



STATISTICAL ECOLOGY

统计生态学

覃 林 编著



中国林业出版社

内容提要

本教材以生态学的种群动态、种群分布格局、物种多样性、物种生态位与种间关系、群落复杂性、群落排序和景观异质性问题为主线,结合最新研究成果,通过虚拟示例及研究实例,比较全面地介绍数理统计、时间序列分析、多元分析和地统计学的原理与方法在生态学上的应用。

本教材可作为林学、生态学、环境科学及地理学专业本科或研究生教材,还可作为生物科学、环境保护、自然保护区管理等方面科学研究、教学、管理和生产实践人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

统计生态学/覃林编著. —北京:中国林业出版社, 2009. 10

ISBN 978-7-5038-5722-5

I. 统… II. 覃… III. 生态学:统计学-教材 IV. Q14-05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 183364 号

中国林业出版社·教材建设与出版管理中心

责任编辑:肖基洪

电话:83220109 83282720

传真:83220109

出版发行 中国林业出版社(100009 北京市西城区德内大街刘海胡同7号)

E-mail:jiaocaipublic@163.com 电话:(010)83224477

网 址:www.cfph.com.cn

经 销 新华书店
印 刷 中国农业出版社印刷厂
版 次 2009年10月第1版
印 次 2009年10月第1次
开 本 850mm×1168mm 1/16
印 张 14.75
字 数 338千字
定 价 24.00元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有 侵权必究

前 言

生态学是一门强调异质性和不确定性的学科,因此,统计学在生态学中占有重要地位。统计生态学可理解为运用统计学原理、方法和现代计算机技术来分析、处理观测的生态数据信息,寻求生态学一般规律的学科。它是目前数学领域涉及生态学研究方面的主要内容之一。

统计生态学作为生态学的分支学科,其在生态学的研究中居于主导地位,这在很大程度上是由于生态学的复杂性和人们对生态学的认识程度决定的。但是,有关统计生态学的研究内容则多出现于数学生态方面的著作中,比如, Pielou (1977) 的 *Mathematical Ecology*, 阳含熙和卢泽愚 (1981) 的《植物生态学数量分类方法》, Gauch (1982) 的 *Multivariate Analysis in Community Ecology*, Greig - Smith (1983) 的 *Quantitative Plant Ecology* (3rd ed), Jongman et al. (1987) 的 *Data Analysis in Community and Landscape Ecology*, 余世孝 (1995) 的《数学生态学导论》, 张金屯 (1995) 的《植被数量生态学方法》, 张金屯 (2004) 的《数量生态学》等。以统计生态学命名的书籍则不多, 国外主要有 Ludwig & Reynolds (1988) 的 *Statistical Ecology: A Primer on Methods and Computing*, Waite (2000) 的 *Statistical Ecology: A Guide to Analysing Environmental and Ecological Field Data*, 而国内目前还没有。

统计生态学的内容十分丰富。本书主要以生态学的种群动态、种群分布格局、物种多样性、物种生态位与种间关系、群落复杂性、群落数量分类、群落排序和景观空间异质性等科学问题为主线, 结合最新的研究成果, 通过虚拟示例或研究实例, 比较全面地介绍了数理统计、时间序列分析、多元分析和地统计学的原理与方法在生态学上的应用, 同时对涉及的相关知识以课后阅读材料形式说明, 属于内容上的扩充。因此, 本书可供生态学、林学、环境科学和地理学等学科领域的研究和教学人员参考, 也可作为高年级大学生和研究生选修课的教材或参考书。

统计生态学是一门发展中的学科, 对学科的定义和内涵还有待讨论与统一。本书在编写过程中, 主要参阅了《数学生态学导论》(余世孝, 1995)、《数量生态学》(张金屯, 2004)、*Statistical Ecology: A Guide to Analysing Environmental and Ecological Field Data* (Waite, 2000) 和《地统计学及其在生态学中的应用》(王政权, 1999) 等专著, 引用的国内外文献已在书中注明, 在此特向相关作者致以诚挚的谢意。同时, 本书的顺利出版得到了广西大学生态学博士点建设项目的经费资助, 在此表示衷心的感谢。

由于笔者的学识所限, 书中难免有疏漏与错误之处, 敬请专家、读者批评指正。

章 林

2008 年 11 月

目 录

前 言

第1章 统计生态学基础	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 取样方法	(1)
1.2.1 样方法	(1)
1.2.2 标志重捕法	(4)
1.2.3 去除取样法	(6)
1.3 数据	(7)
1.3.1 数据的基本类型	(7)
1.3.2 数据类型的转化	(8)
1.3.3 数据的处理	(9)
1.3.4 生态数据	(12)
1.4 矩阵运算	(13)
1.4.1 矩阵概念	(13)
1.4.2 矩阵简单运算	(14)
1.4.3 方阵求逆	(15)
1.4.4 矩阵的特征根及特征向量	(17)
小结	(18)
思考题	(18)
第2章 种群动态	(21)
2.1 引言	(21)
2.2 种群增长的理论模型	(21)
2.2.1 种群增长的确定性模型	(21)
2.2.2 种群增长的随机模型	(25)
2.2.3 种群增长的矩阵模型	(27)
2.3 生命表	(28)
2.3.1 生命表的编制	(28)
2.3.2 生命表结构分析	(29)
2.3.3 生存分析	(31)
2.4 种群动态的时间序列分析	(33)
2.4.1 时间序列分析的含义	(33)

2.4.2 时间序列分析方法	(33)
小结	(37)
思考题	(37)
 第3章 种群分布格局	(42)
3.1 引言	(42)
3.2 种群分布格局类型	(43)
3.2.1 样地法	(43)
3.2.2 距离法	(47)
3.3 种群格局分析	(54)
3.3.1 取样方法	(54)
3.3.2 格局规模分析	(55)
3.3.3 格局强度分析	(58)
3.3.4 格局纹理分析	(59)
小结	(60)
思考题	(60)
 第4章 物种多样性.....	(61)
4.1 引言	(61)
4.2 α 多样性的含义和测度	(61)
4.2.1 α 多样性的含义	(61)
4.2.2 物种丰富度的测度	(62)
4.2.3 物种多度分布模型	(63)
4.2.4 物种多样性指数	(72)
4.3 β 多样性的含义和测度	(75)
4.3.1 β 多样性的含义	(75)
4.3.2 β 多样性的测度	(75)
小结	(78)
思考题	(79)
 第5章 物种生态位与种间关系	(81)
5.1 引言	(81)
5.2 群落优势种	(81)
5.2.1 优势种的含义	(81)
5.2.2 优势种的测度	(82)
5.3 物种生态位	(84)
5.3.1 生态位的含义	(84)
5.3.2 物种生态位宽度	(85)

5.3.3 物种生态位重叠	(88)
5.3.4 物种生态位分离	(91)
5.4 种间关系	(91)
5.4.1 种间关联	(91)
5.4.2 种间相关	(94)
5.4.3 种间分离	(96)
小结	(97)
思考题	(97)
第6章 群落复杂性	(98)
6.1 引言	(98)
6.2 复杂性的含义与测度	(98)
6.2.1 复杂性的含义	(98)
6.2.2 复杂性的测度	(99)
6.3 群落复杂性的测度	(102)
6.3.1 基于信息熵的测度	(102)
6.3.2 基于本质多样性的测度	(103)
6.3.3 基于最小剩余熵的测度	(105)
6.3.4 基于联合熵的测度	(106)
小结	(109)
思考题	(109)
第7章 群落数量分类	(112)
7.1 引言	(112)
7.2 相似性测定	(112)
7.2.1 关联系数	(113)
7.2.2 内积系数	(114)
7.2.3 距离系数	(116)
7.2.4 信息系数	(117)
7.2.5 概率系数	(117)
7.3 数量分类方法	(119)
7.3.1 等级聚类分析	(119)
7.3.2 等级分划法	(133)
7.3.3 非等级分类方法	(142)
小结	(145)
思考题	(145)

第8章 群落排序	(150)
8.1 引言	(150)
8.2 间接排序方法	(151)
8.2.1 主分量分析	(151)
8.2.2 因子分析	(155)
8.2.3 对应分析	(160)
8.2.4 除趋势对应分析	(165)
8.3 直接排序方法	(167)
8.3.1 典范主分量分析	(167)
8.3.2 典范对应分析	(170)
8.3.3 除趋势典范对应分析	(173)
8.3.4 典范相关分析	(175)
小结	(178)
思考题	(178)
第9章 景观空间异质性	(181)
9.1 引言	(181)
9.2 景观空间异质性的有关概念	(181)
9.2.1 景观	(181)
9.2.2 景观空间异质性	(182)
9.3 地统计学的基本理论和方法	(183)
9.3.1 地统计学的含义	(183)
9.3.2 区域化变量	(183)
9.3.3 变异函数	(185)
9.3.4 空间局部插值	(195)
小结	(201)
思考题	(201)
参考文献	(205)
附表1 t 分布的双侧分位数表	(217)
附表2 χ^2 分布的上侧分位数表	(218)
附表3 F 检验的临界值表	(220)
附表4 秩相关的 Spearman 检验临界值表	(222)

CONTENTS

Preface

Chapter 1 Basic knowledge in statistical ecology	(1)
1.1 Introduction	(1)
1.2 Sampling methods	(1)
1.2.1 Quadrat methods	(1)
1.2.2 Mark-recapture method	(4)
1.2.3 Removal trapping method	(6)
1.3 Data	(7)
1.3.1 General types of data	(7)
1.3.2 Data exchange	(8)
1.3.3 Data handling	(9)
1.3.4 Ecological data	(12)
1.4 Matrix operating	(13)
1.4.1 Concept of matrix	(13)
1.4.2 Brief operation of matrix	(14)
1.4.3 Inverse matrix	(15)
1.4.4 Eigenvalue and eigenvector of matrix	(17)
<i>Summary</i>	(18)
<i>Review questions</i>	(18)
 Chapter 2 Population dynamic	(21)
2.1 Introduction	(21)
2.2 Theoretical models of population growth	(21)
2.2.1 Certain models of population growth	(21)
2.2.2 Random model of population growth	(25)
2.2.3 Matrix models of population growth	(27)
2.3 Life table	(28)
2.3.1 Compile life table	(28)
2.3.2 Life table construction analysis	(29)
2.3.3 Survival analysis	(31)
2.4 Time serise analysis of population dynamics	(33)
2.4.1 Implication of time serise analysis	(33)

2.4.2	Methods of time series analysis	(33)
<i>Summary</i>		(37)
<i>Review questions</i>		(37)
Chapter 3	Population distribution pattern	(42)
3.1	Introduction	(42)
3.2	Types of population distribution pattern	(43)
3.2.1	Plot sampling methods	(43)
3.2.2	Distance sampling methods	(47)
3.3	Population pattern analysis	(54)
3.3.1	Sampling methods	(54)
3.3.2	Pattern scale analysis	(55)
3.3.3	Pattern intensity analysis	(58)
3.3.4	Pattern grain analysis	(59)
<i>Summary</i>		(60)
<i>Review questions</i>		(60)
Chapter 4	Species diversity	(61)
4.1	Introduction	(61)
4.2	Implication of α -diversity and its measure	(61)
4.2.1	Implication of α -diversity	(61)
4.2.2	Measures of species richness	(62)
4.2.3	Models of species abundance distribution	(63)
4.2.4	Species diversity indices	(72)
4.3	Implication of β -diversity and its measure	(75)
4.3.1	Implication of β -diversity	(75)
4.3.2	Measures of β -diversity	(75)
<i>Summary</i>		(78)
<i>Review questions</i>		(79)
Chapter 5	Species niche and interspecific relationship	(81)
5.1	Introduction	(81)
5.2	Dominant species	(81)
5.2.1	Implication of dominant species	(81)
5.2.2	Measures of dominant species	(82)
5.3	Species niche	(84)
5.3.1	Implication of niche	(84)
5.3.2	Species niche breadth	(85)

5.3.3	Species niche overlap	(88)
5.3.4	Species niche separation	(91)
5.4	Interspecific relationship	(91)
5.4.1	Interspecific association	(91)
5.4.2	Interspecific correlation	(94)
5.4.3	Species separation	(96)
	<i>Summary</i>	(97)
	<i>Review questions</i>	(97)
Chapter 6	Community complexity	(98)
6.1	Introduction	(98)
6.2	Implication of complexity and its measure	(98)
6.2.1	Implication of complexity	(98)
6.2.2	Measures of complexity	(99)
6.3	Measures of community complexity	(102)
6.3.1	Based on information entropy	(102)
6.3.2	Based on intrinsic diversity	(103)
6.3.3	Based on parsimonious code	(105)
6.3.4	Based on the joint entropy	(106)
	<i>Summary</i>	(109)
	<i>Review questions</i>	(109)
Chapter 7	Community numerical classification	(112)
7.1	Introduction	(112)
7.2	Measures of resemblance	(112)
7.2.1	Association coefficient	(113)
7.2.2	Inner product coefficient	(114)
7.2.3	Distance coefficient	(116)
7.2.4	Information coefficient	(117)
7.2.5	Probability coefficient	(117)
7.3	Numerical Classification methods	(119)
7.3.1	Hierarchical cluster analysis	(119)
7.3.2	Hierarchical divisive methods	(133)
7.3.3	Non-hierarchical clustering methods	(142)
	<i>Summary</i>	(145)
	<i>Review questions</i>	(145)

Chapter 8 Community ordination	(150)
8.1 Introduction	(150)
8.2 Indirect ordination methods	(151)
8.2.1 Principal component analysis	(151)
8.2.2 Factor analysis	(155)
8.2.3 Correspondence analysis	(160)
8.2.4 Detrended correspondence analysis	(165)
8.3 Direct Ordination methods	(167)
8.3.1 Canonical principal component analysis	(167)
8.3.2 Canonical correspondence analysis	(170)
8.3.3 Detrended canonical correspondence analysis	(173)
8.3.4 Canonical correlation analysis	(175)
Summary	(178)
Review questions	(178)
Chapter 9 Landscape spatial heterogeneity	(181)
9.1 Introduction	(181)
9.2 Concepts of landscape spatial heterogeneity	(181)
9.2.1 Landscape	(181)
9.2.2 Landscape spatial heterogeneity	(182)
9.3 Fundamental theories and methods of geostatistics	(183)
9.3.1 Implication of geostatistics	(183)
9.3.2 Regionalized variable	(183)
9.3.3 Semivariogram	(185)
9.3.4 Kriging methods	(195)
Summary	(201)
Review questions	(201)
References	(205)
Appendix Table 1 Critical values for the t-distribution in two-sided tests	(217)
Appendix Table 2 Critical values for the chi-squared distribution in upper-sided Test	(218)
Appendix Table 3 Critical values for the F-test	(220)
Appendix Table 4 Critical values for spearman test of rank correlation coefficient	(222)

第 1 章

统计生态学基础

1.1 引言

统计生态学的分析方法都是从一组观测数据出发,经过分析、运算,找出数据中隐藏的规律。因此,统计分析的首要任务是获得所需的数据。在此基础上,还应对观测数据的类型和特点有所了解,适当进行一些处理也是必要的。

生态数据(ecological data)以反映生态信息的属性为测量指标而测得的数据(张金屯, 2004)。在生物群落研究中的数据收集过程叫做取样(sampling)。由于受人力、物力和时间的限制,在大多数情况下,研究者都不可能对所研究地区(或范围)的生物群落进行全部的研究,而只能抽取其中的一部分来研究分析,抽取的部分叫做取样单位(sampling unit)。取样方法可分为样方法(quadrat method)、标志重捕法(mark-recapture method)和去除取样法(removal trapping method)。样方法主要用于植物群落调查,根据形状的不同,分别有样方(quadrat)、样圆(sampling circle)、样点(sampling point)、样条(narrow transect)和样带(transect)等;标志重捕法和去除取样法,主要用于动物种群的调查。同时,在取样过程中,研究者要记录一系列反映群落(或种群)属性的数量指标,这一过程叫做观测,是生态学调查工作的主要内容。

生态数据的统计分析需要运用数理统计、多元统计以及地统计的相关方法,而矩阵的基本知识是理解这些方法的必备基础。

1.2 取样方法

1.2.1 样方法

(1) 取样单位的形状

植物群落学中的取样单位有多种形式,但最常用的是样方,一是由于方形易于应用;二是从统计学角度讲,方形的边与面积的比较小,因而边际影响的误差小。圆的周长与面积比更小,但是应用圆形必须使用特制的样圆,在森林和灌丛研究中应用困难,一般用于草本群落。

(2) 取样单位的大小

从统计学上讲,使用面积小数目多或面积大数目少的样方可以达到同样的精确度,

但样方小, 取样工作量增加, 计算也麻烦, 同时许多样方的观测值可能很接近, 给统计分析带来一定困难。所以, 一般采用群落的最小取样面积(minimum sample area)作为样方的大小。群落最小取样面积定义为群落中大多数种类都能出现的最小样方面积, 通常用种数—面积曲线(species-area curve)来确定, 即该曲线的转折点所对应的样方面积; 也可采用优势种的重要值—面积曲线法(王伯荪等, 1982)来确定。因此, 不同的植物群落类型, 有不同的最小取样面积, 如低矮草本群落用 0.25m^2 的样方, 高草本群落或低灌丛群落用 $1\sim4\text{m}^2$ 的样方, 高灌丛群落用 $4\sim25\text{m}^2$ 的样方, 温带森林用 $200\sim500\text{m}^2$ 的样方, 热带雨林用 $500\sim4\,000\text{m}^2$ 的样方。

(3) 样方的数目

样方大小确定后, 就要考虑样方的数目。理论上讲, 样方数目越多越好, 但样方太多, 费时费工; 样方太少, 可能代表性较差, 会导致错误的研究结果, 因此, 一般会选用一定方法来确定适当的样方数目。

① 样方成效曲线法 由统计学知识可知, 每个样方观测值(如物种数或个体数)的平均数是随样方数目变化而变化的, 当样方数较少时, 平均数变化幅度较大, 随着样方数目的增加, 平均数的变化幅度逐渐减小, 当达到某一样方数目时, 平均数的变化趋于稳定, 此时的样方数目即为所需的样方数。这种样方数与观测值平均数的关系用曲线表示即为样方成效曲线(sample effort curve)(图 1-1)。从图 1-1 可知, 样方数为 8 时, 观测值平均数基本稳定, 因此应该取 8 个样方。

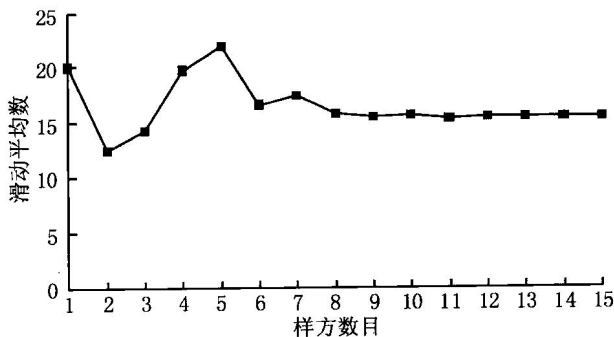


图 1-1 样方成效曲线

② 方差法 方差法是根据所研究的总体方差来决定取样数目, 一般方差大, 取样数目就要多; 若方差小, 取样数目则可少。在随机分布的情况下, 取样数目 n 与总体方差 σ^2 的关系为

$$n = \frac{t^2 \sigma^2}{E^2} \quad (1-1)$$

式中: t 为显著性水平值, 如在 95% 置信区间 $t = 1.96$; E 为研究允许误差, 为已知数。

方差法要求取样数目不少于 30 (Wratten *et al.*, 1980), 总体方差可以用前 30 个样方来估计。

③ 面积比法 面积比法是在知道研究地域总面积的情况下, 事先决定要选择研究面积的百分之几作为样地, 因此, 在样方大小已经确定的情形下, 样方数目就可计算出

来。例如,研究地域面积为 $10\,000\text{m}^2$,样方大小为 $5\text{m} \times 5\text{m}$,要求抽取研究面积的 5% 作为样地,即样方总面积应为 500m^2 ,则样方数为 $500/25 = 20$ (个)。

总之,上述 3 种方法一般认为是决定样方数目的客观方法,样方成效曲线法和方差法由于基于随机分布假设之上,在实际应用中也有不少困难,研究中应用得较少。面积比法对研究者有重要参考价值,但实际工作中也很少有人完全用此法决定样方数。在决定样方数时,研究者的经验往往起着重要作用(张金屯,2004)。

(4) 取样策略

① 主观取样 样方的选择是凭主观判断的,使它能够代表所研究的生物群落。该方法迅速、简便,在植物群落研究中曾广泛使用,对有经验的研究者能够取得较好的结果。缺点是由于它是非统计学方法,不能进行显著性检验,因而受到统计学者的质疑。

② 随机取样 随机取样(random sampling)的样方设置是随机的。理论上讲,随机取样是“理想”的方法,但是要真正做到“随机”,困难较大,因为在实际研究中往往难以确切地设置样方位置,尤其是在地形复杂、沟壑交错、裸岩纵横的地方更是如此,所以说随机取样真正达到随机的是很少的。但是,随机取样的样方可以用于统计分析,从而检验样方的分布是否真正是随机的。

③ 系统取样 系统取样(systematic sampling)是根据某一规则系统地设置样方,也叫规则取样(regular sampling)。系统取样的规则由研究者自行选择,主要根据所研究的植被类型及其分布特点和变异程度等来判断。例如,随机地选择第一个样方后,可以向两个方向规则地设置其他样方,也可以同时向 4 个方向规则地设置其他样方。在大多数情况下,系统取样是先用地形等因素确定第一个样方位置,如第一个样方设在山麓,然后从山麓到山顶每隔 100m 设置其他样方。系统取样效果的好坏不能客观评价,只能凭经验判断,其数据不能进行统计分析。

④ 分层取样 分层取样(stratified sampling)是将研究地域按自然的界线或生态学的标准分成一些小的地段,然后在小地段内进行随机或规则取样。例如,在草地和灌丛分布的地段,可以用群落的界线为依据划分小地段;森林群落的乔木层和草本层可以分开,用不同的取样方法。分层取样简便易做,也是应用最多的方法。缺点是小地段的大小一般是很难知道的、不等的,所以难以进行统计分析。

⑤ 集群取样 集群取样(cluster sampling)是一种二水平取样,即首先随机选取样点,然后在每一样点取一些样方(而不是一个样方),这在特殊调查中更有效。例如,假定一位调查者在一块面积大约为 $30\text{km} \times 50\text{km}$ 的森林中用 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 的样方计数蕨类植物,因为森林面积大,需要较长时间走到随机设置的样方地点,但在每一样方中计数蕨类植物所需的时间较短。如果在每一样点取一些样方,如计数一个 $40\text{m} \times 40\text{m}$ 的网格中的每一个 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 样方,这样工作效率可能更高。集群取样可有多种设计方案,根据所研究对象的不同而有差异(图 1-2)。

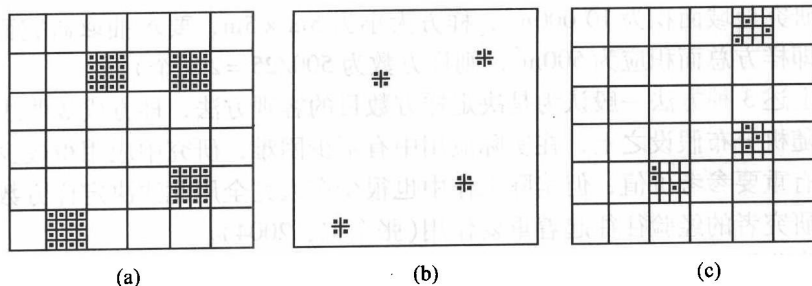


图 1-2 集群取样(仿自 Waite, 2000)

(a) 集群面积(大方框)是随机选取而所有取样单位(小方框)在集群内抽取 (b) 样点(+)是随机选取而样方(·)在样点按固定格局抽取 (c) 主要单位(大方框)是随机选取而次要单位(小方框)是在主要单位内随机抽取

1.2.2 标志重捕法

(1) 标志重捕的基本原理

在调查地段中, 捕获某动物种群的一部分个体进行标志, 然后放回, 经过一定时间后进行重捕; 根据重捕个体中标志个体的比例, 估计该地段中种群个体的总数。若将种群个体总数记作 N , 其中标志数(即重捕前标志放回的个体数)为 M , 重捕个体数为 n , 重捕中标志个体数为 m , 假定总数中标志个体的比例与重捕取样中标志个体的比例相同, 即 $N : M = n : m$ 。则, 种群总数的估计值 $\hat{N}$ 为

$$\hat{N} = \frac{Mn}{m}$$

显然, 标志重捕法的关键是要保证总数中标志个体的比例与重捕取样中标志个体的比例相同, 任何影响该比例的因素都会影响到估计的结果。因此, 应用时应作如下假设:

- ① 标志个体在整个调查种群中均匀分布, 标志个体和未标志个体都有同样的被捕机会;
- ② 调查期间, 没有迁入或迁出;
- ③ 调查期间, 没有新的出生或死亡。

(2) 标志重捕的方法

标志重捕的方法很多, 主要包括: 一次标志一次重捕法, 又称林可指数法(Lincoln index method); 一次标志多次重捕法, 如施夸贝尔法(Schnabel method); 以及多次标志多次重捕法, 如乔利—西贝尔法(Jolly-Seber method)。若一次标志重捕可获得足够的个体数, 则可采用林可指数法; 若一次标志重捕不能获得足够的个体数, 利用林可指数法获得的种群数量估计值往往不够准确, 则可采用施夸贝尔法或乔利—西贝尔法。这里主要介绍林可指数法和施夸贝尔法, 乔利—西贝尔法参见文献(付荣恕和刘林德, 2004)。

- ① 林可指数法 适用于一次标志一次重捕的调查。种群总数估计值为

$$\hat{N} = \frac{Mn}{m} \quad (1-2)$$

种群总数的 95% 置信区间为

$$\hat{N} \pm 2SE \quad (1-3)$$

其中, SE 是标准误, 计算公式为

$$SE = \hat{N} \sqrt{\frac{(\hat{N} - M)(\hat{N} - n)}{Mn(\hat{N} - 1)}}$$

【例 1-1】在一次赤拟谷盗 (*Tribolium castaneum*) 种群数量调查中, 第一次捕捉了 80 头, 标志后放回; 第二次捕捉了 60 头, 其中标志个体为 20 头。问该赤拟谷盗种群数量的估计值是多少? 其 95% 的置信区间是多少?

已知: $M = 80$, $n = 60$, $m = 20$, 则种群总数估计值为

$$\hat{N} = \frac{Mn}{m} = \frac{80 \times 60}{20} = 240 (\text{头})$$

估计值的标准误为

$$SE = \hat{N} \sqrt{\frac{(\hat{N} - M)(\hat{N} - n)}{Mn(\hat{N} - 1)}} = 240 \times \sqrt{\frac{(240 - 80)(240 - 60)}{80 \times 60 \times (240 - 1)}} = 240 \times 0.025 = 6$$

种群总数的 95% 的置信区间为

$$\hat{N} \pm 2SE = 240 \pm 2 \times 6, \text{ 即 } [228, 252]。$$

② 施夸贝尔法 该方法要求在每一次取样中, 检查捕获动物的标志情况, 然后再标志, 再放回。通过多次的标志重捕, 就可以得到如下数据:

S = 取样总数;

n_i = 在第 i ($i = 1, 2, \dots, S$) 次取样时, 捕获动物的数量;

m_i = 在第 i 次取样的捕获动物中, 已标志动物的数量;

$u_i = n_i - m_i$, 在第 i 次取样的捕获动物中, 新标志并放回动物的数量;

$M_i = \sum_{j=1}^{i-1} u_j$, 在第 i 次取样时, 种群中已标志动物数量。

于是, 种群总数估计值为

$$\hat{N} = \frac{\sum_{i=1}^S n_i M_i^2}{\sum_{i=1}^S m_i M_i} \quad (1-4)$$

种群总数的 95% 的置信区间为

$$\frac{\sum_{i=1}^S n_i M_i^2}{\sum_{i=1}^S m_i M_i} \pm t_{0.05}(S-2) \sqrt{\frac{[(\sum_{i=1}^S n_i M_i^2)(\sum_{i=1}^S m_i^2/n) - (\sum_{i=1}^S m_i M_i)^2]/(S-2)}{(\sum_{i=1}^S m_i M_i)^2}} \quad (1-5)$$

【例 1-2】Gerking 于 1953 年在印第安纳的 Gordy 湖用多次标志重捕方法, 调查了小脊鳞太阳鱼 (*Lepomis microlophus*) 的种群大小, 结果见表 1-1。