

文章编号: 1001-1498(2009)01-0109-06

稳定性同位素技术在森林生态系统 碳水通量组分区中的应用

郑秋红, 王兵

(中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所; 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091)

摘要: 生态系统碳水循环过程中的同位素分馏效应, 为区分生态系统净碳交换过程中光合和呼吸通量, 蒸散通量中植物蒸腾和土壤蒸发提供了理论依据。本文综述了稳定性同位素技术在这一领域的应用进展。研究结果显示, 此方法切实可行, 为进一步解释森林生态系统过程提供了广阔的前景。但由于森林生态系统结构复杂, 不确定性因素多, 国内外研究还处于尝试阶段。该方法在森林生态系统应用中还存在诸如 Keeling图技术和涡度相关技术的假设条件难以满足等问题, 期待今后在技术和理论上的突破。

关键词: 稳定性同位素技术; 森林生态系统; 碳水通量; 组分区

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

Applications of Stable Isotope Techniques to Determine Components of CO₂ and H₂O Fluxes in Forest Ecosystems

ZHENG Qiu-hong, WANG Bing

(Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, CAF; Key Laboratory of Forest Ecological Environment, State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: Isotopic fractionation during the carbon and water processes of ecosystem provides the chances to partition ecosystem CO₂ flux into photosynthesis flux and respiration flux, and partition evapotranspiration flux into soil evaporation flux and plant transpiration flux. In this paper stable isotope techniques applied to forest ecosystems were overviewed. Research results showed that applications of stable isotope techniques to determine components of CO₂ and evapotranspiration fluxes in forest ecosystems were possible. But because of the complexity and uncertainty of forest ecosystems, studies in this field were difficult. Many problems were to be solved urgently, for example, the techniques relied on Keeling plot and eddy covariance techniques but their hypothesis were difficult to be match in forest ecosystems, expecting the progresses in techniques and theories.

Key words: stable isotope techniques; forest ecosystems; CO₂ and H₂O fluxes; components partition

自从 20 世纪 30 年代末 Nier 和 Gulbransen^[1] 首先发现植物体内 ¹³C 含量比周围环境中偏低以来, 经过 50、60 年代的探索发展期^[2-6], 70 年代, 植物生理生态方面的稳定性碳同位素理论开始形成并在植

物光合作用途径判别方面得以应用^[7-11]。80 年代后伴随着光合作用同位素分馏过程的揭示, 生态系统的稳定性碳同位素理论迅速发展^[12-16]。与此同时, 植物生理生态方面的氢、氧同位素研究也逐步开

收稿日期: 2007-03-19

基金项目: 北京市科委重大科技项目“北京山区森林健康经营关键技术研究与示范”(D0706001000091); 国家自然科学基金重大项目“我国主要陆地生态系统对全球变化的响应与适应性样带研究”(30590381-06); 江西大岗山国家级森林生态站资助

作者简介: 郑秋红(1975—), 女, 河北滦县人, 博士后, 主要从事陆地生态系统关键过程长期观测与模拟研究。

展起来^[17-21]。近 20 年来,在国外,稳定性同位素技术作为一项比较成熟的技术已逐步在生态学研究的诸多领域大量应用,例如确定植物水分来源、水分利用效率与育种、植物对生源元素吸收、生态系统气体交换、全球变化与碳平衡等方面^[22-27]。在我国,由于受到技术设备和其他一些因素的限制,植物生理生态方面的稳定性同位素的研究和应用还处于起步阶段,只有少数单位和研究者在研究中使用了该项技术^[28-35]。

近几年,国内陆续有一些综述性的文章发表,为稳定性同位素技术在我国生态学中的进一步应用奠定了基础。曹燕丽等^[36]、石辉等^[37]、陈世莘等^[38]、孙双峰等^[39]、陈英华等^[40]综述了稳定性氢氧同位素在确定植物水源、水分利用效率、水分胁迫等方面的应用;陈世莘等^[38]同时综述了稳定性碳同位素在植物光合途径判别、生态系统功能群的划分、全球碳库分布方面的研究进展;刘启明等^[41]综述了稳定碳同位素技术在生态转换系统土壤有机质变化研究中的应用;郑淑霞和上官周平^[42]综述了碳稳定性同位素技术在全球变化研究中的应用;丁明明等^[43]综述了碳稳定同位素技术在林木遗传改良中的应用。

国际上,运用稳定性同位素技术区分生态系统碳水通量组分已经成为一个热点问题,这为更深入地了解生态系统过程提供了重要手段^[44]。孙伟等^[45]和于贵瑞等^[46]曾相继发表文章对该方法的基本原理加以介绍,但迄今国内还未见有这方面的研究成果发表。本文试图在此基础上,对该方法在森林生态系统研究中的应用进展给予综述,并分析目前研究中存在的问题和未来发展前景,为我国森林生态学研究引入该方法提供参考。

1 森林生态系统碳水循环过程中对碳、氢、氧同位素的分馏效应

1.1 碳循环过程中对碳、氧同位素的分馏效应

生态系统中碳的输入主要靠植物的光合作用。植物在光合作用过程中,因同位素扩散效应和光合酶系统对同位素的分馏作用,导致了植物光合作用合成的碳水化合物中的¹³C的贫化,同时也使其叶片周围空气 CO₂ 的¹³C得到富集,而且不同的光合作用途径的碳同位素分馏效应不同,其中以 C₃植物的分馏效应最大^[7-9, 46]。

植物光合作用生成的碳水化合物在其代谢和转化过程中也会发生同位素分馏,因此在植物体内的

不同组织和物质成分间的稳定性同位素组成也有不同程度的差异。最终,这些物质以凋落物的形式返还到地表,碳在土壤中的储量和存储时间是陆地生态系统碳库中最大和最长的,土壤有机质是综合反映长时间尺度生态系统初级生产力过程特征的碳库^[31, 46]。

生态系统在光合和呼吸过程中,也存在 O 同位素的分馏效应。在光合作用过程中进入叶片内部的 CO₂ 的大部分 (2/3) 不能被固定下来,而又被重新释放回空气,在此过程中,CO₂ 中的¹⁸O 会与叶片内水中的¹⁸O 发生溶解平衡反应,发生同位素交换。由于叶片内的水因蒸腾作用强烈富集¹⁸O,结果导致在植物光合作用过程中释放的 CO₂ 会富集¹⁸O^[47]。同样,土壤呼吸产生的 CO₂ 在从土壤释放到大气的过程中也会与土壤水分产生同位素交换反应,但是土壤水分中¹⁸O 的含量比叶片中的低很多。而且释放 CO₂ 的速度较快,发生同位素交换反应的程度一般较低。所以土壤呼吸过程所释放的 CO₂ 中的¹⁸O 含量比空气中的要低^[46, 48]。

1.2 水循环过程中对氢、氧同位素的分馏效应

在降水过程中,重同位素比轻同位素先下落,在大气运动过程中,轻同位素比重同位素运动的更快,因此降水中的²H 和¹⁸O 值在陆地上的不同纬度、不同海拔及与海洋距离不同的地区呈现规律变化^[49]。

生态系统水分向大气的输出包括蒸腾和蒸发两个过程。在水分蒸发过程中,由于平衡效应 (equilibrium effect) 和动力学效应 (kinetic effect), 导致液态中的重同位素含量比气态中的高^[46]。土壤水和地表水的蒸发过程都存在以上两种效应造成的同位素分馏效应。对于植物而言,尽管其叶片内的水分也是以蒸发的形式与大气进行水气交换的,但在水分流经树干向叶片的迁移过程中通常无同位素分馏^[48, 50-51]。当植物蒸腾过程处于稳定平衡态 (ISS, isotopic steady state) 时,植物叶片蒸发水气的稳定性同位素组成与来自树干的水分的同位素组成是相等的^[48]。

2 稳定性同位素技术在森林生态系统碳水通量组分区中的应用

2.1 森林生态系统净碳交换过程中光合和呼吸通量的区分

在稳定性同位素技术对生态系统通量组分区研究方面,目前应用比较多的是在农田和草地生态

系统中。与农田等人工生态系统相比,天然森林生态系统具有结构和影响因素复杂,异质性高等特点,这些都会对生态系统的光合和呼吸过程的同位素效应造成影响。在总结借鉴 Yakir 和 Wang 运用同位素方法对农田生态系统光合和呼吸通量区分的基础上, Bowling 等人首次结合涡度相关技术和 Keeling 图技术,提出了将该方法应用于森林生态系统的理论与推导过程,并对美国田纳西州东部的一片自然落叶林的光合和呼吸通量进行了区分^[25-26, 52-53]。基本原理如下:

根据质量守恒原理,生态系统净碳交换量 NEE 可以表示为^[54]:

$$NEE = wC + \frac{dC}{dt} = F_R + F_A \quad (1)$$

式中, wC 为涡度相关测定的总 CO_2 通量; $\frac{dC}{dt}$ 为从地面到测定高度上 CO_2 摩尔浓度变化速率; F_R 为生态系统总呼吸释放 CO_2 通量,包括土壤异养生物呼吸、根系呼吸、树干呼吸; F_A 为净光合同化 CO_2 通量,等于总光合吸收通量与叶呼吸通量之差;遵循 Ruimy 等^[55]和 Lloyd 等^[56]的计算法则,叶呼吸通量在白天算入 F_A 中,在夜间算入 F_R 中。经过一系列换算,得到 $^{13}CO_2$ 的标准通量方程^[26]:

$$isoflux = ^{13}C_r F_R + (^{13}C_a -) F_A \quad (2)$$

式中, $^{13}C_r$ 为光合作用同位素判别。利用公式 (1) 和 (2), 可将 F_A 和 F_R 加以区分。在 Bowling 等^[26]的研究中,公式 (1) 中的 wC 项利用涡度相关仪测定冠层上 CO_2 通量获得, $\frac{dC}{dt}$ 通过测定垂直剖面上不同高度的 CO_2 摩尔浓度获得。利用气瓶取样技术^[51]建立 CO_2 摩尔浓度与 $^{13}C_a$ 之间的直线关系式,在 CO_2 摩尔浓度已知的情况下,通过此关系式计算林内不同高度上的 $^{13}C_a$ 值,公式 (2) 中的 $^{13}C_a$ 即为求得的林冠层之上大气本底 $^{13}C_a$ 值, $^{13}C_a$ 取夜间冠层高度处 Keeling 图的截距。

研究结果表明,稳定性同位素确实携带着足够的信息对森林生态系统的光合和呼吸通量进行区分。文章求出了 F_A 和 F_R 的日变化曲线,与通过夜间 NEE 与温度指数回归法得到的结果基本一致。敏感性分析显示此方法对冠层导度 (影响值) 非常敏感。此研究是同位素方法用于复杂的自然森林生态系统光合和呼吸通量区分的一个比较成功的范例。

在 Bowling 等^[26]的研究中,认为生态系统呼吸过程释放的 CO_2 的 ^{13}C 主要取决于光合作用判别结果,忽略植物体内的不同组织和土壤中的稳定性同位素组成之间的差异。Sakata 等^[57]人在对日本一片落叶阔叶林的研究中,对土壤呼吸通量中来自根系、土壤有机质和枯落物三部分进行了区分,在夏季三者贡献之比为 51:44:5,而在冬季三者贡献之比为 20:11:69,全年平均为 30:43:27。Ngao 等^[58]采用同样的方法对法国 Hesse 州的山毛榉 (*Fagus sp.*) 林枯落物分解对土壤呼吸的贡献进行了研究,其贡献率由早春季的 2.8% 到仲夏季上升到 11.4%,在落叶后下降到 4.2%,全年比率为 8%。

2.2 森林生态系统蒸散通量中植被蒸腾和土壤蒸发的区分

生态系统蒸散通量由植物蒸腾和土壤蒸发两部分组成。通过大气采样和同位素分析,可以利用 Keeling 图技术建立生态系统水汽 (包括空气本底和蒸散) 同位素组成与空气湿度倒数之间的线性关系式。在植物蒸腾达到稳定平衡态时,植物蒸腾释放水汽的同位素组成与其来源水 (木质部中的水) 的同位素组成相同,通过测定木质部水分的 D 和 ^{18}O 值,确定蒸腾通量的同位素特征。土壤蒸发过程存在同位素分馏,蒸发通量中的同位素含量可以用下式计算^[59-60]:

$$R_E = \left(\frac{1}{k}\right) \frac{(R_S / ^*) - R}{1 - h} \quad (3)$$

式中, R_E 为蒸发水汽中重轻同位素比率; R_S 为蒸发面水分同位素比率; R 为大气水汽同位素比率; h 为空气相对湿度; * 和 k 同前,分别为蒸发过程中的同位素平衡分馏系数和动力学分馏系数。 * 与温度有关,在 25 °C 下,对于 ^{18}O 而言 * 取值 9.3‰, D 的 * 取值 76.4‰^[61]。在 Merlivat^[62]的研究中, ^{18}O 和 D 的 k 分别取值 1.028 5 和 1.025; 在扰动界面上, ^{18}O 和 D 的 k 分别取值 1.018 9 (大约 19‰) 和 1.017 (大约 17‰)^[49, 63]。

Moreira 等^[59]运用此方法对南美洲亚马逊盆地的两片热带雨林进行研究,通过绘制 Keeling 图,对比水汽同位素组成、空气湿度、蒸腾三者的日变化曲线,定性研究,发现蒸腾在该区旱季森林水循环中发挥着重要作用,是蒸散通量的主要来源。Harwood 等^[64]也是通过观测,进行类似定性比较,指出该方法的耦合程度取决于水汽交换中各库的同位素组成及其时间稳定性。

Yepez等^[60]进一步将此方法与涡度相关测定相结合,在晴朗风小的天气条件下,成功地对美国亚利桑那州的半干旱稀树草原林的土壤蒸发、冠层蒸腾和冠下植被蒸腾进行了定量区分,结果表明 9月份该生态系统蒸散通量主要来自冠层蒸腾。Williams等^[65]在摩洛哥一片人工橄榄 (*Olea europaea* L.)林内,将稳定性同位素方法分离的土壤蒸发和植物蒸腾量与用树液流测定方法求得的蒸发蒸腾量进行比较,在中午天气条件稳定的情况下两者结果相似,指出在生态系统尺度上,稳定性同位素分析与涡度相关技术结合分离蒸发蒸腾量是基于单株树液流测定尺度外推法的有效替代,而且比后者更直接,限制条件更少。

3 结论与讨论

自然界物理和生物过程中存在的同位素分馏效应,为利用同位素含量来研究这些过程提供了条件^[66-67]。稳定性同位素技术与涡度相关技术和 Keeling图技术相结合,对生态系统碳交换中的光合和呼吸通量的区分以及水通量中的蒸腾和蒸发的区分,是当前研究的重要方向。稳定性同位素技术凭借着其测定结果准确、应用起来安全等特点,在这一领域的研究中,显示出了其他方法所无法比拟的优越性,解决了一些其他方法所无法解决的难题。实际研究表明,该方法在森林生态系统中的应用是可行的,为进一步解释森林生态系统过程提供了广阔的前景。

但是,森林生态系统由于其结构复杂,不确定性因素多,目前,此方面的研究在国外还处于尝试阶段,总体上,该方面的研究还比较少,存在诸多问题,例如,生态系统 CO_2 和 H_2O (气)的同位素组成通过绘制 Keeling图求得,绘制 Keeling图要求 CO_2 和水汽在不同高度上存在一定的浓度梯度,实践表明,这在极端干旱地区是很难获得的。此方法对采样的要求高,需在天气状况稳定的条件下,生态系统处于同位素稳定平衡态 (ISS)时进行,取样要快,不能拖太长时间,这样才能保证所采集样品的质量和有效性。目前,定量研究依赖于将同位素技术与涡度相关技术联合来实现,而涡度相关技术对于下垫面平缓均质的生态系统比较有效,对于复杂的森林生态系统而言,基于涡度相关技术所得的结果在尺度外推上局限性较大。总之,稳定性同位素技术在给森林生态学研究带来重大突破的同时其本身也急待理论与技术上的进一步发展。

参考文献:

- [1] Nier A O, Gulbransen E A. Variations in the relative abundance of the carbon isotopes [J]. Journal of the American Chemical Society, 1939, 61: 697 - 698
- [2] Wickman F E. Variations in the relative abundance of the carbon isotopes in plants [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1952, 2: 243 - 252
- [3] Craig H. Carbon-13 in plants and the relationship between carbon-13 and carbon-14 variation in nature [J]. Journal of Geology, 1954, 62: 115 - 149
- [4] Park R, Epstein S. Carbon isotope fractionation during photosynthesis [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1960, 21: 110 - 126
- [5] Park R, Epstein S. Metabolic fractionation of ^{13}C and ^{12}C in plants [J]. Plant Physiology, 1961, 36: 133 - 138
- [6] Kortschak H P, Hartt C E, Burr G O. Carbon dioxide fixation in sugarcane leaves [J]. Plant Physiology, 1965, 40: 209 - 213
- [7] Bender M M. Variations in the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of plants in relation to the pathway of photosynthetic carbon dioxide fixation [J]. Phytochemistry, 1971, 10: 1239 - 1244
- [8] Smith B N, Epstein S. Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of for higher plants [J]. Plant Physiology, 1971, 47: 380 - 384
- [9] Downton W J S. The occurrence of C_4 photosynthesis among plants [J]. Photosynthetica, 1975, 9: 96 - 105
- [10] Raghavendra A S, Das V S R. Distribution of the C_4 dicarboxylic acid pathway of photosynthesis in local monocotyledonous plants and its taxonomic significance [J]. New Phytologist, 1976, 76: 301 - 305
- [11] Raghavendra A S, Das V S R. The occurrence of C_4 photosynthesis: A supplementary list of C_4 plants reported during late 1974-mid 1977 [J]. Photosynthetica, 1978, 12: 200 - 208
- [12] O Leary M H, Osmond C B. Diffusional contribution to carbon isotope fractionation during dark CO_2 fixation in CAM plants [J]. Plant Physiology, 1980, 66: 931 - 934
- [13] O Leary M. H. Carbon isotope fractionation in plants [J]. Phytochemistry, 1981, 20: 553 - 567
- [14] Farquhar G D, O Leary M H, Berry J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves [J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1982, 9: 121 - 137
- [15] Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1989, 40: 503 - 537
- [16] Stenberg L S L, Mulkey S S, Wright S J. Ecological interpretation of leaf carbon isotope ratios: Influence of respired carbon dioxide [J]. Ecology, 1989, 70: 1317 - 1324
- [17] Epstein S, Yapp C J, Hall J H. The determination of the D/H ratio of nonexchangeable hydrogen in cellulose extracted from aquatic and land plants [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1976, 30: 241 - 251
- [18] De Niro M J, Epstein S. Relationship between oxygen isotope ratios of terrestrial plant cellulose, carbon dioxide and water [J]. Sci-

- ence, 1979, 204: 51 - 53
- [19] Yapp C J, Epstein S. Climatic significance of the hydrogen isotope ratios in tree cellulose [J]. *Nature*, 1982, 297: 636 - 639
- [20] Leaney F W, Omond C B, Allison G B, *et al*. Hydrogen-isotope composition of leaf water in C₃ and C₄ plants: Its relationship to the hydrogen-isotope composition of dry matter [J]. *Planta*, 1985, 164: 215 - 220
- [21] White J W C, Cook E R, Lawrence J R, *et al*. The D/H ratio of sap in trees: Implications for water sources and tree ring D/H ratios [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, 49: 237 - 246
- [22] Stenberg L S L, Swart P K. Utilization of fresh water and ocean water by coastal plants of southern Florida [J]. *Ecology*, 1987, 68: 1898 - 1905
- [23] Johnson R C, Li Y Y. Water relations, forage production, and photosynthesis in tall fescue divergently selected for carbon isotope discrimination [J]. *Crop Science*, 1999, 39: 1663 - 1670
- [24] Evans R D. Physiological mechanisms influencing plant nitrogen isotope composition [J]. *Trends Plant Science*, 2001, 6: 121 - 126
- [25] Yakir D, Wang X F. Fluxes of CO₂ and water between terrestrial vegetation and the atmosphere estimated from isotope measurement [J]. *Nature*, 1996, 380: 515 - 517
- [26] Bowling D R, Tans P P, Monson R K. Partitioning net ecosystem carbon exchange with isotopic fluxes of CO₂ [J]. *Global Change Biology*, 2001, 7: 127 - 145
- [27] Pataki D E, Ellsworth D S, Evans R D, *et al*. Tracing changes in ecosystem function under elevated carbon dioxide conditions [J]. *Bioscience*, 2003, 53: 805 - 818
- [28] Cheng X L, An S Q, Li B, *et al*. Summer rain pulse size and rain-water uptake by three dominant desert plants in a desertified grassland ecosystem in northwestern China [J]. *Plant Ecology*, 2006, 184: 1 - 12
- [29] 陈拓, 冯虎元, 徐世建, 等. 荒漠植物叶片碳同位素组成及其水分利用效率 [J]. *中国沙漠*, 2002, 22(3): 288 - 291
- [30] 黄建辉, 林光辉, 韩兴国. 不同生境间红树科植物水分利用效率的比较研究 [J]. *植物生态学报*, 2005, 29(4): 530 - 536
- [31] 于贵瑞, 王绍强, 陈泮勤, 等. 碳同位素技术在土壤碳循环研究中的应用 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(5): 568 - 577
- [32] 丁明明, 苏晓华, 黄秦军. 欧洲黑杨基因资源稳定同位素组成特征 [J]. *林业科学研究*, 2006, 19(3): 272 - 276
- [33] 王国安, 韩家懋, 周力平, 等. 中国北方黄土区 C₃ 植物稳定碳同位素组成的研究 [J]. *中国科学 D 辑*, 2005, 35(12): 1174 - 1179
- [34] 徐庆, 刘世荣, 安树青, 等. 川西亚高山暗针叶林降水分配过程中氧稳定同位素特征 [J]. *植物生态学报*, 2006, 30(1): 83 - 89
- [35] 刘启明, 王世杰, 朴河春, 等. 稳定碳同位素示踪农林生态转换系统中土壤有机质的含量变化 [J]. *环境科学*, 2002a, 23(3): 75 - 78
- [36] 曹燕丽, 卢琦, 林光辉. 氢稳定性同位素确定植物水源的应用与前景 [J]. *生态学报*, 2002, 22(1): 111 - 117
- [37] 石辉, 刘世荣, 赵晓广. 稳定性氢氧同位素在水分循环中的应用 [J]. *水土保持学报*, 2003, 17(2): 163 - 166
- [38] 陈世苹, 白永飞, 韩兴国. 稳定碳同位素技术在生态学研究中的应用 [J]. *植物生态学报*, 2002, 26(5): 549 - 560
- [39] 孙双峰, 黄建辉, 林光辉, 等. 稳定同位素技术在植物水分利用研究中的应用 [J]. *生态学报*, 2005, 25(9): 1362 - 2371
- [40] 陈英华, 胡俊, 李裕红, 等. 碳稳定同位素技术在植物水分胁迫研究中的应用 [J]. *生态学报*, 2004, 24(5): 1027 - 1033
- [41] 刘启明, 王世杰, 朴河春, 等. 生态转换系统中土壤有机质变化的稳定碳同位素示踪研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2002b, 1(2): 58 - 60
- [42] 郑淑霞, 上官周平. 陆生植物稳定碳同位素组成与全球变化 [J]. *应用生态学报*, 2006, 17(4): 733 - 739
- [43] 丁明明, 苏晓华, 黄秦军. 碳稳定同位素技术在林木遗传改良中的应用 [J]. *世界林业研究*, 2005, 18(5): 21 - 26
- [44] Yakir D, Stenberg L D. The use of stable isotopes to study ecosystem gas exchange [J]. *Oecologia*, 2000, 123: 297 - 311
- [45] 孙伟, 林光辉, 陈世苹, 等. 稳定性同位素技术与 Keeling 曲线法在陆地生态系统碳/水交换研究中的应用 [J]. *植物生态学报*, 2005, 29(5): 851 - 862
- [46] 于贵瑞. 陆地生态系统通量观测的原理与方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 285 - 306
- [47] Bowling D R, Baldocchi D D, Monson R K. Dynamics of isotopic exchange of carbon dioxide in a *Tennessee deciduous* forest [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(4): 903 - 922
- [48] Flanagan L B, Comstock J P, Ehleringer J R. Composition of modeled and observed environmental influences on the stable oxygen and hydrogen isotope composition of leaf water in *Phaseolus vulgaris* L. [J]. *Plant Physiology*, 1991, 96: 588 - 596
- [49] 王建柱, 林光辉, 黄建辉, 等. 稳定同位素在陆地生态系统动植物相互关系研究中的应用 [J]. *科学通报*, 2004, 49(21): 2141 - 2149
- [50] Flanagan L B, Ehleringer J R. Stable isotope composition of stem and leaf water: applications to the study of plant water use [J]. *Functional Ecology*, 1991, 5: 270 - 277
- [51] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: perspective from stable isotope composition [J]. *Plant, Cell and Environment*, 1992, 15: 1073 - 1082
- [52] Keeling C D. The concentration and isotopic abundances of atmospheric carbon dioxide in rural areas [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1958, 13: 322 - 334
- [53] Keeling C D. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in rural and marine air [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1961, 24: 277 - 298
- [54] Wofsy S C, Goulden M L, Munger J W, *et al*. Net exchange of CO₂ in a mid-latitude forest [J]. *Science*, 1993, 260: 1314 - 1317
- [55] Ruimy A, Jarvis P G, Baldocchi D D, *et al*. CO₂ fluxes over plant canopies and solar radiation: a review [J]. *Advances in Ecological Research*, 1995, 26: 1 - 68
- [56] Lloyd J, Kruijt B, Hollinger D Y, *et al*. Vegetation effects on the isotopic composition of atmospheric CO₂ at local and regional scales: theoretical aspects and a comparison between rain forest in Amazon

- nia and a boreal forest in Siberia [J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1996, 23: 371 - 399
- [57] Sakata T, Ishizuka S, Takahashi M. Separation of soil respiration into CO₂ emission sources using ¹³C natural abundance in a deciduous broad-leaved forest in Japan [J]. Soil Science & Plant Nutrition, 2007, 53 (3): 328 - 336
- [58] Ngao J, Epron D, Brechet C, *et al* Estimating the contribution of leaf litter decomposition to soil CO₂ efflux in a beech forest using ¹³C-depleted litter [J]. Global Change Biology, 2005, 11: 1768 - 1776
- [59] Moreira M Z, Martinelli L A, Victoria R L, *et al* Contribution of transpiration to forest ambient vapour based on isotopic measurements [J]. Global Change Biology, 1997, 3: 439 - 450
- [60] Yepez, E A, Williams D G, Scott R L, *et al* Partitioning overstory and understory evapotranspiration in a semiarid savanna woodland from the isotope composition of water vapor [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 119: 53 - 68
- [61] Majoube M. Fractionnement en oxygene-18 et en deuterium entre l'eau et sa vapeur [J]. Journal of Chemical Physics, 1971, 68: 1423 - 1436
- [62] Merlivat L. Molecular diffusivities of H₂¹⁸O in gases [J]. Journal of Chemical Physics, 1978, 69: 2864 - 2871
- [63] Wang X F, Yakir D. Using stable isotopes of water in evaporation studies [J]. Hydrological Processes, 2000, 14: 1407 - 1421
- [64] Hardwood K G, Gillon J S, Roberts A, *et al* Determinants of isotopic coupling of CO₂ and water vapor within a *Quercus petraea* forest canopy [J]. Oecologia, 1999, 119: 109 - 119
- [65] Williams D G, Cable W, Hultine K, *et al* Evapotranspiration components determined by stable isotope, sap flow and eddy covariance techniques [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 125: 241 - 258
- [66] 徐庆, 刘世荣, 安树青, 等. 卧龙地区大气降水氢氧同位素特征的研究 [J]. 林业科学研究, 2006, 19 (6): 679 - 686
- [67] 徐庆, 蒋有绪, 刘世荣, 等. 卧龙巴郎山流域大气降水与河水关系的研究 [J]. 林业科学研究, 2007, 20 (3): 297 - 301