

The Application and Research
of Mathematical Model
in Ecology

13

数学模型在生态学 的应用及研究

杨东方 陈 豫 编著



中国科学院
中国科学院图书馆
中国科学院图书馆

数学模型在生态学 的应用研究

中国科学院图书馆

中国科学院图书馆

数学模型在生态学的应用及研究(13)

The Application and Research of Mathematical Model in Ecology(13)

杨东方 陈 豫 编著

海洋出版社

2011 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,定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,通过对该书的学习,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,培养定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。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. 13/杨东方,陈豫编著. —北京:海洋出版社,2011.4
ISBN 978-7-5027-7965-8

I. ①数… II. ①杨… 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(2011)第028835号

责任编辑:方 菁

责任印制:刘志恒

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

北京海洋印刷厂印刷 新华书店北京发行所经销

2011年4月第1版 2011年4月第1次印刷

开本:787 mm × 1092 mm 1/16 印张:19.25

字数:580千字 定价:60.00元

发行部:62147016 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

前 言

细大尽力,莫敢怠荒,远迎辟隐,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?或者它是如何发生的?”。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,将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。又如不能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,不仅要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并预测了自然资源可持续利用。通过本书的学习和研究,可更好地促进自然资源、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。

本书是在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放”和“近海水域预防环境污染养殖模型”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和上海海洋大学的李家乐院长;还要感谢刘瑞玉院士、冯士筴院士、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,祖国在心间。

杨东方 陈 豫

2010年8月7日

目 次

自毒效应的响应指数	(1)
农业生态经济系统的评估	(3)
土壤肥力的内梅罗指数	(5)
药剂抑菌效果的计算	(7)
冠层能量平衡的计算	(9)
植物再生能力的计算	(13)
区域的生态足迹和生态承载力	(15)
草害的指数计算	(18)
土地使用权和生态产品的计算	(20)
频率磁化率的测定	(23)
动物养殖的贡献率	(25)
抗氧化能力的隶属函数	(27)
叶片叶绿素的计算	(29)
土壤质量的评价指数	(31)
作物系数的计算	(33)
资产负债表的理论模型	(36)
甲烷通量的计算	(38)
玉米根系分布的计算	(40)
冠层光合有效辐射的计算	(42)
土壤肥力的评价指数	(44)
冬小麦籽粒的灌浆速率方程	(46)
农田蒸散量及水分利用效率	(48)
空间分布的理论抽样和序贯抽样	(50)
集对分析法的评价	(52)
热量平衡及蒸散量的计算	(55)
最小耕地面积及耕地压力指数模型	(57)
多维时空全息协调理论评价	(60)

光解动力学方程	(62)
Log Normal 和 Modified Gaussian 模型	(64)
细根的生物量及年周转模型	(66)
线虫群落的评价指数	(68)
干物质的指数计算	(71)
土壤氮素表观盈亏的计算	(73)
协同克立格法的估值	(75)
农业水灾脆弱性评价模型	(77)
群落多样性指数比较	(79)
遭遇霜冻风险度的经验方程	(81)
区域农业系统的协调度函数	(83)
氮肥的分配率和利用率	(85)
覆盖方法的蒸腾计算	(87)
灰类型白化权的函数	(89)
竞争系数的计算	(91)
Cochran 公式的取样计算	(93)
植物气候生产力的计算	(95)
水肥耦合效应模型	(97)
生态位指数的计算	(99)
生态压力指数的计算	(101)
种子活力的计算	(103)
根系增大土壤抗剪切强度的力学模型	(105)
土壤重金属的污染评价	(107)
植物种内、种间竞争能力的计算	(109)
旱地棉花氮素生产效率和水分利用效率	(111)
地下水位及地表径流的计算	(113)
林下枯落物吸持降水能力的计算	(115)
土壤中硝态氮累积量的计算	(117)
根分泌物产生的效应模型	(119)
DSS AT - CropGro - Soybean 模型的应用	(121)
农果复合系统的能量计算	(123)
生态环境状况指数模型	(125)

农业区位商的计算	(128)
养殖海带的生长模型	(130)
一维分形海面模型	(134)
气浮法的采收模型	(140)
沉积物活动时间和输运率计算	(142)
海滩平衡剖面形态模型	(145)
混浊水声衰减的模型	(147)
有效波高的反演公式	(149)
共线法对海面高度的计算	(151)
河口及海湾生态系统的健康评价	(153)
单种 P-Z 赤潮生态模型	(155)
沉积物粒度 Fork-Ward 公式	(158)
抛弃式温盐探头运动模型	(160)
马尔可夫链波高相关性模式	(164)
局地垂直螺旋度公式	(166)
蛇行破坏期望滑移量模型	(168)
BP 神经网络长期预测数值模型	(172)
飞雁滩近岸水动力特征模型	(175)
孤立波的 KP 方程	(179)
石岛湾水道影响环境的数值模拟	(182)
局部投影算法模型	(186)
球面坐标的二维风暴潮模型	(190)
不规则波的越浪率计算	(192)
多波束测深系统的校准模型	(198)
非接触式海洋模拟平台测量模型	(202)
高频波浪的谱分析模型	(207)
遗传算法	(210)
效用理论的风险决策模型	(213)
SWAN 海浪数值模式	(216)
复杂地形的 Boussinesq 方程	(218)
天文潮与风暴潮的耦合模型	(222)
水团的最优分割法	(225)

岸坡波浪传播摄动法	(227)
加权融合概率模型	(231)
随机非线性的动植物模型	(235)
风浪作用的泥沙骤淤模式	(240)
SeaWinds 散射计模型	(243)
盐度输运公式	(246)
光衰减系数	(250)
海岸演变的一线模型	(253)
岬间海湾岸线平衡形态神经网络模型	(257)
区域生物多样性综合评价	(260)
果树蒸腾预测模型	(262)
区域生态效率评价	(264)
景观空间负荷对比指数的计算	(267)
非对称和对称的对数比转换公式	(269)
种群点格局计算	(271)
畜牧产品生态足迹公式	(272)
重金属对海水无机碳的影响模拟	(273)
城市土地生态水平评价的物元模型	(275)
模糊综合评判模型	(278)
生态位计测	(281)
生态系统风险的模型	(283)
营养通道模型	(285)
种群的 Leslie 矩阵模型	(287)
物质流的 STIRPAT 模型	(289)
物种多样性公式	(291)
土地利用程度的综合指数	(293)

自毒效应的响应指数

1 背景

菊花作为我国十大传统名花和一种重要的多用途园艺作物,与其他鲜切花一样,在规模化、专业化和设施化的要求下,生产面积势必不断扩大,但菊花的自毒作用抑制了菊花的生长,导致其连作障碍^[1],成为限制菊花专业化生产的瓶颈之一。周凯^[2]等采用室内生测及温室盆栽的方法,研究菊花不同部位和根际土壤水浸液对同品种盆栽植株光合作用的影响,探讨菊花自毒的可能作用机制,为揭示菊花自毒作用机制及其他园艺作物连作障碍问题的解决提供了理论依据。

2 公式

自毒作用(Autotoxicity),又称自身化感作用(Self-allopathy),指植物通过地上部淋溶、系分泌、植株残茬分解及气体挥发等途径释放的生物代谢产物过度积累而抑制下茬同种或同科植物生长的现象^[3]。

以响应指数 RI(Response index)^[4]衡量菊花不同部位水浸液自毒效应的大小,即:

$$RI = \begin{cases} 1 - CT & (T \geq C) \\ T/C - 1 & (T < C) \end{cases}$$

式中, C 为对照值, T 为处理值。 $RI \geq 0$ 为促进, $RI < 0$ 为抑制,定义对照的 RI 值为 0,绝对值的大小与作用强度一致。所得数据用 SPSS 软件进行差异显著性分析。

3 意义

在大面积人工集约栽培下,植物面临种内竞争的压力,需通过包括自毒作用在内的调节机制调节种群密度至一个合适的范围。以响应指数衡量菊花不同部位水浸液自毒效应的大小,从而确定一直是影响园艺和其他农作物专业化和设施化生产的连作障碍,可以更好地解决保护地栽培和设施栽培生产带来的连作障碍和自毒问题已是当务之急。

参考文献

- [1] 周凯,郭维明,王智芳. 菊花不同部位水浸液自毒作用的研究. 西北植物学报,2008, 28(4): 759 – 764.
- [2] 周凯,郭维明,王智芳,等. 菊花不同部位及根际土壤水浸液处理对光合作用的自毒作用研究. 中国生态农业学报, 2009, 17(2): 318 – 322.
- [3] Rice E L. Allelopathy(2nd Ed.). New York: Academic Press Inc, 1984.
- [4] Williamson G B, Richardson D. Bioassay for allelopathy: measuring treatment responses with independent controls. Journal Chemical Ecology,1988, 14(1): 181 – 187.

农业生态经济系统的评估

1 背景

农业生态经济系统是由农业自然资源生态环境系统与农业经济系统耦合而成的复杂生产系统,系统运行受自然规律和经济规律的双重制约,其影响因素繁杂而多样^[1]。因此,该系统定量综合评估将涉及不同层面,这方面虽不乏有益的研究,但因数据采集困难或对系统结构把握不准等原因,模型大多过于简陋。晏路明^[1]以福建省为例,尝试借助地理信息系统(GIS)、遥感(RS)技术和现代数学方法进行一些积极的探索和改进,以期能客观而有效地反映真实系统,并对区域农业可持续发展研究有所促进。

2 公式

2.1 原始指标数据的采集

例如地表起伏度的计算和数据采集:地表起伏从宏观上规定了一个地区生态环境的脆弱程度,可由式(1)所刻画的地表起伏度(RDLS)指数来表示^[2]:

$$RDLS = \{[\max(h) - \min(h)] / [\max(H) - \min(H)]\} \times [1 - P(A)/A] \quad (1)$$

式中, $\max(h)$ 为地区最高海拔高度(m), $\min(h)$ 为地区最低海拔高度(m), $\max(H)$ 为全国最高海拔高度(m), $\min(H)$ 为全国最低海拔高度(m), $P(A)$ 为地区平地所占面积(km^2), A 为地区陆地总面积(km^2)。RDLS值越大,表明地形对生态环境的“应力”或“胁迫”也越大,因而可作为农业生态环境脆弱性的表达因子之一。在DTM上,应用该式可快速计算出全省各市(县)的RDLS值。

2.2 农业生态经济系统综合评估的指标体系构建

农业生态经济系统评估的指标体系可分为总体层、状态层、基准层、变量(源指数)层和要素层5个层面。

2.3 原始数据的无量纲化与指数矩阵的生成

设评估指标体系某一层面有原始数据矩阵 $X = [X_{ij}]_{n \times m}$, n 为样本数目, m 为该层面的指标数目。则由式(2)对原始数据进行无量纲化变换可生成该层面的指数矩阵 $Y = [Y_{ij}]_{n \times m}$ 。式(2)中的正指标为越大越好的指标,而逆指标则为越小越好的指标^[3]。

$$Y_{ij} = \begin{cases} 100 \times X_{ij}/\max X_{ij} & (X_{ij} \text{ 为正指标}) \\ 100 \times (\max X_{ij} + \min X_{ij} - X_{ij})/\max X_{ij} & (X_{ij} \text{ 为逆指标}) \end{cases} \quad (2)$$

$1 \leq i \leq n \quad 1 \leq i \leq n \quad 1 \leq i \leq n$

2.4 各层面指标权重的确定和指标体系的逐层收敛

采用熵权法^[4-6],从底层到高层逐层计算各层面指标的权重结构。其步骤为:①按式(3)对矩阵 Y 计算第 j 项指标下第 i 个样本指标值的比重 p_{ij} ;②按式(4)计算第 j 项指标的信息熵值 e_j ;③按式(5)计算第 j 项指标的权重 a_j 。

$$p_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^n y_{ij}} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

$$e_j = -(\ln n)^{-1} \sum_{i=1}^n (p_{ij} \ln p_{ij}) \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

$$a_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^m (1 - e_j)} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

则所有变量指标的权重向量为 $A = [a_1, a_2, \dots, a_m]^T$ 。

3 意义

利用各种数学方法为地理数据的采集、分析、解释和成果的可视化表达提供有效的技术和方法支持,且基于主成分分析法或熵权法的权重确定,能充分利用原始数据本身空间波动的信息,避免指标权重确定的主观性,使样本区分结果更为客观。可为农业管理规划和决策提供有效的数据分析支持。尤其通过对一些极端现象的揭示,可为不同层面的农业决策者就相应市(县)有针对性地总结经验和发现偏差提供参考,进而为农业生态经济发展不同层面的扬优挖潜和改善劣势指出方向。

参考文献

- [1] 晏路明. 农业生态经济系统综合评估的方法与技术应用研究. 中国生态农业学报, 2009, 17(2): 348-353.
- [2] 中国科学院可持续发展研究组. 中国可持续发展战略报告. 北京: 科学出版社, 1999.
- [3] 胡永宏, 贺思辉. 综合评价方法. 北京: 科学出版社, 2000.
- [4] 余宏. 外贸出口市场多元化的定量表达. 商业时代, 2006(18): 28-29.
- [5] 邱苑华. 管理决策与应用熵学. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [6] 周荫清. 信息理论基础. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.

土壤肥力的内梅罗指数

1 背景

土壤养分含量受成土母质、地形、人类活动等多种因素的影响^[1],对土壤养分时空变异的充分了解是精准农业中土壤养分管理和合理施肥的基础^[2-3]。目前施肥结构大多从有机无机肥结合变为以施用化肥为主,必然对区域土壤的肥力质量产生重大影响。

王绪奎等^[4]以位于江苏省环太湖地区的常州市武进区为例,选取有代表性的6种水稻土亚类为研究对象,比较1982年和2004年相同位置上不同水稻土亚类土壤的肥力质量变化,并对驱动该变化的农业管理因素进行分析,以期为该区土壤质量管理和农业耕作制度的改良提供借鉴模式和参考依据。

2 公式

由于加和法、平均值法、加权平均法等受主观因素影响较大,此次评价采用了较为客观的内梅罗(Nemerow N. C.)公式^[5],并加以修正:

$$Q = \sqrt{\frac{(\bar{P}_i)^2 + (P_{i\min})^2}{2}} \times \frac{n-1}{n}$$

式中, Q 为土壤肥力质量指数, $\bar{P}_i$ 为样品中单质量指数的均值, $P_{i\min}$ 为各种样品单质量指数的最小值,为参评因子个数。上式用 $P_{i\min}$ 代替了内梅罗公式中的 P_{imax} ,并加上修正项 $(n-1)/n$ 。根据土壤肥力质量指数及土壤普查资料,可将土壤肥力质量分为5级:优(质量指数2.5)、良(质量指数2.5~2.0)、中(质量指数2.0~1.5)、差(质量指数1.5~1.0)、极差(质量指数小于1.0)^[6-7]。

3 意义

修改后的内梅罗公式一方面突出了土壤属性因子中最差因子对土壤质量的影响,反映了生态学中作物生长的最小因子定律;另一方面增加修正项后,提高了该评价结果的可信度,参与评价的因子越多, $(n-1)/n$ 的值就越大,可信度越高^[6]。

利用此公式可以研究近20年来区域水稻土肥力质量的演变规律,对于人为调控和定向

培肥土壤,改善生态环境,促进区域农业的可持续发展具有重要意义。

参考文献

- [1] Berndtsson R, Bahri A, Jinno K. Spatial dependence of geochemical elements in a semiarid agricultural field II. Geostatistical properties. *Soil Sci Soc Am J*, 1993, 57: 1 323 – 1 329.
- [2] Burgess T M, Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semi-variogram and punctual Kriging. *J Soil Sci*, 1980, 31: 315 – 341.
- [3] Franzen D W, Hofman V L, Halvorson A D, et al. Sam-pling for site-specific farming: Topogrhy and nutrient considerations. *Better Crops*, 1996, 80(3): 14 – 18.
- [4] 王绪奎,徐茂,汪吉东,等. 太湖地区典型水稻土大时间尺度下的肥力质量演变. *中国生态农业学报*, 2009, 17(2): 220 – 224.
- [5] Hedlund A, Witter E, Bui X A. Assessment of N, P and K management by nutrient balances and flows on pre-urban farms in southern Vietnam. *European Journal of Agronomy*, 2003, 20(1): 71 – 87.
- [6] 秦明周,赵杰. 城乡结合部土壤质量变化特点与可持续性利用对策. *地理学报*, 2000, 55(5): 545 – 553.
- [7] 张庆利,潘贤章,王洪杰. 中等尺度上土壤肥力质量的空间分布研究及定量评价. *土壤通报*, 2003, 34(6): 493 – 497.

药剂抑菌效果的计算

1 背景

印楝(*Azadirachta indica* A. Juss)系楝科楝属乔木,含有能防虫、杀虫、杀菌的活性物质印楝素^[1],是当前世界各国研究最多的植物源杀虫剂;其种子中含有杀线虫、杀菌和抗病毒的活性成分^[2]。

叶敏等^[3]采用菌丝生长速率法,测定了印楝素对几种重要植物病原菌的毒力活性,研究了印楝素与病原菌的剂-效关系和时-效关系。

2 公式

药剂抑菌效果测定:采用FAO推荐的菌丝生长速率法^[4]进行药剂的抑菌效果测定。在经预培养的供试病原菌菌落边沿,用内径5 mm的打孔器制取菌饼,分别接种到含不同浓度印楝素及无药(含等量丙酮)的PDA培养基平板上,26℃下黑暗培养。接种一定时间后用十字交叉法测量菌落直径,依各处理菌落直径计算不同浓度印楝素对病原菌菌丝生长的抑制率。

$$\text{菌丝生长抑制率} = \left(1 - \frac{\text{药剂处理菌落平均值直径}}{\text{对照菌落平均直径}} \right) \times 100\%$$

3 意义

印楝提取物中含有对昆虫具有胃毒、拒食、抑制呼吸、抑制激素分泌、抑制生长发育和降低生育能力的活性化合物,其中印楝素的活性作用尤为突出^[5-6]。但不同官能团对昆虫具有不同的生物活性,相同官能团对不同昆虫的生物活性也不相同^[7]。通过菌丝生长抑制率的公式测定药剂抑菌效果,可以测定印楝素类化合物的构-效关系,为印楝素杀菌剂的开发利用提供依据。

参考文献

[1] 赖永祺. 印楝栽培. 昆明:云南科技出版社, 2003: 1.