



Design
and
Analysis
of
Ecological
Experiments

生态学实验设计与分析

(第2版) (中文版)

Samuel M. Scheiner 编著
Jessica Gurevitch

牟 溥 主译



高等教育出版社
Higher Education Press

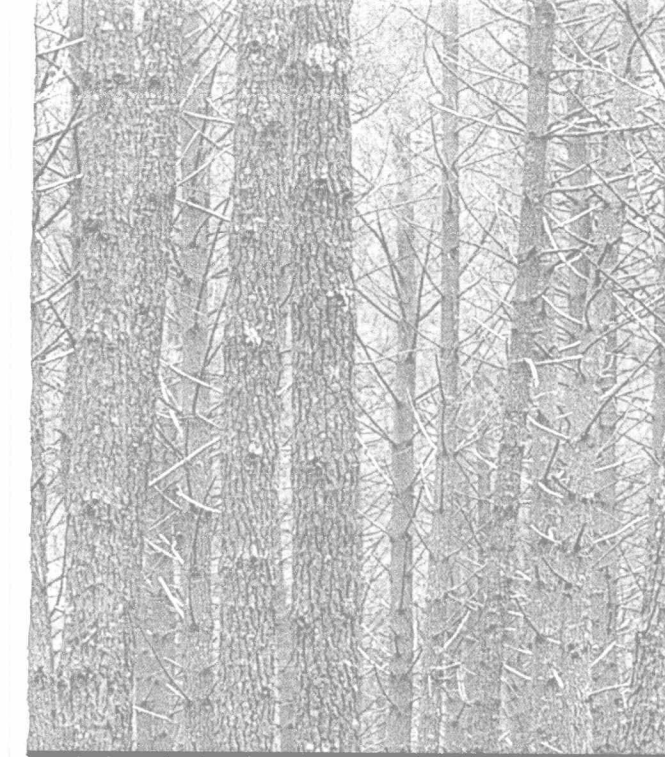


Ecology
10th Edition
by Rick M. Borner
© 2011 Sinauer Associates, Inc.
978-0-7302-1061-1

生态学实验设计与分析



生态学实验设计与分析
——从数据到结论
——从数据到结论
——从数据到结论



Design
and
Analysis
of
Ecological
Experiments

生态学实验设计与分析

(第2版) (中文版)

Samuel M. Scheiner 编著
Jessica Gurevitch

牟 溥 主译



高等教育出版社
Higher Education Press

内容简介

本书反映了生态学实验研究（尤其是野外实验研究）对概率统计需求与日俱增的现实。对介绍的各种统计方法，书中都以具体生态学问题为例进行讲解，尤其是给出了在什么情况下用什么方法、怎样用、结果如何解释的详细说明。

本书适合生态学及相关专业教师、学生和研究者参考使用。

图字：01-2008-3629 号

© 2001 by Oxford University Press, Inc.

Design and Analysis of Ecological Experiments Second Edition was originally published in English in 2001. This translation is published by arrangement with Oxford University Press and is for sale in the Mainland (part) of The People's Republic of China only.

《生态学实验设计与分析（第2版）（中文版）》，原版以英文于2001年出版，本翻译版由牛津大学出版社授权出版并仅限在中国大陆销售。

图书在版编目（CIP）数据

生态学实验设计与分析：第2版 /（美）沙尼（Scheiner, S. M.），（美）格维茨（Gurevitch, J.）编著；牟溥主译。
—北京：高等教育出版社，2008.11
书名原文：Design and Analysis of Ecological Experiments
ISBN 978-7-04-024271-3

I.生... II.①沙... ②格...③牟... III.生态学—实验—高等学校—教材 IV.Q14-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2008）第 113622 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 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京七色印务有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 21.75
字 数 520 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2000 年 4 月第 1 版
2008 年 11 月第 2 版
印 次 2008 年 11 月第 1 次印刷
定 价 40.00 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

物料号 24271-00

第2版前言

我们这本关于高级统计方法的书是写给生态学家的，在第1版发行7年后，第2版又与读者见面了。本书第1版广泛地应用于统计生态学研究生课程，我们感到非常欣慰。读者对这本书的热情是我们出这个新版的动力。新版比旧版有很多更新和扩展。我们希望本书在介绍许多生态学家原本不熟悉的方法上，以及在为传统分析方法的使用和发表设立更高标准方面起到应有的作用。

我们设计此新版书是要强化上述目的。第1版中几乎所有的章节都经过修订，有些做了很大改动，使内容达到最新。我们还加入了4个新的章节重点反映统计实践方面在生态学领域的进步。新的统计理论，新的计算机软件和硬件能力，以及生态学家不断进步的统计实践和统计标准的改善综合导致了本书的修订。

我们还得益于信息技术的一个重要进步：互联网。牛津大学出版社为本书建立了一个网站 (<http://www.oup-usa.org/sc/0195131878/>)，该网站包含了本书许多章节的源代码和数据。将源代码移入互联网使我们能够为本书加入新篇章。现在读者可以使用网上的样本数据检验计算结果。

我们为本书能在2001年出版发行感到欣喜。生态学研究以及生态学研究统计方法的使用方兴未艾，我们希望新版不仅对已往的研究者有用，而且对新的研究者也有帮助，年轻的研究者将会为21世纪的科学服务引入新的标准和新的理解。

Samuel M. Scheiner
Jessica Gurevitch

第1版前言

本书源于1990年在横滨街上吃便当（有米饭、寿司、酸黄瓜和其他调料的日本盒饭）时的一次街头对话。这次对话转入统计学话题，我们俩都在评论被生态学家们少用或错用的统计问题和方法。Jessica思考为生态学家们写一本关于实验设计和统计分析方法的书已有些时日。这本书的目的在于鼓励生态学家们正确使用那些已熟知的方法，以及将生态学家们不太熟悉但可能非常有用的方法介绍给他们。我们两人强烈感到这本书是到了该写的时候了，而且会对从事实验和基本问题研究的生态学家们非常有用。如果不是Sam的加入，写书的主意无疑会像许多其他好想法一样最终不见天日，不了了之。我们非常明白自己难以胜任本书的写作。但是我们能够列出题目和一些资深专家的名单，我们知道这些专家对这些题目深有专攻。[最初的名单是在去富士山来回旅途中堵车的几小时草拟的。下次INTECOL（国际生态学大会）时，别忘了买一件印有“I survived the trip to Mt. Fuji”（我熬过了去富士山的旅行）的T恤衫。]在将近一年的时间里，我们通过e-mail反复详细讨论了这些想法。1991年Phil Dixon在美国生态学会年会组织的关于生态实验设计研讨会成功极大地鼓舞了我们。在那一个礼拜，我们和许多作者敲定了任务。同时我们得到了同事们的热情鼓舞，以及来自Chapman and Hall的Greg Payne的重视和鼓励，使得我们能够不畏艰辛，继续前行。注意！千万别在吃生鱼时讨论，这是件非常危险的事！

Samuel M. Scheiner

Jessica Gurevitch

中文译本序

我们对本书新译本的出版感到十分欣喜。18年前，我们第一次构思本书时，正值实验生态学和统计学的关系发生迅速变化的时期。虽然有少数生态学家对统计学方法及其在生态学实验设计和分析中的应用理解入微，但是很多其他的生态学家在这方面缺乏训练和经验。不幸的是，对统计学的有限理解并没有阻止他们去设计实验、进行分析并发表研究结果。更糟的也许在于大多数科学论文和科研基金项目的评审者们同样对这方面知识知之甚少。在这种情况下，我们希望通过简明易懂地将如何使用较高级统计方法，以及在运用传统和高级统计技术时的注意事项及缺陷介绍给生态学家，来解决上述问题。

当时，写给具有有限统计学背景的实验生态学家关于此问题的书籍少之又少。没有关于如何将高级统计学方法应用到生态学问题的介绍；生态学家们不知道有什么书可以引导他们如何进行从分析假定到解释结果的整个过程。因而，我们的书一经出版就获得了十分正面的反响。我们适时地再版，而这个第2版就是你们现在手中所拿的这本书。现在市面上已经有了一些成功地将生态学和统计学联系在一起的书，它们都旨在增强生态学统计方法的复杂性和严格性。这些书籍彼此互为补充，并且毫无疑问地改变了生态学实践的面貌——从设计实验到分析实验结果，从准备学术论文到它们的评审和发表。

今天在生态学领域，统计学方法的应用已经有了显著的改善。生态学家设计的实验更加复杂，并且能够更好地解答所提出的科学问题。这些实验越发大胆地尝试在大时空尺度上测量和操控变量。使用传统统计方法（例如回归和ANOVA）的同仁们对其前提假定和局限性更为了解。对包括自助法、最大似然性、贝叶斯分析、整合分析等在内的其他统计方法的运用越发普遍，在论文中对于统计过程结果的报告也更为完整。

我们很乐于认为，本书在改善我们学科中实验设计的严格性与分析标准上起到了作用。我们仅仅对其中几个章节在科学网站（Web of Science）上略做一下快速查询，就发现本书已被引用超过1000次之多。本书在许多研究生课程中得到使用，对生态学训练和实践也起了重要的间接作用。我们为多次在同事们的办公室中发现这本书而感到很自豪，听到许多的人告诉我们这本书是多么有帮助令我们倍感荣幸。

这次的中文译本为我们的书带来一大群新读者，这意味着生态科学在中国有了极大的发展。我们感激牟溥博士和他的同事们的辛勤劳动，得以将本书呈现给广大读者。这是这本书首次被翻译成其他语言，我们为此深感骄傲。希望你们能发现本书对你们有所帮助。

Samuel M. Scheiner

Jessica Gurevitch

September 2008

（鲍喆 译，牟溥 校）

译者的话

由 Scheiner 和 Gurevitch 主编的“生态学实验设计与分析”主要涉及生态学实验中的统计技术的运用,反映了生态学实验研究(尤其是野外实验研究)对概率统计需求与日俱增的现实。对介绍的各种统计方法,书中都以具体生态学问题为例进行讲解,尤其是给出了在什么情况下用什么方法、怎样用、结果如何解释的详细说明,非常实用。我国的生态学研究正处于快速发展阶段,实验设计与分析统计方法的应用在大多数生态研究中尚属初度,错用、误用或不用统计学方法的现象屡见不鲜。究其原因,不外乎生态学者的数理统计训练与实际需要之间较大的知识和观念差距。其实不仅在中国,在国际生态学界都存在这种现象,从而导致生态学研究常常受到激烈的批评。目前我国尚无一本专门为生态学研究编写的实验设计与统计分析的书籍,因此急需一本好的统计书来帮助我们缩短差距,而这本来的正逢其时。该书以有统计学基本知识的生态学者和研究生为对象,介绍了大量常见和较高深的实验设计与统计分析方法。此外,本书还讨论了控制实验,也对观测实验分析和非实验性观测分析进行了讨论。

本书的翻译既是偶然,又是必然。一日在我办公室的下午咖啡聚会,葛剑平教授、张大勇教授、寇晓军副教授,和我闲话统计学在生态学中的应用与现状时,恰逢我才整理了运回的图书,忙不迭拿出这本书以示众人。大家对本书盛赞之余,有将其翻译之欲。于是在寇晓军副教授襄助之下,就有我的几个月“劳苦做事”。而今我望着就要交到出版社的逾三寸厚之译稿,大有“悔不当初,轻易就范”之感。

在本书翻译过程中,我们得到同事们的大力支持与鼓励。葛剑平教授为本书的翻译积极组织,联系出版,提供了一切必要支持。葛剑平教授和张大勇教授经常审阅译稿,提供极为有益的建议与批评。张大勇教授、韩洁副教授、张雁云副教授经常为译者的问题提供资料。我们由衷地感谢他们。北京师范大学生命科学学院生态学研究所的许多研究生主动参加翻译工作,他们不仅得到了锻炼,在学识上也有所增益。尤其是李金朝同学,积极组织同学们参与这件有意义的工作,为本书的翻译付出了心血。没有他们的帮助与参与,短时间内完成这本有分量的译著是不可能的。我们还要感谢高等教育出版社赵晓媛和张晓晶二位编辑对译者工作的各方面帮助。为本书做了很多默默无闻的工作的研究生还有:滕焜、杨艳、鲍喆、张立伟、谭增权、张馨等。我们深知自己学微识浅,且对统计学又非专攻,翻译错误在所难免,希望八方同仁不吝赐教。

工欲善其事,必先利其器。本书以易懂的语言将前沿统计技术介绍给生态学工作者们,使之可怀利器以求研究之精善。我们把它翻译出来,以饗辛勤之同事,待哺之学子。如这本译著对我国生态学研究与发展庶几有用,我们于愿足矣。

牟溥

致 谢

我们感谢为本书出版做过贡献的人们。我们感谢不厌其烦地为我们审阅各章节的同事们：Marti Anderson, Norma Fowler, Charles Goodnight, Ed Green, Jeff Hatfield, Ray Hilborn, Ed Heske, Charles Janson, Martin Lechowicz, Bryan Manly, Jim McGraw, Tom Meagher, Scott Menard, Tom Mitchell-Olds, Patrick Phillips, Alan Tessier, Joel Trexler, Art Weis 和 Neil Willits。我们特别感谢本书第 1 版编辑 Greg Payne 和本书第 2 版编辑 Kirk Jensen 为本书付出的努力。哈佛大学 Arnold 树木园的奖学金使得 J. G. 得到到日本，然后有此书动议，在此表示感谢。S. M. S. 到日本是由北 Illinois 大学文理学院生物学系、研究生院以及横滨市共同资助的。生物学系还为本书的编辑提供支持。S. M. S. 对 Judy Scheiner 在本书编写过程中所表现的耐心和克制表示感谢。J. G. 对 Todd Postol 这些年一直在她身边表示万分感谢。

第 1 章	理论、假设和统计	1
	Samuel M. Scheiner	
第 2 章	功效分析与实验设计	9
	Robert J. Steidl 和 Len Thomas	
第 3 章	探索式数据分析和图形表示	26
	Aaron M. Ellison	
第 4 章	方差分析 (ANOVA): 实验设计和分析	42
	Catherine Potvin	
第 5 章	方差分析 (ANOVA) 与协方差分析 (ANCOVA): 野外竞争实验	52
	Deborah E. Goldberg 和 Samuel M. Scheiner	
第 6 章	多元方差分析 (MANOVA): 多元响应变量和多物种交互作用	68
	Samuel M. Scheiner	
第 7 章	协方差分析 (ANCOVA): 非参数和随机化方法	81
	Peter S. Petraitis, Steven J. Beaupre 和 Arthur E. Dunham	
第 8 章	重复测量分析: 生长测量和其他时间依赖测量	94
	Carl N. von Ende	
第 9 章	时间序列干扰分析: 非重复大尺度实验	113
	Paul W. Rasmussen, Dennis M. Heisey, Erik V. Nordheim 和 Thomas M. Frost	
第 10 章	非线性拟合: 捕食和功能响应曲线	129
	Steven A. Juliano	
第 11 章	分对数模型和逻辑斯谛回归: 蚜虫、蚂蚁和植物	143
	Ted Floyd	
第 12 章	路径分析: 传粉	158
	Randall J. Mitchell	
第 13 章	失效时间分析: 研究事件发生的次数和发生概率	172
	Gordon A. Fox	

II 目录

第 14 章	自助法 (bootstrap) 和刀切法 (jackknife): 生态指标精度的确定	196
	Philip M. Dixon	
第 15 章	空间分析: 野外实验的分析	212
	Jay M. Ver Hoef 和 Noel Cressie	
第 16 章	Mantel 检验: 野外实验的空间结构	227
	Marie-Josée Fortin 和 Jessica Gurevitch	
第 17 章	贝叶斯统计: 估计植物种群动态参数	242
	James S. Clark 和 Michael Lavine	
第 18 章	整合分析方法: 独立实验结果的整合	257
	Jessica Gurevitch 和 Larry V. Hedges	
引用文献	275
索引及中英文名词对照	305

第1章

理论、假设和统计

Samuel M. Scheiner

设想在一个地下岩洞生活的人们，岩洞深处的火光引导他们穿过长长的通道……这些人看不到他们自己，也看不到同伴，只能看到被火光投射到岩壁上的身影……对于这些人而言，他们感受的真理就是身影。

我觉得科学哲学对科学史学家比对科学家更有用。Lakatos (1974)

1.1 本书的目的

生态学益发成为一门实验科学。生态学家们越来越多地利用实验来检验自然的理论 (Hairston 1989; Reserits 和 Bernardo 1998)。然而，生态学实验不论是在实验室、温室还是在自然界中，都会出现许多统计困难：许多统计基本原则常被严重违反，常遇到的高度非平衡设计使得生物体或其他生物真实性丢失。生态过程尺度过大或研究成本费过高经常限制了实验的有效重复性，正确确定重复单元通常在生态学实验中很困难，而且许多正确答案依赖于复杂的实验设计或需要非常规或扩展的统计技术。为解决这些问题，我们将本书设计成一个获取高级统计技术必备的知识工具箱，并加上一些其应用方面谨慎的解释。本书各章只是对这些问题的介绍，而不是确定的总结，仅为感兴趣的读者提供一个获取文献进行深入探索的渠道。

许多生态学家离开研究生院时仅有一些基本的统计训练，他们或是自学或是上过一学期或一年的基本统计学课程，因而对许多解决生态学问题的高深方法缺乏了解。有些方法仅见于统计学刊物，生态学家一般是不接触这些专业刊物的。一些其他方法经常用一些非常一般化或非常理论化的词句来表述，从而将其翻译成分析实际数据所必需的计算步骤非常困难。在统计学书中很难发现将这些专门化的统计学方法应用到生态学问题上的论述，更不用说在生态学文章简短的方法部分中对统计学方法应用进行充分解释。这类障碍使得这些方法不为大多数生态学家所掌握。

这种训练与需要之间的知识差距导致大量的文章激烈批评生态学中错误运用统计学的现象。这类被批评的现象包括：错误判断重复的性质和伪重复 (Hurlbert 1984; Gurevitch 和 Chester 1986; Potvin 等 1990b)，错误运用多元统计比较检验 (Day 和 Quinn 1989)，当更有效的技术存在时，还用 ANOVA (方差分析) (Gaines 和 Rice 1990)，误用递进多元回归 (James 和 McCulloch 1990)，不适当地使用统计参数或检验 (Fowler 1990)，以及过度运用显著性检验 (Yaccoz 1991)。

本书设计为一本作为生态学者和准备进入生态学研究教学的研究生们的指南，鉴于其在当前生态研究中的重要性，所选生态题目包括竞争（第5, 11, 16和17章）、植物-动物交互作用（第12章）、捕食（第6, 9和10章）以及生活史（第6, 7, 8和13章）方面的分析，所选统计技术是由于它们对生态学问题的分析尤其适合或有用，以及它们目前被广泛使用或将来可能会被用到。有些技术生态学者很熟悉但常被误用（例如ANOVA，第4和5章），其他则在应使用时很少被使用（例如功效分析，第2章；MANOVA，第6章；重复测量分析，第8章；非线性拟合，第10章），更有一些统计技术不为多数生态学者所熟悉或是新发展的，但是非常重要（例如非参数ANCOVA，第7章；空间分析，第15和16章；贝叶斯分析，第17章；整合分析，第18章）。有些统计手段在生态学界内已家喻户晓，其他则是新的或是有争议的。我们争取将它们结合在一起论述。每一种统计技术，将以一具体生态学问题为例进行讲解，当然这不是说该技术仅能用于该问题。很显然许多这里讲解的统计技术都有相当广的应用范围。我们希望本书能鼓励生态学者们扩展他们的统计技术。

这本书主要涉及实验中的统计学运用，反映了生态学实验研究，尤其是野外实验研究的增加对统计学的需求与日俱增。我们的讨论着重于可控制实验，虽然许多技术对观测实验分析（第6, 11, 12和18章）和非实验性观测分析（第2, 3, 9, 10, 11, 14, 15和16章）也同样适用。我们如此做并非轻视其他类型的生态学实验和研究项目。许多其他已出版的书籍已经论述诸如非实验性观测分析这类问题（如Ludwig和Reynolds 1988；Digby和Kempton 1987；Manly 1990b, 1997）。这里列出的生态学问题及对应统计学方法并非固定不变，而是要说明大量生态学问题是要通过实验分析来解决，例如第9章讲述通常不在可控制实验范围内的大尺度现象。我们希望通过编写此书来表示生态学者们可以掌握十分先进的统计技术，从而提高生态学实验的设计和分析水平。

1.2 理论、假设和统计

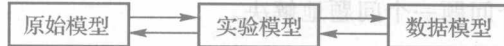
1.2.1 误差—统计科学过程

绝大多数科学家自觉或不自觉地成为先验的或认识上的现实主义者，那就是我们相信客观世界独立于我们或我们的观察而存在。这样的话，科学就是一个建立关于什么组成这个世界，这些组成怎么集合到一起形成这个世界，以及这个世界如何行使其功能的理论或模型的过程。这些理论包括一系列关于这个世界的假设（Pickett等 1994），我们努力要去发现的重要真理，以及不断积累的那些离真理最接近的理论。在建立和检验理论的过程中，我们相信我们还在成功地向真理步步逼近，虽然我们不能断言我们已经实际上到达了真理，但我们通过仔细地排查可能的误差来源而前进。科学就是一个从错误中学习的实验过程。

统计学在这个科学过程中扮演着核心角色，统计学的这个角色已经被哲学家Deborah Mayo (1996) 在她称之为误差—统计方法中详细论述过。她用一本493页的书来讨论此题，而我在这里最多只是讲她论文的骨架。如果你有兴趣去探究我们这个产业的哲学基础，我极力推荐此书。这本书是我所阅读的所有关于科学哲学的书中最能把握真正科学实践的。大多数生态学家（例如Peters 1991；Pickett等 1994）对科学哲学的认识还停留在Popper (1959)

的证伪理论和 Kuhn (1962) 的社会构建理论 (social constructivism) 上, 这些观点已经跟不上科学实践中现实主义的脚步。

误差—统计方法的核心是认识到科学家们在他们寻求真理过程中利用误差—概率统计学从错误中探究而前进这一事实。这个方法部分来源于所谓的 Neyman—Pearson 统计学, 虽然前者与后者有明显的不同。该方法可以简化为一个模型等级:



这个等级体系被故意横向, 而不是纵向表述, 因为你可在其中向任意方向移动: 从原始模型到数据模型方向或反向, 而不应该试图用归纳或演绎过程将这些方向等同。

这个等级体系是理清原始数据与科学假设之间复杂关系的骨架。原始模型考虑将主要问题分解成一系列假设检验和理论数值估计的过程。实验模型将这些问题与现有的实验联系起来, 而数据模型则专注原始数据的产生与模拟。

本书主旨是实验模型以及其与数据模型的联系。第一种类型是可控制 (操纵) 实验, 这是一般感觉上的实验, 包括诸如对行为的实验室研究 (第 10 章), 在生长箱或温室内控制生长条件 (第 4 章), 制造半自然环境, 以及在野外进行实验处理 (第 5, 9, 15, 16 和 18 章)。第二种类型是观测实验, 这种类型的实验在生态学中尤其重要, 因为所关心事件尺度或出于道德伦理考虑常常使可控制实验无法施行。例如, 理论上可以预测草原物种比森林物种丰富。人们可以通过测量 (观察) 这两生境中各自的物种数量来检验此假设。只要用于检验的观察方法不同于产生该理论的原非实验性观察方法, 这一过程就是对该理论有效的检验。在控制实验和观测实验之间是自然实验。如人们预测一些自然干扰产生的后果 (Diamond 1986; 时间序列分析, 第 9 章) [有人 (如 Hairston 1989) 会将此类实验放入观测实验。]

统计学在联系这个模型等级体系中起到关键作用。Mayo 确定了误差统计学的 3 项任务: (1) 统计学为数据产生和假设检验提供了技术手段。例如, 功效分析 (power analysis) (第 2 章) 及残差分布 (residual distribution) 检验 (第 3 章)。(2) 统计学提供误差概率 (本书大部分论及此)。(3) 统计学提供查验可能误差的方法, 例如机会相关 (chance correlation)、参数估计或实验假定中的错误。从统计学观点出发, 一个严密的检验应该是第 I 类和第 II 类错误概率均很小 (1.2.2 部分; 第 2 章)。当我们的数据通过了这些检验, 我们就已经学到了一些东西。至此, 我们已经非常可靠地回答了一个问题并在解决问题的路上前进了一步。

这个讨论的中心是假定 (assumption) 这个概念的 3 个不同的用法。第一个是解释性假定, 即那些一般的假定 (例如同种间的竞争更甚于亲缘关系较远的种间竞争)。这些假定形成理论而由实验去检验。第二个是简化假定, 这类假定为方便分析而作 (例如关于交配完全随机的假定)。这类假定或者已为以前的实验所验证, 或已知如违反也不致产生严重偏差。第三个是统计假定, 是那些支撑所使用统计步骤的假定 (如在参数统计学中被检验变量应具正态分布的假定)。统计假定是所报告概率 (P 值) 的基础, 该 P 值表示观测的参数值与预测值的偏差只是由随机抽样影响产生。欲使统计过程提供正确答案, 满足这些假定是关键。不幸的是, 许多做实验的科学工作者不是不懂得这些统计假定就是忽视它们, 从而导致错误的结论 (如第 7, 9 和 10 章)。本书从头到尾都会将支撑统计过程的关键假定提出, 并显示一旦违反这些假定所产生的后果。知道违反这些假定所导致的后果是十分有用的, 因为有时虽然违反了一些这

类假定，但合理的结论还是可以得到的。

这种以统计结论为据，步步逼近的过程是科学研究的特点。但是统计结论并非等同于科学结论。而科学结论也不是规范逻辑的简单标记。由于误差—统计过程包含使用科学家们的专业推断从而可以确定误差的可能来源，使之更为复杂。同时要认识到误差—统计的模式并非科学研究的不变处方。与多数科学哲学家们不同，Mayo并非给出一系列适合一切场合的规律，反而强调实际科研工作要一个问题一个问题地解决。

1.2.2 第 I 类和第 II 类错误

两类错误可在假设检验中确定假设是否被拒绝时产生。第 I 类错误是当假设被检验为错误时，而它实际上是正确的。第 II 类错误则是假设不能被检验为错误，而实际上它是错误的。统计过程能够表示出这两类错误的可能性或概率。最为熟悉的是第 I 类错误的概率，即科学文章中结果一节中报告的 α 与 P 值。在众多 P 值中， $P < 0.05$ 成了一个魔幻数字：如果观测到某一数值参数的概率仅由于机会原因小于 5%，那么拒绝假设，反之，如果大于 5% 则不拒绝（或接受）假设。虽然一些客观标准是必要的，使我们不能简单地改动我们的预估来符合结果（如往墙上投镖，然后把靶心画在镖周围），但三个例外是必须要考虑的。

第一，我们必须要考虑假设检验的功效（power）： β 值或第 II 类错误的概率（第 2 章）。（确切地讲，该功效等于 $1 - \beta$ 。）在生态学中，由于研究事件的尺度，实验处理的大量重复在很多情况下不能实现且有时是不可能的。在这种情况下，由于检验功效低，将 α 值提高一些，如 $\alpha = 0.1$ ，作为统计显著的阈值是可接受的。对于这方面的讨论，尤其是在检验结论确定时关于各类型错误的相对重要性，请见 Toft 和 Shea (1983)，Young 和 Young (1991) 以及 Shrader-Frechette 和 McCoy (1992)。对于这个问题的一个非常不同的方法由统计学中的贝叶斯 (Bayes) 学派 (Bayes 1763；第 17 章) 给出。其建议者相信检验结论基于误差率而给出的常规过程是错误的。他们为统计分析和结果评估而使用一种不同的方法 [见 Edwards 等 (1983) 和 Berger (1985) 对贝叶斯统计更多的讨论]。

第二，重要的是牢记任何科学研究的最终目的：确定关于宇宙的哪一个假设是正确的。最终这些回答为是或否。而统计检验应该给出的是：“是，该假设基本上是正确的。”或“不是，该假设基本上是错误的。”或“可能是，但必须做另一个实验。”因而， P 值只是一个指标，而结果处于 $0.011 < P < 0.099$ （随便取两个随意值）应该是非常小心来进行确定的。

第三，当我们在选择判断的标准时，重要的是区别理论建立和理论检验。当注意力在格局和建立理论时，我们不应该太保守并使用较高 α 值，从而不忽视研究中有希望的方向。而当检验理论时，我们应该站在较保守的立场上；这与 Mayo 的主张相同，需要对假设进行严格的检验。[按统计学的说法，就是采用更为保守的步骤使原假设 (null hypothesis) 更不容易被拒绝。] 造成第 I 类或第 II 类错误的代价也要考虑：如果用统计检验功效低的方法对一种濒危物种进行有害影响的检验时，就宁可在统计上更为保守，更为小心（见第 2 章）。

判断实际犯第 I 类错误的概率有时是很困难的事情。该错误率是指如果实验重复许多次，假设正确但被不当拒绝的次数。在研究过程中，如果对同一参数有两次或更多次的检验时就会产生问题。例如，我们想判断两个植物种群是否不同，我们可以在每一个种群中各选相同数目的个体，对每一个个体测量 10 种不同的特征，并比较估计出来的参数。或者，我们可以测量

3个不同的物种，来检验所关心的假设。在什么情况下对 α 值进行调整才是必要的呢？我们在回答问题时所关注的是：是否单个假设被独立检验一次以上。如果是这种情况，那么某种改正便是有意义的了，如巴氏（Bonferroni）过程（Simes 1986；Rice 1990）。当变量反应不独立时，另一种解决办法就是用多元统计，将问题减少到一次统计检验（第6和8章）。

至于多均值的比较，统计学界有过非常深入的辩论（Jones 1984）。一方认为这样做时，在判断二样本不同时会受到在分析中包括进来的其他样本的影响。他们认为只能进行单独均值对的比较，而多样本分析，如ANOVA（方差分析）或Tukey检验（一种多元检验）是不应使用的（Jones和Matloff 1986；Saville 1990）。另一方则认为这样做会导致第I类错误的上升（Day和Quinn 1989）。两方都有理，而每一个研究者在进行研究时必须确定（1）你的问题是什么，（2）统计检验所需要的保守程度。例如，一个实验要检验3种杀虫剂对6块农田中的玉米螟种群的影响，如果问题是“玉米螟对杀虫剂反应如何？”那么样本应是代表一个大范围的随机样本，包括此物种的所有种群。在这种情况下，多元比较过程，如ANOVA，则比较合适。如果问题是“这3种杀虫剂中，哪一种控制玉米螟效果最好”，那么感兴趣的是单独的样本。这样单独地两两比较则是合适的。不管我们的立场是什么，在发表文章时，至关重要的是要把问题表示清楚，把使用的统计方法讲明白，并且将犯第I类及第II类错误的概率的范围以及选择这些步骤及错误率的标准表达准确。

永远记住统计学显著并不等于生物学显著。大的实验可以检验出非常小的影响。这些小影响在各种随机因素存在的世界里，会很快被环境变化的因素淹没，例如，一个检验两物种间竞争实验可以设计成能够检测出其中一种哪怕只有0.001%的竞争优势。这种影响在诸如群落每几年就有一次大干扰，或实际两物种相遇概率较低的情况下是毫无意义的。另外，我们还必须对不能从统计上认识到那些会在非常大的时空尺度上产生后果的弱过程重要性的可能性有足够的警惕。例如，当人体寄生虫（螨、虱等）在集群时可对其寄主的种群动态产生长时间的重大影响，然而由于任何单一个体的寄生率的低下，这种影响就很难被察觉。整合分析（第18章）是一种整合不同实验结果的分析方法，为检测这类弱过程提供了一种方法。

生态学中的统计学 1.2.3

1.2.3 伪重复和非独立 在生态学中反对坏统计学的一发重炮是Hurlbert(1984)的文章，在文章中，他发明了伪重复（pseudoreplication）一词来特指在实验中不独立的实验单元（experimental unit）在统计分析时被当成独立单元处理的现象。从此，虽然伪重复问题尚未绝迹，却的确减少了（Hefner等 1996）。可是现在我们又面临另一问题：伪重复并不存在却认为其存在。我总是听到这样的说法：“噢，那是伪重复，”而实际上，这些简单的非独立观察值可在统计模型中得到适当地处理。区分在哪里？可以用一个检验生境条件对一种制造虫瘿的昆虫虫体分布影响的实验为例来考虑。从灌木树茎上采集的虫瘿，每一个都有许多小室，每一个小室中有一个幼虫。虫瘿采集后，用等级法（hierarchical fashion）来测量幼虫，即每一虫瘿测量3个幼虫，每一丛灌木采5个虫瘿，每一生境选20丛灌木，一共在4个生境抽样。我们要问：真正重复的最低限在哪？回答是：取决于要回答的问题。对于虫瘿内的幼虫，一个幼虫的生长影响其他幼虫的生长。这是一个伪重复的例子，因为观察值的残差（residual error）不独立。但是对于生长在不同枝杈

上的虫瘿，虽然观察值也不独立，却不是伪重复，因为其残差是独立的。由于这两类观察值具有相同的外部因子（灌丛），因而此例统计上可以处理（包括在模型中），即在 ANOVA 中将“灌丛”嵌入“生境”之中（第 4 章）。其他统计技术，如空间分析（第 15 和 16 章），也可以处理这类问题。Hurlbert 关于伪重复的文章并未区分这两类非独立性，故使许多生态工作者对这个问题的态度有些极端。

我还见到对 Hurlbert (1984) 提出的另两个问题：外插和魔鬼入侵（demonic intrusion）（随实验处理而来的未被察觉的系统干扰误差——译者）采取的较中性立场。外插的方法常用于生态单位内缺乏重复的情况。例如第 9 章讨论整个湖泊的控制实验，由于成本和可行性限制，只在一个湖泊进行了实验，一派认为研究者不能将研究结果扩展到其他湖泊，因为他们在实验中没有取得湖泊间反应相异的信息。我觉得这种外展是有效的，只要研究者能够提供附加信息来说服我们其他湖泊对实验处理的反应与这个湖泊一样。这个例子就是 Mayo 所说的使用误差统计学来检验数据和实验假定（assumption）。

“魔鬼入侵”是一个相关的问题。虽然研究人员提供了证明该地区的其他湖泊与实验处理的湖泊一样的一长列测量的变量，他们怎么能知道其他没有测量的变量不会不同呢？更为典型的是对人造环境的实验提出这类问题。例如，一个实验使用一对环境可控温室，一个温室放入一个温度处理下的全部重复，而另一个温室则放另一个温度处理下的全部重复（第 4 章），在此案例中，实际情况不可能使一个温室有全部温度处理。我要说在一定情况下，应该从正常感觉出发来处理。我们能在每一个温室中测量尽可能多的其他环境因子来说服我们自己：它们除温度外其他都是完全一样的。我们可以进行一些小的实验（即，在两个温室同温度条件种植）来评估温室间的差异。如果其差异小于处理影响，便可忽略不计。是的，我们都可以提出一些可能误导我们的非常不可能发生的情况，而且我们可能还会经历一些这样的情况。但是，对现时情况的顾虑会干扰我们试图设计完美实验的努力。科学的发展要求我们允许在解释我们的实验结果时考虑非统计信息。这就是为什么 Mayo 所说科学推理并不等于统计推理。

1.2.4 统计学的使用与报告

最终，统计学只是我们作为科学工作者用来增加对宇宙知识的众多工具之一。要将之使用得好，就必须考虑周全地运用之，而不是自动化式地应用。我们要告诉大家的是：通常没有一种唯一正确的方式来利用统计学。另外，还有许多错误的方式。本书许多章（即第 4，7，15 和 16 章）对分析相似问题给出了不同的方法。哪一种方法最好取决于诸多因素，包括数据对不同统计方法的统计假定的适应程度。最重要的是根据所提问题来挑选统计方法。不同的方法对解决不同类型的问题效果各异。例如，von Ende（第 8 章）讨论了不同类型的重复测量分析，这些分析类型对提出诸如以下问题是有效的：是否不同处理导致它们的均值的不同，或导致对它们的响应曲线的形状不同。本书应该给人们一种感觉，即各种统计方法都能够解决许多普通生态问题。它应该能鼓励使用一些非常规统计技术和减少错用常规技术。

对于实验设计，首先考虑用于分析实验结果的统计分析方法至关重要。统计技术在缓解不佳设计的实验方面毕竟能力有限。这些考虑不仅包括处理种类与重复数目（如，重复测量分析，第 8 章），而且包括如何对待实验单元，如 Potvin（第 4 章）展示了实验区组相对于环境异质尺度的空间安排怎样影响探知处理影响显著性的能力。在实验设计阶段，我们大力建议去