

丰林国家级自然保护区不同海拔红松光合特性分析

韩丽冬^{1,2*}, 沃晓棠^{1,2}, 刘延坤^{1,2#}, 邵英男^{1,2}, 刘玉龙^{1,2}

¹黑龙江省森林工程与环境研究所森林生态与林业生态工程重点实验室, 黑龙江 哈尔滨

²黑龙江牡丹江森林生态系统国家定位观测研究站, 黑龙江 牡丹江

Email: #liuyankun1979@163.com

收稿日期: 2021年4月26日; 录用日期: 2021年5月18日; 发布日期: 2021年5月27日

摘要

为了揭示不同海拔对红松光合作用的影响规律, 在黑龙江省丰林国家级自然保护区内, 选择不同海拔样地(低海拔、高海拔), 采用光合分析仪(li-6400)进行光合基本参数和光响应曲线(6~9月)测定。结果表明: 6~9月份生长季内, 高海拔样地红松净光合速率、最大净光合速率均高于低海拔样地, 差异不显著; 光补偿点和光饱和点随着海拔的高度的增加而升高; 在AQY无明显变化情况下, 除6月份外, 高海拔红松Rd均低于低海拔红松。海拔高度的变化对红松光合特性有明显的影响。高海拔红松的光合能力优于低海拔红松。

关键词

红松, 海拔, 光合特性

Analysis of Physiological Characteristics of *Pinus koraiensis* at Different Elevations in Fenglin National Nature Reserve

Lidong Han^{1,2*}, Xiaotang Wo^{1,2}, Yankun Liu^{1,2#}, Yingnan Shao^{1,2}, Yulong Liu^{1,2}

¹Key Laboratory of Forest Ecology and Forestry Ecological Engineering, Institute of Forest Engineering and Environment, Heilongjiang Province, Harbin Heilongjiang

²National Positioning Observation Station of Mudanjiang Forest Ecosystem in Heilongjiang Province, Mudanjiang Heilongjiang

Email: #liuyankun1979@163.com

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 韩丽冬, 沃晓棠, 刘延坤, 邵英男, 刘玉龙. 丰林国家级自然保护区不同海拔红松光合特性分析[J]. 植物学研究, 2021, 10(3): 379-387. DOI: 10.12677/br.2021.103051

Abstract

In order to reveal the effects of different elevations on photosynthesis of *Pinus koraiensis*, we selected samples at different elevations (low elevation and high elevation) in Fenglin National Nature Reserve of Heilongjiang Province, and used a photosynthesis analyzer (LI-6400) to measure the basic photosynthetic parameters and light response curves (from June to September). The results showed that during the growing season from June to September, the net photosynthetic rate and the maximum net photosynthetic rate of *Pinus koraiensis* at high altitude were higher than those at low altitude, and the differences were not significant. The light compensation point and light saturation point increased with the increase of altitude. In the case of no significant change in AQY, RD of *Pinus koraiensis* at high elevation was lower than that at low elevation except in June. The change of altitude had obvious effect on the photosynthetic characteristics of *Pinus koraiensis*. The photosynthetic capacity of *Pinus koraiensis* at high elevation is better than that at low elevation.

Keywords

Pinus koraiensis, Elevations, Photosynthetic Characteristics

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

光合作用是植物生长发育的基础,是植物光合生产力的重要衡量指标[1] [2]。不同植物有不同的光适应特性,植物的光合特性除了受植物内在生理因素决定外,也与光、热、水等外界环境因子密切相关[3] [4] [5]。研究植物光合特性是分析环境因子影响植物生长与发育的重要手段[6]。

光合作用可以反映植物对环境的适应性,而海拔梯度可以反映出环境因子的综合变化,随着海拔梯度的变化,光照、温度、水分、土壤等环境因子均呈现出规律性的变化[7],温度、大气压以及二氧化碳浓度等随着海拔的升高而降低,光强、紫外线辐射随海拔的升高而增加[8]。海拔的变化对环境因子影响显著进而影响植物光合特性。龚荣高等[9]研究发现,随着海拔的升高,青脆李最大净光合速率、暗呼吸速率和光补偿点均出现了先增后降的变化。井锐锐等[10]研究了4个海拔区域柠檬光合特性,结果为800 m > 1110 m > 420 m > 300 m,即这4个区域中,最适宜种植尤力克柠檬的海拔为800~1110 m。有学者认为高海拔地区的强光环境有利于植物净光合速率的增加[11] [12],而部分学者持相反观点,认为随着海拔梯度的上升,环境条件会逐渐变得恶劣,高海拔地区的低温、强光、低气压等不利条件限制了植物的生长发育,进而影响植物的光合作用[13] [14]。这是由于高海拔的低温环境使植物叶片气体交换的能力降低,导致光合能力下降[15]。由此可见,海拔高度的变化对植物光合特性有显著的影响。因此,研究不同海拔地区植物的光合参数及光响应曲线特征参数,比较其光合特性,对探究不同生态环境下植物的生态适应性具有重要意义。

红松(*Pinus koraiensis*)在维系东北森林生态系统稳定方面起到重要作用,是我国温带地带性顶极群落

小兴安岭阔叶红松林的优势树种[16] [17]。本研究以黑龙江省丰林国家级自然保护区红松为研究对象,对不同海拔(低海拔、高海拔)样地红松的光合参数及光响应曲线进行测定分析,从光合特性角度探究红松对不同海拔的适应性差异,揭示不同海拔高度对红松光合特性的影响,以期为东北地区红松的经营管理提供科学参考。

2. 材料与方法

2.1. 试验地概况

试验在黑龙江省丰林国家级自然保护区(E128°58'~129°15', N48°02'~48°12')进行,保护区总面积18,165.4 hm²,其中核心区总面积4165 hm²,缓冲区总面积3812 hm²,试验区总面积10,188.4 hm²,研究区内气候富有大陆性及季风气候相结合的特点,年平均气温为-0.5℃,年平均降水量640.5 mm,空气相对湿度为73%,生长期约100~110天。土壤主要是发育在阔叶红松林下的地带性土壤-暗棕色森林土,通常土层较厚,透水性良好,肥力较高。该区域属长白山植物区系小兴安岭亚区,地带性植被为温带针阔叶混交林,是中国目前保存最完整、最典型的原始红松林保护区。本研究选取不同海拔高度的试验地,分别为低海拔样地和高海拔样地,样地概况见表1。在每个海拔类型内设置3个重复样地,面积为20 m × 30 m,在每个重复样地内随机选取植株健康,长势基本一致的红松3株。

Table 1. Summary of sample plot

表 1. 样地概况

海拔	海拔高度/m	坡向	经度	纬度
低海拔	360	南	129°12'23.50"	48°06'56.11"
高海拔	547	南	129°04'39.13"	48°07'30.07"

2.2. 研究方法

2.2.1. 光合参数的测定

于2018年6~9月每月中旬选择晴朗无云的上午(8:00~11:30)采用美国lico公司生产的li-6400光合仪进行光合参数的测定,由于无法进行高位活体测量,为保持测量的一致性,所有叶片均进行离体测定,每株测定3束红松,取平均值。测定时,设定叶温为25℃,CO₂浓度为400 μmol/mol,湿度为60%,光辐射强度为1500 μmol·m⁻²·s⁻¹。测定净光合速率(P_n , μmol·m⁻²·s⁻¹);气孔导度(G_s , mol·m⁻²·s⁻¹);蒸腾速率(T_r , mmol·m⁻²·s⁻¹);胞间CO₂浓度(C_i , μmol/mol⁻¹)。水分利用效率(WUE) = P_n/T_r 。

2.2.2. 光响应曲线的测定

使用li-6400光合仪的LED光源,从高到低设置梯度为2000 μmol·m⁻²·s⁻¹、1800 μmol·m⁻²·s⁻¹、1500 μmol·m⁻²·s⁻¹、1200 μmol·m⁻²·s⁻¹、1000 μmol·m⁻²·s⁻¹、800 μmol·m⁻²·s⁻¹、600 μmol·m⁻²·s⁻¹、400 μmol·m⁻²·s⁻¹、200 μmol·m⁻²·s⁻¹、150 μmol·m⁻²·s⁻¹、100 μmol·m⁻²·s⁻¹、50 μmol·m⁻²·s⁻¹、25 μmol·m⁻²·s⁻¹和0 μmol·m⁻²·s⁻¹,设定测量室温度为25℃,CO₂浓度为400 μmol/mol,流速为500 μmol/s。记录净光合速率(P_n)。

2.2.3. 数据分析

采用Excel 2019和SPSS 20.0软件对数据分析。本研究光响应曲线使用直角双曲线修正模型计算[18] [19]。

$$\text{净光合速率 } (p_n) = \alpha \frac{1 - \beta I}{1 + \gamma I} I - R_d \quad (1)$$

(1)式中, P_n 为净光合速率; I 为光强; α 为 $I = 0$ 时光响应曲线的初始斜率即初始量子效率; β 为修正系数; $\gamma = \alpha/P_{nmax}$, P_{nmax} 为最大净光合速率。根据公式可以得出相应的表观量子效率(AQY)、暗呼吸速率(R_d)、最大净光合速率(P_{nmax})、光饱和点(LSP)、光补偿点(LCP)等指标[20] [21] [22]。

3. 结果与分析

3.1. 光合参数差异性比较

3.1.1. 不同海拔红松光合参数差异性比较

不同海拔红松光合参数指标见图 1。低海拔和高海拔样地红松的 P_n 在 6~9 月份均呈先上升后下降趋势。高海拔红松 P_n 在 6~9 月份分别高于低海拔红松 4.80%、2.99%、5.33%、4.46%，差异均不显著；在 6~9 月份低海拔样地 C_i 浓度分别高于高海拔样地 5.63%、8.26%、46.43%、30.20%。8、9 月份差异显著；低海拔和高海拔样地红松的 T_r 在 6~9 月份均呈现出先上升后下降的趋势，7 月份两者差异显著，低海拔样地高于高海拔 97.03%，6、8、9 月份高海拔样地高于低海拔，差异不显著；低海拔和高海拔样地红松的 G_s 在 6~9 月份均呈现先上升后下降的趋势，差异均不显著；低海拔和高海拔样地红松的 WUE 7 月份差异极显著，高海拔高于低海拔 90.85%，6、8、9 月份低海拔略高于高海拔，差异不显著。

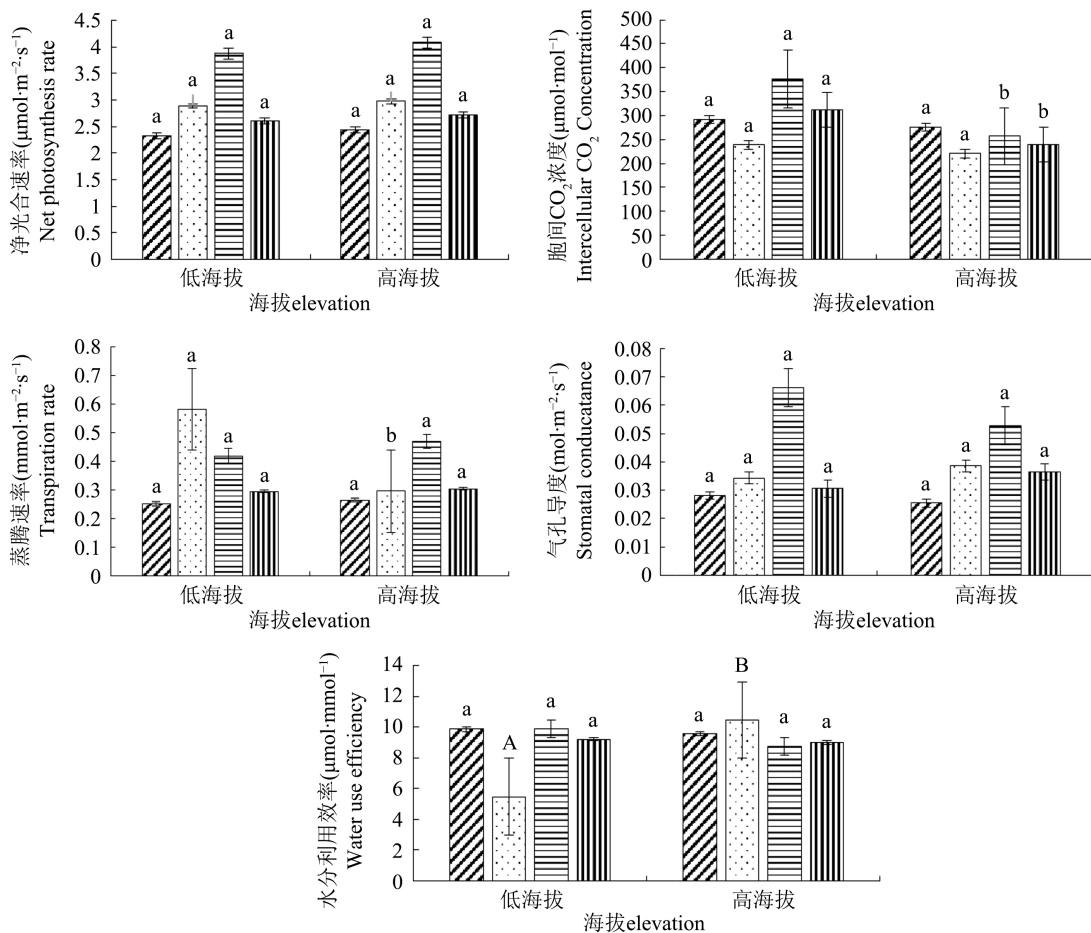


Figure 1. Comparison of photosynthetic parameters of *Pinus koraiensis* at different elevations. Notes: Uppercase letters in the data label indicate differences at the 0.01 level, and lowercase letters indicate differences at the 0.05 level

图 1. 不同海拔红松光合参数比较。注：不同大写字母表示在 0.01 水平上的差异，不同小写字母表示在 0.05 水平上的差异

对不同海拔、不同月份红松的光合参数进行方差分析, 方差结果见表 2, 不同海拔红松 C_i 差异极显著, P_n 、 T_r 、 G_s 、 WUE 均无显著差异; 不同月份红松 P_n 、 C_i 、 T_r 、 G_s 均表现出极显著差异, 季节变化对红松光合参数的影响显著。

Table 2. Analysis of variance of photosynthetic parameters of *Pinus koraiensis* at different elevations
表 2. 不同海拔红松光合生理指标方差分析

来源	光合参数	平方和	df	均方	F	显著性
不同海拔	P_n	0.186	1	0.186	0.452	0.505
	C_i	9811.00	1	9811.00	9.629**	0.00
	T_r	0.03	1	0.03	1.553	0.22
	G_s	0	1	0	0.071	0.791
	WUE	6.684	1	6.684	1.291	0.263
月份	P_n	14.69	3	4.897	127.744**	0
	C_i	38,504.01	3	12,834.67	6.968**	0.00
	T_r	0.27	3	0.09	7.173**	0.00
	G_s	0.05	3	0.00	11.37**	0.00
	WUE	17.287	3	5.762	1.115	0.356

注: **在 0.01 水平(双侧)上差异显著, *在 0.05 水平(双侧)上差异显著。

3.1.2. 光合参数相关性分析

低海拔和高海拔红松的光合参数的相互关系见表 3。结果表明, P_n 与 T_r 、 G_s 呈极显著的正相关, C_i 与 T_r 显著负相关, T_r 与 G_s 显著正相关, 与 WUE 呈极显著负相关。

Table 3. Correlation analysis of photosynthetic parameters of *Pinus koraiensis*
表 3. 红松光合参数相关性分析

指标	P_n	C_i	T_r	G_s	WUE
P_n	1	-0.151	0.492**	0.654**	-0.009
C_i		1	-0.371*	-0.130	-0.059
T_r			1	0.345*	-0.567**
G_s				1	-0.181
WUE					1

注: **在 0.01 水平(双侧)上显著相关, *在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

3.2. 光响应曲线及特征参数差异性比较

3.2.1. 叶子飘模型光强响应拟合效果

光响应曲线反映了植物光合速率随光强改变而变化的规律, 对植物光合速率进行客观呈现。采用叶子飘模型对不同海拔红松净光合速率与光照强度之间的关系规律进行拟合, 拟合优度大于 0.98, 结果如图 2 所示。不同海拔红松 6~9 月的光响应曲线变化趋势一致, 净光合速率随着光强的增加逐渐增加, 最后趋于平缓。高海拔红松的净光合速率在 6~9 月略高于低海拔, 差异不显著。

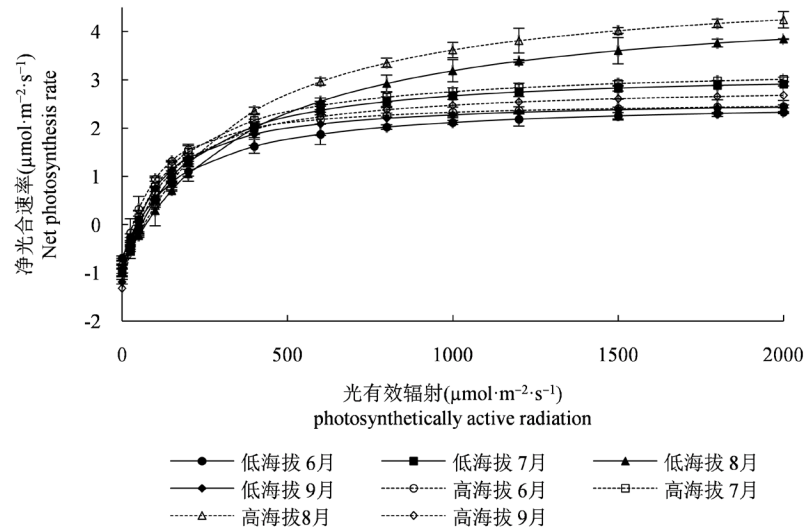


Figure 2. Light response curve fitting effect of *Pinus koraiensis*
图 2. 红松光响应曲线拟合效果

3.2.2. 不同海拔红松光响应曲线特征参数差异性比较

不同海拔红松光响应曲线特征参数差异见表 4。低海拔和高海拔样地 P_{nmax} 总体上呈先上升后下降的季节动态,在 8 月份达到最大值。6~9 月份高海拔样地红松 P_{nmax} 分别高于低海拔样地 4.06%、4.14%、6.32%、11.07%, 差异显著; 低海拔和高海拔样地 LSP 在 6~9 月份呈先上升后下降的季节动态, 高海拔样地 LSP 分别高于低海拔样地 2.97%、0.35%、4.81%、0.29%, 不同海拔间无显著差异; 低海拔与高海拔样地 LCP 在 6~9 月份呈先上升后下降的季节动态, 不同海拔间无显著差异; 低海拔与高海拔样地暗呼吸速率总体上呈上升的季节动态, 高海拔样地暗呼吸速率在 6 月份高于低海拔样地 2.11%, 且差异显著, 在 8 月份高于低海拔样地 19.57%, 差异极显著; 表观量子效率总体上没有明显的季节动态, 高海拔样地红松表观量子效率在 6 月份和 8 月份高于低海拔样地, 且差异显著。

对不同海拔, 不同月份红松的光响应特征参数进行方差分析, 结果见表 5。不同海拔红松间 R_d 差异显著, P_{nmax} 、 LSP 、 LCP 、 AQE 差异均不显著; 不同月份红松的 P_{nmax} 、 LCP 、 LSP 、 AQE 、 R_d 均差异极显著, 说明季节变化对红松光合作用影响显著。

Table 4. Characteristic parameters of light response curve of *Pinus koraiensis* on different elevations
表 4. 不同海拔红松光响应曲线特征参数

样地	月份	P_{nmax}	LSP	LCP	R_d	AQE
低海拔	6	3.28 ± 0.14a	1198.22 ± 12.16a	44.54 ± 2.48a	0.79 ± 0.09a	0.02 ± 0.00a
高海拔		3.41 ± 0.10b	1233.56 ± 16.86a	42.07 ± 1.46a	0.81 ± 0.07b	0.03 ± 0.00b
低海拔	7	4.06 ± 0.12a	1278.93 ± 32.91a	57.45 ± 3.54a	0.98 ± 0.09a	0.02 ± 0.00a
高海拔		4.23 ± 0.10b	1282.44 ± 22.26a	50.62 ± 7.43a	1.00 ± 0.07a	0.03 ± 0.00a
低海拔	8	5.63 ± 0.11a	1412.73 ± 47.02a	70.14 ± 5.50a	0.86 ± 0.01a	0.01 ± 0.00a
高海拔		5.98 ± 0.09b	1480.72 ± 22.59a	61.81 ± 1.78a	1.03 ± 0.07b	0.02 ± 0.00b
低海拔	9	3.80 ± 0.08a	1327.48 ± 29.43a	43.48 ± 1.44a	1.20 ± 0.10a	0.04 ± 0.01a
高海拔		4.22 ± 0.09b	1331.33 ± 50.79a	43.07 ± 1.34a	1.34 ± 0.02a	0.05 ± 0.00a

注: 大写字母表示在 0.01 水平上的差异, 小写字母表示在 0.05 水平上的差异。

Table 5. Variance analysis of characteristic parameters of light response curve of *Pinus koraiensis* on different elevations
表 5. 不同海拔红松光响应曲线特征参数方差分析

来源	特征参数	平方和	df	均方	F	显著性
不同海拔	P_{max}	0.807	1	0.807	0.954	0.339
	LCP	0.15	1	0.150	0.001	0.97
	LSP	3814.63	1	3814.626	0.32	0.58
	AQE	0.00	1	0.000	2.552	0.12
	R_d	0.2	1	0.200	5.217*	0.03
月份	P_{max}	18.357	3	6.119	114.189**	0.00
	LCP	1842.97	3	614.323	25.082**	0.00
	LSP	229353.90	3	76,451.310	41.731**	0.00
	AQE	0.00	3	0.001	28.328**	0.00
	R_d	0.71	3	0.235	14.023**	0.00

注: **在 0.01 水平(双侧)上差异显著, *在 0.05 水平(双侧)上差异显著。

3.2.3. 光响应曲线特征参数间的相关性分析

红松光响应曲线特征参数之间的相关性分析见表 6。结果表明, P_{max} 与 LSP 及 LCP 均呈极显著正相关; LCP 和 LSP 呈极显著正相关, 与 AQE 呈极显著负相关; AQE 和 R_d 呈极显著正相关。

Table 6. Correlation analysis between various characteristic parameters of photosynthetic capacity
表 6. 光响应曲线特征参数间的相关性分析

指标	P_{max}	LSP	LCP	R_d	AQE
P_{max}	1	0.840**	0.786**	0.153	-0.356
LSP		1	0.566**	0.083	-0.231
LCP			1	0.283	-0.526**
R_d				1	0.587**
AQE					1

注: **在 0.01 水平(双侧)上显著相关, *在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

4. 结论与讨论

海拔高度的变化对红松光合特性有明显的影响。高海拔红松的光合能力及环境适应能力优于低海拔红松。主要体现在以下几方面:

净光合速率直接反应植物光合作用的强弱, 最大净光合速率较高的植物, 能积累更多的有机物, 植物生长更快[23]。6~9 月份高海拔红松的净光合速率和最大净光合速率均高于低海拔红松, 说明高海拔红松具有更强的光合能力, 这可能是由于随着海拔的升高, 光照强度增强, 使叶片能吸收到更多的光能[11][12]。

光饱和点高的植物能较好地利用全天且在强光下不易发生光抑制现象。本研究光补偿点和光饱和点随着海拔的高度的增加而升高, 说明高海拔红松能更好地利用强光进行光合作用。

植物叶片表观量子效率 AQY , 反映了植物在弱光阶段对光能的转化利用效率, 值越大表明植物叶片

利用弱光的能力越强[24], R_d 也与植物的耐弱光性相关, R_d 较高说明暗呼吸速率较大, 有机物代谢效率较低, 不利于有机物的积累。在 AQY 无明显变化情况下, 除 6 月份外, 高海拔红松 R_d 均低于低海拔红松, 表明高海拔红松通过降低暗呼吸作用来间接提高光合性能。

基金项目

国家自然科学基金面上项目(41275154); 黑龙江省森林工业总局科技计划(sgzjQ2015006; sgzjY2018001); 黑龙江省财政自拟课题(2015-02SCZ); 黑龙江省自然科学基金资助项目(LH2020C104)。

参考文献

- [1] Niinemets, Ü. (2001) Global-Scale Climatic Controls of Leaf Dry Mass Per Area, Density, and Thickness in Trees and Shrubs. *Ecology*, **82**, 453-469. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2001\)082\[0453:GSCCOL\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2001)082[0453:GSCCOL]2.0.CO;2)
- [2] 刘红明, 龙春瑞, 李进学, 付小猛, 周东果, 高俊燕, 等. 3 个柠檬品种在云南干热河谷区的光合特性及结果性能分析[J]. 果树学报, 2017, 34(1): 59-68.
- [3] 吴飞洋, 柳新红, 董峰平, 董海日, 叶明, 李因刚. 光照和土壤对乌柏秋季叶片色素及可溶性糖的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2019, 39(6): 41-48.
- [4] 王佳佳, 张明如, 高磊, 金迪, 何云核. 遮荫和氮素添加对芒果光合特性与抗氧化酶活性的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2019, 39(6): 24-32.
- [5] 杜流姗, 陆琦, 梁紫嫣, 类延宝. 贡嘎山海螺沟冰川退缩区原生演替不同阶段优势植物光合生理特征[J]. 生态环境学报, 2019, 28(12): 2356-2363.
- [6] 苏春江, 刘俊, 何锦峰. 海拔高度对大马士革玫瑰叶叶绿素含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(9): 3945-3946.
- [7] 王菲, 李琬婷, 程小毛, 黄晓霞. 急尖长苞冷杉叶光合特性及营养元素对海拔的响应[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2021, 41(1): 55-61.
- [8] 尹鹏, 黄娇, 廖金花, 胡霞. 峨眉山不同海拔迎阳报春花的生理特性[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2019, 40(6): 550-555.
- [9] 龚荣高, 丁建林, 张光伦. 不同海拔高度对青脆李生理辐射光谱、光合特性及果实品质的影响[J]. 四川农业大学学报, 2010, 28(4): 454-458.
- [10] 井锐锐, 张赛赛, 张子豪, 李文祥. 不同海拔区域尤力克柠檬光合特性的比较研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2018, 33(6): 1016-1023.
- [11] 叶宏达, 达布希拉图, 沙本才, 王文祥, 刘佳, 叶怡然, 等. 海拔梯度对马铃薯光合特性和荧光特性的影响[J]. 作物杂志, 2017(5): 93-99.
- [12] 金高明. 黄土高原不同海拔高度的富士苹果光合特性及生理效应的比较研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 甘肃农业大学, 2015.
- [13] 李惠梅, 师生波. 不同海拔麻花苜蓿植物光合特性的比较[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(11): 4799-4804.
- [14] 胡启鹏, 郭志华, 孙玲玲, 王彬. 长白山林线树种岳桦幼树叶功能型性状随海拔梯度的变化[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3594-3601.
- [15] 李永霞, 索郎拉措, 杨小林. 急尖长苞冷杉叶片结构和光合特性对海拔高度的响应[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2018, 57(4): 503-509.
- [16] 刘敏, 毛子军, 厉悦, 孙涛, 李兴欢, 黄唯, 等. 不同纬度阔叶红松林红松径向生长对气候因子的响应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1341-1352.
- [17] 王玲. 长白山阔叶红松林群落树种关联及演替特征的研究[D]: [硕士学位论文]. 吉林: 北华大学, 2017.
- [18] 叶子飘, 高峻. 光响应和 CO₂ 响应新模型在丹参中的应用[J]. 西北农林科技大学学报, 2009, 37(1): 129-134.
- [19] Ye, Z.P. (2007) A New Model for Relationship between Light Intensity and the Rate of Photosynthesis in *Oryza sativa*. *Photosynthetic*, **45**, 637-640. <https://doi.org/10.1007/s11099-007-0110-5>
- [20] Wang, X., Lewis, J.D., Tissue, D.T., Seemann, J.R. and Griffin, K.L. (2001) Effects of Elevated Atmospheric CO₂ Concentration on Leaf Dark Respiration of *Xanthium strumarium* in Light and in Darkness. *Proceedings of the Nation-*

al Academy of Sciences of the United States of America, **98**, 2479-2484. <https://doi.org/10.1073/pnas.051622998>

- [21] 叶子飘, 康华靖, 陶月良, 于强. 以“光合助手”计算光合参数的一些问题[J]. 植物生理学通讯, 2010, 46(1): 67-70.
- [22] 倪妍妍, 常二梅, 刘建峰, 江泽平. 不同树龄侧柏接穗光合生理的比较研究[J]. 西北林学院报, 2017, 32(1): 19-24.
- [23] 杨兴洪, 邹琦, 赵世杰. 遮荫和全光下生长的棉花光合作用和叶绿素荧光特征[J]. 植物生态学报, 2005, 29(1): 8-15.
- [24] Chen, Z.Y., Peng, Z.S., Yang, J., Chen, W.Y. and Ou-Yang, Z.M. (2011) A Mathematical Model for Describing Light-Response Curves in *Nicotiana tabacum* L. *Photosynthetica*, **49**, Article No. 467. <https://doi.org/10.1007/s11099-011-0056-5>