

张 敏,王明伟,刘欣宇,等. 太行山丘陵区不同林龄核桃树固碳释氧量及冠下土壤碳储量[J].江苏农业学报,2021,37(1):93-98.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2021.01.012

太行山丘陵区不同林龄核桃树固碳释氧量及冠下土壤碳储量

张 敏¹, 王明伟¹, 刘欣宇¹, 刘利生¹, 于家悦¹, 刘 洋¹, 齐国辉^{1,2,3}

(1.河北农业大学林学院,河北 保定 071000; 2.河北省核桃工程技术研究中心,河北 临城 053400; 3.河北省<邢台>核桃产业技术研究院,河北 临城 054300)

摘要: 为了探明太行山丘陵区核桃树的固碳释氧量和不同部位的碳储量及冠下土壤碳储量随林龄的变化规律,以1年、3年、5年、9年、13年和16年生的核桃树为研究对象,测定其叶片面积、叶片净光合速率、不同部位的生物量以及土壤有机质含量。结果表明,不同林龄核桃树间存在较大差异。随着林龄的增加,核桃树的固碳释氧量呈现出先增加后降低的趋势,单株核桃树的固碳量、释氧量大小排序为9年生>5年生>13年生>16年生>3年生>1年生;随着林龄的增加,核桃树的树叶、树枝和树干的碳储量均呈先增加后降低的趋势,单株核桃树的碳储量大小排序为树枝>树干>树叶;就不同林龄的核桃树而言,其林地各土层(0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm)的土壤碳储量均呈现出随林龄的增加而逐渐增大的趋势,而对于同一林龄核桃树,其土壤碳储量随土壤深度的增加而逐渐降低。

关键词: 太行山; 核桃; 固碳释氧; 碳储量

中图分类号: S664.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2021)01-0093-06

Carbon fixation and oxygen release amount and soil carbon storage under the canopy of walnut trees with different forest ages in hilly areas of Taihang Mountain

ZHANG Min¹, WANG Ming-wei¹, LIU Xin-yu¹, LIU Li-sheng¹, YU Jia-yue¹, LIU Yang¹, QI Guo-hui^{1,2,3}

(1.College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China; 2.Research Center for Walnut Engineering and Technology of Hebei Province, Lincheng 053400, China; 3.Institute of Walnut Industrial Technology of Hebei Province(Xingtai), Lincheng 054300, China)

Abstract: To find out the carbon fixation and oxygen release amount of walnut trees, carbon storage of different parts and change of soil carbon storage under the canopy with forest ages in hilly areas of Taihang Mountain, the walnut trees of one year old, three years old, five years old, nine years old, thirteen years old and sixteen years old were taken as the research objects, and the leaf area, net photosynthetic rate of leaves, biomass of different parts and soil organic matter content were determined. The results showed that there were significant differences between walnut trees of different ages. With the increase of forest age, the carbon fixation and oxygen release amount of walnut trees increased first and then decreased.

收稿日期:2020-06-05

基金项目:林业公益性行业科研专项经费项目(201504408);河北农业大学大学生创新创业训练项目(2018128)

作者简介:张 敏(1997-),女,河北滦南人,本科生,主要从事经济林栽培生理研究。(E-mail)1137916489@qq.com

通讯作者:齐国辉,(E-mail)bdqgh@sina.com

The carbon fixation and oxygen release amount of a single walnut tree all showed the trend of nine years old > five years old > thirteen years old > sixteen years old > three years old > one year old. With the increase of forest age, the carbon storage of leaves, branches and trunks from walnut trees increased first and then decreased. The carbon storage of a single walnut tree showed the trend of

branch > trunk > leaves. For walnut trees of different ages, the soil carbon storage of each soil layer (0–20 cm, 20–40 cm, 40–60 cm) in the forest land all increased with the increase of forest age, while for walnut trees of the same age, the soil carbon storage decreased with the increase of soil depth. The results of this paper can provide a theoretical basis for the accurate evaluation of ecological benefits of economic forest.

Key words: Taihang Mountain; walnut; carbon sequestration and oxygen release; carbon storage

森林作为陆地生态系统主体,不仅在保护地域生态环境中起着十分重要的作用,而且对全球碳循环有着不容忽视的影响,其碳储量及动态等问题已经受到人们的重视^[1-2]。在森林生态系统中,80%的有机碳源于陆地生态系统的地上部分,40%源于其地下部分,因此地球上陆地生态系统中碳储藏量最大的是森林^[3]。近年来,国内外学者主要针对常见的绿化树种、绿地的固碳释氧量进行研究,发现乔木改善环境的作用是最强的^[4-5]。刘嘉君等^[6]对彩叶树种固碳释氧功能的研究结果表明,植物固碳释氧能力的强弱与其光合作用有着紧密联系,净光合速率越大,植物固碳释氧的能力就越高,反之则越低。乔小菊^[7]对园林绿化中常见阔叶乔木树种的研究发现,落叶乔木日平均和年平均固碳释氧量均大于常绿乔木。万昊等^[8]在对森林植被固碳释氧量的研究中发现,林木各器官固碳量的顺序为凋落物>树干>树枝>叶片>灌木>草本。刘婷婷^[1]在基于树体结构推算杨树人工林生物量及碳储量的研究中发现,杨树作为速生树种,随着树龄和树高的变化,其生物量和生产力会逐年增大,疏导功能和储藏功能也会增强。安利波^[9]在研究土壤碳储量的分配中发现,有机质含量和碳储存量均随土壤深度的增加逐渐减少。王鑫等^[10]在对干旱区灌丛生物量碳和土壤有机碳进行研究时也得到与安利波^[9]同样的结论。近年来随着中国扶贫事业的大力推进,经济林占整个林业产业的比重越来越大。经济林与生态林在管理方式上有很大不同,所以在树体固碳释氧及碳储量规律上也存在较大差异,但目前国内对栽培经济林的固碳释氧及碳储量研究鲜见报道。核桃是中国北方山区主栽的经济林树种之一,是山区农民脱贫致富的支柱产业^[11-12],核桃光合作用吸收固定的CO₂除形成供人们食用的坚果外,大量储存在树干、树枝、树叶及土壤中。本试验以不同林龄核桃树作为研究对象,探讨不同林龄核桃树的固碳释氧量、不同部位的碳储量及冠下土壤碳储量的变化规律,以期在经济林生态效益的精准评估提供理论基

础。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在河北绿岭果业有限公司李家韩示范基地,其地理坐标为东经 114°30′~114°33′,北纬 37°29′~37°32′。该区属于暖温带大陆性季风气候,四季分明,年平均气温为 13℃,气温最高可达 41.8℃,最低气温为-23.1℃,无霜期 202 d,年均降水量为 521 mm;降水季节分布不均,夏季降水较多。土壤类型为褐土,土壤深度约为 80 cm。园内主栽核桃品种为绿岭,南北行向,采用矮化密植栽培,树高在 3.5 m 左右。

1.2 试验设计

在不同林龄(1年、2年、4年、8年、13年和16年)的核桃林地内分别随机选取3株长势一致、无病虫害的核桃树作为试验树。于2018年6月20日用Li-3000C叶面积仪测定叶片的长、宽及面积,同时计算叶形指数;调查整株树的总叶片数,计算总叶面积。于2018年7月选择晴朗无风的白天测定不同林龄核桃树的叶片净光合速率,测定时间为8:00–18:00,每2h测定1次,每次选取向阳的3~5张叶片测其瞬时净光合速率,计算其平均值,同时固定每个时间段内测定不同林龄核桃树的顺序。于2018年8月下旬分别测定核桃树的树干、枝条和叶片的生物量,计算各部位的碳储量;用土钻钻取不同林龄核桃树下的土壤,取样深度为60cm,按固定间距分3个土壤层取样,土壤层深度由上至下依次为0~20cm、20~40cm、40~60cm。取样后将土样放入自封袋内,带回实验室,经风干后测其有机质含量,计算土壤碳储量。

1.3 测定方法

1.3.1 固碳释氧量 用Li-6400便携式光合仪测定不同林龄核桃树的净光合速率 $[\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 。在此基础上,设植株当日净同化量为 P ,计算公式如下^[13]:

$$P = \sum_{i=1}^j [(P_{i+1} + P_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 3\ 600 / 1\ 000]$$

式中: P 为日净同化量, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; j 为各时间段内的测定次数; P_i 为首次测定时间点的瞬时光合速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; P_{i+1} 为下一测定点的瞬时光合速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; t_i 为首次测定时间点的瞬时时间, h ; t_{i+1} 为下一测定点的瞬时时间, h 。

树木光合作用方程式如下:



式中: CO_2 的摩尔质量为 44 g/mol , O_2 的摩尔质量为 32 g/mol , 依据下列公式计算日单位叶面积固碳量、释氧量:

$$W_{\text{CO}_2} = P \times 44 / 1\ 000 \quad (1)$$

$$W_{\text{O}_2} = P \times 32 / 1\ 000 \quad (2)$$

式中, W_{CO_2} 为净固定的 CO_2 质量, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; W_{O_2} 为释放的 O_2 质量, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; P 为单位叶面积日净同化总量。

1.3.2 树体碳储量 在不同林龄的核桃林中分别选取 3 株标准树, 从地面开始每隔 0.5 m 测量树干直径, 计算树干体积, 用生长锥钻取树干的一部分心材, 测定其密度, 树干干质量 = 体积 \times 密度; 然后再测量每株树上所有枝条的直径, 从中采集不同粗度的枝条 15 根, 测量所采集枝条的直径、枝条质量和枝条上叶片的质量。制作回归方程, 根据“枝条直径(自变量)-枝条质量/叶片质量(因变量)”回归方程, 用枝条直径即可计算出核桃树上所有枝条的枝条(不含叶片)质量和叶片质量。

施溯筠等^[14]研究发现, 长白山区森林每生产 1 g 干物质需要 1.63 g CO_2 , 按此规律分别计算出不同林龄核桃树固定的 CO_2 量。

1.3.3 土壤碳储量 土壤在地表是连续分布的, 土壤厚度并不是固定不变的, 且不同土层的土壤碳储量存在差异。碳储量的计算公式:

$$\text{SOC} = \frac{\sum_{i=1}^n 0.58 H_i B_i O_i}{\sum_{i=1}^n H_i}$$

式中: H_i 为第 i 层土壤的厚度(cm), B_i 为第 i 层土壤的容质量(g/cm^3), O_i 为第 i 层土壤的有机质含量($\%$)(用重铬酸钾法测定), 0.58 是土壤有机碳含量比例^[8]。将土壤剖面依据土壤和植被类型分类后, 同类型土壤碳储量的误差区间计算公式如下:

$$\text{Error} = tSD / \sqrt{n}$$

式中: Error 为土壤碳储量的误差区间, t 为显著性概率 95% 置信区间的分布值, SD 为某一类型 SOC 的标准差, n 为某土地覆被类型的自由度。

1.4 数据分析方法

用 Excel 2013 进行数据处理、作图。用 DPS 7.05 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同林龄核桃树的固碳释氧量

2.1.1 不同林龄核桃树的单位叶面积净光合速率

如图 1 所示, 各林龄核桃树单位叶面积净光合速率的日变化总体呈现先上升后下降的趋势, 为单峰曲线, 其峰值出现在 $10:00$ 左右。其中 5 年生核桃树的净光合速率峰值最高, 为 $11.77\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; 16 年生核桃树的净光合速率峰值最低, 为 $8.68\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。其原因可能在于该试验园栽植的为早实品种, 为了尽早产生经济效益, 在幼树时整形修剪培养树形, 在林龄为 5 年时核桃树树体基本成形, 达到了良好的通风透光效果, 在基本进入结果期时肥水管理较好, 故在林龄为 5 年时净光合速率达到最高值; 随着林龄的增加, 树势逐渐衰弱, 树体内通风透光条件变差, 故 16 年生核桃树净光合速率最低。

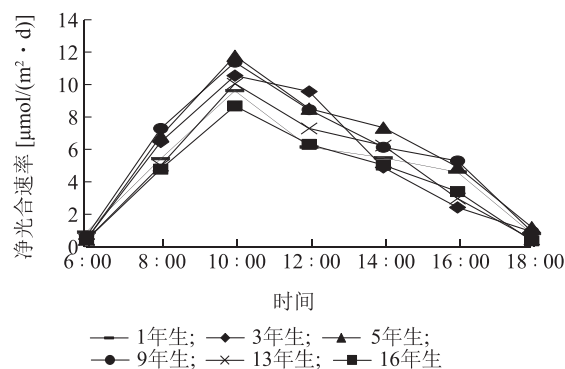
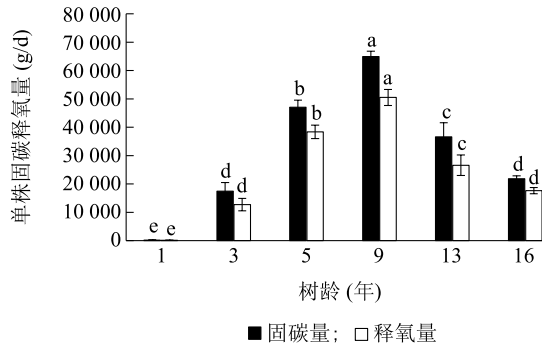


图 1 不同林龄核桃树净光合速率

Fig.1 Net photosynthetic rate of walnut trees with different ages

2.1.2 不同林龄核桃树的固碳释氧量 不同林龄核桃树的单株固碳释氧量如图 2 所示。就同一林龄而言, 核桃树的固碳量明显高于释氧量; 就不同林龄而言, 核桃树的固碳量和释氧量均呈现先增高后降低的趋势, 均在林龄为 9 年时达到最大值, 此时单株

核桃树的固碳量、释氧量分别为 64 910.17 g/d、50 502.85 g/d,其固碳量、释氧量显著高于其他林龄核桃树。



不同小写字母表示同一类别在 0.05 水平下差异显著。

图 2 不同林龄核桃树的固碳释氧量

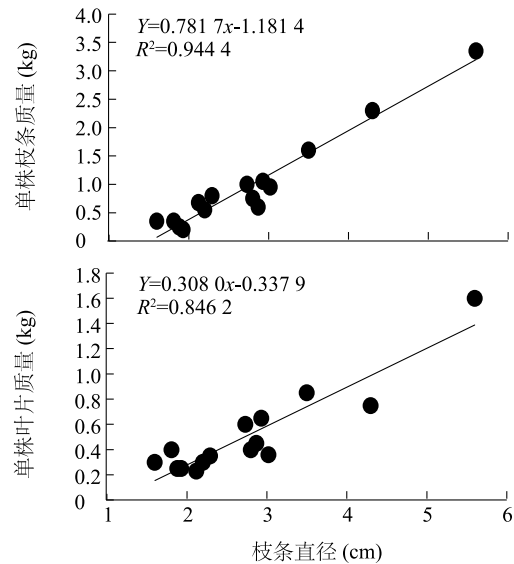
Fig.2 Carbon fixation and oxygen release quantities of walnut forests with different ages

2.2 不同林龄核桃树树体的碳储量

2.2.1 枝条直径与枝条质量和叶片质量的回归方程 枝条直径与枝条质量和叶片质量的回归方程如图 3 所示。在核桃林中随机采集不同粗度的枝条 15 根,测量枝条直径、枝条质量和枝条上叶片质量,对各部分营养器官的生物量进行回归模拟。枝直径-枝质量线性回归方程的 R^2 为 0.944 4,表明树枝的生物量与枝条基部直径有很高的线性关系;枝直径-叶质量线性回归方程的 R^2 为 0.846 2,表明枝条上叶片生物量与枝条基部直径也有较高的线性关系。由核桃树的树枝生物量和树叶生物量与枝条基部直径的回归分析结果可知,可以用回归方程较好地估测核桃树树枝、树叶的当年生物量。

2.2.2 树体各部分生物量 如图 4 所示,就同一林龄核桃树的不同部位而言,树枝的生物量显著高于树叶和树干的生物量;就不同林龄核桃树的同一部位而言,树叶、树枝和树干的生物量均呈现先增加降低的变化趋势,均在树龄为 13 年时达到最大值,此时树叶、树枝、树干的单株生物量分别为 4.9 kg、60.1 kg、34.3 kg。

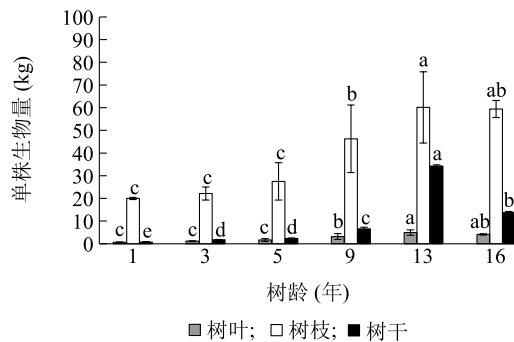
2.2.3 树体碳储量 不同林龄核桃树地上部碳储量如图 5 所示。可以看出,就同一林龄核桃树的不同部位而言,树枝的碳储量明显高于树叶和树干的碳储量。就不同林龄核桃树的同一部位而言,随着栽植年限的增加,核桃树的树叶、树枝和树干的碳储量均呈现出先增高后降低的趋势,13 年生树最大,



不同小写字母表示同一类别在 0.05 水平下差异显著。

图 3 核桃树枝条直径与枝条质量和叶片质量的回归方程

Fig.3 Regression equation of branch diameter of walnut trees and branch weight and leaf weight



不同小写字母表示同一类别在 0.05 水平下差异显著。

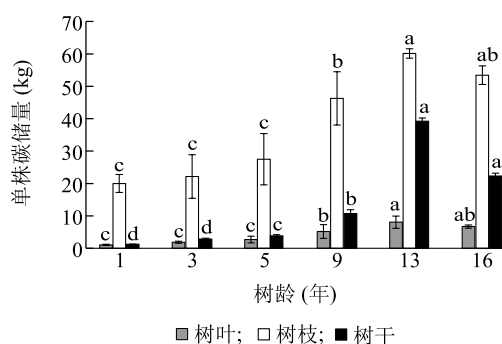
图 4 不同林龄核桃树树体各部分的生物量

Fig.4 Biomass of each part of walnut trees with different ages

这是因为树体碳储量决定于生物量,13 年生树体的生物量最高。13 年生单株核桃树的树叶、树枝和树干的碳储量分别为 8.06 kg、60.10 kg、39.26 kg,均显著高于 1 年、3 年、5 年和 9 年生的核桃树。在碳储量的增长期,幼树期核桃树碳储量的增长速度较缓,在树龄为 5 年后增长速度加快。对于核桃整个树体来说,树枝的碳储量最大,其次为树干,树叶的碳储量最小,而且随着栽植年限的增加,枝条碳储量所占比例逐渐增大。

2.3 不同林龄核桃树冠下土壤碳储量

不同林龄核桃树冠下土壤碳储量变化如图 6 所示。可以看出,就不同林龄核桃树冠下同一土层

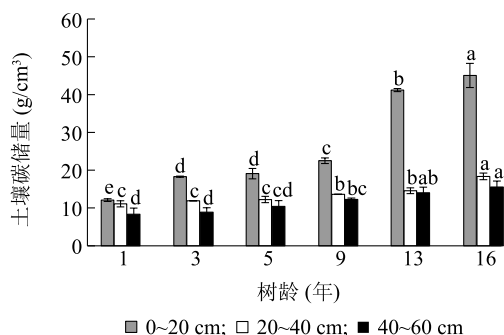


不同小写字母表示同一类别在 0.05 水平下差异显著。

图 5 不同林龄核桃树树体碳储量

Fig.5 Carbon storage quantities of walnut trees with different ages

而言,随栽植年限的增加,核桃林地各土层的土壤碳储量均呈现出逐渐增高的趋势。就同一林龄核桃树冠下不同土层而言,0~20 cm 土层的土壤碳储量要高于20~40 cm 土层和40~60 cm 土层的土壤碳储量,并随着林龄的增加,该差异更加显著。在树龄为16年时表现最为明显,16年生核桃林各土层的土壤碳储量依次为 45.08 g/cm³、18.36 g/cm³、15.55 g/cm³,其中0~20 cm 和20~40 cm 土层的碳储量显著高于1年、3年、5年、9年和13年生的核桃林地,40~60 cm 土层的碳储量显著高于1年、3年、5年和9年生的核桃林地。



不同小写字母表示同一类别在 0.05 水平下差异显著。

图 6 不同林龄核桃树林土壤碳储量

Fig.6 Soil carbon storage quantities of walnut forests with different ages

3 讨论与结论

森林植被在光合作用下,经过植物体内一系列化学反应将 CO₂ 转换成 O₂,并释放能量,从而达到固碳释氧的功效,这对于提升大气质量、维护生态系

统平衡和加快绿色小康建设有着重大的意义^[15-16]。本研究发现,不同林龄的核桃树固碳、释氧功能具有一定的差异,核桃树体的固碳量和释氧量随着林龄的增加呈现先升高后下降的趋势,且9年生核桃树固碳量和释氧量均达到最大值。原因可能在于林龄不同,树体的光合、呼吸等生理特性不同,而9年生核桃树正处于盛果期,枝叶茂盛,根系发达,所以平均固碳量和释氧量均达到最大值。研究结果表明,核桃树每年的固碳量明显高于释氧量,王立等^[17]在对不同树龄园林树种固碳释氧能力的研究中也得到了相似结果。由此可见,核桃树生长良好,对大气中的二氧化碳也会起到一定的调控功能。

本研究发现,不同林龄核桃林的树体碳储量随栽植年限的增加呈现出先升高后下降的趋势。这与姚利辉等^[18]对不同生长阶段杉木碳储量研究得出的其各器官碳含量随树龄增大而增大的结论有所不同。原因可能在于本试验用树属于早实核桃类,枝条衰老后易枯死,为保证健壮树势,进入盛果期后,每年对一些衰老大枝进行更新,使树冠保持在一定大小,而不是任其生长。研究结果表明,核桃单木各组分生物量的排序为树枝>树干>树叶。而杨众养等^[19]对海南岛3种经济树种单木各组分生物量分配情况进行研究时发现,树干的生物量最大。可能是因为树种间的差异造成了这种现象,也可能是因为核桃的树枝相对于海南岛的3种经济林树种的树枝比较粗壮,并且在核桃的整形过程中对树枝加重修剪,以促进更多的新枝萌发抽枝,所以能积累更多的碳,从而实现更高的固碳价值。

土壤碳储量包括动植物及微生物的残骸、排泄物及其部分分解物和腐殖质^[20]。本研究发现,不同树龄核桃林地各土层的土壤碳储量随栽植年限的增加均呈现出逐渐升高的趋势。这与陶玉华等^[21]和刘维佳等^[22]对土壤碳储量的研究结果相似。原因可能在于树势随树龄的增加而逐渐衰弱,需要逐年向土壤中输入新鲜有机物,进而使土壤碳储量逐渐增加。当树木处于幼树期时,土壤的不同土层碳储量基本处于稳定,但随着树龄的增长,达到盛果期,表层的土壤碳储量明显高于深层的土壤碳储量。在垂直方位上,土壤有机碳含量与土壤深度有着紧密的联系,其含量随土层深度的增加呈下降趋势^[23]。这与兰斯安等^[24]对不同树龄杉木人工林碳储量的研究结果一致,原因可能在于为保证树体生长良好,

每年均施用有机肥,再加上表层枯落物层的分解和杂草腐烂等原因造成表层土壤的碳储量明显高于深层土壤,更加说明土壤是储存有机碳的巨大碳库来源。

随着林龄的增加,核桃树的固碳释氧量及树叶、树枝和树干的碳储量均呈现出先增加后降低的趋势。就同一林龄核桃树而言,其土壤碳储量随土壤深度的增加而逐渐降低;而对于不同林龄的核桃树而言,其林地各土层(0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm)的土壤碳储量均呈现出随林龄的增加而逐渐增高的趋势。

参考文献:

- [1] 刘婷婷. 基于树体结构推算杨树人工林生物量及碳储量[D]. 北京:北京林业大学,2009.
- [2] 刘世荣,王 晖,栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展[J]. 生态学报,2011,31(19):5437-5448.
- [3] MALHI Y, BALDOCCHI D D, JARVIS P G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests[J]. Plant Cell and Environment, 1999, 22(6): 715-740.
- [4] 陈 洁,陈会玲,金晓玲. 三种常见灌木的固碳释氧和降温增湿效益研究[J]. 现代园艺,2015(3):9-10.
- [5] 张艳丽,费世民,李智勇,等. 成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益[J]. 生态学报,2013,33(12):3878-3887.
- [6] 刘嘉君,王志刚,阎爱华,等. 12种彩叶树种光合特性及固碳释氧功能[J]. 东北林业大学学报,2011,39(9):23-25,30.
- [7] 乔小菊. 南京城区园林绿化中常见阔叶乔木树种的光合特性及相关生态功能的研究[D]. 南京:南京农业大学,2016.
- [8] 万 昊,刘卫国. 六盘山2种森林植被固碳释氧计量研究[J]. 水土保持学报,2014,28(6):332-336.
- [9] 安利波. 栓皮栎天然次生林土壤碳储量分配格局[J]. 西部林业科学,2017,46(1):49-53.
- [10] 王 鑫,杨德刚,熊黑钢,等. 新疆干旱区8种常见灌丛生物量碳和土壤有机碳特征[J]. 生态学杂志,2016,35(8):1996-2002.
- [11] 江 焘,方传波. 山核桃丰产栽培技术[J]. 林业科技开发,2002(6):42-43.
- [12] 张日清,吕芳德. 优良经济树种—美国山核桃[J]. 广西林业科学,1998(4):202.
- [13] 丁 杰,李少宁,鲁绍伟,等. 北京市常见经济林水分利用及固碳释氧功能[J]. 江苏农业科学,2017,45(18):130-133.
- [14] 施溯筠,李 光,张三焕. 长白山区森林固定 CO₂ 价值的评估[J]. 延边大学学报(自然科学版),2002,28(2):134-137.
- [15] GUDKOV S V, GRINBERG M A, SUKHOV V, et al. Effect of ionizing radiation on physiological and molecular processes in plants[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2019, 202(6):8-24.
- [16] LUO F L, ZENG B, CHEN T, et al. Response to simulated flooding of photosynthesis and growth of riparian plant salix variegata in the three gorges reservoir region of China[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(5):910-918.
- [17] 王 立,王海洋,常 欣. 常见园林树种固碳释氧能力浅析[J]. 南方农业,2012,6(5):54-56.
- [18] 姚利辉,康文星,赵仲辉,等. 会同杉木人工林不同生长阶段植物固碳特征[J]. 生态学报,2015,35(4):1187-1197.
- [19] 杨众养,陈宗铸,陈小花,等. 海南岛北部3种经济林树种的生物量、碳储量及其分配特征[J]. 经济林研究,2018,36(3):62-68.
- [20] 王晓峰,汪思龙,张伟东. 杉木凋落物对土壤有机碳分解及微生物生物量碳的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(9):2393-2398.
- [21] 陶玉华,冯金朝,马麟英,等. 广西罗城马尾松、杉木、桉树人工林碳储量及其动态变化[J]. 生态环境学报,2011,20(11):1608-1613.
- [22] 刘维佳,李 疆,时 坤,等. 不同树龄库尔勒香梨园土壤有机碳储量及其对树体生长的影响[J]. 新疆农业科学,2012,49(2):209-215.
- [23] 韩焕金. 哈尔滨市主要植物生理生态功能研究[J]. 江苏林业科技,2005(4):5-10.
- [24] 兰斯安,杜 虎,曾馥平,等. 不同林龄杉木人工林碳储量及其分配格局[J]. 应用生态学报,2016,27(4):1125-1134.

(责任编辑:张震林)