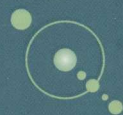


“十二五”国家重点图书出版规划项目



现代生态学前沿

# 陆地生态学研究方法

## Ecological Methods for Terrestrial Ecosystems

主编 陈吉泉 阳树英



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS

“十二五”国家重点图书出版规划项目

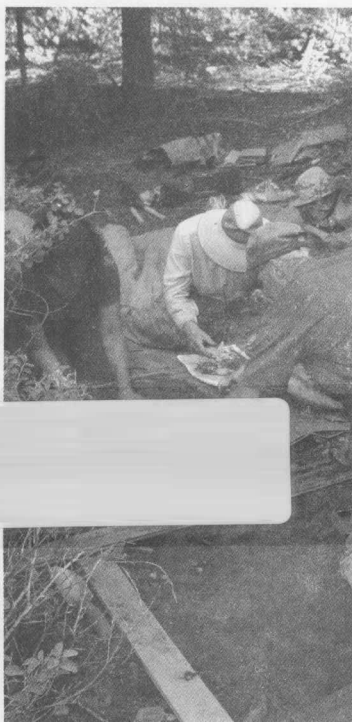
P9  
39

# 陆地生态学研究方法

## Ecological Methods for Terrestrial Ecosystems

主编 陈吉泉 阳树英

LUDI SHENGTAIXUE YANJIU FANGFA



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容简介

本书集 50 余名活跃生态学者的不懈努力, 30 余名同仁审阅, 经两年有余而成书。本书是近 20 年来更新生态学研究方法的首篇, 不仅依照陆地生态系统主要类型分别提供目前被广泛应用的主要科研方法, 各章节附有实例为读者提供参考, 而且引入许多近年开始试用的高新技术和方法, 不乏国际前沿技术、仪器使用指南、分析方法以及相关文献。部分章节已延伸至与生态学交叉的相关领域, 如全球气候变化、社会 - 经济与生态的关联、城市生态研究方法、整合分析和基因分析等在常规方法论著中较少涉及的内容, 有助于跨学科研究。本书对生态、农学、林学和环境等相关学科本科生和研究生教学, 对开展陆地生态系统研究和资源普查等具有实践指导作用。

## 图书在版编目(CIP)数据

陆地生态学研究方法/陈景阳, 陈景阳, 陈景阳编. —北京: 高等教育出版社, 2014.

ISBN 978 - 7 - 04 - 037460 - 5

I. ①陆… II. ①陈… ②阳… ③阳… III. ①陆地生态系统 - 研究方法 IV. ①P9 - 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 107457 号

策划编辑 关 焱

责任编辑 关 焱 柳丽丽

封面设计 姜 磊

版式设计 余 杨

插图绘制 尹 莉

责任校对 杨雪莲

责任印制 赵义民

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  
印 刷 大厂益利印刷有限公司  
开 本 787mm × 1092mm 1/16  
印 张 23.75  
字 数 550 千字  
购书热线 010 - 58581118

咨询电话 400 - 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>  
版 次 2014 年 1 月第 1 版  
印 次 2014 年 1 月第 1 次印刷  
定 价 69.00 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 37460 - 00

# 前 言

科研方法是任何一门学科中不可缺少的内容,也往往是限制该学科发展的主要因素。近30年间,以信息技术领军的各种工艺和技术获得了空前的发展和应用,极大地带动了其他学科的发展。与此同时,各分支学科相互渗透,方法互相交融,向人类提出了新的挑战,也为科研人员提供了新的发展空间。以生态学为例,我们已经很难划定其严格的边界,日常所用方法,几无定数。纵观海内外生态学文库,致力于方法的论著相对较少,而且多数过时,远远不能满足教学和科研的需求,迫使各高校、研究所开发适合于自身的教学材料而应急,严重影响了学生对生态学研究方法的综合了解,进而限制他们的长远发展。

20世纪90年代初期,多位学术同行就提出联合撰写一本适合中国本科、研究生教育的生态学研究方法教科书。在2004年首届复旦大学夏季生态学高级讲学班授课期间,高等教育出版社的李冰祥博士等又提及这一需求,但苦于时间和精力之限,未能致力于此。2010年初,湖南农业大学阳树英博士重提此议题,阐述国内科研与教学对此书的需求,并愿意付出时间和精力,邀请同仁参加写作,以促成此书。在随后几周的可行性调查中,诸多同仁也有同感,并慷慨参加写作,激励完成此书,为生态学发展,稍尽绵力。此后高等教育出版社对我所提出申请又予以及时、正面答复。我们在2011年初组团,深秋初审,在百忙之中完成此书。在此,对51名作者和35名审稿专家的努力不胜感激,感谢你们的信任和支持,也代读者向你们致敬。参加审核的专家们包括(按姓氏笔画排序)丁圣彦、马克平、马思延、王岩、代力民、刘玲莉、闫云君、江明喜、江智民、安树青、李凤民、李俊祥、李健伟、杨瑞珍、吴伟光、吴纪华、何方良、辛晓平、张娜、范蓓蕾、赵斌、郝新梅、贺红仕、骆世明、徐庆、郭大力、梁乃申、董刚、董全、韩国栋、惠大丰、傅声雷、曾辉、谢惠莲和蔡庆华。

如前所述,当今生态学范畴非常宽广,内容浩瀚。通过一本论著来囊括所有的方法,已不可能。起初,我们试图包括陆地、海洋等生态系统,后来受限于时间、作者专长等改为陆地生态系统。尽管如此,该书仍然遗漏了几个主要方法(如遥感、模拟等)。其内容和质量距离完美还有很大的差距;各章之间有些内容重复等,错误在所难免,欢迎读者不吝指正,将你们的意见反馈给我或高等教育出版社,为本书再版或出版其他相关新书时有所准备。最后,感谢王旭博士为初稿进行整体排版,李冰祥博士自始至终的支持,关焱编辑不厌其烦的指点。没有她们的努力,此书难成。

陈吉泉

南京信息工程大学生态气象环境研究中心

2013年4月

# 目 录

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第1章 生物多样性测定方法             | 1  |
| 引言                        | 1  |
| 1.1 生物多样性编目和监测            | 2  |
| 1.1.1 生物多样性编目和监测的目的       | 2  |
| 1.1.2 编目和监测的原则            | 3  |
| 1.1.3 编目和监测的步骤            | 4  |
| 1.1.4 物种多样性编目和监测          | 4  |
| 1.1.5 遗传多样性编目和监测          | 6  |
| 1.1.6 生态系统多样性编目和监测        | 6  |
| 1.1.7 “3S”技术在编目和监测中的应用    | 9  |
| 1.2 物种多样性研究方法             | 10 |
| 1.2.1 $\alpha$ 多样性测度方法    | 10 |
| 1.2.2 $\beta$ 多样性测度方法     | 13 |
| 1.2.3 $\gamma$ 多样性测度方法    | 15 |
| 1.2.4 植物群落物种多样性指数的测定方法    | 16 |
| 1.2.5 多样性测度的时间与空间尺度问题     | 16 |
| 1.3 遗传多样性研究方法             | 17 |
| 1.3.1 形态学标记               | 18 |
| 1.3.2 细胞学标记               | 19 |
| 1.3.3 生化标记                | 19 |
| 1.3.4 分子生物学标记方法           | 19 |
| 1.3.5 检测遗传多样性的表型分析        | 22 |
| 1.3.6 分子水平上遗传多样性的测度指标     | 23 |
| 1.4 生态系统多样性研究方法           | 25 |
| 1.5 景观多样性                 | 28 |
| 1.6 综合实习——植物种群、群落及生物多样性调查 | 28 |

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 参考文献                     | 35 |
| 第2章 分子生态学研究方法            | 41 |
| 引言                       | 41 |
| 2.1 DNA标记法在种群生态学中的应用     | 42 |
| 2.1.1 AFLP分析             | 42 |
| 2.1.2 RFLP分析             | 45 |
| 2.1.3 SSR分析              | 47 |
| 2.2 DNA标记法在性别鉴定中的应用      | 49 |
| 2.2.1 RAPD植物性别的分子鉴定      | 49 |
| 2.2.2 动物性别的分子鉴定          | 51 |
| 2.3 DNA标记法在植物杂交鉴定中的应用    | 53 |
| 2.3.1 SRAP技术鉴定植物杂交       | 53 |
| 2.3.2 ISSR技术鉴定植物杂交       | 54 |
| 2.4 DNA条形码技术在个体分子鉴定中的应用  | 56 |
| 2.5 分子生物学技术在生物系统进化研究中的应用 | 58 |
| 2.6 蛋白质组学技术在分子生态学研究中的应用  | 63 |
| 2.6.1 蛋白质的分离             | 64 |
| 2.6.2 利用生物质谱鉴定蛋白质        | 66 |
| 参考文献                     | 71 |
| 第3章 气体通量测定               | 74 |
| 引言                       | 74 |
| 3.1 叶片-大气界面气体通量测定        | 75 |
| 3.1.1 研究目的               | 75 |
| 3.1.2 测量原理               | 75 |

|                                           |     |                                         |     |
|-------------------------------------------|-----|-----------------------------------------|-----|
| 3.1.3 测量系统组成 .....                        | 77  | 4.5.2 微生物呼吸 .....                       | 118 |
| 3.2 生态系统-大气界面气体<br>通量测定 .....             | 79  | 4.6 土壤动物调查方法 .....                      | 119 |
| 3.2.1 研究目的 .....                          | 79  | 4.6.1 土壤动物的定义 .....                     | 119 |
| 3.2.2 测量原理 .....                          | 81  | 4.6.2 土壤动物取样方法 .....                    | 119 |
| 3.2.3 测量系统组成 .....                        | 81  | 4.6.3 土壤动物标本提取设备 .....                  | 120 |
| 3.2.4 通量数据处理 .....                        | 87  | 4.6.4 标本的固定、保存和鉴定 .....                 | 120 |
| 3.3 稳定同位素技术在气体通量<br>测量中的应用 .....          | 90  | 参考文献 .....                              | 121 |
| 3.3.1 测量原理 .....                          | 90  | 附表 BIOLOG 鉴定板碳源<br>分布情况 .....           | 126 |
| 3.3.2 测量系统组成 .....                        | 91  | 第5章 生态系统的经济学方法 .....                    | 132 |
| 3.3.3 稳定同位素技术在光合作用<br>测量中的应用 .....        | 92  | 引言 .....                                | 132 |
| 3.3.4 稳定同位素技术在土壤呼吸<br>测量中的应用 .....        | 93  | 5.1 人类社会经济系统的发展 .....                   | 132 |
| 3.3.5 稳定同位素技术在生态系统-大气<br>界面通量测量中的应用 ..... | 94  | 5.2 经济系统和生态系统的<br>关系 .....              | 133 |
| 3.4 小结 .....                              | 94  | 5.3 生态经济学的主要理论和<br>方法 .....             | 135 |
| 参考文献 .....                                | 95  | 5.3.1 市场理论及方法 .....                     | 135 |
| 第4章 生态系统地下过程与测量 .....                     | 98  | 5.3.2 产权理论及方法 .....                     | 139 |
| 引言 .....                                  | 98  | 5.3.3 自然资本理论及方法 .....                   | 142 |
| 4.1 植物根系寿命 .....                          | 98  | 5.3.4 市场失灵理论及命令<br>与控制方法 .....          | 147 |
| 4.1.1 玻璃根窗安装 .....                        | 99  | 5.4 小结 .....                            | 150 |
| 4.1.2 玻璃根窗图像获取与数字化 .....                  | 99  | 参考文献 .....                              | 154 |
| 4.1.3 根系寿命计算 .....                        | 100 | 第6章 整合分析方法 .....                        | 156 |
| 4.1.4 使用玻璃根窗的注意事项 .....                   | 100 | 引言 .....                                | 156 |
| 4.1.5 羊草根系寿命 .....                        | 100 | 6.1 整合分析概述 .....                        | 156 |
| 4.2 植物根系生产力 .....                         | 102 | 6.1.1 整合分析的概念 .....                     | 156 |
| 4.3 土壤呼吸 .....                            | 103 | 6.1.2 整合分析的起源与发展 .....                  | 156 |
| 4.3.1 研究目的 .....                          | 103 | 6.1.3 整合分析研究的一般步骤 .....                 | 157 |
| 4.3.2 实验方法及工具 .....                       | 103 | 6.1.4 整合分析方法的优点 .....                   | 158 |
| 4.4 土壤微生物多样性分析<br>方法 .....                | 108 | 6.2 整合分析的效应值 .....                      | 159 |
| 4.4.1 土壤微生物结构多样性 .....                    | 108 | 6.2.1 大样本独立实验研究的<br>效应值( $D$ ) .....    | 159 |
| 4.4.2 土壤微生物功能多样性 .....                    | 111 | 6.2.2 大样本配对实验研究的<br>效应值( $D$ ) .....    | 160 |
| 4.5 土壤微生物量分析方法 .....                      | 114 | 6.2.3 独立实验研究的效应值<br>( $d$ 与 $g$ ) ..... | 161 |
| 4.5.1 土壤微生物量碳、氮 .....                     | 114 |                                         |     |

|                                         |            |                                  |            |
|-----------------------------------------|------------|----------------------------------|------------|
| 6.2.4 配对实验研究的效应值<br>( $d$ 与 $g$ ) ..... | 163        | 7.4 其他森林生态学调查方法 .....            | 210        |
| 6.2.5 反应比值(RR) .....                    | 164        | 7.4.1 树木年轮气候分析 .....             | 210        |
| 6.3 整合分析的固定效应模型与<br>随机效应模型 .....        | 165        | 7.4.2 土壤种子库 .....                | 211        |
| 6.3.1 固定效应模型 .....                      | 165        | 参考文献 .....                       | 213        |
| 6.3.2 随机效应模型 .....                      | 166        | <b>第8章 草地与荒漠生态系统</b> .....       | <b>215</b> |
| 6.3.3 模型应用举例 .....                      | 168        | 引言 .....                         | 215        |
| 6.4 整合分析效应值的异质性 .....                   | 172        | 8.1 气候因子测量 .....                 | 215        |
| 6.4.1 $Q$ 检验法 .....                     | 172        | 8.1.1 风的测量 .....                 | 216        |
| 6.4.2 $Z$ 检验法 .....                     | 175        | 8.1.2 降雨的测量 .....                | 218        |
| 6.5 整合分析存在的问题及<br>应用前景 .....            | 176        | 8.1.3 气温度的测量 .....               | 221        |
| 6.5.1 整合分析方法存在的问题 .....                 | 176        | 8.1.4 大气湿度的测量 .....              | 222        |
| 6.5.2 整合分析方法应用的前景 .....                 | 177        | 8.1.5 光的测量 .....                 | 224        |
| 参考文献 .....                              | 177        | 8.2 土壤因子调查与测定 .....              | 225        |
| <b>第7章 森林生态系统研究方法</b> .....             | <b>179</b> | 8.2.1 土壤剖面观察和描述 .....            | 225        |
| 引言 .....                                | 179        | 8.2.2 土壤样品的采集与处理 .....           | 228        |
| 7.1 森林生态因子测定与实验 .....                   | 179        | 8.2.3 野外土壤 pH 的测定 .....          | 229        |
| 7.1.1 树种耐阴性测定 .....                     | 179        | 8.2.4 野外土壤含水量的测定 .....           | 230        |
| 7.1.2 光质对树木影响的测定 .....                  | 182        | 8.2.5 室内土壤有机质含量的<br>测定 .....     | 231        |
| 7.1.3 光周期对树木生长的影响 .....                 | 183        | 8.2.6 土壤动物组成调查 .....             | 233        |
| 7.1.4 林木缺水程度测定 .....                    | 184        | 8.2.7 土壤微生物组成调查 .....            | 234        |
| 7.1.5 树木蒸腾与森林蒸散 .....                   | 186        | 8.3 植物种群与群落数量调查 .....            | 235        |
| 7.2 森林种群与群落调查方法 .....                   | 188        | 8.3.1 固定样地的设置 .....              | 236        |
| 7.2.1 森林样地调查 .....                      | 188        | 8.3.2 植物群落数量特征的调查 .....          | 237        |
| 7.2.2 物种生态位分析 .....                     | 189        | 8.3.3 植物群落生态外貌特征的<br>调查与测定 ..... | 244        |
| 7.2.3 种群分布格局与空间分析 .....                 | 191        | 8.3.4 植物群落物候和群落季相<br>变化的观测 ..... | 247        |
| 7.2.4 模拟动态生命表编制 .....                   | 193        | 8.4 植物群落生态与生理特征的<br>测定 .....     | 249        |
| 7.2.5 种间联结分析 .....                      | 195        | 8.4.1 植物群落光合速率和呼吸<br>速率的测定 ..... | 250        |
| 7.2.6 林木竞争指数 .....                      | 197        | 8.4.2 植物群落叶面积测定 .....            | 252        |
| 7.2.7 群落分类与排序 .....                     | 199        | 8.4.3 植物群落现存量的测定 .....           | 254        |
| 7.3 森林生态系统功能测定 .....                    | 201        | 8.5 动物群落数量特征的调查 .....            | 257        |
| 7.3.1 生物量测定 .....                       | 201        | 8.5.1 啮齿动物种类及其数量<br>调查 .....     | 257        |
| 7.3.2 凋落物量及分解速率测定 .....                 | 204        |                                  |            |
| 7.3.3 碳储量估算 .....                       | 206        |                                  |            |
| 7.3.4 生态系统服务功能估算 .....                  | 208        |                                  |            |

|                               |            |                              |            |
|-------------------------------|------------|------------------------------|------------|
| 8.5.2 蝗虫种类及其数量调查 .....        | 259        | 植被生态修复 .....                 | 306        |
| 参考文献 .....                    | 263        | 参考文献 .....                   | 310        |
| <b>第9章 淡水生态系统研究方法 .....</b>   | <b>264</b> | <b>第11章 农业生态系统研究方法 .....</b> | <b>312</b> |
| 引言 .....                      | 264        | 引言 .....                     | 312        |
| 9.1 淡水生态系统的非生物                |            | 11.1 生物与生态因子的关系 .....        | 312        |
| 因子分析 .....                    | 265        | 11.1.1 作物对逆境胁迫的生理            |            |
| 9.1.1 水体非生物因子分析 .....         | 265        | 生态响应 .....                   | 312        |
| 9.1.2 沉积物非生物因子分析 .....        | 268        | 11.1.2 作物构件与生物量、经济           |            |
| 9.2 淡水生态系统的种群与                |            | 产量的相关性分析 .....               | 316        |
| 群落调查 .....                    | 269        | 11.1.3 蚯蚓的生活习性与回避            |            |
| 9.2.1 细菌种群与群落调查 .....         | 269        | 反应的观测 .....                  | 317        |
| 9.2.2 浮游植物种群与群落调查 .....       | 271        | 11.2 农业生态系统的种群与              |            |
| 9.2.3 浮游动物种群与群落调查 .....       | 274        | 群落 .....                     | 319        |
| 9.2.4 大型水生植物种群与群落             |            | 11.2.1 种间竞争与种间互利关系 .....     | 319        |
| 调查 .....                      | 276        | 11.2.2 农田杂草群落演替的观察与          |            |
| 9.2.5 底栖动物种群与群落调查 .....       | 278        | 分析 .....                     | 320        |
| 9.2.6 鱼类种群与群落调查 .....         | 280        | 11.2.3 植物根系分泌物的化感            |            |
| 9.3 淡水生态系统的结构与                |            | 作用测定 .....                   | 321        |
| 功能分析 .....                    | 282        | 11.3 农业生态系统的结构分析 .....       | 322        |
| 9.3.1 食物网分析 .....             | 282        | 11.3.1 农业生态系统的水平             |            |
| 9.3.2 生态系统分析 .....            | 283        | 结构分析 .....                   | 323        |
| 9.4 淡水生态系统的健康与                |            | 11.3.2 农业生态系统的垂直             |            |
| 完整性分析 .....                   | 283        | 结构分析 .....                   | 326        |
| 9.4.1 从景观生态到河沿生态 .....        | 284        | 11.3.3 农业生态系统的营养结构与          |            |
| 9.4.2 生态系统健康与生物               |            | 能值分析 .....                   | 327        |
| 完整性指数 .....                   | 284        | 11.3.4 农业生态系统的产业             |            |
| 参考文献 .....                    | 285        | 结构分析 .....                   | 331        |
| <b>第10章 湿地生态系统 .....</b>      | <b>288</b> | 参考文献 .....                   | 335        |
| 引言 .....                      | 288        | <b>第12章 城市生态系统研究方法 .....</b> | <b>337</b> |
| 10.1 不同生境土壤酶活性测定 .....        | 288        | 引言 .....                     | 337        |
| 10.2 湿地生态系统外来入侵植物的            |            | 12.1 城市的生态要素 .....           | 339        |
| 危害调查与分析 .....                 | 293        | 12.1.1 非生命要素 .....           | 339        |
| 10.3 湖泊水-气交换面 $\text{CO}_2$ 和 |            | 12.1.2 生命要素 .....            | 342        |
| $\text{CH}_4$ 的释放规律 .....     | 299        | 12.2 城市景观生态学 .....           | 345        |
| 10.4 不同营养条件下水生植物              |            | 12.2.1 城市结构 .....            | 345        |
| 对 N、P 的吸收规律 .....             | 301        | 12.2.2 结构与功能 .....           | 347        |
| 10.5 富营养化湖泊湿地的水生              |            | 12.2.3 结构与尺度 .....           | 348        |
|                               |            | 12.3 城市生态与环境 .....           | 350        |

---

|                    |     |                      |     |
|--------------------|-----|----------------------|-----|
| 12.3.1 物种多样性 ..... | 350 | 12.4 城市生态与社会经济 ..... | 358 |
| 12.3.2 热岛效应 .....  | 352 | 参考文献 .....           | 360 |
| 12.3.3 流域环境 .....  | 356 | 索引 .....             | 364 |

# 第1章 生物多样性测定方法

阳树英 郭勤峰 方炜 贺金生 王智 李巧云

## 引言

《生物多样性公约》将生物多样性定义为:所有生物的多样化程度,包括陆地、海洋和其他水生生态系统及其构成的生态复合体,包括种内、种间和生态系统多样性。《中华人民共和国生物多样性保护行动计划》将生物多样性定义为:“生物多样性”是生物(动物、植物和微生物)与环境形成的生态复合体以及与此相关的各种生态过程的总和,包括生态系统、物种和基因三个层次。

生物多样性中研究较多且意义重大的主要有遗传多样性、物种多样性、生态系统多样性、景观多样性和功能多样性(张凤春和张文国,2010;马克平,2011a)。遗传多样性(genetic diversity)是物种多样性的基础,广义的遗传多样性是指地球上所有生物所携带的全部遗传信息的集合。这些遗传信息通常由生物个体的基因组所携带,故生物的遗传多样性有时候在一定程度上可以等同于生物的遗传基因多样性,包括种内或种间表现在分子、细胞、个体三个水平的遗传变异度;狭义的遗传多样性则是指物种自身基因发生的改变,通常指种内不同群体间(两个隔离地理种群间)及单个群体(种群)内个体间的遗传变异总和,即基因多样性(gene diversity)。遗传多样性的变化是由于物种基因(等位基因)的数目或频率的改变。目前,就植物而言,能确定和改变其遗传多样性的因素包括物种的繁育系统(生殖方式)、遗传漂变、自然选择、基因突变和基因流等,同时还包括由于环境变化和人为干扰因素引起的物种灭绝、种群隔离、生境破碎化等(施立明等,1993;葛颂和洪德元,1994;Guo,2012)。物种多样性(species diversity)是指动物、植物和微生物种类的丰富性。生态系统多样性(ecosystem diversity)是指生物圈内生境、生物群落和生态过程的多样化以及生态系统内生境差异、生态过程变化的巨大的多样性及其功能多样性。生境多样性则是生物群落多样性乃至整个生物多样性的根基;而生物群落多样性是指群落的组成、结构及其动态(如波动或演替)等的多样性;生态过程多样性则主要是指生态系统的组成、结构及其功能在时间和空间尺度上的变异(McNeely et al., 1990;马克平等,1995)。景观多样性(landscape diversity)是指景观单元在结构、功能及其随时间变化方面的多样性,揭示了景观的复杂程度。景观多样性主要研究景观结构和功能的多样性,包括斑块在数量、大小、形状和景观上的类型、分布以及斑块间的连接性和连通性等。其中景观结构主要指景观元素的大小、形状、类型、数量及其空间组合;景观功能是指物质、能量和物种在景观元素之间的流动。景观动态是景观结构和功能随时间的变化过程。自然干扰、人类活动和植被内源演替是导致景观发生动态变化的主要原因。

## 1.1 生物多样性编目和监测

生物多样性编目指对基因、个体、种群、物种、生境、群落、生态系统、景观或它们的组成成分等实体进行调查、分类、排序、数量化和制图,并对这些信息进行分析或综合的过程。因此生物多样性编目就是对地球上存在的生物类群加以鉴定并汇集成名录。

生物多样性监测是为确定与预期标准相一致或相背离的程度,对生物多样性进行定期或不定期的监视。从本质上看,生物多样性监测是随着时间和空间的变化对生物多样性的反复编目,它所反映的是生物多样性在某一段时间内的变化过程。由此获得的信息可以为区域规划、可持续发展和生物多样性保护等宏观决策提供科学依据。生物多样性监测主要在物种、生态系统和景观三个水平上进行:①在物种水平,主要选择濒危物种、经济物种和指示物种等,监测其种群动态和主要影响因素。②在生态系统水平,通过选择重要的生态系统类型并在其典型地段建立一定面积的长期固定监测样地,实现对生态系统组成、结构、功能以及关键物种、濒危物种等的监测。③在景观水平,主要通过遥感手段和地理信息系统对一定区域的景观格局和过程及其影响因素进行监测。欧盟在1997年提出欧洲自然保护区生物多样性监测的指标主要分为物种和环境两个水平,其中物种水平的指标包括受威胁物种占全部物种的比例、特有物种与外来物种的比例和生殖个体与死亡个体的比例等;而环境水平的指标包括植被类型分布、生境类型分布、景观破碎化、线性自然和半自然实体的长度以及自然保护区的数量和大小等(马克平,2011c;贺金生和马克平,2011b)。

### 1.1.1 生物多样性编目和监测的目的

生物多样性编目和监测的目的是:①快速地为生物多样性空白区域收集本底数据。②将调查所获得的信息最终整合到生物多样性信息数据库。③掌握有关生物多样性调查和保护的基础知识和基本技能。④为区域规划、可持续发展和生物多样性保护等的宏观决策提供科学依据。例如,我们整合欧洲各地的鸟类监测数据,目的就是要阐明其种群变化状况及其与土地利用之间的关系。瑞士政府启动的生物多样性监测项目,目的是提供全国的生物多样性动态信息以供政府部门决策作参考,他们分别采用10 m、1 km和区域尺度上的物种数作为生物多样性指标在对应的三个尺度(即局域尺度、景观尺度和区域尺度)上监测生物多样性的时间动态。南非提出了生物多样性的完整性指数(biodiversity intactness index, BII)用于生物多样性监测。其中BII综合了土地利用、生态系统范围、物种丰富度和种群丰度数据,用以描述一个地区地理尺度上各大生物类群相对于参照种群的平均丰度和特定物种及其不同空间尺度的生物多样性状况的综合性指标,它对生物多样性变化及其驱动力都比较敏感。

### 1.1.2 编目和监测的原则

#### 1. 方法和目标

生物多样性编目和监测最重要的原则就是要把所采取的方法和目标联系起来。编目和监测有很多技术和取样方法,但具体问题应根据实际情况进行一些方法上的修正,同时考虑到与其他类似的研究进行对比和交流的可能性。如果能与其他地区或其他时间的结果相比较,就能大幅度提高编目和监测的价值。相反,如果方法不标准,就失去了编目和监测的真正意义。

#### 2. 定性数据处理方法

编目和监测数据,有一些是定性数据,如用稀少、常见和丰富等来描述;有一些是定量数据,如密度和盖度的数值等。定性数据虽然简单和容易获得,但不适合作为监测数据,也不适合统计分析。并且,取样时样方大小、取样强度及取样方式都会影响数据的科学性。

#### 3. 监测指标

生物多样性监测指标,即一些简化的生物或环境特征参数,可用于提取有关生物多样性现状和变化趋势的信息。根据反映对象的不同,生物多样性指标大体可分为生物、环境、压力和管理四种类型。生物相关指标是指直接表达生物多样性的一些指标,如种群变化趋势、受威胁物种的变化趋势等;环境相关指标是指气候、地形、土壤特性、景观功能特征以及影响物种时空分布和土地利用格局的其他参数;压力相关指标是指表现人类活动对生物多样性胁迫的参数,如人口密度、渔业捕捞、森林采伐等;管理相关指标是能够度量生物多样性保护对策有效性的参数,如受到有效保护的 natural 生境的面积。

目前,已经实施或正在实施的生物多样性监测项目数量众多,应用的监测指标也互不相同,各具特色。从监测的尺度看,主要有全球尺度和国家(地区)尺度;从监测的生态系统类型看,主要有森林和草地;从全球尺度来看,虽然国际上在生物多样性指标体系的构建上做了大量努力,但迄今为止,表征大尺度上生物多样性变化趋势的指标还很少,虽然一些学者试图确定一些通用的生物多样性指标,但更多的是提出原则或模型。目前,受到广泛关注的主要有《生物多样性公约》(Convention on Biological Diversity, CBD)的生物多样性监测指标、世界自然基金会(World Wide Fund for Nature, WWF)的生命行星指数(living planet index, LPI)和世界自然保护联盟(International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, IUCN)的红色名录指数(red list indices, RLIs)(贺金生和马克平,2000;陈圣宾等,2008)。

2004年初,《生物多样性公约》(CBD)提出了一个评价生物多样性保护的框架。英国皇家学会在邀请了60多位专家对这些参数进行评价以后认为,CBD提出的18个指标可以提供有用的生物多样性信息,但存在一些不足,故提出了一些附加指标。在它的引导下,欧洲、拉丁美洲和环北极地区都在努力发展本地区生物多样性的监测指标体系;同时,CBD也在敦促各缔

约国政府确定适当的生物多样性指标,用于国家和地区尺度上的生物多样性监测。例如,澳大利亚正积极通过多学科合作,发展一个能更好地监测生物多样性变化与土地利用和全球变化之间关系的指标体系;而英国野生鸟类指数(UK Wild Bird Index)已被英国政府采纳为指示环境质量和环境政策执行状况的指数。

生命行星指数(LPI)是WWF于1997年提出的一个监测全球生物多样性状况的指标,主要利用时间序列数据计算生活在陆地、淡水和海洋生态系统中脊椎动物种群数量的平均变化速率。例如,WWF《生命行星报告2006》的最新数据(2003年)显示,LPI不但衡量了世界上生物多样性的趋势,而且通过跟踪野生物种监测了生态系统的健康程度。

红色名录指数(RLIs)通过比较一定时期特定生物类群在IUCN红色名录中的物种数量,衡量这些生物类群灭绝风险的变化趋势。红色名录指数显示,自1988年对鸟类进行首次全面评估以来,其生存状态持续恶化,而濒危的两栖动物恶化趋势则更为严重。红色名录指数的缺点是保护地位的确定相对粗糙且落后于物种监测的变化,如濒危物种加入和去除可能不是由于物种状态的变化,而是来自对物种状态的了解增加、评价程序的变化和分类的细化。

从国家(地区)尺度来看,欧盟在1997年提出了欧洲自然保护区生物多样性监测的指标,主要分物种和环境两个水平。物种水平的指标包括受胁物种占全部物种的比例、特有物种与外来物种的比例和生殖个体与死亡个体的比例等;环境水平的指标包括植被类型分布、生境类型分布、景观破碎化、线性自然和半自然实体的长度以及自然保护区的数量和大小等。另外,还采用了欧洲野生鸟类指数(European Wild Bird Index,EWBI)对欧洲各地鸟类监测数据进行整合,说明其种群变化状况及其与土地利用之间的关系。

### 1.1.3 编目和监测的步骤

生物多样性编目和监测的步骤包括项目设计、资料收集、野外调查、鉴定、数据库的建立及数据分析。编目和监测会因不同的时间、空间尺度,不同的对象,不同的结果期望值以及所采用的不同手段而不同。其中时间尺度上,长期的项目可能需要很多年,或者几十年。空间尺度则包括地方、地区和全球性的编目和监测。其中地方性编目和监测由当地的资源及需要而定,例如,对保护区、湖泊、湿地、农田、人工林、河口和海岸线内生态系统或生境进行编目和监测;地区性编目和监测包括对一个或多个生态系统、大型河流、海湾和大型海洋生态系统进行编目和监测;全球性编目和监测建立在前两者的基础之上,采取广泛布点与定向观测相结合的方法(Heywood,1995;贺金生和马克平,2000)。

### 1.1.4 物种多样性编目和监测

物种多样性编目和监测既包括一定区域内所有物种(从病毒到大树)的编目和监测,即全物种生物多样性编目和监测,也包括对一些关键种、外来种、指示种、重点保护种等的编目和监测,参照Heywood(1995)的方法,可划分为单一物种和多类群的编目和监测。在种群水平上的编目和监测也作为物种多样性编目和监测的内容(Heywood,1995;贺金生和马克平,2000)。

种群编目是指在特定时间和特定地方种群的内禀增长速率、生态平衡时的种群大小、不同年龄和性别的个体的结构;种群监测是指种群随着时间和空间的动态变化,包括出生率、死亡率、迁入、迁出及基因频率的变化等。种群编目和监测的方法随着研究目的及研究对象的生物学特性不同而差异较大,不同的研究对象有不同的调查方法,其中鸟类可参照 Koskimies 和 Vaisanen(1986) 和 Bibby 等(1992),两栖类可参照 Heyer 等(1994),植物可参照 Kershaw(1973)、Greig-Smith(1983)、Austin(1998)及 Dallmeier 和 Comiskey(1998)等文献,这些都是比较经典的文献。植物的调查方法比较简单。但对于动物,就需要一些比较特殊的方法,如标记-重新俘获法(mark-recapture)、无线电跟踪法(radio track)、现场制图(spot mapping)、固定地点统计(point counts)以及样带法(transects)等(Heywood,1995)。在现场制图调查中,比较成功的例子是始于1962年的“不列颠常见鸟类监测计划”(Baillie,1990)。

### 1. 单一物种编目和监测

单一物种和多类群在编目和监测的方法上有一定的区别,并且不同类型的物种强调的内容也不尽相同。因此下面我们主要就重点物种,如关键种、外来种、指示种、重点保护种、群落的建群种或有代表性的物种的编目和监测方法作一些介绍。

**关键种:**主要鉴定生态系统的关键种;研究关键种在生态系统中的作用,随着人类活动对生态系统的影响进程监测它们作用的动态变化过程。

**外来种:**主要鉴定各种生态系统(自然生态系统和受人类活动影响的生态系统)的外来种;监测它们的扩散及对当地生态系统的影响;用 GIS 根据气候资料确定它们的适宜生境,预测它们可能扩散的地区。

**重点保护种:**主要包括对濒危种、对人类有特殊价值的物种、典型生态系统的建群种或代表性物种的编目和监测。

**指示种:**指一些物种可以敏感地反映环境的质量和变化,也可以指示群落的物种组成,可以认为它们是生物多样性的指示种。用指示种进行生物多样性编目越来越受到重视(Lawton et al.,1998)。一般主要对指示种的分布、丰富度、种群的结构和动态进行编目和监测。两栖动物、软体动物、鸟类、真菌、珊瑚及一些植物物种在不同情况下可以作为指示种,但是指示种的选择依赖于所研究的目的。Pearson(1994)认为理想的生物多样性指示种或类群应该具有七个条件:第一,系统位置稳定,分类学上认识全面;第二,生物学和生活史清楚;第三,容易调查和操作;第四,地理分布较广,生态幅较宽;第五,低的分类学特征分化,对生境变化敏感;第六,它的多样性格局反映其他相关或不相关类群的多样性格局;第七,具有潜在经济价值。例如,Ruokolainen 等(1997)用蕨类植物和野牡丹科(Melastomataceae)植物作为指示种度量亚马孙流域不同地点的植物区系相似性,并用乔木树种来度量这些相似性,它们之间存在着非常好的相关性,相关系数达 0.8(Mantel 检验,  $p < 0.001$ )。Tuomisto(1998)用蕨类植物作为指示种,结合卫星图像,对亚马孙流域的植物多样性格局进行了研究,得到了比较满意的效果。值得注意的是用于生物多样性监测的指示种应该由不同的功能群组成。因为这些不同功能群对环境变化的响应不同,而使得监测具有更大的可信度、灵敏度和可操作性(贺金生和马克平,2000;陈圣宾等,2008)。

## 2. 多类群 (multiple-taxa) 编目和监测方法

多类群编目和监测可以分为两种方法:研究地点或区域的深入编目;生物多样性的快速编目 (Heywood, 1995) 或生物多样性快速评估 (Beattie and Oliver, 1994)。

### 1.1.5 遗传多样性编目和监测

遗传多样性主要是指种内不同群体之间或同一种群内不同个体之间的遗传变异的总和 (施立明等, 1993)。目前, 监测遗传多样性的方法主要有以形态学性状为主的表型分析和分子水平的监测。分子水平上监测遗传多样性的方法有很多 (见本章遗传多样性分析方法)。实际上, 所有遗传多样性编目涉及的都是遗传变型监测, 定性、定量调查它们在物种内或居群内的分布情况。

遗传多样性编目的内容及应用大致综合为如下几个方面。

居群内个体间: ① 居群内遗传变异的大小; ② 居群内个体间的血统关系; ③ 居群内的交配制度; ④ 居群内是否存在近亲交配以及怀疑近交衰退的理由; ⑤ 个体性别不均 (sex-biased) 扩散的遗传效应; ⑥ 具有迁移特性的个体的地理起源。

物种内居群间: ① 一个物种内是否存在在遗传方面具有明显特征的进化谱系 (genetically distinct evolutionary lineages); ② 居群间遗传分化的程度如何; ③ 生物地理与遗传分化的关系; ④ 居群间基因流 (gene flow) 程度如何。

不同物种间的比较: ① 物种间系统发育的关系; ② 物种间遗传分化的程度; ③ 关系密切的物种之间个体或居群是否可以明显区分; ④ 物种间分化的相对年代。

限于研究方法和监测手段, 遗传多样性的研究主要集中在具有重要经济价值和保护价值的物种及群落的优势种, 如大熊猫 (*Ailuropoda melanoleuca*)、金丝猴 (*Rhinopithecus* sp.)、长臂猿 (*Hylobates* sp.)、牛 (*Bos* sp.)、马 (*Equus caballus*)、猪 (*Sus* sp.)、鸡 (*Gallus domestica*)、野生大豆 (*Glycine soja*)、野生稻 (*Oryza* sp.)、野生燕麦 (*Elytrigia* sp.)、银杉 (*Cathaya argyrophylla*) 和辽东栎 (*Quercus wutaishanica*) 等。

### 1.1.6 生态系统多样性编目和监测

#### 1. 生态系统多样性动态监测

##### (1) 监测意义

生态系统的变化主要包括物理环境的长期变化导致的生物群落变化、自然过程引起的个体生存能力的变化、自然或人为干扰引起的群落改变导致的生态系统特征改变。生物多样性的监测有利于认识生态系统中的生态过程、预测全球气候变化可能的影响以及预测关键物种或类群的灭绝可能带来的生态变化。

### (2) 监测方法

生态系统多样性的监测包括两个方面:一方面是通过样地法,对生态系统组成、结构及主要生态过程等进行监测。一般情况下,根据生态系统的性质和监测的目的不同来确定样地的面积、监测指标和监测的时间间隔等。例如,热带雨林生态系统的样地面积一般不小于 $1\text{ hm}^2$ ,而温带森林生态系统则可以适当减小样地面积。另一方面是对生态系统的分布格局和面积进行监测,采用地理信息系统(geographic information system, GIS)、全球定位系统(global positioning system, GPS)和遥感(remote sensing, RS)技术。这是近年来一种借助于高科技的监测手段。遥感影像的选择、判读、地面核实及资料的计算机处理是决定监测成效的关键环节。但是在实际的应用中,我们应根据所监测的区域面积的大小和监测内容,选择不同的遥感影像,发挥每种类型影像的优势。例如,季节性的多谱段(multispectral)卫星影像可用于确定上层林冠的树种组成和盖度;立体影像和激光文件(laser profile)则可用于结构和生物量等的估测;小尺度的监测,可选用大比例尺的航空像片。

### (3) 监测内容

利用遥感手段和 GIS 等信息技术等,通过样地法不仅可以对生态系统的组成、结构及其主要生态过程等进行监测;还可以对一定区域内不同生态系统类型的面积及其分布格局进行监测。例如,不同时间、空间上的生境监测包括大气监测、水质监测和土壤监测;在不同生物学水平上的监测包括物种监测、种群监测、群落监测、生态系统格局与景观监测。

## 2. 森林生物多样性编目和监测

传统的森林生物多样性编目,主要是对各种森林系统类型的生境、结构特征、物种组成、优势种种群结构及一些生理生化特征等进行研究,建立相应的数据库。近年主要集中在复杂的森林生态系统,如热带雨林,通过建立大面积的固定样地,调查它们的结构和动态。Hubbell 和 Foster 等美国生态学家于 1981 年在巴拿马的 Barro Colorado 岛建立了一块  $50\text{ hm}^2$  的森林生物多样性监测样地,进行热带雨林结构和动态的研究(Hubbell, 1998)。这一样地划分为  $20\text{ m}\times 20\text{ m}$  的样方,样方又进一步划分为  $5\text{ m}\times 5\text{ m}$  的小样方(subquadrats)。在 1982 年,完成了所有胸径大于  $1\text{ cm}$  的木本植物的胸径测量、树种鉴定及定位图绘制(共计约 24 万个体,300 多种)。在 1985 年、1990 年和 1995 年分别进行了复查,对胸径达到  $1\text{ cm}$  的更新幼树进行了测量和绘图。这一研究成为了森林生物多样性编目和监测的经典之作。1989 年,美国的 Smithsonian 热带研究所(STRI)成立了热带森林科学研究中心(Center for Tropical Forest Science, CTFS),其目的就是对亚洲具有代表性的热带森林类型进行编目和价值评估,并且建立优化的森林经营模型。他们在马来西亚的 Pasoh 和 Lambir(婆罗洲)、泰国的 Huai Kha Khaeng、印度的 Mudumalai 及斯里兰卡的 Sinharaja 建立了一系列  $16\text{ hm}^2$ 、 $25\text{ hm}^2$  或  $50\text{ hm}^2$  的固定监测样地(Ashton, 1998)。

森林生物多样性监测指标可以划分为组成(物种、种群)、结构(森林立地的地貌和相关生境特征)和功能(生态系统过程,如养分循环)三类。目前,采用的指标多为与结构和组成相关的,当然这两类指标也能够一定程度上代替功能指标,如枯死木是一个结构指标,但也能在一定程度上说明生态系统的降解功能。美国和芬兰采用的森林生物多样性监测指标见表 1.1。

表 1.1 美国和芬兰采用的森林生物多样性监测指标

|    |                 |                           |
|----|-----------------|---------------------------|
| 组成 | 1. 树种的基因多样性     | 1. 保护基因资源的受管理林地           |
|    | 2. 植被与生境类型      | 2. 树种组成(优势种、外来种、物种数、关键种)  |
|    | 3. 敏感种与特有种      | 3. 高价值群落生境保护(如老龄林、未排干的沼泽) |
|    | 4. 群落多样性        | 4. 受胁物种数目和比例的变化           |
|    | 5. 物种多样性        |                           |
| 结构 | 6. 林地结构         | 5. 林地的发育等级                |
|    | 7. 斑块大小、形状,生境边缘 | 6. 自然更新占年度全部更新面积的比例       |
|    | 8. 破碎化          | 7. 单位面积上枯死、濒死、倒木和古树的数目和材积 |
|    | 9. 生境的连接        | 8. 轮伐中未砍掉的树木数量            |
| 功能 | 10. 生境周转率       |                           |
|    | 11. 养分循环与土壤生产力  | 9. 遭受火灾和有意焚烧的林地面积及其变化     |
|    | 12. 鱼类生境适宜性     | 10. 遭受水土流失、施肥和除草剂喷洒的林地面积  |
|    | 13. 土地利用趋势      |                           |
|    | 14. 自然生态系统功能    |                           |

森林生物多样性可以通过一定面积内的植物和动物种数、不同区域间的物种流、相对相对丰富度和均匀度等进行度量。但最好针对关键种和优势种进行监测,因为它们在森林生态系统中具有重要功能,与其他物种有着大量直接或间接的联系。结构多样性可以通过林地生境异质性、复杂性和与尺度相关的指标进行度量,如生境斑块特征、连接性和林地破碎化等。

3. 草原生态系统生物多样性监测

草原生物多样性监测主要在物种、生态系统和景观三个水平上进行:① 在物种水平,主要选择草原濒危物种、经济物种和指示物种等,监测其种群动态和主要影响因素;② 在生态系统水平,通过选择重要草原生态系统类型的典型地段建立一定面积的长期固定监测样地,实现对草原生态系统组成、结构、功能以及关键物种、濒危物种等的监测;③ 在景观水平,主要通过遥感手段和地理信息系统对一定区域的草原景观格局和过程及其影响因素进行监测。

澳大利亚的草原生物多样性监测是目前世界上最成熟的,主要监测 11 个核心指标(表1.2)。就植物而言,这些指标可划分为两类:① 压力指标,包括被清除本土植被、外来入侵种变化趋势等;② 响应指标,如本土多年生草本/地表植被盖度、对火敏感的植物种类和群落、刈割敏感植物、受胁物种分布和多度等。