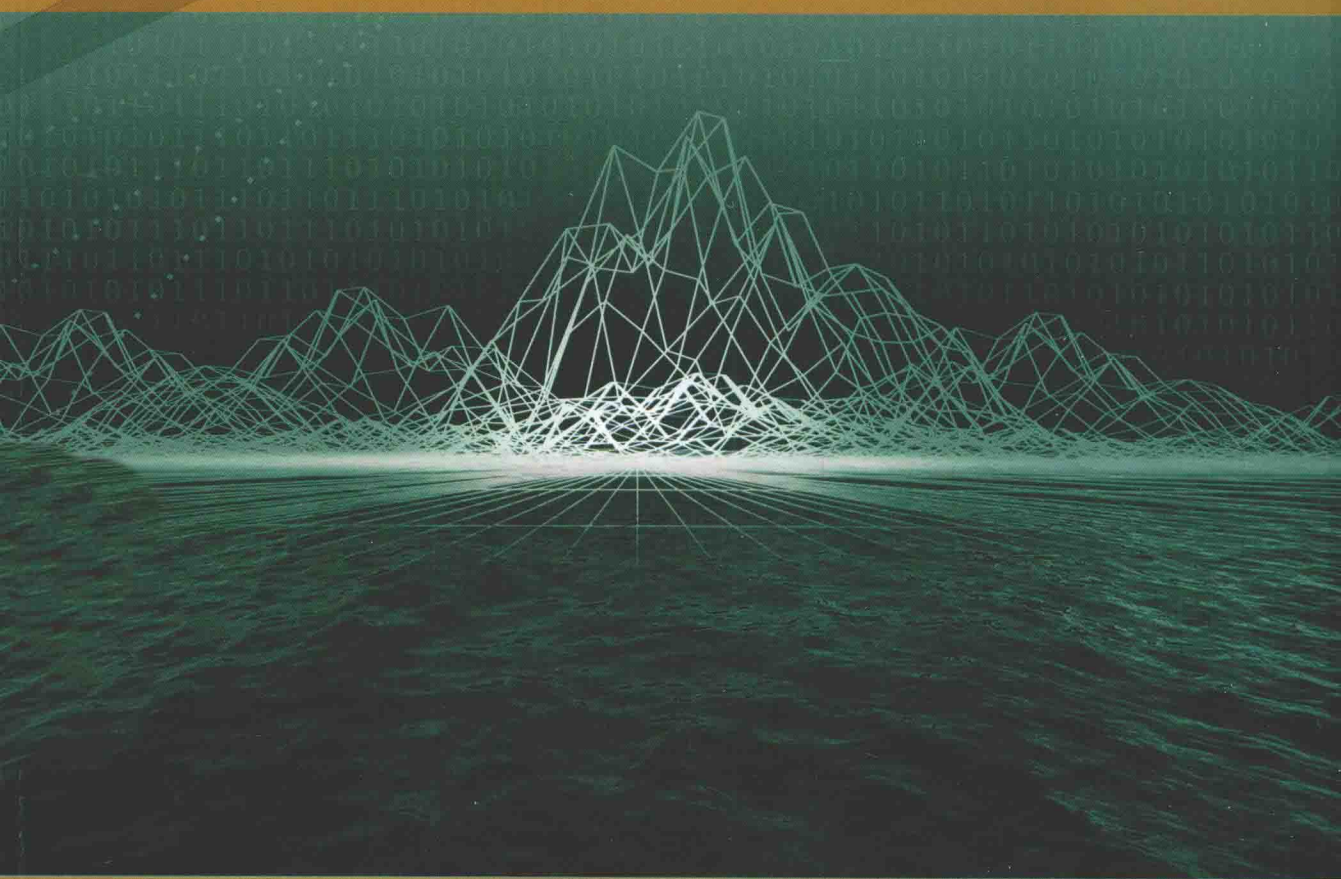


*The Application and Research
of Mathematical Model
in Ecology*

30

数学模型在生态学的 应用及研究

杨东方 王凤友 编著



 海洋出版社

数学模型在生态学的应用及研究(30)

The Application and Research of Mathematical Model
in Ecology(30)

杨东方 王凤友 编著

海洋出版社

2015 年 · 北京

内 容 提 要

通过阐述数学模型在生态学的应用和研究,量化的展示生态系统中环境因子和生物因子的变化过程,揭示生态系统的规律和机制,以及其稳定性、连续性的变化,使生态数学模型在生态系统中发挥巨大作用。在科学技术迅猛发展的今天,通过该书的学习,可以帮助读者了解生态数学模型的应用、发展和研究的过程;分析不同领域、不同学科的各种各样生态数学模型;探索采取何种数学模型应用于何种生态领域的研究;掌握建立数学模型的方法和技巧。此外,该书还有助于加深对生态系统的量理解,培养量化研究生态系统的思维。

本书主要内容为:介绍各种各样的数学模型在生态学不同领域的应用,如在地理、地貌、水文和水动力,以及环境变化、生物变化和生态变化等领域的应用。详细阐述了数学模型建立的背景、数学模型的组成和结构以及其数学模型应用的意义。

本书适合气象学、地质学、海洋学、环境学、生物学、生物地球化学、生态学、陆地生态学、海洋生态学和海湾生态学等有关领域的科学工作者和相关学科的专家参阅,也适合高等院校师生作为教学和科研的参考

图书在版编目(CIP)数据

数学模型在生态学的应用及研究.30/杨东方,王凤友编著. —北京:海洋出版社,2015.5
ISBN 978-7-5027-8947-3

I. ①数… II. ①杨… ②王… III. ①数学模型-应用-生态学-研究 IV. ①Q14

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第207697号

责任编辑:鹿 源

责任印制:赵麟苏

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路8号 邮编:100081

北京华正印刷有限公司印刷 新华书店北京发行所经销

2015年5月第1版 2015年5月第1次印刷

开本:787 mm×1092 mm 1/16 印张:20

字数:480千字 定价:60.00元

发行部:62132549 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

《数学模型在生态学的应用及研究(30)》编委会

主 编 杨东方 王凤友

副主编 吴有富 王 林 吴兴玲 索洪敏 陈 豫

编 委 (按姓氏笔画为序)

王自强 邓 婕 冯志纲 田应福 刘小华

孙静亚 朱四喜 杨丹枫 杨佩华 陈应华

贺华中 常彦祥 黄 宏 储昌木 童 红

数学是结果量化的工具
数学是思维方法的应用
数学是研究创新的钥匙
数学是科学发展的基础

杨东方

要想了解动态的生态系统的基本过程和动力学机制,尽可从建立数学模型为出发点,以数学为工具,以生物为基础,以物理、化学、地质为辅助,对生态现象、生态环境、生态过程进行探讨。

生态数学模型体现了在定性描述与定量处理之间的关系,使研究展现了许多妙不可言的启示,使研究进入更深的层次,开创了新的领域。

杨东方

摘自《生态数学模型及其在海洋生态学应用》

海洋科学(2000),24(6):21-24.

前 言

细大尽力,莫敢怠荒,远迹辟隐,专务肃庄,端直敦忠,事业有常。

——《史记·秦始皇本纪》

• 数学模型研究可以分为两大方面:定性和定量的,要定性地研究,提出的问题是:“发生了什么?或者发生了没有”,要定量地研究,提出的问题是“发生了多少?或者它如何发生的”。前者是对问题的动态周期、特征和趋势进行了定性的描述,而后者是对问题的机制、原理、起因进行了定量化的解释。然而,生物学中有许多实验问题与建立模型并不是直接有关的。于是,通过分析、比较、计算和应用各种数学方法,建立反映实际的且具有意义的仿真模型。

生态数学模型的特点为:(1)综合考虑各种生态因子的影响。(2) 量化描述生态过程,阐明生态机制和规律。(3) 能够动态地模拟和预测自然发展状况。

生态数学模型的功能为:(1) 建造模型的尝试常有助于精确判定所缺乏的知识和数据,对于生物和环境有进一步定量了解。(2) 模型的建立过程能产生新的想法和实验方法,并缩减实验的数量,对选择假设有所取舍,完善实验设计。(3) 与传统的方法相比,模型常能更好地使用越来越精确的数据,从生态的不同方面所取得材料集中在一起,得出统一的概念。

模型研究要特别注意:(1) 模型的适用范围:时间尺度、空间距离、海域大小、参数范围。例如,不能用每月的个别发生的生态现象来检测1年跨度的调查数据所做的模型。又如用不常发生的赤潮的赤潮模型来解释经常发生的一般生态现象。因此,模型的适用范围一定要清楚。(2) 模型的形式是非常重要的,它揭示内在的性质、本质的规律,来解释生态现象的机制、生态环境的内在联系。因此,重要的是要研究模型的形式,而不是参数,参数是说明尺度、大小、范围而已。(3) 模型的可靠性,由于模型的参数一般是从实测数据得到的,它的可靠性非常重要,这是通过统计学来检测。只有可靠性得到保证,才能用模型说明实际的生态问题。(4) 解决生态问题时,所提出的观点,不仅从数学模型支持这一观点,还要从生态现象、生态环境等各方面的事实来支持这一观点。

本书以生态数学模型的应用和发展为研究主题,介绍数学模型在生态学不同领域的应用,如在地理、地貌、气象、水文和水动力以及环境变化、生物变化和生态变化

等领域的应用。详细阐述了数学模型建立的背景、数学模型的组成和结构以及其数学模型应用的意义。认真掌握生态数学模型的特点和功能以及注意事项。生态数学模型展示了生态系统的演化过程和预测了自然资源可持续利用。通过本书的学习和研究,促进自然资源、环境的开发与保护,推进生态经济的健康发展,加强生态保护和环境恢复。

本书获得贵州民族大学出版基金、“贵州喀斯特湿地资源及特征研究”(TZJF-2011年-44号)项目、“喀斯特湿地生态监测研究重点实验室”(黔教全KY字[2012]003号)项目、教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0659)项目、“西南喀斯特地区人工湿地植物形态与生理的响应机制研究”(黔省专合字[2012]71号)项目、“复合垂直流人工湿地处理医药工业废水的关键技术研究”(筑科合同[2012205]号)项目、水库水面漂浮物智能监控系统开发(黔教科[2011]039号)项目、基于场景知识的交通目标行为智能描述(黔科合字[2011]2206号)项目、水面污染智能监控系统的研发(TZJF-2011年-46号)项目、基于视觉的贵阳市智能交通管理系统研究项目、水面污染智能监控系统的研发项目、贵阳市水面污染智能监控系统的研发项目、基于信息融合的贵州水资源质量智能监控平台研究项目以及浙江海洋学院出版基金、浙江海洋学院承担的“舟山渔场渔业生态环境研究与污染控制技术开发”、海洋渔业科学与技术(浙江省“重中之重”建设学科)和“近海水域预防环境污染养殖模型”项目、海洋公益性行业科研专项——浙江近岸海域海洋生态环境动态监测与服务平台技术研究及应用示范(201305012)项目、国家海洋局北海环境监测中心主任科研基金——长江口、胶州湾、莱州湾及其附近海域的生态变化过程(05EMC16)的共同资助下完成。

此书得以完成应该感谢北海环境监测中心崔文林主任、上海海洋大学的李家乐院长、浙江海洋学院校长吴常文和贵州民族大学校长张学立;还要感谢刘瑞玉院士、冯士筌院士、胡敦欣院士、唐启升院士、汪品先院士、丁德文院士和张经院士。诸位专家和领导给予的大力支持,提供良好的研究环境,成为我们科研事业发展的动力引擎。在此书付梓之际,我们诚挚感谢给予许多热心指点和有益传授的其他老师和同仁。

本书内容新颖丰富,层次分明,由浅入深,结构清晰,布局合理,语言简练,实用性和指导性强。由于作者水平有限,书中难免有疏漏之处,望广大读者批评指正。

沧海桑田,日月穿梭。抬眼望,千里尽收,祖国在心头。

杨东方 王凤友

2015年4月6日

目 次

温室盆栽一品红生长发育模型	(1)
底聚型的盐分剖面模型	(7)
内燃式水泵的三缸动力模型	(11)
车辆功率的分流耦合模式	(15)
糖渍加应子的热风干燥模型	(20)
农业机械人的视觉导航算法	(23)
滴灌土壤的水分均匀度计算	(27)
区域水量的优化调配模型	(31)
生物质直燃的减排效益公式	(34)
灌水的效率计算	(38)
多普勒频移的生物识别模型	(41)
降雨的坡地入渗公式	(43)
人工牧草生长的需水量计算	(46)
弹性变形的配流副润滑模型	(55)
多垄线识别的视觉导航算法	(59)
边柱侧向支撑的稳定方程	(63)
作物的养分投入模型	(70)
沟灌土壤的水热传输公式	(72)
虚拟水战略的配置模型	(75)
萃取水飞蓟素的动力方程	(80)
水稻生育和产量的评价模型	(84)
病害的识别模型	(87)
森林蓄积的角规模型	(90)
流域蒸散发的水文模型	(94)
轮胎的受力模型	(97)
蒸渗仪的设计公式	(99)
棉花异性纤维的分类公式	(102)
节水灌溉的预报与决策模式	(105)
雾滴粒径的分布模型	(108)

土地整理的类型区划分公式	(113)
多传感器的信息融合模型	(117)
渠道的冻融水热耦合模型	(119)
砼衬砌渠道的冻胀破坏模型	(122)
沟灌土壤的水量平衡方程	(127)
粮食生产潜力的计量模型	(130)
金莲花需水的模糊评判模型	(133)
固液两相的湍流模型	(137)
黏弹性悬架的缓冲模型	(139)
风压及风载体型的系数计算	(144)
昆虫图像的识别模式	(148)
植被覆盖度的光谱模型	(151)
大麦叶面积的指数模型	(157)
大气和林冠的热通量模型	(162)
毛竹林生物量的遥感模型	(165)
秸秆还田的固碳计算	(171)
耕作方式的碳释放方程	(178)
玉米光合产物的分配模型	(181)
流域生态系统的服务价值模型	(186)
稻麦生育期的氮积累模型	(192)
污染物排放的环境压力函数	(198)
长白山地区的降水模型	(201)
膜孔灌溉的入渗模型	(205)
玉米的蒸散模型	(211)
逐日气象的插值模型	(215)
森林碳的储存通量模型	(219)
景观格局的粒度效应模型	(223)
刺槐树干的液流公式	(230)
农业生态经济的耦合态势模型	(234)
棉花群体的光合特性公式	(237)
不同林型的土壤呼吸模型	(241)
怪柳的耗水量模型	(244)
贵州倒春寒的演变模型	(249)
陕北植被覆盖的演变模型	(254)

碳通量的数据处理模型	(258)
毛白杨的水肥耦合效应模型	(261)
技术开发区的评价模型	(266)
农田环境的损益公式	(271)
城市景观的生态安全评价模型	(277)
森林冠层的地面叶面积模型	(281)
植物叶片的滞尘模型	(285)
林冠的降雨截留模型	(288)
天气环境的预测模型	(292)
捕食者与猎物的关系模型	(296)
林冠截留与降水的关系模型	(301)
气候变暖的生态环境模型	(305)

温室盆栽一品红生长发育模型

1 背景

鉴于适合不同季节上市的温室盆栽一品红生长发育模型的研究,国内外均鲜有报道。张红菊等^[1]通过不同定植期和不同摆放密度处理的栽培试验,定量分析光合有效辐射、光周期、温度和摆放密度对温室盆栽一品红生长发育的影响,以生理辐热积(Physiological product of thermal effectiveness and PAR, PTEP)为尺度,建立了温室盆栽一品红生育期模拟子模型;以冠层吸收的生理辐热积(Canopy intercepted PTEP, PTEP_{int})为尺度,建立了温室盆栽一品红干物质生产和分配模拟子模型;综合生育期模拟子模型与干物质生产和分配模拟子模型,建立了温室盆栽一品红生长发育模拟模型,并用独立的试验数据对模型进行了检验。为温室盆栽一品红生产中的光温精准调控提供理论依据与决策支持。

2 公式

2.1 生育期模拟子模型的构建

一品红发育速率主要由温度热效应、光合有效辐射和光周期共同决定。本研究采用文献[2]中提出的生理辐热积 PTEP 来作为衡量一品红发育的指标。

$$PTEP = \begin{cases} TEP & PTEP \leq PTEP_{SD} \\ TEP \times RPE & PTEP_{SD} < PTEP < PTEP_{FVB} \\ TEP & PTEP \geq PTEP_{FVB} \end{cases} \quad (1)$$

$$TEP(i) = \sum_{i=m}^n DTEP(i) \quad (2)$$

$$DTEP(i) = \{ [\sum RTE(i,j)]/24 \} \times PAR(i) \quad (j = 1, 2, \dots, 24) \quad (3)$$

式中: PTEP 为一品红不同发育阶段的生理辐热积, MJ/m²; TEP(i) 为一品红从第 m 天到第 n 天的累积辐热积, MJ/m²; DTEP(i) 为第 i 天的日总辐热积, MJ/(m² · d); RTE(i, j) 为第 i 天内第 j 小时内的相对热效应, 根据一品红生长所需的三基点温度和温室内气温实际观测值来计算, 一品红各时期的生长三基点温度见表 1; PAR(i) 为第 i 天日总光合有效辐射, MJ/(m² · d); RPE 为每日光周期效应, 具体计算方法如文献[3], 一品红的临界日长为 12.5 h, 最适日长为 9 h^[4]; PTEPSD 为摘心到短日处理所需的累积生理辐热积; PTEPFVB 为摘心到

单蕾所需的累积生理辐热积,确定方法见文献[1]。

表 1 一品红各生育时期的三基点温度

单位:℃

生育期		最低温度	最适下限~最适上限	最高温度
定植到短日处理	白天	5	21~27	32
	夜间	5	16~21	32
短日处理到单苞	白天	5	22~23	28
	夜间	5	19~20	23
单苞到开花	白天	5	22~23	28
	夜间	5	19~20	23

注:表 1 数据来源于参考文献[5]~[9]。

2.2 干物质生产和分配模拟子模型的构建

2.2.1 冠层吸收的生理辐热积的计算

在其他栽培条件相同条件下,不同摆放密度的盆栽一品红生长的差异主要是由于冠层大小的不同,导致冠层吸收的光合有效辐射量不同,因此本文引用冠层吸收的生理辐热积^[10]($PTEP_{int}$)的概念来模拟不同密度一品红群体的生长,计算冠层吸收的生理辐热积只需将式(3)中的 $PAR(i)$ 替换为各摆放密度的盆栽一品红冠层吸收的光合有效辐射 PAR_{int} 即可。 PAR_{int} 的计算方法如下:

$$PAR_{int}(i) = PAR(i) \times \{1 - \exp[-k \times KAI(i-1)]\} \quad (4)$$

式中: $PAR_{int}(i)$ 为第*i*天冠层吸收的光合有效辐射, $MJ/(m^2 \cdot d)$; k 为冠层消光系数,根据本研究的试验观测, k 为 0.77; $LAI(i-1)$ 为一品红定植后第*i*-1 天的叶面积指数,定义 $LAI(0)$ 为定植时一品红的叶面积指数,是模型的输入参数,根据试验的观测数据,16.0 株/ m^2 ,11.1 株/ m^2 ,8.2 株/ m^2 3 个密度处理的 $LAI(0)$ 分别取值为 0.24,0.15,0.08。

2.2.2 叶面积指数的模拟

根据试验的叶面积指数、温度和 PAR 观测数据,利用式(1)~式(4)计算出定植后冠层吸收的生理辐热积 $PTEP_{int}$,得到不同摆放密度的叶面积指数与冠层累积吸收的生理辐热积的关系(图 1)均可用公式(5)描述:

$$LAI = 5.31 - 5.23 \times \exp(-PTEP_{int}/26.50) \\ n = 54, R^2 = 0.99, SE = 0.15 \quad (5)$$

式中: SE 为标准差。

2.2.3 干物质生产的模拟

利用试验的数据,各密度处理单位面积总干质量与定植后冠层累积吸收的生理辐热积关系如图 2 所示。

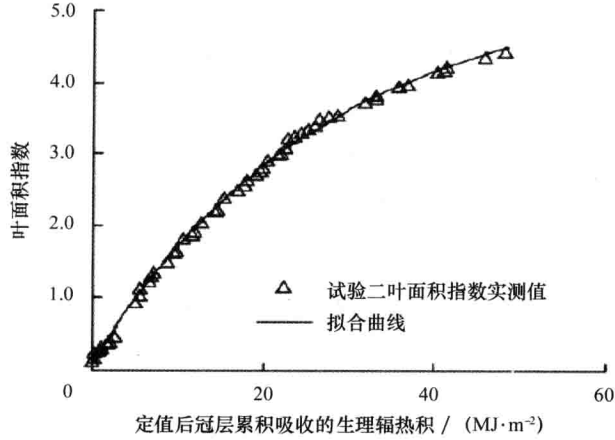


图1 叶面积指数与定植后冠层累积吸收的生理辐射热的关系

$$DMT = 256.62 \times \exp(PTEP_{int}/98.22) - 250.53$$

$$R^2 = 0.99, SE = 17.25 \text{ g/m}^2, n = 15$$

(6)

式中: DMT 为单位面积植株总干质量; $PTEP_{int}$ 为定植后冠层累积吸收的生理辐射热。

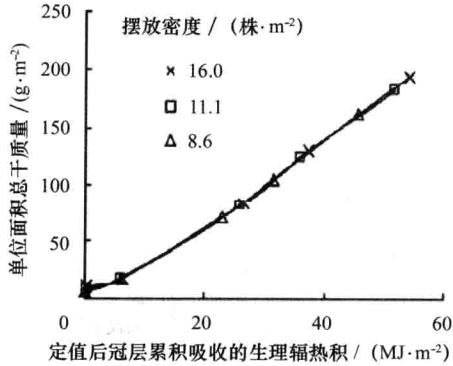


图2 单位面积植株总干质量与定植后冠层累积吸收的生理辐射热的关系

2.2.4 干物质分配指数模拟

在干物质分配的研究中,假定干物质首先在地上部分与地下部分之间进行分配,然后地上部分干物质再向茎、叶、苞叶中分配,各器官干物质分配指数按式(7)~式(11)计算^[11]。

$$PISH_i = DMSH_i / DMT_i \quad (7)$$

$$PIR_i = 1 - PISH_i \quad (8)$$

$$PIL_i = DML_i / DMSH_i \quad (9)$$

$$PIST_i = DMST_i / DMSH_i \quad (10)$$

$$PIC_i = 1 - (PIL_i + PIST_i) \quad (11)$$

式中: $PISH_i$ 、 PIR_i 、 PIL_i 、 $PIST_i$ 、 PIC_i 为分别表示第 i 天地上部分、根系、叶、茎、苞叶的干物质分配指数; $DMSH_i$ 、 DMT_i 、 DML_i 、 $DMST_i$ 为分别表示第 i 天地上部分、整株、叶和茎的干质量 (g/m^2)。

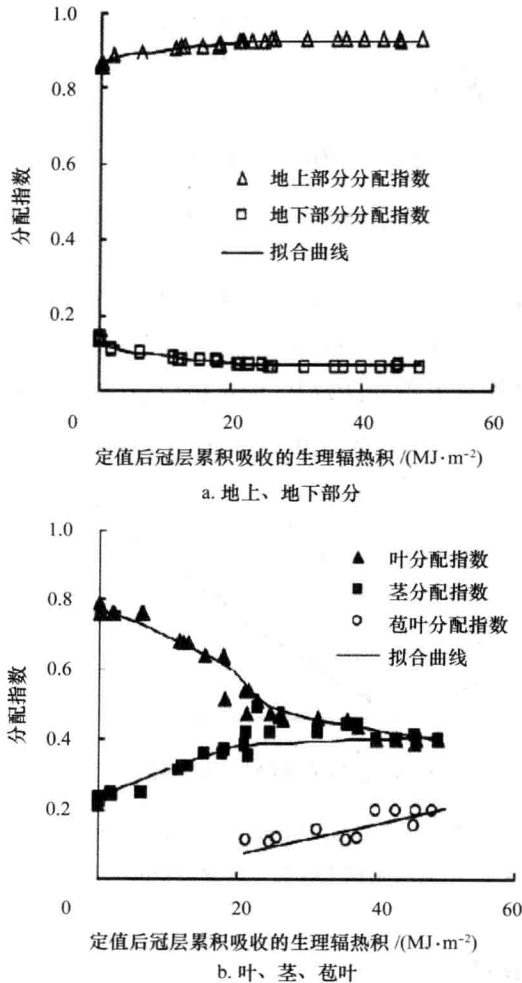


图3 地上部分和地下部分分配指数及叶、茎、苞叶分配指数与定值后冠层累积吸收的生理辐射热积的关系

用试验的数据按式(7)~式(11)计算得到一品红地上部分(图3a)、叶、茎和苞叶(图3b)的干物质分配指数,其拟合方程分别为:

$$PISH = 0.93 - 0.07 \times \exp(-PTEP_{int}/3.21)$$

$$n = 15, R^2 = 0.99, SE = 0.004 \quad (12)$$

$$PIL = 0.40 + 0.37 / \{1 + \exp[(PTEP_{int} - 19.61)/4.98]\}$$

$$n = 15, R^2 = 0.99, SE = 0.08 \quad (13)$$

$$PIST = 0.41 - 0.19 \times \exp(-PTEP_{int}/10.9)$$

$$n = 15, R^2 = 0.98, SE = 0.028 \quad (14)$$

式中: $PISH$ 、 PIL 、 $PIST$ 为分别表示地上部分、叶和茎的分配指数; $PTEP_{int}$ 为定植后冠层累积吸收的生理辐射热积, MJ/m^2 。

2.2.5 器官干质量的模拟

根据分配指数概念,利用总干质量和分配指数可计算地上、地下部分及地上部分各器官的干质量^[11],各器官干物质预测值用式(15)~式(19)计算

$$DMSH = DMT \times PISH \quad (15)$$

$$DMR = DMT \times (1 - PISH) \quad (16)$$

$$DML = DMSH \times PIL \quad (17)$$

$$DMST = DMSH \times PIST \quad (18)$$

$$DMC = DMSH \times (1 - PIL - PIST) \quad (19)$$

式中: DMT 、 $DMSH$ 、 DMR 、 DML 、 $DMST$ 、 DMC 为植株总干质量、地上部分干质量、根系干质量、叶干质量、茎干质量和苞叶干质量(g/m^2),因为一品红花蕾很小,所以本研究将其干质量归到苞叶干质量。

2.3 模型的检验

用回归估计标准误(root mean squared error, RMSE)对预测值和观测值之间的符合度进行统计分析^[11]。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2}{n}} \quad (20)$$

式中: OBS_i 为实际观测值; SIM_i 为模型预测值; n 为样本容量。

3 意义

温室盆栽一品红生长发育模型对从摘心到短日处理、单苞、单蕾、多蕾和开花期的模拟预测值与实测值的符合度较好。模拟值与实测值基于 1:1 线的决定系数 R^2 为 0.99,回归估计标准误差 $RMSE$ 分别为 0.7 d、3 d、3.5 d、0.7 d 和 2 d,预测精度明显高于以有效积温为尺度的发育模型。模型对单位面积总干质量、叶干质量、茎干质量和苞叶干质量的模拟值与实测值基于 1:1 线的 R^2 和 $RMSE$ 分别为 0.98、0.97、0.91、0.95 以及 7.12 g/m^2 和 7.49

g/m^2 、 3.89 g/m^2 和 2.48 g/m^2 。模型对一品红单位面积总干质量的预测精度明显高于基于光合作用驱动的生长模型。该研究建立的模型能够较准确地预测温室盆栽一品红各生育期出现时间、干物质生产和各个器官干质量的动态,模型的预测精度较高、参数少且易获取、实用性较强。

参考文献

- [1] 张红菊,戴剑锋,罗卫红,等. 温室盆栽一品红生长发育模拟模型. 农业工程学报,2009,25(11): 241-247.
- [2] 杨再强,罗卫红,陈发棣,等. 温室标准切花菊发育模拟与收获期预测模型研究. 中国农业科学,2007, 40(6):1229-1235.
- [3] 袁昌梅,罗卫红,张生飞,等. 温室网纹甜瓜发育模拟模型研究. 园艺学报,2005,32(2):262-267.
- [4] 江明艳. 遮荫和光质对一品红生长发育的影响研究. 雅安:四川农业大学,2004.
- [5] Liu B, Heins R D. Photothermal ratio affects plant quality in 'Freedom' poinsettia. Journal of the America Society for Horticultural Science, 2002,127(1):20-26.
- [6] Hagen P, Moe R. Effect of temperature and light on lateral branching in poinsettia (*Euphorbia pulcherrima* Willd.). Acta Horticulturae, 1981, 128:47-51.
- [7] 夏春森,朱义君,夏志卉,等. 名新花卉标准化栽培. 北京:中国农业科学出版社,2005.
- [8] Whipker B, Jones R, Baker J, et al Poinsettia problem diagnostic key: Physiological disorders of poinsettias. Online. North Carolina State University, Dep. of Hort Sci., 1990.
- [9] 鲁涤非. 花卉学. 北京:中国农业出版社,1997.
- [10] 杨再强,戴剑锋,罗卫红,等. 单位面积杆数对温室标准切花菊品质影响的预测模型. 应用生态学报. 2008,19(3):575-582.
- [11] 倪纪恒,罗卫红,李永秀,等. 温室番茄叶面积与干物质生产的模拟. 中国农业科学,2005,38(8): 1629-1635.