

黄土高原子午岭人工油松林碳储量与碳密度研究

孟蕾¹, 程积民^{1, 2}, 杨晓梅², 韩娟娟¹, 范文娟³, 胡秀娟⁴

(1. 西北农林科技大学 动物科技学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学 生命科学学院, 陕西 杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为准确估计子午岭林区人工油松林群落的碳库分配特征, 运用湿烧法对该群落空间尺度上的碳储量及碳密度进行了估算, 并分析了各层次碳储量分配特征。结果表明, 人工油松林群落平均含碳率为0.446 2, 空间尺度上各层次差异显著; 整个油松林碳储量为7.649 8 Tg (1Tg=10⁶ t), 储碳密度为164.55 t/hm², 各层碳储量依次为: 土壤>乔木层>枯落物层>草本层>灌木层, 从而呈现空间分配不均的特征。此外, 子午岭人工油松林林龄在20 a, 生长进入中期, 林相整体生长旺盛, 此阶段若对林木实施规范的人工抚育管理措施, 将使其具有较大的碳吸存潜力。

关键词: 黄土高原; 子午岭; 人工油松林; 碳密度; 碳储量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)02-0133-05

中图分类号: S718.5

Artificial *Pinus Tabulaeformis* Carbon Storage and Density in Ziwuling Forest Area on the Loess Plateau

MENG Lei¹, CHENG Ji-min^{1, 2}, YANG Xiao-mei², HAN Juan-juan¹, FAN Wen-juan³, HU Xiu-juan⁴

(1. College of Animal Sciences, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Soil Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Life Sciences, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

4. College of Forests Sciences, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To accurately estimate carbon pool and features of artificial *Pinus tabulaeformis* in Ziwuling forest area, we use wet-burn method to account carbon storage and density on the spatial scale and analyze distribution characteristics at different levels. Results show that the mean carbon rate is 0.446 2, but it is quite different on spatial scale and has great significance between them. The total carbon storage is 7.649 8 Tg and its density is 164.55 t/hm². However, layers of carbon storage have the order of soil layer> tree layer> litter layer> herb layer> shrub layer, showing the uneven distribution of the characteristics on spatial scale. In addition, artificial *Pinus tabulaeformis* in Ziwuling forest area has grown for only about 20 years and still grows well. If efficient management measures are taken for artificial *Pinus tabulaeformis*, its communities will have a greater potential for carbon sequestration.

Keywords: Loess Plateau; Ziwuling; artificial *Pinus tabulaeformis*; carbon density; carbon storage

大气中CO₂浓度迅速增加, 引发全球变暖已成为世界面临的严峻问题^[1]。森林作为全球陆地生态系统的主体, 贮存了陆地生态系统76%~98%的有机碳, 而且每年的固碳量约占整个地球生物固定量的2/3^[2]。因此, 森林生态系统不仅在维护和改善全球生态环境上起着重要作用, 而且在全球碳循环和碳平衡中发挥着不可替代的作用^[3]。国内外对森林生态

系统碳贮量和贮存潜力进行了大量的研究, 但大多局限于天然林^[4-5], 对人工林的研究较少, 我国是世界上人工林面积最大的国家^[6], 已成林的人工林面积约3.43×10⁷ hm²^[7], 其中80%以上为中、幼林和近熟林^[8]。因此, 探究我国人工林碳储量及其潜力, 对整个国家应对当前气候变暖、履行森林碳汇抵消工业温室气体排放量具有重要的意义。

收稿日期: 2009-10-09

修回日期: 2009-11-22

资助项目: 中国科学院重要方向项目(KZCX2-YW-441; KZCX2-YW-149); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB106803); 国家自然科学基金重点项目(40730631); 农业部“现代农业产业技术体系建设专项”

作者简介: 孟蕾(1984—), 女(汉族), 陕西省宝鸡市人, 硕士研究生, 主要方向为植被生态恢复与森林碳研究。E-mail: 525ml@163.com。

通信作者: 程积民(1955—), 男(汉族), 陕西省蒲城县人, 研究员, 博士生导师, 主要从事草地资源与恢复生态等方面的研究工作。E-mail: gyzcjm@ms.isw.c.cn。

油松(*Pinus tabulaeformis*)是我国特有树种^[9],也是我国暖温带森林主要建群种,它对大陆性气候及大气干旱有较强的适应性,生长速度中等,是北方地区主要的造林树种之一,也被认为是黄土高原地区退耕还林工程中的优良树种^[10-11]。目前,在子午岭林区分布着较大面积的人工油松林。然而,对油松林碳储量的研究主要集中在秦岭火地塘地区天然次生林的研究^[12-13],对黄土高原子午岭林区人工油松林的储碳密度和碳储量的研究还鲜见报道。本研究对油松林及林下植被采用实测含碳率,得出该区域储碳密度和碳储量,旨在为准确评价人工油松林在该区域生态系统碳平衡中的作用提供理论依据,为进一步研究黄土高原子午岭林区森林生态系统的碳贮量及其潜力提供基础资料。

1 研究区概况

子午岭是黄土高原腹地唯一隆起的长塬,位于陕甘两省交界处的 108°10′—109°08′E, 35°03′—36°37′N, 是洛河和泾河的分水岭,属天然次生林针阔叶混交林类型。海拔 1 280~1 500 m, 相对高差 200 m 左右, 年均气温 7.4 °C, 极端最高气温 36.7 °C, 极端最低气温 -27.7 °C, ≥10 °C 积温 2 671.0 °C, 无霜期 112~140 d。年平均相对湿度 63%~68%, 年均降雨量 587.6 mm。土壤以石灰性褐土为主, 皆发育于原生(山坡)或次生(沟谷)黄土, 黄土层下覆盖的红土厚约 80~100 m, 山体在阴坡和山脊坡面平缓, 阳坡和半阳坡坡面较陡, 属温凉半干旱区黄土覆盖的森林草原地带, 适于杨、桦、栎等部分落叶阔叶林和温性针叶林发育。子午岭林区林相整齐, 植物种类丰富, 目前林区郁闭度 0.80~0.95, 是黄土高原中部面积最大, 保存最为完整, 且最具代表性的天然次生林区^[14-16]。其对于改善陇东及周边地区的生态环境, 水源涵养、气候调节及保障农牧业发展具有十分重要的作用。

2 材料与方法

2.1 试验材料与样地选择

试验地设置在甘肃省合水县连家砭林场, 选择了具有典型代表性的人工油松林群落, 该群落目前的人工造林面积已达到了 4.65×10⁴ hm²。本试验主要是对人工油松林群落碳储量的现存量进行了定量研究, 探讨森林对全球气候变化的贡献。采样时间选择在林木生长缓慢、吸收的碳与其自身呼吸作用相对平衡的 10 月下旬, 采样时考虑到地形条件, 因此, 采样地点选取了不同坡向(阴、阳坡)和坡位(坡上部、坡中部、坡下部)。

2.2 研究方法

2.2.1 森林生物量测定 (1) 乔木生物量: 试验选择林相相对整齐, 在具有一定代表性的地段上(不同的坡向、坡位)设置 12 个(阳坡 3 个、阴坡 9 个)标准地(10 m×10 m), 标准地内每木检尺, 同时, 配合林场的森林抚育工程, 实测伐倒标准木的树干、树枝、树叶、树皮、树根和果球等各器官生物量, 根据组分与测树因子项(D²H)的异速生长模型, 由回归方程 $B = a(D^2H)^b$ (B——林分生物量; D——林分平均胸径; H——林分平均高; a, b——为回归系数)推算乔木层的生物量, 回归方程如表 1 所示。(2) 灌木、草本和枯落物生物量: 在每块标准地内设 3 个 2 m×2 m 的样方, 采用收获法测定林下灌木(枝十干、叶、根)、草本(枝、叶、根)生物量, 同时测定小样方内的地面枯落物量(未分解层、半分解层和全分解层), 分别取样, 烘干后换算成单位面积的生物量。

表 1 人工油松林乔木层各组分的生物量回归方程 [$Biomass = a(D^2H)^b$] 参数

| 部位 | a | b | R ² | F 值 | 样本参数 |
|----|-------|-------|----------------|-----------|---|
| 树干 | 3.486 | 0.193 | 0.825 | 343.675** | 样本数: n=75; 胸径范围: 5~49 cm; 树高范围: 5~16 m |
| 树枝 | 1.468 | 0.219 | 0.894 | 613.758** | |
| 树叶 | 0.322 | 0.351 | 0.874 | 505.754** | |
| 树皮 | 0.089 | 0.454 | 0.885 | 564.169** | |
| 果球 | 0.008 | 0.692 | 0.786 | 267.402** | |
| 树根 | 1.050 | 0.272 | 0.912 | 759.829** | |
| 合计 | 5.162 | 0.274 | 0.932 | 996.608** | |

注: **表示差异显著(P<0.01)

2.2.2 土壤样品采集与处理 在各标准地内选择 3 个样方(左、中、右), 用直径 10 cm 的土钻取样, 取样深度为 90 cm; 分为 0—10 cm, 10—30 cm, 30—50 cm, 50—70 cm, 70—90 cm 共 5 个层次, 每个样方采样 3 个, 采样时每一采样层重复 3 次制成一个混合样, 将采集样品编号带回实验室, 取一部分在 105±5 °C 烘至恒重后, 计算土壤含水量, 同时用环刀法测定土壤容重。对剩下的样品挑除植物根系和石砾等杂物, 于阴凉处自然风干后用四分法过 0.25 mm 筛, 编号备用。

2.2.3 有机碳含量的测定 在标准地内选择不同胸径的标准木 3 株, 重复 3 次, 采用分层切割法, 使用全根挖掘得到地下部分根系, 收集乔木各器官(枝、叶、根、皮、干和果球), 采样时同一胸径林木重复 3 次制成一个混合样, 并在各标准地内采集灌木(枝十干、叶、根)、草本(叶、根)和枯落物(未分解层、半分解层和全分解层)的样品, 放入 80±5 °C 的烘箱中至恒重, 烘干的样品粉碎之后过筛、编号备用。本实验有机碳(质)含量均采用湿烧法进行测定^[17]。

2.2.4 人工油松林碳储量的计算 乔木层碳储量为各器官储碳密度乘以其生物量之和; 灌草层碳储量为各层内不同种类的碳储量之和; 枯落物层碳储量为各层储碳密度与其生物量乘积之和。乔木层、灌草层和枯落物层的储碳密度采用实测数据, 土壤储碳密度与土壤面积的乘积为土壤碳储量, 土壤储碳密度(t/hm^2)计算公式为^[18]:

$$S = BD \times C \times T \times 100$$

式中: S ——土壤储碳密度(t/hm^2); BD ——土壤容重(g/cm^3); C ——土壤有机碳含量(%); T ——土层厚度(cm)。人工油松林碳储量是乔木层、灌草层、枯落物层和土壤层的碳储量之和。

2.3 数据分析

根据野外调查资料和实验室分析结果, 用 Excel 2003 和 SPSS 10.0 软件进行数据处理分析。

3 结果与分析

3.1 人工油松林乔木层储碳密度和碳储量特征

由表 2 可以看出, 子午岭人工油松林群落的乔木层储碳密度是 $30.37 t/hm^2$, 总碳储量为 $1.4118 Tg$, 其中地上部分(包括树干、树枝、树叶、树皮和果球)碳储量为地下部分的 4 倍, 可见在乔木层中地上储存了绝大部分的碳量。此外, 人工油松林各器官的储碳密度从大到小的顺序为: 树干>树根>树枝>树

叶>树皮>果球, 介于 $2.28 \sim 10.10 t/hm^2$, 从而呈现林木各营养器官中的碳密度差异, 人工油松林各器官的含碳率平均值为 0.5228 ± 0.0304 , 各器官含碳率差异较小, 从而使得生物量的大小直接影响其储碳密度和碳储量。

3.2 人工油松林灌、草层储碳密度和碳储量特征

森林灌草层的碳储量和碳密度与森林类型、年龄以及人为干扰有关^[19]。油松林种植密度较大, 林龄大约在 20 a 左右, 林相整齐, 林窗密度较小, 光照投射到林内有限, 使得林下灌木及草本分布较少。

本试验对其主要灌木及草本优势种碳储量及碳密度进行了分析(表 3—4), 结果表明, 灌木层, 总碳储量为 $0.3980 Tg$, 各优势种之间碳储量从大到小的顺序为: 沙棘>卫矛>悬钩子, 造成种间差异的主要原因与该林地内其生长的状况和生物量大小相关。而草本层, 不同种各器官的碳储量大小顺序为: 干+枝>树根>树叶, 且种间碳储量大小各异: 大披针苔草>白羊草>中华萎陵菜>披碱草>铁杆蒿>野棉花。

总体来讲, 灌草层地上部分生物量较大, 从而使得碳密度及碳储量是地下部分的 2 倍, 同时也可以看出, 碳在灌草层的分布因种类的差别而不同, 这就给寻找吸碳及储碳高植被提供了可依循的基础。

表 2 人工油松林乔木层储碳密度和碳储量分布

| 部位 | 生物量/($t \cdot hm^{-2}$) | 含碳率/($g \cdot g^{-1}$) | 储碳密度/($t \cdot hm^{-2}$) | 碳储量/Tg |
|----|---------------------------|--------------------------|----------------------------|---------|
| 树枝 | 10.16 ± 3.33 | 0.540 0 | 5.48 ± 1.80 | 0.254 9 |
| 树叶 | 7.33 ± 3.09 | 0.553 2 | 4.05 ± 1.71 | 0.188 4 |
| 果球 | 4.61 ± 2.94 | 0.494 2 | 2.28 ± 1.45 | 0.105 8 |
| 树皮 | 5.29 ± 2.83 | 0.541 0 | 2.86 ± 1.53 | 0.133 0 |
| 树干 | 19.11 ± 5.84 | 0.528 5 | 10.10 ± 3.09 | 0.469 5 |
| 树根 | 11.66 ± 4.45 | 0.479 8 | 5.60 ± 2.13 | 0.260 0 |
| 总计 | | | 30.37 | 1.411 8 |

表 3 人工油松林灌木层储碳密度和碳储量分布

| 种类 | 部位 | 生物量/($t \cdot hm^{-2}$) | 含碳率/($g \cdot g^{-1}$) | 储碳密度/($t \cdot hm^{-2}$) | 碳储量/Tg |
|-----|-----|---------------------------|--------------------------|----------------------------|---------|
| 沙棘 | 干+枝 | 3.38 ± 0.23 | 0.470 5 | 1.80 ± 0.11 | 0.083 8 |
| | 叶 | 1.27 ± 0.05 | 0.495 4 | 0.63 ± 0.02 | 0.029 3 |
| | 根 | 3.09 ± 0.09 | 0.469 3 | 1.45 ± 0.04 | 0.067 4 |
| 悬钩子 | 干+枝 | 1.68 ± 0.05 | 0.481 0 | 0.81 ± 0.02 | 0.037 5 |
| | 叶 | 0.30 ± 0.04 | 0.444 8 | 0.13 ± 0.02 | 0.006 2 |
| | 根 | 1.32 ± 0.06 | 0.464 4 | 0.61 ± 0.03 | 0.028 5 |
| 卫矛 | 干+枝 | 3.40 ± 0.54 | 0.466 6 | 1.59 ± 0.22 | 0.073 7 |
| | 叶 | 1.10 ± 0.26 | 0.456 2 | 0.50 ± 0.11 | 0.023 4 |
| | 根 | 2.51 ± 0.38 | 0.411 5 | 1.03 ± 0.14 | 0.048 1 |
| 总计 | | | 8.56 | 0.398 0 | |

表 4 人工油松林草本层储碳密度和碳储量分布

| 草本种类 | 部位 | 生物量/(t·hm ⁻²) | 含碳量/(g·g ⁻¹) | 储碳密度/(t·hm ⁻²) | 碳储量/Tg |
|-------|-----|---------------------------|--------------------------|----------------------------|---------|
| 野棉花 | 干+枝 | 0.54±0.05 | 0.417 6 | 0.23±0.02 | 0.010 5 |
| | 叶 | 0.04±0.01 | 0.403 4 | 0.01±0.00 | 0.000 8 |
| | 根 | 0.04±0.01 | 0.422 6 | 0.01±0.00 | 0.000 9 |
| 铁杆蒿 | 干+枝 | 1.11±0.06 | 0.494 8 | 0.55±0.03 | 0.025 6 |
| | 叶 | 0.14±0.03 | 0.484 1 | 0.07±0.01 | 0.003 2 |
| | 根 | 0.60±0.04 | 0.445 6 | 0.27±0.02 | 0.012 5 |
| 中华委陵菜 | 叶 | 2.17±0.62 | 0.443 9 | 0.96±0.28 | 0.044 8 |
| | 根 | 2.01±0.50 | 0.376 0 | 0.76±0.19 | 0.035 1 |
| 披碱草 | 叶 | 2.08±0.75 | 0.464 0 | 0.97±0.35 | 0.044 9 |
| | 根 | 1.99±0.48 | 0.285 6 | 0.57±0.14 | 0.026 4 |
| 白羊草 | 叶 | 4.11±0.52 | 0.415 4 | 1.71±0.22 | 0.079 3 |
| | 根 | 1.87±0.52 | 0.280 7 | 0.53±0.14 | 0.024 4 |
| 大披针苔草 | 叶 | 4.11±1.20 | 0.403 8 | 1.66±0.48 | 0.077 2 |
| | 根 | 2.02±0.53 | 0.306 3 | 0.62±0.16 | 0.028 9 |
| 总计 | | | | 8.91 | 0.414 4 |

3.3 人工油松林枯落物层储碳密度和碳储量特征

森林枯枝落层的厚度、生物量大小森林类型、森林年龄、枯落物的分解速度、人为干扰以及温度、水分等因子有关。子午岭林区的人工油松林, 尽管林龄在 20 a 左右, 但枯枝落叶层已形成较明显的层次结构, 本实验通过对枯枝落叶层(未分解层、半分解层、全分解层)各层碳储量及密度的分别研究, 结果表明(表 5), 人工油松林群落中, 枯落物层总储碳密度为 22.88 t/hm², 碳储量为 1.063 8 Tg, 而各层的碳储量从大到小的顺序为: 未分解层> 半分解层> 全分解层, 分别占整个枯落物层碳储量的 63.71%, 27.24% 和 9.04%, 这主要是因为表层的枯落物还没有分解, 其生物量远远大于半分解层和分解层, 使得其成为枯枝落叶层碳量分布最多的层次。因此, 在研究枯落层碳储量时, 应针对其具体的层次结构分别研究, 从而准确地反映出该层碳库的大小。

表 5 人工油松林枯枝落叶层储碳密度和碳储量分布

| 项目 | 生物量/(t·hm ⁻²) | 含碳率/(g·g ⁻¹) | 储碳密度/(t·hm ⁻²) | 碳储量/Tg |
|------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|---------|
| 未分解层 | 31.44±9.69 | 0.463 7 | 14.58±4.49 | 0.677 8 |
| 半分解层 | 22.32±5.87 | 0.279 3 | 6.23±1.64 | 0.289 8 |
| 全分解层 | 14.63±3.34 | 0.141 5 | 2.07±0.47 | 0.096 2 |
| 总计 | | | 22.88 | 1.063 8 |

3.4 人工油松林土壤层储碳密度和碳储量特征分析

土壤各层的碳储量在 0.4973 ~ 1.4002 Tg 之间(表 6), 上层土(0—50 cm)的碳储量为 3.353 6 Tg, 占土壤层总储量的 76.89%; 下层土(50—70 cm)为 1.008 2 Tg, 占 23.11%, 从而可以看出, 土体内 50 cm

深度集中着土壤中大部分的碳, 是研究土壤碳库的重要深度。此外, 碳储量和储碳密度都随土壤深度的增加而逐渐递减, 这与地表枯枝落叶分解、土体内微生物活性以及理化性质息息相关。

表 6 人工油松林土壤层储碳密度和碳储量分布

| 土层深度/cm | 容重/(g·cm ⁻³) | 含碳量/(g·g ⁻¹) | 储碳密度/(t·hm ⁻²) | 碳储量/Tg |
|---------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|---------|
| 0—10 | 0.92 | 0.028 0 | 25.72±3.04 | 1.195 5 |
| 10—30 | 1.03 | 0.014 6 | 30.12±3.64 | 1.400 2 |
| 30—50 | 1.22 | 0.006 7 | 16.30±2.86 | 0.757 9 |
| 50—70 | 1.35 | 0.004 1 | 10.99±2.07 | 0.510 9 |
| 70—90 | 1.39 | 0.003 8 | 10.70±0.42 | 0.497 3 |
| 总计 | | | 93.83 | 4.361 7 |

4 结论

(1) 从空间尺度上, 人工油松林群落自上而下各层的碳储量从大到小的顺序是: 土壤层> 乔木层> 枯落物层> 草本层> 灌木层, 碳储量在 0.398 0 ~ 4.361 7 Tg 之间, 人工油松林整个土壤剖面的碳储量 4.361 7 Tg, 占人工油松林碳储量的 57.02%, 人工油松林植物的碳储量占人工油松林碳储量的 29.08%, 说明在该区域中土壤是人工油松林群落中最为重要的有机碳库。

(2) 不同的研究者对油松林乔木层的储碳密度和碳储量的估计不同。本研究对子午岭油松林的研究结果表明, 该区域的储碳密度和碳储量分别为: 30.37 t/hm², 1.41 Tg。而程堂仁等人^[29]对甘肃小陇山森林植被碳库的研究表明, 小陇山油松林的乔木层

储碳密度是 30.20 t/hm^2 , 与本研究结果基本一致, 而侯琳等人^[13]对秦岭火地塘林区油松的乔木层储碳密度是 6.59 t/hm^2 , 比本研究结果偏小, 这可能是由于在秦岭火地塘地区设置的试验地坡度陡、土层薄、林窗较大, 导致乔木分布不均匀且密度较小, 致使乔木层的碳密度不高。

(3) 本试验对子午岭油松林灌木层和草本层储碳密度和碳储量的研究, 采用与以往研究者不同的研究方法, 对灌木层和草本层的含碳率采用的是实测数据, 而有些研究者^[21-23]采用 0.45 或 0.50 作为林下植被的含碳率, 与它们相比较本研究采用实测数据更真实地反映了林下植被的储碳密度和碳储量, 为今后研究者在该区域对碳储量的研究提供基础资料。

(4) 不同研究者对中国土壤储碳密度估计结果差异很大, 李克让和方精云等人^[24-25]对中国常绿针叶林土壤有机碳密度的估算结果分别为 179.80 和 71.60 t/hm^2 , 而子午岭人工油松林土壤的储碳密度为 93.83 t/hm^2 。这可能是由于土壤类型、植被结构的不同以及气候差异造成了相关研究结果的不一致, 说明今后针对不同林分研究土壤有机碳库有着重要的意义。

[参 考 文 献]

- [1] Houghton R A, Hackler J L, Lawrence K T. The US Carbon Budget: Contributions from land-use change [J]. Science, 1999, 285: 574-577.
- [2] Fan S M, Glorr M, Mahlman J. Large terrestrial carbon sink in North America Implied by atmospheric and oceanic CO_2 data and models [J]. Science, 1998, 282: 442-446.
- [3] 方精云. 全球生态学: 气候变化与生态响应[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 136-137.
- [4] 陈楚莹, 廖利平, 汪思龙. 杉木人工林生态系统的碳素分配与贮量的研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(S): 175-178.
- [5] 方晰, 田大伦, 项文化. 不同经营方式对杉木林采伐迹地土壤储量的影响[J]. 中南林学院学报, 2004, 24(1): 1-5.
- [6] 黄从德, 张健, 杨万勤, 等. 四川人工林生态系统碳储量特征[J]. 应用生态学报, 2008, 19(8): 1644-1650.
- [7] 周广胜. 全球碳循环[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 172-173.
- [8] 赵敏, 周广胜. 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析[J]. 地理科学, 2004, 24(1): 50-54.
- [9] 张希彪, 王瑞娟, 上官周平. 黄土高原子午岭油松林的种子雨和土壤种子库动态[J]. 生态学报, 2009, 29(4): 1877-1884.
- [10] 邓娟, 上官周平. 子午岭林区人工与天然油松林 (*Pinus tabulaeformis*) 养分库和碳库特征[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 3231-3240.
- [11] 王彬, 王辉, 杨军珑, 等. 子午岭油松林林隙更新特征研究[J]. 林业资源管理, 2007, 4(2): 60-65.
- [12] 侯琳, 雷瑞德, 王得祥, 等. 秦岭火地塘林区油松群落乔木层的碳密度[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(1): 23-24.
- [13] 马明, 王得祥, 刘玉民. 秦岭火地塘林区天然油松林碳素空间分布规律[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2009, 31(3): 114-118.
- [14] 邹厚远, 刘国彬, 王晗生. 子午岭林区北部近 50 年植被的变化发展[J]. 西北植物学报, 2002, 22(1): 1-8.
- [15] 张平仓, 郑粉莉. 子午岭地区自然区域特征及其与土壤侵蚀的关系[J]. 水土保持研究, 1993, 17(1): 11-16.
- [16] 程积民, 赵凌平, 程杰. 子午岭 60 年辽东栎林种子质量与森林更新[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(2): 10-16.
- [17] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [18] 骆土寿, 陈步峰, 陈永富, 等. 海南岛霸王岭热带山地雨林采伐经营初期土壤碳氮储量[J]. 林业科学研究, 2000, 13(2): 123-128.
- [19] 方运霆, 莫江明, 彭少麟, 等. 森林演替在南亚热带森林生态系统碳吸存中的作用[J]. 生态学报, 2003, (9): 1685-1694.
- [20] 程堂仁, 冯菁, 马钦彦, 等. 甘肃小陇山森林植被碳库及其分配特征[J]. 生态学报, 2008, 28(1): 33-44.
- [21] 方精云, 刘国华, 朱彪, 等. 北京东灵山三种温带森林生态系统的碳循环[J]. 中国科学(D 辑), 2006, 36(6): 533-543.
- [22] 马明, 王得祥, 刘玉民. 秦岭火地塘林区天然油松林碳素空间分布规律[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2009, 31(3): 114-118.
- [23] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 13-16.
- [24] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(1): 72-80.
- [25] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳循环及其全球意义[M]//王庚辰, 温玉璞. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 129-139.