

# 稳定同位素生态学: 先进技术推动的生态学新分支

林光辉<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>滨海湿地生态系统教育部重点实验室(厦门大学), 福建厦门 361005; <sup>2</sup>中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093

## Stable isotope ecology: a new branch of ecology resulted from technology advances

LIN Guang-Hui<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of the Ministry of Education for Coastal and Wetland Ecosystems (Xiamen University), Xiamen, Fujian 361005, China; and <sup>2</sup>State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

稳定同位素技术因具有示踪(tracers)、整合(integration)和指示(indicators)等多项功能, 以及检测快速、结果准确等特点, 在生态学研究中日显显示出广阔的应用前景。近年来, 由于生态学研究问题更趋复杂化和全球化, 多学科的交叉综合研究已成为本学科发展的新的生长点。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的工具, 使现代生态学家能够解决用其他方法难以解决的生态学问题(Rundel *et al.*, 1989; Ehleringer *et al.*, 1993; Yakir & Sternberg, 2000; Dawson *et al.*, 2002; Maguas & Griffiths, 2003; Fry, 2007)。例如, 在植物生理生态学方面, 稳定同位素技术使我们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。生态系统生态学家则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其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, 以及动物的迁移活动等方面的研究。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的重大影响一样, 稳定性同位素技术已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(Ciais *et al.*, 1995; Zanden *et al.*, 1999; Lin *et al.*, 1999; Battle *et al.*, 2000; Bowling *et al.*, 2001; Yopez *et al.*, 2003; Bukata & Kyser, 2007; Kosiba *et al.*, 2007)。由于众多同位素化学家和地球化学家前期的开拓性研究工作, 我们已经对稳定性同位素在生态系统和生物地球化学循环中的特性有了深入的了解(Farquhar *et al.*, 1989)。随着同位素研究技术与方法的日趋完善, 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。例如, 通过稳定同位素的分析, 不仅可以追踪重要元素如碳、氮和水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、林产品的组成成分、原产地及掺假可能性等等(Yakir & Sternberg, 2000; Dawson *et al.*, 2002; Maguas & Griffiths, 2003)。总之, 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响应与反馈作用等方面的认识, 拓展了生态学研究和应用的发展空间。美国Brian Fry专著《Stable Isotope Ecology》在2007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(Fry, 2007), 是

收稿日期Received: 2009-10-28 接受日期Accepted: 2009-12-07

\* E-mail: [lingh@xmu.edu.cn](mailto:lingh@xmu.edu.cn)

继遥感技术导致景观生态学迅速发展后又一门技术进步与生态学交叉产生的新兴学科, 显示出良好的发展前景。

虽然, 由于资金和设备的限制, 稳定同位素技术在我国生态学研究中的应用起步较晚, 但近十几年通过国际交流与合作以及我国科学家的不懈努力, 该技术已取得了重要的突破和进展, 逐渐成为我国生态学研究常用的一种技术。尽管我国生态研究人员发表了一系列总结国外研究的综述文章(林植芳, 1990; 陈世莘等, 2002; 王建柱等, 2004; 林光辉等, 2005; 孙双峰等, 2005; 孙伟等, 2005; 白志鹏等, 2007; 李由明等, 2007; 刘慧杰等, 2007; 任明忠和吴福源, 2007; 董子为等, 2009), 但原创的研究工作为数不多。值得一提的是, 2005年中国农业大学陆雅海教授课题组采用现代分子生态技术和稳定同位素示踪技术相结合的手段, 研究了水稻(*Oryza sativa*)根际碳循环的关键微生物种群和功能, 用稳定同位素技术在水稻根系发现了一组新古菌的产甲烷功能, 在《*Science*》发表了题为“*In situ stable isotope probing of Methanogenic archaea in the rice rhizosphere*”的研究论文(Lu & Conrad, 2005)。我们近几年也利用稳定同位素技术研究了三峡水位升高对库区动植物可能产生的生态效应(Sun *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2009), 以及外来种红树植物无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)的生理生态特性(Chen *et al.*, 2008)。从近几年我国众多生态研究单位投入巨资购买同位素比率质谱仪和其他相关仪器设备, 以及不断增加的各类基金项目资助使用稳定同位素技术研究生态学问题可以看出, 稳定同位素技术将在很大程度上提高我国生态学研究的深度和广度, 为稳定同位素生态学的发展做出更大的贡献。

为了反映稳定同位素技术在我国生态学研究应用的最新进展, 我们组织了7篇文章, 意在认识和理解近些年来稳定同位素技术在我国植物生态研究中发挥出的优势及其存在的普遍问题。例如, 张鹏等(2010)以分布于祁连山北麓中段的两种优势乔木祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)和青海云杉(*Picea crassifolia*)为研究对象, 分析了高山乔木叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值对海拔、土壤含水量和叶片含水量、叶片碳氮含量的响应及其机理, 发现海拔变化引起的水热条件的改变, 尤其是温度变化对高山乔木叶片碳同位素的分馏起主要作用。何春霞等(2010)结合碳同位素

分析和其他一些生理指标的测定, 研究了解树木生长的局部小环境条件差异对5种常见绿化树木生长的影响。王玉涛等(2010)则研究了北京地区75种不同生活型绿化植物叶片碳同位素组成的季节变化特征, 揭示了植物物种、生活型, 以及生长环境对植物水分利用效率的影响机理。何茜等(2010)比较了不同无性系间 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异, 并与气体交换参数建立相关关系, 阐明了稳定同位素技术在筛选高光合及高水分利用效率毛白杨(*Populus tomentosa*)无性系中的应用价值及其应注意的问题。这些研究具有一定的原创性, 并能结合我国农林业生产中普遍存在的一些植物生态学现象, 利用稳定同位素技术解决一些常规方法不容易解决的难题, 并且积累了一些重要的基础数据。

在另外3篇文章中, 作者阐述了其他稳定同位素技术在研究氮循环、水分关系, 以及污染物来源等方面的应用情景。吴田乡和黄建辉(2010)通过测定内蒙古锡林河流域围封和放牧条件下草原群落主要优势植物和土壤的 $\delta^{15}\text{N}$ 值, 发现放牧显著降低了表层土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值, 推测这种变化可能与长期放牧导致的氮循环速率降低有关。袁国富等(2010)比较了以水分同位素激光痕量气体分析仪(TDLAS)为基础构建的大气水汽同位素比值原位连续观测技术, 和以传统气体稳定同位素比率质谱仪为基础的Keeling曲线法(Keeling Plot)在区分麦田蒸散组分(即蒸腾和蒸发)方面的优缺点, 为研究生态系统水平的水分关系解决了一些技术问题。王艳红等(2010)则系统综述了天然硫稳定同位素和人为添加的硫稳定同位素在污染生态学研究中的应用现状, 并从其研究的范围、分析手段及源解析模型方面介绍了潜在的发展方向。我国由于近30多年经济的飞速增长, 已成为仅次于欧洲和北美的世界第三大酸雨区, 而酸雨主要是煤和石油燃烧后产生大量的硫氧化物 $\text{SO}_x$ 所造成的。因此, 利用稳定硫同位素技术研究生态系统中硫酸盐与大气硫的来源和动态, 可为硫元素的源-库和循环过程提供重要的信息。虽然稳定硫同位素分析在国外已经进行了大量的研究, 但是目前在国内能够进行稳定硫同位素含量分析的研究单位还很少, 而且分析费用较高, 限制了稳定硫同位素技术的应用, 需要在今后的研究资助计划中给予特别的重视。

从以上的研究报告和综述论文可以看出, 各位

作者都十分认同稳定同位素技术在植物生态学研究中的应用前景,但也指出了应用这种先进技术存在的一些问题。近几年稳定同位素技术在我国生态学研究中的普及应用,在生态学和相关领域如环境科学、林学、农学等掀起一股稳定同位素的热潮。加上过去十几年来稳定同位素分析仪器品种的增多、自动化程度的提高、方法的不断完善和分析费用的降低,会有更多的生态学科人员投入到稳定同位素生态学的学科建设和完善中,促进这一新学科的进一步发展。然而,应该强调的是,我们不应一味地模仿国外过去20年里开展过的研究,而是应该在稳定同位素生态学的学科理论框架、相关分析技术研发和仪器改进,以及如何利用稳定同位素技术解决我国特殊生态学问题等方面下足功夫,为本学科的进一步发展做出贡献。由于我国现行的科研政策鼓励科研人员到国外发表SCI论文,以上介绍的7篇论文并不代表我国稳定同位素生态学研究的最高水平,仅仅是稳定同位素技术在我国植物生态学应用情景的冰山一角,但我们还是要向读者推荐这些研究成果,相信它们能为我国稳定同位素生态学更深入的研究提供一些借鉴。

## 参考文献

- Bai ZP (白志鹏), Zhang LW (张利文), Zhu T (朱坦), Feng YC (冯银厂) (2007). The status of applying stable isotope in the studies of environmental science. *Journal of Isotopes (同位素)*, 20(1), 57–64. (in Chinese with English abstract)
- Battle M, Bender ML, Tans PP, White JWC, Ellis JT, Conway T, Francey RJ (2000). Global carbon sinks and their variability inferred from atmospheric O<sub>2</sub> and  $\delta^{13}\text{C}$ . *Science*, 287, 2467–2470.
- Bowling DR, Tan PP, Monson RK (2001). Partitioning net ecosystem carbon exchange with isotopic fluxes of CO<sub>2</sub>. *Global Change Biology*, 7, 127–145.
- Bukata AR, Kyser TK (2007). Carbon and nitrogen isotope variations in tree-rings as records of perturbations in regional carbon and nitrogen cycles. *Environmental Science & Technology*, 41, 1331–1338.
- Chen LZ, Tam NFY, Huang JH, Zeng XQ, Meng XL, Zhong CR, Wong YS, Lin GH (2008). Comparison of ecophysiological characteristics between introduced and indigenous mangrove species in China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 79, 644–652.
- Chen SP (陈世莘), Bai YF (白永飞), Han XG (韩兴国) (2002). Applications of stable carbon isotope techniques to ecological research. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, 26, 549–556. (in Chinese with English abstract)
- Ciais P, Tans PP, Trolier M, White JW, Francey RJ (1995). A large northern hemisphere terrestrial CO<sub>2</sub> sink indicated by the  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratio of atmospheric CO<sub>2</sub>. *Science*, 269, 1098–1102.
- Dawson TE, Mambelli S, Plamboeck AH, Templer PH, Tu KP (2002). Stable isotope in plant ecology. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 33, 507–559.
- Dong ZW (董子为), Li JH (李建华), Yang CM (杨长明), Zhao JF (赵建夫) (2009). Application of stable isotopes approach on riparian zone function research. *Environmental Science and Management (环境科学与管理)*, 34(7), 116–120. (in Chinese with English abstract)
- Ehleringer JR, Hall AE, Farquhar GD (1993). *Stable Isotopes and Plant Carbon/Water Relations*. Academic Press, San Diego, CA, USA.
- Farquhar GD, Ehleringer JR, Hubick KT (1989). Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 40, 503–537.
- Fry B (2007). *Stable Isotope Ecology*. Springer, New York.
- He CX (何春霞), Li JY (李吉跃), Zhang YX (张燕香), Zheng QS (郑泉水), Xie B (谢博), Ding YT (丁映婷) (2010). Differences in leaf mass per area, photosynthetic pigments and  $\delta^{13}\text{C}$  by orientation and crown position in five greening tree species. *Chinese Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 34, 134–143. (in Chinese with English abstract)
- He Q (何茜), Li JY (李吉跃), Shen YB (沈应柏), Chen XY (陈晓阳), Shang FH (尚富华), Hu L (胡磊), Zhang ZY (张志毅) (2010). Difference in  $\delta^{13}\text{C}$  and gas exchange parameters among *Populus tomentosa* clones. *Chinese Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 34, 144–150. (in Chinese with English abstract)
- Kosiba SB, Tykot RH, Carlsson D (2007). Stable isotopes as indicators of change in the food procurement and food preference of Viking Age and Early Christian populations on Gotland (Sweden). *Journal of Anthropological Archaeology*, 26, 394–411.
- Li YM (李由明), Huang XH (黄翔鹤), Liu CW (刘楚吾) (2007). Applications of stable carbon and nitrogen isotopes to studies of animal diets. *Journal of Guangdong Ocean University (广东海洋大学学报)*, 27(4), 99–103. (in Chinese)
- Lin GH, Ehleringer JR, Rygielwicz PT, Johnson MG, Tingey DT (1999). Elevated CO<sub>2</sub> and temperature impacts on different components of soil CO<sub>2</sub> efflux in Douglas-fir terracosms. *Global Change Biology*, 5, 157–168.
- Lin GH (林光辉), Huang JH (黄建辉), Chen SP (陈世莘) (2005). Stable isotope techniques for ecological research. In: Chen JQ (陈吉泉), Li B (李博), Ma ZJ (马志军), Zhao

- B (赵斌) eds. *Challenges Faced by Ecologists: Problems and Solutions*. Higher Education Press, Beijing. 103–144. (in Chinese)
- Lin ZF (林植芳) (1990). Applications of stable carbon isotopes to study plant physiological and ecology. *Plant Physiology Communications* (植物生理学通讯), (3), 1–6. (in Chinese)
- Liu HJ (刘慧杰), Tian Y (田蕴), Zheng TL (郑天凌) (2007). Application of stable isotope probing in bioremediation of polluted environment. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 13, 443–448. (in Chinese with English abstract)
- Lu YH, Conrad R (2005). *In situ* stable isotope probing of methanogenic archaea in the rice rhizosphere. *Science*, 309, 1088–1090.
- Maguas C, Griffiths H (2003). Applications of stable isotopes in plant ecology. *Progress in Botany*, 64, 472–505.
- Ren MZ (任明忠), Wu FY (吴福源) (2007). Progress of stable isotopic fractionation in environmental behaviors of organic contaminants. *Journal of Earth Sciences And Environment* (地球科学与环境学报), 29, 422–428. (in Chinese with English abstract)
- Rundel PW, Ehleringer JR, Nagy KA (1989). *Stable Isotopes in Ecological Research*. *Ecological Studies* 68. Springer-Verlag, New York.
- Sun SF (孙双峰), Huang JH (黄建辉), Lin GH (林光辉), Zhao W (赵威), Han XG (韩兴国) (2005). Application of stable isotope technique in the study of plant water use. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 25, 2362–2371. (in Chinese with English abstract)
- Sun SF, Huang JH, Han XG, Lin GH (2008). Comparisons in water relations of plants between newly formed riparian and non-riparian habitats along the bank of Three Gorges Reservoir, China. *Trees*, 22, 717–728.
- Sun W (孙伟), Lin GH (林光辉), Chen SP (陈世莘), Huang JH (黄建辉) (2005). Applications of stable isotope techniques and keeling plot approach to carbon and water exchange studies of terrestrial ecosystems. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 29, 851–862. (in Chinese with English abstract)
- Wang JZ (王建柱), Lin GH (林光辉), Huang JH (黄建辉), Han XG (韩兴国) (2004). Applications of stable isotopes to study plant-animal relationships in terrestrial ecosystems. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 49, 2339–2347. (in Chinese)
- Wang J, Huang J, Wu J, Han XG, Lin GH (2009). Habitat insularization affects foraging behavior and dynamics of local rodent populations: exploring ecological consequences of the Three Gorges Dam. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7, doi:10.1890/070188.
- Wang YT (王玉涛), Li JY (李吉跃), Liu P (刘平), Chen C (陈崇), He CX (何春霞) (2010). Seasonal differences in leaf carbon isotope composition among landscaping species of different life forms in Beijing, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 34, 151–159. (in Chinese with English abstract)
- Wang YH (王艳红), Jiang H (江洪), Yu SQ (余树全), Li W (李巍), Lin XQ (林曦乔) (2010). A review of applications of sulfur stable isotope technology in ecological studies. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 34, 179–185. (in Chinese with English abstract)
- Wu TX (吴田乡), Huang JH (黄建辉) (2010). Effects of grazing on the  $\delta^{15}\text{N}$  values of foliage and soil in a typical steppe ecosystem in Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 34, 160–169. (in Chinese with English abstract)
- Yakir D, Sternberg LDL (2000). The use of stable isotopes to study ecosystem gas exchange. *Oecologia*, 123, 297–311.
- Yepez EA, Williams DD, Scott RL, Lin GH (2003). Partitioning overstory and understory evapotranspiration in a semiarid savanna woodland from the isotopic composition of water vapor. *Agricultural and Forest Meteorology*, 119, 53–68.
- Yuan GF (袁国富), Zhang N (张娜), Sun XM (孙晓敏), Wen XF (温学发), Zhang SC (张世春) (2010). Partitioning wheat field evapotranspiration using Keeling Plot method and continuous atmospheric vapor  $\delta^{18}\text{O}$  data. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 34, 170–178. (in Chinese with English abstract)
- Zanden MJV, Casselman JM, Rasmussen JB (1999). Stable isotope evidence for the food web consequences of species invasions in lakes. *Nature*, 401, 464–467.
- Zhang P (张鹏), Wang G (王刚), Zhang T (张涛), Chen NL (陈年来) (2010). Responses of foliar  $\delta^{13}\text{C}$  in *Sabina przewalskii* and *Picea crassifolia* to altitude and its mechanism in the Qilian Mountains, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 34, 125–133. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 王 蔚