

刘迎春,王秋凤,于贵瑞,朱先进,展小云,郭群,杨浩,李胜功,胡中民. 黄土丘陵区两种主要退耕还林树种生态系统碳储量和固碳潜力. 生态学报 2011, 31(15): 4277-4286.

Liu Y C, Wang Q F, Yu G R, Zhu X J, Zhan X Y, Guo Q, Yang H, Li S G, Hu Z M. Ecosystems carbon storage and carbon sequestration potential of two main tree species for the Grain for Green Project on China's hilly Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica 2011, 31(15): 4277-4286.

黄土丘陵区两种主要退耕还林树种生态系统 碳储量和固碳潜力

刘迎春^{1,2}, 王秋凤^{1,*}, 于贵瑞¹, 朱先进^{1,2}, 展小云^{1,2}, 郭群^{1,2},
杨浩^{1,2}, 李胜功¹, 胡中民¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:黄土丘陵区是中华文明的起源地,而原有植被却遭受严重破坏。因此,自 20 世纪 70 年代末开始的三北防护林工程、退耕还林工程和天然林保护工程等大型生态恢复工程,在本区均有大面积分布。这些工程已经对生态恢复起到重要作用,并将对全球碳素循环起到积极作用。以黄土丘陵区的主要造林树种——油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.) 和刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.) 为研究对象,共设置样方 28 个,测定森林乔木、灌木、草本生物量及凋落物碳储量;钻取并分析土样 516 份,获得土壤有机碳储量。结合文献数据和农田碳储量数据,建立 0—86 年生油松林和 0—56 年生刺槐纯林生态系统碳储量—林龄序列;在此基础上分析造林对生态系统碳储量和固碳潜力的影响。结果表明,造林后的油松林和刺槐林生态系统的植被、凋落物及土壤碳储量逐渐增加;在没有人干扰的情况下,19、27、36、86 年生油松林生态系统碳储量分别为 70.76、143.43、167.30、271.23—332.26 Mg/hm²;8、17、39 年生刺槐林生态系统碳储量分别为 80.37、94.08、140.77 Mg/hm²。受间伐干扰,45、52 年生油松林生态系统碳储量分别为 136.42、168.56 Mg/hm² 相对于没有人干扰的油松林,其植被碳储量明显下降,而土壤碳储量保持稳定甚至升高。受乱砍滥伐干扰的 71 年生油松林和 56 年生刺槐林的生态系统碳储量分别为 118.87、76.99 Mg/hm² 相对于没有人干扰的森林,其植被碳储量和土壤碳储量均呈明显下降趋势。种植油松林之后的 86a 时间内,其生态系统固碳潜力为 211.61—272.64 Mg/hm²;而种植刺槐林,在 39a 时间内的生态系统固碳潜力为 81.15 Mg/hm²。

关键词:黄土丘陵区;生态系统碳储量;固碳潜力;油松;刺槐

Ecosystems carbon storage and carbon sequestration potential of two main tree species for the Grain for Green Project on China's hilly Loess Plateau

LIU Yingchun^{1,2}, WANG Qiufeng^{1,*}, YU Guirui¹, ZHU Xianjin^{1,2}, ZHAN Xiaoyun^{1,2}, GUO Qun^{1,2}, YANG Hao^{1,2}, LI Shengong¹, HU Zhongmin¹

1 Key Laboratory of Ecosystem Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The Loess Plateau covers 640000 square kilometers in Northwest China, and much of the Plateau's terrain is hilly. Though the Plateau was a cradle of early civilization, its primary vegetation has been severely degraded in modern times. In response, beginning in the 1970s, several National Ecology Restoration Projects have focused on restoring the region's ecological health. Among them are the Three-North Shelterbelt Project, the Grain for Green Project, and the Natural Forest Protection Project. These projects have played an important role in soil and water conservation, in some

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX2-YW-Q1-05-05);国家重点基础研究发展计划(2010CB833504)

收稿日期:2010-11-23; 修订日期:2011-05-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qfwang@igsnr.ac.cn

cases, reversing ecological destruction. In the future, these and other projects will play an important role in the carbon cycle. In this paper, we assessed the carbon storage and carbon sequestration potential of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.) and Black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) planted forest on the hilly Loess Plateau. For our study, we established 28 plots and collected 516 soil samples to measure biomass carbon density of trees, shrubs, and herbaceous plants, as well as carbon storage in litter and soil. The plots contained 6 types of Chinese pine forests planted between the 1940s and 1990s, 4 types of black locust forests planted between the 1950s and the 2000s, and 4 farmland plots, which served for comparison. The results showed that, following the afforestation, carbon storage increased gradually in vegetation, leaf litter, and soil for Chinese pine and black locust ecosystems, in the absence of human disturbance. The carbon storage was 70.76, 143.43, 167.30 and 271.23–332.26 Mg/hm² for the 19-, 27-, 36- and 86-year-old Chinese pine ecosystems, and 80.37, 94.08 and 140.77 Mg/hm² for the 8-, 17- and 39-year-old black locust ecosystems, respectively. Compared with the forest that in the absence of human disturbance, the 45- and 52-year-old Chinese pine ecosystems, which are recovering from thinning, had carbon storage of 136.42 and 168.56 Mg/hm², pose significant decline of vegetation carbon storage and the soil organic carbon storage keep stable or even increased, and the 71-year-old Chinese pine ecosystem and the 56-year-old black locust ecosystem, which had suffered significant timber poaching, had carbon storage of 118.87 and 76.99 Mg/hm², pose significant decline both of vegetation carbon and soil organic carbon. We take the carbon stock of cropland as the baseline, and take the forest plantation ecosystem, which in the absence of human disturbance, as the potential carbon storage. The carbon sequestration potential is 211.61–272.64 Mg/hm² for planting Chinese pine on farmland in 86 years, and 81.15 Mg/hm² for planting black locust in 39 years. Thus, planting Chinese pine and black locust, and weaken the human disturbance could both increase ecosystem carbon sequestration. With such an approach, the Loess Plateau will act as a significant carbon sink in the coming decades.

Key Words: hilly Loess Plateau; ecosystem carbon stock; carbon sequestration potential; Chinese pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.); Black locust (*Robinia pseudoacacia* L.)

黄土丘陵区作为中华文明的发源地,其生态环境多次受到严重破坏;又因黄土极易被水冲蚀,遂形成严重的水土流失区。为使本区的自然植被得到恢复,早在20世纪70年代便开始了举世瞩目的“三北”防护林工程;90年代末开始的退耕还林工程和天然林保护工程也在本区域有大面积分布。在全球气候变暖问题引起全世界人们关注的形势下,黄土丘陵区植被的恢复除了水土保持功能之外,其固碳功能也开始引起人们的重视。造林能否持续固碳或可以在什么时间内固碳,其固碳增汇潜力有多大,用什么方法进行评估造林的固碳潜力,是开展大规模生态环境工程必须考虑的问题;而目前针对森林碳储量和生产力的研究较多,对造林的增汇潜力研究较少^[1]。

森林固碳潜力是指森林在当前环境条件和自然干扰的情况下可能达到的碳储量与现实碳储量之差^[2-3]。森林固碳潜力采用的参考标准有老龄林(或成熟林)碳储量^[1-2]、森林采伐之前碳储量^[4]、区域平均固碳速率^[5]等指标。已有预测生态系统潜在固碳量或固碳潜力的方法有:连续清查(调查)法^[6-8]、空间代替时间法^[9]、限制因子法^[10-11]、情景分析或工程规划法^[12-14]。

刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)于20世纪60年代以后开始成为黄土高原丘陵沟壑区的主要造林树种,并且是该地区人工林面积最大的树种^[15]。油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)是我国特有树种,耐干旱、耐贫瘠,适应性强,是黄土高原主要的乡土树种之一,被认为是黄土高原地区退耕还林工程中的优良树种^[16-17]。因此,对这两种树种的生态系统碳储量现状和固碳潜力的研究,有助于加强对退耕还林工程固碳的认识。

本文选择黄土丘陵区典型的造林县为研究地点,利用空间代替时间样地调查法,建立黄土丘陵区自40年代以来、不同造林时期人工林碳储量的时间序列,尝试发现本区域植被恢复过程中生态系统碳储量随林龄变化的规律,为评估黄土丘陵区退耕还林工程的固碳功能提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 野外调查地点和样地信息

野外调查工作分别于 2007 年 8 月和 2010 年 8 月在山西省和陕西省进行。样地分布见图 1, 样地具体信息见表 1。

1.1.1 野外调查地点概况

吉县属于暖温带、半湿润地区, 土壤类型为褐土, 该地区为典型的黄土高原侵蚀地貌^[18]。年平均降水量为 576 mm, 年平均气温 10℃^[19], 主要造林树种为油松、刺槐、侧柏 (*Platycladus orientalis*) 和沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 等^[20]。安塞县属于中温带、半湿润地区, 主要土壤类型为黄绵土^[21]。年均降水量 549.1 mm, 年平均气温 8.8℃, 年蒸发量大于 1463 mm^[22]。植被区划上属森林草原区, 灌木呈零星分布, 天然植被已遭全部破坏, 主要造林树种为刺槐和沙棘。长武县属于暖温带、半湿润地区, 土壤类型为黄壤土。年平均降水量 584 mm, 年平均气温 9.1℃^[23], 主要造林树种为刺槐。

1.1.2 样点选择和样方布设

野外调查样点布设。从已经发表的文献中, 整理出 181 条森林生物量数据, 建立了黄土高原区刺槐林和油松林生物量数据库, 绘制了本研究和其他研究的黄土高原区刺槐林和油松林野外调查样地分布图(图 1), 作为布设野外调查点的参考, 使样地调查更具代表性。由图 1 可知, 已有研究样地主要分布于山西和陕西两省, 在内蒙古、宁夏、甘肃、青海等省区也分布着一些研究点, 这与黄土高原区的森林分布相一致。从人工林和天然林的分布来看, 大致以陕西和山西之间的黄河为界, 黄河以东以油松天然林为主, 黄河以西则以人工林(刺槐人工林和油松人工林)为主; 从油松和刺槐的分布来看, 越往西部刺槐林分布点相对越多。因此, 样地布设区域选择了刺槐人工林和油松人工林分布区的中部, 并且整体上沿着森林分布的东北-西南向布设。

样方设置。在每个调查点内, 首先根据当地林业部门提供的不同造林时期的林区分布情况, 选定调查林区; 然后在林区内采用随机法布设样地, 同时远离林缘, 尽量避免受人为干扰强烈区域^[24]。样方布设原则, 每种森林类型布设 3 个 20 m × 30 m 乔木样方, 每个乔木样方内沿对角线布设 3 个 5 m × 6 m 灌木样方, 每个灌木样方内布设 1 个 1 m × 1 m 草本样方, 每个草本样方内布设 1 个 0.25 m × 0.25 m 凋落物样方, 在凋落物样方内按 0—10, 10—20, 20—30, 30—40, 40—60, 60—100 cm 土层取土样。在操作过程中, 根据森林的实际情况, 对每种森林类型的样方数和样方大小进行了适当调整, 共布设样方 28 个, 其中油松纯林样方 14 个; 刺槐纯林样方 10 个; 农田样方 4 个, 详细信息见表 1。

1.2 样品采集和测定

1.2.1 森林林龄的确定方法

在每种森林类型的样地内, 选取多株标准木, 在其胸高处钻取树芯 2—4 个。将树芯带回实验室, 经打磨、交差定年后得到树木年轮数, 以树芯的年轮数作为此森林类型的林龄。经比较, 由该方法得到的林龄与林业部门的造林年限一致。

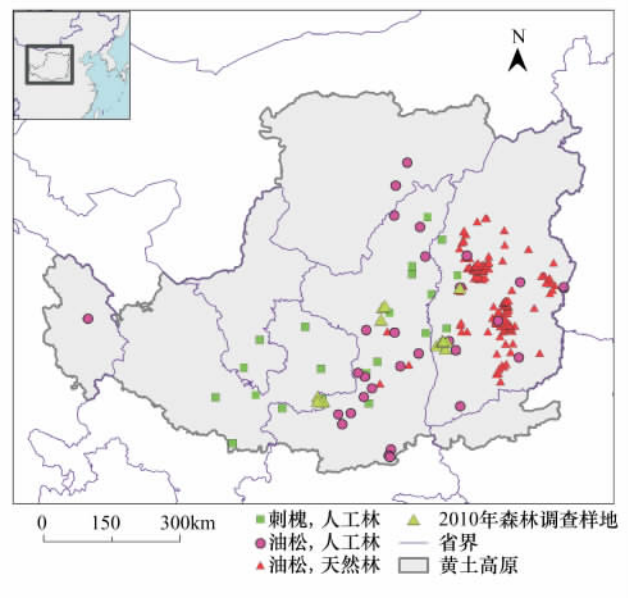


图 1 本研究和其他研究在黄土高原区对油松林和刺槐林进行生态系统碳储量调查的样地分布

Fig. 1 The forest carbon stock inventory sites of *Pinus* and *Robinia* on the Loess Plateau in this study and other literatures

表 1 黄土丘陵区样地基本情况

Table 1 Information of sample plots in the hilly Loess Plateau

林型 Forest type	地名 County	林龄 Stand age /a	纬度 N Latitude /(°)	经度 E Longitude /(°)	海拔 Altitude /m	坡向 Aspect	坡度 Slope /(°)	样方数 Plot number	人为干扰 Human disturbance
油松林*	乡宁	71	36.08	111.06	1456	E	27	1	乱砍滥伐
油松林*	中阳	52	37.32	111.22	1219	N	27	1	间伐
油松林	吉县	45	36.11	110.81	1351	NW15°	30	3	间伐 3 次
油松林	吉县	36	36.19	110.60	1490	WS23°	9	3	—
油松林	吉县	27	36.26	110.86	1205	NW20°	32	3	—
油松林	吉县	19	36.27	110.76	1122	WN30°	29	3	—
刺槐林	安塞	56	37.01	109.36	1185	EN25°	33	1	乱砍滥伐
刺槐林	长武	39	35.13	107.83	1040	EN30°	12	3	乱砍滥伐
刺槐林	吉县	17	36.28	110.74	1144	SW25°	23	3	—
刺槐林	吉县	8	36.27	110.76	1094	SE34°	22	3	—
农田	吉县	—	36.27	110.77	940	—	0	1	—
农田	安塞	—	36.97	109.29	1074	—	0	1	—
农田	安塞	—	36.74	109.25	1258	E	15	1	—
农田	长武	—	35.13	107.68	980	—	0	1	—

* 为 2007 年野外调查样地

1.2.2 乔木层植被生物量的测定方法

油松和刺槐地上生物量测定方法。对样方内所有胸径 >4 cm 的乔木进行每木检尺。使用胸径尺测树木的胸径,使用手持激光测距仪(Leica Disto D5, Heerbrugg, Switzerland, 2009)测定每棵树的树高。如果林分过密,难以测定所有树的树高,则按径阶测定部分乔木的树高,用于建立树高-胸径关系方程,进而计算出其余树木的高度。乔木生物量计算所需的相对生长方程为文献中给定,同时考虑了各方程的物理意义、适用范围和模拟效果,筛选出油松和刺槐生物量相对生长方程^[25-26](表 2),进而计算出乔木各器官的生物量和总生物量。

表 2 油松和刺槐各器官生物量与胸径(D)、树高(H)的相对生长方程

Table 2 Organ biomass allometric equations with variances of diameter at breast height (D) and height (H) of Chinese pine and black locust

树种 Tree species	器官 Organ	相对生长方程 Biomass allometric equation	R ²	参考文献 Reference
油松	树干	$B = 0.02059 \times (D^2 H)^{0.9359}$	0.99	[25]
油松	树枝	$B = 0.00169 \times (D^2 H)^{1.1242}$	0.97	[25]
油松	树叶	$B = 0.00486 \times (D^2 H)^{0.8812}$	0.90	[25]
油松	树皮	$B = 0.00602 \times (D^2 H)^{0.8649}$	0.97	[25]
油松	树根	$B = 0.0086 \times (D^2 H)^{0.9204}$	0.96	[25]
刺槐	树干	$B = 0.02583 \times (D^2 H)^{0.95405}$	0.98	[26]
刺槐	树枝	$B = 0.00464 \times (D)^{3.21307}$	0.95	[26]
刺槐	树叶	$B = 0.02340 \times (D)^{1.92768}$	0.96	[26]
刺槐	树皮	$B = 0.00763 \times (D^2 H)^{0.94478}$	0.91	[26]
刺槐	树根	$B = 0.01779 \times (D)^{2.64480}$	0.88	[26]

1.2.3 灌木、草本地地上生物量和凋落物量的测定

灌木地上生物量测定,主要根据灌木植株大小和群落特征分别采用嵌套式模型法^[27]、平均木法^[17, 24]和相对生长法^[28]。

1) 针对灌木个体较大的情况,采用嵌套式模型法,建立灌木生物量与基径、高度、冠幅的关系方程,进而计算每株灌木的生物量。

2) 针对灌木个体较小且可以区分植株的情况, 测量每棵灌木的基径、高度和冠幅; 每个灌木样方每个物种选择标准样株 3 株称重, 进而推算样方内灌木的生物量。

3) 针对灌木植株太多、灌木群落呈团簇状、基径测量困难的情况, 测量灌丛的高度和面积; 收割其 1/4 或 1/8 进行称重, 进而估算样方内灌丛的鲜重。每个样方均按物种取部分灌木枝和叶的样品称量得鲜重, 带回实验室, 在 65 °C 下烘干称量得干重, 根据干重/鲜重比计算样方的灌木地上生物量。

草本地地上生物量的测定采用全部收获法, 获得草本地地上部分鲜重, 将全部或 1/2 样品带回实验室, 在 65 °C 下烘干, 称量得干重, 根据干重/鲜重比计算得到样方内草本地地上生物量。

凋落物量的测定采用全部收获法, 每个凋落物样方内的凋落物分两层(未分解层和已分解层)收集, 将全部或 1/2 样品带回实验室, 在 65 °C 下烘干, 称重, 得到样方内凋落物干重, 进而得到单位面积凋落物量。

1.2.4 土壤取样和分析

对于森林样地, 用内径为 6 cm 的土钻分层取样, 为增加土样代表性, 在每个草本样方内打 2—3 钻, 将取出的土混合均匀后取样, 带回实验室, 用于分析土壤有机碳含量。每个森林类型取 9 个重复土样(与草本样方数相等), 每个重复分 6 层, 即取回 $9 \times 6 = 54$ 个土样。对于农田样地, 按每个类型 5 个重复进行取样, 取样方法和分层均与森林样方相同。

土壤容重的测定, 按照每个植被类型挖一个剖面的标准, 分 6 层(与土壤取样分层相同)用环刀法取样, 带回实验室, 在 105 °C 下烘干后, 测得干重, 进而计算土壤容重。土壤样品经自然风干, 去除土样中根系和其它枯落物, 用球磨机研磨后, 采用重铬酸钾滴定法测土壤有机碳。

1.3 统计分析

1.3.1 森林生物量计算

油松林和刺槐林乔木的生物量计算见 1.2.2。灌木和草本生物量的计算, 首先获得其地上生物量(见 1.2.3), 然后通过已有研究给定的地上/地下生物量比, 计算其地下生物量和总生物量。本文采用灌木的地上地下生物量比为 1.1:1, 草本的地上地下生物量比为 0.21:1^[19]。

1.3.2 植被碳储量计算

植被碳储量由生物量乘以含碳率得到。含碳率参考值均来自发表文章, 在选择时主要考虑物种一致性。本文选定乔木的含碳率为 0.5; 灌木含碳率 0.49^[29]; 草本和凋落物含碳率分别为 0.40 和 0.39^[30]。

1.3.3 土壤碳储量计算

土壤碳储量计算参考程先富等的方法^[31], 略作修改:

$$\text{SOC} = 10 \sum_{i=1}^n D_i \times \theta_i \times C_i \times (1 - \delta_i) \quad (1)$$

式中, SOC 为土壤有机碳密度 Mg/hm^2 ; n 为土层数, 本文为 6; D_i 为不同土层的厚度 cm ; θ_i 为土壤容重 g/cm^3 ; C_i 为不同土层土壤有机碳的含量 g/kg ; δ_i 为 >2 mm 砾石含量(体积%)。由于黄土丘陵区的土壤以黄土母质发育而成, 砾石含量少; 在处理土壤样品时, 将全部土样磨碎, 因此公式(1)中的 δ_i 为 0。

1.3.4 生态系统碳储量

生态系统碳储量为植被碳储量、凋落物碳储量和土壤有机碳储量之和。

1.3.5 生态系统固碳潜力

生态系统固碳潜力可用公式(2)计算。由于黄土丘陵区植被破坏严重, 而人工林的林龄较短, 无法找到生态系统碳储量达到饱和状态的生态系统(如植被破坏前的生态系统或地带性植被老龄林生态系统)。因此, 本文所说的造林的生态系统固碳潜力是指在当前气候和自然干扰情况下, 生态系统类型由农田变为森林之后, 在未来一段时间内(几十年)的最大可能固碳量。基于此绘制的生态系统碳储量-林龄曲线可用于评估造林的固碳效应:

$$\text{CSP} = \text{CSr} - \text{CS} \quad (2)$$

式中, CSP (Carbon Sequestration Potential) 为生态系统固碳潜力 Mg/hm^2 ; CSr (Carbon Stock of referred Ecosystem) 为参考植被类型的碳储量 Mg/hm^2 , 当参考植被类型为碳储量达到饱和的生态系统时, 其碳储量称为生态系统碳容量 CCC (Carbon Carrying Capacity) [31]; CS (Carbon Stock) 为初始植被类型的碳储量 Mg/hm^2 。

由于参考植被类型的碳储量难以获得, 本文假设参考植被类型的各组成碳库(包括植被、凋落、土壤碳库)均达到最大值。因此, 按树种将各组成碳库-林龄序列中的最大碳储量之和(即最大植被碳库+最大凋落物碳库+最大土壤碳库), 以及碳储量-林龄曲线延长线上的值作为参考值的分布区间。

2 结果

2.1 植被碳储量

植被碳储量包括乔木、灌木和草本的地上和地下碳储量(表3)。从植被碳储量的组成来看, 乔木生物量占绝对优势(85.17%—100%), 灌木和草本碳储量较少。油松林下草本生物量很少, 仅为 0—0.11 Mg/hm^2 。刺槐林下草本的生物量比油松林稍多, 为 0.12—0.67 Mg/hm^2 。

从不同树种的植被碳储量来看, 在相同造林年限内油松 > 刺槐, 说明不同树种的植被固碳速率存在一定差异。如 36 年生的油松林植被碳储量为 67.47 Mg/hm^2 , 而 39 年生的刺槐林为 49.51 Mg/hm^2 。

从相同树种植物碳储量随造林年限的变化趋势来看, 其整体上呈现先增加后降低的趋势, 如 19、27、36、45、52、71 年生油松林的植被碳储量分别为 11.97、59.90、67.47、43.86、47.50、26.50 Mg/hm^2 ; 8、17、39、56 年生刺槐林的植被碳储量分别为 25.08、35.68、49.51、11.97 Mg/hm^2 。

表3 不同生态系统类型植被碳储量

Table 3 Vegetation carbon stock in different types of ecosystem

林型 Forest type	林龄 Stand age /a	乔木碳储量 C stock in arbor /(Mg/hm^2)				灌木碳储量 C stock in shrub /(Mg/hm^2)	草本碳储量 C stock in grass /(Mg/hm^2)	植被碳储量 C stock in vegetation /(Mg/hm^2)
		总计 Total	树干 Stem	树枝 Branch	树叶 Leaf			
油松林	71	26.50	15.79	3.46	2.18	5.09	—	26.50
油松林	52	47.50	28.71	6.14	3.94	8.71	—	47.50
油松林	45	43.44	25.60	5.06	3.79	8.99	0.34	43.86
油松林	36	67.45	39.19	7.59	6.03	14.64	0.01	67.47
油松林	27	58.23	31.00	5.78	5.13	13.11	1.67	59.90
油松林	19	10.23	5.70	1.05	0.97	2.51	1.63	11.97
刺槐林	56	11.37	9.06	2.04	0.26	2.47	1.31	13.35
刺槐林	39	49.01	30.24	7.27	1.32	10.19	0.21	49.51
刺槐林	17	35.45	21.80	5.29	0.93	7.43	0.11	35.68
刺槐林	8	23.52	13.19	3.49	0.92	5.91	1.35	25.08

2.2 凋落物碳储量

从不同树种的凋落物碳储量来看(表4), 油松林凋落物碳储量明显高于刺槐林。油松林未分解凋落物碳储量在 2.07—5.47 Mg/hm^2 之间, 已分解凋落物碳储量在 2.75—15.91 Mg/hm^2 之间; 而刺槐林的未分解凋落物碳储量在 1.38—2.14 Mg/hm^2 之间, 已分解凋落物碳储量在 2.59—6.72 Mg/hm^2 之间。

从同一树种凋落物碳储量随林龄的变化趋势来看, 基本为先增加之后达到相对稳定状态。当植被达到郁闭时, 油松林凋落物碳储量大概是植被碳储量的 30% 左右(如 27、36、45 年生油松林), 而刺槐林凋落物碳储量大概是植被碳储量的 15% 左右(如 17、39 年的刺槐林)。

2.3 土壤碳储量

从不同树种的土壤有机碳储量来看, 林龄相近的油松林和刺槐林的土壤有机碳储量相近。如 36 年生油松林和 39 年生刺槐林的土壤有机碳储量分别为 79.86、82.04 Mg/hm^2 , 19 年生油松林和 17 年生刺槐林分别为 53.97、53.99 Mg/hm^2 。

从同一树种的土壤有机碳储量随造林年限的变化趋势来看, 油松林和刺槐林的土壤碳储量在造林后的一

段时间内降低,甚至低于农田;之后随林龄增加而增加,最后因违规砍伐而降低。如 52 年生油松林土壤碳储量达到 108.58 Mg/hm²;39 年生刺槐林土壤碳储量达到 82.04 Mg/hm²,而 71 年生油松林和 56 年生刺槐林土壤碳储量分别降低到 79.89、58.65 Mg/hm²。

尤其值得关注的是 45 年生油松林经历了 3 次间伐,其植被碳储量低于 36 年生油松林,但其土壤有机碳储量较 36 年生油松林略有增加。说明适当的间伐虽然降低了植被碳储量,但土壤碳储量依然可以保持稳定甚至持续增加;而 71 年生油松林和 56 年生刺槐林则因过度砍伐,其土壤有机碳储量也出现大幅度下降的现象。

2.4 生态系统碳储量

从不同树种的生态系统碳储量来看,林龄相近的油松林和刺槐林的碳储量相近,且油松林略高。36 年生油松林和 39 年生油松林生态系统碳储量分别达到 167.30 Mg/hm²和 140.77 Mg/hm²。

从相同树种的生态系统碳储量来看,油松林和刺槐林的碳储量随着林龄增加均呈现先增加后降低的趋势,19、27、36、45 年生油松林生态系统碳储量分别为 70.76、143.43、167.30、136.42 Mg/hm²,8、17、39、56 年生刺槐林生态系统碳储量分别为 80.37、94.08、140.77、76.99 Mg/hm²。

2.5 生态系统固碳潜力

以农田生态系统碳储量为基准值(初始值),按树种分别建立了生态系统碳储量-林龄序列(表 4),以生态系统各碳库的最大碳储量之和为参考,计算了造林的生态系统固碳潜力(表 5)。可知,在当前气候条件和干扰强度下,在黄土丘陵区种植油松林 86a 内的生态系统固碳潜力为 211.61 Mg/hm²(若将土壤碳储量在林龄为 36—86a 内看作线性变化的话,则 86 年生油松林生态系统潜在碳储量可达 332.26 Mg/hm²,生态系统固碳潜力为 272.64 Mg/hm²);种植刺槐林 39a 内的生态系统固碳潜力为 81.15 Mg/hm²。

表 4 不同生态系统类型凋落物和土壤碳储量

Table 4 Carbon stock in litter and soil for different ecosystem types

生态系统类型 Ecosystem type	林龄 Stand age /a	植被碳储量 C stock in vegetation /(Mg/hm ²)	凋落物碳储量		土壤有机碳储量 Soil organic carbon stock /(Mg/hm ²)	生态系统碳储量	
			C stock in litter /(Mg/hm ²)			平均值 mean	标准差 SD
			未分解 Little decomposition	已分解 Most decomposition			
油松林	71	28.20	—	—	79.89	—	—
油松林	52	50.55	—	—	108.58	—	—
油松林	45	43.86	3.82	8.66	80.08	136.42	4.57
油松林	36	67.47	5.47	14.50	79.86	167.30	9.65
油松林	27	59.9	3.56	15.91	64.06	143.43	28.61
油松林	19	11.97	2.07	2.75	53.97	70.76	16.08
刺槐林	56	13.35	1.38	3.61	58.65	76.99	—
刺槐林	39	49.51	2.14	6.72	82.40	140.77	25.34
刺槐林	17	35.68	1.82	2.59	53.99	94.08	2.29
刺槐林	8	25.08	1.56	3.87	49.86	80.37	18.78
农田	—	—	—	—	59.62	59.62	17.16

表 5 黄土丘陵区生态系统各碳库的最大碳储量和造林的生态系统固碳潜力

Table 5 The potential carbon stock of ecosystem and its component and the ecosystem carbon sequestration potential of the afforestation for different forest types on the hilly Loess Plateau

初始植被类型 Original vegetation type	初始生态 系统碳储量 Original ecosystem carbon stock /(Mg/hm ²)	参考植被类型 Reference vegetation	潜在碳储量				造林的生态 系统固碳潜力 Ecosystem carbon sequestration potential /(Mg/hm ²)
			Potential carbon stock /(Mg/hm ²)				
			植被 Vegetation	凋落物 Litter	土壤 Soil	生态系统 Ecosystem	
农田	59.62	86 年生油松林	142.68* ^[32]	19.97	108.58	271.23	211.61
农田	59.62	39 年生刺槐林	49.51	8.86	82.4	140.77	81.15

从各组成碳库固碳潜力所占比例来看,油松林和刺槐林均以生物量和死有机体形式储存的碳为主,其固碳量分别为 162.65、58.37 Mg/hm²,占生态系统固碳量的 77% 和 72%,而土壤碳库和凋落物碳库固碳潜力之和分别占 23% 和 28%。

2.6 采伐对生态系统固碳的影响

相对于封禁的森林生态系统,受采伐影响的生态系统碳储量均有所降低(图 2),但间伐和乱砍滥伐对生态系统各组成碳库的影响不同。间伐使植被碳储量降低,而土壤碳储量可以维持稳定甚至升高。如受间伐影响的 45 年生和 52 年生油松林,其植被碳储量比 36 年生油松林分别低 23.61、19.97 Mg/hm²,而土壤碳储量则比 36 年生油松林分别高 0.22、28.72 Mg/hm²。而乱砍滥伐不但使植被碳库明显下降,而且土壤碳库也因干扰导致明显降低。如受乱砍滥伐影响,71 年生油松林相对于 36 年生、封禁的油松林,其植被碳储量降低 40.97 Mg/hm²,而土壤碳储量相对于受间伐影响、52 年生油松林降低了 28.69 Mg/hm²; 相对于 39 年生刺槐林,受乱砍滥伐影响,56 年生刺槐林的植被和土壤碳储量分别降低了 36.16、23.75 Mg/hm²。

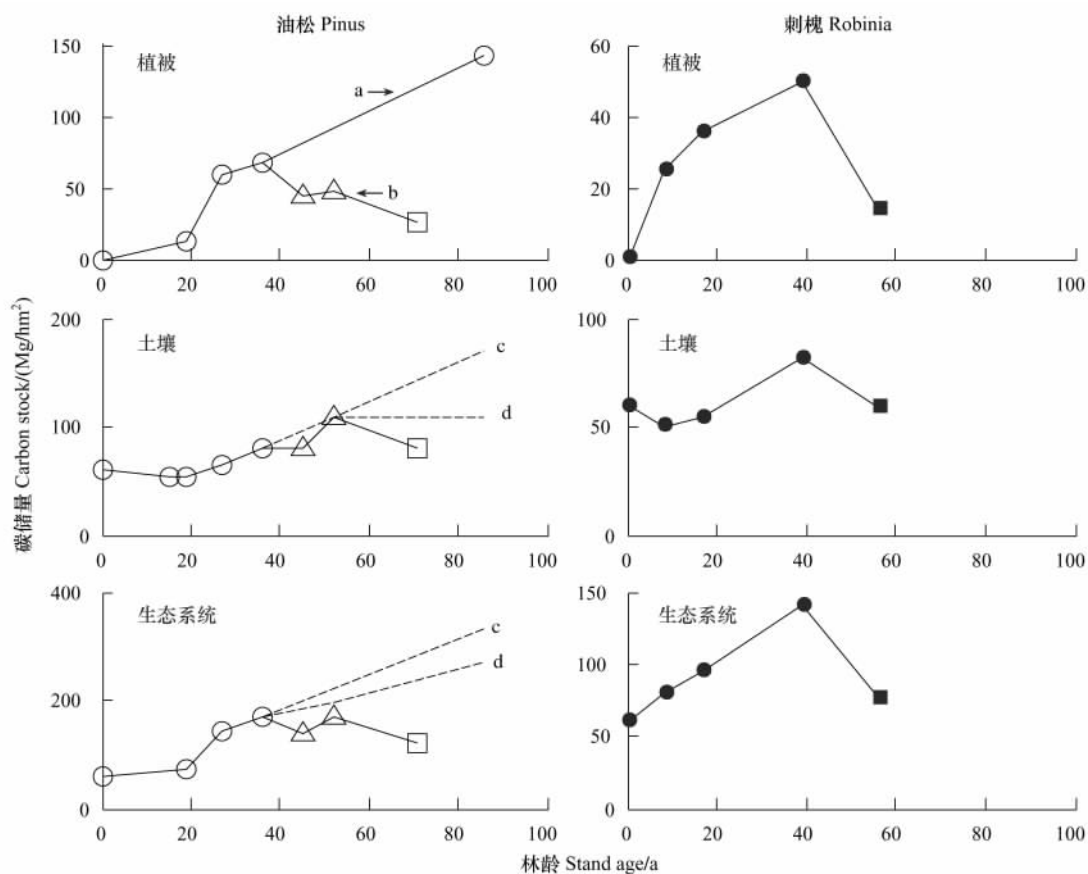


图 2 黄土丘陵区造林的生态系统固碳潜力,以及采伐对油松林和刺槐林的植被、土壤和生态系统碳储量的影响

Fig. 2 Carbon sequestration potential of the afforestation, and the relationship of harvest and ecosystem carbon stock of *Pinus* and *Robinia* forests on the hilly Loess Plateau

a 为封禁的油松林植被碳储量-林龄曲线; b 为受采伐(间伐和乱砍滥伐)干扰的油松林植被碳储量-林龄曲线; c 为假设油松林土壤碳随林龄呈线性增加; d 为假设已有调查样地中的土壤碳储量已达到最大。空心标记为油松林,实心标记为刺槐林。标记的形状代表了不同的森林管理和人为干扰。其中,圆形为封禁林地,不受人为干扰;三角形为间伐;方形为乱砍滥伐

3 结论与讨论

3.1 黄土丘陵区造林增加了生态系统碳储量

造林后生态系统碳储量及各组成碳库碳储量随林龄的变化与已有概念理论和研究结果相似^[33],植被碳储量呈现逐年增加,而土壤碳库呈现先降低后增加的趋势。在没有人为干扰的情况下,36 年生油松林和 39

年生刺槐林生态系统的碳储量分别为 167.30、140.77 Mg/hm²; 相对于农田碳储量, 其碳储量分别增加了 107.68 Mg/hm²和 81.15 Mg/hm²; 增加的碳储量中以生物量为主, 分别为 67.47、49.51 Mg/hm²; 其次为土壤有机碳, 分别增加 20.24、22.78 Mg/hm²; 凋落物碳储量也分别增加了 19.97 Mg/hm²和 8.86 Mg/hm²。

油松和刺槐林生态系统碳储量研究结果与黄土高原区其他研究中同林龄(8—35 a) 结果相近^[34-35], 而低于水分条件较好的长白山地区(33 年生白落叶松和 33 年生红松林碳储量分别为 187.26、178.58 Mg/hm²)^[1]。从固碳速率来看, 36 年生油松林植被固碳速率为 1.89 Mg/(hm²·a), 略高于暖温带森林植被平均固碳速率的 1.43 Mg/(hm²·a)^[5], 39 年生刺槐林的植被固碳速率为 1.26 Mg/(hm²·a), 略低于暖温带森林植被平均固碳速率。

3.2 消除采伐(间伐和乱砍滥伐)干扰等人为措施能够提高黄土丘陵区生态系统固碳效果

采伐导致森林碳储量降低。如间伐 3 次、45 年生油松林相对于封禁的、36 年生油松林的生态系统碳储量降低 30.88 Mg/hm²; 71 年生油松林植被碳储量至少损失 40.95 Mg/hm²。而乱砍滥伐不仅将植物体运出生态系统, 同时伴随着对凋落物的干扰, 减少土壤碳库的来源, 增加土壤碳库的干扰和释放^[36]。如乱砍滥伐严重、56 年生刺槐林相对于封禁的、39 年生刺槐林的生态系统碳储量降低 60.08 Mg/hm²。因此, 在我国人工林面积已经非常大的情况下, 除了造林之外, 还应该对已有人工林加强管理, 提高生态系统固碳增汇效果。

致谢: David Brill 润色英文摘要, 任书杰、官丽莉、姜春明、伍卫星、方华军以及吉县、长武和安塞试验站工作人员对数据采集提供帮助, 样品处理和分析得到刘英会、谢娟、徐丽君、刘兆英、郑涵的帮助, 特此致谢。

References:

- [1] Wang C M, Shao B, Wang R N. Carbon sequestration potential of ecosystem of two main tree species in Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(7): 1764-1772.
- [2] Roxburgh S H, Wood S W, Mackey B G, Woldendorp G, Gibbons P. Assessing the carbon sequestration potential of managed forests: a case study from temperate Australia. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43(6): 1149-1159.
- [3] Keith H, Mackey B G, Lindenmayer D B. Re-evaluation of forest biomass carbon stocks and lessons from the world's most carbon-dense forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(28): 11635-11640.
- [4] Hudiburg T, Law B, Turner D P, Campbell J, Donato D, Duane M. Carbon dynamics of Oregon and Northern California forests and potential land-based carbon storage. *Ecological Applications*, 2009, 19(1): 163-180.
- [5] Wu Q B, Wang X K, Duan X N, Deng L B, Lu F, Ouyang Z Y, Feng Z W. Carbon sequestration and its potential by forest ecosystems in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 517-524.
- [6] Brown S, Lugo A E. Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes. *Science*, 1984, 223(4642): 1290-1293.
- [7] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [8] Pan Y D, Luo T X, Richard B, Hom J, Melillo J. New estimates of carbon storage and sequestration in China's forests: effects of age-class and method on inventory-based carbon estimation. *Climatic Change*, 2004, 67(2/3): 211-236.
- [9] Shi X Z, Wang H J, Yu D S, Weindorf D C, Cheng X F, Pan X Z, Sun W X, Chen J M. Potential for soil carbon sequestration of eroded areas in subtropical China. *Soil and Tillage Research*, 2009, 105(2): 322-327.
- [10] Lieth H. Primary production: terrestrial ecosystems. *Human Ecology*, 1973, 1(4): 303-332.
- [11] Zhou G S, Wang Y H, Jiang Y L, Yang Z Y. Estimating biomass and net primary production from forest inventory data: a case study of China's *Larix* forests. *Forest Ecology and Management*, 2002, 169(1/2): 149-157.
- [12] Eggers J, Lindner M, Zudin S, Zaehle S, Lisk J. Impact of changing wood demand, climate and land use on European forest resources and carbon stocks during the 21st century. *Global Change Biology*, 2008, 14(10): 2288-2303.
- [13] Ju W M, Chen J M, Harvey D, Wang S. Future carbon balance of China's forests under climate change and increasing CO₂. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(3): 538-562.
- [14] Lu J W, Yue Q, Wang Z, Zhang G J. Carbon sequestration potential in Fujian's forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(8): 2188-2196.
- [15] Zhang C Q, Zhang W H. A study on asexual reproduction and regeneration of *Robinia pseudoacacia* plantations in different habitats in Hilly Area of the Loess Plateau. *Journal of Northwest A and F University (Natural Science Edition)*, 2009, 37(1): 135-144.
- [16] Jiao X, Liu G Q. Growth and its influencing factors of *Pinus tabulaeformis* in the Loess Plateau of Shaanxi Province. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, 29(5): 0867-0873.
- [17] Meng L, Cheng J M, Yang X M, Han J J, Fan W J, Hu X J. Artificial *Pinus tabulaeformis* carbon storage and density in Ziwuling Forest Area on the Loess Plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(2): 133-137.
- [18] Zhu J Z, Wei T X, Zhang X P. Arrangement of protective forest system in gullied-hilly loess area based on water balance. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(5): 5-13.
- [19] Zhang X J. Biomass and Nutrient Distribution and Accumulation Pattern of Natural Secondary Forests of Shanxi Province on Loess Plateau. Beijing:

- Beijing Forestry University, 2008.
- [20] Bi H X, Li X Y, Li J, Guo M X, Liu X. Study on suitable vegetation cover on Loess area based on soil water balance. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(4): 17-23.
- [21] Xu B C, Shan L, Li F M. Aboveground biomass and water use efficiency of an introduced grass, *Panicum virgatum*, in the semiarid Loess hilly-gully region. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2206-2213.
- [22] Wang Z, Liu G B, Xu M X. Effect of revegetation on soil organic carbon concentration in deep soil layers in the hilly Loess Plateau of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(14): 3947-3952.
- [23] Gan Z T, Liu W Z. Distribution of the fine roots of different aged apple trees in Weibei rain fed tableland of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(7): 3401-3407.
- [24] Dong M, Wang Y F, Kong F Z, Jiang G M, Zhang Z B. Standard Methods for Observation and Analysis in Chinese Ecosystem Research Network: Survey, Observation and Analysis of Terrestrial Biocommunities. Beijing: Standards Press of China, 1996: 1-80.
- [25] Cheng T R, Ma Q Y, Feng Z K, Luo X. Research on forest biomass in Xiaolong Mountains, Gansu Province. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(1): 31-36.
- [26] Zhang B L, Chen C G. Biomass and production of *Robinia pseudoacacia* plantation in Hongxing Tree Farm of Changwu county, Shaanxi Province. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 1992, (3): 13-17.
- [27] Liu Q J. Nested regression for establishing tree biomass equations. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(2): 331-337.
- [28] Xu W J, Liu Q J, Ma Z Q, Liu Y C. Biomass of *Quercus fabri* population under different ecological restoration regimes in subtropical China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(3): 459-466.
- [29] Ma Q Y, Chen X L, Wang J, Lin C, Kang F F, Cao W Q, Ma Z B, Li W Y. Carbon content rate in constructive species of main forest types in northern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(5): 96-100.
- [30] Luo Y J. Study on Biomass Carbon Accounting Factors of *Larix principis-ruppechtii* Plantation. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2007.
- [31] Cheng X F, Shi X Z, Yu D S, Pan X Z. Organic carbon pool of forest soil and its relationship to environment factors in Xingguo county of Jiangxi Province. *Geographical Research*, 2004, 23(2): 211-217.
- [32] Luo T X. Chinese Ecosystem Research Network (CERN). <http://www.cerndata.ac.cn/>
- [33] Goulden M L, McMillan A M S, Winston G C, Rocha A V, Manies K L, Harden J W, Bond-Lamberty B P. Patterns of NPP, GPP, respiration, and NEP during boreal forest succession. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 855-871.
- [34] Wu G, Feng Z W. Study on the social characteristics and biomass of the *Pinus tabulaeformis* forest systems in China. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, 14(4): 415-422.
- [35] Ma Y X, Yang W Z, Han S F, Yang X M. On the growth dynamics of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 1990, 4(2): 26-32.
- [36] Bagchi S, Ritchie M E. Introduced grazers can restrict potential soil carbon sequestration through impacts on plant community composition. *Ecology Letters*, 2010, 13(8): 959-968.

参考文献:

- [1] 王春梅, 邵彬, 王汝南. 东北地区两种主要造林树种生态系统固碳潜力. *生态学报*, 2010, 30(7): 1764-1772.
- [5] 吴庆标, 王效科, 段晓男, 邓立斌, 逯非, 欧阳志云, 冯宗炜. 中国森林生态系统植被固碳现状和潜力. *生态学报*, 2008, 28(2): 517-524.
- [14] 吕劲文, 乐群, 王铮, 张国君. 福建省森林生态系统碳汇潜力. *生态学报*, 2010, 30(8): 2188-2196.
- [15] 张长庆, 张文辉. 黄土高原不同立地条件下刺槐人工林种群的无性繁殖与更新. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(1): 135-144.
- [16] 焦醒, 刘广全. 陕西黄土高原油松生长状况及其影响因子分析. *西北植物学报*, 2009, 29(5): 0867-0873.
- [17] 孟蕾, 程积民, 杨晓梅, 韩娟娟, 范文娟, 胡秀娟. 黄土高原子午岭人工油松林碳储量与碳密度研究. *水土保持通报*, 2010, 30(2): 133-137.
- [18] 朱金兆, 魏天兴, 张学培. 基于水分平衡的黄土区小流域防护林体系高效空间配置. *北京林业大学学报*, 2002, 24(5): 5-13.
- [19] 张晓娟. 山西吉县天然次生林生物量和营养元素积累与分布研究. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [20] 毕华兴, 李笑吟, 李俊, 郭孟霞, 刘鑫. 黄土区基于土壤水平衡的林草覆被率研究. *林业科学*, 2007, 43(4): 17-23.
- [21] 徐炳成, 山仑, 李凤民. 黄土丘陵半干旱区引种禾草柳枝稷的生物量与水分利用效率. *生态学报*, 2005, 25(9): 2206-2213.
- [22] 王征, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳的影响. *生态学报*, 2010, 30(14): 3947-3952.
- [23] 甘卓亭, 刘文兆. 渭北旱塬不同龄苹果细根空间分布特征. *生态学报*, 2008, 28(7): 3401-3407.
- [24] 董鸣, 王义凤, 孔繁志, 蒋高明, 张知彬. 中国生态系统研究网络观测与分析标准方法: 陆地生物群落调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 1996: 1-80.
- [25] 程堂仁, 马钦彦, 冯仲科, 罗旭. 甘肃小陇山森林生物量研究. *北京林业大学学报*, 2007, 29(1): 31-36.
- [26] 张柏林, 陈存根. 长武县红星林场刺槐人工林的生物量和生产量. *陕西林业科技*, 1992, (3): 13-17.
- [27] 刘琪璟. 嵌套式回归建立树木生物量模型. *植物生态学报*, 2009, 33(2): 331-337.
- [28] 徐雯佳, 刘琪璟, 马泽清, 刘迎春. 江西千烟洲不同恢复途径下白栎种群生物量. *应用生态学报*, 2008, 19(3): 459-466.
- [29] 马钦彦, 陈遐林, 王娟, 蔺琛, 康峰峰, 曹文强, 马志波, 李文宇. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析. *北京林业大学学报*, 2002, 24(5): 96-100.
- [30] 罗云建. 华北落叶松人工林生物量碳计量参数研究. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.
- [31] 程先富, 史学正, 于东升, 潘贤章. 兴国县森林土壤有机碳库及其与环境因子的关系. *地理研究*, 2004, 23(2): 211-217.
- [32] 罗天祥. 中国生态系统研究网络(CERN). <http://www.cerndata.ac.cn/>
- [34] 吴刚, 冯宗炜. 中国油松林群落特征及生物量的研究. *生态学报*, 1994, 14(4): 415-422.
- [35] 马玉玺, 杨文治, 韩仕峰, 杨新民. 黄土高原刺槐生长动态研究. *水土保持学报*, 1990, 4(2): 26-32.