

森林与大气中 CO₂ 关系的研究进展

尚正春, 张硕新

(西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵 712100)

摘 要: 森林与全球气候变化及大气中 CO₂ 含量密切相关, 本文对国内外在森林对大气中 CO₂ 的影响和大气中 CO₂ 浓度的变化对森林的影响方面的研究进展进行了述评。

关键词: 森林; 二氧化碳; 碳平衡

中图分类号: S718.554.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-7461(2004)01-0188-05

Research Progress on Relationship between Forest and Atmospheric CO₂

SHANG Zheng-chun, ZHANG Shuo-xin

(College of Forestry, NW Sci-Tech Univ. of Agri. and For., Shaanxi 712100, China)

Abstract: Forest is closely correlated to atmospheric CO₂. The role of forest in global carbon balance is illustrated; some achievements and problems are discussed in the paper.

Key words: forest; atmospheric CO₂; carbon balance

近代由于人口急剧增长、工业高速发展、石化燃料消耗猛增、森林资源大规模的破坏,使得大气中的 CO₂ 浓度从 18 世纪的 0.028% 升高到 1987 年的 0.035%, 大气中的 CO₂ 含量增加了 25%^[1~8], 从而引起了温室效应、全球变暖等一系列生态环境问题。引起了全世界极大关注, 各国生态环境专家正着手于探讨控制大气 CO₂ 浓度的对策。各国政府和科学界对这个关系到人类和地球未来的重大问题给予极大的关注。

森林是陆地上对区域性气候影响最大的生态系统。森林作为地球之肺, 在生长过程中吸收大量的 CO₂, 而在森林受到破坏和燃烧的过程中又大量排放 CO₂。而且森林能够把吸收的 CO₂ 长期的保存起来。森林与全球气候变化及大气中 CO₂ 含量密切相关。国外对森林与碳的关系研究已有几十年的历史, 最著名且成果最为丰富的为吉良龙夫(Kira Tatsuo)及其研究小组自上世纪 60 年代以来在东南亚热带地区所做的研究^[9,10]。这些研究方法和结论对后来的研究起了非常重要的作用。后来许多学者陆续研究了森林与大气中 CO₂(C)含量之间的相互关系, 现将他们的研究成果及存在问题分述如下。

1 森林对大气中 CO₂ 的影响

1.1 森林在固定大气中 CO₂ 的作用

森林植物通过光合作用吸收大气中的 CO₂, 固定在植物体中, 森林是碳的汇; 另一方面, 森林中的动物、植物、微生物的呼吸以及枯枝落叶的分解氧化等过程又向大气排放 CO₂, 森林又是碳的源。森林生态系统是陆地生态系统中生产力最高的生态系统, 生物量很高; 全球森林约占地球陆地面积的 1/3, 生物量约占整个陆地生态系统的 90%, 净生产量约占陆地生态系统的 70%^[1,10~12]。生物量(干重)中含碳(碳转换系数)43%~58%^[9,10,13~15], 土壤中含碳又储存着大量的有机碳。如热带原始森林地上部分生物量中含碳 150~230 t/hm²^[6,9,13], 土壤中含碳 102~115 t/hm²^[10,13]; 温带原始森林生物量含碳为 125 t/hm², 土壤中含碳 134 t/hm²^[13]。因此森林是一个巨大的碳库, 森林生态系统在全球碳循环中与碳平衡中起着非常重要的作用。

森林每生产出 1 m³ 木材, 需要吸收约 350 kg 的 CO₂^[11]。据 Whittaker 报道, 每年森林净光合固定的碳量: 热带森林为 450~1 600 g/m², 温带森林为 270

收稿日期: 2003-05-26

基金项目: 国家林业局“陕西秦岭火地塘森林景观结构特征和生态功能的定位研究”(2001-04)

作者简介: 尚正春(1974-), 男, 甘肃武都人, 助教, 现工作单位湖北农学院, 主要从事环境生态学的研究和教学。

~1 125 g,寒带森林为180~900 g,耕地为45~200 g,草原约为130 g。显然,森林的固碳能力远高于耕地和草原。全世界森林生物量碳储量约为3 590~8 136亿t,森林土壤中碳储量为7 870~27 750亿t^[5,10,11,16]。单位面积的森林碳贮量为农田的20~100倍。不过森林被开采和利用的过程却是CO₂排放的过程。森林在被采伐以后,地下的生物量实际上是不被利用的,地上部分的小枝、树叶等也是不加利用的。林产品中一部分短时间释放出CO₂,另一部分如板材要经过很长时间才会腐烂掉,释放出CO₂。所以从很长时间尺度(1 000~10 000 a)来考察森林对大气CO₂浓度变化的作用,其影响是很小的,只能是一个不很大的汇。但是,森林如果从短时间尺度(<300 a)来考察,由于单位森林面积中的碳贮量很大,林下土壤中碳贮量更大,因而它的微小变化就可引起大气中的CO₂浓度很大的变化。另外,当森林受到破坏时,首先影响到土壤,使大量的土壤有机质氧化而排放大量的CO₂。

1.2 研究现状及存在的问题

工业革命后,随着人口的激增和工农业的发展,森林资源也进行了大量砍伐。据FAO的统计,1980年热带森林的年消失面积为1 100万hm²,据Myers的统计,1980年热带郁闭林年消失为750万hm²,1989年达到了1 390万hm²,即10 a中热带森林的消失面积几乎翻了一番^[11]。最新报道,热带森林的年消失面积为1 700~2 000 hm²^[2,10,11]。森林如此迅速的消减,引起了全世界的极大关注。

对由于砍伐造成的CO₂排放,已有许多研究。由于森林的破坏,森林正向大气释放出它过去储存的碳,成为大气CO₂的一个排放源。单对其每年释放的碳数量估计如同贮存的碳量数据一样有很大的差异,从4亿t至80亿t碳不等。如聂道平^[1]、曾庆波^[10]、徐德应^[11]等报道Bolin 1977年的估计为每年10亿t;Woodwell等1978年为40~80亿t,1983年又重新估计为18~47亿t;Brown等1984年估计为6.7~7.4亿t;Dale^[12]等估计,1850~1980年期间,由于森林的破坏而排放的碳总计量为90~120亿t,相当于每年释放0.4~26亿t^[1,10,11,17]。鉴于碳贮量和释放量的数据差别太大,目前美国环保局(USEPA)正在组织拥有热带森林的主要国家建立F-7研究网络“热带森林与全球变化”,计算各热带森林国家CO₂的排放量,政府间气候变化委员会和芬兰科学院正在发起更大规模的联合研究,不久将有新的数据公布。否则,全球碳循环研究得出的各个分

库间数据将消失于这些差值中。

在全球碳循环研究中,美国、加拿大和欧洲国家均有较好的研究积累,发展中国家则资料不足,尤以热带国家更为缺乏。中国开展这方面的研究较晚,但由于中国地域广阔,又是世界上造林规模最大的国家,森林资源变化很快,人工林面积居世界之首。据统计和计算,在1984~1988年间,中国森林平均每年约从大气中吸收250万t碳^[11,14]。更进一步的精确计算正在进行之中。可见,中国森林对全球碳平衡的贡献巨大,中国在这方面的学术研究成果也越来越引起世人的关注。

李意德、吴仲民^[6,9]等根据实际测定和调查结果,估算中国目前残存的100多万hm²热带林中,森林碳贮量约为1.22~1.30亿t,平均约为1.24亿t。根据1992年林业部统计资料,贺庆棠^[4]推算我国森林碳贮量约为103亿t,占大气碳贮量的1.47%。我国森林每年从大气中固定的碳约为8.4亿t,约占全球森林固碳量的2.6%,占大气碳贮量的0.12%,约占我国上空大气中碳贮量的6.3%。

综上所述,森林是陆地生态系统中对大气中CO₂含量及全球碳循环影响最大和最重要的自然因素。目前对全球森林碳贮量和碳年排放量的估算数据相差较大,其原因除了估算模型不完善外,还由于缺乏基点研究以及资料和数据,这迫使研究者不得不采用一些假设,这些假设因人而异,难免发生偏差,有时甚至与观测资料相矛盾。尤其是对森林采伐、土地利用方式改变后,森林碳贮存量的变化存在更大的不一致性。如Hought^[18]、Johnson^[19]等的研究,都认为森林采伐后土地利用方式改变会使土壤碳贮存量下降,但所估计的下降幅度有很大的出入。Hought认为森林采伐后进一步垦殖会使土壤碳量减少25%~50%;Mann统计森林采伐后的农业垦殖使土壤碳量减少20%;Detwiter指出,森林采伐后开垦成牧场,土壤碳将减少20%,种植农作物5 a使土壤碳减少40%。Bramn等人的研究表明,森林采伐后如转化为牧场,则土壤碳不变或有所增加^[1,10,19]。李意德、吴仲民等在海南岛尖峰岭研究了热带森林采伐后土壤碳的变化认为:森林采伐后4 a里原始林土壤有机碳贮量下降了6.27%,林地恢复森林植被后,土壤碳含量增加很快,更新30 a后便已超过了原始林土壤碳含量^[6,10]。

近几十年来,在有关森林对全球碳平衡贡献的研究中,发展了许多模型,如20世纪70年代在森林经理中使用的森林资源动态模型;在80年代,

Hought 和 Myers 等创建了更为精细的估算模型,提高了精度,减少了偏差。他们根据联合国有关部门统计资料,对模型各主要变量进行了敏感性分析,使全球碳平衡研究模型达到一个新层次。徐德应研制了适用于中国森林碳贮量计算及土地利用方式改变后碳排放的计算机模型(CARBON)^[13]。该模型分区、分林种计算,提高了中国森林碳贮量的估计精度。目前应用模型计算碳贮量时,所使用的基本数据在类似林型划分、林级划分、木材比重及木材碳含量等重要的参数上均无统一标准。由于估算的对象规模非常庞大,只要在上述参数略有差别就可能产生很大的误差。因此,在应用这些模型时,要注意系统的准确性和一致性。

2 CO₂ 变化对森林的影响

森林与全球碳的变化是相互影响的,森林影响着全球碳变化,同时,由于 CO₂ 是光合作用的基质,大气中 CO₂ 浓度的变化又对森林有着巨大的影响。

关于气候变化对森林的影响,目前国际上是从两方面来研究的:(1)用实验方法研究在不同水平的 CO₂ 浓度和水分供应条件下,以不同的增温和水分供应水平下,林木的生理生态反应;(2)利用现有的模型或新的模型,研究气候变化的不同构想条件下,自然状态的森林生态系统的反应和可能变化。

2.1 CO₂ 增长对林木生理作用的影响

CO₂ 浓度升高对植物影响可分为两个层次:第一层次是对光合作用、呼吸作用、水分利用效率、繁殖、生产速率等的直接影响;第二层是对植物间相互作用(如竞争、共生)的影响(Bradecki 等)^[3]。

通常在短期的实验中,大气 CO₂ 浓度的增加直接影响到树木的生理活动和生化活动,尤其是光合作用。Kramer 和 Sionit 认为,由于 CO₂ 浓度的增加,使植物体内 RuBP 羧化酶的羧化活性增强,导致光合作用增强,呼吸作用减弱^[20]。但一些植物对 CO₂ 浓度升高的反应会随时间而消失,甚至会出现光合受抑制现象^[3,20],这可能是其它因子如营养不足等最终限制了 CO₂ 的吸收(Mellilo 等)。在高 CO₂ 浓度下,光合、呼吸一般大大降低(Woodward 等)^[3]。

CO₂ 浓度升高的另一效应是使叶面气孔导度减少。Tolley 的实验表明,当 CO₂ 浓度从 350×10^{-6} 增加到 675×10^{-6} 时,糖胶树气孔导度减少 50%,由于气孔导度减少,导致水分蒸腾速率下降,从而使水分利用率提高^[3,5,20,21]。因此,可以预计在水分有限

的环境下,CO₂ 升高会通过提高水分利用率而提高植物生长。CO₂ 浓度升高是否会改变光合产物的分配,目前仍有争论。不过,已有证据表明高 CO₂ 会提高植物的根茎比值^[5,20,21]。

2.2 CO₂ 变化对森林生态系统的影响

由于作为温室气体的 CO₂ 浓度升高,造成了温度和水分这两大生态因子的改变,引起了全球气候变化,那么由 CO₂ 引起的气候变化对森林生态系统有什么影响呢?许多生态环境专家研究了气候变化对森林生态系统影响,大致可归纳为:(1)对森林的分布、组成、演替的影响;(2)对生产力的影响;(3)对森林病虫害和森林火灾的影响。这些研究多半和现有的某一个全球环流模型的预测结果相联系。由于不同树种、不同的生态系统对于气候变化的反应不一样,所以这种研究又往往和具体的树种和具体的生态系统相联系。

Emanuel 等人用欧洲常用的 Holdridge 生命带分类指数,预测了气候变化对森林分布和生长的影响^[5,22]。Hulme 和王馥棠等人用 1 组能划分植被类型分布的气候参数,与中国特征性植被类型的目前分布状况建立联系,根据 7 个 GCM 模型预测的气候变化平均值,推断了中国 2050 年植被的可能变化^[5]。潘代远和张新时运用相同的方法研究了气候变化对中国植被的影响^[11]。Leverenz 和 Lev 主要利用 GISS 模型的气候预测结果,研究了美国 6 个重要的用材树种在气候发生变化后的分布区的变化^[5,11]。

大气 CO₂ 浓度的增加影响到植物的生长,由于不同植物种类对 CO₂ 升高有不同的反应,植物之间的相互关系如竞争、种群动态和群落结构也会随着 CO₂ 升高而发生改变^[3,7,21]。

La Marche 等对加利福尼亚州的几种松树生长量的研究,认为是地区松树生长量的提高是 CO₂ 浓度增加的结果。Miller 等人利用 GISS 气候模型,研究了气候变化后对火炬松生产力的影响,得出气候变化使其面积可能增加,但总生产力要下降^[5,11]。刘世荣等研究了气候变化对中国森林生产力的影响,结果表明,气候变化引起森林生产力的变化率从东南向西北递增^[7,23]。

由于温室效应,全球气温上升,在一些地区出现夏季高温、干旱,造成森林火灾的发生频率增大,火灾面积增加。在过去几十年里,美国国有森林及其附近地区,由森林火灾造成的损失达 100 亿美元;1980 年加拿大森林火灾面积达 4.8 万 hm²,比 1961

年增加 28%^[11,21];从 1985 年以来,我国大兴安岭北部严重干旱,气温比往年都高,因而森林火灾比较严重。种种迹象表明,大气中的 CO₂ 浓度增加与森林火灾增多有密切关系。

病虫害的发生、分布与气候也密切相关。植物处在高 CO₂ 浓度下,其含氮量发生变化,因而植物体中 C/N 值发生变化,再加上温度和降雨的变化,必定会影响到病虫害种类和灾害程度。Lincoln 等研究了 CO₂ 升高对某些森林害虫的影响,认为由于 CO₂ 升高是通过间接影响植物组织的质量而影响森林害虫的。由于昆虫对气候的变化的反应比森林快,它们的适应和进化过程比树木大一个数量级,因此,对森林的危害巨大^[3,11,21]。

我国政府对大气 CO₂ 浓度增加及全球气候变化问题极为关注。1991 年以来国家科委将气候变化问题列为重大科技攻关项目;我国林业界已经开始研究大气中 CO₂ 浓度增加及气候变化对我国森林的影响;中国林科院正在研究气候变化对我国 6 个主要用材树种的分布和生长的影响。这项研究采用地理信息系统(GIS),根据树种的中心分布区和极限分布区,找出不同树种的最适分布区和极限分布区,建立树种分布和气候条件的相关模型。进而根据气候变化预测,推断未来树种的理论分布区,再筛选出未来可能分布区^[5]。阎洪采用地理信息系统研究气候变化与森林动态的关系,提出需要建立气候因素信息库、土壤信息库、主要树种分布信息库,还要建立气候变化模型、树种分布模型、森林生产力模型^[21]。刘世荣、徐德应对森林植被的第一性生产力格局及其模拟进行了初步研究^[21]。在具备上述的信息和模型后,预测大气中 CO₂ 浓度增加及气候变化对森林树种的改变、分布和生产力消长的影响,将变成可能。

除了以上的研究,还有人用演替模型来研究未来森林变化。20 世纪 70 年代国外已研制出的森林动态模型,如 JABOWA、FORET 等都在一定程度上预测了气候变化对森林生态系统的影响。

现在国内外已有许多文献预测气候变化对森林的影响。这些研究都遇到了一个相同的问题:根据哪个模型预测的结果最为可靠?遗憾的是,这个问题至今还没有解决。到目前为止,所有的全球环流模型都存在一定的弊端,不十分成熟。而目前的这些研究都是基于气候预测做出的,如果气候预测不准确,无疑就降低了它们的价值。如潘愉德采用三个大气环流模型(GFDL-Q,GISS 和 OSU)预测的结

果代表未来潜在气候变化,探讨在此条件下中国陆地生态系统的结构和变化。用三个模型产生的结果就有出入^[24],所以这一问题有待解决。

参考文献:

- [1] 聂道平,徐德应. 全球碳循环与森林关系的研究—问题与进展[J]. 世界林业研究,1997(5):33-39.
- [2] 蒋有绪. 世界森林生态系统结构与功能研究简述[A]. 中国森林生态系统结构与功能规律研究—国家自然科学基金重大项目期中论文集[M]. 北京:中国林业出版社,1996. 3-15.
- [3] 林光辉. 全球变化研究进展与新方向[A]. 李博主编. 现代生态学讲座[M]. 北京:科学出版社,1995. 142-157.
- [4] 贺庆棠. 森林对地气系统碳素循环的影响[J]. 北京林业大学学报,1993,15(3):132-137.
- [5] 徐德应. 大气 CO₂ 增长和气候变化对森林的影响研究进展[J]. 世界林业研究,1994(2):26-31.
- [6] 吴仲民,李意德,曾庆波,等. 尖峰岭热带山地雨林碳素库及皆伐影响的初步研究[J]. 应用生态学报,1998,9(4):341-344.
- [7] 钟秀丽,林而达. 气候变化对我国自然生态系统影响的研究综述[J]. 生态学杂志,2000,19(5):62-66.
- [8] Armentano T V. Effects of increased wood energy consumption on carbon storage in forests of the United States[J]. Environmental Management, 1985, 28:235-240.
- [9] 李意德,吴仲民,曾庆波. 尖峰岭热带山地雨林生态系统碳平衡的初步研究[J]. 生态学报,1998,18(4):371-378.
- [10] 曾庆波,李意德,吴仲民等. 热带森林生态系统研究与管理[M]. 北京:中国林业出版社,1997.
- [11] 徐德应,刘世荣. 温室效应、全球变暖与林业[J]. 世界林业研究,1992(1):25-31.
- [12] Dale V H. Estimating the effects of land-use change on global atmospheric CO₂ concentrations[J]. Can. J. For. Res., 1991, 21:87-90.
- [13] 秦建华,姜志林. 森林在大气碳平衡中的作用[J]. 世界林业研究,1997(4):18-25.
- [14] 周玉荣,于枕良,赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报,2000,24(5):518-522.
- [15] Dewar R C. Analytical model of carbon storage in the trees, soils, and wood products of managed forests[J]. Tree Physiology, 1991(8):239-258.
- [16] Dixon R K. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. Science, 1994, 263:185-189.
- [17] Cropper W P, Ewel K C. Carbon storage patterns in Douglas-fir ecosystems[J]. Can. J. For. Res. 1984(14):855-859.
- [18] Houghton R A, Boone B D, Melillo J M, et al. Net flux of carbon dioxide from tropical forest in 1980[J]. Nature, 1985, 316:235-262.
- [19] Johnson W C, Sharpe D M. The ratio of total to merchantable forest biomass and its application to the global carbon budget[J]. Can. J. For. Res. 1983(13):372-383.
- [20] Bazzaz F A, Fajer E C. Plant life in a CO₂-rich world[M]. Scientific American, 1992. 68-74.

- [21] 王凤友,陈雄文. 大气 CO₂ 浓度增加与林业发展对策[J]. 世界林业研究,1994(3):9-13.
- [22] Emanuel, W R, G G Killough, Post W M, et al. Modeling terrestrial ecosystem in the global carbon cycle with shifts in carbon storage capacity by land-use change[J]. Ecology. 1984, 65: 970-983.
- [23] 刘世荣,徐德应,王兵. 气候变化对中国森林生产力的影响. II. 中国森林第一性生产力的模拟[J]. 林业科学研究,1994, 7(4):425-430.
- [24] 潘愉德, J M Melillo, D W Kicklighter. 大气 CO₂ 升高及气候变化对中国陆地生态系统结构与功能的制约和影响[J]. 植物生态学报,2001,25(2):175-189.
- [25] 苑志沛,严平. 森林对二氧化碳循环的影响[J]. 安徽农业大学学报,1997,24(1):8-13.
- [26] Cropper C F. Carbon storage in managed forests[J]. Can. J. For. Res. 1983,13:155-156.
- [27] Andren Olof., Thomas Katterer. ICBM: The introductory carbon balance model for exploration of soil carbon balance[J]. Ecological applications, 1997, 7(4):1226-1236.
- [28] Bossel H, Schafer H. Generic simulation model of forest growth, carbon and nitrogen dynamics and application to tropical Acacia and European spruce[J]. Ecol. Model. ,1989, 48:221-256.
- [29] Cooper C F. Carbon storage in managed forests[J]. Can. J. For. Res. 1983, 13:155-166.
- [30] Dewar R C, Cannell M G. Carbon sequestration in the trees, products and soils of forest plantation: an analysis UK examples [J]. Tree Physiology, 1992, 11: 49-71.
- [31] Lin G H, Adams J R, Rygielwicz P T, et al. Elevated CO and temperature impacts on different components soil CO₂ efflux in Douglas-fir terraces[J]. Global Change Biology, 1999, (5): 157-168.
- [32] Xiao X M, Kicklighter D W, Melillo J M, et al. Linking a global terrestrial biogeochemical model and a 2-dimensional climate model: implications for the carbon budget. Tellus, 1997, 49B: 18-37.
- (上接第 187 页)
- [39] Bird D F, Kalf J. Empirical relationships between bacterial abundance and chlorophyll concentration in fresh and marine water [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science,1984, 41:1015 ~ 1023.
- [40] Morris D P, William M L J. Nutrient limitation of bacterioplankton growth in Lake Dillon, Colorado [J]. Limnology and Oceanography, 1992, 37:1179-1192.
- [41] Detwiler R P, Hall C S. Tropical forests and the global carbon cycle[J]. Science, 1988, 239: 42-47.
- [42] Tans P P, Fung I Y, Takahashi T. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget[J]. Science, 1990, 247: 1431-1438.
- [43] 毛子军. 森林生态系统碳平衡估测方法及其研究进展[J], 植物生态学报, 2002, 26(6):731-738.
- [44] 刘国华,傅伯杰,方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 733-740.
- [45] 康惠宁, 马钦彦, 袁嘉祖. 中国森林碳汇功能基本估计[J]. 应用生态学报, 1996, 7(3): 230-234.
- [46] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. 生态学报, 1996, 16(5): 597-508.
- [47] 延晓冬, 赵士洞. 温带针阔混交林林分碳储量动态的模拟模型[J]. 生态学杂志, 1995, 14(2): 6-12.
- [48] 张金霞, 曹广明, 周觉卫, 等. 高寒矮嵩草甸大气-土壤-植被-动物系统碳素储量及碳素循环[J]. 生态学报, 2003, 23(4): 627-634.
- [49] 田应兵, 熊明彪, 熊晓山, 等. 若尔盖高原湿地土壤-植物系统有机碳的分布与流动[J]. 植物生态学报, 2003, 27(4): 490-495.
- [50] Bossel H, Schafer H. Generic simulation model of forest growth, carbon and nitrogen dynamics and application to tropical Acacia and European spruce[J]. Ecol. Model. , 1989, 48: 221-265.
- [51] Oikawa T. Simulation of forest carbon dynamics based on a dry-matter production model[J]. Bot. Mag. Tokyo. , 1985, 98: 225-238.
- [52] O'Neil E G, Norby R J. Litter quality and decomposition rates of foliar litter produced under CO₂ enrichment[A]. In: Koch G W, Mooney H A. Carbon dioxide and terrestrial ecosystems [M]. San Diego Academic Press, USA, 1996, 87-103.
- [53] Norby R J, Cotrufo M F. A question of litter quality[J]. Nature, 1998, 396:17-18.
- [54] Hungat B A. The fate of carbon in grasslands under carbon dioxide enrichment[J]. Nature, 1997, 388:576-579.
- [55] Schimel D S, Braswell B H, Holland E A, et al. Climatic edaphic and biotic controls over carbon and turnover of carbon in soils[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1994, 8:279-293.
- [56] Peterson E. Effects of elevated CO₂ on rhizosphere carbon flow and soil microbial processes[J]. Global Chang Biology, 1997, 3:363-377.
- [57] Chpin F S. Responses of arctic tundra to experimental and observed changes in climate[J]. Ecology, 1995, 76:694-711.