

陆地生态系统类型转变与碳循环

周广胜 王玉辉 蒋延玲 杨利民

(中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093)

摘要 土地利用变化引起的陆地生态系统类型转变对于全球碳循环有着极其重要的作用。通过总结国内外有关森林砍伐以及森林、草地转变成农田对于碳循环的影响, 阐述了可能引起全球“未知汇”现象的重要原因, 强调未来中国陆地生态系统碳循环研究应充分重视陆地生态系统类型转变对于全球碳循环的影响研究, 包括研究陆地生态系统的不同发展阶段(自然与退化生态系统)、利用方式的改变(森林转化为人工林或农田, 草地转化为农田、退耕还林草等)所引起的碳库类型转换的增汇机理及其对全球变化响应, 并指出了建立统一观测方法与规范的陆地生态系统碳通量观测网络、发展针对中国陆地生态系统特点、具有自主知识产权的陆地生态系统碳循环模型的重要性。

关键词 碳循环 陆地生态系统类型转变 碳源/汇 全球变化

CONVERSION OF TERRESTRIAL ECOSYSTEMS AND CARBON CYCLING

ZHOU Guang-Sheng WANG Yu-Hui JIANG Yan-Ling and YANG Li-Min

(Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract Conversion of terrestrial ecosystems resulting from land-use practice plays an important role in global carbon cycling. The studies on the effects of forest felling and the conversions of forest and grassland into farmland on terrestrial carbon budget are reviewed in this paper, and the possible reasons resulting in “missing sink” are also discussed. In terms of carbon studies, the authors point out that the effects of terrestrial conversion on carbon budget should be emphasized in the future carbon project of China, including the ecological processes and mechanisms of different development stages of terrestrial ecosystems (natural and degraded ecosystems), land-use changes (conversion of forest into plantation or farmland, conversion of grassland into farmland, and the conversion of agricultural land into natural vegetation (forest or grassland)) and their responses to global climate change. Meantime, concurrent observation methods and standards related to terrestrial carbon flux observation network as well as developing Chinese terrestrial carbon budget evaluation model should also draw more and more attention.

Key words Carbon cycling, Conversion of terrestrial ecosystems, Carbon source/sink, Global change

碳循环、水循环以及食物与纤维已成为当今全球变化研究的3大热点。准确地评估陆地生态系统碳循环不仅是准确地估算未来大气CO₂浓度、预测气候变化及其对陆地生态系统影响的关键(Berrien & Braswell, 1994), 也是履行《联合国气候变化框架公约(UNFCCC)》与《京都协议》国际公约及制定应对策略的关键。

陆地生态系统至少在两个方面影响着陆地碳循环: 一是土地利用的变化, 亦即生态系统类型的转变, 如森林改造成农业用地将导致CO₂向大气的净

释放; 二是净生态系统生产量的可能变化及由此引起的碳循环变化, 这些变化是由于大气中CO₂浓度的变化、其它生物地球化学循环和(或)自然-气候系统所引起, 已有大量的观测与研究(Bolin, 1977; 方精云等, 2001)。但关于生态系统类型的转变对于全球碳收支的影响研究还很少。

人类活动作为气候变化的重要驱动力, 不仅通过影响气候系统造成全球性的气候变化, 进而影响陆地生态系统的地理分布格局及其生产力(周广胜等, 1996; 周广胜等, 1997), 改变陆地生态系统的碳

收稿日期: 2001-06-25 接受日期: 2002-01-09

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX1-SW-01-12, KSCX2-I-07)、国家重点基础研究发展规划项目(G1999043407)和国家自然科学基金项目(30070642, 30028001)

E-mail: zhongs@public2.bta.net.cn

贮量和碳排放速率,从而影响陆地生态系统的碳循环;而且还在利用化石燃料以及改变森林、草地成为农田等的过程中使大量的有机碳以 CO_2 形式排放到地球大气中(Vitousek *et al.*, 1997)。仅在20世纪90年代,人口剧增引起的粮食需求增加就使得每年1200万 hm^2 的林地转化为耕地,250万 hm^2 林地转化为草地(Bouwman & Leemans, 1995)。据估计,到2025年全球耕地面积将增加至20亿 hm^2 ,其中增加耕地的60%在热带地区,5%在温带地区(Sauerbeck, 1992)。如此大面积的林地和草地转化为耕地,加之全球气候变化的影响必将引起陆地生态系统碳库的剧烈变化,从而严重地影响全球碳循环,加剧全球气候变化,进而威胁人类的生存环境。正因为如此,《京都协议》将一个国家或地区的 CO_2 排放与其经济发展联系起来,并强调准确评估温室气体的排放和寻找减少 CO_2 排放或增汇的陆地生态系统管理对策的重要性与紧迫性。

因此,十分有必要总结国内外有关陆地生态系统类型转变与碳循环的研究进展,探讨未来陆地生态系统碳循环,特别是中国陆地生态系统碳循环研究所面临的关键科学问题及其迫切需要解决的科学问题,为科学地管理陆地生态系统以减少 CO_2 排放,增加碳汇,保证本国经济的持续发展及履行《联合国气候变化框架公约》提供思路与方法。

1 森林生态系统管理与碳循环

全球森林面积约41.61亿 hm^2 ,其中热带、温带、寒温带分别占32.9%、24.9%和42.1%(WBGU Special Report, 1998)。全球森林生态系统的碳贮量约114.6 Pg C,其中约50%贮存在北方林中,热带森林和温带森林分别为37%和13.8%,但北方林中84%的碳贮存在土壤中,而热带森林和温带森林土壤中的碳分别为50%和62.9%。全球平均而言,森林土壤及其有机层贮存了森林生态系统39%的碳,其余碳素贮存在植被之中(Dixon *et al.*, 1994)。

森林砍伐与碳循环:热带地区的大规模毁林活动早就引起了人们的重视,目前由于原始森林受毁导致的次生森林或林用种植园在热带至寒温带都有分布,由此造成的森林生物量的变化必将影响森林的碳贮量。与自然森林相比,热带地区种植园的森林地上生物量较自然森林低20%~50%;温带地区生产性森林的地上生物量较自然森林低40%~50%(WBGU Special Report, 1998)。次生森林和不定期砍伐森林的木本植物生物量较自然森林低30%

~80%(FAO, 1981)。因此,砍伐或开采自然森林后形成的次生林的固碳能力将降低。

森林收获早亦将引起固碳量的降低。一般温带森林生长到20~50年,热带森林生长到60~120年即被砍伐,而在无干扰生长条件下累积到原始森林的碳贮量,温带次生林需150~250年(Harmon *et al.*, 1990),热带森林则需150年以上(Feanside, 1996)。平均而言,经过几个“生长-收获”周期后,人工林的碳贮量仅是未干扰立地或原始林的30%(Cooper, 1983)。

森林砍伐不仅影响森林的固碳能力,而且影响土壤碳排放。由于森林皆伐使得温度和水分条件都发生变化,土壤呼吸在许多年内都超过幼年树木同化固碳能力,亦即成为碳源。森林收获后土壤碳含量一直处于下降状态,一般需要经过20~50年才可使土壤碳含量增加(Cohen *et al.*, 1996; Black & Harden, 1995)。但经过多个“生长-收获”长期经营森林的土壤碳贮量如何变化还不清楚。

森林转变成农田与碳循环:至1998年已有约750×10⁶ hm^2 的森林被用作农田,占土地利用变化的45%(Lal *et al.*, 1998)。森林被用作农田后,土壤碳贮量的损失因气候,土壤初始碳含量和管理措施的不同而不同。一般而言,1 m深度土层内的土壤碳损失25%~30%(Houghton, 1995),耕作层(0~20 cm)损失最大,可达40%(Davidson & Ackermann, 1993)。森林用作农田后,土壤碳含量一直处于下降状态,尤其在前5年,与森林砍伐类似,一般需经过20~50年才可使土壤碳含量增加(Arrouys *et al.*, 1995)。

值得注意的是,关于森林退化与碳贮量的研究则较少。据FAO1990年统计资料,全球范围内的森林退化速度比毁林速度高出几倍(FAO, 1993)。由于森林退化将改变森林的立地结构、微气候和土壤状况,从而通过影响森林的固碳能力和土壤碳排放影响全球碳平衡。《京都协议》尽管强调将1990年以来的“造林、再造林和毁林”作为评价一个国家减少温室气体排放的主要依据,但没有将森林退化考虑到毁林之中,是不足的。因此,退化森林的碳贮量应该引起足够的重视。

2 草地转换成农田与碳循环

全球的草地面积,包括热带草原、温带草原、冻原及高寒草原,约为44.5亿 hm^2 ,碳贮量达761 Pg C,其中植被占10.6%,土壤则占89.4%(Atjay *et*

al., 1979)。单位面积的温带草原碳贮量较热带草原大,一般为热带草原的2~4倍(Houghton & Hackler, 1995)。

由于人口增加以及对粮食需求的增加,大量草地被开垦成农田。至1998年,全球已有约660 Mhm²的草地被开垦成农田,占土地利用变化的近40%(Lal et al., 1998)。这些草地开垦成农田使得碳贮量由草地的116 t C·hm⁻²减少到农田的87 t C·hm⁻²,亦即碳贮量损失了19 Gt(28.8 t C·hm⁻²);同时,地上生物量损失了7.7 Gt(28.8 t C·hm⁻²)。这些碳贮量的减少超过了热带森林转化为农田导致的土壤碳损失的全球平均值24.5 t C·hm⁻²(Eswaran et al., 1993)。就全球碳平均而言,草地开垦成农田导致1 m深度土层内的土壤碳损失20%~30%(WBGU Special Report, 1998),与森林被用作农田后1 m深度土层内的土壤碳损失25%~30%相当(Houghton, 1995)。可见,草地开垦成农田与毁林一样对全球碳循环有着重要的影响,尽管《京都协议》没有考虑草地开垦为农田引起的全球碳贮存的损失,未来仍应该引起足够的重视。

3 陆地生态系统类型转换与全球“未知汇”

“未知汇”(Missing sink)是指化石燃料燃烧与毁林等释放的CO₂超过同期地球大气CO₂的增量及海洋吸收量的现象。据估计,1958~1978年的20年间有37 Pg C的“未知汇”,80年代平均为1.8 Pg C·a⁻¹的“未知汇”(Houghton & Skole, 1990; Houghton et al., 1999)。而Tans等(1990)研究表明,海洋对于“未知汇”的贡献十分有限,全球“未知汇”可能存在于陆地生物圈,特别是北半球中高纬度陆地生态系统,碳汇强度可高达2~3 Pg C·a⁻¹。这一点也为Keeling等(1996)以及20世纪90年代末期欧美实施的陆地碳汇监测的大型研究计划EUROFLUX和AMERFLUX所证实,但关于陆地生态系统碳汇强度的估算仍存在较大的差异(Holland et al., 1999; Aubinet et al., 2000)。

目前,关于气候变化和大气CO₂增加对陆地生态系统碳源/汇的影响(Schimel et al., 2000),以及人类活动引起的陆地生态系统类型转化对碳循环的影响(Houghton et al., 1999)研究,无论是基于模型的情景模拟,还是观测与对比研究都还很不够。受气候变化和人为活动的影响,陆地生态系统的不同发展阶段(自然与退化生态系统)、利用方式的改变(森林转化为人工林或农田,草地转化为农田,退耕还林

草等)所引起的陆地生态系统类型的转变都将会严重影响陆地生态系统碳收支评估的准确性。已有研究表明,欧洲的许多地区大面积的弃耕农地正逐渐恢复成森林植被(Walker & Steffen, 1999),我国大面积的人工造林,特别是国家“退耕还林草”政策的实施亦将增强陆地生态系统的碳汇功能。因此,对于陆地生态系统类型转变对碳平衡贡献的研究可能有助于减少全球碳收支评估的不确定性。除了陆地生态系统类型转变引起的碳收支评估的不确定性是引起全球“未知汇”现象的重要原因外,以下4个方面亦是引起全球“未知汇”现象的重要原因:

(1) 观测资料缺乏可比性:目前关于碳通量测定的方法有大气成分监测方法(CO₂和δ¹³CO₂或O₂/N₂的测定)(Keeling et al., 1996; Ciais et al., 1995)、涡相关法(Wofsy et al., 1993)、碱液吸收法(陈四清等, 1999)、箱式法与气相色谱法(Dong et al., 2000)等。这些方法各有其特点与适用范围,所取得的资料难以进行比较,从而造成了生态系统碳评估的不确定性。为此,统一观测方法是减少碳估算不确定性的重要手段。

(2) 研究资料的时间与空间或分析方法的不同:即使应用同一类研究区域的同一类资料,由于所用资料的时段不同,如森林资源清查资料(Birdsey & Heath, 1995; Turner et al., 1995);或使用同一时段资料并应用同一种分析方法,而所用资料的区域不同,如美国大陆与北半球中高纬度(Dixon et al., 1994; Turner et al., 1995);或使用相同研究区域的同一时段资料,而所用的分析方法不同,如森林资源清查资料与生态系统过程模型(Birdsey & Heath, 1995; Tian et al., 1999)均可能导致陆地生态系统碳估算的不确定性。

(3) 影响生态系统呼吸作用因素考虑的不足:EUROFLUX计划在1996~1998年对欧洲14类森林的监测结果表明生态系统呼吸作用(植被呼吸+土壤呼吸)在系统的碳平衡中起着支配作用(Valentini et al., 2000)。目前关于生态系统呼吸作用的估算公式仅考虑了环境因子(如温度、湿度或实际蒸散等)的影响作用(刘绍辉等, 1996),对于植物本身生物学特性的影响考虑较少,甚至没有考虑,从而影响陆地生态系统碳估算的准确性。因此,生态系统土壤呼吸作用必须综合考虑植物本身的生物学特性和环境因子的综合影响。

(4) 模型的不完善:目前对陆地生态系统碳循环机理的认识、过程的描述和参数化还很不够,从而

造成评估陆地生态系统碳源/汇的大气环流模式、气候模型和生态系统过程模型的不完善(Zhou & Wang, 2000), 必然导致陆地生态系统碳估算的不确定性。

4 我国陆地生态系统碳循环研究展望

我国位于地球环境变化速率最大的东亚季风区, 以气候变暖为标志的全球变化必将影响我国陆地生态系统(周广胜等, 1996; 1997); 同时, 我国人口众多(占世界人口的 1/5), 且处于经济高速发展时期, 大面积的土地开发、高速的城市化进程所引起的土地利用变化和大规模的产业转型等必将对全球的大气组成和气候产生重大影响, 从而构成我国经济与社会发展的严重障碍。据统计, 我国草地退化面积已达 1.35 亿 hm^2 , 约占草地面积的 1/3, 且仍以每年 200 万 hm^2 的速度增加; 森林资源, 尤其是原始森林以每年 50 万 hm^2 的速度减少; 荒漠化面积已达 2.62 亿 hm^2 , 且每年以 24.6 万 hm^2 速度扩展。目前, 我国的温室气体排放已占全球的 11%, 成为第三排放大国, 在国际环境外交大战的今天, 不能不引起高度重视。因此, 如何加强以 CO_2 减排与增汇为目的的陆地生态系统管理, 以保证我国社会经济的高速发展, 同时又促进我国生存环境的改善及履行气候变化公约是我国政府当前迫切需要解决的问题。科学地回答这些国家关心的重大问题, 关键就在于正确地认识和把握气候变化和人类活动引起的陆地生态系统类型转变, 特别是“退耕还林(草)”政策实施所恢复和重建的陆地生态系统碳循环的生态学过程、机制及其与环境的相互作用机理, 揭示这些生态系统的生产力及其土壤 CO_2 排放的动态规律, 准确地评估这些生态系统的碳源/汇及其固碳潜力。为此, 我国未来陆地生态系统碳循环研究在强调研究陆地生态系统类型转变对于全球碳循环贡献的同时, 拟注重以下方面研究:

1) 建立具有统一的观测方法与规范的陆地生态系统碳通量观测网络, 以保证资料的可比性和连续性。

2) 加强陆地生态系统碳平衡主导控制因子研究, 强调植物的生物学特性与环境因子对于生态系统呼吸作用的综合影响。

3) 加强对气候变化及人类活动驱动下的多尺度陆地生态系统碳循环机理与过程的认识, 特别强调对陆地生态系统不同发展阶段(自然与退化生态系统)、不同利用方式(森林转变为人工林或农田, 草地

转化为农田、退耕还林(草)等)及其对气候变化响应的陆地生态系统碳循环过程与机理的理解。

4) 改进与完善现有的陆地生态系统动态模型, 并针对中国陆地生态系统的特点, 发展具有自主知识产权的陆地生态系统碳循环模型, 以准确地评估中国陆地生态系统碳源/汇的时间和空间分布格局。

5) 强化遥感技术在陆地生态系统碳平衡研究中的应用, 以实现对于陆地生态系统源/汇的时间和空间分布格局的快速诊断与评估。

6) 探讨(自然和人工)陆地生态系统 CO_2 减排对策和技术措施的评价标准和评价方法, 提出陆地生态系统管理的碳减排对策和技术措施。

参 考 文 献

- Arronys, D., J. Mariotti & C. Girard. 1995. Modelling organic carbon turnover in cleared temperate forest soils converted to maize cropping by using ^{13}C natural abundance measurements. *Plant and Soil*, **173**:191 ~ 196.
- Atjay, G. L., P. Ketner & P. DuVigneaud. 1979. Terrestrial primary production and phytomass. In: Bolin, B., E. T. Degens & S. Kempe eds. *The global carbon cycle SCOPE 13*. Chichester: John Wiley & Sons. 129 ~ 182.
- Aubinet, M., A. Grelle, A. Ihrom, U. Rannik & J. Moncrieff. 2000. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research*, **30**:112 ~ 175.
- Berrien, III. M. & B. H. Braswell Jr. 1994. Earth metabolism: understanding carbon cycling. *AMBIO*, **23**:4 ~ 12.
- Birdsey, R. A. & T. S. Heath. 1995. Carbon changes in US forests. In: Joyce, L. A. ed. *Productivity of America's forest and climatic change*. Colorado: Forest Service, US Department of Agriculture. 56 ~ 70.
- Black, T. A. & J. W. Harden. 1995. Effect of timber harvest on soil carbon storage at blodgett experimental forest, California. *Canadian Journal of Forest Research*, **25**:1385 ~ 1396.
- Bolin, B. 1977. Change of land biota and their importance for carbon cycle. *Science*, **196**:613 ~ 616.
- Bouwman, A. F. & R. Leemans. 1995. The role of forest soils in the global carbon cycle. In: McFee, W. & J. M. Kelly eds. *Carbon forms and functions in forest soils*. Madison, Soil Science Society of America, 503 ~ 525.
- Chen, S. Q. (陈四清), X. Y. Cui (崔晓勇), G. S. Zhou (周广胜), Z. Z. Chen (陈佐忠) & T. H. Li (李凌浩). 1999. Study on the CO_2 releasing rate of soil respiration and litter decomposition in the *Stipa grandis* steppe in Xilin River Basin, Inner Mongolia. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), **41**:645 ~ 650 (in Chinese).
- Ciais, P., P. P. Tans, M. Trolier, J. W. C. White & R. J. Francey. 1995. A large northern hemisphere terrestrial CO_2 sinks indicated by the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of atmospheric CO_2 . *Science*, **269**:1098 ~ 1102.
- Cohen, W. B., M. E. Harmon & D. O. Wallin. 1996. Two decades of carbon flux from forests of the Pacific Northwest. *Bioscience*, **46**:836 ~ 844.
- Cooper, C. F. 1983. Carbon storage in managed forests. *Canadian Journal of Forest Research*, **13**:155 ~ 166.
- Davidson, E. A. & I. L. Ackermann. 1993. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils. *Biogeochemistry*, **20**:161 ~ 193.
- Dixon, R. K., S. Brown, R. A. Houghton, A. M. Solomon, M. C. Trexler & J. Wisniewski. 1994. Carbon pools and flux of global forest e-

- cosystems. *Science*, **263**:185 ~ 190
- Dong, Y. S., Y. Q. Zhang, Z. Chen & Y. Geng. 2000. Fluxes of CO₂, N₂O and CH₄ from a typical temperate grassland in Inner Mongolia and its daily variation. *Chinese Science Bulletin*(科学通报), **45**:1590 ~ 1594
- Eswaran, H., E. Van den Berg & P. Reich. 1993. Organic C in soils of the world. *Journal of Soil Science Society of America*, **57**:192 ~ 194.
- Fang, J. Y. (方精云), S. L. Piao (朴世龙) & S. Q. Zhao(赵淑清). 2001. The carbon sink: the role of the middle and high latitudes terrestrial ecosystems in the northern hemisphere. *Acta Phytocologica Sinica*(植物生态学报), **25**:594 ~ 602. (in Chinese)
- Feanside, P. M. 1996. Amazonian deforestation and global warming: carbon stocks in vegetation replacing Brazil's Amazon forest. *Forest Ecology and Management*, **80**:21 ~ 34.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations(FAO). 1981. Tropical forest assessment project: forest resources of tropical Asia. Rome.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations(FAO). 1993. Forest resources assessment 1990: tropical countries. FAO Forestry Paper. Rome. 112.
- Harmon, M. E., W. K. Ferrell & J. F. Franklin. 1990. Effects on carbon storage of conversion of old-growth forests to young forests. *Science*, **247**: 699 ~ 702.
- Holland, E. A., S. Brown, C. S. Potter, S. A. Ikooster, S. Fan, M. Gloor, J. Mahlman, S. Pacala, J. Sarmiento, T. Takahashi & P. Tans. 1999. North American carbon sink. *Science*, **283**:1815
- Houghton, R. A. & J. L. Hackler. 1995. Continental scale estimates of the biotic carbon flux from land cover change: 1850 ~ 1980. ORNL/CDI-AC-79, NDP-050, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA, 144
- Houghton, R. A. & D. L. Skole. 1990. Carbon. In: Turner, D. P. ed. *The Earth as transformed by human action*. Cambridge: Cambridge University Press. 393 ~ 408.
- Houghton, R. A. 1995. Changes in storage of terrestrial carbon since 1859. In: Lal, R., J. Kimble & E. Levine eds. *Soils and global change*. Boca Raton: CRC Press. 45 ~ 65.
- Houghton, R. A., J. L. Hackler & K. T. Lawrence. 1999. The U.S. carbon budget: contributions from land use change. *Science*, **285**:574 ~ 578
- Keeling, R. F., S. C. Piper & M. Heimann. 1996. Global and hemispheric CO₂ sinks deduced from changes in atmospheric O₂ concentration. *Nature*, **381**:218 ~ 221.
- Lal, R., J. Kimble & R. Follett. 1998. Land use and soil C pool in terrestrial ecosystems. In: Lal, R., J. Kimble, R. Follett & B. A. Stewart eds. *Management of carbon sequestration in soil*. Boca Raton: CRC Press. 1 ~ 10
- Lin, S. H. (刘绍辉) & J. Y. Fang(方精云). 1996. Factors affecting soil respiration and the effect of temperature in global scale on soil respiration. In: Wang, R. S. (王如松), J. Y. Fang(方精云), L. Gao(高林) & Z. W. Feng(冯宗炜) eds. *Hot issue study of modern ecology*. Beijing: Chinese Science and Technology Press. 285 ~ 294. (in Chinese)
- Sauerbeck, D. 1992. Temperate agricultural systems. IPCC update WGII AFOS Section 2.
- Schimel, D., J. Mehlilo, T. Hanqin, A. D. McGuire, D. Kicklighter, T. Kittel, N. Rosenbloom, S. Running, P. Thornton, D. Ojima, W. Parton, R. Kelly, M. Sykes, R. Neilson & B. Rizzo. 2000. Contribution of increasing CO₂ and climate to carbon storage by ecosystems in the United States. *Science*, **287**: 2004 ~ 2006.
- Tans, P. P., I. Y. Fung & T. Takahashi. 1990. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science*, **247**:1431 ~ 1438.
- Tian, H., J. M. Mellillo, D. W. Kicklighter, A. D. McGuire & J. V. K. Helfrich. 1999. The sensitivity of terrestrial carbon storage to historical climate variability and atmospheric CO₂ in the United States. *Tellus*, **51** (B1):414 ~ 452
- Turner, D. P., G. J. Koepper, M. E. Harmon & J. J. Lee. 1995. A carbon budget for forests of the conterminous United States. *Ecological Applications*, **5**:421 ~ 436.
- Valentini, R., G. Matteucci, A. J. Dolman, E. -D. Schulze, C. Rebmann, E. J. Moors, A. Granier, P. Gross, N. O. Jensen & K. Pilegaard. 2000. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, **404**:861 ~ 865.
- Vitousek, P. M., H. A. Mooney & J. Lubchenco. 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, **277**:494 ~ 499.
- Walker, B. H. & W. L. Steffen. 1999. The nature of global change. In: Walker, B. H., W. L. Steffen, J. Canadell & J. Ingram eds. *The terrestrial biosphere and global change*. Cambridge: Cambridge University Press. 1 ~ 18.
- WBCU Special Report. 1998. The accounting of biological sinks and sources under the Kyoto Protocol.
- Wofsy, S. C., M. L. Goulden, J. M. Munger, S. M. Fan & P. S. Bakwin. 1993. Net exchange of CO₂ in a mid-latitude forest. *Science*, **260**: 1314 ~ 1317.
- Zhou, G. & Y. Wang. 2000. Global change and climate-vegetation classification. *Chinese Science Bulletin*(科学通报), **45**:577 ~ 584
- Zhou, G. S. (周广胜), X. S. Zhang(张新时), S. H. Gao(高素华), K. Z. Bai(白克智), X. D. Yan(延晓冬) & Y. R. Zheng(郑元润). 1997. Experiment and modeling on the responses of Chinese terrestrial ecosystems to global change. *Acta Botanica Sinica*(植物学报), **39**:879 ~ 888. (in Chinese)
- Zhou, G. S. (周广胜) & X. S. Zhang(张新时). 1996. Study on climate-vegetation classification for global change in China. *Acta Botanica Sinica*(植物学报), **38**:8 ~ 17. (in Chinese)

责任编辑:方精云 责任编辑:张丽赫