

中文版

生物实验设计与数据分析

Experimental Design and Data Analysis for Biologists

Gerry P. Quinn Michael J. Keough 著

蒋志刚 李春旺 曾岩 主译



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

生物实验设计与数据分析

(中文版)

【澳】Gerry P. Quinn

【澳】Michael J. Keough 著

蒋志刚 李春旺 曾 岩 主译



高等教育出版社

图字:01-2003-0691号

Experimental Design and Data Analysis for Biologists

Gerry P. Quinn & Michael J. Keough

© G. Quinn & M. Keough 2002

This book is in copyright. Subject to statutory exception and to the provisions of relevant collective licensing agreements, no reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press.

First published in 2002

Printed in the United Kingdom at the University Press, Cambridge

图书在版编目(CIP)数据

生物实验设计与数据分析/(澳)奎恩(Quinn, G. P.),
(澳)基奥(Keough, M. J.)著;蒋志刚,李春旺,曾岩主
译.——北京:高等教育出版社,2003.11

ISBN 7-04-013644-9

I. 生... II. ①奎... ②基... ③蒋... ④李... ⑤
曾... III. ①生物学-实验-设计②生物学-实验数据-分
析 IV. Q-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第095399号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷

开 本 787×1092 1/16
印 张 36.25
字 数 890 000

版 次 2003年12月第1版
印 次 2003年12月第1次印刷
定 价 45.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

内 容 提 要

如何设计生物学实验,如何在空间设置安排实验处理区组,如何在不同时间施加实验处理,是生物学研究人员的必备知识。首先在设计生物学实验时,无论是生态学实验,还是细胞生物学实验,生物化学实验,都必须参考有关统计学和实验设计的专业书籍,考虑选用适当的统计方法。本书深入浅出地介绍了生物学研究中最常见的实验设计方法,适用于连续型与离散型数据的统计方法。作者有针对性地分析了当前生物学研究文献中的具体实例,介绍了具体生物统计方法的运用,便于读者掌握。通过对该书的学习,读者将知道为什么我们要以一种特定的实验设计来探讨一个生物学问题以及怎样来分析实验数据;同时作者提供了该书中所有原始数据的网址,读者可以自己利用生物统计软件包分析这些原始数据。最后,作者以相当的篇幅介绍了如何简明扼要地展示生物统计分析结果。读者通过对本书的学习,能够了解生物学统计模型的基本假设前提条件,能够利用有限的时间与资源优化设计实验与抽样过程,能够正确地应用适当的统计模式分析设计实验或野外采集的生物学数据,能够理解生物统计分析软件包输出的结果。

本书适合高校生物学科、生物技术专业以及农林医类相关专业的高年级本科生和研究生作为生物学实验设计与统计分析的教材或参考书,还可以作为有关研究人员案头的实验设计与统计分析参考书。

前 言

统计分析是大多数现代生物学的核心。许多生物学假说,甚至是那些看似简单的假说,也是用复杂的统计学模型拟合的。在现代台式计算机出现之前,确定这些数据是否与这些复杂的模型相吻合是专业统计学家的职责。许多生物学家宁愿选择那些结构被简化了的简单模型。现在,我们中的大多数人都可得到功能强大的统计软件,都可利用这些软件来拟合复杂的模型。对生物学家来说,这也带来一系列新的要求和问题。

我们需要:

- 了解特定统计模型的缺陷与假设;
- 能够确定合乎我们计划收集的取样设计和数据类型的模型类型;
- 能够用这些模型对分析结果进行解释;
- 能够优化实验设计和取样程序,例如,最大可能地利用我们有限的时间和资源。

这种分析可以由专业统计学家而不是由受过统计学培训的生物学家来做,尤其是在大型课题组或多学科研究队伍中的生物学家。在这种情况下,我们需要使用一种共同的语言:

- 以这样一种形式来界定我们的问题以便得到合理的答案;
- 了解可能引起统计问题的生物学事项。我们不能期望一位统计学家了解我们特定研究中所有的生物学特征,但是如果他或她缺少那方面的知识,我们可能得到有误的或者不正确的信息;
- 了解我们所得到的建议与分析,并且能够将其变成生物学。

本书旨在将生物学家放在较好的处境上来处理这些事情。其内容来自我们的试验设计以及自己的数据分析,还有来自为学生和同事提供的意见,以及实验设计与数据分析的教学。在这些活动中,我们首先意识到自己的知识有限,这迫使我们不得不大量阅读初级统计学文献。其次,这也是最重要的,我们了解到,与多数生物学研究有关的统计学模型的复杂性。特别需要指出的是,我们仍不断遇到在我们喜爱的许多教材中没有得到充分描述的实验设计。这本书描述了许多生物学常用的实验设计,我们讲解了这些实验设计所涉及的模型,并提供了关于这些模型的优点与缺陷的充分信息。

我们在此的重点是处理生物学数据——怎样设计取样程序,以便最佳地利用我们的资源,怎样避免由于犯错误而使我们难以分析数据,以及收集到数据时怎样分析。我们强调与真实世界生物学情形有关的问题。

本书中

我们的方法是鼓励读者理解大多数普通实验设计有关的模型。我们介绍了适合于各种各样生物学数据的模型——连续的与分类的响应变量、连续的与分类的预测或独立变量。重点是一般线性模型,我们从最简单的形式开始——单一的、连续变量——详细地描述了那些模型。我们

利用这些模型作为积木,以了解一大批其他类型的数据——所有的一般统计分析方法,只是一般统计模型主题的变化,而非完全不同的分析方法——为数据构建一个模型,然后决定这些观察数据能否用这个特定的模型拟合。我们的目的是显示、理解较多模型如何能处理一系列更复杂的情形。

我们主要以参数统计学,举例说明了模型拟合这种研究途径。大多数生物学数据仍用假设正态分布的线性模型来分析。然而,我们给读者提供了一系列更普遍的方法,并强调一旦你了解了正态分布数据的一般模型分析方法,就可以利用那些信息来分析具有非线性关系的数据,以及遵从其他统计分布的变量。

通过例子学习

我们相信,当我们看到如何将统计学应用在我们的领域中时,我们就能够更好的理解统计学的原理。这些例子可以帮助我们建立统计模型与常规统计项(区组,小区等),或撰写其他学科论文,以及我们所处理的生物学情形之间建立联系。例如,我们怎样才能通过阅读一篇关于田间区组的文献,来加深理解并分析一个多次重复的实验?来源于心理学研究的文献,将怎样帮助我们测度植物生理反应的变化?

在这本书中,我们用现代生物学文献,举例说明了所有统计技术。我们描述了为什么(我们认为)作者选择以一种特定的方式做一个实验,怎样分析那些数据,包括检验假说和解释统计输出结果。这些例子在每一章中以专栏出现,我们荣幸地得到了大多数作者为我们提供的原始数据。我们将这些原始数据放在一个网站上<http://www.zoology.uinmelb.edu.au/qkstats>,读者可以用自己的软件来分析这些数据。

这些已发表例子的另一个价值,是我们因此看到,如何描述和报告一个特定的分析。当拟合复杂统计模型时,大量的统计输出结果很容易淹没生物学结论。我们希望最后一章中的例子,以及我们对这个问题的看法,可以防止这种事情发生。

这本书是一座桥梁

没有人能写一本既给读者介绍生物统计学的入门,又能让他们深入学习所有复杂模型的书,至少这样一本书不可能小到可以携带。于是,我们假设读者已经熟悉基本的统计学概念,如学习过一两个学期的统计学导论课程,或是从一本优秀的基础教材获得了统计学知识(例如 Soka & Rohlf 1995 的著作)。我们将读者从这些教材带入更复杂的领域。解释原则、假设和缺陷,并鼓励读者去读更好的详细分析(例如,关于方差分析,参见 Winer 等,1991 或 Underwood 1997)。

生物学数据通常是海量的,读者会发现,和我们在这里所描述的相比,他们研究的问题通常需要复杂得多的模型。初级统计学文献里通常会提供处理海量数据,或是复杂问题的解决方案。我们试图指出统计学文献中的关键之处,为读者提供处理文献数据的基本工具,或是当情形变得太复杂时,读者能够寻求到专业统计学的帮助。

我们必须时刻记住,对于生物学家来说,统计学是一个展示和弄清生物学问题的工具。我们的目的是能够有效地应用这些工具,不至于失去生物学意义,而生物学是我们中间大多数人进入这个领域的动机。

致谢

我们写作本书时最大一笔欠债是欠我的同事们的,他们阅读、评论和修正了本书不同版本章节中的错误。参与这项工作的同事中许多人有自己的研究组。这些无私和勤奋的人包括(以英文字母顺序为序)Jacqui Brooks, Andrew Constable, Barb Downes, Peter Fairweather, Ivor Grown, Murry Logan, Ralph Mac Nally, Richard Marchant, Pete Raimondi, Wayne Robinson, Suvaluck Satumanatpan 和 Sabine Schreiber。也许最不幸的是那些在我们写作这本书期间,在我们研究组就读的研究生。他们愿意用阅读本书并标出感到困惑之处来交换一些得到启发的机会,对此我们感到非常荣幸。

我们也希望在此向那些为全书提供数据的各位研究者表示感谢,他们中的大多数人提供了原始数据。相信我们既不会批评也不会找他们已经发表的工作的茬子(我们没有!),或者说他们有足够的公德心让我们发表他们的原始数据。

译者的话

Gerry P. Quinn 教授和 Michael J. Keough 教授写作的 *Experimental Design and Data Analysis for Biologists* (直译为《生物学家的实验设计与数据分析》,译为《生物实验设计与数据分析》)一书 2002 年由剑桥大学出版社出版。全书共分为导论、参数估计、假说检验、数据的图示、相关与回归、多元与复杂回归、实验设计和检验功效分析、比较区组或处理——方差分析、多因素方差分析、随机区组与简单重复测量:非重复的双因素设计、裂区与重复测量设计、部分嵌套的方差分析、协方差分析、广义线性模型与逻辑斯谛回归、频数分析、多元变量分析导论、多元变量方差分析与判别分析、主成分法和对应分析、多维排序和聚类分析以及结果的展示等 19 章,是一本全面介绍生物学实验设计与实验数据分析的教学参考书。

实验设计与数据统计分析是现代生物学的基石,是生物学家检验假说、寻找模式、建立生物学理论的有利工具,是生物学家探索微观生物世界和宏观生物世界的必备基础知识。可以说,在现代要完成任何一项生物学研究,都需要坚实的统计学知识。首先,在设计生物学实验时,无论是生态学实验,还是细胞生物学实验,生物化学实验,都必须参考有关统计学和实验设计的专业书籍,考虑选用适当的统计方法。因此,如何设计生物学实验,如何在空间设置安排实验处理区组,如何在不同时间施加实验处理,是生物学家必备的必备知识。

现在,电子计算机的普及使得生物统计分析过程大大地简化,即使是在 20 世纪 50—60 年代需要大型计算机才能运算的 Monte - Carlo 方法,今天也能在微机上短时间内完成。生物统计分析软件包的普及将生物统计学从统计学家的书本里解放出来,使之成为生物学研究者的常用工具。但是,生物统计分析软件包的普及却带来了一个严重的弊端——那就是对生物统计方法的误用与滥用。生物统计软件大大简化了生物统计分析过程。商品化的生物统计软件易于掌握,实用性强。使用者只要输入实验数据,生物统计软件将自动进行运算,在短时间输出“统计结果”。这时,针对生物学实验设计选择适当的生物统计模型显得至关重要。否则,在生物统计软件进行生物统计分析时,有可能垃圾进,垃圾出(Garbage in, garbage out)。

今天利用生物统计分析统计包进行生物统计分析已经上升到一个新阶段,问题的性质发生了变化。生物统计分析的手段简化了,生物统计分析的成本下降了,生物学研究的重心又一次移到了野外和实验室,回到如何进行生物学实验设计,通过实验室与野外实验获得生物学数据上来。获得生物学数据,需要长期的、艰巨的劳动。这时,研究人员要验证假说,寻找模式,进行正确的生物学实验设计,以节约实验成本,选择正确的生物学统计分析模型以获得正确的结论,显得十分重要。

在《生物实验设计与数据分析》一书中,Quinn 教授和 Keough 教授指出了当前生物学研究中存在的误区。他们希望读者通过对本书的学习,能够了解生物学统计模型的基本假设前提条件,能够利用有限的时间与资源优化设计实验与抽样过程,能够正确地应用适当的统计模式分析设计实验或野外采集的生物学数据,能够理解生物统计分析软件包输出的结果。

II 译者的话

《生物实验设计与数据分析》一书既注重理论性,又具有实用性。作者深入浅出地介绍了生物学研究中最常见的实验设计方法、介绍了适用于连续型与离散性数据的统计方法。作者在本书中有针对性地分析了当前生物学研究文献中的具体实例,介绍了具体生物统计方法的运用,便于读者掌握。通过对该书的学习,读者将知道为什么我们要以一种特定的实验设计来探讨一个生物学问题以及怎样来分析实验数据。同时,作者提供了该书中所有原始数据的网址,读者可以自己利用生物统计软件包分析这些原始数据。最后,作者以相当的篇幅介绍了如何简明扼要地展示生物统计分析结果。

《生物实验设计与数据分析》一书适用于高校生物科学、生物技术专业学生和农林医类相关专业学生作为生物学实验设计与统计分析的教材或教学参考书,也适用生物学各专业的硕士、博士研究生作为统计学参考书,还可以作为生物学研究人员的案头的生物学实验设计与统计分析参考书。笔者认为很必要将《生物实验设计与数据分析》一书翻译出版推荐给广大中国读者。该书中文版的发行将推动中国生物学实验设计与统计分析的教学,并提高中国生物学科学研究水平。参与本书翻译的有我的研究生和博士后:雷润华、李春旺、曾岩、于广志、吴孝兵、阎彩娥、游章强、刘建、蔡静、马瑞俊等,我还感谢高等教育出版社的邹学英编辑,他们为本书的及时翻译出版付出了很大努力。

中国科学院动物研究所首席研究员
蒋志刚博士

2003年7月20日于北京中关村

目 录

1 导论 (1)

- 1.1 科学方法 (1)
 - 1.1.1 模式描述 (2)
 - 1.1.2 模型 (2)
 - 1.1.3 假说与检验 (3)
 - 1.1.4 证伪的备择 (4)
 - 1.1.5 统计分析的角色 (5)
- 1.2 实验与其他检验 (5)
- 1.3 数据、观察与变量 (7)
- 1.4 概率 (7)
- 1.5 概率分布 (9)
 - 1.5.1 对变量的描述 (10)
 - 1.5.2 统计值的分布 (12)

2 估计 (14)

- 2.1 样本和总体 (14)
- 2.2 常用参数和统计变量 (15)
 - 2.2.1 分布的中心(位置) (15)
 - 2.2.2 离散或变异性 (16)
- 2.3 平均数的标准误差和置信区间 (17)
 - 2.3.1 正态分布和中心极限定理 (17)
 - 2.3.2 样本平均数的标准误 (18)
 - 2.3.3 总体平均数的置信区间 (19)
 - 2.3.4 总体平均数置信区间的解释 (20)
 - 2.3.5 其他统计数据的标准误 (20)
- 2.4 参数估计的方法 (23)
 - 2.4.1 最大似然法(ML法) (23)
 - 2.4.2 普通最小二乘法(OLS) (24)
 - 2.4.3 ML估计与OLS估计的比较 (25)
- 2.5 估计中重复抽样的方法 (25)
 - 2.5.1 自举法 (25)
 - 2.5.2 “刀切”法 (26)

2.6	贝叶斯推断则——估计	(27)
2.6.1	贝叶斯推断的估计	(27)
2.6.2	先验知识和概率	(28)
2.6.3	似然函数	(28)
2.6.4	后验概率	(28)
2.6.5	举例	(29)
2.6.6	其他评论	(29)

3


假说检验	(32)
------------	------

3.1	统计假说检验	(32)
3.1.1	经典的统计假说检验	(32)
3.1.2	相关概率和类型 I 错误	(34)
3.1.3	单个总体的假设检验	(35)
3.1.4	单尾和双尾检验	(36)
3.1.5	两个总体的假设	(37)
3.1.6	参数检验及其假设	(40)
3.2	决策错误	(41)
3.2.1	类型 I 错误和类型 II 错误	(41)
3.2.2	不对称性和可升级的决策标准	(44)
3.3	其他检验方法	(44)
3.3.1	稳健参数检验	(44)
3.3.2	随机(排列)检验	(45)
3.3.3	基于秩的非参数检验	(46)
3.4	多重检验	(47)
3.4.1	问题	(47)
3.4.2	调整显著性水平和/或 P 值	(49)
3.5	统计检验结果的合并	(50)
3.5.1	P 值合并	(50)
3.5.2	Meta - 分析	(50)
3.6	对统计假说检验的批评	(51)
3.6.1	与样本容量和停止规则的相关性	(52)
3.6.2	样本空间 - 未观测数据的相关性	(52)
3.6.3	P 值作为证据测度	(52)
3.6.4	零假设一直是假的	(53)
3.6.5	任意显著性水平	(53)
3.6.6	统计假设检验的备择方法	(53)
3.7	贝叶斯假设检验	(54)

4

数据的图示	(57)
-------------	------

4.1	探索性数据分析	(57)
-----	---------------	------

4.1.1	探索性分析样本	(57)
4.2	用图进行分析	(61)
4.2.1	参数分析模型的假设	(62)
4.3	数据转换(transforming data)	(63)
4.3.1	转换与分布假设	(64)
4.3.2	转换和线性	(66)
4.3.3	转换和加性	(67)
4.4	标准化(standardizations)	(67)
4.5	异常值	(68)
4.6	删截(censored)和缺失数据(missing data)	(68)
4.6.1	缺失数据	(68)
4.6.2	删截(截尾)数据	(69)
4.7	一般事项与分析提示	(70)
4.7.1	一般事项	(70)
	相关与回归	(72)
5.1	相关分析	(72)
5.1.1	参数相关模型	(72)
5.1.2	强相关	(76)
5.1.3	参数与非参数的置信区间	(76)
5.2	线性模型	(77)
5.3	线性回归分析	(78)
5.3.1	简单(二元)线性回归	(78)
5.3.2	线性模型回归	(81)
5.3.3	模型参数的估计	(85)
5.3.4	方差分析	(88)
5.3.5	回归中的零假设	(89)
5.3.6	回归模型比较	(90)
5.3.7	方差解释	(92)
5.3.8	回归分析假设	(93)
5.3.9	回归诊断	(95)
5.3.10	诊断图表	(97)
5.3.11	转换	(99)
5.3.12	通过原点的回归	(100)
5.3.13	加权最小平方法	(101)
5.3.14	X 随机(二类回归模型)	(102)
5.3.15	稳健回归	(107)
5.4	回归与相关间的关系	(109)
5.5	修匀	(110)
5.5.1	移动平均值	(110)
5.5.2	LO(W)ESS	(111)


5.5.3	样条	(112)
5.5.4	核	(112)
5.5.5	其他观点	(112)
5.6	相关与回归检验的功效	(113)
5.7	分析的一般特征及其启示	(113)
5.7.1	一般特征	(113)
5.7.2	分析提示	(114)

6 多元与复杂回归

6.1	多元线性回归分析	(115)
6.1.1	多元线性回归模型	(120)
6.1.2	模型参数的估计	(123)
6.1.3	方差分析	(125)
6.1.4	零假设与模型比较	(125)
6.1.5	解释的方差	(127)
6.1.6	哪些自变量(预测变量)重要?	(127)
6.1.7	多元回归的假设	(129)
6.1.8	回归诊断法	(130)
6.1.9	诊断图	(131)
6.1.10	转换	(132)
6.1.11	共线性	(132)
6.1.12	多元回归中的交互效应	(136)
6.1.13	多项式回归	(139)
6.1.14	指示(虚拟)变量	(141)
6.1.15	找寻“最佳”的回归模型	(142)
6.1.16	等级分类	(148)
6.1.17	多元线性回归的其他问题	(149)
6.2	回归树	(151)
6.3	通径分析及结构方程建模	(153)
6.4	非线性模型	(158)
6.5	平滑与响应面	(160)
6.6	一般事项与分析提示	(161)
6.6.1	一般事项	(161)
6.6.2	分析提示	(162)

7 实验设计和检验功效分析

7.1	抽样	(163)
7.1.1	抽样设计	(163)
7.1.2	样本量	(165)
7.2	实验设计	(165)

7.2.1	重复	(166)
7.2.2	对照	(168)
7.2.3	随机化	(169)
7.2.4	独立	(171)
7.2.5	减少未解释的方差	(171)
7.3	检验功效分析	(171)
7.3.1	用检验功效设计实验(预先分析检验功效)	(173)
7.3.2	后检验功效计算	(175)
7.3.3	效应量	(176)
7.3.4	使用检验功效分析	(177)
7.4	分析的一般问题和提示	(179)
7.4.1	一般问题	(179)
7.4.2	分析提示	(179)
	比较区组或处理——方差分析	(180)
8.1	单因素设计	(180)
8.1.1	预测变量(因素)的类型	(184)
8.1.2	单因素分析的线性模型	(185)
8.1.3	方差分析	(192)
8.1.4	零假设	(194)
8.1.5	对照方差分析模型	(194)
8.1.6	样本大小不等(不平衡的设计)	(195)
8.2	因素效应	(196)
8.2.1	随机效应:方差的组成	(197)
8.2.2	固定效应	(198)
8.3	假设	(199)
8.3.1	正态	(200)
8.3.2	方差齐次性	(200)
8.3.3	独立	(201)
8.4	方差分析诊断	(202)
8.5	强方差分析	(203)
8.5.1	方差不齐时的检验	(203)
8.5.2	Rank - based(非参数的)检验	(203)
8.5.3	随机化检验	(204)
8.6	平均数的特定比较	(204)
8.6.1	计划比较或对照	(205)
8.6.2	非计划的配对比较	(207)
8.6.3	特定的比较与非计划成对比较	(210)
8.7	趋势检验	(210)
8.8	检验组方差的相等性	(212)
8.9	单因素方差分析的功效	(213)


8.10	一般事项与分析提示	(215)
8.10.1	一般事项	(215)
8.10.2	分析提示	(215)


9 多因素方差分析

9.1	嵌套(分层 hierarchical)设计	(217)
9.1.1	嵌套分析的线性模型	(219)
9.1.2	ANOVA	(223)
9.1.3	零假设	(224)
9.1.4	不等样本大小(不平衡设计)	(225)
9.1.5	ANOVA 模型比较	(225)
9.1.6	嵌套式模型中的因素效应	(226)
9.1.7	嵌套式模型的前提	(227)
9.1.8	嵌套式设计详细比较	(228)
9.1.9	更复杂的设计	(228)
9.1.10	设计和功效	(228)
9.2	析因设计	(231)
9.2.1	析因设计线性模型	(235)
9.2.2	ANOVA	(239)
9.2.3	零假设	(241)
9.2.4	主效应和交互效应究竟测定的是什么	(246)
9.2.5	ANOVA 模型比较	(250)
9.2.6	不平衡设计	(251)
9.2.7	因素效应	(257)
9.2.8	前提	(259)
9.2.9	可靠的析因 ANOVA	(260)
9.2.10	主效应的特定比较	(260)
9.2.11	交互效应的解释	(261)
9.2.12	复杂析因设计	(265)
9.2.13	析因 ANOVA 的功效和设计	(270)
9.3	多因素设计合并	(270)
9.4	析因设计与嵌套设计之间的关系	(271)
9.5	一般事项与分析提示	(272)
9.5.1	一般事项	(272)
9.5.2	分析提示	(272)

10 随机区组与简单重复测量:非重复的双因素设计

10.1	非重复双因素实验设计	(273)
10.1.1	完全随机区组(RCB)设计	(273)
10.1.2	重复测量(RM)设计	(276)

10.2	分析完全随机区组(RCB)实验与重复测量(RM)实验	(279)
10.2.1	完全随机区组和简单重复测量分析的线性模型	(279)
10.2.2	方差分析	(283)
10.2.3	零假设	(284)
10.2.4	ANOVA 模型比较	(285)
10.3	完全随机区组实验与重复测量实验中的交互作用	(285)
10.3.1	区组交互作用的重要处理	(285)
10.3.2	非典型设计的核验	(288)
10.4	假设	(291)
10.4.1	误差的正态性和独立性	(291)
10.4.2	方差和协方差——球形性	(291)
10.4.3	推荐策略	(295)
10.5	强完全随机区组和重复测量分析设计	(295)
10.6	特定比较	(296)
10.7	区组的效益(分组还是不分组?)	(297)
10.8	时间作为区组因素	(298)
10.9	非平衡完全随机区组实验的分析	(298)
10.10	完全随机区组实验与单个重复测量实验的功效	(301)
10.11	更复杂的区组设计	(301)
10.11.1	析因的随机区组设计	(301)
10.11.2	不完全区组设计	(303)
10.11.3	拉丁方设计	(304)
10.11.4	交叉设计	(307)
10.12	一般化的随机区组设计	(309)
10.13	完全随机区组实验和重复测量实验与统计软件	(310)
10.14	一般事项与分析提示	(311)
10.14.1	一般事项	(311)
10.14.2	分析提示	(311)
	 裂区与重复测量设计: 部分嵌套的方差分析	(313)
11.1	部分嵌套设计(partly nested designs)	(313)
11.1.1	裂区设计(split-plot designs)	(313)
11.1.2	重复测量设计(repeated measures designs)	(317)
11.1.3	使用这些设计的原因	(321)
11.2	部分嵌套设计的分析	(321)
11.2.1	部分嵌套分析的线性模型	(323)
11.2.2	方差分析	(326)
11.2.3	零假设	(327)
11.2.4	比较方差分析模型	(331)
11.3	假设	(331)
11.3.1	区组(或对象)间	(331)

11.3.2	区组(或对象)内和多次抽样球形	(331)
11.4	部分嵌套的鲁棒分析(robust partly nested analyses)	(333)
11.5	特定比较	(334)
11.5.1	主效应	(334)
11.5.2	交互作用	(334)
11.5.3	剖面(趋势)分析	(335)
11.6	非平衡部分嵌套设计的分析	(336)
11.7	部分嵌套设计的功效	(337)
11.8	更复杂的设计	(338)
11.8.1	附加的区组(对象)间因素	(338)
11.8.2	附加的区组(对象)内因素	(346)
11.8.3	附加的区组(对象)间因素和区组(对象)内因素	(350)
11.8.4	复杂设计的一般评价	(350)
11.9	部分嵌套设计与统计软件	(351)
11.10	一般事项与分析提示	(352)
11.10.1	一般事项	(352)
11.10.2	个别分析提示	(352)
 12	协方差分析	(354)
12.1	单因素协方差分析	(354)
12.1.1	协方差分析的线性模型	(358)
12.1.2	(协)方差分析	(362)
12.1.3	零假说	(362)
12.1.4	协方差模型的比较	(363)
12.2	协方差分析的假设	(363)
12.2.1	直线性	(364)
12.2.2	各组协变量值相似	(364)
12.2.3	固定协变量(X)	(364)
12.3	斜率齐性	(365)
12.3.1	组内回归斜率齐性的检测	(365)
12.3.2	组内回归斜率不同的处理	(366)
12.3.3	回归线的比较	(367)
12.4	稳健的协方差分析	(368)
12.5	样本量不等(不平衡设计)	(368)
12.6	调整均值的特殊比较	(368)
12.6.1	有计划的对比	(368)
12.6.2	无计划的对照	(369)
12.7	更复杂的设计	(369)
12.7.1	含两个或多个协变量的设计	(369)
12.7.2	析因设计	(369)
12.7.3	含一个协变量的嵌套设计	(371)