

# 徐州市石灰岩山地不同植被恢复模式的碳储量

董波<sup>1</sup>, 万福绪<sup>1</sup>, 严妍<sup>1</sup>, 蒋丹丹<sup>1</sup>, 刘建中<sup>2</sup>, 刘天池<sup>2</sup>

(1. 南京林业大学 森林资源与环境学院, 江苏省林业生态工程重点实验室,  
江苏 南京 210037; 2. 徐州市铜山区林业局, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** [目的] 研究不同造林模式的碳储量, 为区域碳汇森林的营建提供理论依据。[方法] 以江苏省徐州市石灰岩山地分布普遍的 6 种植物恢复模式为研究对象, 对其碳储量及其分配格局进行了计算。[结果] 6 种植物恢复模式总碳储量的变化范围在 28.379~46.561 t/hm<sup>2</sup> 之间, 表现为侧柏(*Platycladus orientalis*)×梧桐(*Firmiana simplex*)>侧柏×女贞(*Ligustrum lucidum*)>侧柏×枫香(*Liquidambar formosana*)>侧柏>侧柏×栎树(*Koelreuteria paniculata*)>侧柏×黄栌(*Cotinus coggygria*)。土壤碳储量占总碳储量的 54.333%~78.290%。植被碳储量占总碳储量的 20.213%~44.414%。枯落物碳储量占总碳储量的 0.582%~3.897%。[结论] 土壤碳储量是不同植被恢复模式总碳储量的主体。保护石灰岩山地现有土层, 防治水土流失及频繁的人为扰动对于维持土壤碳储量具有重要作用。加强对侧柏的养护管理, 配置适宜的阔叶树种可以有效地增加植被的固碳潜力。

**关键词:** 碳储量; 侧柏; 植被恢复模式; 石灰岩山地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)03-0288-05

中图分类号: S718.55

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.03.059

## Carbon Storage of Different Forest Restoration Patterns in Limestone Mountains of Xuzhou City

DONG Bo<sup>1</sup>, WAN Fuxu<sup>1</sup>, YAN Yan<sup>1</sup>, JIANG Dandan<sup>1</sup>, LIU Jianzhong<sup>2</sup>, LIU Tianchi<sup>2</sup>

(1. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry

University, Jiangsu Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering, Nanjing,

Jiangsu 210037, China; 2. Forestry Bureau of Tongshan District, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate the carbon storage of different forest restoration patterns in order to provide theoretical basis for the construction of regional forest carbon sinks. [Methods] The storage and distribution was calculated based on different forest restoration patterns that widely distributed in limestone mountains of Xuzhou City. [Results] The carbon storage of different forest restoration patterns was in the range of 28.379~46.561 t/hm<sup>2</sup>, followed a sequence of *Platycladus orientalis*×*Firmiana simplex*>*P. orientalis*×*Ligustrum lucidum*>*P. orientalis*×*Liquidambar formosana*>*P. orientalis*>*P. orientalis*×*Koelreuteria paniculata*>*P. orientalis*×*Cotinus coggygria*. The carbon storage of soil occupied 54.333%~78.290% of the total carbon storage. The carbon storage of vegetation occupied 20.213%~44.414% of the total carbon storage, and the carbon storage of litter only occupied 0.582%~3.897% in total carbon storage. [Conclusion] Soil carbon storage is an important component of the total carbon storage. It is an effective way to maintain soil carbon storage by protecting surface soil, controlling soil and water losses, and reducing artificial disturbance on limestone mountains. Furthermore, strengthening maintenance for *Platycladus orientalis* and selecting the suitable broadleaved tree species can effectively increase the carbon sequestration potential.

**Keywords:** carbon storage; *Platycladus orientalis*; forest restoration pattern; limestone mountain

森林生态系统是地球生物圈的重要组成部分, 储存了陆地生态系统中有机碳地上部分的 80%, 地下部分的 40%<sup>[1]</sup>, 其在调节全球碳平衡、减缓大气中 CO<sub>2</sub> 等温室气体浓度上升和维护全球气候等方面具

收稿日期: 2014-05-13

修回日期: 2014-05-16

资助项目: 国家林业局“948”项目“用于石灰岩山地植被恢复及石漠化治理的墨西哥柏良种引进”(2009-4-17); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

第一作者: 董波(1981—), 男(汉族), 陕西省宝鸡市人, 博士研究生, 研究方向为林业生态工程。E-mail: 78691217@qq.com。

通信作者: 万福绪(1952—), 男(汉族), 江苏省赣榆县人, 教授, 硕士, 博士生导师, 从事林业生态工程研究。E-mail: Fxwan@njfu.edu.cn。

有不可替代的作用<sup>[2]</sup>。人工林作为陆地森林生态系统中的重要组成部分,其碳汇作用被认为是减缓全球变化的一种可能机制和最有希望的选择<sup>[3]</sup>,提高人工林碳汇功能的关键在于选择适宜的造林模式及树种。近年来,许多学者在森林植被碳储量、碳密度和固碳潜力等方面开展大量研究工作<sup>[4-10]</sup>,但由于研究方法、对象和区域的差异,导致森林生态系统碳储量研究结果存在较大差异。侧柏(*Platycladus orientalis*)人工林是黄、淮平原东部石灰岩残丘分布的一种重要植被类型,分布范围广、面积大,是徐州市丘陵地区的主要森林类型。近年来,徐州大力实施“市区山地绿化工程”和“二次进军荒山绿化工程”,通过不同的树种配置,对现有的大面积侧柏纯林进行更新改造,高标准营造生态风景林,促进人工侧柏林向地带性落叶阔叶林的演替。以往关于侧柏生物量和碳储量的研究主要集中在侧柏纯林<sup>[11-13]</sup>,缺乏对侧柏与阔叶树混交林生态系统碳储量的研究。对徐州石灰岩山地不同植被恢复模式的碳储量进行研究,有助于客观认识不同造林模式的碳储量及其分配特征,从而选择出最适宜的配置模式,为区域碳汇森林的营建提供理论依据和技术支持。

## 1 研究区概况

研究区位于徐州市吕梁林场(117°28′34″—117°28′41″E,34°10′42″—34°10′51″N),海拔 95~136 m。气候属暖温带半湿润季风气候,光照充足,降水

量较为充沛,四季分明。年均气温 13.9℃,全年无霜期 200~220 d,年日照时数为 2 284~2 495 h,年均降水量 800~930 mm,雨季降水量占全年的 56%。研究区土层含石率达 30%,土壤类型为石灰岩发育而成的粗骨褐土和淋溶褐土,土层薄,腐殖质少,保水保肥能力差。

侧柏与阔叶树混交林是研究区山体的主要林分类型,林分密度 1 224~2 250 株/hm<sup>2</sup>,常采用行间混交或块状混交种植模式。林下灌木稀少,发育较差。灌木主要有火棘(*Pyracantha fortuneana*)、柘树(*Cudrania tricuspidata*)、牡荆(*Vitex negundo*)、酸枣(*Ziziphus jujuba*)等,草本主要有狗尾草(*Setaria viridis*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)、茅莓(*Rubus parvifolius*)、马兜铃(*Aristolochia debilis*)等。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置

2013 年 10 月,选择侧柏纯林、侧柏×黄栌混交林、侧柏×女贞混交林、侧柏×梧桐混交林、侧柏×栾树混交林和侧柏×枫香混交林等 6 种植被恢复模式作为研究对象。每种模式各设 3 块 20 m×20 m 乔木样方,每个乔木样方内沿对角线布设 3 个 5 m×5 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 枯落物样方。在枯落物样方内采集土壤样品。样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况

恢复模式	林龄/a	坡向	坡位	坡度/(°)	平均树高/m	平均胸径/cm	郁闭度	密度/(株·hm <sup>-2</sup> )
侧柏	10	东南	坡上	16	3.40	8.36	0.59	1 250
侧柏×黄栌	10×7	正东	坡中	14	3.36×1.89	7.56×3.75	0.73	1 049×506
侧柏×女贞	10×7	正东	坡中	13	3.36×2.58	10.37×4.73	0.72	1 326×911
侧柏×梧桐	10×7	东南	坡下	14	3.96×2.22	10.73×5.03	0.86	1 249×790
侧柏×栾树	10×7	正东	坡中	18	4.03×2.58	5.47×5.07	0.97	1 279×848
侧柏×枫香	10×7	东南	坡中	15	3.78×2.84	7.90×3.60	0.57	1 335×477

### 2.2 碳储量计算

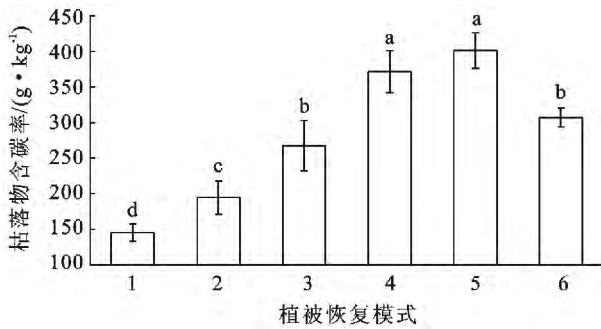
2.2.1 乔木碳储量计算 记录乔木样方内胸径(DBH)≥3 cm 的所有乔木树种的株数、树高、胸径等,利用李朝<sup>[13]</sup>的侧柏各器官生物量模型,计算侧柏的生物量。其他 5 种阔叶乔木树种则在样地内根据测定的平均胸径和平均树高选取 1 株标准木,共选取标准木 5 株,采用全挖实测法测定标准木的生物量,按林木的根、干、枝、叶等部分分别称量鲜重,每部分取一定量样品带回实验室,在 60℃下烘干称量得干

重,根据干重/鲜重比计算得到标准木的生物量,依据样方内每种阔叶树的数量可得到样方内阔叶树种的生物量。乔木层生物量乘以 0.5 的碳转化率<sup>[14]</sup>,得到乔木层碳储量。

2.2.2 林下灌、草层碳储量计算 林下灌、草层生物量的测定采用全部收获法。称量鲜重后,将一定量样品带回实验室,在 60℃下烘干称量得干重,根据干重/鲜重比计算得到单位面积内灌、草层生物量。林下灌草层采用 0.45 为碳转化率<sup>[15]</sup>,碳储量是根据单

位面积灌草层生物量乘以其碳含量而求得。

2.2.3 枯落物碳储量计算 采用全部收获法对枯落物样方内的枯落物进行收集,将全部样品带回实验室,在 60 °C 下烘干,称量得干重,计算单位面积内枯落物量。不同植被恢复模式枯落物含碳率测定采用重铬酸钾加热法,结果见图 1。枯落物干重再乘以相应含碳率得到枯落物碳储量。



注:植被恢复模式中 1 指侧柏; 2 指侧柏×黄栌; 3 指侧柏×女贞; 4 指侧柏×梧桐; 5 指侧柏×栎树; 6 指侧柏×枫香。下同。

图 1 6 种植物恢复模式的枯落物含碳率

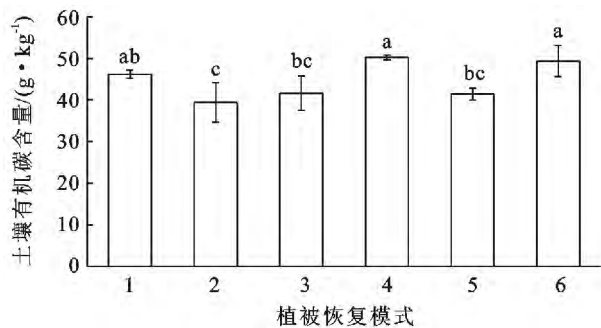


图 2 6 种植物恢复模式的土壤有机碳含量

2.2.4 土壤碳储量测定 在实验室将土壤样品风干,研磨过 0.149 mm 土壤筛,采用重铬酸钾氧化法测定不同植被恢复模式土壤有机碳含量  $C(g/kg)$ ,结果见图 2。同时用环刀法测定土壤容重  $\theta(g/cm^3)$ 。 $D$  为土层厚度(cm), $\delta$  为  $>2$  mm 砾石含量(体积%)。因本区属于石灰岩山地,砾石含量较高, $\delta$  值统一

采用 30%。土层较薄,平均土层厚度只有 10 cm,所以未对土壤做分层处理。土壤有机碳储量 SOC ( $t/hm^2$ ) 的计算公式参考徐艳等<sup>[16]</sup>的方法,略作修改:

$$SOC=10^{-1} \times D \times \theta \times C \times (1-\delta)$$

2.2.5 不同植被恢复模式总碳储量的计算 不同植被恢复模式总碳储量为植被碳储量、枯落物碳储量和土壤有机碳储量之和。

### 2.3 数据处理与分析

用 Microsoft Excel 2007 进行数据处理,通过 SPSS 18.0 软件的单因素方差分析(ANOVA)检验不同植被恢复模式间碳储量的差异( $\alpha=0.05$ )。图表用 Origin 9.0 进行绘制。

## 3 结果与分析

### 3.1 植被碳储量

植被碳储量包括乔木、灌木和草本碳储量(表 2)。6 种恢复模式的植被碳储量差异显著,平均为  $12.278 t/hm^2$ 。最大的为侧柏×梧桐模式,达  $20.680 t/hm^2$ ;其次是侧柏×女贞模式,为  $16.911 t/hm^2$ ;最小的是侧柏×黄栌模式,仅为  $6.823 t/hm^2$ ,只占侧柏×梧桐模式植被碳储量的 32.993%。从植被碳储量的组成来看,乔木碳储量占总植被碳储量的 82.788%~95.775%,具有绝对优势。这是由于石灰岩山地地条件恶劣,林下灌草稀少所致。在 5 种针阔混交林模式中,侧柏碳储量占乔木碳储量的 59.042%~96.845%,明显高于其他阔叶树,这是由于侧柏为 5 种针阔混交林模式中的优势树种,其树龄高于其他阔叶树,生长情况也优于阔叶树种。不同植被恢复模式中灌木和草本的碳储量间差异显著,平均仅为  $0.066 t/hm^2$  和  $0.802 t/hm^2$ 。这与研究区裸岩率高及较为频繁的人工抚育有密切关系。灌木碳储量表现为侧柏>侧柏×女贞>侧柏×枫香>侧柏×栎树>侧柏×黄栌>侧柏×梧桐模式。草本的碳储量以侧柏×女贞模式最高,为  $1.420 t/hm^2$ ;侧柏×枫香模式最小,碳储量仅为  $0.379 t/hm^2$ 。

表 2 6 种植物恢复模式的碳储量

$t/hm^2$

恢复模式	乔木碳储量			灌木碳储量	草本碳储量	植被碳储量
	侧柏	阔叶树	合计			
侧柏	$11.134 \pm 1.442^a$	—	$11.134 \pm 1.442^c$	$0.086 \pm 0.011^a$	$0.468 \pm 0.112^{cd}$	$11.688 \pm 1.320^c$
侧柏×黄栌	$5.358 \pm 0.941^b$	$0.861 \pm 0.087^{cd}$	$6.219 \pm 0.954^d$	$0.056 \pm 0.006^b$	$0.547 \pm 0.038^{cd}$	$6.823 \pm 0.960^d$
侧柏×女贞	$11.297 \pm 1.716^a$	$4.113 \pm 0.192^b$	$15.409 \pm 1.655^b$	$0.082 \pm 0.007^a$	$1.420 \pm 0.560^a$	$16.911 \pm 1.886^b$
侧柏×梧桐	$11.674 \pm 0.611^a$	$8.099 \pm 1.331^a$	$19.773 \pm 0.778^a$	$0.033 \pm 0.004^c$	$0.874 \pm 0.211^{bc}$	$20.680 \pm 0.987^a$
侧柏×栎树	$4.156 \pm 0.610^b$	$1.580 \pm 0.212^c$	$5.736 \pm 0.763^d$	$0.069 \pm 0.007^{ab}$	$1.123 \pm 0.165^{ab}$	$6.929 \pm 0.628^d$
侧柏×枫香	$9.869 \pm 1.164^a$	$0.321 \pm 0.036^d$	$10.191 \pm 1.162^c$	$0.071 \pm 0.015^{ab}$	$0.379 \pm 0.041^d$	$10.640 \pm 1.154^c$

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母代表模式间差异显著, $p<0.05$ 。

### 3.2 枯落物碳储量

由表3可知,6种植被恢复模式枯落物碳储量的变化范围在 $0.213\sim 1.106\text{ t/hm}^2$ 之间,表现为:侧柏×黄栌>侧柏×女贞>侧柏×梧桐>侧柏×栾树>侧柏×枫香>侧柏。5种针阔混交林模式的枯落物碳储量普遍大于侧柏纯林,侧柏纯林的枯落物碳储量只占5种针阔混交林模式的 $19.259\%\sim 45.127\%$ 。由于针阔混交林相对于侧柏纯林模式枯落物输入多,所以其碳储量也较高。5种针阔混交林模式间枯落物碳储量的差异主要取决于阔叶树枯落物生物量和分解速率。

### 3.3 土壤碳储量

6种植被恢复模式的土壤碳储量(见表3)平均为 $24.756\text{ t/hm}^2$ 。最大的是侧柏×枫香模式,为 $28.125\text{ t/hm}^2$ ;侧柏×黄栌模式的碳储量最小,为 $20.450\text{ t/hm}^2$ 。6种植被恢复模式的土壤碳储量的差异主要取决于不同植被恢复模式的土壤含碳率和土壤容重。

### 3.4 不同配置模式的总碳储量及分配格局

由表3可知,6种植被恢复模式总碳储量差异显

著,变化范围在 $28.379\sim 46.561\text{ t/hm}^2$ ,平均为 $37.625\text{ t/hm}^2$ ,表现为:侧柏×梧桐>侧柏×女贞>侧柏×枫香>侧柏>侧柏×栾树>侧柏×黄栌。植被碳储量对总碳储量的排序贡献较大,除侧柏模式外的其余5种针阔混交林总碳储量和其植被碳储量的变化趋势一致。这是由于各植被恢复模式间土壤碳储量差异相对较小,而枯落物的碳储量在总碳储量中所占比例相对较少所致。侧柏纯林的碳储量大于侧柏×栾树和侧柏×黄栌模式,小于其余3种植被恢复。可见,现阶段针阔混交林相比针叶纯林在总碳储量方面并无优势。这是由于研究对象处于幼龄林阶段,而阔叶树种多在中后期进入快速生长阶段,进而才能在生物量和碳储量方面显示出较大的优势。从总碳储量的分配来看,表现为土壤层>植被层>枯落物层。土壤碳储量占总碳储量的 $54.333\%\sim 78.290\%$ ,是不同植被恢复模式总碳储量的主体。其次是植被层,占总碳储量的 $20.213\%\sim 44.414\%$ 。枯落物碳储量对总碳储量贡献较小,只占总碳储量的 $0.582\%\sim 3.897\%$ 。

表3 6种植被恢复模式的碳储量

恢复模式	植被碳储量/( $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )		枯落物碳储量/( $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )		土壤碳储量/( $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )		总碳储量/ ( $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ )
	碳储量	百分比/%	碳储量	百分比/%	碳储量	百分比/%	
侧柏	$11.688\pm 1.320^c$	31.953	$0.213\pm 0.028^c$	0.582	$24.677\pm 3.761^{ab}$	67.465	$36.578\pm 2.442^b$
侧柏×黄栌	$6.823\pm 0.960^d$	24.041	$1.106\pm 0.214^a$	3.897	$20.450\pm 2.528^b$	72.062	$28.379\pm 3.538^c$
侧柏×女贞	$16.911\pm 1.886^b$	41.539	$0.599\pm 0.104^b$	1.470	$23.202\pm 1.920^{ab}$	56.991	$40.712\pm 2.227^{ab}$
侧柏×梧桐	$20.680\pm 0.987^a$	44.414	$0.583\pm 0.131^b$	1.253	$25.298\pm 6.628^{ab}$	54.333	$46.561\pm 6.449^a$
侧柏×栾树	$6.929\pm 0.628^d$	20.213	$0.513\pm 0.113^b$	1.497	$26.839\pm 3.225^{ab}$	78.290	$34.281\pm 3.924^{bc}$
侧柏×枫香	$10.640\pm 1.154^c$	27.117	$0.472\pm 0.039^b$	1.204	$28.125\pm 2.799^a$	71.678	$39.238\pm 3.730^{ab}$

## 4 结论

6种恢复模式的植被碳储量差异显著,表现为:侧柏×梧桐>侧柏×女贞>侧柏>侧柏×枫香>侧柏×栾树>侧柏×黄栌。乔木碳储量占总植被碳储量的 $82.788\%\sim 95.775\%$ ,具有绝对优势。侧柏碳储量占5种针阔混交林模式中乔木碳储量的 $59.042\%\sim 96.845\%$ ,明显高于其他阔叶树。不同植被恢复模式中灌木和草本的碳储量间差异显著,平均仅为 $0.066\text{ t/hm}^2$ 和 $0.802\text{ t/hm}^2$ 。6种植被恢复模式枯落物碳储量的变化范围在 $0.213\sim 1.106\text{ t/hm}^2$ 之间,表现为:侧柏×黄栌>侧柏×女贞>侧柏×梧桐>侧柏×栾树>侧柏×枫香>侧柏,5种针阔混交林模式的枯落物碳储量均高于侧柏纯林。土壤碳储量最大的是侧柏×枫香模式,为 $28.125\text{ t/hm}^2$ ;最小的是侧柏×黄栌模式,为 $20.450\text{ t/hm}^2$ 。土壤碳储量的

差异主要取决于不同植被恢复模式的土壤含碳率和土壤容重。6种植被恢复模式的总碳储量差异显著,变化范围在 $28.379\sim 46.561\text{ t/hm}^2$ ,表现为:侧柏×梧桐>侧柏×女贞>侧柏×枫香>侧柏>侧柏×栾树>侧柏×黄栌。

从总碳储量的分配来看,土壤碳储量占总碳储量的 $54.333\%\sim 78.290\%$ ,是不同植被恢复模式总碳储量的主体。因此,保护石灰岩山地现有土层,防治水土流失及频繁的人为扰动对于维持土壤碳储量具有重要作用。林下灌草清理、整地等频繁的人为扰动虽有利于林木的成活与快速生长,但这些措施使土壤微生物类群与活动增加,导致土壤有机碳大量释放<sup>[5]</sup>。植被碳储量占总碳储量的 $20.213\%\sim 44.414\%$ ,对总碳储量的影响仅次于土壤碳储量。侧柏碳储量在植被碳储量中占有举足轻重的地位。因此,加强对现有侧柏的养护管理对于维持植被碳储量具有重要作用。

现阶段,虽然阔叶树种在在植被碳储量中贡献较小,但配置适宜的阔叶树种可以增加石灰岩山地植被的固碳潜力。从研究结果来看,梧桐和女贞相比黄栌和枫香具有更好的固碳潜力。枯落物碳储量对生态系统碳储量贡献较小,只占总碳储量的 0.582%~3.897%。但其在生物碳库向土壤碳库转移过程中具有关键作用,还可有效保持水土,对维持人工林生态系统的碳库也有重要的作用。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Malhi Y, Baldocchi D D, Jarvis P G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests[J]. *Plant, Cell & Environment*, 1999, 22(6):715-740.
- [2] 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.
- [3] Lal R. Forest soils and carbon sequestration[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 220(1):242-258.
- [4] 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(5):518-522.
- [5] 邱月宝,王辉民,马泽清,等. 亚热带森林生态系统不同重建方式下碳储量及其分配格局[J]. *科学通报*, 2012, 57(17):1553-1561.
- [6] 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[J]. *生态学报*, 2010, 30(7):1764-1772.
- [7] 刘迎春,王秋凤,于贵瑞,等. 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[J]. *生态学报*, 2011, 31(15):4277-4286.
- [8] 王哲,韩玉洁,康宏樟. 黄浦江上游主要树种水源涵养林生态系统碳储量[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(8):1930-1935.
- [9] 萧自位,王丽娟,毛加梅,等. 西双版纳不同林茶复合生态系统碳储量[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(007):1617-1625.
- [10] 张鹏超,张一平,杨国平,等. 哀牢山亚热带常绿阔叶林乔木碳储量及固碳增量[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(6):1047-1053.
- [11] 李瑞霞,彭婷婷,刘娜,等. 间伐对侧柏人工林碳储量以及细根生物量和形态的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2013, 41(5):34-38.
- [12] 石聪. 徐州侧柏人工林生态系统碳储量影响因素研究[D]. 南京:南京林业大学, 2012.
- [13] 李朝. 侧柏人工林生物量研究[D]. 南京:南京林业大学, 2010.
- [14] Fang J, Chen A, Peng C, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. *Science*, 2001, 292(5525):2320-2322.
- [15] Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, et al. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [J]. Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japan, 2006.
- [16] 徐艳,张凤荣,段增强,等. 区域土壤有机碳密度及碳储量计算方法探讨[J]. *土壤通报*, 2006, 36(6):836-839.

(上接第 287 页)

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 顾康康,刘景双,陈昕. 辽中地区矿业城市水资源供需平衡动态分析[J]. *地理学报*, 2008, 63(5):473-481.
- [2] 石培基,金淑婷,李博,等. 水资源控制下西北干旱区城市发展模式研究[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(6):1898-1904.
- [3] 鲍超,方创琳. 干旱区水资源开发利用对生态环境影响的研究进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2008, 27(3):38-46.
- [4] 方创琳,鲍超. 黑河流域水—生态—经济发展耦合模型及应用[J]. *地理学报*, 2004, 59(5):781-790.
- [5] Murray-Hudson M, Wolski P, Ringrose S. Scenarios of the impact of local and upstream changes in climate and water use on hydro-ecology in the Okavango Delta, Botswana[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 1(1/2):73-84.
- [6] 黄庆旭,史培军,何春阳,等. 中国北方未来干旱化情景下的土地利用变化模拟[J]. *地理学报*, 2006, 61(12):1299-1310.
- [7] 彭少明,李群,杨立彬. 黄河流域水资源多目标利用的柔性决策模式[J]. *资源科学*, 2008, 30(2):254-260.
- [8] Ehrlich P R, Holdren J P. Impact of population growth [J]. *Science*, 1971, 171(3977):1212-1217.
- [9] Ehrlich P R, Holdren J P. One dimensional economy [J]. *Bulletin of Atomic Scientists*, 1972, 28(5):16-27.
- [10] 王立猛,何康林. 基于 STIRPAT 模型的环境压力空间差异分析:以能源消费为例[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(5):1032-1037.
- [11] Dietz T, Rosa E A. Rethinking the environmental impacts of population, affluence, and technology [J]. *Human Ecology Review*, 1994(1):277-300.
- [12] Waggoner P E, Ausubel J H. A framework for sustainability science: A renovated IPAT identity [J]. *Proceedings of the National Academy of Science*, 2002, 99(12):7860-7865.