

不同播期和灌水条件下冬小麦生物量变化与产量模拟

陈先冠 冯利平 马雪晴 程 陈 潘学标 王 靖

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 为了阐明播期和灌水对冬小麦生物量积累动态特征的影响并实现不同播期与灌水条件下的产量模拟,在吴桥实验站2年(2017—2019年)播期水分大田试验基础上,结合2011—2017年播期水分文献资料,采用“小麦钟”模型发育指数来定量模拟冬小麦的发育期,以Logistic模型定量模拟不同播期和水分处理对地上部生物量积累动态的影响,并建立冬小麦生物量模型,进而构建冬小麦产量模型。结果表明,播期通过影响冬小麦生长旺盛期来影响生物量积累;播期推迟,冬小麦生长旺盛期缩短而使生物量减小。不同水分处理造成的地上部最大生物量的差异主要由生物量的最大积累速率决定,生物量最大积累速率随灌水量的增大呈先增加后下降趋势。基于冬前积温和生长季供水量建立冬小麦生物量与产量模型,冬小麦地上部生物量实测值和模拟值的均方根误差(RMSE)和归一化均方根误差(NRMSE)分别为1 980.2 kg/hm²和15.7%,产量实测值和模拟值的RMSE和NRMSE分别为839.7 kg/hm²和10.6%。基于发育指数的Logistic模型能较好地模拟冬小麦的生物量积累,对不同播期与灌水条件下的产量具有较好的预测效果。足墒播种条件下,冬小麦适宜冬前积温为200~600℃·d,生长季适宜供水量为200~450 mm。该研究为华北地区合理调控播期灌水措施提供了科学依据,为不同播期与灌水条件下冬小麦产量预测提供了思路。

关键词: 冬小麦; 冬前积温; 供水量; 发育指数; Logistic模型; 生物量动态特征

中图分类号: S3-5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)10-0349-09

OSID: 

Biomass Change and Yield Simulation of Winter Wheat under Different Sowing Dates and Irrigation Conditions

CHEN Xianguan FENG Liping MA Xueqing CHENG Chen PAN Xuebiao WANG Jing
(College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Understanding how different sowing dates and irrigation scheduling affect wheat dry matter accumulation was very helpful to improve grain yield and resource utilization efficiency. Field experiments with six-levels sowing dates and four-levels irrigation for winter wheat over two years were conducted during 2017—2019 in North China Plain in Hebei Province, China. Based on the two-year experiment, combined with the literature data of coupling irrigation with sowing dates of Wuqiao Experimental Station from 2011 to 2017. The development index of “wheat clock” model was used to quantitatively express the development phase of winter wheat. The effects of different sowing date and irrigation treatment on the dynamic characteristics of biomass accumulation were analyzed by Logistic mathematical model and establishment of biomass prediction model of winter wheat. Furthermore, winter wheat yield prediction model was established based on the biomass prediction model. The results showed that sowing date affected biomass accumulation by affecting rapid growth period of biomass accumulation. With the delay of sowing date, the rapid growth period was shortened, which made the biomass decreased. The difference of the maximum above-ground biomass caused by different irrigation treatment was mainly determined by the maximum growth rate of biomass, and the increase of irrigation amount helped to increase the maximum growth rate. The characteristics of biomass accumulation of winter wheat were different under different sowing date and irrigation treatments. According to the biomass and yield

收稿日期: 2020-11-17 修回日期: 2021-01-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300201、2016YFD0300105)

作者简介: 陈先冠(1994—),男,博士生,主要从事作物模型与智慧决策研究,E-mail: chenxianguan@cau.edu.cn

通信作者: 冯利平(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事农业模型、农业气象及气候变化与资源利用研究,E-mail: fenglp@cau.edu.cn

prediction model of winter wheat based on accumulated temperature before wintering and water supply amount in the growing season, the root mean square error (RMSE) and normalized root mean square error (NRMSE) of measured and simulated above-ground biomass of winter wheat were 1 980.2 kg/hm² and 15.7%, respectively, and the RMSE and NRMSE of measured and simulated yield were 839.7 kg/hm² and 10.6%, respectively. Logistic model based on development index can well simulate the biomass accumulation of winter wheat, and had a good simulation accuracy on yield under different sowing dates and irrigation conditions. Under adequate soil moisture conditions before sowing, the appropriate accumulated temperature before wintering was ranged from 200℃·d to 600℃·d, and the appropriate water supply amount in winter wheat growing season was between 200 mm and 450 mm. The research result can provide scientific basis for the reasonable control of sowing date and irrigation measures in North China, and provide ideas for the prediction of winter wheat yield under different sowing dates and irrigation conditions.

Key words: winter wheat; accumulated temperature before wintering; water supply amount; development index; Logistic model; dynamic characteristics of biomass

0 引言

播期和灌水调控是减轻气候变化影响、提高水分利用效率及实现粮食高产稳产的有效措施。过去几十年,我国华北地区小麦在品种更新、栽培管理措施改进和生产投入多条件下,产量持续增加^[1-2]。“双晚技术”即冬小麦晚播和夏玉米晚收是目前华北地区一项比较成熟的产量提升措施,WANG 等^[2]利用 APSIM 模型研究发现“双晚技术”可使华北地区小麦玉米周年产量提升 4%~6%。土壤水分条件是小麦生长发育的基础,在华北平原等水资源短缺地区,灌溉水直接决定着小麦产量的高低^[3-4];通过实施优化灌溉制度,把有限的灌溉水量在作物发育期内进行最优分配,达到高产和高水分利用效率的目的^[5-6]。在全球气候变暖和灌溉水资源日益紧缺的背景下,需要进一步明确栽培措施对冬小麦生物量及产量的定量影响并提高不同栽培措施条件下的产量预测精度,为合理调控播期灌水措施提供科学依据。

预测作物生长动态与产量形成既可以用复杂的作物模型,也可以用简单的生长方程^[7-9],前者可以综合反映基因型、环境和管理措施对作物生长的影响,但模型参数输入多且不容易获得,后者如 Chapman-Richards 函数、Gompertz 函数和 Logistic 模型,要求输入的数据少,方便使用,常用来描述作物的动态生长、株高动态及生物量积累等^[10-11]。Logistic 模型是常用的生长方程之一,能反映出不同栽培管理措施下的生物量积累动态特征^[12]。由于 Logistic 模型经常用特定地区的播种后时间驱动,导致其不同气候条件和不同播期的适用性差^[13],为了使其能更好地模拟作物生长过程,农业气象学家做了大量工作。王信理^[14]提出了叶面积指数(LAI)随发育时间变化的修正 Logistic 模型。于强

等^[15]在修正 Logistic 模型基础上统一时间尺度,使大田作物发育期在 0~1 之间变化,提出了基于干物质质量和发育时间的普适生长模型,并将其应用于水稻。李正鹏等^[16]利用基于积温的 Logistic 模型分析了水氮耦合下冬小麦 LAI 与株高的动态特征及其与产量的关系。赵姣等^[12]用 Logistic 模型对冬小麦干物质积累过程与相对积温之间的关系进行曲线估计,分析冬小麦干物质积累对产量的影响。基于活动积温的 Logistic 模型可以较好地模拟作物生长,但由于积温法考虑的因子简单且其假设发育速度与平均温度呈直线关系^[17],用积温法预测发育期的结果误差较大^[18]。对于特定的冬小麦品种,在不同光、温条件下,完成某一发育阶段的发育生理日数恒定,该方法较积温恒定更符合冬小麦的发育实际,能保证冬小麦各发育期的预测准确^[18]。因此,本文通过计算基于发育生理日数的发育指数,对冬小麦发育进程定量表达,并利用基于发育指数的 Logistic 模型对冬小麦不同发育期的生物量进行预测,并进一步建立冬小麦产量模型。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在河北省沧州市吴桥县姚庄村中国农业大学吴桥实验站(37°37'N,116°23'E)进行。试验地点位于海河平原的黑龙港地区中部,海拔 20 m,地下水位 6~9 m,为半湿润大陆性季风气候,1981—2014 年日平均温度 13.2℃,平均年降水量 542 mm,小麦生长季平均年降水量 117 mm^[19]。试验土壤为黏壤土。

1.2 数据来源

2011—2019 年逐日气象资料来自吴桥县气象局,主要包括:日最高温度(℃)、日最低温度(℃)、日照时数(h)和日降水量(mm)。

冬小麦分期播种试验于 2017 年 10 月开始至 2019 年 6 月结束,供试品种为济麦 22。2017—2018 年试验设置 5 个播期,3 个重复,小区面积 32.4 m²。播期分别为 10 月 6 日(D1)、10 月 16 日(D2)、10 月 23 日(D3)、10 月 30 日(D4)和 11 月 6 日(D5),播种量分别为 187.5、300、375、375、375 kg/hm²,行距 15 cm。播前浇底墒水,春季浇拔节水,灌水定额 75 mm。2018—2019 年试验增设 1 个播期,为 11 月 13 日(D6),播量为 375 kg/hm²,其他处理同 2017—2018 年试验。冬小麦水分试验于 2017 年 10 月开始至 2019 年 6 月结束,供试品种为济麦 22,于 10 月 23 日播种,播量为 375 kg/hm²,行距 15 cm。试验在足墒播种条件下设置 4 个春季灌水量处理,3 个重复,小区面积为 32.4 m²。4 个灌水量处理为春季不浇水(W0)、春季浇起身水(W1-1)、春季浇拔节水和开花水(W2)、春季浇起身水、孕穗水和开花水(W3),每次灌水定额 75 mm。播期与水分试验的栽培方式都参照小麦节水高产栽培技术^[20],施尿素 225 kg/hm²、磷酸二铵 300 kg/hm²、硫酸钾 225 kg/hm²,均作底肥一次性施入,春季不再追肥。小麦发育期观测参照《农业气象观测规范》,于越冬期、返青期、起身期、拔节期、孕穗期、开花期、乳熟期、成熟期在每个小区选取具有代表性的 0.5 m 双行样段取样,105℃ 下杀青 30 min 后于 75℃ 下干燥至质量恒定,计算各时期小麦地上部生物量。每小区取 1.8 m²进行测产,自然风干后脱粒测产,产量均以 13% 含水率计。

为验证本研究建立的模型,提取文献中吴桥实验站 2011—2017 年期间利用济麦 22 开展的播期与水分试验数据,主要包括播种期、春季灌水量、关键发育期的地上部生物量以及小麦产量(表 1)。利用 WebPlotDigitizer 软件从文献中提取数据,其放大功能使得数据提取精度非常高(<http://arohatgi.info/WebPlotDigitizer/>)。

表 1 吴桥实验站播期水分处理数据文献来源
Tab.1 Data sources for different treatments of sowing date and irrigation of winter wheat in Wuqiao

Experimental Station			
年份	品种	试验处理	文献序号
2011—2014	济麦 22	4 个播期×3 个灌水量	[21]
2012—2014	济麦 22	3 个灌水量	[19]
2013—2016	济麦 22	3 个灌水量	[22]
2016—2017	济麦 22	3 个灌水量	[23]

1.3 发育指数及冬前积温计算

1.3.1 “小麦钟”模型法

“小麦钟”模型是在“水稻钟”模型的基础上发

展得到的^[24],其表达式为

$$\frac{dM}{dt} = e^k T_E^p P_E^q f(E_C)$$

(1)

式中 M ——发育期或发育阶段的发育进程,完成时 M 为 1

t ——时间

k ——基本发育系数,由品种自身的遗传特性决定, k 大,说明该品种发育速度快,是早熟品种,反之则发育迟缓,表现晚熟

T_E ——温度效应因子,反映温度对小麦发育的非线性影响

p ——温度系数,反映品种在某一发育阶段内对温度反应的敏感性, p 大,说明在下限到最适温度范围内,增温对发育速度的促进作用大,反之则小

P_E ——光周期效应因子,反映光照对小麦发育的非线性影响

q ——光周期反应特征遗传系数,反映某品种在某一发育阶段内对光周期反应的敏感性, q 大,说明该品种对光周期的反应敏感,反之则钝感

E_C ——肥料、播种深度等可控栽培措施因子

1.3.2 发育生理日数

划分播种期、出苗期、拔节期、开花期、成熟期 5 个发育期,并分别用发育期指数(D_{Si}) 0、1、2、3、4 表示。由于种子萌发后便可进行春化作用^[25],因此本研究对“小麦钟”模型的春化阶段进行改进,设置春化阶段开始的发育期指数为 0,发育生理日数计算式为^[24]

$$N_o = \sum_{i=1}^L D_{PDi}$$

(2)

其中

$$D_{PDi} = \begin{cases} T_E^{p_1} & (0 < D_{Si} \leq 1) \\ V_E^{v_1} & (0 < D_{Si} \leq 2, \text{春化阶段}) \\ T_E^{p_2} P_E^{q_2} & (1 < D_{Si} \leq 2, \text{光照阶段}) \\ T_E^{p_3} & (2 < D_{Si} \leq 3) \\ T_E^{p_4} & (3 < D_{Si} \leq 4) \end{cases}$$

(3)

$$T_E = \begin{cases} \frac{T_{\text{mean}} - T_b}{T_o - T_b} & (T_b < T_{\text{mean}} \leq T_o) \\ 1 & (T_{\text{mean}} > T_o) \\ 0 & (T_{\text{mean}} \leq T_b) \end{cases}$$

(4)

$$V_E = \begin{cases} \frac{V_T - V_{Tb}}{V_{To1} - V_{Tb}} & (V_{Tb} < V_T \leq V_{To1}) \\ 1 & (V_{To1} < V_T \leq V_{To2}) \\ \frac{V_{Tm} - V_T}{V_{Tm} - V_{To2}} & (V_{To2} < V_T < V_{Tm}) \\ 0 & (V_T \leq V_{Tb}, V_T \geq V_{Tm}) \end{cases}$$

(5)

$$P_E = \begin{cases} \frac{P_L - P_{Lb}}{P_{Lo} - P_{Lb}} & (P_{Lb} < P_L \leq P_{Lo}) \\ 1 & (P_L > P_{Lo}) \\ 0 & (P_L \leq P_{Lb}) \end{cases} \quad (6)$$

式中 N_o ——发育生理日数
 D_{PDi} ——第 i 天的发育生理日
 T_{mean} ——日平均温度,℃
 T_b ——某一阶段内小麦生长发育的下限温度,播种-出苗、出苗-拔节、拔节-开花、开花-成熟阶段分别为 1、3、3、9℃
 T_o ——发育阶段内小麦生长的最适温度,播种-开花阶段为 20℃,开花-成熟阶段为 22℃
 V_E ——春化效应因子
 V_T ——春化温度,℃
 V_{Tb} ——春化下限温度,取 -4℃
 V_{To1} ——春化最适温度下限,取 3℃
 V_{To2} ——春化最适温度上限,取 7℃
 V_{Tm} ——春化上限温度,取 18℃
 $p_1、p_{21}、p_{22}、p_3、p_4$ ——不同发育阶段温度系数
 q_2 ——光周期系数
 P_L ——光长,包括曙暮光在内,为发育阶段内的平均光长,h
 P_{Lo} ——发育阶段的最适光长,取 18 h
 P_{Lb} ——发育阶段内的临界光长,取 8 h

1.3.3 发育指数

发育指数 D_{VI} 计算式为^[18]

$$D_{VI}(L) = \frac{\sum_{i=1}^L D_{PDi}}{\sum_{i=1}^Z D_{PDi}} \quad (7)$$

式中 $D_{VI}(L)$ ——播种后第 L 天的发育指数,反映了作物发育进程,取[0,1]
 Z ——播种-收获的天数

1.3.4 冬前积温

播种到越冬期大于 0℃ 的积温为冬前积温 W_{GDD} ^[21],计算式为

$$W_{GDD} = \sum_{i=1}^j T_{\text{mean}i} \quad (T_{\text{mean}i} > 0^{\circ}\text{C}) \quad (8)$$

式中 W_{GDD} ——冬前积温,℃·d
 $T_{\text{mean}i}$ ——播种后第 i 天的日平均温度,℃
 j ——播种到越冬期开始的天数

1.4 建模与检验方法

1.4.1 Logistic 模型

Logistic 模型为

$$y = \frac{a}{1 + b \exp(-cD_{VI})} \quad (9)$$

式中 y ——生物量
 $a、b、c$ ——模型待定参数

对 Logistic 模型求一阶导数可得到生物量积累速率方程,该方程是一连续变化的单峰曲线,曲线峰值即为最大积累速率,在其生物量积累速率方程的基础上再求导数(或对 Logistic 模型求二阶导数),并令其为零,可求出生物量最大积累速率出现时的发育指数 $T_{\text{max}} = \ln b / c$,此时最大速率为 $R_{\text{max}} = ac / 4$ 。对 Logistic 模型求三阶导数并令其等于零,可以得到生物量积累速率曲线上的 2 个拐点,2 个拐点对应的发育指数分别为 $x_1 = (\ln b - 1.317) / c$ 与 $x_2 = (\ln b + 1.317) / c$ 。 $[0, x_1]$ 和 $(x_2, 1]$ 为生物量积累速率的缓变期, $[x_1, x_2]$ 为生物量积累速率的快速生长期,即冬小麦生长旺盛期^[12]。

1.4.2 模型建立

利用 2017—2019 年两个小麦生长季的播期水分试验的地上部生物量确定 Logistic 模型参数 $a、b、c$ 。分析冬前积温、生长季供水量(灌水量 + 降水量) W_{IR} 与 Logistic 模型参数 $a、b、c$ 之间的关系,利用多元回归建立 $a、b、c$ 与冬前积温及生长季供水量的关系模型。利用多元回归建立产量与开花期和成熟期地上部生物量的关系模型。

1.4.3 模型验证

利用已建立的基于冬前积温及生长季供水量的 Logistic 模型参数估算模型获得参数 $a、b、c$,对 2011—2017 年吴桥实验站的冬小麦播期水分试验的各发育期地上部生物量进行模拟,进而利用模拟的开花期及成熟期的地上部生物量计算 2011—2017 年各处理的小麦产量。将地上部生物量与产量的预测值与实测值进行比较,评价模型性能。

1.5 数据统计分析

采用 OriginPro 8 软件对冬小麦不同发育期的发育指数和地上部生物量进行 Logistic 曲线拟合。采用均方根误差(Root mean squared error, RMSE)和归一化均方根误差(Normalized root mean squared error, NRMSE)对方程进行评估,RMSE 和 NRMSE 用来衡量模拟值与实测值之间的偏差,能够很好地反映出测量的精度:若 NRMSE 在 10% 以下,说明模型模拟效果精度很高;若 NRMSE 在 10% ~ 20%,说明模型模拟效果精度较高;若 NRMSE 在 20% ~ 30%,说明模型模拟效果精度中等;若 NRMSE 大于 30%,说明模型模拟效果精度差^[26]。

2 结果与分析

2.1 “小麦钟”模型的适应性评价及发育指数

基于 2017—2019 年冬小麦播期试验数据应用试错法对“小麦钟”模型进行调参,应用文献中 2011—2014 年冬小麦播期试验发育期数据进行模型验证,获得冬小麦品种济麦 22 模型参数(表 2)。

表 2 冬小麦品种济麦 22 不同发育阶段的模型参数
Tab.2 Parameters of various development phase models for winter wheat variety Jimai22

参数	阶段	数值
基本发育系数 k_1	$0 < D_{St} \leq 1$	-1.700
温度系数 p_1	$0 < D_{St} \leq 1$	1.000
基本发育系数 k_{21}	$0 < D_{St} \leq 2$	-3.254
温度系数 p_{21}	$0 < D_{St} \leq 2$	0.330
基本发育系数 k_{22}	$1 < D_{St} \leq 2$	-2.500
温度系数 p_{22}	$1 < D_{St} \leq 2$	0.752
光周期系数 q_2	$1 < D_{St} \leq 2$	0.650
基本发育系数 k_3	$2 < D_{St} \leq 3$	-2.965
温度系数 p_3	$2 < D_{St} \leq 3$	0.977
基本发育系数 k_4	$3 < D_{St} \leq 4$	-3.397
温度系数 p_4	$3 < D_{St} \leq 4$	1.242

验证结果表明,播种-拔节期、播种-开花期和播种-成熟期的模拟值和实测值的 RMSE 分别为 3.5、3.0、2.4 d, NRMSE 分别为 2.0%、1.6% 和 1.0% (图 1)。表明“小麦钟”模型能够较好地模拟冬小麦

不同播期的播种-拔节期、播种-开花期和播种-成熟期的时间。

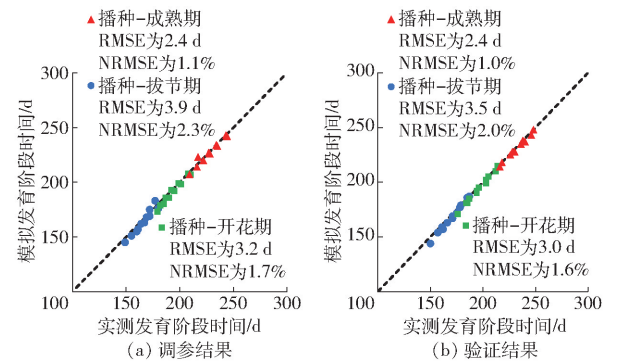


图 1 济麦 22 发育期的调参和验证结果
Fig.1 Comparison between simulated and observed growth periods of Jimai22 for calibration and validation

在不同温光条件下完成某一发育期的发育生理日数基本上是恒定的,通过得到的“小麦钟”模型参数计算济麦 22 各发育期的发育生理日数,进而计算出发育指数。济麦 22 拔节期、开花期和成熟期的发育生理日数分别为 43.55、62.94 和 92.82,冬小麦拔节期、开花期和成熟期的发育指数分别为 0.47、0.68 和 1。

2.2 基于发育指数的冬小麦干物质积累 Logistic 模型建立与分析

利用 Origin 自定义方程拟合曲线求得 Logistic 模型 a 、 b 、 c (表 3),每个试验处理的 Logistic 模型拟

表 3 冬小麦地上部生物量积累过程的 Logistic 模型参数和动态特征
Tab.3 Parameters of Logistic model on above-ground biomass accumulation in winter wheat

年份	处理	$W_{CDD}/$ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)	灌水量/ mm	Logistic 模型参数			R^2	特征参数			
				$a/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	b	c		$T_{\max}$	$R_{\max}/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	x_1	x_2
2017—2018	D1	575	75	18 330	126	7.766	0.99	0.623	35 589	0.453	0.792
	D2	437	75	16 108	348	9.362	0.99	0.625	37 701	0.484	0.766
	D3	329	75	16 339	618	9.619	0.99	0.668	39 289	0.531	0.805
	D4	240	75	13 656	6 408	13.409	0.99	0.654	45 777	0.556	0.752
	D5	160	75	14 236	7 966	13.093	0.98	0.686	46 597	0.586	0.787
	W0	329	0	15 608	291	8.535	0.99	0.665	33 302	0.511	0.819
	W1-1	329	75	15 710	414	9.514	0.99	0.633	37 365	0.495	0.772
	W2	329	150	18 788	331	8.319	0.99	0.697	39 074	0.539	0.856
2018—2019	W3	329	225	17 108	360	8.862	0.99	0.664	37 905	0.516	0.813
	D1	632	75	19 187	213	10.203	0.99	0.525	48 940	0.396	0.655
	D2	484	75	19 818	251	9.303	0.98	0.594	46 092	0.452	0.735
	D3	387	75	17 280	932	10.640	0.98	0.643	45 964	0.519	0.766
	D4	301	75	14 071	3 313	12.624	0.99	0.642	44 410	0.538	0.746
	D5	220	75	14 088	10 405	13.341	0.99	0.693	46 989	0.595	0.792
	D6	157	75	13 334	11 615	15.104	0.99	0.620	50 350	0.533	0.707
	W0	387	0	9 419	303	10.486	0.96	0.545	24 691	0.419	0.671
	W1-1	387	75	16 767	832	11.399	0.99	0.590	47 784	0.474	0.705
	W2	387	150	18 796	1 155	10.758	0.97	0.656	50 549	0.533	0.778
	W3	387	225	18 776	629	10.425	0.98	0.618	48 935	0.492	0.745

合的 R^2 均不小于 0.96,说明 Logistic 模型可用于描述小麦生物量的积累过程。在 Logistic 模型中,当 D_{VI} 趋于 1 时, y 趋近于 a ; a 可以用来代表生物量的最大积累量,而 b 、 c 共同决定着生物量最大积累速率出现时的发育指数, a 、 c 共同决定着生物量最大积累速率, b 、 c 共同决定着冬小麦生长旺盛期的开始和结束时间。不同播期水平和灌溉水平下 a 、 b 、 c

差异明显。由图 2c 可以看出,模拟和实测的地上部生物量较均匀地分布在 1:1 线附近,其中模拟与实测地上部生物量的 RMSE 和 NRMSE 分别为 648.6 kg/hm² 和 10.1%。基于发育指数的 Logistic 模型对地上部生物量模拟精度很高,可以进一步分析不同播期与水分处理对地上部生物量积累过程的影响。

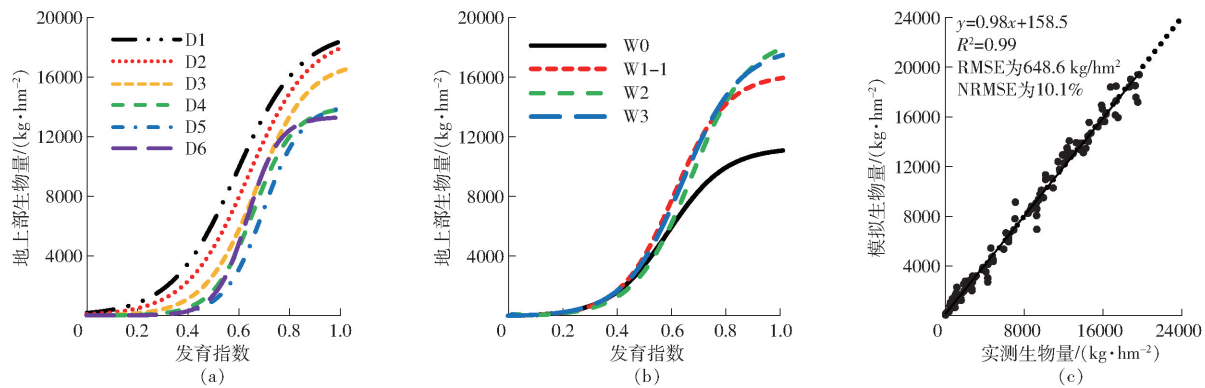


图 2 生物量积累变化曲线与 Logistic 模型调参结果

Fig. 2 Dynamic process curves of biomass accumulation and comparison between simulated and observed biomass of winter wheat for Logistic model calibration

在 6 个播期水平下,随播期的推迟,地上部生物量减少,由 D1 的 18 759 kg/hm² 降低至 D6 的 13 334 kg/hm² (表 3);各播期冬小麦生长旺盛期开始的发育指数随播期的推迟而增大,由 D1 的 0.425 增大到 D5 的 0.591,而冬小麦生长旺盛期结束的发育指数各处理间差异不明显,由此可见,各播期的冬小麦生长旺盛期随播期的推迟而缩短(表 3,图 2);随播期的推迟,生物量最大积累速率出现时的发育指数变大,生物量最大积累速率增加(表 3,图 2)。

4 个灌水水平下,随灌水量的增加,地上部生物量积累量呈先增加后下降趋势,其中 W0 处理的最大生物量最小,为 12 513 kg/hm²,W2 处理的最大生物量最大,为 18 792 kg/hm²,W3 处理的生物量略小于 W2 处理(表 3)。不同灌水处理造成的地上部最大生物量的差异主要是由生物量的最大积累速率决定,灌水量的增加有助于最大积累速率的增大(表 3,图 2)。

2.3 Logistic 模型参数估算模型与产量模型

Logistic 模型参数 a 、 b 、 c 与冬前积温 W_{GDD} 及生长季供水量(灌水量 + 降水量) W_{IR} 的多元回归结果为

$$a = 2.621W_{GDD}\ln W_{IR} + 9.974\ln W_{IR} - 39.57W_{IR} - 32.350$$
$$(R^2 = 0.58, P = 0.001) \tag{10}$$

$$b = 174.526.56e^{-0.01416W_{GDD}} \quad (R^2 = 0.74, P < 0.001) \tag{11}$$

$$c = -4.795\ln W_{GDD} - 0.0012W_{IR}\ln W_{GDD} + 40.321$$
$$(R^2 = 0.78, P < 0.001) \tag{12}$$

对各处理的花前及花后的地上部生物量与产量之间作线性回归分析,得到产量模型

$$Y_G = 0.7082(B_M - B_F) + 0.3105B_F - 0.5521$$
$$(R^2 = 0.70, P < 0.001) \tag{13}$$

式中 Y_G ——籽粒产量,kg/hm²
 B_M ——成熟期生物量,kg/hm²
 B_F ——开花期生物量,kg/hm²

2.4 模型验证

采用 2011—2017 年文献中实测地上部生物量,验证 Logistic 模型的预测值(图 3,图中 W1-2 为春浇拔节水)。2012—2014 生长季地上部生物量预测值与实测值较一致,表明该模型对不同年份 W0、W1-2 及 W2 处理不同发育期的地上部生物量预测较好。为了评价 Logistic 模型预测地上部生物量的结果,将 2011—2017 年预测和实测的地上部生物量进行比较, RMSE 和 NRMSE 分别为 1 980.2 kg/hm² 和 15.7% (图 3g),表明地上部生物量的预测精度较高。

为了评价产量模型预测产量的结果,将 2011—2017 年不同处理预测和实测的产量进行比较, RMSE 和 NRMSE 分别为 839.7 kg/hm² 和 10.6%,表明产量的预测精度较高(图 3h)。

2.5 冬小麦适宜播期和供水量

基于建立的产量模型分析冬前积温和生长季供水量对冬小麦产量的影响(图 4,图中产量单位

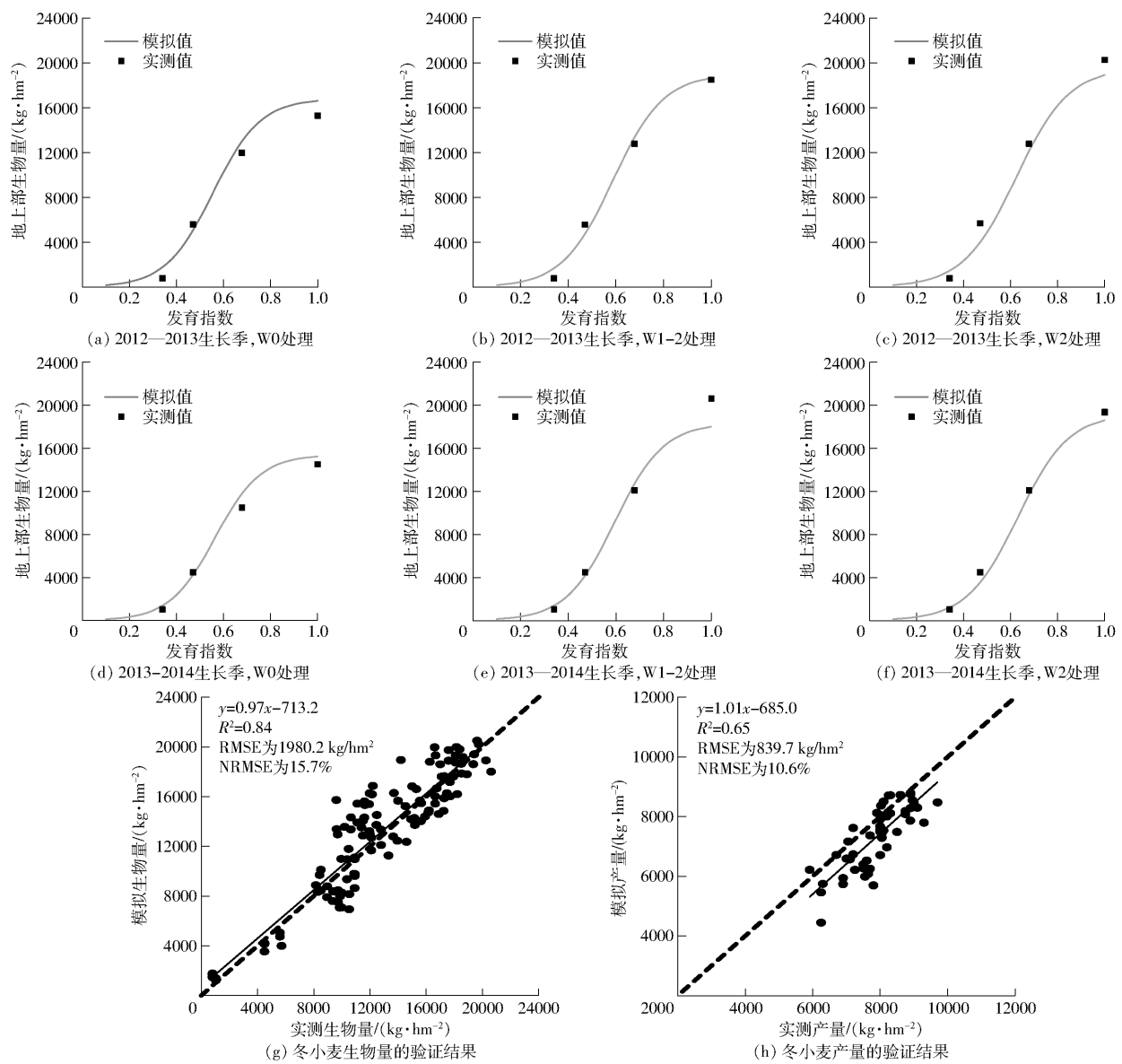


图 3 冬小麦地上部生物量和产量的验证结果

Fig. 3 Comparison between simulated and observed above-ground biomass of winter wheat for validation

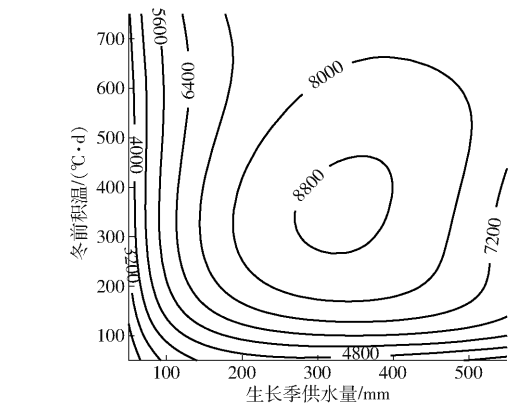


图 4 冬前积温和生长季供水量对冬小麦产量的影响

Fig. 4 Impacts of accumulated temperature before wintering and water supply amount in growing season on grain yield of winter wheat

为 kg/hm²), 以高于最高产量的 90% 确定最适宜的冬前积温和生长季供水量。足墒播种条件下, 冬小

麦冬前积温在 200 ~ 600℃·d 之间, 生长季供水量在 200 ~ 450 mm 之间, 可获得最高产量, 产量在 8 000 ~ 8 900 kg/hm² 之间。相比于适宜供水量, 生长季供水量 50 mm 的冬小麦减产 50%, 若小麦生长季(10 月—5 月)降水量无法满足供水需求, 需补充灌水以减少产量损失。相比于适宜播期, 冬小麦早播和晚播都会导致减产, 早播减产幅度较小, 在 10% 左右, 超晚播减产幅度较大, 在 30% 以上。

3 讨论

不同播期下, 冬小麦的生物量积累特征不同, 因此针对不同播期进行生产管理时需对栽培管理措施进行一定的调整, 使其适应冬小麦生长规律。灌水有助于冬小麦生物量最大积累速率的增大, 冬小麦群体偏小时, 可采取灌水措施, 减小水分胁迫, 增大生物量的积累速率, 为高产打下基础。Logistic 模型

可用于分析小麦、水稻和玉米等作物的生物量积累动态变化特征,但在不同品种、栽培措施和技术条件下,其方程参数差异性较大,通用性不强。通过归一化处理,可以在一定程度上消除年际间积温、播期、品种及密度差异^[12,27]。赵姣等^[12]将冬小麦播种至成熟大于0℃的积温归一化处理,对归一化的积温与生物量之间用 Logistic 模型模拟,得到干物质积累过程的特征参数。但由于积温法无法准确预测冬小麦发育期,导致采用积温归一化处理方法建立的 Logistic 模型在预测冬小麦特定发育期的地上部生物量效果较差,而当前的栽培管理措施很大程度上是根据发育期而制定的,因此需要提升对不同栽培措施条件下冬小麦不同发育期生物量的预测效果。本研究基于“小麦钟”模型的发育指数建立冬小麦生物量的预测方程,可实现对不同发育期地上部生物量进行预测,预测效果较好。但由于生物量积累受土壤、气象、品种及栽培管理措施等各种因素影响很大,模型关系还需进一步完善。

作物产量的形成与生物量密切相关,尤其是花前及花后的地上部生物量与产量显著正相关。利用建立的生物量预测模型,预测冬小麦开花期与成熟期的生物量,然后建立产量模型,预测和实测产量的 NRMSE 不大于 10.6%,预测效果较好。模型中,冬小麦产量等于花前生物量的 31% 与花后生物量的 71% 相加,可见无论是改善作物群体提升开花期生物量,还是提升籽粒库容量都对提升产量具有重要作用。不同品种花前与花后的生物量对籽粒产量的贡献率不同,因此需进一步研究不同品种基于花前与花后生物量的冬小麦产量预测模型,以提升该模型的适用性。本研究所得到的冬小麦适宜播期和适宜供水量是基于吴桥实

验站小麦节水高产栽培技术^[20],适用于“足墒播种,晚播增密”条件,针对不同底墒条件还有待进一步研究;试验年份没有发生越冬冻害,由于晚播小麦抗冻能力较差,对于越冬冻害风险高的地区,播种期应在本文最迟适宜播种期的基础上适当提早,以保证冬前壮苗,提高抗冻能力。

4 结论

(1)随播期的推迟,冬小麦生长旺盛期缩短而使生物量减小,生物量由 D1 的 18 759 kg/hm²降低到 D6 的 13 334 kg/hm²;随灌水量的增加,生物量的最大积累速率呈先增加后下降趋势,导致生物量呈现相应的变化趋势,生物量由 W0 的 12 513 kg/hm²增加到 W2 处理的 18 792 kg/hm²,W3 处理的生物量略小于 W2 处理。

(2)“小麦钟”模型能够较准确地模拟不同播期冬小麦的发育进程。基于发育指数的 Logistic 模型可以较为准确地模拟冬小麦各发育期的地上部生物量,冬小麦地上部生物量的实测值和模拟值吻合较好。

(3)建立的基于冬前积温和生长季供水量的 Logistic 模型参数估算模型,能够较好地模拟冬小麦各发育期的地上部生物量。冬小麦地上部生物量的实测值和模拟值的 RMSE 和 NRMSE 分别为 1 980.2 kg/hm²和 15.7%;建立的基于冬小麦花前及花后地上部生物量的产量模型能够较好地预测小麦产量,冬小麦产量实测值和模拟值的 RMSE 和 NRMSE 分别为 839.7 kg/hm²和 10.6%。

(4)足墒播种条件下,冬小麦适宜冬前积温为 200 ~ 600℃·d,生长季的适宜供水量为 200 ~ 450 mm;适宜播期和供水条件下,冬小麦产量为 8 000 ~ 8 900 kg/hm²。

参 考 文 献

- [1] LIU Y, WANG E, YANG X, et al. Contributions of climatic and crop varietal changes to crop production in the North China Plain, since 1980s[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(8):2287–2299.
- [2] WANG J, WANG E, YANG X, et al. Increased yield potential of wheat-maize cropping system in the North China Plain by climate change adaptation[J]. *Climatic Change*, 2012, 113(3–4):825–840.
- [3] FAN Y, WANG C, NAN Z. Determining water use efficiency of wheat and cotton: a meta-regression analysis[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 199(8):48–60.
- [4] LI J, INANAGA S, LI Z, et al. Optimizing irrigation scheduling for winter wheat in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 76(1):8–23.
- [5] 王德梅,于振文.灌溉量和灌溉时期对小麦耗水特性和产量的影响[J].*应用生态学报*,2008,19(9):1965–1970.
WANG Demei, YU Zhenwen. Effects of irrigation amount and stage on water consumption characteristics and grain yield of wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9):1965–1970. (in Chinese)
- [6] XU C, TAO H, TIAN B, et al. Limited-irrigation improves water use efficiency and soil reservoir capacity through regulating root and canopy growth of winter wheat[J]. *Field Crops Research*, 2016, 196:268–275.
- [7] 杜文勇,何雄奎,SHAMAILA Z,等.冬小麦生物量和产量的 AquaCrop 模型预测[J].*农业机械学报*,2011,42(4):174–178,183.
DU Wenyong, HE Xiongkui, SHAMAILA Z, et al. Yield and biomass prediction testing of AquaCrop model for winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(4):174–178, 183. (in Chinese)
- [8] 王全九,刘云鹤,苏李君.基于单参数 Logistic 的典型作物相对叶面积指数模型研究[J/OL].*农业机械学报*,2020,51(7):210–219.

- WANG Quanjiu, LIU Yunhe, SU Lijun. Relative leaf area index of typical crops based on single parameter Logistic model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 210–219. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200724&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.024. (in Chinese)
- [9] 王全九, 蔺树栋, 苏李君. 马铃薯主要生长指标对有效积温响应的定量分析[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 306–316. WANG Quanjiu, LIN Shudong, SU Lijun. Quantitative analysis of response of potato main growth index to growing degree days [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 306–316. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200335&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.035. (in Chinese)
- [10] 刘凤丽, 彭世彰. 节水灌溉的水稻干物质积累 C-R 模型研究[J]. 节水灌溉, 2006(6): 1–6. LIU Fengli, PENG Shizhang. Study on Chapman-Richards model of rice dry matter accumulation under water saving irrigation [J]. Water Saving Irrigation, 2006(6): 1–6. (in Chinese)
- [11] PRASAD T V R, KRISHNAMURTHY K, KAILASAM C. Functional crop and cob growth models of maize (*Zea mays* L.) cultivars[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 1992, 168(3): 208–212.
- [12] 赵姣, 郑志芳, 方艳茹, 等. 基于动态模拟模型分析冬小麦干物质积累特征对产量的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(2): 300–308. ZHAO Jiao, ZHENG Zhifang, FANG Yanru, et al. Effect of dry matter accumulation characteristics on yield of winter wheat analyzed by dynamic simulation model[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(2): 300–308. (in Chinese)
- [13] MAHBOD M, SEPASKHAH A R, ZAND-PARSA S. Estimation of yield and dry matter of winter wheat using Logistic model under different irrigation water regimes and nitrogen application rates[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2014, 60(12): 1–16.
- [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[J]. 农业气象, 1986, 7(1): 14–19.
- [15] 于强, 傅抱璞, 姚克敏. 水稻叶面积指数的普适增长模型[J]. 中国农业气象, 1995, 16(2): 6–8. YU Qiang, FU Baopu, YAO Kemin. A generalized growth model of rice leaf area index [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 1995, 16(2): 6–8. (in Chinese)
- [16] 李正鹏, 宋明丹, 冯浩. 水氮耦合下冬小麦 LAI 与株高的动态特征及其与产量的关系[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 195–202. LI Zhengpeng, SONG Mingdan, FENG Hao. Dynamic characteristics of leaf area index and plant height of winter wheat influenced by irrigation and nitrogen coupling and their relationships with yield[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4): 195–202. (in Chinese)
- [17] 殷新佑. 对预测作物发育的积温法的评价[J]. 作物学报, 1999, 25(4): 474–482. YIN Xinyou. A critical appraisal of thermal time approach for predicting crop development[J]. Acta Agronomica Sinica, 1999, 25(4): 474–482. (in Chinese)
- [18] 高亮之. 水稻栽培计算机模拟优化决策系统[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1992: 21–26.
- [19] 周丽丽. 基于 CERES 模型的华北地区冬小麦-夏玉米周年土壤水分动态模拟及水利用特性分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2015. ZHOU Lili. Dynamic simulation of soil water utilization analysis for winter wheat-summer maize rotation system in North China Plain on CERES model[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [20] 王志敏, 王璞, 李绪厚, 等. 冬小麦节水省肥高产简化栽培理论与技术[J]. 中国农业科技导报, 2006, 8(5): 38–44. WANG Zhimin, WANG Pu, LI Xuhou, et al. Principle and technology of water-saving, fertilizer-saving, high-yielding and simple cultivation in winter wheat[J]. Review of China Agricultural Science and Technology, 2006, 8(5): 38–44. (in Chinese)
- [21] 王彬. 限水灌溉下极端晚播冬小麦的产量形成与水氮利用特征[D]. 北京: 中国农业大学, 2016. WANG Bin. Characteristics of yield formation and water-nitrogen use in extremely-late sown winter wheat with increased seeding rate under limited irrigation[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [22] 徐学欣. 冬小麦节水高产灌溉模式的源-库性能及其协调机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2018. XU Xuexin. Performance and coordination of source and sink system in winter wheat under water-saving and high-yielding irrigation patterns[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [23] 刘松源. 水氮运筹对冬小麦粒重的调控研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018. LIU Songyuan. Effect of irrigation and nitrogen management on grain weight of winter wheat[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [24] 冯利平, 高亮之, 金之庆, 等. 小麦发育期动态模型的研究[J]. 作物学报, 1997, 23(4): 418–424. FENG Liping, GAO Liangzhi, JIN Zhiqing, et al. Studies on the simulation model for wheat phenology[J]. Acta Agronomica Sinica, 1997, 23(4): 418–424. (in Chinese)
- [25] 陈满霞, 蒋玉蓉, 於金生. 小麦春化作用研究进展[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(24): 6–12. CHEN Manxia, JIANG Yurong, YU Jinsheng. Research progress of vernalization of wheat[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(24): 6–12. (in Chinese)
- [26] 程陈, 冯利平, 薛庆禹, 等. 日光温室黄瓜生长发育模型[J]. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3491–3500. CHENG Chen, FENG Liping, XUE Qingyu, et al. Simulation model for cucumber growth and development in sunlight greenhouse[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(10): 3491–3500. (in Chinese)
- [27] 张旭东, 蔡焕杰, 付玉娟, 等. 黄土区夏玉米叶面积指数变化规律的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(2): 25–29. ZHANG Xudong, CAI Huanjie, FU Yujuan, et al. Study on leaf area index of summer maize in loess areas[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(2): 25–29. (in Chinese)