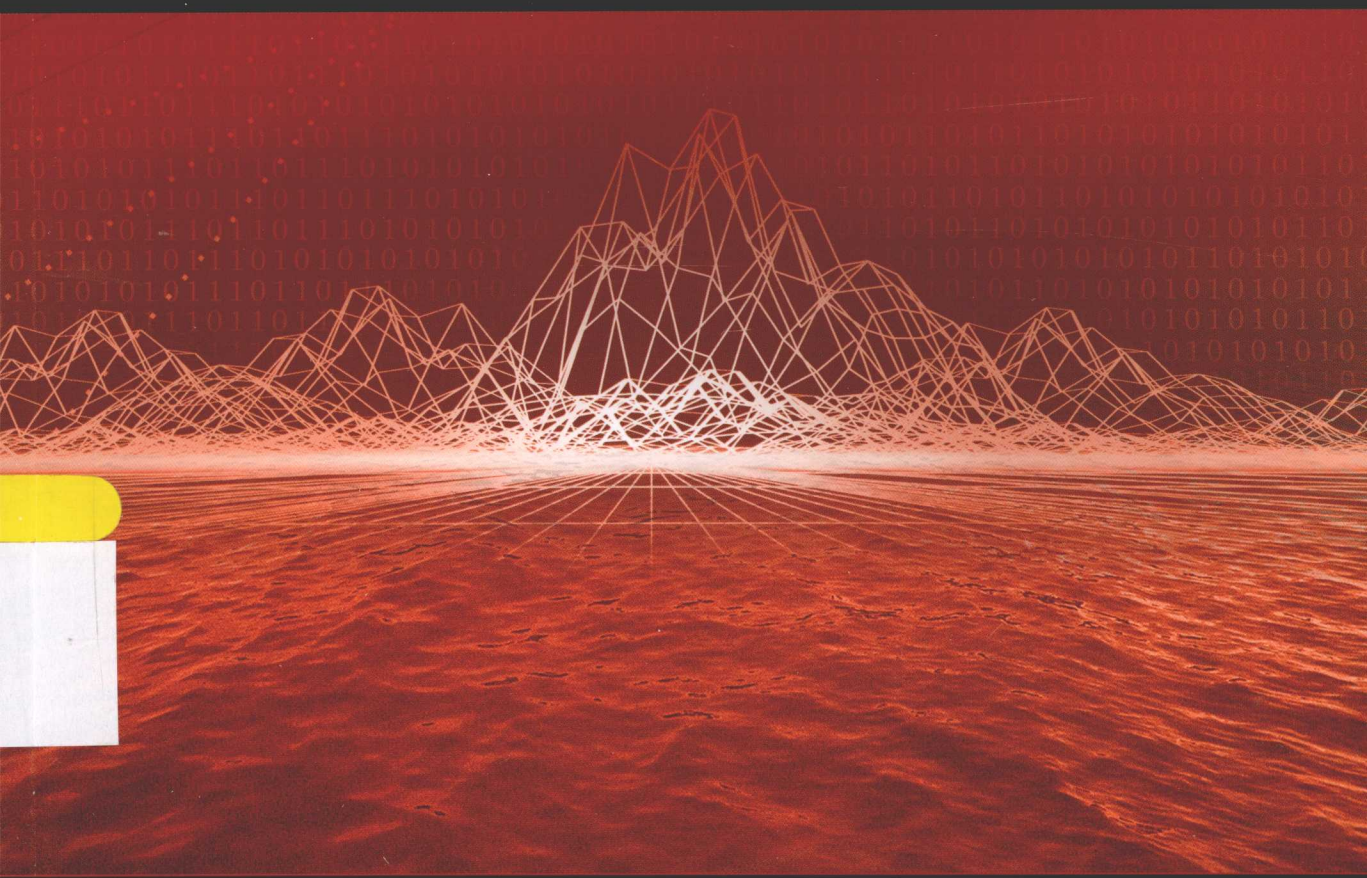


The Application and Research
of Mathematical Model
in Ecology

32

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(32)

The Application and Research of Mathematical Model in Ecology(32)

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,量化地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. 32/杨东方,王凤友编著. —北京:海洋出版社,2015.7
ISBN 978-7-5027-9010-3

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280878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7月第1版 2015年7月第1次印刷

开本:787mm×1092mm 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(32)》编委会

主 编 杨东方 王凤友

副主编 朱四喜 贺华中 吴有富 童 红 陈 豫

编 委 (按姓氏笔画为序)

刁春燕 王 艺 邓 婕 冯志纲 孙静亚

余文翎 吴云杰 杨 成 杨秀琴 杨佩华

杨丹枫 苏春花 赵孝梨 常彦祥 黄 宏

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) 定量化描述生态过程,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,提供的良好的研究环境,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,祖国在心间。

杨东方 王凤友

2015年5月16日

目 次

黄瓜干物质的产量模型	(1)
红枣维生素的热降解公式	(8)
滤波器的消除噪声公式	(12)
平原农业生态的能值评估模型	(15)
农机装备的水平组合模型	(20)
灌区水资源的优化配置模型	(26)
棉花穴播轮的种子运动模型	(30)
雷达影像的土壤湿度反演模型	(34)
秸秆合成甲醇的动力模型	(37)
农业机械的作业成本预测模型	(41)
苹果生态的适宜性评价公式	(45)
电网多谐波的叠加公式	(50)
冷库门的冷风渗透模型	(54)
食品微波加热的杀菌模型	(58)
稻谷和脱粒元件的碰撞方程	(62)
风干白鲢的热风干燥模型	(66)
稻谷干燥的爆腰率增值模型	(69)
水稻产量的遥感估测模型	(72)
温室环境的切换系统模型	(76)
砂石覆盖的土壤蒸发公式	(80)
紫色土的水分分布模型	(82)
秸秆解液的滤膜通量模型	(86)
苹果渣的果胶提取公式	(91)
黄瓜叶片的光合速率公式	(94)
猪场废水的降解模型	(99)
流域土地的分形公式	(103)
博弈论的改进可拓评价模型	(108)
平原农牧渔的产值预测模型	(113)

配电网的无功优化模型	(117)
番茄图像的匹配模型	(120)
真空冷却的熟肉水分迁移模型	(124)
油梨皮的黄酮提取公式	(127)
微灌系统的凯勒均匀度公式	(131)
银杏脱壳机的优化设计公式	(134)
土壤含水的遥感监测模型	(137)
发动机的燃烧模型	(140)
样品的品质检测模型	(143)
发电系统的电源配置计算	(146)
耕施肥机的设计方程	(150)
黄土高原的土壤水分模型	(154)
泥沙的冲淤公式	(157)
随机波的波力公式	(159)
波浪的要素公式	(162)
波群的数值计算	(165)
斜坡护面的波浪公式	(169)
挪威海域的波浪和海流计算	(171)
水泥土的垫层公式	(175)
海堤的波浪爬高模型	(177)
浅水波的波长计算	(180)
波谷的压力公式	(182)
船闸闸室的水体盐量计算	(185)
弧形褶皱板的受力计算	(188)
上海港的台风增水计算	(191)
堤头稳定的计算	(193)
水体中染料云团的运动公式	(195)
港口航道的回淤强度公式	(197)
有效风速的频率计算	(199)
风浪引起防波堤的受损公式	(201)
波浪变形的要素公式	(204)
地形改变的潮汐计算	(208)

波群的统计模型	(211)
水位的判定公式	(214)
海岸演变的计算	(216)
防波堤的优化公式	(218)
桩基的承载能力计算	(221)
绕射和折射的波传播方程	(224)
浅海的波浪谱方程	(229)
盐水入侵量的计算	(232)
定位的距离交会公式	(234)
防浪堤的胸墙断面优化公式	(237)
特征波的要素统计公式	(241)
风荷载的概率模型	(244)
稳定块重计算	(248)
江堤的风浪模型	(250)
波高的分离推算公式	(253)
风输沙率的计算	(256)
沉箱的远程浮运公式	(259)
龙口湾的波浪公式	(261)
龙口湾的泥沙运动模型	(264)
抛石工程的效率计算	(266)
西双版纳的舒适评价方程	(268)
同震滑坡的年代公式	(270)
岩爆的动力扰动方程	(273)
山区流域的坡面流方程	(276)
石山区发展的评价公式	(281)
顺层坡的溃屈破坏模型	(284)
西双版纳鸟类的多样性计算	(288)
石山区发展的评价指标	(290)
水系沟槽的统计函数	(292)
泥石流的土体破坏方程	(295)
山区资源的可持续利用模型	(298)
山系的分形模型	(300)

土壤动物的群落结构模型	(302)
植物因子阻拦明渠输沙的方程	(305)

黄瓜干物质的产量模型

1 背景

针对氮素对温室黄瓜干物质分配和产量影响的模拟研究,了解氮素对干物质分配和产量的定量影响是实现温室黄瓜氮肥优化管理的前提。韩利等^[1]研究通过黄瓜雌性无限生长型品种“戴多星”不同定植期、开花后不同氮素处理的试验,定量分析不同光温条件下氮素施用水平对温室黄瓜开花后干物质分配指数和果实采收指数的影响。在此基础上,进一步建立氮素对温室黄瓜开花后干物质分配和产量影响的预测模型,以期为中国温室黄瓜生产的氮肥优化管理提供理论依据和决策支持。

2 公式

2.1 分配指数的计算

在干物质分配的研究中,常假设干物质首先在地上部分和地下部分进行分配,然后再以地上部干物量为基础,进一步向叶、果、茎中分配^[2]。由于温室黄瓜采用基质栽培,根系不发达,根据我们的试验结果,根系干物质量占植株总干物质量的比例从定植时的 10% 迅速下降到开花结果期的 2%。因此,本研究只考虑地上部分干物质向茎、叶和果实的分配。果实采收后对分配会存在影响,实验分别采用分配指数和收获指数来模拟黄瓜干物质分配和产量。分配指数定义为植株的器官累积干物质量与累积总干物质量之比,随作物的不同生育进程而异,由于分配指数是以器官和植株的累积干物质量计算的,因此已将果实采收对分配的影响考虑进去。根据定义可计算如下^[3]:

$$PIS = WS/WSH \quad (1)$$

$$PIL = WL/WSH \quad (2)$$

$$PIF = WF/WSH \quad (3)$$

式中, PIS 、 PIL 、 PIF 分别为地上部分干物质向茎、叶和果实的分配指数; WSH 、 WS 、 WL 、 WF 分别为植株地上部分累积干物质量、茎累积干物质量、叶累积干物质量和果实累积干物质量,单位为 g/m^2 。

2.2 分配指数随生育进程的变化

温度和辐射是影响干物质分配的两个最重要的环境因子^[4],因此分配指数随生育进程

的变化规律可以用综合考虑温、光影响的量化指标“辐热积”^[5]来描述。辐热积是温度相对热效应和冠层上方光合有效辐射的乘积。由于作物的生长与作物吸收的光合有效辐射直接相关,作物吸收的光合有效辐射与作物实际生长状况和种植密度有关。为了进一步量化辐射效应,本研究在“辐热积”的基础上提出了“冠层吸收辐热积”的概念。冠层吸收辐热积(TEP_{ab})定义为温度相对热效应(RTE)与冠层吸收的光合有效辐射(PAR_{ab})的乘积,计算方法为:

$$TEP_{ab}(i) = RTE(i) \times PAR_{ab}(i) \quad (4)$$

式中, $TEP_{ab}(i)$ 为第*i*天冠层日吸收辐热积, $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$; $RTE(i)$ 、 $PAR_{ab}(i)$ 分别为第*i*天的日平均相对热效应和冠层吸收的日总光合有效辐射, $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 。

黄瓜在一定生长阶段内的累积 TEP_{ab} ($MJ \cdot m^{-2}$) 由冠层每日吸收辐热积累得到:

$$TEP_{ab} = \sum [TEP_{ab}(i)] \quad (5)$$

公式(4)中 RTE 可按文献[3]的公式进行计算, PAR_{ab} 可用下面的公式计算^[6]:

$$PAR_{ab} = PAR \times [1 - \exp(-k \times LAI)] \quad (6)$$

式中, k 为黄瓜冠层消光系数,本研究中取值为0.8^[7]; PAR 为到达作物冠层上方的总光合有效辐射, $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$; LAI 为叶面积指数。

冠层上方的光合有效辐射 PAR 是太阳总辐射中能被植物光合作用所利用的部分,可计算为:

$$PAR = 0.5 \times Q \quad (7)$$

式中, Q 为到达作物冠层上方的太阳总辐射, $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$; 0.5为光合有效辐射在太阳总辐射中所占的比例^[6]。当叶面积指数较小时(根据试验观测, $LAI < 1.3$),由于叶片间没有相互遮光,每张叶片都可以获得充足阳光进行光合作用,且当光辐射超过光饱和点时,光合速率也不再增加^[8]。在这个阶段当光合有效辐射高于单叶光饱和点时 PAR 取单叶光饱和点值。黄瓜单叶光饱和点为 $1300 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ^[9]。当 LAI 不小于 1.3,冠层上方光合有效辐射高于单叶光饱和点时,尽管上层叶片接收的 PAR 在光饱和点以上,群体内部的光照度仍在饱和光强以下,对冠层而言光并没有达到饱和,所以 PAR 取实际值。

根据试验的观测资料和式(1)~式(7),计算得到各处理的黄瓜分配指数和冠层累积吸收辐热积。各处理的茎、叶和果实的分配指数与累积冠层吸收辐热积的关系如图1所示。

由图1可知,各处理地上部分干物质向茎、叶和果实的分配指数随累积冠层吸收辐热积的变化规律都各自遵循同一模式。不同处理的叶分配指数和果实分配指数随累积冠层吸收辐热积的变化动态均可分别用式(8)和式(9)表示:

$$PIL = \begin{cases} 0.8 \times TEP_{ab}^{-0.05} & 0 < TEP_{ab} \leq 13, R^2 = 0.851, SE = 0.028 \\ PIL_{min} + (PIL_t - PIL_{min}) \times \exp[-a \times (-13)] & TEP_{ab} > 13 \end{cases} \quad (8)$$

$$PIF = \begin{cases} 0 & 0 < TEP_{ab} \leq 13 \\ PIF_{max} \times \{1 - \exp[-b \times (TEP_{ab} - 13)] / PIF_{max}\} & TEP_{ab} > 13 \end{cases} \quad (9)$$

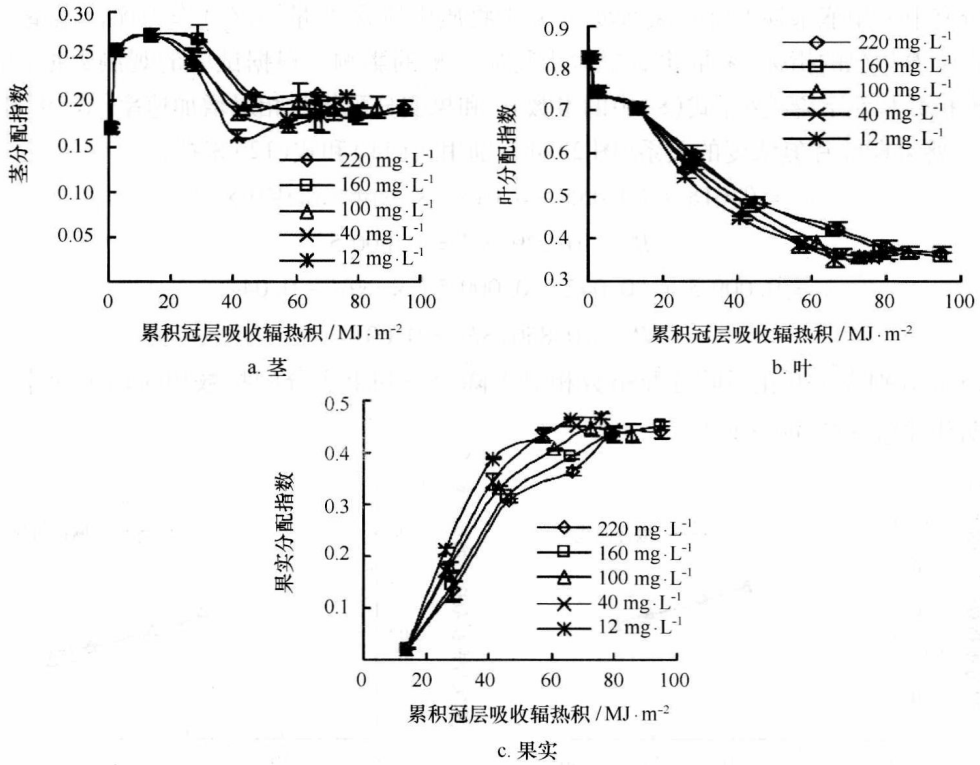


图1 不同处理的地上部分干物质向茎、叶和果实的分配指数与累积冠层吸收辐射热积的关系

则茎分配指数为:

$$PIS = 1 - PIL - PIF \quad (10)$$

式(8)、式(9)都是分段函数,以 TEP_{ab} 达到 $13 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ (黄瓜进入结瓜期)为转折点。式(8)中 PIL 为叶分配指数; $PIL_{\min}$ 为叶分配指数的最小值,与品种特性有关,根据试验的实测数据取值为 0.3; PIL_t 为进入结瓜期时的叶分配指数;参数 a 为叶分配指数进入结瓜期后的相对下降速率,受氮素水平影响。式(9)中 PIF 为果实分配指数; $PIF_{\max}$ 为果实分配指数的最大值,与品种特性有关,根据试验的实测数据取值为 0.5;参数 b 为果实分配指数相对增加速率,受氮素水平影响。

2.3 氮对地上部干物质向茎、叶和果实的分配指数的影响

叶片含氮量和氮浓度是诊断作物氮素亏缺与否的重要指标^[10]。由于实验供试的是长季节栽培的无限生长型品种,在盛果期以前是作物搭建“丰产架子”的时期,干物质主要分配给营养器官,此时叶片氮浓度主要是影响作物干物质的积累(即作物生长速率)。到盛果期时,黄瓜的营养生长和生殖生长趋于平衡,此时叶片氮浓度亦趋于稳定,叶片氮浓度对干物质向不同器官特别是叶片和果实的分配的影响很大,从而影响产量。此外,盛果期占黄瓜全生育期的比例很大,而且此时期的氮素营养状况直接决定着盛果期的长短与产量,所

以本研究中采用盛果期的叶片氮浓度(1 g 干物质中所含 N 量 mg/g)作为评价温室黄瓜作物氮素营养状况的指标,来量化氮素对干物质分配的影响。根据试验的观测数据,开花后叶分配指数相对下降速率[式(8)中的参数 a]和果实分配指数相对增加速率[式(9)中的参数 b]与盛果期叶片氮浓度的关系(图 2)可分别用式(11)和式(12)来拟合。

$$a = 0.018 + (0.055 - 0.018) \times \exp(-0.040 \times N_L) \quad R^2 = 0.979, SE = 0.0005 \quad (11)$$

$$b = 0.0095 + (0.042 - 0.0095) \times \exp(-0.044 \times N_L) \quad R^2 = 0.850, SE = 0.0013 \quad (12)$$

式中, a 、 b 分别表示开花后叶分配指数相对下降速率和果实分配指数相对增加速率; N_L 为盛果期叶片氮浓度, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

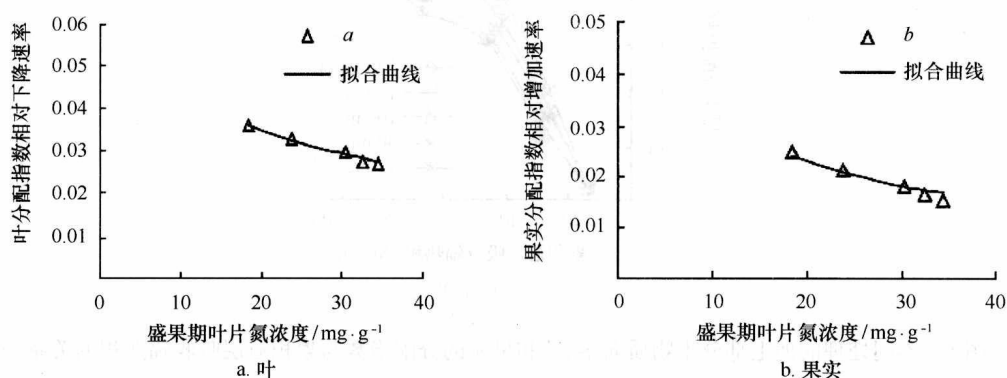


图 2 叶分配指数相对下降速率(a)和果实分配指数相对增加速率(b)与盛果期叶片氮浓度的关系

2.4 茎、叶、果实干物质质量的模拟

茎、叶、果实的干物质质量可根据植株地上部干物质质量和各个器官的分配指数计算:

$$WS = WSH \times PIS \quad (13)$$

$$WL = WSH \times PIL \quad (14)$$

$$WF = WSH \times PIF \quad (15)$$

式中, WSH 、 WS 、 WL 、 WF 分别为地上部干物质质量、茎干物质质量、叶干物质质量和果实干物质质量, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$; PIS 、 PIL 、 PIF 分别为茎、叶、果实分配指数。

根据本研究各个试验的数据,黄瓜地上部干物质质量随累积冠层吸收辐射热的变化如图 3 所示。本研究采用指数—线性生长方程^[6]来描述黄瓜地上部干物质质量随累积冠层吸收辐射热的变化:

$$WSH = 2.9/0.08 \times \ln\{1 + \exp[0.08 \times (TEP_{ab} - 13)]\} \quad R^2 = 0.987, SE = 7.960 \quad (16)$$

式中, WSH 为黄瓜地上部干物质量, $g \cdot m^{-2}$; 2.9 为线性生长阶段干物质量增长速率, 也是最大增长速率, $g \cdot m^{-2} \cdot MJ^{-1}$; 0.08 为指数生长阶段干物质量相对增长速率, $g \cdot m^{-2} / (g \cdot m^{-2} \cdot MJ \cdot m^{-2})$; TEP_{ab} 为累积冠层吸收辐热积, $MJ \cdot m^{-2}$; 13 为指数生长结束时累积的冠层吸收辐热积。

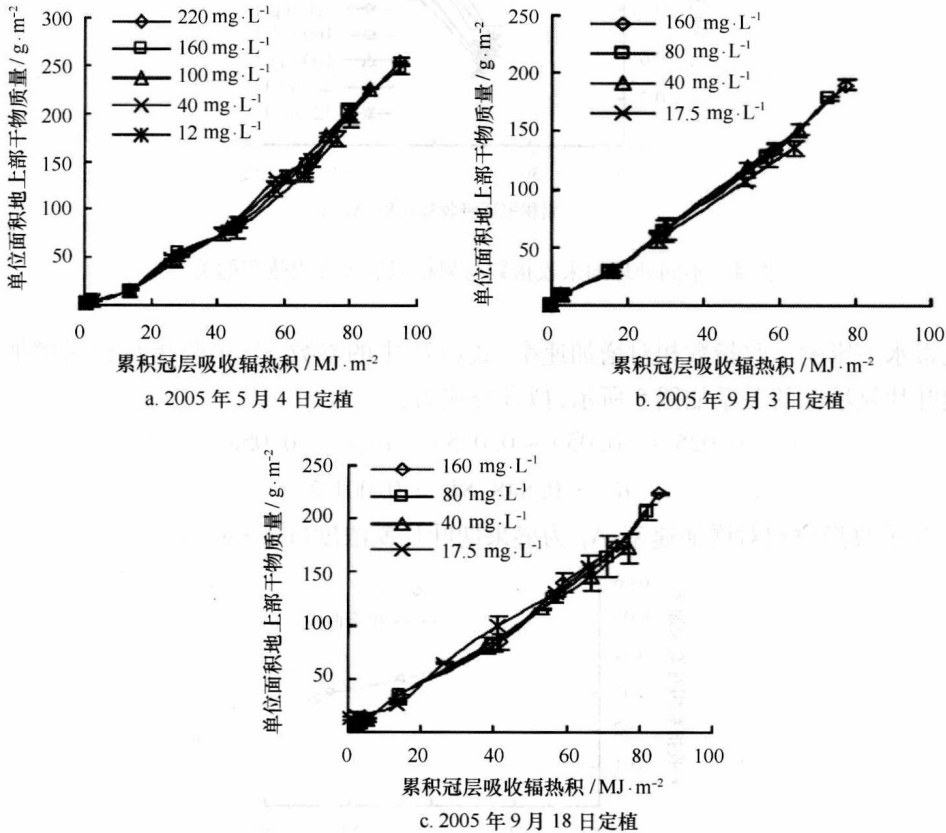


图3 地上部干物质量与累积冠层吸收辐热积的关系

2.5 产量的模拟

由地上部干物质量和干物质分配指数计算出的果实干物质量包括三个部分: 已采收的果实干物质量、植株上尚未成熟的果实干物质量和被摘除化果的果实干物质量, 其中已采收的果实即为形成产量的果实。将累积已采收的果实干物质量占累积果实总干物质量的比例定义为采收指数(HI)。利用试验的数据计算得到各处理的黄瓜采收指数, 不同处理的采收指数随累积冠层吸收辐热积的变化动态(图4)均可以用式(17)表示:

$$HI = HI_{\max} \times \{1 - \exp[-c \times (TEP_{ab} - 13)]\} \quad TEP_{ab} \geq 13 \quad (17)$$

式中, HI 为采收指数; $HI_{\max}$ 为采收指数的最大值, 根据文献[3]和本研究的试验数据取值为 0.96; 参数 c 为采收指数相对增加速率, 受氮素水平影响; TEP_{ab} 为累积冠层吸收辐热积,