

贺兰山 10 种典型植物固碳释氧能力研究

陈高路^{1,2,3}, 陈林^{2,3}, 庞丹波^{2,3}, 马进鹏^{2,3},
万红云^{2,3}, 王继飞⁴, 李静尧⁴, 李学斌^{2,3}

(1.宁夏大学农学院,银川 750021; 2.宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室,银川 750021;
3.宁夏大学西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地,银川 750021;
4.宁夏贺兰山国家级自然保护区管理局,银川 750021)

摘要:为探讨贺兰山典型植物固碳释氧能力,运用 Li-6400XT 便携式光合仪对贺兰山 10 种乔灌木进行了光合生理指标的测定,计算 10 种乔灌木不同尺度的日固碳释氧量,并分析其固碳释氧能力。结果表明:(1)青海云杉的单株叶面积、单株叶干重、叶面积指数显著高于其他植物;苔草的比叶面积最高,且呈现出草本>灌木>乔木的规律;披针叶黄华的日均净光合速率最高,乔灌木之间无明显差异。(2)单位叶面积日固碳释氧能力由强到弱依次为披针叶黄华、灰榆、山杨、栒子、冰草、油松、小叶忍冬、小檗、青海云杉、苔草;单位冠幅投影面积日固碳释氧能力由强到弱依次为山杨、青海云杉、灰榆、栒子、小檗、小叶忍冬;单株植物日固碳释氧能力由强到弱依次为青海云杉、山杨、油松、灰榆、小檗、栒子、小叶忍冬、披针叶黄华、冰草;4 种典型林分乔木日固碳释氧能力由强到弱依次为青海云杉林、混交林、油松林、灰榆林。(3)固碳释氧能力聚类分析表明,单位叶面积尺度上将乔木(4 种)、灌木(3 种)分为 2 级,草本(3 种)分为 3 级;单位冠幅投影面积尺度上将乔木(4 种)、灌木(3 种)均分为 3 级;植物单株尺度上将乔木(4 种)、灌木(3 种)、草本(2 种)均分为 2 级;不同林种乔木单位土地面积尺度上将 4 种典型林分分为 2 级。(4)测试植物的单位叶面积日固碳释氧量与植物形态指标均没有显著相关性;单位冠幅投影面积日固碳释氧量与叶面积指数呈显著正相关;单株植物日固碳释氧量与株高、胸径和叶面积指数呈显著正相关;单位林地面积日固碳释氧量与林分密度呈显著正相关。综上,青海云杉和山杨在不同尺度上均有较高固碳释氧能力,在今后贺兰山生态修复过程中可以重点考虑这 2 种乔木,再将小叶忍冬和披针叶黄华等固碳释氧能力较强的灌木和草本与乔木进行合理配置,以达到最大的生态效益。

关键词:贺兰山;乔灌木;固碳释氧;叶片性状

中图分类号:S718.5

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)03-0206-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2021.03.029

Study on Carbon Sequestration and Oxygen Release Capacity of 10 Typical Plants in Helan Mountain

CHEN Gaolu^{1,2,3}, CHEN Lin^{2,3}, PANG Danbo^{2,3}, MA Jinpeng^{2,3},
WAN Hongyun^{2,3}, WANG Jifei⁴, LI Jingyao⁴, LI Xuebin^{2,3}

(1.School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021; 2.Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021; 3.Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021; 4.Administration of National Nature Reserve of Helan Mountain in Ningxia, Yinchuan 750021)

Abstract: In order to investigate the carbon sequestration and oxygen release capacity of typical plants in the Helan Mountain, the photosynthetic physiological indexes of 10 species of trees, shrubs and grasses were measured by using the portable Li-6400XT photosynthetic apparatus, and the daily carbon sequestration and oxygen release capacity were analyzed. The results showed that: (1) The leaf area, leaf dry weight and leaf area index of *Picea crassifolia* were significantly higher than those of other plants. The specific leaf area of *Carex muliensis* was the highest, and showed a rank of herb>shrub>tree. The average daily net photosyn-

收稿日期:2020-11-27

资助项目:宁夏重点研发计划项目(2018BFG02015);国家自然科学基金项目(31960359);第三批宁夏青年科技人才托举工程项目(TJGC2018068);宁夏自然科学基金项目(2020AAC03102)

第一作者:陈高路(1998—),男,硕士研究生,主要从事森林生态研究。E-mail:1091868186@qq.com

通信作者:李学斌(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事土壤碳循环研究。E-mail:lixuebin@nxu.edu.cn

thetic rate of *Thermopsis lanceolata* was the highest, and there was no significant difference between trees, shrubs and grasses. (2) The descending order of daily carbon sequestration and oxygen release capacity per unit leaf area was *T. lanceolata*, *Ulmus glaucescens*, *Populus davidiana*, *Cotoneaster hissaricus*, *Agropyron cristatum*, *Pinus tabuliformis*, *Lonicera microphylla*, *Berberis thunbergii*, *P. crassifolia*, *C. muliensis*. The descending order of daily carbon sequestration and oxygen release capacity of unit crown width was *P. davidiana*, *P. crassifolia*, *U. glaucescens*, *P. tabuliformis*, *C. hissaricus*, *B. thunbergii*, *L. microphylla*. The descending order of daily carbon sequestration and oxygen release capacity of a single plant was *P. crassifolia*, *P. davidiana*, *P. tabuliformis*, *U. glaucescens*, *B. thunbergii*, *C. hissaricus*, *L. microphylla*, *T. lanceolata*, *A. cristatum*. The daily carbon sequestration and oxygen release capacity of the four typical stand trees were in a rank of *P. crassifolia* forest, mixed forest, *P. tabuliformis* forest, *U. glaucescens* forest. (3) According to cluster analysis results, the carbon sequestration and oxygen release capacity on the per leaf area of trees (4 species) and shrubs (3 species) were divided into two levels, and herbs (3 species) were divided into three levels, which on the projection area scale of unit crown width of trees (4 species) and shrubs (3 species) were divided into three levels. However, the tree (4 species), shrub (3 species) and herb (2 species) were divided into two levels according to the single plant scale, and on the scale of unit land area of different forest species, four typical forests are divided into two levels. (4) There was no significant correlation between the daily carbon sequestration and oxygen release per unit leaf area of plants and the plant morphological indicators. The daily carbon sequestration and oxygen release per unit canopy projection area was significantly positively correlated with the leaf area index. Moreover, we observed that the daily carbon sequestration and oxygen release per plant was significantly positively correlated with plant height, diameter at breast height and leaf area index. The daily carbon sequestration and oxygen release per unit forest area was significantly positive correlation with stand density. In conclusion, both *P. crassifolia* and *P. davidiana* had high carbon sequestration and oxygen release capacity in different scales. In the ecological restoration process of the Helan Mountain in the future, the two species of trees should be given priority consideration, and shrubs and herbs with high carbon sequestration and oxygen release capacity, such as *C. hissaricus*, should be added to achieve the maximum ecological benefits.

Keywords: Helan Mountain; arbor bush; carbon sequestration and oxygen release; leaf traits

全球气候变暖已经成为国内外研究的热点问题^[1],究其原因是由于CO₂等温室气体大量排放造成的温室效应不断积累。IPCC第5次评估报告^[2]预测,2016—2035年全球地表平均气温将升高0.3~0.7℃,2081—2100年将升高0.3~4.8℃,这将对全球生态环境提出巨大的挑战。森林生态系统作为陆地生物圈的重要组成部分,不仅在能量平衡和水循环方面起着关键作用,而且森林的碳汇功能在调节气候、碳循环和减缓气候变暖方面也起着至关重要的作用^[3]。研究森林的固碳释氧能力不仅对提高造林质量,而且对评价该地区森林生态效益具有重要意义。

植物固碳是通过光合作用同化CO₂的过程,也是植物生长过程中碳素化合物积累的主要途径^[4]。目前学者们对植物光合固碳释氧方面做了大量研究。Okimoto等^[5]用气体交换分析和生长曲线分析2种方法估算出泰国9年生红树林年固碳量大于3年、5年生的红树林;Zheng等^[6-7]研究发现,半干旱黄土高原刺槐固碳能力阴坡大于阳坡,幼龄林大于成

熟林,且在相同林分密度下,33%的低强度间伐更适合刺槐的可持续经营,提高了刺槐的固碳能力;史红文等^[8]、邵永昌等^[9]、郝鑫杰等^[10]分别研究了武汉、上海、呼和浩特常见绿化树种的光合特性及固碳释氧能力并对测试植物日固碳释氧量进行聚类分析,目的在于筛选出适合该地区环境的高固碳释氧绿化植物。这些研究结果均为该地区生态建设提供了数据支持,因此,研究不同环境及地区植物固碳释氧能力具有重要意义。

宁夏贺兰山自然保护区是宁夏三大天然林区之一,地处我国温带草原区与荒漠区的过渡地带,为银川平原形成了一道天然屏障,对于保护银川平原的生态环境起到了重要的作用^[11]。但是目前尚未有贺兰山主要森林树种光合固碳释氧能力方面的报道。本文选取贺兰山10种典型植物作为研究对象,对其叶片性状和净光合速率进行测量,并对单位叶面积、单位冠幅投影面积、单株植物、单位土地面积日净固碳释氧量进行对比分析,旨在探讨该地区典型植物固碳

释氧能力的优劣,为今后贺兰山典型林分抚育管理提供理论支撑及科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贺兰山自然保护区位于宁夏银川平原和阿拉善沙漠之间,地理坐标为 38°19′—39°22′N,105°49′—106°41′E。该区气候类型为典型大陆性气候,具有山地气候特征。年均气温 −0.8℃,≥10℃积温 478.6℃,年均降水量 420 mm,年均蒸发量 2 000 mm。贺兰山植被有明显的垂直分布规律,随海拔的升高,植被类型分别为荒漠化草原、山地疏林草原、针阔混交林、温性针叶林、寒性针叶林和高山草甸。青海云杉林分布于 2 400~3 100 m 的地带,林下土壤以灰褐土为主。油松林分布于 2 000~2 400 m 的地带,林下土壤为灰褐土和灰钙土。部分区域有油松、青海云杉与山杨等乔木组成的混交林。灰榆林分布于海拔

1 500~1 900 m,土壤以灰钙土与粗骨土为主^[12]。

1.2 供试材料

2020 年 7 月 28—31 日对贺兰山所选的 10 种乔灌木进行样方调查,其中乔木 4 种:青海云杉(*Picea crassifolia* Kom.)、山杨(*Populus davidiana* Dode.)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、灰榆(*Ulmus glaucescens* Franch.);灌木 3 种:小檗(*Berberis thunbergii* DC.)、栒子(*Cotoneaster hissaricus* Wall. ex Lindl.)、小叶忍冬(*Lonicera microphylla* Willd.);草本 3 种:披针叶黄华(*Thermopsis lanceolata* R. Br.)、冰草(*Agropyron cristatum* (L.) Gaertn.)、苔草(*Carex muliensis* Nees.)。每种植物选取标准样地 3 个,乔木标准样地 20 m×20 m,灌木标准样地 5 m×5 m,草本标准样地 1 m×1 m,共计 30 个标准样地,并测量每种植物的株高、胸径和冠幅等指标。测试的 10 种植物基本信息见表 1。

表 1 样地基本信息

林分类型	植物名称	平均 株高/m	平均 胸径/cm	平均 冠幅/m	林分密度 (株·hm ⁻²)	郁闭度或 盖度/%	坡度/ (°)	主要林下 植被
油松林	油松	10.11±0.34	21.65±0.94	4.57±0.17	533.33	0.5	23	杜松、虎榛子、小叶忍冬、小檗、苔草、早熟禾等
	山杨	4.94±0.15	10.58±0.34	2.48±0.09	366.67			
混交林	青海云杉	8.14±0.28	16.85±0.74	3.62±0.14	508.33			银露梅、栒子、小檗、小叶忍冬、唐松草等
	油松	8.43±0.89	21.79±4.32	4.38±0.40	58.33	0.6	16	
青海云杉林	青海云杉	9.79±0.20	15.92±0.50	3.42±0.09	1233.33	0.6	29	杜松、栒子、小檗、小叶忍冬、苔草等
灰榆林	灰榆	3.10±0.10	8.94±0.24	2.86±0.20	383.33	0.2	30	短花针茅、灌木亚菊等
	小檗	2.12±0.10	1.72±0.08	2.84±0.19				
灌木	栒子	2.16±0.06	1.71±0.06	1.75±0.10				
	小叶忍冬	1.90±0.14	2.12±0.08	1.86±0.10				
草本	披针叶黄华	0.19±0				30.0		
	苔草	0.14±0.01				25.0		
	冰草	0.44±0.01				30.0		

注:表中数据形式为平均值±标准误。下同。

1.3 叶片性状测定

比叶面积测定:每种植物选取 3 株标准木,从东西南北 4 个方位随机取叶片 50~100 个。将取下的叶片带回实验室,利用扫描仪对叶片进行图像扫描,采用 Photoshop 软件测定其投影面积,以此作为叶片面积。测定完毕后放入烘箱 65℃烘干至恒重。植物的比叶面积 SLA 计算公式为:

$$SLA=\frac{S}{W_{dry}} \tag{1}$$

式中:SLA 为植物比叶面积(cm²/g);S 为叶片投影面积(cm²);W_{dry}为叶片干重(g)。

叶面积指数测定:植物的叶面积指数采用经验公式法进行计算,是指利用前人对植物生物量模型(本文选用 7 种植物叶生物量模型见表 2)的研究计算该植物的整株叶片干重。植物的叶面积指数 LAI 计算

公式为:

$$LAI=\frac{W \cdot SLA}{C} \tag{2}$$

式中:LAI 为植物的叶面积指数;W 为植物整株叶片干重(kg);C 为植物的冠幅面积(m²)。

1.4 固碳释氧量测定

根据植物光合作用原理,利用植物净光合速率日变化来计算植物的日固碳释氧量。于 2020 年 8 月 26—29 日,选择晴朗无云、无风的天气,在自然光照下,从 8:00—18:00 每隔 2 h 用 Li-6400XT 便携式光合仪测量 1 次。每种植物选取生长健壮、无病虫害的标准样株 3 株,每株植物选取阳面、大小基本一致、生长健壮的叶片离体测量 3 次重复,测量时尽量将叶片铺满叶室,无相互遮盖。每次测量记录 5 个净光合速率瞬时值,最后取其平均值。

表 2 植物叶生物量模型

植物名称	公式	数据来源
青海云杉	$\log W=1.6201+0.6921D^2H$	穆天民 ^[13]
山杨	$W=1/(0.0000333+0.00369\times0.815^D)$	姜鹏等 ^[14]
油松	$\ln W=-4.605+0.816\ln(D^2H)$	刘斌等 ^[15]
灰榆	$\ln W=-2.9503+1.7657\ln D$	梁永亮 ^[16]
小檗	$W=0.052(-8.464+0.051(D^2H)-(2.403\times10^{-5})(D^2H)^2$	仇瑶等 ^[17]
栒子	$W=0.035(5.654-0.011V^2+0.001V^3)$	仇瑶等 ^[17]
小叶忍冬	$W=0.054(7.448\times10^{-9})(D^2H)^{2.753}$	仇瑶等 ^[17]

植物日同化量是净光合速率日变化图中净光合速率曲线与时间横轴围合的面积,用简单积分法可以计算植物叶片的日净同化量。日净同化量计算公式^[18]为:

$$P=\sum_{i=1}^j(((P_{i+1}+P_i)/2)(t_{i+1}-t_i)\times3600/1000)$$

(3)

式中: P 为测定日单位叶面积的日同化量($\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$); P_i 为初测点的瞬时光合速率($\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$); P_{i+1} 为下一测点的瞬时光合速率($\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$); t_i 为初测点的瞬时时间(h); t_{i+1} 为下个测点的瞬时时间(h); j 为测试次数。

一般植物晚上的暗呼吸消耗量按照白天同化量的 20% 计算,测定日的总同化量换算为测定日固定 CO_2 量计算公式为:

$$W_{\text{CO}_2}=P\times(1-0.2)\times44/1000$$

(4)

式中: W_{CO_2} 为单位面积的叶片固定 CO_2 的质量($\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$)。

植物日释氧量计算公式为:

$$W_{\text{O}_2}=P\times(1-0.2)\times32/1000$$

(5)

式中: W_{O_2} 为单位面积的叶片释放 O_2 的质量($\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$)。

植物单位冠幅投影面积日固碳释氧量计算公式为:

$$C_{\text{CO}_2/\text{O}_2}=W_{\text{CO}_2/\text{O}_2}\times\text{LAI}$$

(6)

式中: C_{CO_2} 为单位冠幅投影面积的叶片固定 CO_2 的质量($\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$); C_{O_2} 为单位冠幅投影面积的叶片释放 O_2 的质量($\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$)。

单株植物日固碳释氧量计算公式为:

$$S_{\text{CO}_2/\text{O}_2}=W_{\text{CO}_2/\text{O}_2}\times S$$

(7)

式中: S_{CO_2} 为单株植物叶片固定 CO_2 的质量(g/d); S_{O_2} 为单株植物叶片释放 O_2 的质量(g/d); S 为单株植物总叶面积。

单位林地面积乔木日固碳释氧量计算公式为:

$$Q_{\text{CO}_2/\text{O}_2}=S_{\text{CO}_2/\text{O}_2}\times\text{林分密度}$$

(8)

式中: Q_{CO_2} 为单位林地面积乔木固定 CO_2 的质量($\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{d})$); Q_{O_2} 为单位林地面积乔木释放 O_2 的质量($\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{d})$)。

1.5 数据处理

所有数据使用 Excel 2016 和 SPSS 25 软件进行

整理与统计分析;利用 Origin 2018 软件,使用 Word Method 离差平方和法,对 10 种测试植物单位叶面积、单位冠幅投影面积、单株、不同林种单位土地面积日固碳释氧能力进行聚类分析并作图。

2 结果与分析

2.1 植物叶片性状和日均净光合速率分析

由表 3 可知,单株叶干重青海云杉显著高于其他植物,为 15.98 kg,依次为油松、灰榆、山杨、小檗、栒子、小叶忍冬、披针叶黄华,冰草最低为 0.000 3 kg。从不同生活型来看,乔木(7.72 kg)显著高于灌木(0.34 kg)>草本(0.01 kg)。单株叶面积青海云杉显著高于其他植物,为 66.57 m^2 ,依次为油松、山杨、灰榆、小檗、栒子、披针叶黄华,冰草最低为 0.004 m^2 。从不同生活型来看,乔木(38.21 m^2)显著高于灌木(3.71 m^2)和草本(0.01 m^2)。比叶面积苔草显著高于其他植物,为 25.15 m^2/kg ,依次为小叶忍冬、冰草、山杨、栒子、披针叶黄华、小檗、灰榆、青海云杉,油松最低为 3.90 m^2/kg 。从不同生活型来看,草本显著大于乔木和灌木。叶面积指数青海云杉显著高于其他植物,为 6.60,依次为山杨、灰榆、油松、小檗、栒子,小叶忍冬最低为 0.24。从不同生活型来看,乔木(4.20)显著>灌木(0.75)。日均净光合速率披针叶黄华显著高于其他植物,为 11.35 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,依次为灰榆、山杨、栒子、冰草、油松、小叶忍冬、小檗、青海云杉,苔草最低为 3.40 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。从不同生活型来看,乔木>草本>灌木,但不同林分之间无显著性差异。

2.2 植物固碳释氧能力分析

2.2.1 植物单位叶面积日固碳释氧量 由表 4 可知,4 种乔木单位叶面积日同化量、日固碳量及日释氧量分别为 197.67~421.29 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、6.96~14.83 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、5.06~10.79 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$;3 个指标均以灰榆最高,青海云杉最低。3 种灌木单位叶面积日同化量、日固碳量及日释氧量分别为 200.13~349.70 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、7.04~12.31 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、5.12~8.95 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$;3 个指标均以栒子最高,小檗最低。3 种草本单位叶面积日同化量、日固碳量及日释氧量分别为

132.21~458.68 mmol/(m² · d)、4.66~16.15 g/(m² · d)、3.39~11.74 g/(m² · d);3 个指标均以苔草最低,披针叶黄华最高。从不同生活型来看,乔木、灌木及草本植物单位叶面积平均日同化量、日固碳量及日释氧量

分别为 259.10~313.25 mmol/(m² · d)、9.12~11.03 g/(m² · d)、6.63~8.02 g/(m² · d)。由大到小均为乔木>草本>灌木,乔木分别约为灌木和草本的 1.21,1.08 倍,但不同林分之间均无显著性差异。

表 3 植物叶片性状

植物名称	单株 叶干重/kg	单株 叶面积/m ²	比叶面积/ (m ² · kg ⁻¹)	叶面积指数	日均净光合速率/ (μmol · m ⁻² · s ⁻¹)
青海云杉	15.98±1.53a	66.57±6.36a	4.16±0.08g	6.60±0.32a	4.95±1.02cd
山杨	2.32±0.39c	28.22±4.70c	12.14±0.16cd	5.47±0.43b	9.54±2.55abc
油松	10.06±1.25b	39.23±4.87b	3.90±0.47g	2.20±0.11c	5.85±1.47bcd
灰榆	2.50±0.01c	18.82±0.07d	7.52±0.27f	2.82±0.32c	10.15±2.48ab
乔木平均值	7.72±1.77A	38.21±5.75A	6.93±1.01C	4.27±0.56A	7.62±1.30A
小檗	0.71±0.09cd	7.39±0.92e	10.41±0.11e	1.10±0.04d	5.17±0.70cd
小叶忍冬	0.05±0.01d	0.70±0.14e	14.81±0.09b	0.25±0.05e	5.60±1.56bcd
栒子	0.25±0.02d	3.05±0.29e	11.97±0.72de	1.22±0.11d	8.88±1.45abc
灌木平均值	0.34±0.10B	3.71±1.02B	12.40±0.68B	0.86±0.16B	6.55±1.17A
披针叶黄华	0.0013±0d	0.01±0e	11.67±1.19de	—	11.35±2.37a
苔草	—	—	25.15±0.52a	—	3.40±0.71d
冰草	0.0003±0d	0.00±0e	13.76±0.74bc	—	6.94±1.64abcd
草本平均值	0.001±0B	0.01±0B	16.86±2.14A	—	7.23±2.30A

注:表中同列不同小写字母表示不同植物在 P<0.05 水平上差异显著;同列不同大写字母表示不同生活型植物在 P<0.05 水平上差异显著。下同。

表 4 植物单位叶面积日固碳释氧量

植物名称	单位叶面积 日同化量/ (mmol · m ⁻² · d ⁻¹)	单位叶面积 日固碳量/ (g · m ⁻² · d ⁻¹)	单位叶面积 日释氧量/ (g · m ⁻² · d ⁻¹)
青海云杉	197.67±4.90f	6.96±0.17f	5.06±0.13f
山杨	394.90±5.89b	13.90±0.21b	10.11±0.15b
油松	239.12±7.56e	8.42±0.27e	6.12±0.19e
灰榆	421.29±8.87b	14.83±0.31b	10.79±0.23b
乔木平均值	313.25±55.67A	11.03±1.96A	8.02±1.43A
小檗	200.13±8.48f	7.04±0.30f	5.12±0.22f
小叶忍冬	227.47±5.16ef	8.01±0.18ef	5.82±0.13ef
栒子	349.70±12.30c	12.31±0.43c	8.95±0.31c
灌木平均值	259.10±45.98A	9.12±1.62A	6.63±1.18A
披针叶黄华	458.68±24.11a	16.15±0.85a	11.74±0.62a
苔草	132.32±2.45g	4.66±0.09g	3.39±0.06g
冰草	282.82±16.34d	9.96±0.58d	7.24±0.42d
草本平均值	291.27±94.31A	10.26±3.32A	7.46±2.41A

2.2.2 植物单位冠幅投影面积日固碳释氧量 由表 5 可知,4 种乔木单位冠幅投影面积日同化量、日固碳量及日释氧量分别为 525.33~2 159.05 mmol/(m² · d)、18.49~76.00 g/(m² · d)、13.45~55.27 g/(m² · d);3 个指标均以油松最低,山杨最高。3 种灌木单位冠幅投影面积日同化量、日固碳量及日释氧量分别为 56.27~220.21 mmol/(m² · d)、1.98~7.75 g/(m² · d)、1.44~5.64 g/(m² · d);3 个指标均以小叶忍冬最低,栒子最高。从不同生活型来看,乔木与灌木植物单位冠幅投影面积日同化量、日固碳量及日释氧量分别为 1 294.04,234.41 mmol/(m² · d)、45.55,

8.25 g/(m² · d)、33.13,6.00 g/(m² · d)。3 个指标乔木均显著大于灌木,乔木约为灌木的 5.52 倍。

表 5 植物单位冠幅投影面积日固碳释氧量

植物名称	单位冠幅投影 面积日同化量/ (mmol · m ⁻² · d ⁻¹)	单位冠幅投影 面积日固碳量/ (g · m ⁻² · d ⁻¹)	单位冠幅投影 面积日释氧量/ (g · m ⁻² · d ⁻¹)
青海云杉	1303.89±62.52b	45.90±2.20b	33.38±1.60b
山杨	2159.05±169.06a	76.00±5.95a	55.27±4.33a
油松	525.33±26.32c	18.49±0.93c	13.45±0.67c
灰榆	1187.89±132.87b	41.81±4.68b	30.41±3.40b
乔木平均值	1294.04±181.67A	45.55±6.39A	33.13±4.65A
小檗	220.21±7.91de	7.75±0.28de	5.64±0.20de
小叶忍冬	56.27±12.32e	1.98±0.43e	1.44±0.32e
栒子	426.76±38.80cd	15.02±1.37cd	10.93±0.99cd
灌木平均值	234.41±54.91B	8.25±1.93B	6.00±1.41B

2.2.3 单株植物日固碳释氧量 由表 6 可知,4 种乔木单株日同化量、日固碳量及日释氧量分别为 7.93~13.16 mol/d、279.05~463.17 g/d、202.94~336.85 g/d;3 个指标均以灰榆最低,青海云杉最高。3 种灌木单株日同化量、日固碳量及日释氧量分别为 0.16~1.48 mol/d、5.64~52.07 g/d、4.10~37.87 g/d;3 个指标均以小叶忍冬最低,小檗最高。披针叶黄华及冰草的单株日同化量、日固碳量及日释氧量分别为 0.001,0.001 mol/d、0.24,0.04 g/d、0.17,0.03 g/d;3 个指标披针叶黄华均>冰草。乔木、灌木及草本植物单株平均日同化量、日固碳量及日释氧量分别为 0.01~10.40 mol/d、0.14~366.17 g/d、0.10~261.31 g/d;3

个指标乔木均显著>灌木和草本,乔木分别约为灌木和草本的 11.56,1 040 倍。

2.2.4 单位林地面积乔木日固碳释氧量 由表 7 可知,4 种不同类型林分乔木单位林地面积日同化量、日固碳量及日释氧量分别为 3 040.94~16 198.95 mol/(hm²·d)、107.04~570.20 kg/(hm²·d)、77.85~414.69 kg/(hm²·d);3 个指标由大到小排序均为青海云杉林>混交林>油松林>灰榆林,且青海云杉林与油松林和灰榆林有显著性差异,混交林和油松林、油松林和灰榆林之间无显著性差异。青海云杉林分别约为混交林、油松林、灰榆林的 1.51,3.24,5.31 倍。4 种不同类型林分乔木单位土地面积平均日同化量、日固碳量及日释氧量分别为 8 750.41 mol/(hm²·d)、308.01 kg/(hm²·d)、224.01 kg/(hm²·d)。

表 6 单株植物日固碳释氧量

植物名称	单株植物日同化量/ (mol·d ⁻¹)	单株植物日固碳量/ (g·d ⁻¹)	单株植物日释氧量/ (g·d ⁻¹)
青海云杉	13.16±1.26a	463.17±44.27a	336.85±32.20a
山杨	11.14±1.85ab	392.23±65.27ab	285.26±47.47ab
油松	9.38±1.17bc	330.23±41.03bc	240.17±29.84bc
灰榆	7.93±0.03c	279.05±1.10c	202.94±0.80c
乔木平均值	10.40±0.80A	366.17±28.11A	266.31±20.45A
小檗	1.48±0.18d	52.07±6.47d	37.87±4.71d
小叶忍冬	0.16±0.03d	5.64±1.13d	4.10±0.82d
枸杞	1.07±0.10d	37.52±3.56d	27.29±2.59d
灌木平均值	0.90±0.20B	31.74±7.19B	23.09±5.23B
披针叶黄华	0.01±0d	0.24±0.03d	0.17±0.02d
冰草	0.001±0d	0.04±0d	0.03±0d
草本平均值	0.01±0B	0.14±0.05B	0.10±0.03B

表 7 不同林分类型单位林地面积日固碳释氧量

林分类型	植物名称	单位土地面积日同化量/ (mol·hm ⁻² ·d ⁻¹)	单位林地面积日固碳量/ (kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	单位林地面积日释氧量/ (kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)
青海云杉林	青海云杉	16198.95±1468.64aA	570.20±51.70aA	414.69±37.60aA
混交林	山杨	3927.59±1108.16bc	138.25±39.01bc	100.55±28.37bc
	青海云杉	6354.10±2215.01b	223.66±77.97b	162.66±56.70b
	油松	476.34±278.90c	16.67±9.82c	12.19±7.14c
	总计	10758.02±3450.50AB	378.68±121.46AB	275.41±88.33AB
油松林	油松	5003.72±662.25bBC	176.13±23.31bBC	128.10±16.95bBC
灰榆林	灰榆	3040.94±299.00bcC	107.04±10.52bcC	77.85±7.65bcC
	平均值	8750.41±2974.15	308.01±104.69	224.01±76.14

注:表中同列不同小写字母表示不同植物在 P<0.05 水平上差异显著;不同大写字母表示不同类型林种在 P<0.05 水平上差异显著。

2.3 测试植物固碳释氧能力聚类分析

由图 1 可知,从单位叶面积固碳释氧能力角度,可将 4 种乔木分为 2 级,其中山杨、灰榆为 1 级,固碳释氧能力较强;青海云杉、油松为 2 级,固碳释氧能力较弱。3 种灌木可分为 2 级,枸杞为 1 级,固碳释氧能力较强;小檗、小叶忍冬为 2 级,固碳释氧能力较弱。3 种草本分为 3 级,披针叶黄华为 1 级,固碳释氧能力较强;冰草为 2 级,固碳释氧能力中等;苔草为 3 级,固碳释氧能力较弱。

由图 2 可知,从单位冠幅投影面积固碳释氧能力角度,可将 4 种乔木分为 3 级,其中山杨为 1 级,固碳释氧能力较强;青海云杉、灰榆为 2 级,固碳释氧能力中等;油松为 3 级,固碳释氧能力较弱。3 种灌木分为 3 级,其中

枸杞为 1 级,固碳释氧能力较强;小檗为 2 级,固碳释氧能力中等;小叶忍冬为 3 等,固碳释氧能力较弱。

由图 3 可知,从单株植物固碳释氧能力角度,可将 4 种乔木分为 2 级,其中青海云杉和山杨为 1 级,固碳释氧能力较强;油松和灰榆为 2 级,固碳释氧能力较弱。3 种灌木分为 2 级,小檗和枸杞为 1 级,固碳释氧能力较强;小叶忍冬为 2 级,固碳释氧能力较弱。2 种草本分为 2 级,披针叶黄华为 1 级,固碳释氧能力较强;冰草为 2 级,固碳释氧能力较弱。

由图 4 可知,从不同类型林分乔木单位林地面积固碳释氧能力角度,可将 4 种典型林分分为 2 级,其中青海云杉林和混交林为 1 级,固碳释氧能力较强;油松林和灰榆林为 2 级,固碳释氧能力较弱。

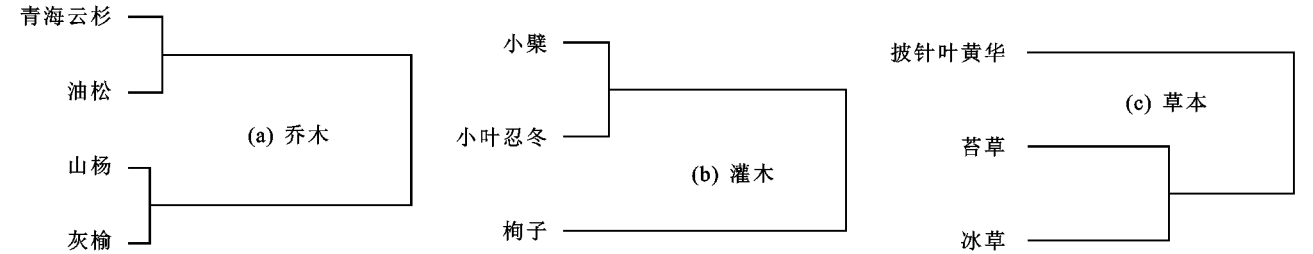


图 1 测试植物单位叶面积固碳释氧能力聚类分析

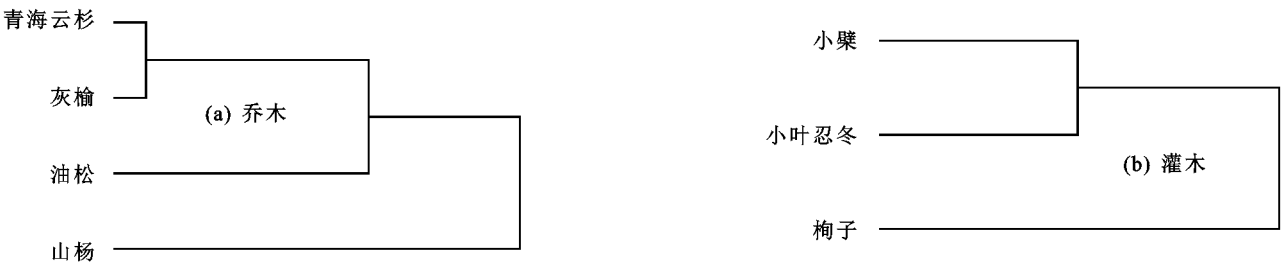


图 2 测试植物单位冠幅投影面积固碳释氧能力聚类分析

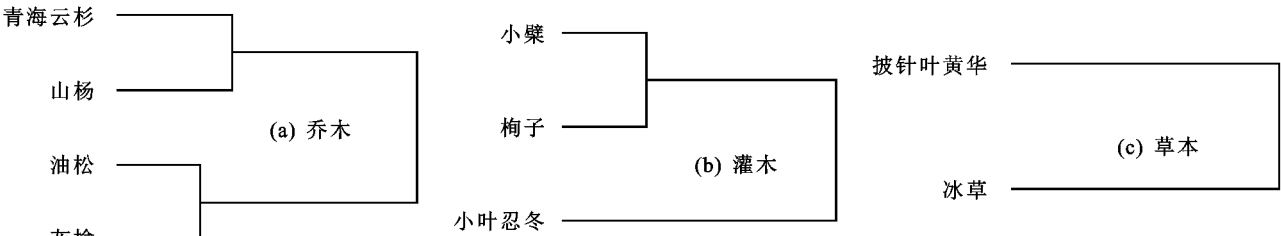


图 3 测试植物单株固碳释氧能力聚类分析

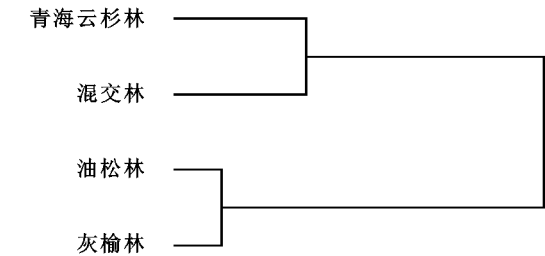


图 4 单位林地面积不同类型林分乔木固碳释氧能力聚类分析

2.4 植物固碳释氧能力与植物形态指标相关性分析

对测试植物的日固碳释氧量与植物形态指标进行相关性分析。由表 8 可知,测试植物的单位叶面积日固碳释氧量与株高、胸径、冠幅面积等指标均没有显著相关性;单位冠幅投影面积日固碳释氧量与叶面积指数呈显著正相关($P<0.05$);单株植物日固碳释氧量与株高和胸径呈显著正相关($P<0.05$),与叶面积指数呈极显著正相关($P<0.01$);单位林地面积日固碳释氧量与林分密度呈显著正相关($P<0.05$)。

表 8 植物固碳释氧能力与植物形态指标相关性分析

指标	株高	胸径	冠幅 面积	叶面积 指数	比叶 面积	林分 密度	单位叶面积 固碳释氧量	单位冠幅面积 固碳释氧量	单株植物 固碳释氧量	单位林地面积 固碳释氧量
株高	1.000	0.950 **	0.831 *	0.625	-0.843 *	0.669	-0.327	0.324	0.802 *	0.541
胸径	0.950 **	1.000	0.885 **	0.580	-0.841 *	0.363	-0.105	0.408	0.840 *	0.200
冠幅面积	0.831 *	0.885 **	1.000	0.239	-0.878 **	0.165	-0.303	0.041	0.570	-0.009
叶面积指数	0.625	0.580	0.239	1.000	-0.484	0.638	0.132	0.864 *	0.911 **	0.737
比叶面积	-0.843 *	-0.841 *	-0.878 **	-0.484	1.000	-0.613	0.219	-0.195	-0.701	-0.485
林分密度	0.669	0.363	0.165	0.638	-0.613	1.000	-0.809	-0.147	0.784	0.985 *
单位叶面积固碳释氧量	-0.327	-0.105	-0.303	0.132	0.219	-0.809	1.000	0.554	0.143	-0.699
单位冠幅面积固碳释氧量	0.324	0.408	0.041	0.864 *	-0.195	-0.147	0.554	1.000	0.800 *	0.005
单株植物固碳释氧量	0.802 *	0.840 *	0.570	0.911 **	-0.701	0.784	0.143	0.800 *	1.000	0.816
单位林地面积固碳释氧量	0.541	0.200	-0.009	0.737	-0.485	0.985 *	-0.699	0.005	0.816	1.000

注: ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

3 讨论

植物固碳释氧能力不仅和植物所处的外界环境有关,与植物自身生理特性也有很大关系。叶片是植物吸收固定物质、分配转化和碳水循环的主要器官,影响着植物生长、发育等生理过程^[19]。单株叶干重、单株叶面积和叶面积指数是植物生产力大小的重要指标。叶面积指数的大小还反映了植物叶片的疏密程度,数值越大说明单位冠幅投影面积的叶面积越大,与光照的接触面积越大^[20-21]。本研究中单株叶干重、单株叶面积和叶面积指数 3 个指标均以青海云杉

最高,且乔木大于灌木大于草本,说明青海云杉相比其他测试植物具有较高的生产力,且具有较高的光能利用率。比叶面积反映了植物截获光的能力和对强光的适应能力,往往与植物对不同生境适应特征有紧密的联系^[22]。本研究中,苔草的比叶面积最大,且草本的平均比叶面积大于灌木大于乔木,这可能是由于草本往往生长在林下或林缘等遮荫的环境中,不需要应对强光、强风等苛刻的自然环境,但是也因为遮荫而使可获得的光资源减少,从而发育薄且表面积大的叶片来增加获取光的能力,这与齐威等^[22]研究青藏

高原 4 科植物遮荫越大比叶面积越大的规律一致。相关研究^[23]表明,在郁闭林内进行的更新,落叶植物的比叶面积往往高于常绿植物,这是因为常绿植物降低了单位叶面积呼吸碳损失,通过延长叶片寿命增加光合碳收获,从而达到正碳平衡,这与本研究中山杨和灰榆比叶面积大于青海云杉和油松的结果一致。本研究中日均净光合速率最大的为披针叶黄华,最小的为苔草,从不同生活型来看表现为乔木>草本>灌木,而冯晶红等^[24]对三峡库区适生植物日均净光合速率的研究结果为草本>灌木>乔木,与本研究结果略有不同,可能是因为选择的植物和植物所处的生境不同造成的。

固碳释氧能力即植物同化 CO₂ 释放 O₂ 的能力^[24]。单位叶面积日固碳释氧量虽与株高、胸径等指标没有显著相关性,但是单位叶面积日固碳释氧量是由植物叶片净光合速率日变化计算而来,其大小与日均净光合速率有直接关系,所以测试植物单位叶面积固碳释氧量大小顺序与日均净光合速率一致,均为披针叶黄华最大,苔草最小,且乔灌木之间没有显著性差异。单位冠幅投影面积日固碳释氧量与叶面积指数呈显著正相关。本研究中,虽然乔灌木单位叶面积平均日固碳释氧量无显著性差异,但是乔木的叶面积指数却远高于灌木和草本,所以乔木单位冠幅投影面积日固碳释氧量要高于灌木和草本,这与刘雪莲等^[25]对昆明市绿化植物固碳释氧能力研究结果一致。单株植物日固碳释氧量体现了植物个体在固碳释氧能力的综合水平,其大小与株高、胸径、叶面积指数呈显著正相关。本研究中海云杉的株高、胸径和叶面积指数均处于较高水平,所以其固碳释氧能力显著大于其他植物。单位林地面积不同林分类型乔木日固碳释氧量能更好地从大尺度范围比较其固碳释氧能力,其大小与林分密度呈显著正相关。本研究中,单位林地面积日固碳释氧量由大到小顺序为青海云杉林>混交林>油松林>灰榆林,在贺兰山呈现随海拔的上升固碳释氧能力随之上升的规律。综合考虑植物胸径、株高、冠幅面积等指标的相互关系发现,胸径大的植物通常较高且冠幅面积较大,叶面积指数也较大,植物的固碳释氧能力较高。

4 结论

综上所述,不同植物不同尺度固碳释氧能力各不相同。虽然青海云杉单位叶面积日固碳释氧量较低,但其具有较高的单株叶面积和叶面积指数,所以在单位冠幅投影面积、单株、单位土地面积 3 个不同尺度上均有较高的固碳释氧能力。在今后贺兰山生态修复的过程中可以重点考虑青海云杉和山杨,再将小叶

忍冬和披针叶黄华等固碳释氧能力较强的灌木和草本与乔木进行合理配置,以更大程度上提高生态修复措施的生态效益。

参考文献:

[1] 王绍武.全球气候变暖的争议[J].科学通报,2010,55(16):1529-1531.

[2] 沈永平,王国亚.IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J].冰川冻土,2013,35(5):1068-1076.

[3] Chu X, Zhan J Y, Li Z H, et al. Assessment on forest carbon sequestration in the Three-North Shelterbelt Program region, China [J].Journal of Cleaner Production,2019,215:382-389.

[4] 张娇,施拥军,朱月清,等.浙北地区常见绿化树种光合固碳特征[J].生态学报,2013,33(6):1740-1750.

[5] Okimoto Y, Nose A, Oshima K, et al. A case study for an estimation of carbon fixation capacity in the mangrove plantation of *Rhizophora apiculata* trees in Trat, Thailand [J]. Forest Ecology and Management, 2013, 310:1016-1026.

[6] Zheng Y, Zhou J J, Zhou H, et al. Photosynthetic carbon fixation capacity of black locust in rapid response to plantation thinning on the semiarid loess plateau in China [J].Pakistan Journal of Botany,2019,51(4):1365-1374.

[7] Zheng Y, Zhao Z, Zhou J J, et al. The importance of slope aspect and stand age on the photosynthetic carbon fixation capacity of forest: A case study with black locust (*Robinia pseudoacacia*) plantations on the Loess Plateau [J]. Acta Physiologiae Plantarum,2010,33(2):419-429.

[8] 史红文,秦泉,廖建雄,等.武汉市 10 种优势园林植物固碳释氧能力研究[J].中南林业科技大学学报,2011,31(9):87-90.

[9] 邵永昌,庄家尧,王柏昌,等.上海地区主要绿化树种夏季光合特性和固碳释氧能力研究[J].安徽农业大学学报,2016,43(1):94-101.

[10] 郝鑫杰,李素英,王继伟,等.呼和浩特市 13 种绿化植物固碳释氧效率的比较研究[J].西北植物学报,2017,37(6):1196-1204.

[11] 季波,王继飞,何建龙,等.宁夏贺兰山自然保护区青海云杉林的有机碳储量[J].草业科学,2014,31(8):1445-1449.

[12] 季波,何建龙,李娜,等.宁夏贺兰山主要森林树种的含碳率分析[J].水土保持通报,2015,35(2):332-335.

[13] 穆天民.贺兰山区青海云杉森林群落的生物量[J].内蒙古林业科技,1982(1):34-45.

[14] 姜鹏,任佳佳,任仙,等.典型针阔混交林中山杨生物量和碳储量研究[J].西北林学院学报,2014,29(1):15-20,83.

[15] 刘斌,刘建军,任军辉,等.贺兰山天然油松林单株生物量回归模型的研究[J].西北林学院学报,2010,25(6):69-74.

(下转第 220 页)

- increase in local cooling effect of deforestation at higher latitudes [J]. *Nature*, 2011, 479(7373): 384-387.
- [10] Li Y, Zhao M S, Mildrexler D J, et al. Potential and actual impacts of deforestation and afforestation on land surface temperature [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(24): 14372-14386.
- [11] Ge J, Guo W D, Pitman A J, et al. The nonradiative effect dominates local surface temperature change caused by afforestation in China [J]. *Journal of Climate*, 2019, 32(14): 4445-4471.
- [12] Lü Y H, Zhang L W, Feng X M, et al. Recent ecological transitions in China: Greening, browning and influential factors [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 1-8.
- [13] Wang H H, Yue C, Mao Q Q, et al. Vegetation and species impacts on soil organic carbon sequestration following ecological restoration over the Loess Plateau, China [J]. *Geoderma*, 2020, 371: e114389.
- [14] 徐丽萍, 杨改河, 姜艳, 等. 黄土高原人工植被小气候生态效应研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(1): 163-167.
- [15] 薛亚永, 梁海斌, 张园, 等. 黄土高原地表温度变化的时空格局[J]. *地球与环境*, 2017, 45(5): 500-507.
- [16] Peng S S, Piao S, Zeng Z, et al. Afforestation in China cools local land surface temperature [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(8): 2915-2919.
- [17] Fang H Y, Li Q Y, Cai Q G. A study on the vegetation recovery and crop pattern adjustment on the Loess Plateau of China [J]. *African Journal of Microbiology Research*, 2011, 5(12): 1414-1419.
- [18] Schaaf C L B, Liu J, Gao F, et al. MODIS albedo and reflectance anisotropy products from Aqua and Terra [J]. *Land Remote Sensing and Global Environmental Change: NASA's Earth Observing System and the Science of ASTER and MODIS*, 2011, 11: 549-561.
- [19] Mu Q Z, Zhao M S, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(8): 1781-1800.
- [20] Zhao K G, Jackson R B. Biophysical forcings of land-use changes from potential forestry activities in North America [J]. *Ecological Monographs*, 2014, 84(2): 329-353.
- [21] Menon S, Akbari H, Mahanama S, et al. Radiative forcing and temperature response to changes in urban albedos and associated CO₂ offsets [J]. *Environmental Research Letters*, 2010, 5(1): e014005.
- [22] Shen W J, Li M S, Huang C Q, et al. Local land surface temperature change induced by afforestation based on satellite observations in Guangdong plantation forests in China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 276: e107641.
- [23] Zhou L M, Tian Y H, Roy S B, et al. Impacts of wind farms on land surface temperature [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(7): 539-543.
- [24] Perugini L, Caporaso L, Marconi S, et al. Biophysical effects on temperature and precipitation due to land cover change [J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(5): e53002.
- [25] 苟娇娇, 王飞, 金凯, 等. 黄土高原植被恢复引发区域气温下降[J]. *生态学报*, 2018, 38(11): 3970-3978.
- (上接第 213 页)
- [16] 梁咏亮. 贺兰山灰榆疏林单株生物量回归模型的研究[J]. *林业资源管理*, 2012(5): 98-104.
- [17] 仇瑶, 常顺利, 张毓涛, 等. 天山林区六种灌木生物量的建模及其器官分配的适应性[J]. *生态学报*, 2015, 35(23): 7842-7851.
- [18] 赵文瑞, 刘鑫, 张金池, 等. 南京城郊典型树种光合蒸腾、固碳释氧及降温增湿能力[J]. *林业科学*, 2016, 52(9): 31-38.
- [19] 薛雪, 李娟娟, 郑云峰, 等. 5 个常绿园林树种的夏季光合蒸腾特性[J]. *林业科学*, 2015, 51(9): 150-156.
- [20] 李梦. 木兰科几种常用绿化树种光合特性及固碳能力研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014.
- [21] 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.
- [22] 齐威, 郭淑青, 崔现亮, 等. 青藏高原东部 4 科植物种子大小和比叶面积随海拔和生境的变异[J]. *草业学报*, 2012, 21(6): 42-50.
- [23] 胡耀升, 么旭阳, 刘艳红. 长白山森林不同演替阶段比叶面积及其影响因子[J]. *生态学报*, 2015, 35(5): 1480-1487.
- [24] 冯晶红, 刘德富, 吴耕华, 等. 三峡库区消落带适生植物固碳释氧能力研究[J]. *水生态学杂志*, 2020, 41(1): 1-8.
- [25] 刘雪莲, 何云玲, 张淑洁, 等. 昆明市常见绿化植物冬季固碳释氧能力研究[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(8): 1327-1335.