Wenbin, WANG Guoxiang, et al (2474)
- Community characteristics and soil properties of coniferous plantation forest monocultures in the early stages after close-to-nature transformation management in southern subtropical China HE Youjun, LIANG Xingyun, QIN Lin, et al (2484)
- Response of invasive plant *Flaveria bidentis* to simulated herbivory based on the growth and reproduction WANG Nannan, HUANGFU Chaohe, LI Yujin, et al (2496)
- Estimation of leaf area index of secondary *Betula platyphylla* forest in Xiaoxing'an Mountains LIU Zhili, JIN Guangze (2505)
- Optimal number of herb vegetation clusters: a case study on Yellow River Delta YUAN Xiu, MA Keming, WANG De (2514)
- Application of polychaete in ecological environment evaluation of Laizhou Bay ZHANG Ying, LI Shaowen, LÜ Zhenbo, et al (2522)
- Soil meso- and micro arthropod community diversity in the burned areas of *Pinus massoniana* plantation at different restoration stages YANG Daxing, YANG Maofa, XU Jin, et al (2531)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Temporal variety of boundary layer height over deep arid region and the relations with energy balance ZHANG Jie, ZHANG Qiang, TANG Congguo (2545)
- Analysis and forecast of landscape pattern in Xi'an from 2000 to 2011 ZHAO Yonghua, JIA Xia, LIU Jianchao, et al (2556)
- Spatio-temporal variation in the value of ecosystem services and its response to land use intensity in an urbanized watershed HU Hebing, LIU Hongyu, HAO Jingfeng, et al (2565)

Resource and Industrial Ecology

- Household optimal forest management decision and carbon supply: case from Zhejiang and Jiangxi Provinces ZHU Zhen, SHEN Yueqin, WU Weiguang, et al (2577)
- Spatial variability characteristics of soil nutrients in tobacco fields of gentle slope based on GIS LIU Guoshun, CHANG Dong, YE Xiefeng, et al (2586)
- Method of determining the maximum leaf area index of spring maize and its application MA Xueyan, ZHOU Guangsheng (2596)

Urban, Rural and Social Ecology

- Morphological structure of leaves and dust-retaining capability of common street trees in Guangzhou Municipality LIU Lu, GUAN Dongsheng, CHEN Yongqin David (2604)

Research Notes

- Morphological responses to temperature, drought stress and their interaction during seed germination of *Platycodon grandiflorum* LIU Zigang, SHEN Bing, ZHANG Yan (2615)
- Effects of nutrients on the growth of the parasitic plant *Cuscuta australis* R. Br. ZHANG Jing, LI Junmin, YAN Ming (2623)

《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

本期责任副主编 吕永龙

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 33 卷 第 8 期 (2013 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 8 (April, 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	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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元