

紫外辐射胁迫下小麦干物质生产和积累的动力学模型研究

吴荣军, 郑有飞

(南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210044)

摘要:采用系统动力学软件 Stella,模拟研究了小麦群体的日光合作用量,并经呼吸消耗与物质转化形成生物量的动态变化,同时,模拟紫外辐射增强对小麦光合作用的影响引起的干物质重量的变化。通过均方根差和相对误差对干物重的模拟值与观测值之间的符合度进行统计分析。结果表明,模拟值与实测结果没有显著差异,说明运用 Stella 开展作物的生长发育过程的模拟是可行的,这为气候与环境条件变化下作物生长的模拟模型建立提供了一条新的途径。

关键词:紫外辐射;光合作用;呼吸作用;物质积累;系统动力学

中图分类号:Q945.78 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)06-2325-07

A Dynamical Model of Photosynthetic Production and Dry Matter Accumulation in Wheat Under Increment UV-B Radiation

WU Rong-jun, ZHENG You-fei

(College of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The rapid decline in stratospheric ozone concentrations has been confirmed by satellite measurements, especially given recent evidence that global warming may exaggerate ozone depletion. So, the biologically active short-wavelength ultraviolet-B radiation will increase in ground surface, changing ecosystem of ground surface. Investigations of the responses of crops to increased UV-B radiation have mostly been studied at home and abroad, utilizing qualitative analysis and statistics analysis, less quantitative analysis by numerical simulations. Dynamic model development for describing complex ecological systems continues to grow in popularity. The objective of this study is to construct a simulation model for predicting the photosynthetic production and dry matter accumulation under increment UV-B radiation, according to the simulation model of crop growth, added the stress factor of UV-B radiation, utilizing the commercial available software package Stella. Daily total photosynthetic rate, and variation of total biomass which was subtracting respiration and transformation from it, were simulated in the paper, under increment UV-B radiation, considering the effects of daily temperature and crop physiological age on photosynthesis rate. The results of testing the dynamical model showed that there was no significant difference between the simulated and observed values of dry matter weight, and the simulation process of accumulated dry matter was reliable, compared with other research, according to the statistics analysis of root mean square error and relative error. So, it was feasible that simulating the growth, development and dry matter accumulation of wheat and other crop by software Stella in windows system. So, Stella will become one new method to simulating the crop growth and biomass accumulation.

Keywords: UV-B radiation; photosynthesis; respiration; dry matter accumulation; system dynamics

大气平流层臭氧在减少^[1-3],使得到达地表的紫外辐射增加,从而影响地球表面生物的正常生长和生态

系统的稳定。目前,国内外有关紫外辐射增强对陆生植物的影响已经开展了较多的研究,内容涉及分子、细胞、组织、器官、个体和生态系统等不同的研究尺度^[4-7]。然而,其中作物干物质生产和积累的紫外辐射效应研究多采用定性分析和统计分析手段,运用定量分析手段的分析研究较少。

目前,国内外已经建立了若干作物光合生产和物质积累的模拟模型^[8-12],如小麦的发育阶段和形态

收稿日期:2007-12-18

基金项目:国家自然科学基金(40775072);南京信息工程大学科研基金(20070023)

作者简介:吴荣军(1975—),男,浙江江山人,博士生,讲师,从事应用气象和数学生态研究。E-mail: wurj@nuist.edu.cn

通讯作者:郑有飞 E-mail: zhengyf@nuist.edu.cn

模拟研究^[13-18],小麦田间土壤氮素及水分平衡动态模拟模型的研究^[19-24],小麦光合物质生产的模拟模型研究^[8,25-26],用来定量分析作物的光合作用等生理生态过程。然而,关于小麦干物质生产和积累的紫外辐射效应模型研究开展的较少。

因此,本文在前人开展作物模拟模型研究的基础上,着重考虑紫外辐射增强对小麦干物质生产和积累的影响,建立系统动力学模拟模型,定量研究紫外辐射增强对小麦干物质生产和积累的影响,揭示其影响机理,这对于完善全球变化研究具有重要的意义。

1 模型描述

1.1 光合作用模型

逐日光合量采用朱玉洁^[11]的计算模型(式1)。

$$PG_i = \int_0^{DL} PG_i DL = \frac{P_{\max} \times DL}{K} \ln \left[\frac{P_{\max} + \alpha \times 0.47 \times K \times (1-r) \times S}{P_{\max} + \alpha \times K \times (1-r) \times S \times \exp(-K \times LAI) \times 0.47} \right] \quad (1)$$

式中: PG_i 为第*i*d的群体光合量, $\text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; $P_{\max}$ 为光饱和时的最大光合强度, $\text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,本模型中取值 $5 \text{ gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; α 为光合作用曲线初始斜率, $\text{gCO}_2 \cdot \text{MJ}^{-1}$,本模型中取值 $14.5 \text{ gCO}_2 \cdot \text{MJ}^{-1}$; K 为群体消光系数,本模型中取值 $0.35^{[27]}$; r 为群体反射率,%,本模型中取值 0.05 ; LAI 为叶面积系数; 0.47 为光合有效辐射占太阳辐射的比例; S 为每小时的平均辐射量,令 $S=Q/DL$,其中 Q 为第*i*d的太阳辐射量, $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, DL 为第*i*d的日长,h;日长计算参考文献[24]。

同时,本模型中引入温度订正因子和生理年龄影响因子^[8],用于订正 $P_{\max}$ 。

$$AP_{\max} = P_{\max} \times FT \times FA \quad (2)$$

式中: $AP_{\max}$ 为叶片实际最大光合速率, $\text{gCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; FT 为温度订正因子(式3); FA 为生理年龄影响因子(式4)。

$$FT = \begin{cases} 0 & -10 \leq T_{\text{mean}} < T_b \text{ or } T_{\text{mean}} \geq T_{\max} \\ \sin \left(\frac{T_{\text{mean}} - T_b}{T_{\text{ol}} - T_b} \cdot \frac{\pi}{2} \right) & T_b \leq T_{\text{mean}} < T_{\text{ol}} \\ 1 & T_{\text{ol}} \leq T_{\text{mean}} < T_{\text{ou}} \\ \cos \left(\frac{T_{\text{mean}} - T_{\text{ou}}}{T_{\text{in}} - T_{\text{ou}}} \cdot \frac{\pi}{2} \right) & T_{\text{ou}} \leq T_{\text{mean}} < T_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_{mean} 为日平均气温, $^{\circ}\text{C}$; T_b 为基点温度,取值为 0°C ; T_{ol} 为最适温度的下限值,取值为 12°C ; T_{ou} 为最

适温度的上限值,取值为 27°C ; $T_{\max}$ 为最高温度,取值为 45°C 。

$$FA = \begin{cases} 1 & PDT < 31 \\ 1 - 0.02 \times (PDT - 31) & 31 \leq PDT \leq 56 \end{cases} \quad (4)$$

式中: PDT 为生理发育时间,是相对于最适发育条件下的时间尺度。其中,9.5代表单棱期,14.5代表二棱期,14.5代表小花原基分化期,16.1代表雌雄原基分化期,17.9代表药隔期,21.4代表四分体期,26.8代表抽穗期,31代表开花,56代表成熟^[15]。

1.2 呼吸作用模型

作物的呼吸作用采用高亮之^[28]的模型,用下式表达:

$$Resp = RG + RM \quad (5)$$

$$RG = m \times PG_i \quad (6)$$

$$RM = n \times Q_{10}^{\frac{T_{\text{mean}} - T_0}{10}} \times DW \quad (7)$$

式中: $Resp$ 为小麦群体每日的呼吸消耗量,其中 RG 为生长呼吸, RM 为维持呼吸。式(6)中, m 为生长呼吸系数,本模型中取值为 0.25 。式(7)中, n 为维持呼吸系数,本模型中取值为 0.0125 , Q_{10} 表示在 25°C (T_0)下小麦的呼吸商,本模型中取值为 2 , DW 表示到当日为止所累积的干物质质量。

1.3 干物质积累

群体干物质质量是群体光合作用与呼吸作用之差,其公式为:

$$PN_i = \beta \times \lambda \times I_{\text{uv}} \times \frac{1}{1 - \varepsilon} \times (PG_i - Resp) \quad (8)$$

式中: PN_i 是第*i*d以干物质质量表示的日净光合量; β 是 CO_2 与碳水化合物的转换因子,本模型中取值为 0.68 ; λ 是由葡萄糖合成植株干物质的转换系数,本模型中取值为 0.74 ; ε 是小麦干物质中的矿物质含量,本模型中取值为 10% ; I_{uv} 表示紫外(UV-B)辐射增强对小麦光合作用影响的系数,其中在对照(CK)处理中, $I_{\text{uv}}=1$,在处理1(T_1 :紫外辐射增强 $0.90 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,相当于南京地区夏天日平均UV辐射增强 3.0%)、处理2(T_2 :紫外辐射增强 $2.52 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)中分别由多年观测值在不同生育期与CK的比较中得出,本模型中取值分别为 0.69 和 0.47 。本文主要考虑的是水肥适宜情况下小麦在对照和紫外辐射处理中的光合生产和干物质累积,因此,没有考虑氮素因子和水分因子对小麦光合作用和干物质累积的影响。

每日的干物质积累形成群体生物量($DM, \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,包括地上与地下部分,式9)。

$$DW(t) = DW(t-dt) + (PN_i) \times dt \quad (9)$$

1.4 模型运行环境

利用视窗化模型软件 Stella9.0™ 构建和运行上述模型。Stella9.0 是一种可运行在 Windows 环境下的,创建和运行系统动力学模型的工具。它所提供的图形用户界面,使许多问题得以进行可视化模拟,是生态建模中一个强有力的模拟软件。模型运行步长为 1 d,模拟时间从 1999 年 12 月 1 日至 2000 年的 5 月 30 日,约 6 个月共 183 d。模型的流程图见图 1。

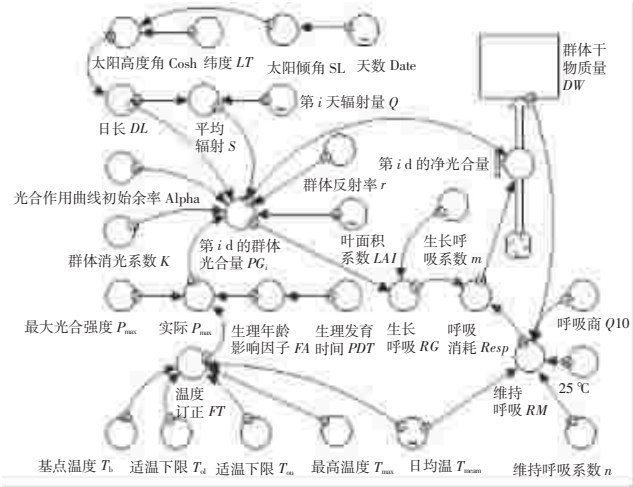


图 1 小麦干物质生产和累积模型建立的 Stella 流程图
Figure 1 The scheme of Stella model of photosynthetic production and dry matter accumulation in wheat

2 模型的有效性检验

2.1 大田试验和气象资料

试验于 1999—2000 年在南京信息工程大学农业气象试验站(北纬 32°14′,东经 118°42′)进行,供试品种为扬麦 158,试验田土壤肥力水平一致,分成 3 个小区,每小区 12 m²,设一组重复,统一时间播种,每一个小区播种密度、播种深度均匀一致,小麦条播,播种密度 26 万株·hm⁻²,施肥也都均匀一致,施肥量中等偏上。

UV-B 辐射增强处理:采用的是可升降式的 UV-B 辐射灯架,架于植株上方,其高度随株高调整;在每

种作物从出苗时起设 3 个试验处理:对照(CK:自然光)、处理 1(T1:紫外辐射增强 0.90 kJ·m⁻²·h⁻¹,相当于南京地区夏天日平均 UV 辐射增强 3.0%)、处理 2(T2:紫外辐射增强 2.52 kJ·m⁻²·h⁻¹,相当于南京地区夏天日平均 UV 辐射增强 8.0%),每日 8:00—17:00 照射 9 h,直至成熟为止。试验期间观察记载各主要生育时期。

干物质质量的测定:于分蘖期、越冬期、返青期、拔节期、孕穗期、开花期、花后 15 d、成熟期等时段测定地上与地下部的干物质质量。每个小区取 30 cm×30 cm 的样方,将小麦按叶片、叶鞘、茎、果实各器官进行分类,分别放入挂上标签经过称过质量的布袋内称取鲜样质量,之后将样本袋放入恒温干燥箱内加热,第 1 h 温度控制在 100~105 ℃杀青,以后维持在 70~80 ℃,12 h 后进行第一次称量质量,以后每小时称量质量一次,当样本前后两次重量差≤5‰时,该样本不再烘烤。烘烤温度和时间根据样本大小和老嫩程度等掌握。UV-B 辐射增强对小麦群体的干物质量、穗粒数和千粒质量见表 1。

日平均温度、日总辐射量等气象资料来自南京信息工程大学农业气象试验站。

2.2 检验方法

采用国际上检验模型时常用的统计方法均方根差(Root Mean Square Error, RMSE)和相对误差(Relative Error, RE)对模拟值与观测值之间的符合度进行统计分析^[29]。RMSE 和 RE 可用以下的方程求算:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (MEA_i - SIM_i)^2}{n}}, RE = \frac{MEA_i - SIM_i}{MEA_i}$$

式中:MEA_i 为观测值, SIM_i 为模拟值, n 为样本容量。

2.3 检验结果

以 1999—2000 年南京日中辐射量和日平均温度的连续观测数据作为模型输入,采用系统动力学手段模拟南京地区小麦群体生物量的动态变化,包括地上和地下部分,并与实测值进行比较(图 2)。从图 2a、图 2b 及图 2c 可以看出,模拟的群体干重动态变化与实

表 1 UV-B 辐射增加对小麦群体产量结构的影响				
Table 1 The effects of UV-B radiation increment on yield structure of wheat population				
处理 Treatments	干物质质量 Dry Matter Weight/g·m ⁻²	每 hm ² 穗数 Ears Per Mu	每穗粒数 Grains Per Spike	千粒质量 1 000-grain Weight/g
CK	2 080.90(100%)	4 078 500(100%)	47.48(100%)	32.39(100%)
T1	1 447.60(69.6%)	4 018 500(98.5%)	40.90(86.1%)	29.54(91.2%)
T2	974.95(46.9%)	3 900 000(95.6%)	35.32(74.4%)	26.72(82.5%)

测值具有较好的一致性。对模拟值与实测值进行相关分析表明,CK、T1 和 T2 处理的模拟值与实测值的相关系数分别为 0.98、0.97 和 0.99($n=14$),均达到 1% 的显著性水平,分别对 CK、T1 和 T2 处理的模拟值与实测值作散点图,其趋势线与 1:1 图的对角线很接近,回归方程的斜率分别为 0.91、0.94 和 0.90,均接近于 1,而截距与 0 没有显著差异(图 2d、图 2e、图 2f 和表 2)。同时,CK、T1 和 T2 处理的实测值与模拟值的均方根差(RMSE)分别为 76.99、58.65 和 41.62 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,相对误差平均值分别为 7.13%、8.63%和 7.05%($n=14$,见表 2)。说明模型可较准确地模拟小麦干物质重的动态变化。

3 讨论

大量的研究表明,UV-B 辐射增强可以使作物植株矮化、叶面积减少、发育迟缓、光合作用和蒸腾作用

下降及作物品质发生变化^[4,7,30-31],影响种间竞争^[32-33],影响整个农田生态系统^[34],这些研究更多地采用定性研究和统计分析手段。同时,对于小麦生物量和产量的紫外辐射效应的评估,国内外学者运用现场试验和温室试验开展了较多的研究^[31,33,35-36],其中一半的研究认为 UV-B 辐射增强将降低小麦产量,一部分研究表明对小麦产量没有影响,而有一小部分研究表明将提高小麦产量。但小麦产量和生物量的变化主要是因为叶面积、冠层光合作用速率、叶绿素含量等参数受到紫外辐射的影响^[37],因此,上述参数是紫外辐射增强影响小麦产量的评估和模拟研究需要重点研究的。

国内外关于紫外辐射增强对小麦生物量和干物质质量的影响的模拟研究的报道并不多,如李元^[38]研究了大田栽培和自然光条件下,模拟 UV-B 辐射增强对春小麦生物量累积和产量的影响及评估,建立生物量积累与紫外辐射强度的平方回归模型,郑有飞^[39]也

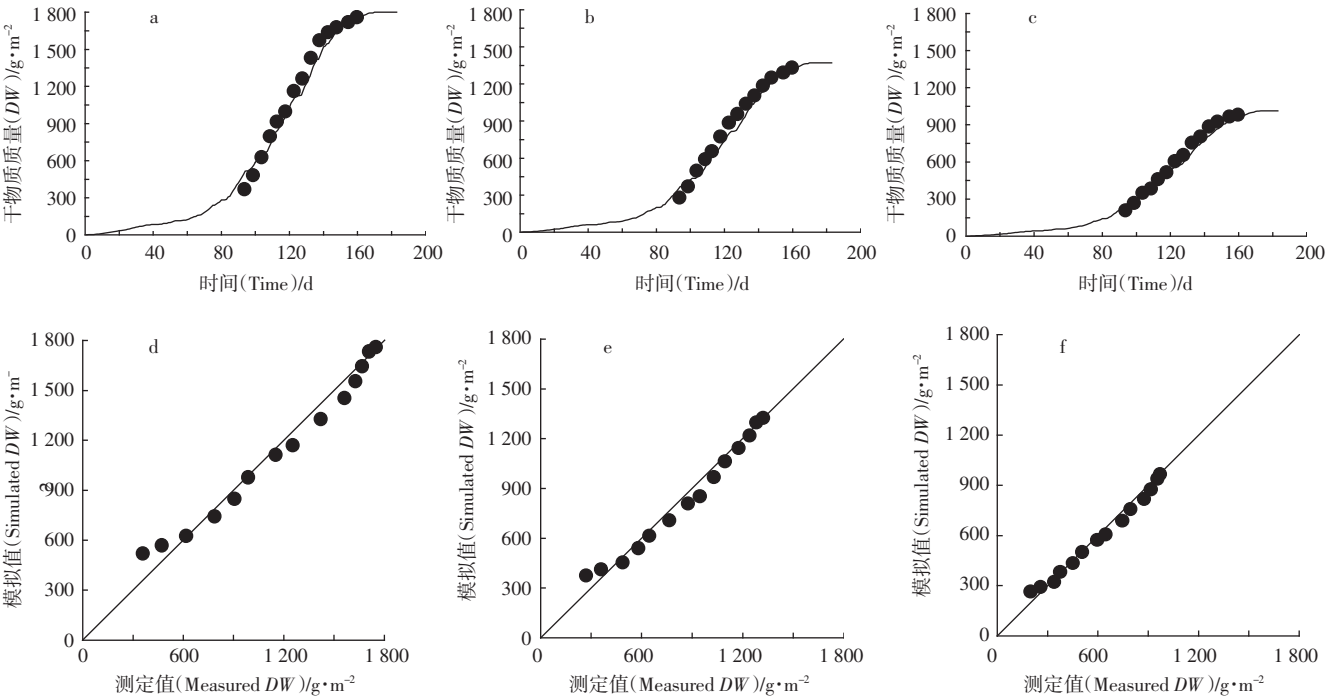


图 2 对照 CK(a、d)、处理 T1(b、e)、处理 T2(c、f)的小麦干物质质量模拟值与实测值比较
Figure 2 Comparison between simulated and measured dry weight in wheat in control(a,d), T1(b,e)and T2(c,f)

表 2 小麦干物质模拟值与测定值的差异性及相关性分析

Table 2 The difference and correlation analysis between simulated and measured dry weight in wheat						
处理 Treatment	样本容量 Sample Size(n)	均方根差 Root Mean Square Error	相对误差 Relative Error	回归系数 Regression Coefficient(α)	截距 Intercept (β)	相关系数 Correlation Coefficient(R)
CK	14	76.99	7.13	0.91	76.73	0.98
T1	14	58.65	8.03	0.94	15.98	0.97
T2	14	41.62	7.05	0.90	30.50	0.99

建立了紫外辐射增强对小麦生物量和干物质质量影响的统计模型。这些统计模型的建立有助于量化紫外辐射增强对小麦干物质累积和产量的影响,但对于紫外辐射增强的动态影响评估效果不甚理想。

而本文利用软件 Stella (Ver. 9.0.2) 作为建模工具,操作简单、表现直观、易于理解,可避开常规人工求解的繁杂计算,仅需改变初值就能研究系统的动态变化^[40-41]。因此,本文根据日长计算模型、作物群体光合作用和呼吸作用模型,以及前人研究得到的各种参数、温度观测数据和现场试验获取的叶面积指数等数据,用 Stella 软件建立紫外辐射胁迫下的小麦物质生产和积累模型,而且可以在模型运行过程中改变参数来直观反映气候与环境条件的变化对小麦物质生产和积累的动态影响,可以有效地实现紫外辐射增强背景下小麦产量的预测。这与其他作物生长发育模拟模型相比体现出了更大的优越性^[42]。

与国内外同类研究相比,本文所建立的模型考虑了紫外辐射的胁迫作用,同时,运用系统动力学的原理和方法来模拟小麦群体的光合作用,是本文的独特之处。本模型考虑了温度和生育期对小麦群体光合作用的影响,对呼吸作用的模拟包括生长呼吸和维持呼吸,并考虑了温度对呼吸的影响。通过对模型的有效性检验,在对照组和紫外辐射增强条件下小麦群体干物质生产和积累的模拟结果与相应的实测值没有显著的差异,表明模型具有一定的预测性,建立的系统动力学模型是可靠的。

然而,由于小麦生长发育系统的复杂性和生长发育过程中的生理生态试验数据的不充分,模型仍存在一些不足:①对于同化物的分配没有考虑到模型中;②模型只考虑了温度和日总辐射两个气候环境条件,对于水分和氮素对植物生长的影响有待验证,磷、钾和微量元素等影响小麦生长的关键因子未做考虑^[19,21,24];③没有考虑不同的发育期和不同组织的碳水化合物和干物质含量不同,本模型中转换系数 β 和 λ 用了一定值^[8,11-12,26],同时,紫外辐射增强对小麦的影响系数 I_w 在不同生育期也有所不同,本模型也取了一定值。

因此,下一步研究应该考虑不同生育期的同化物分配系数,综合考虑根系生长和茎叶的生长,增强机理性,同时,综合考虑水分和氮素等因素对小麦生长的影响,考虑不同生育期的转换系数 β 和 λ ,以及紫外辐射影响系数 I_w ,特别是 I_w 应该进一步深化研究方案开展更为系统的大田试验,获得不同生育期的 I_w ,以进一步改进和完善本文建立的系统动力学模型。

参考文献:

- [1] 石广玉,白宇波,岩坂泰信,等. 拉萨上空大气臭氧垂直分布的高空气球探测[J]. 地球科学进展, 2000, 15(5):522-524.
SHI Guang-yu, BAI Yu-bo, Yasunobu Iwasaka, et al. A balloon measurement of the ozone vertical distribution over Lahsa[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 15(5):522-524.
- [2] WMO (World Meteorological Organization). Scientific assessment of ozone depletion, Global ozone research and monitoring project[C]//Ajavon A N, Albritton D L, Watson R T, et al. Report No. 47. Geneva, USA: World Meteorological Organization, 2002.
- [3] 周秀骥,李维亮,陈隆勋,等. 青藏高原地区大气臭氧变化的研究[J]. 气象学报, 2004, 62(5):513-527.
ZHOU Xiu-ji, LI Wei-liang, CHEN Long-xun, et al. Study of ozone change over Tibetan plateau[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(5):513-527.
- [4] ZHENG Y F, GAO W, WANG C H. Yield and yield formation of winter wheat in response to enhanced solar Ultraviolet-B radiation [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 20:279-283.
- [5] 石江华,王艳,李韶山. UV-B 对植物分子和细胞水平的效应[J]. 激光生物学报, 2002, 11(4):315-318.
SHI Jiang-hua, WANG Yan, LI Shao-shan. Recent advances of UV-B effects on plants at molecular and cellular levels [J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2002, 11(4):315-318.
- [6] Caldwell M M, Bjorn L O, Bornman J F, et al. Effects of increased solar Ultraviolet radiation on terrestrial ecosystems[J]. *Journal of Photochemical Photobiology. B: Biology*, 1998, 46:40-52.
- [7] 王勋陵. 增强紫外 B 辐射对植物及生态系统影响研究的发展趋势[J]. 西北植物学报, 2002, 22(3):670-681.
WANG Xun-ling. Research advances about effects of enhanced UV-B radiation on plants and ecosystems[J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2002, 22(3):670-681.
- [8] 刘铁梅,曹卫星,罗卫红,等. 小麦物质生产与积累的模拟模型[J]. 麦类作物学报, 2001, 21(3):26-31.
LIU Tie-mei, CAO Wei-xing, LUO Wei-hong, et al. A simulation model of photosynthetic production and dry matter accumulation in wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2001, 21(3):26-31.
- [9] Hunt L A, Pararajasingham S. Cropsim-wheat: A model describing the growth and development of wheat[J]. *Can J Plant Sci*, 1995, 75:619-632.
- [10] 刘铁梅,曹凑贵,黄勇,等. 油菜物质生产与积累的模拟模型[J]. 华中农业大学学报, 2003, 22(6):533-537.
LIU Tie-mei, CAO Cou-gui, HUANG Yong, et al. A simulation model of photosynthetic production and dry matter accumulation in rape-seed[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2003, 22(6):533-537.
- [11] 朱玉洁,冯利平,易鹏,等. 紫花苜蓿光合生产与干物质积累模拟模型研究[J]. 作物学报, 2007, 33(10):1682-1687.
ZHU Yu-jie, FENG Li-ping, YI Peng, et al. A dynamic model simulating photosynthetic production and dry matter accumulation for *Alfalfa*[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(10):1682-1687.
- [12] 郑国清,张曙光,段韶芬. 玉米光合生产与产量形成模拟模型[J]. 农

- 业系统科学与综合研究, 2004, 20(3):193-197, 201.
- ZHENG Guo-qing, ZHANG Shu-guang, DUAN Shao-fen. A simulation model of photosynthetic production and yield formation in Maize[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2004, 20(3), 193-197, 201.
- [13] 冯利平, 高亮之, 金之庆, 等. 小麦发育期动态模拟模型的研究[J]. 作物学报, 1997, 23(4):418-422.
- FENG Li-ping, GAO Liang-zhi, JIN Zhi-qing, et al. Studies on the simulation model for wheat phenology [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1997, 23(4):418-422.
- [14] 郑有飞, 万长建, 宗雪梅, 等. 小麦生育期计算机模拟系统初步研究[J]. 南京气象学院学报, 1998, 21(3):377-382.
- ZHENG You-fei, WAN Chang-jian, ZONG Xue-mei, et al. A preliminary study of computer modeling system of wheat development Data[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1998, 21(3):377-382.
- [15] 刘铁梅, 曹卫星, 罗卫红, 等. 小麦抽穗后生理发育时间的计算与生育期的预测[J]. 麦类作物学报, 2000, 20(3):29-34.
- LIU Tie-mei, CAO Wei-xing, LUO Wei-hong, et al. Calculation of physiological development time and prediction of development stages after heading[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2000, 20(3):29-34.
- [16] 严美春, 曹卫星, 罗卫红, 等. 小麦茎顶端原基发育模拟模型的研究[J]. 作物学报, 2001, 27(3):356-362.
- YAN Mei-chun, CAO Wei-xing, LUO Wei-hong, et al. A simulation model of shoot apex primordium development in wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(3):356-362.
- [17] 刘铁梅, 曹卫星, 罗卫红, 等. 小麦叶面积指数的模拟模型研究[J]. 麦类作物学报, 2001, 21(2):38-41.
- LIU Tie-mei, CAO Wei-xing, LUO Wei-hong, et al. Simulation on leaf area index in wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2001, 21(2):38-41.
- [18] 陈国庆, 朱 艳, 曹卫星. 小麦叶鞘和节间生产过程的模拟研究[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(1):71-74.
- CHEN Guo-qing, ZHU Yan, CAO Wei-xing. Modeling leaf sheath and internode growth dynamics in wheat[J]. *Acta Tritical Crops*, 2005, 25(1):71-74.
- [19] 曹宏鑫, 孙立荣, 高亮之, 等. 长江下游地区小麦生长期土壤水分动态的模拟[J]. 南京农业大学学报, 1998, 21(5):25-30.
- CAO Hong-xin, SUN Li-rong, GAO Liang-zhi, et al. Modeling soil moisture content during winter wheat growing season in the lower Yangtze River of China[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1998, 21(5):25-30.
- [20] 王桂玲, 高亮之. 冬小麦田间土壤水分平衡动态模拟模型的研究[J]. 江苏农业学报, 1998, 14(1):36-41.
- WANG Gui-ling, GAO Liang-zhi. Simulation study on soil water dynamics in winter wheat fields[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 1998, 14(1):36-41.
- [21] 曹宏鑫, 孙立荣, 高亮之, 等. 长江下游地区马肝土小麦生长期土壤氮素动态的模拟[J]. 中国农业气象, 1999, 20(2):35-38.
- CAO Hong-xin, SUN Li-rong, GAO Liang-zhi, et al. Simulation on soil nitrogen dynamic during wheat growing season in the lower valley of the Yangtze River[J]. *Agricultural Meteorology*, 1999, 20(2):35-38.
- [22] 王 康, 沈荣开, 王富庆. 冬小麦生长及根系吸氮的动态模拟研究[J]. 灌溉排水, 2002, 21(1):6-11.
- WANG Kang, SHEN Rong -kai, WANG Fu -qing. Simulation of biomass formation and nitrogen uptake in winter wheat under different water and nitrogen supply [J]. *Irrigation and Drainage*, 2002, 21(1):6-11.
- [23] 庄恒扬, 曹卫星, 任正龙, 等. 土壤有机氮矿化与有机物氮素释放的动态模拟[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2002, 23(2):63-67.
- ZHUANG Heng-yang, CAO Wei-xing, REN Zheng-long, et al. The simulation on mineralization of soil organic nitrogen and nitrogen release from organic materials applied to the fields[J]. *Journal of Yangzhou University(Agriculture and Life Sciences Edition)*, 2002, 23(2):63-67.
- [24] 姜青珍, 张建平, 李雁鸣. 水分影响小麦光合物质生产模拟模型的初步研究[J]. 河北农业大学学报, 1999, 22(2):27-31.
- JIANG Qing -zhen, ZHANG Jian -ping, LI Yan -ming. Preliminary study on the simulation model of water effect on biomass production of winter wheat[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 1999, 22(2):27-31.
- [25] 刘铁梅, 曹卫星, 罗卫红, 等. 小麦器官间干物质分配动态的定量模拟[J]. 麦类作物学报, 2001, 21(1):25-31.
- LIU Tie-mei, CAO Wei-xing, LUO Wei-hong, et al. Quantitative simulation on dry matter partitioning dynamic in wheat organs[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2001, 21(1):25-31.
- [26] 乔玉辉, 宇振荣. 冬小麦干物质在各器官中的累积和分配规律研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(5):543-546.
- QIAO Yu-hui, YU Zhen-rong. Quantification of dry matter accumulation and distribution among different organs of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(5):543-546.
- [27] 高晓飞, 谢 云, 王晓岚. 冬小麦冠层消光系数日变化的实验研究[J]. 资源科学, 2004, 26(1):137-140.
- GAO Xiao-fei, XIE Yun, WANG Xiao-lan. Daily variation of extinction coefficients in winter wheat canopy in experiment[J]. *Resource Science*, 2004, 26(1):137-140.
- [28] 高亮之. 作物生长模型[M]. 香港:天马图书有限公司, 2004. 150-168.
- GAO Liang-zhi. The simulation model of crop growth[M]. Hongkong: Tian-Ma Books Co. Ltd., 2004. 150-168.
- [29] 曹卫星, 罗卫红. 作物系统模拟及智能管理[M]. 北京:高等教育出版社, 2003.
- CAO Wei-xing, LUO Wei-hong. Crop system simulation and intelligent management[M]. Beijing: High Education Press, 2003.
- [30] 李 元, 祖艳群, 王勋陵. 大气臭氧层减薄、地表紫外辐射增强与植物的响应[J]. 武汉植物学研究, 2000, 18(5):426-430.
- LI Yuan, ZU Yan-qun, WANG Xun-ling. Plant responses to atmosphere ozone depletion, Ultraviolet-B radiation increase reaching the earth's surface[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2000, 18(5):426-430.
- [31] 李 元, 王勋陵. 紫外辐射增加对春小麦生理、产量和品质的影响[J]. 环境科学学报, 1998, 18(5):504-509.
- LI Yuan, WANG Xun-ling. Influence of UV radiation on physiology,

yield and quality of spring wheat[J]. *J Environmental Sciences*, 1998, 18(5), 504–509.

- [32] 岳 明, 王勋陵. 紫外线 B 辐射对几种植物种间竞争的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1322–1326.

YUE Ming, WANG Xun–ling. Effect of enhanced UV–B radiation on competition among several plant species[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(8): 1322–1326.

- [33] LI Yuan, ZU Yan–qun, CHEN Jian–jun, et al. Intraspecific differences in physiological response of 20 wheat cultivars to enhanced Ultraviolet–B radiation under field conditions[J]. *Environ Exp Bot*, 2000, 44: 95–103.

- [34] Caldwell M M, Bjorn L O, Bornman J F, et al. Effects of increased solar Ultraviolet radiation on terrestrial ecosystems[J]. *J Photochem Photobiol B: Biol*, 1998, 46: 40–52.

- [35] Hakala K, Jauhiainen L, Hoskela T, et al. Sensitivity of crops to increased ultraviolet radiation in northern growing conditions[J]. *J Agron Crop Sci*, 2002, 188: 8–18.

- [36] Al–Oudat M, Baydoun S A, Mohammad A. Effects of enhanced UV–B on growth and yield of two syrian crops wheat (*Triticum Durum* Var. Horani) and broad beans (*Vicia Faba*) under field conditions[J]. *Environ Exp Bot*, 1998, 40: 11–16.

- [37] Kakani V G, K R Reddy, D Zhao, et al. Field crop responses to Ultra–

violet–B radiation: A review[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 120: 191–218.

- [38] 李 元, 王勋陵. UV–B 辐射对田间春小麦生物量和产量的影响[J]. 农村生态环境, 1999, 15(2): 28–31.

LI Yuan, WANG Xun–ling. Effect of enhanced UV–B radiation on biomass accumulation and yield of spring wheat colonies and assessment under field conditions[J]. *Rural Eco–Environment*, 1999, 15(2): 28–31.

- [39] 郑有飞, 杨志敏, 颜景义, 等. 作物对太阳紫外线辐射增加的生物效应及其评估[J]. 应用生态学报, 1996, 7(1): 107–109.

ZHENG You–fei, YANG Zhi–min, YAN Jing–yi, et al. Biological response of crops on enhanced solar Ultraviolet radiation and its estimation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, 7(1): 107–109.

- [40] 成洪山, 王 艳, 李韶山, 等. 系统动力学软件 STELLA 在生态学中的应用[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2007, 3: 126–131.

CHENG Hong–shan, WANG Yan, LI Shao–shan, et al. Applications of system dynamics software stella in ecology[J]. *Journal of South China Normal University(Natural Science Edition)*, 2007, 3: 126–131.

- [41] Connor D J, E Fereres. A dynamic model of crop growth and partitioning of biomass[J]. *Field Crops Research*, 1999, 63: 139–157.

- [42] Isee System. Technical document for the think and STELLA software [EB/OL]. <http://www.iseesystems.com>, 2007.