

The Application and Research  
of Mathematical Model  
in Ecology

18

# 数学模型在生态学 的应用及研究

杨东方 陈 豫 编著



 海洋出版社

# 数学模型在生态学的应用及研究(18)

The Application and Research of Mathematical Model in Ecology(18)

杨东方 陈 豫 编著



YZLI0890163897

海洋出版社

2012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. 18/杨东方,  
陈豫编著. —北京:海洋出版社,2012. 4

ISBN 978-7-5027-8209-2

I. ①数… II. ①杨… ②陈… 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(2012)第 035672 号

责任编辑:方 菁

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

2012 年 4 月第 1 版 2012 年 4 月第 1 次印刷

开本:787 mm × 1092 mm 1/16 印张:20

字数:580 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

# 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) 能够动态的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生态数学模型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,祖国在心间。

杨东方 陈 豫

2011年12月12日

# 目 次

|                     |       |
|---------------------|-------|
| 生态环境规划模型 .....      | (1)   |
| 植被指数的遥感模型 .....     | (5)   |
| 小麦生长模型 .....        | (11)  |
| 藻类生态动力学模型 .....     | (15)  |
| 土壤感热和潜热的通量计算 .....  | (18)  |
| 城市与生态环境的耦合模型 .....  | (21)  |
| 植物生态的场模型 .....      | (24)  |
| 群落的稳定性模型 .....      | (28)  |
| 生物富集的半静态双箱模型 .....  | (31)  |
| 森林类型的序列指示条件模拟 ..... | (34)  |
| 林木分布格局的角尺度均值 .....  | (37)  |
| 农林系统的水分运移模型 .....   | (40)  |
| 二氧化碳排放控制的经济模型 ..... | (43)  |
| 景观格局的干扰模型 .....     | (48)  |
| 景观的边缘效应模型 .....     | (50)  |
| 土壤硝态氮淋洗的传递函数 .....  | (54)  |
| 稻田甲烷的排放模型 .....     | (59)  |
| 生态环境评价的网络模型 .....   | (65)  |
| 侵蚀地区的植被生态模型 .....   | (68)  |
| 植物蒸腾的计算公式 .....     | (72)  |
| 昆虫发育的随机物候学模型 .....  | (77)  |
| 林内穿透雨量模型 .....      | (79)  |
| 种群空间的分布格局函数 .....   | (82)  |
| 草地的投影分类模型 .....     | (87)  |
| 生物链的准三分子模型 .....    | (90)  |
| 玉米生长的器官形态模型 .....   | (98)  |
| 甘草茎叶与根的网络模型 .....   | (101) |
| 作物的产量模型 .....       | (105) |
| 陆气的耦合模式 .....       | (108) |

|                     |       |
|---------------------|-------|
| 林地枯落物的平衡模型 .....    | (112) |
| 稻麦籽粒的充实度模型 .....    | (115) |
| 林区的水均衡计算式 .....     | (117) |
| 降水的异常型态特征模型 .....   | (119) |
| 气象预测的虫口消长模型 .....   | (122) |
| 农业经济效益的投资计算 .....   | (126) |
| 施肥与产量的关系模型 .....    | (129) |
| 土壤的采样点估算 .....      | (132) |
| 土壤与产量的关系模型 .....    | (134) |
| 土壤空间的插值公式 .....     | (136) |
| 除草剂的生物降解模型 .....    | (139) |
| 大气水势的计算式 .....      | (142) |
| 作物单叶的水分利用效率计算 ..... | (145) |
| 作物的蒸散公式 .....       | (147) |
| 森林涵养水源的评价公式 .....   | (149) |
| 风能资源的估算 .....       | (153) |
| 红松的气候生产力计算 .....    | (156) |
| 番茄生长发育的动态模型 .....   | (159) |
| 植物篱的带间距计算 .....     | (164) |
| 冬小麦作物的生长模型 .....    | (167) |
| 种间的联结系数公式 .....     | (169) |
| 土壤水盐的蒸散模型 .....     | (171) |
| 植被碳同化的遥感信息公式 .....  | (176) |
| 植被分布的评价模式 .....     | (178) |
| 大气与土壤的耦合模式 .....    | (181) |
| 光合速率的计算 .....       | (183) |
| 土壤能量的通量计算 .....     | (185) |
| 马铃薯腾发量的计算 .....     | (188) |
| 农田生态系统的蒸散量方程 .....  | (191) |
| 旱地作物产量与水分的函数 .....  | (193) |
| 农田蒸散力的计算公式 .....    | (197) |
| 气候影响冬小麦的评估模型 .....  | (200) |
| 叶面积指数增长的普适模型 .....  | (205) |
| 光合色素含量的计算 .....     | (209) |

|                                      |       |
|--------------------------------------|-------|
| 土壤的导温率和热通量计算 .....                   | (212) |
| 栽培技术与苹果梨品质的关系模型 .....                | (215) |
| 果树冻害指数的计算 .....                      | (218) |
| 冠层消光系数模型 .....                       | (220) |
| 农林牧用地结构的优化模型 .....                   | (224) |
| 牧草的气候生产力计算 .....                     | (227) |
| 物质交互作用的分类公式 .....                    | (230) |
| 农田热量的分配公式 .....                      | (233) |
| 种群的增长计算 .....                        | (236) |
| 入渗土壤模型和水流连续方程 .....                  | (239) |
| 湿润指数的计算公式 .....                      | (242) |
| 群体结构的变异系数计算 .....                    | (244) |
| 良性养分的循环指数计算 .....                    | (246) |
| 石油的吸附热计算 .....                       | (248) |
| 海域环境污染的负荷计算 .....                    | (250) |
| 溢油的风险等级模型 .....                      | (253) |
| 船舶溢油发生的概率模型 .....                    | (257) |
| 影响赤潮的多元回归方程 .....                    | (261) |
| 沉积物水界面的 $\text{NH}_4^+$ 扩散通量计算 ..... | (265) |
| 水化要素间的关系公式 .....                     | (267) |
| 湿地沉积物的污染评价公式 .....                   | (269) |
| 叶绿素 a 的遥感探测模型 .....                  | (271) |
| 海上溢油流场的网格计算 .....                    | (273) |
| 石油烃的环境容量计算 .....                     | (277) |
| 重金属的生态危害评价公式 .....                   | (282) |
| 沉积物中重金属污染评价 .....                    | (284) |
| 海洋富营养化的集对分析模型 .....                  | (287) |
| Al 溶解态与颗粒态的转化公式 .....                | (291) |
| 种群繁殖分布的计算公式 .....                    | (293) |
| 林带的疏透度模型 .....                       | (298) |
| 生态场的梯度模型 .....                       | (303) |
| 反曲原甲藻种群动态机理模型 .....                  | (306) |

# 生态环境规划模型

## 1 背景

生态环境是人类生存和发展的基本条件,经济、社会发展的物质基础。如何保护和建设好生态环境,合理开发利用自然资源,是当今世界所面临的共同问题<sup>[1]</sup>。针对吉林西部研究区的特点,要使生态环境和经济协调发展,必须统筹规划,突出土地盐碱地治理的重点,实施土、林、水综合治理<sup>[1]</sup>。汤洁等<sup>[1]</sup>根据农业生态环境系统多目标、多层次、多变量和非线性的特点,应用系统动力学的原理与方法,建立系统动力学仿真模型,模拟封闭系统的动态变化,定量预测系统行为。

## 2 公式

### 2.1 建立大安的系統动力学仿真模型

系统动力学简称 SD(System Dynamics),1956 年由美国麻省理工学院福瑞斯特(Forrester)教授创始<sup>[2]</sup>。它以反馈理论为基础,以数学计算机仿真技术为手段,研究复杂系统的行为<sup>[3]</sup>。汤洁等<sup>[1]</sup>采用专用系统动力学仿真软件(Professional DYNAMO Plus)建立了模型,其空间边界为大安市全区,时间边界为 2000—2020 年,内容边界为人口、资源、环境、经济及其相关部分。设定 3 个模型假设:①假定全市为空间的封闭系统,模型不考虑各种产品的外部交换与调节;②鉴于大安市的人口迁移难以定量化,2000 年迁入人口数(14 672 人)和迁出人口数(18 298 人)相差不大。考虑到当地的经济状况,人口迁出和迁入不会有较大的变化。本模型忽略了人口迁入和人口迁出的差异,仅考虑自然增长率对人口变化的影响;③在未来 20 年内实现全市土地资源的合理利用,并以此确定耕地、林地和牧草地的变化速率。

根据系统动力学原理,结合大量历史数据,在对系统主要变量的变化特征进行细致分析的基础上,设计系统动力学因果反馈流程分析图(图 1)。

### 2.2 子系统分析

大安市的生态环境系统包括 6 个子系统,即人口、土地资源、种植业、畜牧业、生态效益和社会经济子系统,社会经济子系统仅考虑农业经济子系统。



GA. K 为草地面积, WA 为水域面积, ML. K 居民建筑用地, TA 为交通用地。

表 1 大安市土地利用类型

| 土地类型                 | 面积       | 所占百分比   | 土地类型                  | 面积/hm <sup>2</sup> | 所占百分比  |
|----------------------|----------|---------|-----------------------|--------------------|--------|
| 幅员面积/hm <sup>2</sup> | 487. 900 | 100. 00 | 农村道路/km               | 492                |        |
| 耕地/hm <sup>2</sup>   | 84. 314  | 17. 28  | 水域/hm <sup>2</sup>    | 73. 20             | 15. 00 |
| 林地/hm <sup>2</sup>   | 51. 30   | 10. 51  | 未利用土地/hm <sup>2</sup> | 170. 900           | 35. 03 |
| 牧草地/hm <sup>2</sup>  | 74. 700  | 15. 31  | 荒草地/hm <sup>2</sup>   | 11. 300            | 2. 32  |
| 交通用地/hm <sup>2</sup> | 5. 500   | 1. 13   | 盐碱地/hm <sup>2</sup>   | 138. 50            | 28. 39 |
| 铁路/km                | 134      |         | 沼泽地/hm <sup>2</sup>   | 18. 50             | 3. 79  |
| 公路/km                | 378      |         |                       |                    |        |

\* 引自吉林省大安市国民经济统计资料(2000 年)。

### 2. 2. 3 种植业子系统

土地生产潜力取决于作物生产力,其核心是光合作用的能力。计算土地生产潜力模型有单因素模型和多因素模型,根据大安市土地资源的特点,汤洁等<sup>[1]</sup>采用多因素衰减模型,考虑到光合有效辐射、温度、水分、土壤肥力因素对作物生产潜力的影响,对模型中函数关系和参数选择进行了研究,得出该区土地资源潜力模型:

$$Y = f(t) \times f\left[\frac{P}{E_0}\right] \times f(s) \times f(Q_v)$$

式中, $f(t)$ 为温度影响函数; $f(s)$ 为土壤肥力影响函数; $f(P/E_0)$ 为水分影响函数; $f(Q_v)$ 为光合有效辐射影响函数; $Y$ 为作物生产潜力。

种植业子系统主要方程:

$$A FE. K = CFPE. K + EFPE. K$$

式中, $FE. K$ 为种植业收入, $CFPE. K$ 为粮食收入, $EFPE. K$ 为经济作物收入。

### 2. 2. 4 畜牧业子系统

畜牧业子系统的主要方程:

$$L GA. K = GA. J + DT(GAL. JK - 0)$$

$$R GAL. KL = TABHL(GAIQ, TIME. K, 2000, 2020, 1)$$

式中, $GA. K$ 为草地面积, $GAL. JK$ 为草地增量, $GAIQ$ 为草地年递增量。

### 2. 2. 5 生态效益子系统

生态环境是人类生存和发展的基本条件,随着经济的不断向前发展,人和资源的供需矛盾越来越突出,可持续发展的呼声也愈来愈高。利用生态系统的自我调节能力和生态系统之间的补偿作用,提高物种的再生能力,维持和改善人类赖以生存、生活和生产的自然环

境及其生态系统的稳定性,使人们从中得到环境的整体性效益,即称为生态效益<sup>[5]</sup>。经济-生态渐渐成为此消彼长的发展趋势。从长远利益的角度出发,应该注重生态效益。治理盐碱化、沙化是涉及林、草、水域诸项因素的综合性工程,需要同时并交叉地进行。这里生态效益主要包括林业、草业、种植业的生态效益、形成盐碱地损失的效益、覆盖率和盐碱地所占比重。植物有吸收二氧化碳、释放氧气、涵养水源、改良土壤(提供氮、磷、钾元素)等作用,并将这些作用折合成经济价值,盐碱地损失也可折合成经济损失。

生态效益子系统主要方程:

$$A\ GFSEE.K = PLANEE.K + GAEE.K + FAEE.K - SAALE.K$$

式中, $GFSEE.K$ 为生态效益, $PLANEE.K$ 为种植业生态效益, $GAEE.K$ 为草地生态效益, $FAEE.K$ 为森林生态效益, $SAALE.K$ 为盐碱地损失生态效益。

### 2.2.6 社会经济子系统

经济子系统主要方程:

$$A\ APE = PE.K + FE.K + FORE$$

式中, $APE$ 为农业总收入, $PE.K$ 为种植业收入, $FE.K$ 为畜牧业收入, $FORE$ 为林业收入。

## 3 意义

汤洁等<sup>[1]</sup>建立的系统动力学模型能够定量描述人口、资源、环境与经济之间的相互关系,帮助决策者了解和判断生态环境系统的动态行为,而不仅仅是某些参数的预测。通过不同决策在模型上进行模拟,可以清晰地反映人口、经济与生态环境的相互关系,因此,用系统动力学模型研究生态环境规划具有较强的操作性。

## 参考文献

- [1] 汤洁,余孝云,林年丰. 吉林省大安市生态环境规划系统动力学仿真模型. 生态学报,2005,25(5): 1178-1183.
- [2] 王其藩. 高级系统动力学. 北京:清华大学出版社,1995.
- [3] 尚金武,张妍,刘仁志. 战略环境评价的系统动力学方法研究. 东北师范大学学报(自然科学版), 2001,33(1):84-89.
- [4] 李月辉,赵弈,胡远满,等. 科尔沁沙地东部农牧交错带土地承载力研究. 生态学杂志,2003,22(3): 23-28.
- [5] 李德. 绿地生态效应定量分析的模型. 林业经济,1995(5):67-69.

# 植被指数的遥感模型

## 1 背景

绿色植被的叶面积指数(LAI)是定量分析地球生态系统能量交换特性的一个重要结构变量,不仅可用于农作物产量预估和病虫害评价,而且是描述林冠特性,确定森林二氧化碳、水和氧气交换率的重要变量<sup>[1]</sup>。从遥感数据中,特别是多光谱数据和高光谱数据提取LAI是可行的<sup>[2]</sup>。由于受大气、土壤背景、仪器定标及植被本身光化学过程变化等内外因素的影响,各种VI和LAI的关系具有地域性和时效性<sup>[2]</sup>。简单实用的LAI的反演方法以及反演精度的提高已成为研究的热点和难点<sup>[2]</sup>。李开丽等<sup>[2]</sup>利用从Landsat TM图像中计算得到的VI与在野外实测的LAI值,建立反演LAI回归统计模型,探讨在此自然环境下,这种模型方法的可行性和最优的模型形式。

## 2 公式

### 2.1 遥感植被指数与LAI值的相关分析

#### 2.1.1 植被指数

考虑到大气和背景土壤对反演LAI的影响,李开丽等<sup>[2]</sup>选取了比值植被指数(RVI)、归一化植被指数(NDVI)、垂直植被指数(PVI)、土壤调节植被指数(SAVI)、修正土壤调节植被指数(MSAVI)、大气阻抗植被指数(ARVI)及综合土壤大气调节植被指数(SARVI)。其中,SAVI中的土壤影响因子L取值0.5;ARVI中的光路辐射订正系数取值为1与0.5;SARVI中的L取0.5,光路辐射订正系数取1。以上植被指数的相应计算公式如下:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

$$RVI = NIR / R$$

$$PVI = \sqrt{(0.355NIR - 0.149R)^2 + (0.355R - 0.852NIR)^2}$$

$$SAVI = (1 + L)(NIR - R) / (NIR + R + L)$$

$$ARVI = (\rho_{NIR} - \rho_{RB}) / (\rho_{NIR} + \rho_{RB}) \text{ 其中, } \rho_{RB} = \rho_R - \gamma(\rho_B - \rho_R)$$

$$SARVI = (\rho_{NIR} - \rho_{RB})(1 + L) / (\rho_{NIR} + \rho_{RB} + L)$$

$$MSAVI = \frac{2NIR + 1 - \sqrt{(2NIR + 1)^2 - 8(NIR - Red)}}{2}$$

式中, $NIR, \rho_{NIR}$ 为近红外波段, $R, \rho_R$ 为红色波段, $\rho_B$ 为蓝色波段。

### 2.1.2 植被指数与 $LAI$ 的相关分析

利用 PCI9.0 遥感软件,完成了各样点的植被指数提取。植被指数与  $LAI$  相关分析的结果见表 1。由表 1 可见,除  $PVI$  外,其他植被指数与  $LAI$  都有很高的相关性。因此可以认为,基于植被指数来建立研究区  $LAI$  的遥感监测模型是基本可行的。

表 1 植被指数与  $LAI$  的相关系数

| 植被指数                     | 相关系数    | 显著性   |
|--------------------------|---------|-------|
| $PVI$                    | 0.879 * | 0.000 |
| $NDVI$                   | 0.866 * | 0.000 |
| $PVI$                    | 0.556 * | 0.000 |
| $SAVI(L=0.5)$            | 0.866 * | 0.000 |
| $MSAVI$                  | 0.856 * | 0.000 |
| $ARVI(\gamma=1)$         | 0.857 * | 0.000 |
| $ARVI(\gamma=0.5)$       | 0.866 * | 0.000 |
| $SARVI(L=0.5, \gamma=1)$ | 0.838 * | 0.000 |

\* 显著水平( $P \leq 0.01$ )。

## 2.2 $LAI$ 监测模型的建立

### 2.2.1 一元线性回归模型

回归模型为:

$$y = ax + b$$

式中, $y$  代表  $LAI$ , $x$  代表植被指数。表 2 分别列出了所建立的不同植被指数与  $LAI$  的一元线性拟合模型。

由表 2 可见, $RVI$  的拟合程度最好, $NDVI$  次之,这与大多数人所得的结果一致。 $SAVI$  系列中, $L=0.1$  时, $R=0.8661, R^2=0.7501$ ,表现最好,并且仅次于  $RVI$ ,略低于  $NDVI$ 。 $L=0.35$  时与  $LAI$  的线性相关性表现最差,而当时植被盖度又较高,这可能和 TM 图像进行了大气校正有关。已有研究表明:土壤背景与大气对于遥感图像影响有交互作用,去除其中一个因素可能会增加另外一个因素的影响,但是总体来看削弱了部分因素影响强度。 $SARVI$  的表现也大体与此相似。 $PVI$  与  $LAI$  的线性回归分析的相关系数和确定系数都很低。

表2 植被指数与  $LAI$  的一元线性回归模型

| 植被指数                     | 回归方程                  | $R$     | $R^2$   | $F$    | Sig.  |
|--------------------------|-----------------------|---------|---------|--------|-------|
| $RVI$                    | $Y = 1.093X - 1.097$  | 0.879 0 | 0.772 6 | 31.366 | 0.000 |
| $NDVI$                   | $Y = 12.274X - 3.917$ | 0.866 1 | 0.750 2 | 63.068 | 0.000 |
| $PVI$                    | $Y = 5.167X - 0.907$  | 0.555 8 | 0.308 9 | 9.386  | 0.006 |
| $SAVI(L=0.1)$            | $Y = 11.164X - 3.915$ | 0.866 1 | 0.750 1 | 63.022 | 0.000 |
| $SAVI(L=0.25)$           | $Y = 9.831X - 3.911$  | 0.865 9 | 0.749 9 | 62.951 | 0.000 |
| $SAVI(L=0.35)$           | $Y = 9.338X - 4.032$  | 0.857 3 | 0.735 0 | 58.251 | 0.000 |
| $SAVI(L=0.5)$            | $Y = 8.203X - 3.905$  | 0.865 7 | 0.749 5 | 62.832 | 0.000 |
| $MSAVI$                  | $Y = 14.634X - 7.486$ | 0.855 9 | 0.732 6 | 57.520 | 0.000 |
| $ARVI(\gamma=1)$         | $Y = 8.515X + 0.418$  | 0.856 9 | 0.734 4 | 58.080 | 0.000 |
| $ARVI(\gamma=0.5)$       | $Y = 9.922X - 1.215$  | 0.865 7 | 0.749 4 | 62.809 | 0.000 |
| $SARVI(L=0.5, \gamma=1)$ | $Y = 5.729X - 0.371$  | 0.838 1 | 0.702 5 | 49.586 | 0.000 |

\* 显著水平( $P \leq 0.05$ ).

### 2.2.2 多元线性回归模型

多元线性方程为:

$$y = a_0x_0 + a_1x_1 + \dots + a_nx_n + a_{n1}$$

式中,  $y$  代表  $LAI$ ,  $x_0, x_1, \dots, x_n$  分别代表不同的  $VI$ ,  $a_0, a_1, \dots, a_n$  为拟合系数。将不同的  $VI$  与  $LAI$  代入上式, 采用向后逐步选择剔除法得到以下回归方程:

$$LAI = 1.493 \times RVI - 0.864 \times PVI - 1.964 \times SAVI_{L=0.35} - 7.378 \times MSAVI + 4.145 \times ARVI_{\gamma=1} + 34.396 \times ARVI_{\gamma=0.5} - 20.966 \times SARVI - 1.430$$

结果显示, 多元线性回归模型比一元线性回归模型和非线性回归模型表现都好, 其  $R = 0.930$ ,  $R^2 = 0.864$ ,  $F$  统计量 = 13.641, Sig. F = 0.000。

### 2.2.3 一元非线性回归模型

$VI-LAI$  的一元非线性回归模型采用了对数模型、指数模型、乘幂模型和三次多项式模型。结果表明, 以下三次多项式模型是最适合研究区使用的非线性模型:

$$y = a * x^3 + b * x^2 + c * x + d$$

式中,  $y$  为  $LAI$ ,  $x$  代表  $VI$ ,  $a, b, c$  与  $d$  为拟合系数。表3列出了  $VI$  与  $LAI$  之间的三次多项式拟合模型。

表3 植被指数与  $LAI$  的一元三次多项式回归模型

| 植被指数                     | 一元三次多项式回归方程                                        | $R$     | $R^2$   | $F$   | Sig.  |
|--------------------------|----------------------------------------------------|---------|---------|-------|-------|
| $RVI$                    | $Y = -0.171x^3 + 1.958x^2 - 6.096x + 7.382$        | 0.883 5 | 0.780 6 | 34.13 | 0.000 |
| $NDVI$                   | $Y = 14.544x^3 + 1.935x^2 - 3.877x + 1.798$        | 0.879 8 | 0.774 1 | 34.27 | 0.000 |
| $PVI$                    | $Y = -100.350x^3 + 237.570x^2 - 178.240x + 45.197$ | 0.639 7 | 0.409 2 | 5.44  | 0.013 |
| $SAVI(L=0.1)$            | $Y = 11.292x^3 + 0.952x^2 - 3.121x + 1.716$        | 0.879 7 | 0.773 9 | 34.24 | 0.000 |
| $SAVI(L=0.25)$           | $Y = 7.926x^3 + 0.296x^2 - 2.437x + 1.645$         | 0.878 8 | 0.772 3 | 34.18 | 0.000 |
| $SAVI(L=0.35)$           | $Y = 0.926x^3 + 0.296x^2 - 2.437x + 1.645$         | 0.879 6 | 0.773 7 | 30.00 | 0.000 |
| $SAVI(L=0.5)$            | $Y = 4.805x^3 - 0.292x^2 - 1.614x + 1.530$         | 0.879 3 | 0.773 2 | 34.10 | 0.000 |
| $MSAVI$                  | $Y = 166.300x^3 - 303.130x^2 + 192.070x - 40.399$  | 0.879 8 | 0.774 0 | 34.06 | 0.000 |
| $ARVI(\gamma=1)$         | $Y = -27.565x^3 + 34.259x^2 - 4.129x + 1.756$      | 0.862 3 | 0.743 5 | 18.36 | 0.000 |
| $ARVI(\gamma=0.5)$       | $Y = -76.365x^3 + 112.87^2 - 43.179x + 6.682$      | 0.878 3 | 0.771 4 | 33.29 | 0.000 |
| $SARVI(L=0.5, \gamma=1)$ | $Y = -5.576x^3 + 12.294x^2 - 1.831x + 1.667$       | 0.845 6 | 0.715 0 | 15.89 | 0.000 |

\* 显著水平( $P \leq 0.01$ ).

## 2.3 精度验证

为估计  $LAI$  和  $APAR$ (吸收性光合辐射)在检验  $VI$  后, Baret & Gauyot 建立了一个作为  $LAI$  函数的  $VI$  变化模型,其表达式为:

$$VI = VI_{\infty} + (VI_g - VI_{\infty}) \cdot \exp(-K_{VI} \cdot LAI)^{[1]}$$

变换后为

$$LAI = -\ln\left[\frac{VI - VI_{\infty}}{VI_g - VI_{\infty}}\right]/K_{VI}$$

式中,  $VI_g$  相应于裸土的  $VI$ ,  $VI_{\infty}$  是  $VI$  的渐进无穷值,  $K_{VI}$  是一个消光系数。本研究采用  $LAI = -\ln\left[\frac{VI - VI_{\infty}}{VI_g - VI_{\infty}}\right]/K_{VI}$  模型得到的一组  $LAI$  值视为实测值来检验多元线性回归模型的精度。 $VI$  被指定采用  $NDVI$ ,  $VI_{\infty}$  采用出现的最大  $NDVI$  值, 而  $VI_g$  为研究区裸土的均值。研究结果表明, 由多元线性回归模型所得预测值( $y$ )与实测值( $x$ )的拟合度较好,  $y = 0.5345x + 1.3304$ ,  $R^2$  为 0.7379。各实测点的预测值与实测值的误差情况如图 1 所示。最后, 根据多元线性回归模型可以得出研究区叶面积指数的监测结果见图 2。

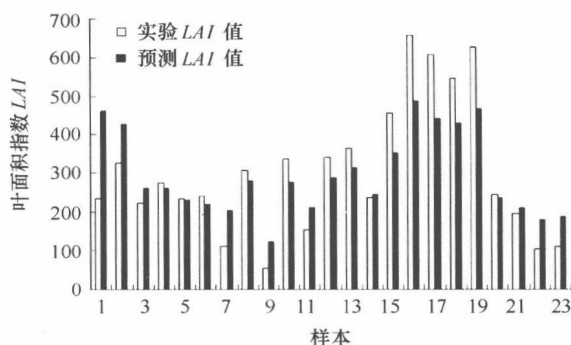


图1 叶面积指数的实测值与预测值

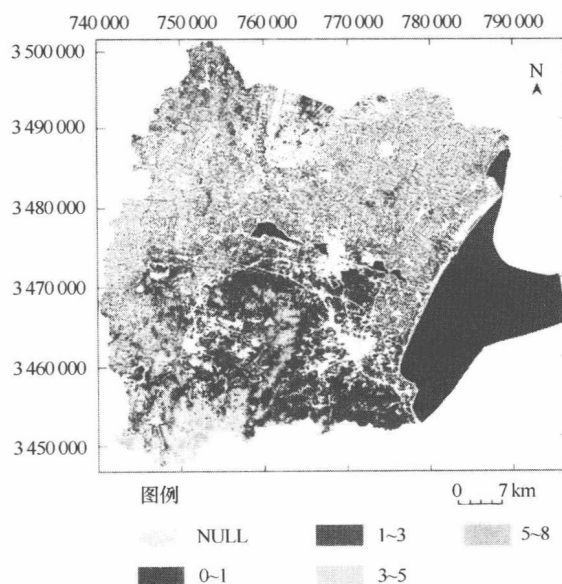


图2 宜兴地区植被 LAI 遥感监测结果

### 3 意义

李开丽等<sup>[2]</sup>对江苏省宜兴市为例进行了研究,结果表明,VI 与 LAI 之间的最佳回归模型为多元线性回归模型,  $R^2$  达 0.864;采用逐步选择剔除法,遴选出了用于回归模型的植被指数为:  $RVI$ 、 $PVI$ 、 $SAVIL = 0.35$ 、 $MSAVI$ 、 $ARVI_{\gamma=1}$ 、 $ARVI_{\gamma=0.5}$  和  $SARVI$ 。经模型  $LAI = -\ln\left[\frac{VI - VI_{\infty}}{VI_g - VI_{\infty}}\right]/K_v$  检验,预测值( $y$ )与实测值( $x$ )的拟合度较好  $y = 0.5345x + 1.3304$ ,