

火地塘林区锐齿栎林土壤碳循环的动态模拟*

刘建军^{1,2}, 王得祥¹, 雷瑞德¹, 及川武久², 王翼龙¹

(1 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵 712100; 2 日本筑波大学 生物科学系, 日本 筑波市)

[摘要] 依据土壤碳循环的分室模型, 对火地塘林区锐齿栎林土壤碳各分室的碳储量和通量进行了初步分析。结果表明, 火地塘林区锐齿栎林土壤有机碳储量为 174.055 t/hm², 其中矿质土壤层有机碳储量为 167.810 t/hm², 凋落物层(A₀层和死细根)中的碳储量为 6.245 t/hm²(A₀层占 80.5%, 死细根占 19.5%)。森林植物每年凋落输入到凋落物层中的碳量(包括地上部分的枯枝落叶和地下部分的细根)为 3.297 t/hm², 其中地上部分占 52.5%, 地下部分占 47.5%, 凋落物层分解每年以腐殖酸的形式输入到矿质土壤中的碳量为 0.935 t/hm²; 锐齿栎林地年(生长季节)呼吸释放碳量(含植被根系呼吸量)为 6.109 t/hm²。

[关键词] 碳循环; 锐齿栎林; 动态模拟

[中图分类号] S714.2; [S719]

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2003)06-0014-05

碳循环是生态系统最重要的物质循环过程之一, 随着全球变化生态学的发展, 人们越来越关注大气中 CO₂、CH₄ 等主要温室效应气体浓度的不断增加及其对全球气候变化所带来的影响, 在全球规模上对生态系统碳循环过程及其特征的研究越来越深入。约 85% 的陆地生物量集中在森林生态系统中, 森林作为全球陆地生态系统的主体, 其在维持全球碳平衡(森林生态系统碳的积累和释放)中的作用正在被人们所认识。特别是在 1997 年京都会议(COP3)以后, 如何精确定量评估森林作为温室效应气体 CO₂ 的吸收源和储存库的作用, 以及如何准确阐明森林作为 CO₂ 吸收源问题, 已不仅是全球生态学领域迫切需要解决的科学问题, 同时也已成为满足京都议定书制定的 CO₂ 排放目标的迫切需要。

过去对森林生态系统碳收支的研究主要集中在地上部分^[1,2], 而对储存在土壤中的有机碳及其循环的研究较少。据气候变动政府间协作组织的第三次报告书(IPCC 2001)报道, 全球陆地土壤有机碳储量(Soil organic carbon)约为 1500 亿 t, 相当于大气中 CO₂ 储量的 2 倍, 是陆地植被生物储存碳量的 3 倍^[1,3-6]。可见, 准确评价森林生态系统中土壤碳收支和碳循环也是当前最为重要的研究课题之一。本研究在前人对火地塘林区锐齿栎林生态系统结构、功能和生产力研究的基础上^[7], 以土壤碳的收入

(包括地上部分的凋落和地下部分的生长、枯死、周转和归还)、支出(凋落物层呼吸、矿质土壤呼吸、根系呼吸)及矿质土壤有机碳储存量动态为主线, 采用分室模型进行碳循环动态模拟, 旨在为构建森林生态系统碳循环模型, 评价森林生态系统碳收支状况及其对大气 CO₂ 浓度变化的贡献奠定基础。

1 研究区概况

火地塘林区位于秦岭中段南坡, 处于北纬 33°18'~33°28', 东经 108°20'~108°39' 的北亚热带北缘, 年平均气温 8~10℃, 年降雨量 900~1200 mm, 年蒸发量 800~950 mm, 湿润系数为 1.022, 年总日照 1100~1300 h, 无霜期 199 d。

林区主要成林树种有油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata* Maxim.)、华山松(*Pinus amandii* Franch.)、红桦(*Betula albo-sinensis* Burk.)、光皮桦(*Betula luminiifera* Winkl.)、青杄(*Picea wilsonii* Mast.)、冷杉(*Abies fargesii* Franch.)、山杨(*Populus davidiana* Dode)、漆树(*Toxicodendron vernicifluum* (Stokes) F. A. Barkl.)。主要伴生树种有青榨槭(*Acer davidii* Franch.)、千金榆(*Carpinus cordata* Bl.)、木姜子(*Litsea pungens* Hemsl.)等。土壤主要为花岗岩和变质花岗岩母质上发育起来的山地棕

* [收稿日期] 2002-12-05

[基金项目] 国家林业局“十五”攻关项目“陕西秦岭火地塘森林景观特征及生态功能研究”(2001-04); 日本JSPS 事业和文部科学省科学研究费补助金资助项目

[作者简介] 刘建军(1962-), 男, 山西运城人, 博士, 副教授, 主要从事生态学研究, 现为日本筑波大学生物科学系特别研究员。

壤, 土层厚度 50 cm 以上。

锐齿栎林标准地设在火地塘碳窑坡的山坡中部, 坡向为阴坡, 土壤为棕色森林土, 土壤厚度 100 cm。树种组成为 8 株 2 漆+ 杂木, 林分密度 1 225 株/hm², 林龄 65 年, 平均胸径 23.3 cm。

2 研究方法

2.1 土壤有机碳量的测定

在研究林分中挖取 1 个土壤剖面, 按照 A、B、C 3 个层次采样, 记载各个层次的厚度。土壤有机碳采用重铬酸钾氧化-外加热法进行测定。根据计算得到的有机碳百分含量, 结合土壤容重和厚度, 换算为单位面积土壤有机碳储量。具体推算公式为

土壤有机碳储量 = 土壤容重 × 采样深度 × 面积 × 土壤有机碳百分含量

2.2 凋落物层(A₀)碳储存量

在调查林分中设置 5 个 1 m × 1 m 的小样方, 调查凋落物的现存量, 按照 0.5 的换算系数计算出凋落物层中碳储量^[2]。

2.3 枯枝落叶的年凋落量

采用凋落物收集器测定锐齿栎林年凋落物量。在锐齿栎林分中布设 10 个 1 m × 0.5 m 的凋落物收集器, 测定枯枝落叶年凋落量, 并按 0.5 的换算系数计算出锐齿栎林林地土壤碳年输入量。

2.4 细根生物量和年凋落量

2.4.1 细根中碳储量的测定 用分层土柱结合水洗筛选法测定细根生物量。在设定的锐齿栎林标准地内随机挖取 10 个 20 cm × 20 cm 的土柱, 在实验室中将土柱放入水中浸泡 24 h, 清除砾石等杂物, 分拣出容易辨认的细根, 然后采用 0.5 mm 的土壤筛冲洗土柱并分检出所有细根; 根据根系的外形、颜色和弹性, 区分出 5 mm 的活根和死根并分别称重。取一定量的根样在 105 ℃ 下烘干至恒重, 计算干重并根据 1 g 生物量的碳含量将样品全部换算成碳储量。

2.4.2 细根年生长积累碳量及死亡归还碳量 根据 McClaugherty 等^[4]提出的最大、最小值法, 利用改进的计算模型计算锐齿栎细根的年生长积累碳量(MR)及死亡归还碳量(LR)。公式为

$$LR = Y_{\max} - Y_{\min} + D$$

$$MR = X_{\max} - X_{\min} + LR$$

式中, D 为细根年分解释放碳量; Y_{max} 为死细根碳储量最大值; Y_{min} 为死细根碳储量最小值; X_{max} 为

活细根碳储量最大值; X_{min} 为活细根碳储量最小值。

2.5 土壤呼吸速率的测定

土壤呼吸用碱溶液密闭吸收法测定。所使用的密闭容器呼吸筒是用马口铁皮卷制(自制)的直径为 16 cm, 高 20 cm 的圆柱筒, 并选择直径稍大的培养皿作为呼吸筒的顶盖, 用凡士林密封防止漏气。在设置的样地中选择 1 株平均木, 在其上、下、左、右 4 个方向各布设 4 个呼吸筒, 将呼吸筒嵌入土层 5 cm 深处, 于 1998-04~10, 每 10 d 测定 1 次, 用 2 mol/L 的 KOH 溶液吸收 CO₂, 每次密闭吸收时间为 48 h; 吸收液的容器为 100 mL 的广口玻璃瓶, 吸收液用量为 30 mL。

2.6 土壤碳循环的分室模型

在对森林生态系统碳循环中各个分量进行定量测定的基础上, 利用分室模型进行碳循环的动态模拟分析。本研究采用日本学者中根周步^[1,4,6]提出的森林生态系统土壤碳循环分室模型, 其参数 L, LR, MO, M, MRD, MR, TA, TR, SL, SM, SRD, SR 和 SS 分别代表枯枝落叶年凋落量、细根死亡年凋落量、凋落物层储存有机碳量、矿质土壤储存有机碳量、死细根储存有机碳量、活细根储存有机碳量、凋落物层(A₀)年分解转化土壤有机碳量、死细根分解转化土壤有机碳量、凋落物层年呼吸量、矿质土壤年呼吸量、死细根年呼吸量、活细根年呼吸量和林地年呼吸量。

3 结果与分析

3.1 凋落物层碳储存量和枯枝落叶年凋落量

碳在凋落物层的循环主要表现在 3 个方面: 碳的输入(主要是枯枝落叶年凋落输入量); 凋落物层呼吸作用释放的 CO₂ 量; 凋落物层腐殖化形成土壤腐殖酸(如胡敏酸、富里酸)的量。对火地塘林区锐齿栎林凋落物层碳储存量和年凋落输入量的调查结果表明, 该林区锐齿栎林凋落物层厚度可达 7.43 cm, 碳储量达到 5.03 t/hm², 相应的枯枝落叶年凋落输入的碳量为 1.73 t/hm²。

3.2 土壤层有机碳储存量

土壤碳库是陆地生态系统碳循环的重要组成部分, 对火地塘锐齿栎林土壤碳储量的测定结果(表 1)表明, 火地塘锐齿栎林土壤碳储量为 167.81 t/hm², 其中 84.9% 储存在 A、B 两个森林土壤层次。

表 1 锐齿栎林土壤碳储量

Table 1 The soil carbon storage in the sharp tooth oak forest

土壤层次 Layer	土壤有机碳含量/(g · kg ⁻¹) Content of soil organic carbon	容重/(g · cm ⁻²) Bulk density	土层深度/cm Depth	碳储量/(t · hm ⁻²) Carbon storage
A	4.91	0.92	28	73.365
B	2.61	1.14	40	69.035
C	0.98	1.49	30	25.410
合计 Total			98	167.810

3.3 细根中碳储存密度季节变化及细根枯死过程中的碳年周转(转移)量

根系(主要指细根,直径 5 mm)在 1 年中处在不断的生长和代谢凋落过程中,这个周转代谢过程,构成了土壤有机碳输入的另一个途径,即细根的枯死脱落和凋落。在对火地塘林区天然锐齿栎林细根生物量季节动态调查的基础上^[7],计算得出火地塘林区锐齿栎林死根库中的碳储量和细根枯死凋落年输入碳量列于表 2。由表 2 可见,锐齿栎林活细根储存的碳平均为 4.642 t/hm²,每年 4 月活细根的碳储量最小,仅为 4.296 t/hm²;8 月达到最大,为 4.966 t/hm²;死细根储存的碳储量平均为 1.215 t/hm²,4 月份最大,为 1.595 t/hm²;7 月份最小,为 0.819 t/hm²。细根碳储量的这种变化可能与

表 2 油松、锐齿栎林细根碳储存密度的季节变化

Table 2 The seasonal dynamic of carbon storage density of fine roots in the Sharp tooth oak and Pinus tabulaeformis forests

根系 Root	月份 Month							平均 Average
	4	5	6	7	8	9	10	
活细根 Live fine root	4.296	4.488	4.670	4.786	4.966	4.752	4.538	4.642
死细根 Dead fine root	1.595	1.372	0.991	0.819	1.149	1.199	1.381	1.215

3.4 锐齿栎林土壤呼吸及碳的输出

1998-04~10 对火地塘林区锐齿栎林地土壤总呼吸量进行了测定。根据测定结果,建立了土壤总呼吸量与土壤温度(距地表 5 cm 深)之间的回归方程,

表 3 锐齿栎林土壤呼吸碳释放量

Table 3 The soil carbon released by respiration of Sharp tooth oak forest

月份 Month	土壤呼吸量/(t · hm ⁻²) Respiration	月份 Month	土壤呼吸量/(t · hm ⁻²) Respiration
4	0.672	8	1.045
5	0.749	9	0.865
6	0.981	10	0.611
7	1.186	合计 Total	6.109

3.5 锐齿栎林土壤碳循环分室模型的定量分析

根据中根^[6]提出的森林生态系统碳循环分室模型,用锐齿栎林土壤碳循环主要分室碳密度和通量的分析结果,可定量计算出锐齿栎林土壤碳循环的各分室参数。

由于根系呼吸释放的碳量以及凋落物层和死细根层等分解过程中有机碳,每年转化为土壤腐殖酸

锐齿栎在 1 年中的生长节律有关,即在火地塘林区,锐齿栎一般在 5 月初才开始放叶,6 月末叶的干重趋于稳定,林分叶面积指数达到最大,到 8 月份锐齿栎的材积生长最快,需要吸收的根量也最多。生长季后期,树木生长减缓,逐渐进入休眠期,部分根系也如叶子一样凋落归还,死亡量增大,直到整个休眠期都有细根死亡,因此,翌年春季死细根碳储量达到最大。

已有的大量研究^[1,3~6]表明,在森林生态系统中,细根的死亡和分解是土壤获得物质和能量的一个重要途径。在对火地塘林区锐齿栎林细根周转代谢过程及碳储量变化研究的基础上,运用改进的 McClaugherty 模型,计算得出锐齿栎林细根年枯死过程的碳周转量为 1.567 t/hm²^[8]。

并由其得出锐齿栎林土壤全年呼吸释放碳量(表 3)。由表 3 可知,锐齿栎林地年(生长季节)呼吸释放碳量为 6.109 t/hm²。

的量没有办法精确测量,并且其分解过程及分解速率与土壤微生物、土壤水分含量和土壤温度都有关系,很难定量测定。因此,进行土壤碳循环分室模型分析时,根据前人的研究结果提出如下假设:地带性顶极群落——锐齿栎林的物质循环处于动态平衡状态,各个分室中的物质储存量及各个分室间物质流通量保持稳定,即物质年供给量和年分解释放量

处于平衡状态; 地上凋落物(枯枝落叶)和地下凋落物(细根枯死)的分解和转化过程中, 用于呼吸的碳量和转换为腐殖酸的碳量之比为常数($1.8^{[1,4]}$)。这样各个分室之间碳通量的关系式分别为:

$$L = TA + SL$$

$$TA + TR = SM$$

$$TR + SRD = LR$$

$$SL + SM + SRD + SR = SS$$

$$SL/TA = SRD/TR = \text{const} = 1.8$$

将实际测定的结果代入上述关系式, 计算出锐齿栎林土壤碳循环各分室模型参数列于表4。由表4可以看出, 各个分室中凋落物层年呼吸释放碳量为 1.112 t/hm^2 , 矿质土壤层为 1.178 t/hm^2 , 死根系层为 1.007 t/hm^2 , 活根系为 2.812 t/hm^2 , 分别占林地总呼吸量的18.2%, 19.3%, 16.5%和46.0%。

表4 锐齿栎林土壤碳循环分室模型参数

L	LR	MO	M	MRD	MR	TA	TR	SL	SM	SRD	SR	SS
1.730	1.567	5.030	167.81	1.215	4.642	0.618	0.560	1.112	1.178	1.007	2.812	6.109

4 结论与讨论

1) 在对锐齿栎林地土壤有机碳各个分室的碳储量及部分碳通量指标进行实际测定的基础上, 本研究应用分室模拟模型, 计算出各分室模型参数, 为进一步评价各分室对大气 CO_2 的贡献奠定了基础。本研究发现, 火地塘林区锐齿栎林土壤有机碳储量为 174.055 t/hm^2 , 其中矿质土壤层为 167.810 t/hm^2 , 凋落物层(A_0 层和死细根)为 6.245 t/hm^2 , 凋落物层中 A_0 层占80.5%, 死细根占19.5%。植物每年凋落输入到凋落物层中的碳量(包括地上部分的枯枝落叶和地下部分的细根)为 3.297 t/hm^2 , 其中地上部分52.5%, 地下部分47.5%。由此可见, 森林生态系统碳循环研究中, 死根的周转代谢是不可忽视的。另外还发现, 凋落物层每年以腐殖酸的形式分解输入到矿质土壤中的碳量为 1.178 t/hm^2 。

锐齿栎林地年(生长季节)呼吸释放碳量(含植被根系呼吸量) 6.109 t/hm^2 , 其中凋落物层为 1.112 t/hm^2 , 矿质土壤层为 1.178 t/hm^2 , 死根系为 1.007 t/hm^2 , 活根系层为 2.812 t/hm^2 , 分别占林地总呼吸量的18.2%, 19.3%, 16.5%和46.0%。

2) 根系呼吸占林地土壤总呼吸量的比例, 是近年来研究的热点问题之一。由于实际测量中无法直接把根系和土壤区分开来直接测定, 只能应用

人工除去根系进行对比试验或采用其他间接方法进行, 因此所得结果差异很大。已有报道^[9~11]表明, 根系呼吸释放的碳量占林地土壤总呼吸释放碳量10%~90%, 本研究表明, 锐齿栎林根系呼吸占土壤呼吸量的46%, 与大多数研究结论相似。

周玉荣等^[2]通过对我国主要森林生态系统碳储量和碳平衡的研究, 认为我国森林土壤平均碳储量为 193.55 t/hm^2 , 相当于生物量碳储量的3.4倍; 由于植被类型和气候特点的不同以及土壤类型的差异, 不同区域土壤中碳储量也存在着很大差异。我国森林土壤中碳储量最大的是云冷杉林, 其土壤碳储量达 360.79 t/hm^2 ; 最低的是暖性针叶林和热带林, 其土壤碳储量为 116.49 t/hm^2 ^[2]。与全国森林土壤碳储量平均水平相比, 火地塘锐齿栎林土壤碳储量稍低。

自然界存在着复杂多样的生态系统类型, 并处于不同的演替阶段, 随着对森林生态系统研究的不断深入, 人们对其认识也更加深刻。本研究是在假设锐齿栎林的物质循环处于动态平衡的状态下进行的, 而这种状态只是森林生态系统演替过程中的一个阶段, 今后应加强对不同演替阶段的森林生态系统土壤碳循环的系统研究, 不断完善和掌握各个分室的碳储量及分解转化速率, 为森林生态系统碳收支状况的准确评价提供依据。

[参考文献]

- [1] Kaneyuki Nakane Carbon cycling in forest ecosystem s[J]. Japanese Journal of Ecology, 1986, 36(1): 29- 39.
- [2] 周玉荣, 于振良, 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(4): 518- 522.
- [3] Akihiko Ito Soil organic carbon storage as a function of the terrestrial ecosystem with respect to the global carbon cycle[J]. Japanese Journal of Ecology, 2002, 52(3): 189- 227.
- [4] Kaneyuki Nakane A mathematical model of the behavior and vertical distribution of organic carbon in forest soils II. A revised model taking the supply of root litter into consideration[J]. Japanese Journal of Ecology, 1978, 28(3): 169- 177.

- [5] Kaneyuki Nakane Dynamic of soil organic matter in different parts on a soil under evergreen oak forest[J]. Japanese Journal of Ecology, 1975, 25(4): 206- 216
- [6] Kaneyuki Nakane Comparative studies of cycling of soil organic carbon in three primeval moist forests[J]. Japanese Journal of Ecology, 1980, 30(2): 155- 172
- [7] 陈存根, 彭 鸿 秦岭火地塘林区主要森林类型的现存量和生产力[J]. 西北林学院学报, 1996, 11(增刊): 92- 102
- [8] 刘建军, 王得祥, 雷瑞德, 等. 秦岭林区天然油松、锐齿栎林细根周转过程与能态变化[J]. 林业科学, 2002, 38(4): 1- 6
- [9] 河原辉彦 リターの分解について(IV)土壤呼吸量中の根の呼吸量の推定[J]. 日本林学会会誌, 1976, 58: 353- 359
- [10] 片桐成夫 落叶宏叶树林における土壤呼吸に占める根の呼吸量の推定[J]. 日本林学会会誌, 1988, 70: 151- 158
- [11] 白旗学, 桥本良二, 北川道隆 森林土壤から放出される二酸化炭素フラックス[J]. 岩手大学演習林報告, 1996, 27: 1- 10

The soil carbon cycle dynamic simulation of *Sharp tooth oak* forest at the Huoditang Forest Region

L IU J ian-jun^{1,2}, WANG De-xiang¹, LEI Rui-de¹, Takehisa², WANG Y i-long¹

(1 College of forest, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Institute of Biological Sciences, University of Tsukuba, Japan)

Abstract: Using soil carbon cycle compartment model, carbon storage and flux of each soil carbon compartment of *Sharp tooth oak* forest in Huoditang forest region were analyzed in this paper. The results showed that the soil organic carbon storage density of the region was 174.055 t/hm², it was 167.810 t/hm² and 6.245 t/hm² of mineral soil layer and litter fall respectively. In litter fall layer, it accounts for 80.50% and 19.50% of A₀-layer and dead fine root layer. The amounts of annual carbon input into litter fall layer (including overground litter and underground fine roots) via plant litter fall was 3.297 t/hm². The upper part accounts for 52.5%, the underground part accounts for 47.5%. The amount of annual carbon input into mineral soil via humus acid formed by litter decomposing was 1.178 t/hm². The amounts of annual (during growth season) carbon released by respiration of *Sharp tooth oak* forest (including vegetation root system respiration) were 6.109 t/hm².

Key words: carbon cycle; *Sharp tooth oak* forest; dynamic simulation