



新世纪高等学校教材

环境科学与工程系列教材

资源与环境系统分析

陈 研 李保国 刘 刚 展志岗 编 著

ZIYUAN YU HUANJING XITONG FENXI



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

新世纪高等学校教材

环境科学与工程系列教材

资源与环境系统分析

ZIYUAN YU HUANJING XITONG FENXI

陈 研 李保国 刘 刚 展志岗 编 著



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

资源与环境系统分析/陈研等编著. —北京: 北京师范大学出版社, 2009. 2

(环境科学与工程系列教材)

ISBN 978-7-303-09732-6

I. 资… II. 陈… III. 资源科学: 环境科学 - 系统分析 - 高等学校 - 教材 IV. F062.1 X196

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 181899 号

营销中心电话 010-58802181 58808006

北师大出版社高等教育分社网 <http://gaojiao.bnup.com.cn>

电子信箱 beishida168@126.com

出版发行: 北京师范大学出版社 www.bnup.com.cn

北京新街口外大街 19 号

邮政编码: 100875

印 刷: 北京新丰印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 170 mm × 230 mm

印 张: 17.5

字 数: 290 千字

印 数: 1~3 000 册

版 次: 2009 年 2 月第 1 版

印 次: 2009 年 2 月第 1 次印刷

定 价: 30.00 元

策划编辑: 王松浦

责任编辑: 王松浦 胡廷兰

美术编辑: 高 霞

装帧设计: 高 霞

责任校对: 李 菡

责任印制: 李 丽

版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话: 010-58800697

北京读者服务部电话: 010-58808104

外埠邮购电话: 010-58808083

本书如有印装质量问题, 请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话: 010-58800825

北京市教育委员会本科专业建设环境科学类项目 资助

前言

我们所处的 21 世纪已是信息技术和知识经济的时代。在其大潮推动下,世界已趋于平坦化。而资源与环境的问题越来越突出,如全球变暖、区域土地资源质量的退化和水环境的恶化等。所以人类必须行动起来,采取有效的措施,实现区域乃至全球的可持续发展。

可持续发展,即经济、生态、社会的和谐发展,要求做到对资源的高效利用并保护与改善环境。在我们所处的这个时代,要达到这个目标,就必须借助于信息技术加强对资源和环境的管理,这就对资源和环境领域的科技人才提出了更高的素质要求,必须学会和掌握利用计算机和信息技术处理本领域复杂的问题。

资源与环境科学是一典型的复杂性科学,是涉及土地、水、生物、大气交互作用的复杂巨系统,直接决定着人类的生存和发展,而现代人类活动是资源与环境系统演化的主要驱动力。对资源与环境系统众多属性和过程的综合,以及对其时空间尺度的转化认识不能仅停留在经验上,而应建立对其属性的精确描述——数字化、严密的逻辑推理——过程定量化和数学模型的基础上。

中国农业大学资源与环境学院从进入 21 世纪开始,就着手对农业资源利用和环境科学类本科专业课程进行改革,加大了信息技术和计算机应用方面的课程,从 2002 年开始,新开设了资源与环境系统分析、资源与环境信息技术等课程,以培养资源与环境相关专业大学生精确定量思维的能力和运用信息技术解决资源与环境实际问题的能力。

掌握系统分析理论和方法已是现代科学人才必备的素质。

系统分析的对象是复杂的大系统。目的是进行系统的最优化设计和对有关重大问题正确决策。系统分析过程是对系统的分解和综合,分解即为研究和描述组成系统的各个要素的特征,掌握各要素的变化规律;综合指的是研究各要素之间的联系和有机组合,达到系统的总目标最优。资源与环境系统分析内容就是对土地、水、生物、大气及其交互作用的复杂巨系统进行模型化和最优化,这门课程是信息化技术在资源与环境研究和管理中基础课程。

考虑到本课程主要是面向资源利用和环境科学类本科专业的大学生,所以在内容上,主要选取了和资源与环境系统密切相关的系统分析的基本方法,同时对该方向的一些前沿研究领域进行了简要的介绍,为感兴趣的同学深入学习指引一些方向。现全书内容包括4篇共10章。第1篇为回归拟合模型,包括线性回归模型、非线性曲线回归模型两章;第2篇为基于过程的动力学模型与应用,包括单种群增长的动力学模型、多种群增长的动力学模型、混沌与分形模型初步三章;第3篇为资源与环境系统中的优化模型,包括线性规划、目标规划、整数规划三章;第4篇为资源与环境评价的决策模型与应用,包括层次分析方法、投入产出模型两章。为巩固掌握所学内容,每一篇后都附有练习题和计算实习,供同学完成和上机练习,上机练习的题目都可通过 Excel 来完成,如条件允许和同学们感兴趣,鼓励同学用编程语言和其他软件来完成。

本教材内容已在中国农业大学资源与环境学院教授了六年,其间不断完善,在教学上取得了较好的效果,也得到了农业资源利用和环境科学类专业学生的认可。在完成高等数学基础课教学后,紧接着就开设此课程,从而有助于同学们把数理精确定量思维落实到专业领域,大大增强了同学们应用计算机、用数学模型处理资源与环境问题的能力,也为后续专业课程的学习打下了一个很好的基础。

本教材中的大部分内容在其他相关教材中早有涉及,但面向农业资源利用和环境科学类本科专业学生,按照本教材体系进行编写,这还是第一次。由于本教材内容涉及的领域较为广泛,所编写的内容难免有不妥、失误之处,敬请各位读者指正,以便不断完善。

李保国

2008年1月

目 录

第 1 篇 回归拟合模型

第 1 章 线性回归模型 / 3

1.1 变量间的相关关系	3
1.1.1 回归模型的建立	5
1.1.2 线性回归模型及其获得的途径	6
1.2 一元线性回归分析	7
1.2.1 散点图与回归直线	7
1.2.2 判断估计量 a, b 的优劣	9
1.2.3 线性关系的检验	11
1.2.4 根据回归方程预报或控制 y 的取值	16
1.3 多元线性回归分析	20
1.3.1 二元回归分析——回归平面的求法 ...	20
1.3.2 多元线性回归方程的一般求法	22
1.3.3 多元性回归的显著性检验	25
1.3.4 多元线性回归的实施步骤及实例	27
1.4 逐步回归	32
1.4.1 逐步回归的基本思想	32
1.4.2 逐步回归的计算例子	34

第 2 章 非线性曲线回归模型 / 37

2.1 可线性化的曲线模型	37
---------------------	----

2.1.1	双曲线	37
2.1.2	指数函数 1	39
2.1.3	指数函数 2	39
2.1.4	对数函数	40
2.1.5	幂函数	41
2.1.6	二次抛物线	41
2.1.7	三次曲线或多项式	41
2.1.8	曲线回归模型的检验	42
2.2	生长曲线回归模型	43
2.2.1	原理	43
2.2.2	Logistic 曲线模型	44
2.3	非线性最小二乘法拟合求解	47
2.3.1	基本算法——泰勒级数展开法	47
2.3.2	改进算法——麦夸尔特法	49
2.4	趋势面分析	51
2.4.1	趋势面分析的一般原理	51
2.4.2	趋势面模型的检验	54
2.4.3	趋势面分析应用	55

第 2 篇 基于过程的动力学模型与应用

第 3 章 单种群增长的动力学模型 / 65

3.1	Logistic 方程	65
3.1.1	非密度制约方程	65
3.1.2	密度制约方程	67
3.2	开发了的单种群增长模型	70
3.3	具有时滞的模型	71
3.4	离散的模型——差分方程	72
3.5	具有时变环境的模型	76
3.6	反应扩散方程	76
3.6.1	随机概念的引入	76
3.6.2	常用的随机方程和模型	78

3.6.3 常用的随机方程和模型的应用实例	80
-----------------------------	----

第4章 多种群增长的动力学模型 / 81

4.1 两种群相互作用模型	81
4.2 被开发了两种群相互作用的模型	85
4.3 具有不变资源的系统	87
4.4 具有时滞的两个种群相互作用的模型	89
4.5 离散时间的两种群相互作用模型	91
4.6 反应扩散方程	91
4.7 反应扩散方程在景观生态学上的应用	92

第5章 混沌与分形模型初步 / 94

5.1 动力学系统与混沌	94
5.1.1 混沌的发现——洛伦兹关于大气对流的模型	94
5.1.2 生态系统中的振荡与混沌	97
5.1.3 混沌的其他例子——滴水水龙头	99
5.1.4 混沌判断——李雅普诺夫指数	100
5.2 分形(fractal)现象与分形维数	101
5.2.1 自然界分形现象的几个实例	101
5.2.2 随机分形的几个例子	103
5.2.3 分形与分形维数的定义	105
5.3 L—系统简介	108
5.3.1 一个实例	108
5.3.2 L—系统基本原理	109

第3篇 资源与环境系统中的优化模型

第6章 线性规划 / 117

6.1 问题及数学模型	118
6.1.1 线性规划引例	118
6.1.2 线性规划模型	124
6.1.3 线性规划模型的标准化的	127

6.1.4 线性规划建模注意事项	130
6.2 线性规划问题的解法	137
6.2.1 线性规划问题的标准型	138
6.2.2 线性规划问题的解	139
6.2.3 图解法	140
6.2.4 单纯形法	143
6.2.5 单纯形法的计算步骤	149
6.2.6 人工变量法	153
6.2.7 改进单纯形法	156
6.3 灵敏度分析	163
6.3.1 目标函数中 c_j 的变化范围的确定	163
6.3.2 在约束条件中 b_i 的变化范围的确定	165
6.3.3 在约束条件的系数矩阵中某一个 a_{ij} 发生变化的范围的 确定	165
6.4 应用举例	166
6.4.1 水资源分配模型——华北某县水资源供需配置模型 ...	166
6.4.2 饲料配方优化模型	170
6.4.3 最佳运输问题——运输问题的线性规划模型	174

第7章 目标规划 / 177

7.1 目标规划的数学模型	177
7.1.1 一些基本概念	178
7.1.2 数学模型	179
7.2 解目标规划的单纯形法	181
7.3 应用举例	182

第8章 整数规划 / 188

8.1 问题的提出	188
8.2 分支定界解法	190
8.2.1 解法	190
8.2.2 解法步骤	193
8.3 0-1 型整数规划	196

8.3.1 0-1 规划举例	196
8.3.2 0-1 规划的解法	200

第 4 篇 资源与环境评价的决策模型与应用

第 9 章 层次分析方法 / 211

9.1 基本步骤	211
9.1.1 成对比较矩阵和权向量	212
9.1.2 比较尺度	213
9.1.3 一致性检验	215
9.2 若干问题	219
9.2.1 正互反阵最大特征根和对应特征向量的性质	219
9.2.2 正互反阵最大特征根和特征向量的实用算法	221
9.2.3 不完全层次结构中组合权向量的计算	222
9.2.4 递阶层次结构和更复杂的层次结构	224
9.2.5 层次分析法的优点和局限性	225
9.3 应用	225

第 10 章 投入产出模型 / 232

10.1 国家级投入产出模型	232
10.1.1 投入产出表	232
10.1.2 投入产出模型	237
10.1.3 价格模型	244
10.2 投入产出模型的应用	251
10.2.1 投入产出模型应用中假设的有效性	251
10.2.2 投入产出分析在经济分析中的应用	252
10.2.3 投入产出分析在计划工作中的应用	260

参考文献 / 266

第1篇 回归拟合模型

资源与环境系统分析所考虑的对象的特点在于它是变化发展的，而不是孤立不变的。它受许多因素的影响和制约，具有一定的相关或因果关系，例如，降雨、灌溉和施肥与粮食产量的关系，大气中灰尘浓度与污染源的排放量之间的关系等。它们之间的关系是非常复杂的，且无法用精确的函数式来描述，而我们又需要了解资源与环境系统中众多因素之间的关系，以进行系统分析、对系统的发展变化进行预估和推测。即根据系统过去发展规律和现状，借助于实际数据或历史资料，采用科学的预测方法探索系统内在的规律，进而估计和预测系统未来的发展趋势。

为了分析各个因素之间的关系，需要对大量的实测数据进行统计分析，从中找到其内在的联系和规律，即把实测数据拟合成数学公式。回归分析就是通过因素之间的相关关系和影响程度进行预测的方法之一。

第1章 线性回归模型

1.1 变量间的相关关系

变量与变量之间的关系常见的有两类。

一类是确定性的函数关系，像正方形的面积和边长的关系、在微积分中讲的 $y=f(x)$ 或 $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 等都是这种关系。其特点是，任意给定一个 x 或一组 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的值，必有确定的唯一的 y 值与之对应。

另一类是变量之间确实存在一定的关系，但又不具备函数关系所要求的确定性。它们的关系带有随机性，因而不能简单地写成 $y=f(x)$ 。例如，由一个人的身高不能确定其体重，但一般地，“身高者，体也重”。也就是说，身高与体重这两个变量具有相关关系。再如，施肥量与产量的关系也具有这种性质，显然产量的高低依赖于土壤的肥沃程度，但绝不能断言，在一亩地中施一定数量的肥料就一定能获得多少(确定的)产量。所以，产量与施肥量之间既互相依赖又不确定，是一种相关关系。

怎样判断两个变量之间有没有相关关系呢？来看下面的例子(人民教育出版社课程教材研究所，中学数学课程教材研究开发中心，2004)。

例 1.1 某校 12 名高一学生的身高与体重的测量数据如表 1.1 所示，试分析学生身高与体重的相关关系。

表 1.1 身高与体重的测量数据

身高 x/cm	151	152	153	154	156	157	158	160	160	162	163	164
体重 y/kg	40	41	41	41.5	42	42.5	43	44	45	45	46	45.5

解 从表 1.1 可以看出， y 有随 x 增加而增加的趋势。为了更清楚地看出 x 与 y 之间是否有相关关系，我们以身高 x 的取值作横坐标，把体重 y 的相应取值作为纵坐标，在直角坐标系中描点 (x_i, y_i) ($i=1, 2, \dots, 12$)，如图 1.1 所示。这样的图形叫做散点图。从图中可以直观地看出身高与体重之间具有相

关关系。一般说来, 身高越高, 体重也就越重, 这种相关被称为正相关; 反之, 如果一个变量的值由小变大时, 另一个变量的值由大变小, 这种相关被称为负相关。

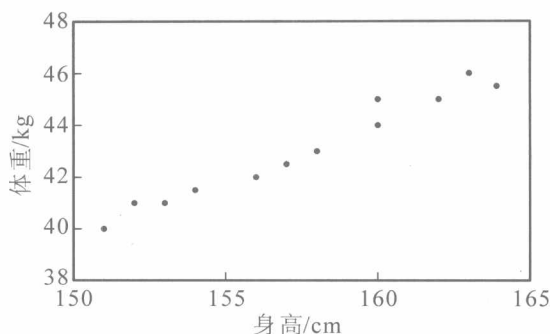


图 1.1 学生身高与体重数据的散点图

借助 Excel, 我们很容易作出散点图, 添加趋势线, 并求出趋势线的表达式。

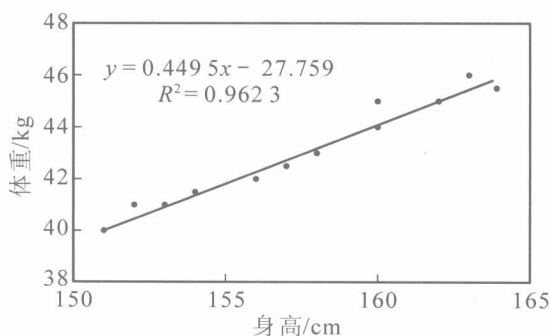


图 1.2 学生身高与体重的关系散点图与趋势线

影响一个量的因素往往是非常多的, 其中有些是属于人们一时还没有认识或掌握的, 有些是已经认识但暂时还无法控制或测量的, 再加上测定一些变量的量值时或多或少有些误差, 所有这些偶然性因素的综合作用造成了变量之间关系的不确定性, 比如身高和体重不存在一一对应的关系。

但是, 这种不确定关系的变量之间还是有规律可寻的, 大量的偶然性中蕴涵着必然规律, 例如前面提到的身高与体重, 其必然规律就是, 在一定范围内, 身材高的人, 体重要重一些。

回归分析就是应用数学方法, 对大量的观测数据进行去粗取精、去伪存

真、由此及彼、由表及里的加工,从而得出反映事物内部规律性的东西。

回归分析主要解决以下几个方面的问题。

(1)确定几个特定的变量之间是否存在相关关系,若存在,则要建立表示这种关系的合适的数学模型。

(2)根据一个或几个变量的值,预测或控制另一个变量的值,并分析这种预测或控制可达到的精度。

(3)进行因素分析,在共同影响一个变量的许多变量(因素)之间,找出哪些是重要因素,哪些是次要因素,这些因素之间有什么关系等。

回归分析有很广泛的应用,工农业生产和科研工作中的许多问题都可用这种方法解决。在实验数据处理、求经验公式、因素分析、产品质量的控制、某些新标准的制订、经济预报、气象和灾害预报及许多其他场合中,回归分析都扮演着重要的角色。

1.1.1 回归模型的建立

建立回归模型,首先要决定什么是因变量,什么是自变量,以及二者之间的大体关系,这是回归分析的关键。

一般说来,建立模型是由专业工作者完成的,但有时也需要数学工作者参与分析,以确定因变量与自变量之间内在关系的函数类型。这里大致有两种情况。

(1)根据专业知识(从理论上推导或根据以往积累的实际经验),确定变量之间的函数类型。

如经历千百年的耕种实践,农民取得经验:阳光、降雨、肥料将影响作物产量,且在一定范围内,大体成正比关系。于是可以写定式:

$$y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 \quad (1.1)$$

其中: a_i ($i=1, 2, 3$) 是比例系数,待估; x_i ($i=1, 2, 3$) 分别代表阳光、降雨和肥料; y 表示产量。

而生物学家对生态发展的长期研究,发现种群发展大体符合指数关系,于是可以写定式:

$$N_t = N_0 e^{\lambda t} \quad (1.2)$$

其中: N_0 , N_t 分别是初始及待求种群的大小; t 是时间; λ 是种群自然增长率,待估。

(2)若仅凭理论或经验无法推知 x 与 y 关系的函数类型,就需要根据实验数据,从散点图的分布形状及特点选择适当的曲线来拟合这些实验数据,从而

得到定式。

由于随机因素的存在, 定式只能解决函数类型的选择问题, 而不能得到确定的函数表达式。后面介绍的回归分析就是用统计方法确定函数式中的待估参数。

确定定式时应注意下列问题。

- 自变量、因变量及其关系如何确定, 要具体问题具体分析, 运用专业知识找出事物内部的必然联系, 可以从多方面探讨而决定取舍。若所确定的定式经过验证, 并不适用, 则应分析失败的原因, 重新确定定式。

- 统计资料是进行回归分析的依据, 搜集统计资料是必不可少的一步。统计资料越丰富, 回归分析的结果将越准确。如果缺乏统计资料, 只能进行小样本分析, 就很难得到好的定式。

- 作为自变量的统计资料必须容易获得, 同时其变化必须有规律可循或比较稳定。

1.1.2 线性回归模型及其获得的途径

回归分析是要确定因变量与自变量之间的定量关系, 而最简单、最常用的关系就是线性关系。用线性方程或方程组确定的回归模型叫做线性回归模型。很多实验数据都可以看成是线性关系或近似地看成线性关系; 还有许多非线性回归模型也可以通过函数的初等变换转化成线性回归模型。线性回归模型的分析比非线性回归模型简单, 本书首先从线性回归模型入手来介绍回归模型。

设要研究的线性回归模型是:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_K x_K + \epsilon \quad (1.3)$$

其中: ϵ 表示随机因素的影响, 它是一个随机变量, 且 $\epsilon \sim N(0, \sigma^2)$ 。

当把观测值 $(x_{1i}, x_{2i}, \cdots, x_{Ki}, y_i) (i = 1, 2, \cdots, N)$ 代入后, 式(1.3)就成为:

$$\begin{cases} y_1 = \beta_0 + \beta_1 x_{11} + \cdots + \beta_K x_{K1} + \epsilon_1, \\ y_2 = \beta_0 + \beta_1 x_{12} + \cdots + \beta_K x_{K2} + \epsilon_2, \\ \vdots \\ y_N = \beta_0 + \beta_1 x_{1N} + \cdots + \beta_K x_{KN} + \epsilon_N \end{cases} \quad (1.4)$$

在式(1.4)中, 假定:

- (1) y_i 与 x_{ji} 是线性关系。
- (2) x_{ji} 的值是实验确定的, 是非随机变量。
- (3) ϵ_i 是随机误差项, 且