

# 稳定同位素生态学

## Stable Isotope Ecology

林光辉 著



稳定同位素生态学随着同位素技术在生态学领域内的广泛应用而诞生，成为先进技术推动的又一门生态学新分支学科。通过稳定同位素分析，不仅可以追踪自然界生源要素（碳、氮、磷、水等）的地球化学循环过程，还可研究动植物对环境胁迫和全球变化的生理生态响应、追踪污染物的来源与去向以及重建古气候和古生态过程等。本书系统论述稳定同位素技术在生态学及相关领域的应用原理，并着重阐述稳定同位素技术在研究不同时空尺度生态学格局和过程的应用案例及应用前景，可作为我国应用这一技术的生态学科研人员、研究生和实验室技术员的参考书。



国家科学技术学术著作  
出版基金资助出版

013070311

Q14  
55

国家科学技术学术著作出版基金资助

# 稳定同位素生态学

林光辉 著



Q14  
55



北航

C1678822



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

## 内容简介

稳定同位素生态学随着同位素技术在生态学领域内的广泛应用而诞生,成为先进技术推动的又一门生态学新分支学科。通过稳定同位素分析,不仅可以追踪自然界生源要素(碳、氮、磷、水等)的地球化学循环过程,还可研究动植物对环境胁迫和全球变化的生理生态响应、追踪污染物的来源与去向以及重建古气候和古生态过程等。本书系统论述稳定同位素技术在生态学及相关领域的应用原理,并着重阐述稳定同位素技术在研究不同时空尺度生态学格局和过程的应用案例及应用前景,可作为我国应用这一技术的生态学科人员、研究生和实验室技术人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

稳定同位素生态学 / 林光辉著. -- 北京: 高等教育出版社, 2013.8

ISBN 978-7-04-028497-3

I. ①稳… II. ①林… III. ①稳定同位素-应用-生态学 IV. ①O562.6②Q14

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第018015号

策划编辑 李冰祥 柳丽丽 责任编辑 柳丽丽 关焱

封面设计 王凌波 版式设计 王凌波

责任校对 刘莉 责任印制 朱学忠

插图绘制 尹莉

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

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>

印 刷 北京信彩瑞禾印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 32.75

字 数 605千字

版 次 2013年8月第1版

印 次 2013年8月第1次印刷

定 价 139.00 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



北航

C1678822



# Stable Isotope Ecology

WENDING TONGWEISU SHENGTAIXUE

谨把此书献给：

我的三位学术导师——中国厦门大学林鹏院士、美国迈阿密大学Leonel Sternberg教授、美国犹他大学James Ehleringer教授，是他们指导我如何开展创造性的研究、成为启蒙型的教师；

我的父母，虽然没有多少文化，却一直教育我踏踏实实做人、做事、做学问；

我的妻子柯渊和女儿Lulu，是她们的爱、支持和鼓励，支撑着我在生态学的前沿领域不断探索、进步。

## 序 言

自德国动物学家海克尔(Ernst Haeckel)提出生态学(ecology)的概念以来,历经140多年的发展,通过与传统博物学(观察、比较与归类)和现代实验生理学(实验、验证与解释)方法的逐渐融合,生态学逐步发展成为具备现代科学特性与品质的重要学科。一方面,它依托地理信息系统、遥感和系统分析等先进技术,向区域和全球等宏观领域拓展;另一方面,它吸收分子生物学的先进成果,不断向微观领域发展。与此同时,生态学的研究内容和任务还逐渐渗透到人类社会系统,成为人类社会可持续发展和生态文明建设的重要支撑。

类同于其他自然科学学科,生态学的创新研究也依赖于技术和方法的进步。作为20世纪80年代发展起来的先进技术,稳定同位素(stable isotope)技术具备示踪(tracing)、整合(integration)和指示(indication)等多项功能以及检测快速、结果准确等特点,在生态学研究得到了广泛的应用,对促进和引领生态学的发展起到了重要作用。

2006年,美国生态学家傅莱(Brian Fry)出版*Stable Isotope Ecology*一书,这是全球第一本系统论述稳定同位素生态学学科背景、研究方法和应用前景的著作。它详细介绍了常见稳定同位素在生物圈的转化循环规律以及在解决生态学的一些关键问题,如物质交换与循环、植物-动物关系与食物网结构、动物迁徙途径以及污染物来源等方面的应用潜力,在国际上产生了很大的影响。然而,中国迄今还没有这方面的专著。如今,清华大学林光辉教授根据20多年的国内外科研经历和教学体会,并参阅大量文献资料,历时多年,撰写了《稳定同位素生态学》一书。该书对稳定同位素技术的发展历史、基本术语和稳定同位素生态学的学科特色,稳定同位素的测定方法,自然界中一些重要生源要素的稳定同位素组成及时空变化,以及稳定同位素技术在生态学和相关领域中的应用等,都进行了系统而深入的阐述,是一部不可多得的集研究和教学为一体的重要专著。

稳定同位素技术尽管在我国生态学研究中的应用起步较晚,但近几年通过国际交流合作以及我国科学家的不懈努力,已取得了重要进展。林教授这部专著的出版,毫无疑问会大大促进稳定同位素技术在我国生态学及相关领域的进一步普及和应用。

为此，特向应用这一技术的生态学科研究人员、研究生和实验技术人员，以及相关领域的从业人员推荐这部目前国内最系统、最全面的专业参考书。



2013年1月

# 前言

稳定同位素是指质子数相同、中子数不同且不具有放射性的元素形式。自从物理学家发现了质子和中子以后,人们就开始了稳定同位素的理论和应用研究,取得了许多重要的突破。尤其是20世纪80年代以后,稳定同位素质谱测试技术的改进和费用的降低,大大拓宽了稳定同位素及其技术的研究应用领域。除了“稳定同位素地球化学”(stable isotope geochemistry)已形成一门独立学科外,稳定同位素技术还应用于医学、农业、生态、环境科学和法医学(forensic science)等研究领域。通过稳定同位素的分析,不仅可以追踪重要元素如碳、氮和氧等的地球化学循环过程,还可诊断病人的代谢变化及其原因,估测农作物施肥的最佳配方和时间,研究动植物对环境胁迫的反应及相互关系,追踪污染物的来源与去向,推断古气候和古生态过程,甚至还可用来了解农、林产品组成成分、来源及掺假可能性,等等。

稳定同位素技术因具有示踪(tracing)、整合(integration)和指示(indication)等多项功能和检测快速、结果准确等特点,在自然科学许多研究领域(如生态学研究)中日益显示出广阔的应用前景。以稳定同位素作为示踪剂研究生态系统中生物要素的循环及其与环境的关系、利用稳定同位素技术的时空整合能力研究不同时间和空间尺度生态过程与机制以及利用稳定同位素技术的指示功能揭示生态系统功能的变化规律,已成为了解生态系统功能动态变化的重要研究手段之一。稳定同位素技术逐渐成为进一步了解生物与其生存环境相互关系的强有力工具,使现代生态学家能够解决用其他方法难以解决的生态问题。例如,在植物生理生态学方面,稳定同位素技术使我们能从新的角度探讨植物光合途径、植物对生源元素吸收、水分来源、水分平衡和利用效率等问题。生态系统生态学家利用稳定同位素技术研究生态系统的气体交换机制、生态系统功能动态变化及对全球变化的响应模式等。在动物生态学方面,稳定同位素也已广泛地应用于区分动物的食物来源、食物链、食物网和群落结构以及动物的迁徙活动等方面的研究。总之,稳定同位素技术在生态学中的应用已引起了生态学家广泛的注意,逐渐成为现代生态和环境科学研究中最有效的研究方法之一。

与分子生物学技术对现代基因、生化和进化生物学领域的发

展所产生重大影响一样, 稳定同位素技术已经对现代生态学的发展产生积极的影响。稳定同位素信息使我们能够洞悉不同空间尺度上(从细胞到植物群落、生态系统或某一区域)和时间尺度上(从数秒到几个世纪)的生态学过程及其对全球变化的响应。由于众多同位素化学家和地球化学家的前期开拓性研究工作, 我们已经对稳定同位素在生态系统和生物地球化学循环中的特性有了更深入的了解。随着同位素研究方法的日趋完善, 稳定同位素技术在那些需要深入研究的现代生态学领域中的应用前景将更加广阔。稳定同位素技术的应用所提供的信息大大加深了我们对自然环境下生物及其生态系统对全球变化的效应与反馈作用等方面的认识。美国生态学家傅莱(Brian Fry)的专著 *Stable Isotope Ecology* 在2006年的正式出版, 标志着稳定同位素生态学作为生态学的一门新分支学科正式诞生。

稳定同位素技术在我国生态学研究中的应用起步较晚, 近几年通过国际交流与合作以及我国科学家的不懈努力, 已取得了重要的进展和突破。我国的生态学研究人员不但发表了一系列总结国外研究的综述文章, 还发表了一些高水平的原创研究论文。然而, 我国目前除了魏菊英、王关玉的《同位素地球化学》(1988年, 地质出版社), 郑淑蕙等的《稳定同位素地球化学分析》(1986年, 北京大学出版社), 郑永飞、陈江峰的《稳定同位素地球化学》(2000年, 科学出版社)以及刘季花等翻译的Jochen Hoefs的 *Stable Isotope Biogeochemistry* (第四版, 2002年, 海洋出版社)等有关稳定同位素技术的专业参考书外, 介绍稳定同位素技术在生态学和环境科学研究中应用的参考书只有易现峰编著的《稳定同位素生态学》(2007年, 中国农业出版社)。

我是在1988年第一次接触稳定同位素技术。1988年春, 我在厦门大学申请美国迈阿密大学(University of Miami)生物学系的博士研究生奖学金, 申请的导师Leonel Sternberg教授正是美国当时为数不多应用稳定同位素技术研究生态学问题的研究人员之一。为了尽快熟悉Sternberg教授的研究方向, 我从厦门大学图书馆借到郭正谊教授编著的《稳定同位素化学》(1984年, 科学出版社), 恶补了一通稳定同位素的基本常识, 并硬啃了几篇有关稳定同位素技术在生态学研究中的英文文献, 于当年8月

前往风光秀丽的美国佛罗里达州迈阿密市,开始了海外求学的旅程,也与稳定同位素技术结下了毕生不解之缘。在四年的博士学习期间,我在Sternberg教授的亲自指导下系统学习了稳定同位素技术的理论知识、同位素比率质谱仪(isotope ratio mass spectrometer, IRMS)的原理和操作方法以及稳定同位素样品的制备技术,并应用稳定同位素技术研究佛罗里达海岸生态系统的一些重要生态问题,揭示了红树植物适应潮汐胁迫环境的生态生理机制,还首次发现了一些盐生植物如红树林在吸收水分过程中对重的氢同位素(即氘)具有明显的排斥效应,得到同位素生态学家的高度肯定。博士学习期间,我还与在同一研究组做博士后研究的罗耀华博士合作撰写了第一篇向国内同行介绍稳定同位素技术的综述论文,收录在由刘建国主编的《当代生态学博论》(1992,中国科学技术出版社)中。

1992年博士毕业后,我应聘到美国犹他大学(University of Utah)生物系从事博士后研究,师从著名的生态学家James Ehleringer教授,采用稳定同位素技术开展全球变化(全球变暖、CO<sub>2</sub>浓度升高、降水变化)生态学效应等方面的研究,也对植物暗呼吸、纤维素合成过程的同位素效应及其生态学意义开展了一些探索性研究,多篇论文他引次数超过100次,最高的一篇达到260余次。1996年到哥伦比亚大学工作后,虽然研究方向涉及生态学多个方面,我领导的课题组始终以稳定同位素技术为主要研究手段,建设国际一流水平的稳定同位素实验室,并利用生物圈2号开展全球大气圈-生物圈相互作用的实验研究。1994—2003年间,我曾多次回国访问,就稳定同位素技术及其在生态学中的应用等专题与国内有关单位和学者进行了学术交流和科研合作,并向国内同仁介绍了稳定同位素技术在全球变化研究中的应用。2003年我入选中国科学院“百人计划”,接受中国科学院植物研究所的聘任,回国组建稳定同位素生态学创新研究团队,并建立专门用于生态学研究的稳定同位素实验室——中国科学院植物研究所生态与环境科学稳定同位素实验室(Stable Isotope Laboratory for Ecological and Environmental Research, SILEER)。即使后来调到厦门大学和清华大学任职,研究重点有所改变的情况下,我也一直把稳定同位素生态学的研究作为主攻方向,带领团队成员包括

博士后和研究生利用稳定同位素技术研究碳、氮和水的循环过程与机理,动物的食物来源与食物网结构以及生物入侵、气候变暖和海平面升高等全球变化的生态响应,也撰写了多篇介绍稳定同位素技术及其在生态学等领域应用的综述论文。过去几年在中国科学院研究生院(现名为中国科学院大学)、中国科学院植物研究所、清华大学、厦门大学、复旦大学、南京大学、北京师范大学等单位授课期间,我深深感受到学生们对稳定同位素技术及其在生态学研究中的浓厚兴趣和我国目前这个领域专业参考书的匮乏,遂决定根据自己20多年的国内外研究经历和教学体会撰写一本有关生态学研究中的稳定同位素技术方面的专著,以期为我国正在和即将应用这一技术的生态学科人员、研究生和实验室技术人员提供一本相对系统和全面的参考书。

本书共分15章,前3章详细介绍稳定同位素技术的基本理论和常识,包括稳定同位素技术的发展历史和基本术语(第1章)、稳定同位素的测定方法(第2章)和自然界中一些重要生源要素的稳定同位素组成及时空变化(第3章);第4—13章分别系统介绍稳定同位素技术在生态学不同领域研究中的应用实例和发展前景,着重介绍了植物的碳代谢(第4章)、植物的水分关系(第5章)、动物生态学(第6章)、植物、动物与微生物之间的相互关系(第7章)、土壤有机质动态(第8章)、氮的地球化学循环(第9章)、大气中主要温室气体的源和汇关系(第10章)、全球变化的生态学效应(第11章)、城市生态问题(第12章)及古气候、古植被和古生态过程的重建(第13章)等方面;最后两章简要论述稳定同位素技术在与生态学紧密相关的两个应用领域的应用,包括污染物追踪(第14章)和法医学及反恐活动中的稳定同位素探测(第15章)。

本书撰写过程中,得到了中国科学院植物研究所稳定同位素与生态学过程创新研究组(2004—2009年)、厦门大学“海岸生态学与湿地工程”课题组(2007—2011年)和清华大学全球变化生态学研究组(2011年—)同仁的支持和帮助,特别是黄建辉、陈世苹、陈鹭真等博士在本书章节设置、原始资料收集和筛选等方面提出了许多建设性意见。在文字输入与校对、图件清绘、文献收集与检查以及书稿统稿等方面也得到我的多位科研助理

(郭婕敏、郑陈娟、王新丽、熊樱、张凡、李娜、李乐义、冀春雷等)的帮助,我的多位研究生特别是冯建祥、王参谋、阎光宇、黄敏参、齐飞、李蕊、黄茜、陈卉、卢伟志、吴浩、贾岱、李清、杨翼、臧振宇、王建柱、孙伟、孙双峰、张文丽、魏龙、苗海霞、张屏等及博士后彭容豪博士也参与了文献收集、翻译和整理等方面工作,在此一并致谢。特别感谢高等教育出版社李冰祥编审的倡议、鼓励与耐心,以及柳丽丽编辑对各章书稿的细致修改和文字润色。本书撰写与出版得到了国家科学技术学术著作出版基金、国家自然科学基金重点项目(30930017)、海洋公益性科研专项(200905009)等项目基金的资助。由于著者的水平限制,书中难免有不足乃至错误之处,敬请读者和同行专家批评指正。

林光辉

2013年元月于北京

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

# 目 录

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                  | 1  |
| 第 1 节 稳定同位素技术的发展史         | 3  |
| 一、早期（1950 年前）的理论突破与仪器研发   | 3  |
| 二、启蒙阶段（1950—1979 年）的开拓性研究 | 3  |
| 三、近代（1980 年后）的开拓性研究工作     | 4  |
| 第 2 节 稳定同位素技术的有关术语        | 5  |
| 一、同位素的定义                  | 5  |
| 二、同位素比率                   | 5  |
| 三、同位素组成的 $\delta$ 表示法     | 7  |
| 四、稳定同位素测试标准物              | 7  |
| 五、同位素分馏                   | 12 |
| 六、扩散过程的同位素分馏效应            | 15 |
| 七、同位素瑞利分馏                 | 16 |
| 八、同位素混合模型                 | 16 |
| 第 3 节 稳定同位素大尺度监测与研究网络     | 18 |
| 一、水同位素监测研究网络              | 18 |
| 二、气体同位素研究网络               | 19 |
| 三、同位素合作研究网络               | 21 |
| 第 4 节 稳定同位素生态学学科特点        | 22 |
| 一、研究对象与内容                 | 22 |
| 二、研究方法学                   | 23 |
| 三、有关参考书                   | 23 |
| 四、有关刊物与学术会议               | 24 |
| 主要参考文献                    | 27 |
| 第 2 章 稳定同位素测定方法与仪器        | 31 |
| 第 1 节 稳定同位素样品的采集方法        | 33 |
| 一、固体样品的采集                 | 33 |
| 二、液体样品采集                  | 34 |
| 三、气体样品采集                  | 34 |

|     |                                          |    |
|-----|------------------------------------------|----|
| 第2节 | 稳定同位素样品的预处理方法                            | 37 |
|     | 一、固体样品的预处理方法                             | 37 |
|     | 二、植物或土壤中的水分提取方法                          | 38 |
|     | 三、纤维素提取方法                                | 39 |
|     | 四、样品的汽化、纯化和分离                            | 40 |
| 第3节 | 同位素比率质谱仪分析方法                             | 41 |
|     | 一、同位素比率质谱仪的工作原理                          | 41 |
|     | 二、同位素比率质谱仪的结构                            | 42 |
|     | 三、同位素质谱仪的主要类型及其辅助设施                      | 44 |
| 第4节 | 稳定同位素的非质谱测定技术                            | 46 |
|     | 一、可调谐二极管激光吸收光谱法                          | 47 |
|     | 二、光腔衰荡激光光谱同位素分析仪                         | 49 |
|     | 主要参考文献                                   | 50 |
|     |                                          |    |
| 第3章 | 稳定同位素的自然丰度                               | 53 |
| 第1节 | 碳稳定同位素                                   | 55 |
|     | 一、碳稳定同位素的分馏                              | 55 |
|     | 二、碳稳定同位素丰度的自然变异                          | 62 |
| 第2节 | 氢稳定同位素                                   | 66 |
|     | 一、氢稳定同位素的分馏                              | 67 |
|     | 二、氢稳定同位素丰度的自然变异                          | 68 |
|     | 三、大气降水 $\delta D$ 与 $\delta^{18}O$ 的相互关系 | 69 |
| 第3节 | 氧稳定同位素                                   | 71 |
|     | 一、氧稳定同位素的分馏                              | 71 |
|     | 二、氧稳定同位素丰度的自然变异                          | 74 |
| 第4节 | 氮稳定同位素                                   | 75 |
|     | 一、氮稳定同位素的分馏                              | 76 |
|     | 二、氮稳定同位素丰度的自然变异                          | 77 |
| 第5节 | 硫稳定同位素                                   | 78 |
|     | 一、硫稳定同位素的分馏                              | 79 |
|     | 二、硫稳定同位素丰度的自然变异                          | 79 |
|     | 主要参考文献                                   | 81 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 第4章 稳定同位素与碳循环研究                    | 87  |
| 第1节 光合作用                           | 89  |
| 一、光合途径与碳同位素比值                      | 89  |
| 二、光合生理生态特征                         | 90  |
| 第2节 呼吸和分解过程                        | 95  |
| 一、呼吸过程                             | 95  |
| 二、土壤呼吸                             | 96  |
| 三、植物衰老过程                           | 97  |
| 第3节 群落冠层水平的CO <sub>2</sub> 交换      | 99  |
| 一、群落冠层内CO <sub>2</sub> 碳同位素比值动态    | 99  |
| 二、森林内CO <sub>2</sub> 再循环           | 100 |
| 第4节 生态系统碳循环                        | 102 |
| 一、Keeling 曲线法                      | 102 |
| 二、生态系统呼吸同位素比值的变化格局                 | 104 |
| 三、生态系统呼吸组分的稳定同位素拆分                 | 107 |
| 四、生态系统碳同位素判别                       | 110 |
| 五、生态系统不同碳通量的拆分                     | 111 |
| 第5节 全球碳循环                          | 114 |
| 一、全球尺度大气CO <sub>2</sub> 同位素守恒原理    | 114 |
| 二、利用大气CO <sub>2</sub> 碳同位素拆分全球碳交换  | 115 |
| 三、利用大气CO <sub>2</sub> 的氧同位素拆分全球碳交换 | 116 |
| 主要参考文献                             | 118 |
| 第5章 稳定同位素与植物水分关系研究                 | 125 |
| 第1节 植物吸收水分过程的稳定同位素效应               | 128 |
| 一、陆地淡水植物                           | 128 |
| 二、滨海盐生植物                           | 129 |
| 三、干旱地区旱生植物和盐生植物                    | 131 |
| 第2节 植物水分来源的确定与量化                   | 134 |
| 一、植物不同水分来源的同位素拆分原理                 | 135 |
| 二、植物群落水分关系稳定同位素研究实例                | 136 |