



新世纪高等学校教材



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

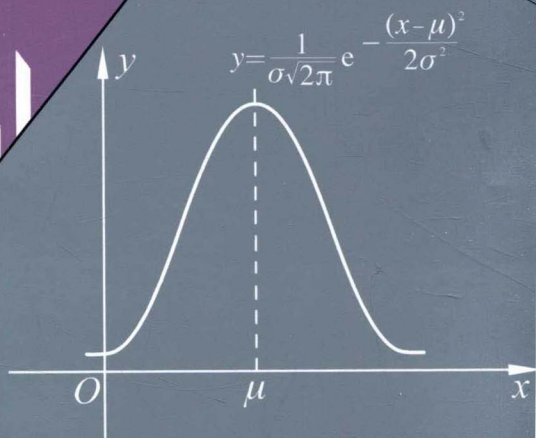
大学公共课系列教材

李仲来 刘来福 程书肖 编著  
北京师范大学数学科学学院 主编

# 生物统计

(第3版)

SHENGWU TONGJI



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



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

大学公共课系列教材

北京师范大学数学科学学院 主编

# 生物统计 (第3版)

SHENGWU TONGJI

李仲来 刘来福 程书肖 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

生物统计 / 李仲来, 刘来福, 程书肖编著. —3版. —北京: 北京师范大学出版社, 2015.8

(新世纪高等学校教材 数学公共课系列教材)

ISBN 978-7-303-19091-1

I. ①生… II. ①李… ②刘… ③程… III. ①生物统计—高等学校—教材 IV. ①Q-332

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第121324号

---

|               |                                                               |
|---------------|---------------------------------------------------------------|
| 营销中心电话        | 010-58802181 58805532                                         |
| 北师大出版社高等教育分社网 | <a href="http://gaojiao.bnup.com">http://gaojiao.bnup.com</a> |
| 电子信箱          | <a href="mailto:gaojiao@bnupg.com">gaojiao@bnupg.com</a>      |

---

出版发行: 北京师范大学出版社 [www.bnup.com](http://www.bnup.com)  
北京市海淀区新街口外大街19号  
邮政编码: 100875

印刷: 三河兴达印务有限公司  
经销: 全国新华书店  
开本: 730 mm×980 mm 1/16  
印张: 20  
字数: 350千字  
版次: 2015年8月第3版  
印次: 2015年8月第6次印刷  
定价: 32.00元

---

策划编辑: 岳昌庆  
美术编辑: 焦丽  
责任校对: 陈民

责任编辑: 岳昌庆  
装帧设计: 焦丽  
责任印制: 陈涛

### 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: 010-58808284

# 内容提要

本书介绍一些概率论基本知识,比较系统地介绍处理生物科学观测数据常用的统计学方法,包括:抽样、参数估计、假设检验、方差分析、回归与相关、协方差分析、非参数检验,及其所依据的统计学基本原理。本书基本概念清楚,一元统计内容较为全面,实用性强。各章均配备了一定数量的练习题,以利于教学及读者掌握书中介绍的方法及其基本原理。本书是作者多年教学和实践的总结,可作为高等学校生命科学学院/生物系的本科生和专科生生物统计课的教材,以及开放大学、农林、医药高校生物统计课的教学参考书,也可供有关生物工作者参考。

# 北京师范大学数学科学学院简介

北京师范大学数学系成立于1922年,其前身为1915年创建的北京高等师范学校数理部,1983年成立数学与数学教育研究所,2004年成立数学科学学院.学院现有教师78人,其中教授35人,副教授26人;有博士学位的教师占96%.特别地,有中国科学院院士2人,第三世界科学院院士1人,国家千人计划2人,全国高校教学名师奖1人,教育部长江学者奖励计划特聘教授4人和讲座教授1人,国家杰出青年基金获得者4人,入选新世纪百千万人才工程国家级人选2人.现有全日制在校生914人,其中本科生636人,硕士研究生206人,博士研究生72人.

数学科学学院1981年获基础数学、概率论与数理统计学博士学位授予权,1986年获应用数学博士学位授予权.1988年,基础数学、概率论与数理统计被评为国家级重点学科.1990年建立了北京师范大学第一个博士后流动站.1996年,数学学科成为国家“211工程”重点建设的学科.1997年成为国家基础科学人才培养基金基地.1998年获数学一级学科博士学位授予权.2001年概率论方向被评为国家自然科学基金创新群体.2005年进入“985工程”科技创新基础建设平台.2007年数学被评为一级学科国家重点学科.2008年数学与应用数学专业师范教育方向获第一批高等学校特色专业建设点.2009年教育部数学与复杂系统重点实验室挂牌,分析类课程教学团队被评为国家级优秀教学团队,调和分析与流形的几何方向被评为教育部创新团队.2011年获统计学一级学科博士学位授予权.2012年在高校第3轮数学一级学科评估中排名第5.学院还有8个硕士点、9个教研室和《数学通报》杂志编辑部.

100年来,数学科学学院已毕业全日制本科生7860人(不含辅仁大学数学系毕业生).30多年来,已授予博士学位387人,硕士学位1608人,研究生班毕业209人.据不完全统计,在博士毕业生中:当选为中国科学院院士2人和第三世界科学院院士1人,获全国高校教学名师奖2人,入选万人计划教学名师1人,任教育部长江学者特聘教授3人,中国科学院百人计划1人,获国家杰出青年基金6人,获国家自然科学基金4人,获国家科技进步奖3人,获国家级有突出贡献的中青年专家称号2人,入选新世纪百千万人才工程国家级人选2人,入选全国百篇优秀博士学位论文2篇,获全国百篇优秀博士学位论文提名奖5篇.(李仲来执笔)

2015-07-06

## 第3版前言

1915年北京高等师范学校成立数理部,1922年成立数学系.2004年成立北京师范大学数学科学学院.经过100年的风风雨雨,数学科学学院在学科建设、人才培养和教学实践中积累了丰富的经验.将这些经验落实并贯彻到教材编著中去是大有益处的.

1980年,北京师范大学出版社成立,给教材的出版提供了一个很好的契机.北京师范大学数学科学学院教师编著的多数教材已先后在这里出版.除《北京师范大学现代数学丛书》外,就大学教材而言,共有5种版本.第1种是列出编委会的《高等学校教学用书》,这是在1985年,由我校出版社编写出版了1套(17部)数学系本科生教材和非数学专业高等数学教材.在出版社的大力支持下,这一计划完全实现,满足了当时教学的需要.第2种是未列编委会的《高等学校教学用书》.第3种是《面向21世纪课程教材》.第4种是《北京师范大学现代数学课程教材》.第5种是未标注“高等学校教学用书”,但实际上是高等学校教学用书.在这些教材中,除再次印刷外,已经有多部教材进行了修订或出版了第2版.

2005年5月,李仲来教授汇总了北京师范大学数学科学学院教师在北京师范大学出版社出版的全部著作,由李仲来教授与北京师范大学出版社理科编辑部岳昌庆、王松浦进行了沟通和协商,由北京师范大学数学科学学院主编(李仲来教授负责),准备对学院教师目前使用的,或北京师范大学出版社已经没有存书的部分教材进行修订后再版,另有一些教材需要重新编写.计划用几年时间,出版数学与应用数学系列教材、数学教育主干课程系列教材、数学公共课系列教材、数学学科硕士研

究生系列教材,共4个系列的主要课程教材。

由学院组织和动员全院在职和退休教师之力量,主编出版数学一级学科4个系列的60余部主要课程教材。教材编写涉及面如此之广和数量之大,持续时间之长,这在一所高校数学院系内是为数不多的,其数量在中国数学界列全国第一。经过10年的编写,至今已经出版了65部教材,原计划的大多数教材已经出版,对于学院来讲,这是一件值得庆贺的大事。现在可以说,数学科学学院和北京师范大学出版社基本上是干成了一件大事。这是很难办成圆满的一件大事。剩下的一些教材在两三年内多数可以出版。若留下缺憾,则需要后人去补充。

从数量上看,按教材系列,出版数学与应用数学系列教材31部、数学教育主干课程系列教材11部、数学公共课系列教材12部、数学学科硕士研究生系列教材11部。按出版教材版次,第1版24部、第2版22部、第3版18部、第4版1部。还出版了3部教辅教材。

从质量上看,7部教材被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材;8部教材被评为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材;9部教材被评为北京市高等教育精品教材;“师范院校数学学科4个系列教材建设”项目获2012年北京师范大学教育教学成果一等奖。

本套教材可供高等师范院校数学教育本科生和研究生、教育学院数学系、函授(数学专业)、开放大学 and 在职中学教师等使用和参考。希望使用这些教材的校内外专家学者和广大读者,提出宝贵的修改意见,使其不断改进和完善。(李仲来执笔)

北京师范大学数学科学学院

2015-03-28

# 第3版编者的话

北京师范大学数学科学学院从1982年至今已为生物系(生命科学学院)33届本科生开设生物统计课程.我已给生物系(生命科学学院)1988~2013级(1992级除外)本科生讲授25届生物统计,25届学生参加期末考试的人数依次为52(1988级),60(1989级),70(1990级),60(1991级),61(1993级),63(1994级,以后依次类推),61,59,59,53,81,76,78,116,111,115,113,108,111,107,106,105,80,95,91人,共计2031人次.

《生物统计》第1版教材从1988年出版后连续使用17届.后使用哈佛大学B.罗斯纳著,孙尚拱译《生物统计学基础》(科学出版社,2004)作为生命科学学院3届本科生教材.2007年修订出版《生物统计》第2版后连续使用至今.

如何结合生物学的学科特点和需要,做到既能够联系生物学专业知 识,在数学上,又要不牺牲数学知识的系统性,并且表达清楚其基本概念,是需要认真解决的一个重要问题.做得好了,就是在发展和宣传应用数学.在生命科学学院教学,在此基础上修编教材,则是完全可以充分利用的一个优越条件.

生物学学科需要数据分析技术.有人说,生物学的研究像吃没有放盐的菜,生物统计是往菜里放盐,吃起来更有味道.还有人 说,生物学家做完实验,研究就结束了,而统计学家认为研究工作刚刚开始.我更欣赏生物统计学是技术+艺术的一门课程.掌握好生物统计技术,创造性地使用生物统计艺术,可以使生物学的研究更上一层楼.

根据对生命科学学院8届本科生讲授本书第2版的教学实践,作了如下修订:第1章(随机事件与概率)中,概率的两个

基本法则内容并到 § 1.2~§ 1.3, 去掉第 9 章协方差分析. 并对书中若干内容, 进行了适当的调整和补充, 删除了部分理论性较强的内容. 对书中前后内容搭配是否合适, 证明是否易懂, 记号是否合理, 写作是否规范, 哪些地方有瑕疵、包括习题配置, 版面是否好看, 力争做到精雕细刻.

在修完本课程之后, 建议读者尤其是攻读硕士学位的学生有机会学习多元统计分析.

本书第 1 版由刘来福和程书肖老师编著, 本书第 2, 3 版由李仲来修订. 不当之处在所难免, 恳请使用本教材的老师和学生以及其他读者提出批评和修改意见.

李仲来

2015-03-28

## 第2版编者的话

刘来福老师从1982年9月开始为生物系开设《生物统计》课程,随后,由刘来福和程书肖老师编写的《生物统计》讲义于1988年由北京师范大学出版社正式出版.出版后到2003年,一直作为生物系(生命科学学院)本科生的教材.1988年的《生物统计》课程由刘来福老师开设,1993年由范韶华老师开设,1988年后其余年份均由我开设.1989~1990年为选修课,1991~2000年为必修课,2001~2004年为限选课(但全部学生都选了该课),2005年后又改为必修课.1989~2000年在第4学期开设,每周4学时.2001~2003年在第2学期开设,每周3学时.2003年后改为在第4学期开设,每周2学时.为弥补学时的不足,从《高等数学》教学中,挤出部分课时,讲授生物统计.2007年后将再改为每周3学时.

根据对18届生物系本科生的教学实践和从事生物统计的科学研究体会,本教材此次作了如下增加:在第1章(随机事件与概率)中,改写事件运算的主要性质,增加全概率公式与贝叶斯(Bayes)公式内容.在第2章(随机变量及其概率分布)中,增加超几何分布,负二项分布;加几种分布的可能应用.在第3章(随机变量的数字特征)中,增加协方差概念引入.在第4章(抽样)中,增加生物统计简史,几种抽样调查方法简介,数据的分类和描述统计.第5章(参数估计)中,增加两总体方差不等的置信区间.在第6章(假设检验)中,修改检验方差的 $F$ 检验方法,并调整到 $H_0: \mu_1 = \mu_2$ 之前;加 $t$ 检验应注意的问题.在第7章(方差分析)中,增加单因素样本容量不等的方差分析.在第10章(非参数检验)中,增加符号检验的近似检验,多个独立样本的秩和检验(Kruskal-Wallis 检验),多个相关样本的秩和

检验,秩相关系数检验.将离散数据的假设检验归为本章.增加列联表精确检验;匹配检验;种间关联系数,优势比.并对书中若干内容,包括练习题,进行了调整和补充,删除了部分理论性较强的内容和章节.考虑到课时的限制,样本容量的估计和功效、生存分析、Logistic 回归(离散和连续)等内容在第2版修订时没有加入.

就生物统计教材而言,主要有三种写法,一种偏重于理论,一种偏重于应用,一种是理论和应用兼顾.本教材属于后一种.

由于生物统计是处理数据的科学,必然涉及大量计算,很多计算靠手工和计算器是无法完成的,但本书的大部分内容是可以依靠计算器完成.由于计算机技术的普及,大量的统计软件使得统计计算变得非常简单、快捷和准确.虽然本书未附常用软件的使用,但在学习生物统计的过程中,需要掌握常用的一个或两个统计软件.如 SPSS(Statistical Package for the Social Sciences)或 SAS(Statistical Analysis Systems).需要指出,统计软件可以帮助我们解决计算问题,但不能替代对统计学概念和方法的学习,要掌握必要的概念、方法和生物学的知识,才能针对具体的实际问题选择正确的统计分析方法,对计算结果做出合乎生物学的合理解释.

本书第2版由李仲来修订,并征求了刘来福老师的意见.

我从1986年开始从事预防医学课题研究,1988年开始在医学杂志上发表论文,1991年从生态学角度进行研究,1993年开始在生物学杂志上发表论文.已在医学杂志上发表论文64篇(独立和第1作者46篇),生物学杂志33篇(独立和第1作者30篇).已培养生物数学硕士研究生15人,在读博士生和硕士生9人.对数学在生物学中的应用有一定深度的了解和理解,我试图将其贯彻落实在教材的写作中,为此作了一些努力.本书的错误和不足概由作者负责,不当之处在所难免,恳请使用本教材的老师和学生以及其他读者提出批评和修改意见.

本书的出版得到了北京师范大学出版社的大力支持和热情帮助,在此表示衷心的感谢.

本教材可供高等院校生命科学学院/生物系本科生、教育学院生物系、函授(生物专业)和在职中学教师等使用和参考.

李仲来

2006-12

# 第1版编者的话

生物统计实质上就是数理统计的分析方法在处理生物学观测资料上的应用. 随着生物科学的发展, 越来越多的人希望使用统计学方法来处理生物学的观测资料. 经验表明, 生物统计方法正确使用关键之一就在于对所使用方法的统计学原理的理解.

近年来, 编者曾为我校生物系本科生、研究生及数学系开设了生物统计课. 本书就是在该课讲义的基础上修改而成的. 作为生物数学方面的一本参考书提供给读者, 它主要介绍常用的生物统计方法的统计学原理及其应用.

这是一本应用统计的书籍. 除了有关的数学原理之外, 我们将用一定的篇幅来介绍常用的生物统计方法, 如何使用这些方法来分析复杂多变的生物学观测资料以及一些常用的统计计算方法. 至于有关生物学方面的内容, 我们不打算进行深入的讨论, 尽量限于多数人都能了解的常识性的知识.

常用的生物统计方法的数学原理也是本书的重点之一. 为了便于非数学工作者阅读, 在论述过程中, 我们在一定程度上放弃了数学上的严谨性, 略去了推证中较为复杂的证明过程以及牵涉到的较深的数学知识. 凡具有微积分和矩阵代数知识的读者均可阅读本书. 正如前面所述, 生物统计方法的正确使用, 在很大程度上取决于对其统计学原理的理解. 因此, 尽管本书用了一定的篇幅较详细地交代了统计分析的方法, 但仍希望读者在掌握这些方法时不要过分回避有关统计学原理的论述. 对于某些方面希望能更深入了解的读者也会在书末所附的参考文献中找到所需要的材料.

书中所引用的有关生物学的例题和习题多数来自书末所

附的参考文献.在此,对有关作者深表谢意.这些问题在这里仅仅作为使用统计方法进行分析的例子.为了便于理解和叙述,其中的某些作了必要的修改.因此这些例题不一定适于在生物学方面进行深入的讨论.

本书前8章为生物统计的基本内容,可以作为大学数学系或生物系本科生物统计课的教材以及农、林、医药等院校生物统计课的教学参考书,也可供有关生物科学工作者参考.后3章系较进一步的知识和方法,论述也较深入,仅供有兴趣的读者参考.

本书前3章和第11章中序贯抽样一节由程书肖同志编写,其余各章节由刘来福同志编写.全书由程书肖同志校订并对习题做了补充整理.限于编者的水平,书中会有谬误和不妥,恳请读者批评指正.

刘来福 程书肖

1986—08

# 目 录

## 第 1 章 随机事件与概率/1

|                         |    |
|-------------------------|----|
| § 1.1 事件及其运算 .....      | 1  |
| § 1.2 概率及其基本性质 .....    | 7  |
| § 1.3 条件概率与事件的独立性 ..... | 16 |
| § 1.4 全概率公式与逆概率公式 ..... | 20 |
| 习题 1 .....              | 22 |

## 第 2 章 随机变量及其概率分布/24

|                            |    |
|----------------------------|----|
| § 2.1 随机变量 .....           | 24 |
| § 2.2 离散型随机变量与分布列 .....    | 27 |
| § 2.3 连续型随机变量与分布密度 .....   | 33 |
| § 2.4 分布函数与随机变量函数的分布 ..... | 39 |
| § 2.5 随机向量 .....           | 45 |
| 习题 2 .....                 | 59 |

## 第 3 章 随机变量的数字特征/64

|                         |    |
|-------------------------|----|
| § 3.1 数学期望 .....        | 64 |
| § 3.2 方差 .....          | 70 |
| § 3.3 多维随机变量的数字特征 ..... | 75 |
| 习题 3 .....              | 83 |

## 第4章 抽样/86

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| § 4.1 生物统计简史 .....      | 86  |
| § 4.2 总体与样本 .....       | 89  |
| § 4.3 统计量 .....         | 92  |
| § 4.4 大数定律和中心极限定理 ..... | 94  |
| § 4.5 正态分布与生物统计 .....   | 96  |
| § 4.6 数据的分类 .....       | 97  |
| § 4.7 描述统计 .....        | 99  |
| 习题 4 .....              | 110 |

## 第5章 参数估计/112

|                  |     |
|------------------|-----|
| § 5.1 点估计 .....  | 112 |
| § 5.2 抽样分布 ..... | 122 |
| § 5.3 区间估计 ..... | 128 |
| 习题 5 .....       | 136 |

## 第6章 假设检验/138

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| § 6.1 假设检验的基本原理 .....   | 138 |
| § 6.2 一个正态总体的假设检验 ..... | 143 |
| § 6.3 两个正态总体的假设检验 ..... | 147 |
| 习题 6 .....              | 156 |

## 第7章 方差分析/159

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| § 7.1 单因素方差分析 .....           | 160 |
| § 7.2 多因素方差分析 .....           | 177 |
| § 7.3 生物学试验的安排及其结果的方差分析 ..... | 185 |
| § 7.4 数据的转换 .....             | 194 |
| 习题 7 .....                    | 197 |

**第 8 章 回归与相关/200**

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| § 8.1 一元线性回归模型 .....          | 201 |
| § 8.2 可以化为直线的常用一元曲线回归模型 ..... | 215 |
| § 8.3 多元线性回归模型 .....          | 221 |
| 习题 8 .....                    | 226 |

**第 9 章 非参数检验/229**

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| § 9.1 顺序统计量 .....            | 229 |
| § 9.2 符号检验 .....             | 231 |
| § 9.3 两个独立样本的游程检验与秩和检验 ..... | 234 |
| § 9.4 两个相关样本的符号秩和检验 .....    | 240 |
| § 9.5 多个独立样本的秩和检验 .....      | 242 |
| § 9.6 多个相关样本的秩和检验 .....      | 245 |
| § 9.7 秩相关系数 .....            | 247 |
| § 9.8 分布的拟合检验 .....          | 250 |
| § 9.9 列联表的独立性检验 .....        | 257 |
| § 9.10 配对四格列联表的检验 .....      | 263 |
| § 9.11 种间关联系数与优势比 .....      | 265 |
| 习题 9 .....                   | 268 |

**附表/272**

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 附表 1 正态分布表 .....                   | 272 |
| 附表 2 $\chi^2_\alpha(n)$ 值表 .....   | 277 |
| 附表 3 $t_\alpha(n)$ 值表 .....        | 278 |
| 附表 4 $F$ 分布值 $F(n_1, n_2)$ 表 ..... | 279 |
| 附表 5 5% 和 1% SSR 值表 .....          | 282 |
| 附表 6 检验平均数差数的 $q$ 值表(1) .....      | 284 |
| 附表 6 检验平均数差数的 $q$ 值表(2) .....      | 286 |
| 附表 7 相关系数的 $r_\alpha$ 值表 .....     | 288 |
| 附表 8 二项分布累积概率表 .....               | 289 |

|       |                   |     |
|-------|-------------------|-----|
| 附表 9  | 游程总数检验表(1)        | 291 |
| 附表 9  | 游程总数检验表(2)        | 291 |
| 附表 10 | 两个独立样本的秩和检验表      | 293 |
| 附表 11 | 两个相关样本的秩和检验表      | 293 |
| 附表 12 | 3 个独立样本的秩和检验表     | 294 |
| 附表 13 | 3~4 个相关样本的秩和检验表   | 295 |
| 附表 14 | Spearman 秩相关系数检验表 | 296 |

## 主要参考文献/299

## 索引/300