

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

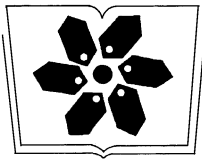
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第17期 Vol.32 No.17 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 17 期

2012 年 9 月 (半月刊)

目 次

基于生物生态因子分析的长序榆保护策略.....	高建国,章 艺,吴玉环,等 (5287)
闽江口芦苇沼泽湿地土壤产甲烷菌群落结构的垂直分布.....	余晨兴,仝 川 (5299)
涡度相关观测的能量闭合状况及其对农田蒸散测定的影响.....	刘 渡,李 俊,于 强,等 (5309)
地下滴灌下土壤水势对毛白杨纸浆林生长及生理特性的影响.....	席本野,王 焯,邸 楠,等 (5318)
绿盲蝽危害对枣树叶片生化指标的影响.....	高 勇,门兴元,于 毅,等 (5330)
湿地资源保护经济学分析——以北京野鸭湖湿地为例.....	王昌海,崔丽娟,马牧源,等 (5337)
湿地保护区周边农户生态补偿意愿比较.....	王昌海,崔丽娟,毛旭峰,等 (5345)
湿地翅碱蓬生物量遥感估算模型.....	傅 新,刘高焕,黄 舸,等 (5355)
增氮对青藏高原东缘典型高寒草甸土壤有机碳组成的影响.....	郑娇娇,方华军,程淑兰,等 (5363)
大兴安岭 2001—2010 年森林火灾碳排放的计量估算.....	胡海清,魏书精,孙 龙 (5373)
基于水分控制的切花百合生长预测模型.....	董永义,李 刚,安东升,等 (5387)
极端干旱区增雨加速泡泡刺群落土壤碳排放.....	刘殿君,吴 波,李永华,等 (5396)
黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应.....	许明祥,王 征,张 金,等 (5405)
小兴安岭 5 种林型土壤呼吸时空变异	史宝库,金光泽,汪兆洋 (5416)
疏勒河上游土壤磷和钾的分布及其影响因素.....	刘文杰,陈生云,胡凤祖,等 (5429)
COII 参与茉莉酸调控拟南芥吲哚族芥子油苷生物合成过程	石 璐,李梦莎,王丽华,等 (5438)
Gash 模型在黄土区人工刺槐林冠降雨截留研究中的应用	王艳萍,王 力,卫三平 (5445)
三峡水库消落区不同海拔高度的植物群落多样性差异.....	刘维湄,王 杰,王 勇,等 (5454)
基于 SPEI 的北京低频干旱与气候指数关系	苏宏新,李广起 (5467)
山地枣树茎直径对不同生态因子的响应.....	赵 英,汪有科,韩立新,等 (5476)
幼龄柠条细根的空间分布和季节动态	张 帆,陈建文,王孟本 (5484)
山西五鹿山白皮松群落乔灌木层的种间分离.....	王丽丽,毕润成,闫 明,等 (5494)
长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响.....	马晓霞,王莲莲,黎青慧,等 (5502)
基于归一化法的小麦干物质积累动态预测模型.....	刘 娟,熊淑萍,杨 阳,等 (5512)
上海环城林带景观美学评价及优化策略	张凯旋,凌焕然,达良俊 (5521)
旅游风景区旅游交通系统碳足迹评估——以南岳衡山为例.....	窦银娣,刘云鹏,李伯华,等 (5532)
一种城市生态系统现状评价方法及其应用.....	石惠春,刘 伟,何 剑,等 (5542)
黄海中南部细纹狮子鱼的生物学特征及资源分布的季节变化.....	周志鹏,金显仕,单秀娟,等 (5550)
蓝藻堆积和螺类牧食对苦草生长的影响.....	何 虎,何宇虹,姬娅婵,等 (5562)
黑龙江省黄鼬冬季毛被分层结构及保温功能.....	柳 宇,张 伟 (5568)
虎纹蛙选择体温和热耐受性在个体发育过程中的变化	樊晓丽,雷焕宗,林植华 (5574)
水丝蚓对太湖沉积物有机磷组成及垂向分布的影响	白秀玲,周云凯,张 雷 (5581)
专论与综述	
城市绿地生态评价研究进展.....	毛齐正,罗上华,马克明,等 (5589)
全球变化背景下生态学热点问题研究——第二届“国际青年生态学者论坛”	万 云,许丽丽,耿其芳,等 (5601)
研究简报	
雅鲁藏布江高寒河谷流动沙地适生植物种筛选和恢复效果.....	沈渭寿,李海东,林乃峰,等 (5609)
学术信息与动态	
生态系统服务时代的来临——第五届生态系统服务伙伴年会述评	吕一河,卫 伟,孙然好 (5619)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 334 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2012-09	



封面图说: 带雏鸟的白枕鹤一家——白枕鹤是一种体型略小于丹顶鹤的优美的鹤。体羽蓝灰色,腹部较深,背部较浅,脸颊两侧红色,头和颈的后部及上背为白色,雌雄相似。其虹膜暗褐色,嘴黄绿色,脚红色。白枕鹤常常栖息于开阔平原芦苇沼泽和水草沼泽地带,有时亦出现于农田和海湾地区,尤其是迁徙季节。主要以植物种子、草根、嫩叶和鱼、蛙、软体动物、昆虫等为食。繁殖区在我国北方和西伯利亚东南部。我国白枕鹤多在黑龙江、吉林、内蒙古繁殖,与丹顶鹤的繁殖区几乎重叠,为国家一级保护动物。

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

DOI: 10.5846/stxb201112041853

刘娟, 熊淑萍, 杨阳, 翟清云, 王严峰, 王静, 马新明. 基于归一化法的小麦干物质积累动态预测模型. 生态学报, 2012, 32(17): 5512-5520.

Liu J, Xiong S P, Yang Y, Zhai Q Y, Wang Y F, Wang J, Ma X M. A model to predict dry matter accumulation dynamics in wheat based on the normalized method. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5512-5520.

基于归一化法的小麦干物质积累动态预测模型

刘娟, 熊淑萍, 杨阳, 翟清云, 王严峰, 王静, 马新明*

(河南农业大学农学院/河南省粮食作物生理生态与遗传改良重点实验室, 郑州 450002)

摘要:为探讨基于归一化法的不同分蘖力小麦品种干物质积累动态预测模型和参数特征, 实现不同小麦品种干物质积累的有效预测, 以 3 个分蘖力不同的小麦品种(豫麦 49-198、兰考矮早 8 和偃展 4110)为材料, 对 3 个密度(75、225 和 375 万株/hm²)下的干物质积累动态进行了研究。结果表明, 高成穗率小麦品种(豫麦 49-198 和偃展 4110)的干物质重均以 375 万株/hm² 密度最高, 而分蘖力高成穗率低的小麦品种(兰考矮早 8)以 225 万株/hm² 最高。建立的基于相对干物质积累量和相对积温的干物质积累预测模型中最佳模型方程式为 $y = 1.1435 / (1 + e^{0.2776 - 4.6558x})^{1/0.1130}$, $r = 0.9927$, 可较好地小麦干物质积累动态进行模拟。通过对小麦干物质积累模型的特征参数分析发现, 干物质积累过程可划分为前、中和后期 3 个阶段, 且干物质积累平均速率与最终干物质重呈极显著正相关, 较高的干物质积累平均速率对小麦干物质重的稳定和提高都有十分重要的作用。

关键词:小麦; 分蘖力; 密度; 干物质积累; 模型

A model to predict dry matter accumulation dynamics in wheat based on the normalized method

LIU Juan, XIONG Shuping, YANG Yang, ZHAI Qingyun, WANG Yanfeng, WANG Jing, MA Xinming*

Key Laboratory of Physiology, Ecology and Genetic Improvement of Food Crops in Henan Province/ College of Agronomy, Henan Agriculture University, Zhengzhou 450002, China

Abstract: Dry matter accumulation plays an important role in the wheat yield. Under field condition, wheat cultivars with different tillering abilities have different dry matter accumulation characteristics. So it has great significance to realize the simulation and prediction of wheat dry matter accumulation process. Simulation models can quantitatively describe dry matter accumulation, and the equation based on the normalized method is widely applicable. Accumulated temperature is superior to time parameters as the variable of the prediction model. To investigate a model to simulate wheat dry matter accumulation, three wheat cultivars (Yumai 49-198, Lankaoaizao 8, and Yanzhan 4110) with different tillering abilities were grown at three densities each (750000, 2250000 and 3750000 plants/hm²) in a field experiment. The dry matter accumulation of wheat varieties with higher ear-bearing tiller percentages (YM49-198 and YZ4110) were highest at a density of 3750000 plants/hm², while that of the variety with a lower ear-bearing tiller percentage (LKAZ8) peaked at 2250000 plants/hm². The dry matter accumulation of different varieties differed with density, therefore a suitable density should be chosen for each variety to maximize dry matter accumulation in wheat production. Five simulation models with high correlation coefficients for relative dry matter accumulation were established using normalized accumulated temperature and dry matter accumulation. We tested five models, and the optimal model was found through the limit of all the equations. The best predictive model for dry matter accumulation was the Richard curve equation, i. e., $y = 1.1435 / (1 + e^{0.2776 - 4.6558x})^{1/0.1130}$.

基金项目: 行业(农业)科研专项(201103001); 河南现代农业产业技术体系(S2010-01-G04)

收稿日期: 2011-12-04; 修订日期: 2012-05-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xinmingma@126.com

$e^{(0.2776-4.6558x)^{1/0.1130}}$, $r = 0.9927$, and its characteristic parameters were calculated based on the relative dry matter accumulation model. This Richard equation had relatively small parameters and a straightforward biological interpretation. Normalization overcame changes in model parameters caused by different cultivation techniques and varieties and improved the versatility of the model. The values of parameters b and c changed dramatically among varieties and densities, while parameters a and d varied only slightly. The model was tested with relative dry matter accumulation data from 2010—2011; the correlation coefficient r of simulated dry matter accumulation was above 0.98 **, and the accuracy K was above 0.91 **, showing that this model could accurately predict dry matter accumulation. This model simulated dry matter accumulation of wheat using accumulated temperature in any growth period and predicted well the actual wheat production, making it highly suitable for practical use.

Overall, dry matter accumulation could be divided into early, middle, and late phases based on the two inflexion points in the rate equation. The dry matter accumulation rate was very sensitive to density in the middle phase. The relative accumulated temperature was 0.53 at the maximum dry matter accumulation rate, when the dry matter weight was about one-half of the total weight. These data indicated the importance to improving wheat yields of enhancing field management in the early growth phases, including the cultivation of sound seedlings and the construction of appropriate populations. The average rates of dry matter accumulation were highly significantly correlated with dry matter weight, and they were the most important factor influencing dry matter accumulation according to path analysis. Higher average rates of dry matter accumulation had significant effects on stabilizing and increasing the dry matter weight of wheat.

Key Words: wheat; tillering ability; density; dry matter accumulation; simulation model

小麦是我国重要的粮食作物之一,其产量的95%以上源于光合作用。干物质是小麦光合作用的最终产物,与产量形成密切相关^[1-3]。小麦干物质积累受多种栽培因素的调节和控制,其中密度是影响小麦生长发育和产量的重要因素^[4],研究明确密度与干物质积累之间的关系对于实现小麦高产或超高产具有重要意义。小麦一生中干物质积累量呈“S”形变化,且不同密度下差异明显^[5]。低密度群体干物质在各生育期的积累量均较低;高密度群体则表现为前期积累量较高,而后期明显下降^[6]。郭天财等^[7]认为,随着种植密度增大,小麦单株茎蘖干物质积累量显著降低。不同品种小麦分蘖力和成穗率差异明显,是造成品种间干物质积累和产量形成差异的重要原因。因此,有必要针对不同分蘖力的小麦品种,深入研究干物质积累动态的演变规律。

作物模拟技术可对作物生长过程进行定量描述,干物质积累模拟模型是作物生长模拟系统的重要组成部分^[8]。作物机理性干物质模型通常由光合作用、呼吸作用和干物质积累子模型等构成,目前,国内外已经建立了若干小麦光合生产和干物质积累的模拟模型^[9-11],但大多机理性较强,且参数较多而难以获取,因此实用性受到明显限制。经验性模型大多都采用 Richards 或 Logistic 方程来模拟小麦干物质积累的过程^[12-13],如任红松^[14]与吴少辉^[15]分别采用 Richards 方程和 Logistic 方程,并以花后天数为自变量,对籽粒生长和灌浆过程进行模拟,进而分析了灌浆参数变异及其与粒重的关系。但有研究认为,用积温等生态变量替代时间变量作为衡量作物生长发育过程的时标要比直接用天数更具有代表性,能更好的反映作物生长状况^[16]。本研究在田间试验的基础上,采用“归一化”方法^[17],并选用积温为时标,建立适用于不同密度和分蘖力的小麦干物质积累动态模型,以期弄清密度和分蘖力与小麦干物质积累之间的动态关系,为小麦生长预测和高产栽培提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2009—2011年在河南农业大学科教示范园区进行。试验地土壤为潮土,前茬为玉米,0—20 cm 土层中有机质含量 12.15 g/kg,碱解氮 71.50 mg/kg,速效磷 16.35 mg/kg,速效钾 150.89 mg/kg。每公顷施纯 N 225 kg, P₂O₅ 158 kg, K₂O 90 kg,其中 50% 的氮肥与磷、钾肥一起作为底肥施入,其余 50% 氮肥于拔节期结

合浇水追施。小麦生育期内防治病虫害。田间管理按高产麦田进行。两年试验方案一致,均采用二因素随机区组设计,A 因素为品种,B 因素为密度,品种选用 3 个分蘖力不同的小麦品种,即:豫麦 49-198(YM49-198,分蘖力中等成穗率高)、兰考矮早 8(LKAZ8,分蘖力强成穗率低)、偃展 4110(YZ4110,分蘖力强成穗率高);密度设置 3 个水平: $75 \times 10^4/\text{hm}^2$ (低密度)、 $225 \times 10^4/\text{hm}^2$ (中密度)、 $375 \times 10^4/\text{hm}^2$ (高密度),分别用 D1、D2、D3 表示,共 9 个处理,采用条播,3 次重复,随机排列。小区面积 15 m^2 ,每小区 23 行,行距 18 cm。2009 年于 10 月 14 日播种,2010 年于 10 月 15 日播种。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 干物质积累动态

在小麦三叶期,选取生长一致的 200 株麦苗挂牌标记。自三叶期至越冬期每隔 10d 取样,越冬期至返青期每隔 30d 取样,返青期至成熟期每隔 10d 取样,每次选取 10—20 株进行干物质测定。样品取回后置于 105°C 烘箱内杀青,再于 70°C 下烘干至恒重,最后称重,计算单位土地面积地上部干物质积累量(Dry matter accumulation, DMA)。

1.3 气象资料

气象资料来源于河南省气象局,主要包括小麦生育期间逐日极端最高气温($T_{i\max}$)、极端最低气温($T_{i\min}$)等。第 i 天日均温(T_i)的计算方法: $T_i = (T_{i\max} + T_{i+1\min})/2$, $T_{i\max}$ 和 $T_{i+1\min}$ 为 i 天的极端最高气温和 $i+1$ 天的极端最低气温。第 i 天积温(AT_i)的计算公式为: $AT_i = \sum T_i$,当第 i 天的日均温 $T_i \leq 0^\circ\text{C}$ 或 $\geq 35^\circ\text{C}$ 时, $T_i = 0$ ^[18]。

1.4 数据归一化处理

应用 2009—2010 年试验数据,采用归一化方法^[17],将 3 种密度下最大的干物质积累量($DMA_{\max}$)和出苗至成熟所需要的积温值($AT_{\max}$)分别定为 1,可得到各生育期相对于 $DMA_{\max}$ 的干物质积累比值($RDMA_i$)和相对于 $AT_{\max}$ 的积温比值(RAT_i),其算式为: $RDMA_i = DMA_i/DMA_{\max}$, $RAT_i = AT_i/AT_{\max}$ 。其中, $RDMA_i$ 为不同生育期的相对干物质积累; DMA_i 为不同生育期的干物质积累; RAT_i 为不同生育期的相对积温; $RDMA_i$ 和 RAT_i 的值均介于 0—1 之间。用 Curve Expert 1.38 软件对数据进行拟合,采用 SPSS13.0 和 Sigmaplot 进行数据分析和作图。

1.5 模型检验

采用 2010—2011 年试验数据验证模型,检验相对干物质积累模拟模型的准确度^[19]。

2 结果与分析

2.1 不同分蘖力小麦干物质积累动态变化

由图 1 可以看出,3 个具有不同分蘖力的小麦品种,其地上部 DMA 在拔节前均呈缓慢增长之势,拔节以后至灌浆前期增长迅速,之后又变缓。不同密度处理的小麦 DMA 也存在明显差异:高密度处理在生长早期 DMA 较高;低密度处理的 DMA 一直处于较低水平。品种间的比较,成穗率高的品种 YM49-198 和 YZ4110 均表现为在低密度下 DMA 最高,分别为 $31794 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 $38024 \text{ kg}/\text{hm}^2$,成穗率低的品种 LKAZ8 则表现为在中密度处理下干物重最高,为 $32198 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。

2.2 小麦相对干物质积累动态模型的建立和筛选

将出苗至成熟期的 AT 和 DMA 进行归一化处理,并利用 Curve Expert 1.38 软件对 3 个小麦品种 RAT 和 $RDMA$ 之间的关系进行拟合,得到了 5 个相关系数较高的数学方程(表 1)。分别对上述 5 组拟合方程求极限值,结果表明:方程(1)、(2)、(3)均不能解释干物质积累过程,而方程(4)和方程(5)当 x (相对积温)趋近无穷大时, y (相对干物质积累值)趋近于 a 即小麦成熟期最大干物质的相对值约为 1,符合干物质积累动态变化规律。而方程(5)是方程(4)的一个特例,当 $d=1$ 时,方程(4)经适当转化即为方程(5)。由于方程(4)在描述多种 S 形曲线时比方程(5)更具灵活性,拟合效果更好,故选用方程(4)即 Richards 方程作为 $RDMA$ 随 RAT 的动态方程,式中 a 、 b 、 c 和 d 为系数。当 x 为 0 时, y 为 a ,即小麦出苗时的 $RDMA$;当 x 为 1 时, y 为 a ,即小麦成熟时 $RDMA$ 。拟合得到的 Richards 曲线方程为:

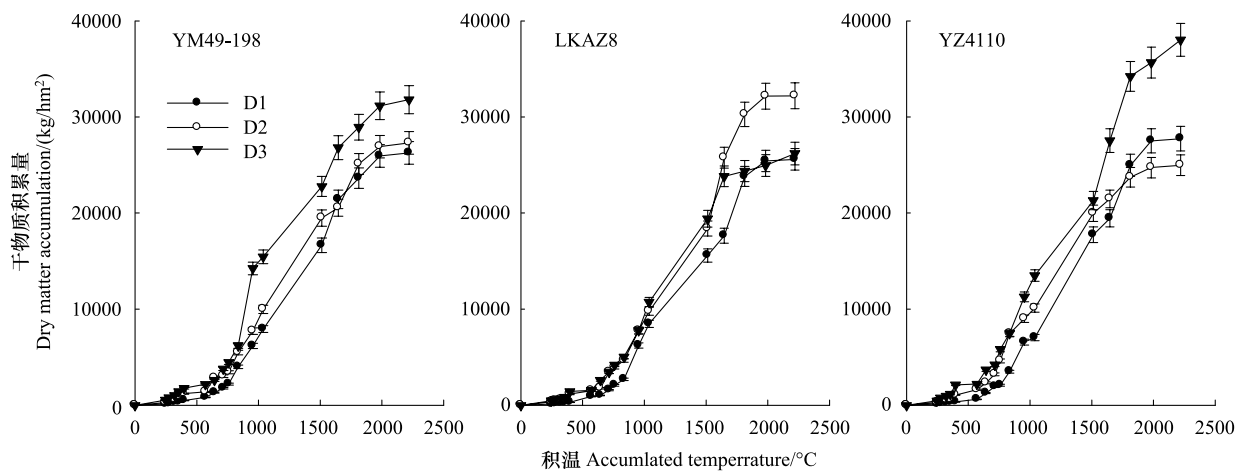


图1 不同分蘖力小麦干物质积累随出苗后积温的变化

Fig.1 Change in dry matter accumulation with accumulated temperature after emergence for 3 wheat varieties with different tillering abilities

D1:低密度 Low density;D2:中密度 Middle density;D3:高密度 High density

$$y=1.1435/(1+e^{0.2776-4.6558x})^{1/0.1130},(r=0.9927) \tag{6}$$

由表2可以看出,所建的3个品种在不同密度下的RDMA方程,其相关系数均在0.99以上,a值基本为1;b值和c值在密度和品种间变异均较大。d值除LKAZ8中密度外在品种和密度间变异均较小。

表1 小麦相对干物质积累动态共性模型

Table 1 Dynamic models of relative dry matter accumulation in wheat

模拟方程 Simulated equation	系数 Coefficient				标准差 SD	相关系数 r	y 值 y value x→∞
	a	b	c	d			
(1) $y=a+bx+cx^2+dx^3$	0.1300	-1.5732	5.8627	-3.4123	0.0438	0.9931**	∞
(2) $y=a+b\cos(cx+d)$	0.5120	0.4966	3.6447	2.6218	0.0441	0.9930**	∞
(3) $y=(ab+cx^d)/(b+x^d)$	0.0094	0.1787	1.2058	3.5727	0.0452	0.9926**	1.3
(4) $y=a/(1+e^{-bx})^{1/d}$	1.1435	0.2776	4.6558	0.1130	0.0452	0.9927**	1
(5) $y=a/(1+be^{-cx})$	1.0474	89.6528	7.6978		0.0482	0.9916**	1

方程中x为相对积温,y为相对干物质积累,** $P<0.01$;a为相对最大生长量,a denoted relative maximum increment;b为参数初值,b denoted initial value of parameter;c为生长速率参数,c denoted growth rate parameters;d为形状参数,d denoted shape parameter

表2 不同分蘖力小麦相对干物质积累量的方程系数

Table 2 Coefficient of normalized dry matter accumulation dynamic equations in 3 wheat varieties with different tillering abilities

品种 Cultivar	密度 Density /($\times 10^4$ 株/hm ²)	系数 Coefficient				标准差 SD	相关系数 r
		a	b	c	d		
YM49-198	75	1.1311	1.1451	5.2225	0.1752	0.0242	0.9984**
	225	1.1262	1.1149	4.9364	0.2212	0.0233	0.9984**
	375	1.0297	0.3105	5.7372	0.1012	0.0468	0.9938**
LKAZ8	75	1.1963	0.7422	4.5944	0.1443	0.0414	0.9952**
	225	1.1080	4.3875	7.1916	0.9213	0.0384	0.9959**
	375	1.0243	3.2801	7.3800	0.6138	0.0228	0.9986**
YZ4110	75	1.1845	1.0015	4.7821	0.1663	0.0274	0.9979**
	225	1.0597	1.0819	5.8445	0.1936	0.0214	0.9988**
	375	1.2915	0.2949	3.7258	0.1499	0.0460	0.9936**

2.3 小麦相对干物质积累动态模型检验

应用 2010—2011 年的试验数据对小麦 *RDMA* 动态模型进行了检验(图 2)。可以看出,小麦 *DMA* 的模拟值与实测值较接近,相关系数均在 0.98 以上,达到极显著水平。模拟的准确度 *K* 均在 0.91 以上,且随着密度的升高而升高,说明对高密度的模拟准确度最高。通过对 Richards 模型参数的推导可以得到一系列具有生物学意义的特征参数,用于定量分析小麦 *DMA* 动态变化特征。

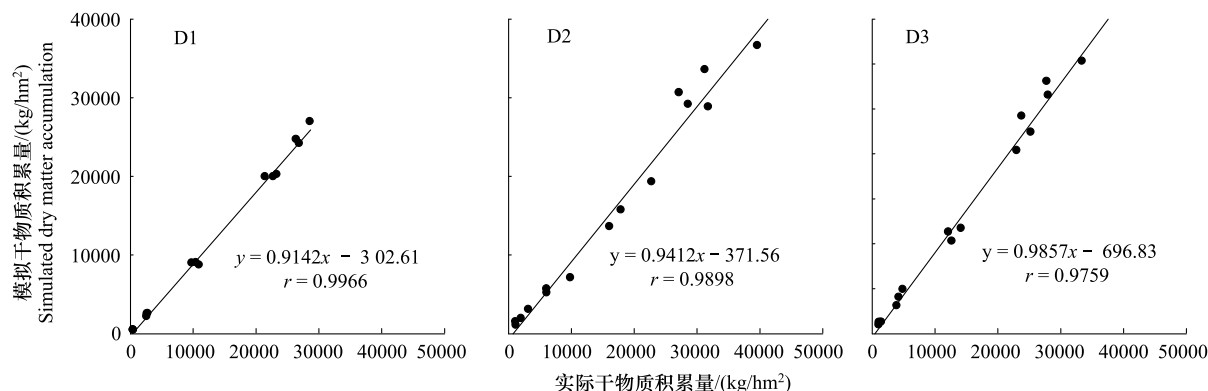


图 2 小麦干物质积累模拟值与实测值的关系

Fig. 2 Relationship between the simulated and measured dry matter accumulation data of wheat

2.4 小麦相对干物质积累阶段的划分和特征参数分析

2.4.1 小麦干物质积累的阶段划分

小麦 *DMA* 明显呈 3 阶段增长趋势:前期(积累渐增期);中期(积累快增期);后期(积累缓增期)。对方程 $y = a / (1 + e^{b-cx})^{1/d}$ 中的 *RAT* 求导,可得到相对干物质积累变化速率(*VRD*)方程,即:

$$dy/dx = a \times c \times \exp(b - cx) / [d \times (1 + \exp(b - cx))^{(d+1)/d}] \quad (7)$$

方程有 2 个拐点,对相对方程(7)二次求导,并令其为 0,可得到 2 个拐点处的 *RAT* 值 T_1 和 T_2 :

$$T_1 = -\ln \left(\frac{d^2 + 3d + d\sqrt{d^2 + 6d + 5}}{2e^b} \right) / c \quad (8)$$

$$T_2 = -\ln \left(\frac{d^2 + 3d - d\sqrt{d^2 + 6d + 5}}{2e^b} \right) / c \quad (9)$$

将小麦 *RDMA* 模型中的参数 *b*、*c* 和 *d* 代入式(8)—(9),得到 $T_1 = 0.31$ 、 $T_2 = 0.75$ 由此可将小麦 *DMA* 过程划分为 3 个阶段,对应的 *RAT* 范围与 *RDMA* 分别为:前期 0—0.31, 0.10; 中期 0.31—0.76, 0.70; 后期 0.76—1.00, 0.20。

2.4.2 不同分蘖力小麦相对干物质积累变化速率

从图 3 可以看出,小麦 *VRD* 呈先升后降趋势。最大相对干物质积累变化速率(VRD_{max}),若按品种排序,则 $LKAZ8 > YM49-198 > YZ4110$ 。在低、中密度处理条件下, $YM49-198$ 在 *RAT* 0.468 时达到 VRD_{max} ,而高密度处理在 *RAT* 0.430 时达到最大,3 个密度 *VRD* 以高密度最大。 $LKAZ8$ *VRD* 低、中、高 3 个密度分别在 *RAT* 0.376、0.682、0.468 时达到最大,且低密度 *VRD* 显著大于中密度、高密度处理。 $YZ4110$ 中密度处理在相对 *RAT* 为 0.468 时 *VRD* 达到最大,低密度和高密度处理在 *RAT* 0.682 时达到最大,密度间比较以中密度最大。小麦 *VRD* 在干物质积累前期和后期密度间差异不显著,在中期密度间差异显著,由此可知小麦干物质积累中期是 *VRD* 对密度的敏感反应期。

2.4.3 小麦干物质积累模型的特征参数

通过对方程(7)进行积分,可得到整个生育期干物质积累相对平均生长速率,另外还可以推导出干物质相对最大积累速率及其出现时的 *RAT* 和 *RDMA* 等特征参数^[20,21]。各特征参数的算式如下:

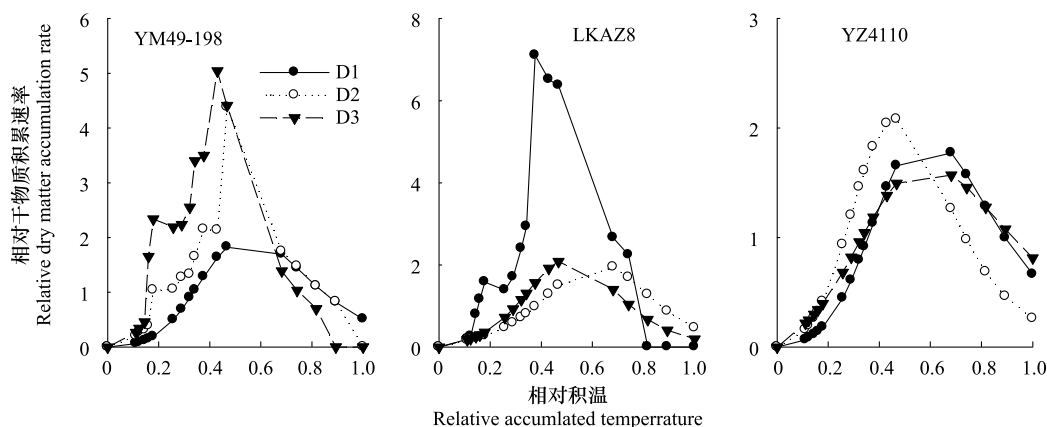


图3 不同分蘖力小麦相对干物质积累速率变化

Fig.3 Change in relative dry matter accumulation rates for 3 wheat varieties with different tillering abilities

$$G = \frac{1}{a} \int_0^a \frac{dy}{dx} dx = \frac{a \times c}{2(d+2)} \quad (10)$$

$$ARAT = (b - \ln d)/c \quad (11)$$

$$AR_{\max} = \frac{a \times c}{(1+d)^{(d+1)/d}} \quad (12)$$

$$ARDMA = \frac{a}{(1+d)^{1/d}} \quad (13)$$

其中, G 为干物质积累相对平均生长速率; $ARAT$ 为干物质最大积累速率出现时的相对积温; $AR_{\max}$ 为干物质相对最大积累速率; $ARDMA$ 为干物质最大积累速率出现时的相对干物质积累量。将小麦 $RDMA$ 模型的参数代入上述各特征参数式,得到 $G=1.26$ 、 $ARAT=0.53$ 、 $AR_{\max}=1.86$ 、 $ARDMA=0.44$ 。因此,到达小麦 $AR_{\max}$ 时的相对积温为 0.53,此时的 DMA 已占总 DMA 的一半左右。利用 $DMA_{\max}$ 和 $AT_{\max}$ 可以还原出 $AR_{\max}$ 出现时实际积温($ARAT'$)和实际的干物质质量($ARDMA'$)以及实际干物质积累平均速率(G')和实际干物质积累最大速率($AR_{\max}'$)(表 3)。

表3 不同分蘖力小麦干物质积累特征参数

Table 3 The dry matter accumulation characteristic parameter of 3 wheat varieties with different tillering abilities

品种 Cultivar	密度 Density /($\times 10^4$ 株/ hm^2)	参数 Parameter				
		干物质相对最大 积累速率出现时的 实际积温 $ARAT'$ / $^{\circ}\text{C}$	实际干物质积累 最大速率 $AR_{\max}'$ /($\text{kg}/^{\circ}\text{C}$)	干物质相对最大积累 速率出现时的实际 干物质质量 $ARDMA'$ /(kg/hm^2)	实际干物质 积累平均速率 G' /($\text{kg}/^{\circ}\text{C}$)	干物质重 Dry matter weight /(kg/hm^2)
YM49-198	75	1227.46	23.63	11808.66	16.04	26235.00
	225	1180.15	22.67	12454.13	15.38	27292.50
	375	1006.74	29.63	12628.59	20.13	31793.75
LKAZ8	75	1294.32	21.76	12031.90	14.77	25596.24
	225	1380.01	29.60	17560.68	19.78	32197.50
	375	1133.77	25.35	12307.89	17.07	26205.00
YZ4110	75	1298.03	24.05	13026.20	16.33	27735.00
	225	1034.88	23.40	10609.39	15.88	24975.00
	375	1306.80	28.22	19341.10	19.16	38023.93

$ARAT'$, actual accumulated temperature in occurrence time of maximum rate of dry matter accumulation; $AR_{\max}'$, maximum actual accumulating rate of dry matter accumulation; $ARDMA'$, actual dry matter accumulation in occurrence time of maximum rate of dry matter accumulation; G' , mean actual growth rate of dry matter accumulation

为确定各 *DMA* 参数对干物质重的相对重要性以及对干物质重的作用途径和大小,对以上 4 个参数与干物质重进行了通径分析(表 4)。可以看出,小麦 *DMA* 特征参数 $AR_{\max}'$ 、 $ARDMA'$ 、 G' 与干物质重的相关系数均呈极显著正相关。通径分析结果表明, G' 对干物质重的直接通径系数绝对值最大,直接通径系数为 6.2938,且 G' 对回归方程 R^2 的总贡献为 5.0747,也为各自变量对 R^2 的总贡献之首,说明 G' 对干物质生产的影响最为重要。它还可以通过 $AR_{\max}'$ 、 $ARDMA'$ 和 $ARAT'$ 对干物质重产生不同的间接影响。各积累参数对干物质重的效应排序为 $AR_{\max}'$ 、 $ARDMA'$ 和 $ARAT'$,其中, $ARAT'$ 主要通过 $ARDMA'$ 对干物质重起作用, $AR_{\max}'$ 和 $ARDMA'$ 主要通过 G' 对干物质重起作用。可见,较高的 G' 对提高小麦干物质重有着十分重要的作用。

表 4 小麦干物质积累参数与干物质重的通径分析

Table 4 The path analysis between dry matter accumulation characteristic parameter and dry matter weight of wheat							
项目 Item	直接作用 Direct path coefficient	间接作用 Indirect path coefficient				相关系数 <i>r</i>	变量对 R^2 总贡献 Variables total contribution to R^2
		→x1	→x2	→x3	→x4		
$ARAT'$	-0.1003	—	-0.2055	0.5379	0.0784	0.3105	-0.0311
$AR_{\max}'$	-6.0693	-0.0034	—	0.5817	6.2864	0.7954 **	-4.8275
$ARDMA'$	0.8599	-0.0627	-4.106	—	4.2153	0.9065 **	0.7795
G'	6.2938	-0.0012	-6.0622	0.5759	—	0.8063 **	5.0747

决定系数 $R^2 = 0.9956$

3 讨论与结论

3.1 不同分蘖力小麦干物质积累特性及其模型的建立

生物学产量是小麦籽粒产量的物质基础,作物产量形成过程实质上是干物质积累与分配的过程^[22-24]。有研究指出,合理密植可提高小麦 *DMA*,但种植密度过高会导致 *DMA* 下降^[25]。本研究发现,成穗率较高的小麦品种(YM49-198、YZ4110)高密度种植可获得较大群体,成穗率较低的小麦品种(LKAZ8)中密度种植可获得较高的干物质产量。此外,不同分蘖力的品种对种植密度的适应性存在着差异,生产上应在获取较高 *DMA* 的基础上,为不同分蘖力小麦选择适宜的种植密度,而并非密度愈大愈好。

DMA 机理性模型具有较强的解释性^[26-27],参数具有物理意义,但参数较多,而经验性模型本身只具有描述性,参数较少,因此采用经验性与机理性融合的方法建立作物生长模型更具实践意义^[28]。前人分析小麦 *DMA* 动态变化特征时,主要以时间变量作为生长发育的标尺^[29-30],而这些模型只适用于特定地区的特定品种,不具有普适性,本研究认为,以积温作为时间尺度更具优越性。另外,利用“归一化”方法建立的方程具有广泛适应性,可降低因模拟方法不同而造成的数值差异,有利于作物间的横向比较^[17]。因此,本研究建立了基于“归一化”法的以积温为变量的 Richards 方程 $y = 1.1435 / (1 + e^{0.2776 - 4.6558x})^{1/0.1130}$, ($r = 0.9927$),提高了模型的通用性,克服了因栽培措施和品种等引起的模型参数变化的缺陷,建立的 Richards 方程参数较少且具有很好的生物学意义。通过模型和任意生育期的积温可以模拟出任意生育期的小麦 *DMA*,对小麦生产过程进行预测。

3.2 小麦干物质积累阶段的划分和特征参数研究

通过对作物生长模拟方程进行推导可以得出具有生物学意义的特征参数,进而可以分析作物的干物质积累动态变化特征^[31-33]。本研究通过求方程得二阶导数,将小麦整个干物质积累过程划分为前、中和后期 3 个阶段,认为小麦干物质积累中期(快增期)是干物质积累变化速率对密度的敏感反应期。研究发现,小麦干物质最大积累速率出现时的 *RAT* 为 0.53,此时的 *DMA* 已占总 *DMA* 的一半左右,说明加强小麦前期田间管理,培育壮苗,构建适宜的群体结构,对实现小麦高产具有重要意义。小麦 $AR_{\max}'$ 以及此时的 $ARDMA'$ 、 G' 分别与最终干物质重呈极显著正相关。通径分析结果表明 G' 对干物质的生产影响最大,较高的 G' 对小麦干物质重稳定和提高有着十分重要的作用。

References:

- [1] Yao S M, Kang Y H, Liu H J. Studies on dry matter accumulation, partitioning and translocation in winter wheat under sprinkler and surface irrigation conditions. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(6): 51-56.
- [2] Dordas C A, Sioulas C. Dry matter and nitrogen accumulation, partitioning, and retranslocation in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) as affected by nitrogen fertilization. *Field Crops Research*, 2009, 110(1): 35-43.
- [3] Hu Y J, Lan J H, Zhao T F. Dry matter accumulation and partitioning in three major wheat cultivars released in different period. *Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science*, 1999, 30(4): 404-408.
- [4] Hiltbrunner J, Streit B, Liedgens M. Are seeding densities an opportunity to increase grain yield of winter wheat in a living mulch of white clover? *Field Crops Research*, 2007, 102(3): 163-171.
- [5] Su Z G, Yang W B, Tian J C, Song G Z. The relationships between soluble sugar contents of plant and kernel and dry matter accumulation in different high yielding wheat genotypes. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(9): 307-311.
- [6] Yang Y M. Study on the Relationship between Source and Sink of High Yield and Super High Yield in Spring Wheat [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2005.
- [7] Guo T C, Sheng K, Feng W, Xu L N, Wang C Y. Effects of plant density on physiological characteristics of different stems during tillering stage in two spike-types winter wheat cultivars. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, 29(2): 350-355.
- [8] Cao H X, Zhao S L, Ge D K, Liu Y X, Liu Y, Sun J Y, Yue Y B, Zhang Z Y, Chen Y L. Discussion on development of crop models. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(17): 3520-3528.
- [9] Hunt L A, Pararajasingham S. CROPSIM—WHEAT, A model describing the growth and development of wheat. *Canadian Journal of Plant science*, 1993, 75, 619-630.
- [10] Liu T M, Cao W X, Luo W H, Wang S H, Yin J. A simulation model of photosynthetic production and dry matter accumulation in wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 2001, 21(3): 26-31.
- [11] Zheng Y F, Yan J Y, Wan C J, Ge H M, Yang Z M. Numerical study of wheat photosynthetic production. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1995, 18(4): 566-571.
- [12] Goudriaan J, Van Laar H H. Modelling Potential Crop Growth Processes. Textbook with Exercises. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [13] Cao W, Moss D N. Modelling phasic development in wheat: a conceptual integration of physiological components. *Journal of Agricultural Science*, 1997, 129(2): 163-172.
- [14] Ren H S, Zhu J H, Aibibula, Song Y, Cui X J, Cao L F. Analysis on grain filling characteristics of wheat variety. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition*, 2006, 34(3): 55-60.
- [15] Wu S H, Duan G H, Gao H T, Zhang X P, Wen H X, Yu S P, Ma F. Research on wheat grain-filling process of water and dryland ecological types of wheat in Huanghuai area. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(6): 1015-1021.
- [16] Lü X. Studies on Effects of Ecological Factors on Growth of Maize and Establishment of Climate Ecology Model and Appraisalment System [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2006.
- [17] Zhang B, Zhao M, Dong Z Q, Li J G, Chen C Y, Sun R. Establishment and test of LAI dynamic simulation model for high yield population. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(4): 612-619.
- [18] Xiao J, Li N, Jiang H F. Calculation and stability of accumulated temperatures in the growing season of winter wheat. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2010, 3(12): 64-67.
- [19] Fu X L, Zhao M, Zhou B Y, Cui G M, Ding Z S. Optimal model for dynamic characteristics of grain weight commonly used in wheat and maize. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(2): 309-316.
- [20] 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. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(12): 2143-2153.
- [21] Li Y D, Tang L, Chen Q C, Zhang Y P, Cao W X, Zhu Y. Dry matter accumulation in rice aboveground part: quantitative simulation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(6): 1504-1510.
- [22] Wu W G, Zhang H C, Qian Y F, Chen Y, Xu J, Wu G C, Zhai C Q, Huo Z Y, Dai Q G. Analysis on dry matter production characteristics of middle-season indica super hybrid rice. *Chinese Journal of Rice Science*, 2007, 21(3): 287-293.
- [23] Meng F D, Ma L, Shi S B, Guo F, Liu X Q, Zhu J, Mao J X, Liu Z X. Dynamics change of dry matter accumulation and relative characteristics of spring wheat under different tillage. *Journal of Triticeae Crops*, 2007, 27(4): 693-698.
- [24] Lin R Y, Liang Y Y, Cai B Q, He H B, Lin W X. Characteristics of dry matter accumulation and partitioning in the process of yield formation in different rice cultivars. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(2): 185-190.
- [25] Wang C N, Wu D Y, Xia X Y, Lin L T, Han S L. Influence of density on population quality and yield of wheat Jinan 17 under high fertilizer condition. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2002, (1): 18-19.
- [26] Wu R J, Zheng Y F. A dynamical model of photosynthetic production and dry matter accumulation in wheat under increment UV-B radiation. *Journal of agro-Environment Science*, 2008, 27(6): 2325-2331.
- [27] Tang L, Zhu Y, Sun X F, Cao W X. Dynamic simulation model for photosynthesis and dry matter accumulation in rapeseed. *Acta Agronomica*

- Sinica, 2007, 33(2): 189-195.
- [28] Cao H X, Zhao S L, Ge D K, Liu Y X, Liu Y, Sun J Y, Yue Y B, Zhang Z Y, Chen Y L. Discussion on development of crop models. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(17): 3520-3528.
- [29] Chen X Y, Gao Z H, Luo Y P. Soil water-integrated dry matter accumulations in roots and shoots and their mutual relations. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 1921-1927.
- [30] Hou Y H, Chen C Y, Guo Z Q, Hou L B, Dong Z Q, Zhao M. Establishment of dry matter accumulation dynamic simulation model and analysis of growth characteristic for high-yielding population of spring maize. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(6): 90-95.
- [31] Huang Z X, Wang Y J, Wang K J, Li D H, Zhao M, Liu J G, Dong S T, Wang H J, Wang H J, Yang J S. Photosynthetic characteristics during grain filling stage of summer maize hybrids with high yield potential of 15000 kg/hm². *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 1898-1906.
- [32] Yang Y Q, Wu L H, Wu Q M. On the Richards curve. *Journal of Biomathematics*, 2000, 15(4): 385-387.
- [33] Li G Q, Tang L, Zhang W Y, Cao W X, Zhu Y. Dynamic analysis on response of dry matter accumulation and partitioning to nitrogen fertilizer in wheat cultivars with different plant types. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(12): 2258-2265.

参考文献:

- [1] 姚素梅, 康跃虎, 刘海军. 喷灌与地面灌溉冬小麦干物质积累、分配和运转的比较研究. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(6): 51-56.
- [3] 胡延吉, 兰进好, 赵檀方. 不同时期 3 个主栽小麦品种干物质积累及分配特性的研究. *山东农业大学学报: 自然科学版*, 1999, 30(4): 404-408.
- [5] 苏振刚, 杨卫兵, 田纪春, 宋广芝. 不同类型高产小麦植株、籽粒可溶性糖含量与其干物质积累的关系. *中国农学通报*, 2007, 23(9): 307-311.
- [6] 杨永梅. 春小麦高产超高产源库关系及其机理的研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2005.
- [7] 郭天财, 盛坤, 冯伟, 徐丽娜, 王晨阳. 种植密度对两种穗型小麦品种分蘖期茎蘖生理特性的影响. *西北植物学报*, 2009, 29(2): 350-355.
- [8] 曹宏鑫, 赵锁劳, 葛道阔, 刘永霞, 刘岩, 孙金英, 岳延滨, 张智优, 陈煜利. 作物模型发展探讨. *中国农业科学*, 2011, 44(17): 3520-3528.
- [10] 刘铁梅, 曹卫星, 罗卫红, 王绍华, 尹钧. 小麦物质生产与积累的模拟模型. *麦类作物学报*, 2001, 21(3): 26-31.
- [11] 郑有飞, 颜景义, 万长建, 葛红梅, 杨志敏. 小麦作物光合生产模拟研究. *南京气象学院学报*, 1995, 18(4): 566-571.
- [14] 任红松, 朱家辉, 艾比布拉, 宋羽, 崔新菊, 曹连莆. 小麦籽粒灌浆特性分析. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(3): 55-60.
- [15] 吴少辉, 段国辉, 高海涛, 张学品, 温红霞, 余四平, 马飞. 黄淮麦区水、旱生态型小麦籽粒灌浆进程研究. *麦类作物学报*, 2009, 29(6): 1015-1021.
- [16] 吕新. 生态因素对玉米生长发育影响及气候生态模型与评价系统建立的研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2006.
- [17] 张宾, 赵明, 董志强, 李建国, 陈传永, 孙锐. 作物高产群体 LAI 动态模拟模型的建立与检验. *作物学报*, 2007, 33(4): 612-619.
- [18] 肖静, 李楠, 姜会飞. 作物发育期积温计算方法及其稳定性. *气象研究与应用*, 2010, 31(2): 64-67.
- [19] 付雪丽, 赵明, 周宝元, 崔国美, 丁在松. 小麦、玉米粒重动态共性特征及其最佳模型的筛选与应用. *作物学报*, 2009, 35(2): 309-316.
- [20] 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.
- [21] 李艳大, 汤亮, 陈青春, 张玉屏, 曹卫星, 朱艳. 水稻地上部干物质积累动态的定量模拟. *应用生态学报*, 2010, 21(6): 1504-1510.
- [22] 吴文革, 张洪程, 钱银飞, 陈烨, 徐军, 吴桂成, 翟超群, 霍中洋, 戴其根. 超级杂交中籼水稻物质生产特性分析. *中国水稻科学*, 2007, 21(3): 287-293.
- [23] 孟凡德, 马林, 石书兵, 郭飞, 刘兴强, 朱军, 毛吉贤, 刘正兴. 不同耕作条件下春小麦干物质积累动态及其相关性的研究. *麦类作物学报*, 2007, 27(4): 693-698.
- [24] 林瑞余, 梁义元, 蔡碧琼, 何海斌, 林文雄. 不同水稻产量形成过程的干物质积累与分配特征. *中国农学通报*, 2006, 22(2): 185-190.
- [25] 王长年, 吴荣业, 夏新宇, 林令通, 韩守利. 高肥条件下密度对济南 17 号小麦群体质量和产量的影响. *江苏农业科学*, 2002, (1): 18-19.
- [26] 吴荣军, 郑有飞. 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. *农业环境科学学报*, 2008, 27(6): 2325-2331.
- [27] 汤亮, 朱艳, 孙小芳, 曹卫星. 油菜光合作用与干物质积累的动态模拟模型. *作物学报*, 2007, 33(2): 189-195.
- [28] 曹宏鑫, 赵锁劳, 葛道阔, 刘永霞, 刘岩, 孙金英, 岳延滨, 张智优, 陈煜利. 作物模型发展探讨. *中国农业科学*, 2011, 44(17): 3520-3528.
- [29] 陈晓远, 高志红, 罗远培. 考虑土壤水分影响的小麦根冠干物质积累及其相互关系模型. *生态学报*, 2005, 25(8): 1921-1927.
- [30] 侯玉虹, 陈传永, 郭志强, 侯立白, 董志强, 赵明. 作物高产群体干物质积累动态模型的构建及生长特性分析. *玉米科学*, 2008, 16(6): 90-95.
- [31] 黄振喜, 王永军, 王空军, 李登海, 赵明, 柳京国, 董树亭, 王洪军, 王军海, 杨今胜. 产量 15000 kg/hm² 以上夏玉米灌浆期间的光合特性. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 1898-1906.
- [33] 李国强, 汤亮, 张文宇, 曹卫星, 朱艳. 不同株型小麦干物质积累与分配对氮肥响应的动态分析. *作物学报*, 2009, 35(12): 2258-2265.

CONTENTS

Conservation strategies for <i>Ulmus elongata</i> based on the analysis of biological and ecological factors	GAO Jianguo, ZHANG Yi, WU Yuhuan, et al (5287)
Vertical distribution of methanogen community structures in <i>Phragmites australis</i> marsh soil in the Min River estuary	SHE Chenxing, TONG Chuan (5299)
Energy balance closure and its effects on evapotranspiration measurements with the eddy covariance technique in a cropland	LIU Du, LI Jun, YU Qiang, TONG Xiaojuan, et al (5309)
Effects of soil water potential on the growth and physiological characteristics of <i>Populus tomentosa</i> pulpwood plantation under subsurface drip irrigation	XI Benye, WANG Ye, DI Nan, et al (5318)
Physiological indices of leaves of jujube (<i>Zizyphus jujuba</i>) damaged by <i>Apolygus lucorum</i>	GAO Yong, MEN Xingyuan, YU Yi, et al (5330)
Economic analysis of wetland resource protection: a case study of Beijing Wild Duck Lake	WANG Changhai, CUI Lijuan, MA Muyuan, et al (5337)
Comparative studies on the farmers' willingness to accept eco-compensation in wetlands nature reserve	WANG Changhai, CUI Lijuan, MAO Xufeng, et al (5345)
Remote sensing estimation models of <i>Suaeda salsa</i> biomass in the coastal wetland	FU Xin, LIU Gaohuan, HUANG Chong, LIU Qingsheng (5355)
Effects of N addition on soil organic carbon components in an alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau	ZHENG Jiaojiao, FANG Huajun, CHENG Shulan, et al (5363)
Estimating carbon emissions from forest fires during 2001 to 2010 in Daxing'anling Mountain	HU Haiqing, WEI Shujing, SUN Long (5373)
Predicting the effects of soil water potential on the growth of cut lily	DONG Yongyi, LI Gang, AN Dongsheng, et al (5387)
Rain enrichment-accelerated carbon emissions from soil in a <i>Nitraria sphaerocarpa</i> community in hyperarid region	LIU Dianjun, WU Bo, LI Yonghua, et al (5396)
Response of soil organic carbon sequestration to the "Grain for Green Project" in the hilly Loess Plateau region	XU Mingxiang, WANG Zheng, ZHANG Jin, et al (5405)
Temporal and spatial variability in soil respiration in five temperate forests in Xiaoxing'an Mountains, China	SHI Baoku, JIN Guangze, WANG Zhaoyang (5416)
Distributions pattern of phosphorus, potassium and influencing factors in the upstream of Shule river basin	LIU Wenjie, CHEN Shengyun, HU Fengzu, et al (5429)
COI1 is involved in jasmonate-induced indolic glucosinolate biosynthesis in <i>Arabidopsis thaliana</i>	SHI Lu, LI Mengsha, WANG Lihua, et al (5438)
Modeling canopy rainfall interception of a replanted <i>Robinia pseudoacacia</i> forest in the Loess Plateau	WANG Yanping, WANG Li, WEI Sanping (5445)
The differences of plant community diversity among the different altitudes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	LIU Weiwei, WANG Jie, WANG Yong, et al (5454)
Low-frequency drought variability based on SPEI in association with climate indices in Beijing	SU Hongxin, LI Guangqi (5467)
Response of upland jujube tree trunk diameter to different ecological factors	ZHAO Ying, WANG Youke, HAN Lixin, et al (5476)
The spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots in a young <i>Caragana korshinskii</i> plantation	ZHANG Fan, CHEN Jianwen, WANG Mengben (5484)
Interspecific segregation of species in tree and shrub layers of the <i>Pinus bungeana</i> Zucc. ex Endl. community in the Wulu Mountains, Shanxi Province, China	WANG Lili, BI Runcheng, YAN Ming, et al (5494)
Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities during maize growing season	MA Xiaoxia, WANG Lianlian, LI Qinghui, et al (5502)
A model to predict dry matter accumulation dynamics in wheat based on the normalized method	LIU Juan, XIONG Shuping, YANG Yang, et al (5512)
Optimization strategies and an aesthetic evaluation of typical plant communities in the Shanghai Green Belt	ZHANG Kaixuan, LING Huanran, DA Liangjun (5521)
Carbon footprint evaluation research on the tourism transportation system at tourist attractions; a case study in Hengshan	DOU Yindi, LIU Yunpeng, LI Bohua, et al (5532)
An urban ecosystem assessment method and its application	SHI Huichun, LIU Wei, HE Jian, et al (5542)
Seasonal variations in distribution and biological characteristics of snailfish <i>Liparis tanakae</i> in the central and southern Yellow Sea	ZHOU Zhipeng, JIN Xianshi, SHAN Xiujuan, et al (5550)
Effects of cyanobacterial accumulation and snail grazing on the growth of <i>vallisneria natans</i>	HE Hu, HE Yuhong, JI Yachan, et al (5562)
The structure and thermal insulation capability of <i>Mustela sibirica manchurica</i> winter pelage in Heilongjiang Province	LIU Yu, ZHANG Wei (5568)
Ontogenetic shifts in selected body temperature and thermal tolerance of the tiger frog, <i>Hoplobatrachus chinensis</i>	FAN Xiaoli, LEI Huanzong, LIN Zhihua (5574)
The influence of tubificid worms bioturbation on organic phosphorus components and their vertical distribution in sediment of Lake Taihu	BAI Xiuling, ZHOU Yunkai, ZHANG Lei (5581)
Review and Monograph	
Research advances in ecological assessment of urban greenspace	MAO Qizheng, LUO Shanghua, MA Keming, et al (5589)
Ecological hot topics in global change on the 2 nd International Young Ecologist Forum	WAN Yun, XU Lili, GENG Qifang, et al (5601)
Scientific Note	
Screening trial for the suitable plant species growing on sand dunes in the alpine valley and its recovery status in the Yarlung Zangbo River basin of Tibet, China	SHEN Weishou, LI Haidong, LIN Naifeng, et al (5609)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,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

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 17 期 (2012 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 17 (September, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 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 70.00 元