

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第6期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.06.014

论文标题： 基于机器学习的防护林树种光合调控与碳汇能力评估框架

作　　者： 韩淑敏，星 星，张 瑞，等

收稿日期： 2025-05-09

引文格式： 韩淑敏,星星,张瑞,等.基于机器学习的防护林树种光合调控与碳汇能力评估框架[J].中南林业科技大学学报,2026,46(6):140-152.

HAN S M, XING X, ZHANG R, et al. A machine learning-based framework for evaluating photosynthetic regulation and carbon sequestration capacity among shelter forest species[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(6):140-152.

相关论文推荐

Recommended articles

森林固碳计量方法研究综述

A review of measurement methods of forest carbon sequestration

基于系统动力学模型的广西典型森林固碳能力多情景模拟

Multi-scenario simulation of carbon sequestration capacity of typical forests in Guangxi based on system dynamics modeling

长沙地区19种园林植物光合特性及固碳释氧测定

Studies on photosynthetic characteristics and carbon fixation and oxygen release capabilities of 19 garden plants in Changsha area

10种蔷薇科绿化植物固碳释氧特性及叶片气孔微形态分析

Analysis of carbon fixation, oxygen release characteristics and leaf stomatal micromorphology of 10 Rosaceae greening plants

北京地区常见果树的光合速率和固碳释氧效应

Photosynthetic rate and effects of carbon fixation and oxygen release of common fruit trees in Beijing City

基于单木模型对温州常见城市绿化树种固碳增湿能力的比较

Comparison of carbon fixation and humidification capabilities of the main greening tree species in Wenzhou

第 46 卷 第 6 期
2026 年 6 月
中南林业科技大学学报
Journal of Central South University of Forestry & Technology
Vol. 46 No. 6
Jun. 2026
Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.06.014
http: //qks.csuft.edu.cn

基于机器学习的防护林树种光合调控与碳汇能力评估框架

韩淑敏[1]，星　星[2]，张　瑞[3]，冀鹏浩[1, 4]，高润红[1]，姚　瑶[3]，吕整荣[3]，杨俊玲[3]，
李　峰[5]，宋景良[6]

（1. 内蒙古农业大学 林学院，内蒙古 呼和浩特 010018；2. 内蒙古自治区妇女事业发展服务中心，内蒙古 呼和浩特 010051；3. 包头市林业和草原工作站，内蒙古 包头 014030；4. 内蒙古农业大学 理学院，内蒙古 呼和浩特 010018；5. 土默特左旗林业和草原局野生动植物保护中心，内蒙古 呼和浩特 010100；6. 内蒙古赤峰市巴林右旗罕山林场，内蒙古 赤峰 025164）

摘　要：【目的】内蒙古阴山山脉作为“三北”防护林体系的典型代表，如何提升其生态系统的固碳功能已成为关键问题。本研究通过测定阴山山脉中段乔木与灌木的光合相关参数，旨在探讨其光合作用及水分利用效率的日变化特征，分析环境因子对光合调控的影响，结合随机森林回归模型与聚类分析，全面评估树种的生态适应性与固碳功能，旨在为防护林体系的生态功能提升提供科学依据。【方法】选取阴山中段 7 种乔木和 5 种灌木，采用 CI-340 便携式光合仪测定其光合参数，结合斯皮尔曼相关性分析、主成分分析、随机森林回归模型与层次聚类分析，系统研究树种光合作用机制及其生态适应性差异。【结果】内蒙古阴山中段 12 种典型木本植物的光合 - 水分生理策略存在显著功能群分化。研究发现，乔木与灌木的净光合速率日变化呈单峰与双峰两种模式，其中蒙古扁桃等物种兼具高水分利用效率与强固碳能力，凸显其独特的“双优”适应机制。随机森林回归分析结果进一步揭示温度是驱动光合日变化的关键非线性因子，凸显了半干旱地区植物对高温胁迫的响应特征。层次聚类分析结果表明，白桦、辽东栎和蒙古扁桃属高固碳功能群，而针叶树种则采取保守型水分利用策略。本研究从生理机制与功能群视角为阴山山脉生态修复及高效固碳树种选择提供了理论基础与科学依据。【结论】本研究系统评估了内蒙古阴山中段主要树种的生理生态功能，并得出以下结论：首先，明确了乔木与灌木在光合及水分利用策略上存在显著差异，并揭示了温度、气孔导度与蒸腾速率在光合调控中的关键作用；其次，通过对比证实，随机森林回归模型在捕捉环境因子与光合速率的复杂非线性关系上优于传统线性方法；最后，层次聚类分析阐明了各树种在固碳能力与生态适应性上的分化类型，为差异化恢复策略提供了直接依据。

关键词：内蒙古阴山中段；净光合效率；随机森林；固碳释氧；层次聚类分析
中图分类号：S718.56　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)06-0140-13

A machine learning-based framework for evaluating photosynthetic regulation and carbon sequestration capacity among shelter forest species

HAN Shumin[1], XING Xing[2], ZHANG Rui[3], JI Penghao[1,4], GAO Runhong[1], YAO Yao[3], LYU Zhengrong[3], YANG Junling[3], LI Feng[5], SONG Jingliang[6]

(1. College Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Women's Career Development Service Center, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China; 3. Baotou Forestry and Grassland Work Station, Baotou 014030, Inner Mongolia, China; 4. College of Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 5. Wild animal and plant protection center, Tumt Left Banner Municipal Bureau of Forestry and Grassland, Hohhot 010100, Inner Mongolia, China; 6. Han Mountain Forest Farm, Balin Right Banner, Chifeng City, Inner Mongolia, Chifeng 025164, Inner Mongolia, China)

Abstract:【Objective】The middle section of the Yinshan mountains in Inner Mongolia, as a representative area of the Three-North

收稿日期（Received）：2025-05-09　　**修订日期**（Revised）：2025-08-29
基金项目：国家自然科学基金地区科学基金项目（32360249）；内蒙古自治区高校青年教师科研创新能力支持项目（BR230161）；包头市森林草原湿地碳汇监测项目（RH2200000501）。
第一作者：韩淑敏（hsm9746@163.com），博士研究生。
通信作者：冀鹏浩（phji@imau.edu.cn），博士，讲师；高润红（grhzwdm@163.com），教授，博士研究生导师。
引文格式：韩淑敏 , 星星 , 张瑞 , 等 . 基于机器学习的防护林树种光合调控与碳汇能力评估框架 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026, 46(6):140-152.
HAN S M, XING X, ZHANG R, et al. A machine learning-based framework for evaluating photosynthetic regulation and carbon sequestration capacity among shelter forest species[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(6):140-152.

Shelter Forest Program, faces critical challenges in enhancing ecosystem carbon sequestration functions. This study aims to investigate the diurnal variation characteristics of photosynthesis and water use efficiency (WUE) in arbor and shrub species in the Middle Section of the Yinshan Mountains, analyze the influence of environmental factors on photosynthetic regulation, and comprehensively evaluate the ecological adaptability and carbon sequestration functions of different tree species. For the first time, a combination of random forest regression models and cluster analysis is applied to provide scientific insights for improving shelter forest ecosystem functions. 【Method】Seven arbor species and five shrub species were selected in the middle section of the Yinshan mountains, Inner Mongolia. Photosynthetic parameters were measured using a CI-340 portable photosynthesis system. Spearman's correlation analysis, principal component analysis (PCA), random forest regression modeling, and hierarchical cluster analysis were employed to explore the photosynthetic mechanisms and ecological adaptability of the species.【Result】The study revealed distinct diurnal variation patterns in photosynthetic activity among arbor and shrub species. Net photosynthetic rate (P_n) and WUE exhibited significant interspecific differences, with single-peak and double-peak patterns observed. Temperature, stomatal conductance, and transpiration rate were identified as key regulators of photosynthesis, particularly in coniferous species, which demonstrated higher WUE. Random forest regression analysis highlighted the critical roles of temperature and water management in photosynthetic processes. Cluster analysis further revealed marked differences in carbon sequestration capacity and ecological adaptability among species, offering critical guidance for species selection and carbon sequestration assessments.【Conclusion】This study underscores the significant differences in photosynthesis and WUE between arbor and shrub species in the middle section of the Yinshan mountains. Temperature, stomatal conductance, and transpiration rate were pivotal in photosynthetic regulation. Unlike traditional linear regression methods, the random forest model effectively captured the nonlinear relationships between environmental variables and photosynthetic rates. The hierarchical cluster analysis, applied for the first time in this context, identified distinct functional groups of species based on their carbon sequestration potential and ecological adaptability. These findings fill a critical gap in understanding photosynthetic mechanisms and carbon sequestration capacity within the Three-North Shelter forest program, providing a novel framework for quantitative carbon sequestration assessment and informing future afforestation and restoration strategies.

Keywords: the middle section of the Yinshan mountains in Inner Mongolia; net photosynthetic efficiency; random forest; carbon fixation and oxygen release; hierarchical cluster analysis

森林与气候之间存在着密切的联系，大气中的CO_2平均7 a通过光合作用与陆地生物圈交换一次，其中70%是与森林进行的[1-2]。林木光合作用对CO_2的同化不仅是森林生态系统进行物质循环和能量流动的基础，更是森林固碳最主要的方式[3-4]。光合特性和水分生理对于植物的生存和发展具有重要作用[5]，研究森林的固碳释氧能力对提高造林质量和评价该地区森林生态效益具有重要意义[6]。不同植物固碳释氧的能力存在差异，如何科学评估和比较不同植物的固碳释氧能力，进而优化植物配置以实现更大的生态效益，是一个值得深入探讨的问题。

内蒙古阴山山脉位于内蒙古自治区的中部，屹立在内蒙古高原的南缘，属于“三北”工程中防沙治沙、保持水土和生态修复的关键区域。阴山山脉中段位于包头市，是“三北”防护林体系中的一部分，扮演着重要的生态保护角色。作为干旱和半干旱地区的重要生态屏障，其中段的植被覆盖在调节局部气候、固定沙土、保水保土和减轻风沙灾害等方面发挥了关键作用。近年来，气候变化与人类活动对这一地区的生态系统产生了深刻影响，了解当地树种的光合作用及固碳能力对于制定科学的生态恢复和保护策略至关重要。内蒙古阴山山脉动植物资源丰富，天然植被保存较完整，以青海云杉天然次生林为生态系统主体，白桦、山杨、辽东栎和虎榛子等分布广泛，具备开展相关研究的良好条件[7]。

席晓雪等[8]以大青山南坡山区虎榛子为材料，测定其7—10月的光合日变化，结果表明虎榛子净光合日变化呈双峰型曲线，对其光合作用生理因子和环境因子进行线性回归分析，结果表明虎榛子净光合速率、蒸腾速率等变化主要受光照、大气水分亏缺和气孔导度的影响。党晓宏[9]以沙冬青、霸王、四合木、半日花和红砂灌丛为试验材料测定光合日变化，单株灌丛日均光合固碳能力由强到弱为沙冬青＞霸王＞四合木＞红砂＞半日花灌丛。弥宏卓[10]采用王效科等[11]提出的生物量与蓄积量关系为基础的植物碳储量估算方法，对九峰山林场乔木林固碳释氧价值进行了测算，利用森林资源调查数据得到不同树种、不同龄级的面积和蓄积量，计算乔木林的碳储量。因此，本研究从生理机制和生态功能的角度，探讨九峰山不同树种光合能力及其影响因子，重点分析光合速率与水分利用效率的日变化趋势及其与环境因子的关系。通过随机森林分析识别影响光合速率的关键因子，并计算树种的固碳释氧量，结合聚类分析结果对树种进行综合评价与分类，为“三北”防护林体系的生态恢复和植被选择提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

阴山山脉位于内蒙古自治区中部，由大青山、乌拉山和狼山组成，东西长约 1 000 km，南北宽 50 ～ 100 km。内蒙古大青山就坐落在阴山山地中段，为阴山山脉的主要段落，位于内蒙古中部包头市、呼和浩特市、乌兰察布市一线以北，是阴山山地中山地森林、灌丛 - 草原镶嵌景观最为完好的一部分，是阴山山地生物多样性最集中的区域。地理坐标为 110°25′ ～ 110°48′E，40°34′ ～ 40°51′N。属中温带半干旱大陆性气候区，四季分明、光照充足、昼夜温差大，降水少而集中，年降水量 380 ～ 435 mm，年均蒸发量 2 055 mm[12-13]。大青山山地为块状断裂的中等高度的山地，一般海拔 1 500 ～ 2 100 m，西部的九峰山可高达海拔 2 338 m。山地的基岩及地表由花岗岩、片麻岩、片岩、页岩、砂砾岩以及残积、坡积层、洪积砂砾层构成。

1.2 试验材料

2022 年 7 月 15 日—8 月 5 日在内蒙古阴山山脉中段选取 12 种典型植物进行样方基本信息调查、叶面积测定、光合相关参数测定及固碳释氧计算。其中，乔木 7 种：白桦 *Betula platyphylla* Suk.、山杨 *Populus davidiana* Dode、辽东栎 *Quercus wutaishansea* Mary、油松 *Pinus tabuliformis* Carr.、茶条槭 *Acer ginnala* Maxim.、蒙古椴 *Tilia mongolica* Maxim.、青海云杉 *Picea crassifolia* Kom.；灌木 5 种：虎榛子 *Ostryopsis davidiana* Decne.、黄刺玫 *Rosa xanthina* Lindl.、蒙古扁桃 *Amygdalus mongolica* (Maxim.) Ricker、柠条 *Caragana microphylla* Lam.、沙棘 *Hippophae rhamnoides* L.。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，共 36 个标准样地，并测量每种植物的平均株高、平均胸径和冠幅投影面积等指标。测试的植物基本信息如表 1 所示。

1.3 指标测定与计算

采用 CI-340 便携式光合仪测定植物净光合速率等指标，选择无风或微风的晴天。在自然光照条件下，样地内具有代表性的 3 株植物选取大小适中、长势较好的向阳叶测定，在不离体的情况下每片叶记录 3 个重复后取平均值，各时间段内测定植物的顺序保持不变。8:00—18:00 每隔 2 h 测定 1 次，同步测定多项生理生态指标，旨在全面解析植物光合作用与环境因子的相互作用机制。净光合速率（P_n）直接表征植物的碳同化能力；蒸腾速率（E）反映植物水分耗散状况；气孔导度（G_s）作为连接 CO_2 吸收与水分散失的关键参数，指示气孔对环境的响应策略。环境因子方面，光合有效辐射（PAR）为光合作用提供能量基础；大气温度（Tair）与叶片温度（Tleaf）共同影响生化反应速率；空气相对湿度（RHin）与饱和水汽压亏缺（VPD）综合表征大气水分胁迫强度，其中 VPD 是驱动气孔行为的关键环境因子；空气二氧化碳浓度（CO_2in）作为光合底物浓度，其变化直接影响碳固定效率。上述指标的同步获取，为解析环境胁迫下植物光合 - 蒸腾的权衡机制及水分利用策略提供了完备的数据基础。测试的植物叶片光合生理参数如表 2 所示。

表 1 植物基本信息
Table 1 Basic plant information

生活型 Life form	种名 Species	平均株高 Mean height /m	平均胸径 Mean DBH /cm	冠幅投影面积 Crown projection area /m²	纬度 Latitude N	经度 Longitude E
乔木 Arbor	白桦	6.13±0.46	13.01±0.55	46.34±2.47	40°41′17.8″	110°37′03.0″
	山杨	11.84±0.63	12.36±0.54	71.22±3.44	40°40′50.2″	110°37′46.6″
	辽东栎	6.20±0.43	16.13±0.68	33.74±2.53	40°40′58.7″	110°37′41.9″
	油松	13.03±0.67	30.61±1.32	18.00±2.46	40°36′43.5″	110°34′36.5″
	茶条槭	6.53±0.45	15.77±0.75	28.74±2.55	40°40′41.9″	110°37′08.2″
	蒙古椴	6.48±0.34	18.22±0.74	59.54±2.75	40°38′09.1″	110°34′10.0″
	青海云杉	2.53±0.26	3.09±0.32	6.40±0.76	40°36′39.6″	110°34′27.4″
灌木 Shrub	虎榛子	1.26±0.13	2.42±0.16	2.98±0.24	40°43′32.9″	110°43′33.5″
	黄刺玫	1.13±0.11	0.81±0.04	3.29±0.23	40°43′35.3″	110°43′31.6″
	蒙古扁桃	1.33±0.17	1.41±0.15	11.6±0.32	40°40′56.3″	110°37′41.9″
	柠条	1.56±0.22	1.09±0.13	7.38±0.35	40°43′35.3″	110°43′31.6″
	沙棘	2.53±0.24	4.12±0.32	8.43±0.26	40°46′32.4″	110°35′23.4″

表 2　植物叶片光合生理参数日均值

Table 2　Daily mean value of photosynthetic physiological parameters of plant leaves

生活型 Life form	种名 Species	净光合速率 P_n /(μmol·m^{-2}·s^{-1})	蒸腾速率 E /(mmol·m^{-2}·s^{-1})	气孔导度 G_s /(mmol·m^{-2}·s^{-1})	光合有效辐射 PAR /(μmol·m^{-2}·s^{-1})	大气温度 Tair /℃	叶片温度 Tleaf /℃	空气二氧化碳含量 CO_2 in /(μmol·mol^{-1})	空气湿度 RHin /%	饱和水汽压亏缺 VPD /kPa
乔木 Arbor	白桦 *Betula platyphylla* Suk.	9.70±0.37	2.05±0.09	99.41±3.63	1 067.27±47.61	28.77±0.35	34.57±0.39	404.58±0.85	46.71±0.52	1.82±0.07
	山杨 *Populus davidiana* Dode	7.15±0.26	1.98±0.04	54.53±5.00	1 088.98±27.45	28.94±0.25	35.02±0.62	339.72±2.74	42.21±0.36	3.12±0.20
	辽东栎 *Quercus wutaishansea* Mary	9.06±0.48	2.21±0.21	54.25±7.35	1 148.90±3.92	30.90±0.23	38.53±1.50	359.06±8.96	40.76±0.42	3.87±0.39
	油松 *Pinus tabuliformis* Carr.	1.63±0.11	0.44±0.14	8.64±3.35	1 002.61±17.86	35.42±1.28	38.42±1.95	460.40±9.66	14.34±0.93	4.22±0.55
	茶条槭 *Acer ginnala* Maxim.	4.19±0.09	1.50±0.25	35.11±3.26	1 052.65±16.42	35.14±0.41	35.87±0.60	420.67±1.92	27.01±0.68	3.96±0.17
	蒙古椴 *Tilia mongolica* Maxim.	7.66±0.45	2.38±0.07	64.19±2.07	1 132.78±6.68	35.68±0.39	36.92±0.69	397.92±1.40	30.79±0.31	3.47±0.16
	青海云杉 *Picea crassifolia* Kom.	2.31±0.09	0.35±0.02	13.86±0.13	989.44±7.19	35.46±0.49	37.02±0.39	389.92±2.53	28.82±0.94	2.75±0.16
灌木 Shrub	虎榛子 *Ostryopsis davidiana* Decne.	8.31±0.32	2.50±0.09	87.18±4.64	1 105.38±18.17	30.80±0.19	34.02±0.40	404.27±0.31	38.14±0.00	2.53±0.11
	黄刺玫 *Rosa xanthina* Lindl.	2.55±0.16	0.78±0.06	16.28±0.89	1 086.13±23.48	35.92±0.58	37.16±0.31	390.46±2.21	32.26±1.81	4.13±0.10
	蒙古扁桃 *Amygdalus mongolica* (Maxim.) Ricker	8.87±0.19	1.97±0.15	60.53±5.14	1 093.53±10.62	33.56±0.69	36.03±1.38	473.73±3.41	47.14±0.25	2.96±0.36
	柠条 *Caragana microphylla* Lam.	4.81±0.12	1.32±0.02	39.62±1.29	1 087.08±40.32	33.16±0.46	36.68±0.48	344.08±1.28	24.58±0.78	3.31±0.16
	沙棘 *Hippophae rhamnoides* L.	3.16±0.27	1.08±0.04	29.37±0.67	1 046.27±7.72	37.53±0.31	40.47±0.36	351.99±0.58	22.97±0.65	3.27±0.04

利用简单积分法计算测试植物在测定当日的净同化量，计算公式为：

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

式中：P 为测定日单位叶面积的净同化总量（mmol·m^{-2}·d^{-1}）；P_i 为初测点的瞬时光合作用速率（μmol·m^{-2}·s^{-1}）；P_i+1 为测点的瞬时光合作用速率（μmol·m^{-2}·s^{-1}）；t_i 为初测点的瞬时时间（h）；t_i+1 为 i+1 测点的时间（h）；j 为测试次数。

被测试植物在测定当日的水分利用效率，计算公式为：

$$WUE=P/E \quad (2)$$

式中：WUE 为测定日单位叶面积的水分利用效率（μmol·mmol^{-1}）；E 为测定日单位叶面积的蒸腾速率（mmol·m^{-2}·d^{-1}）。

一般植物晚上的暗呼吸消耗量按照白天同化量的 20% 计算，单位叶面积日净固定 CO_2 量按以下公式计算：

$$W_{CO_2}=P\times(1-0.2)\times 44/1\ 000 \quad (3)$$

式中：W_{CO_2} 为测定日单位叶面积的净固定 CO_2 的质量（g·m^{-2}·d^{-1}）；44 为 CO_2 的摩尔质量（g·mol^{-1}）。

被测定植物在测定当日单位叶面积每天释放 O_2 按照以下公式计算：

$$W_{O_2}=P\times(1-0.2)\times 32/1\ 000 \quad (4)$$

式中：W_{O_2} 为测定日单位叶面积的净释放 O_2 的质量（g·m^{-2}·d^{-1}）；32 为 O_2 的摩尔质量（g·mol^{-1}）。

1.4 数据处理

本研究获取的原始数据均使用 Excel 2021 软件进行初步整理、计算与存储。后续所有统计分析及可视化均在 R 语言 4.4.2 中完成。进行正式分析前，对所有变量进行了正态性（Shapiro-Wilk 检验）和方差齐性（Levene 检验）检验。结果表明，关键生理参数（如净光合速率 P_n）及环境因子数据均不满足参数检验的前提假设（$P < 0.05$）。因此，后续分析选用非参数检验方法。

采用斯皮尔曼等级相关分析（Spearman's rank correlation）计算各环境因子（如 PAR、Tair、VPD 等）与净光合速率（P_n）之间的相关系数及其显著性水平，初步探明环境因子与植物光合生理指标之间的关联。鉴于多个环境因子间存在较强的共线性，本研究采用主成分分析（Principal component analysis，PCA）分别对乔木和灌木的环境因子数据集进行降维处理，以提取影响光合作用的主导环境模式。分析前，数据均经过标准化处理（均值为 0，标准差为 1）以消除量纲影响。

为更准确地量化各环境因子对净光合速率（P_n）影响的相对重要性，本研究运用了随机森林（Random forest）这一机器学习算法进行回归分析。该模型通过构建大量决策树并集成其结果，兼具高预测精度与良好的抗过拟合能力。具体而言，以 P_n 作为响应变量，多个同步测定的环境因子（PAR, Tair, Tleaf, RHin, VPD, CO_2in 等）作为预测变量构建回归模型。模型参数设置为：决策树数量（ntree）为 1 000，每次分裂时随机抽取的变量数（mtry）占总预测变量数的三分之一。各环境因子的重要性（Variable Importance）采用“百分比均方误差增加量（%IncMSE）”进行评估，其原理为：若随机置换某一变量的观测值后模型预测误差增大越多，表明该变量对预测 P_n 越重要。

此外，基于植物的净光合速率及计算所得的固碳释氧量等功能指标，采用层次聚类分析（Ward.D2 方法，欧几里得距离）对 12 个树种进行归类，以辨别具有相似光合固碳功能的植物类群。所有分析结果均使用 RStudio 中的 ggplot2、patchwork 及 gridExtra 等程序包进行可视化，以确保图表能清晰、准确地呈现数据分析结果。

2 结果与分析

2.1 净光合速率和水分利用效率的日变化特征

12 种植物的净光合速率日变化表现出单峰型和双峰型的变化趋势，其差异主要源于不同植物应对午间强光、高温及水分胁迫的不同策略。单峰型植物凭借更强的水分吸收能力、更高的水分利用效率维持午间较高的光合活性；而双峰型植物通过气孔限制主动降低光合作用以规避水分亏缺风险，表现为“光合午休”（图 1）。单峰型植物包括白桦（12.02±0.11 μmol/m^2/s）和蒙古扁桃（15.38±0.08 μmol/m^2/s），其净光合速率峰值较高，表明其在光合作用方面具有较强的适应性。相较之下，青海云杉（4.41±0.25 μmol/m^2/s）和黄刺玫（4.02±0.16 μmol/m^2/s）等植物的净光合速率较低，显示出较弱的光合能力。双峰型植物如辽东栎，其净光合速率分别在 10:00（12.7±0.58 μmol/m^2/s）和 16:00（9.88±0.18 μmol/m^2/s）出现峰值；而山杨和蒙古栎在午间出现光合速率下降，分别在上午和下午达到峰值。这表明双峰型植物在强光照条件下可能会受到气孔限制或水分胁迫的影响。

植物的水分利用效率同样表现出单峰型和双峰型的变化趋势（图 1）。白桦（7.44±0.22 μmol/mmol）和蒙古扁桃（5.51±0.14 μmol/mmol）为典型的单峰型植物，其水分利用效率在白天保持稳定；而油松则表现出明显的双峰特征，其 WUE 在上午（15.26±0.42 μmol/mmol）和下午（5.05±0.19 μmol/mmol）出现峰值。整体来看，针叶树种的水分利用效率普遍高于阔叶树种，例如油松和青海云杉的 WUE 分别达到（6.7±0.1 μmol/mmol）和（6.55±0.2 μmol/mmol）；而部分阔叶灌木如沙棘（2.96±0.15 μmol/mmol）表现出较低的水分利用能力。这表明不同树种在水分利用策略上存在显著差异，针叶树可能在干旱环境下具有更强的适应性。

2.2　净光合速率与环境生理因素的相关性分析

为探究不同植物净光合速率与环境生理因素的关系，本研究依据生活型将 12 种植物分为乔木和灌木，并分别进行斯皮尔曼相关性分析（图 2）。乔木的相关性分析结果表明，蒸腾速率与气孔导度之间存在极显著正相关（0.81），表明乔木的光合作用过程与水分调节机制紧密协同，气孔的开合直接影响蒸腾作用进而影响光合作用效率。此外，空气湿度与净光合速率呈显著正相关（0.68），

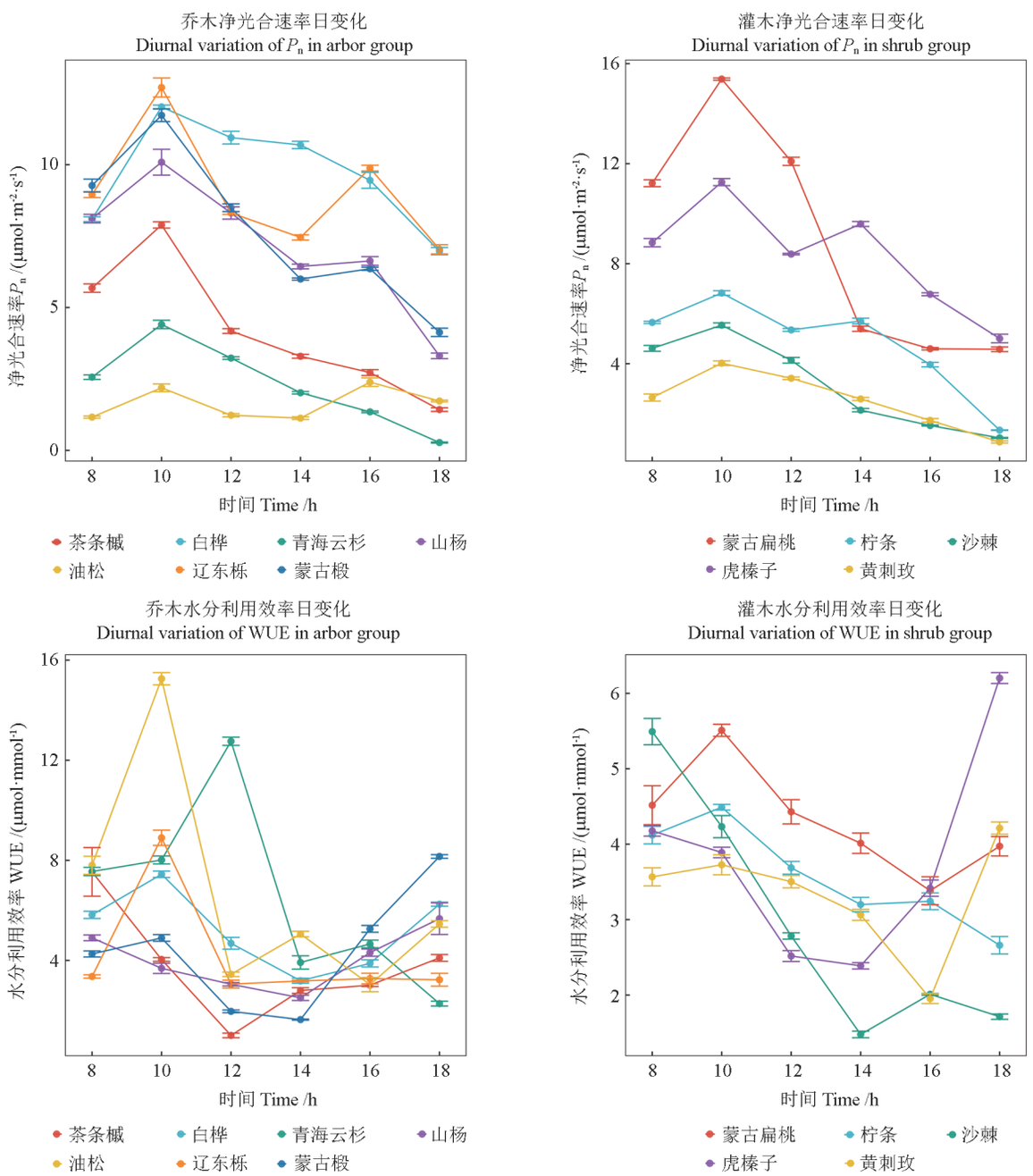


图 1　光合速率和水分利用效率日变化

Fig. 1　Diurnal variation of photosynthetic rate

说明较高的空气湿度有助于乔木维持较高的光合能力，可能与气孔调节和水分蒸发减少有关。叶片温度与大气温度虽然未表现出强相关性，但仍为分析光合作用和水分管理提供了重要生理依据。总体而言，乔木光合作用主要受蒸腾速率、气孔导度以及空气湿度等生理因子的影响。

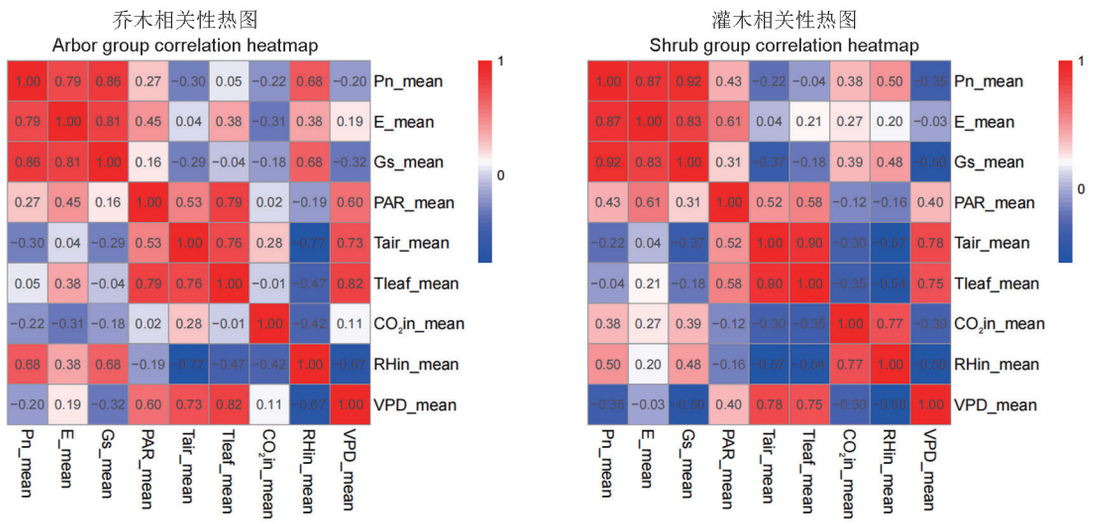


图 2 净光合速率与主要环境生理因素相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of net photosynthetic rate and main environmental physiological factors

灌木的相关性分析结果显示，蒸腾速率与气孔导度同样具有极显著的正相关性（0.83），表明灌木的水分调节与光合作用紧密相关。蒸腾速率的增加通常伴随着气孔导度的增大，从而提高水分输送和气体交换效率。此外，空气相对湿度与净光合速率之间也存在较强的正相关（0.50），进一步证实湿润环境有助于灌木提高光合能力，尤其是在碳固定过程中发挥关键作用。值得注意的是，大气温度与叶片温度虽与净光合速率呈负相关，但相关性较弱，表明温度对灌木光合速率的抑制作用相对有限。因此，灌木的光合作用与水分管理、气孔导度和空气湿度密切相关，这些因素在灌木的生理过程中发挥了重要作用。

2.3 光合生理特征的主成分分析

基于主成分分析（PCA），本研究分别对乔木和灌木组的生理变量进行降维分析，以探究主导光合作用的关键环境因子（图 3）。乔木组的 PCA 结果表明，前 2 个主成分（PC1 和 PC2）共同解释了 78.75% 的总变异（PC1 为 44.19%，PC2 为 34.56%），表明这 2 个主成分对数据结构的解释作用较强。PC1 主要与光合速率、蒸腾速率和气孔导度相关，这些变量与水分调节和气体交换密切相关，反映了乔木组的生理特征。PC2 则主要与叶片温度和大气温度的变化有关，表明温度在乔木的生态适应性中起着重要作用。

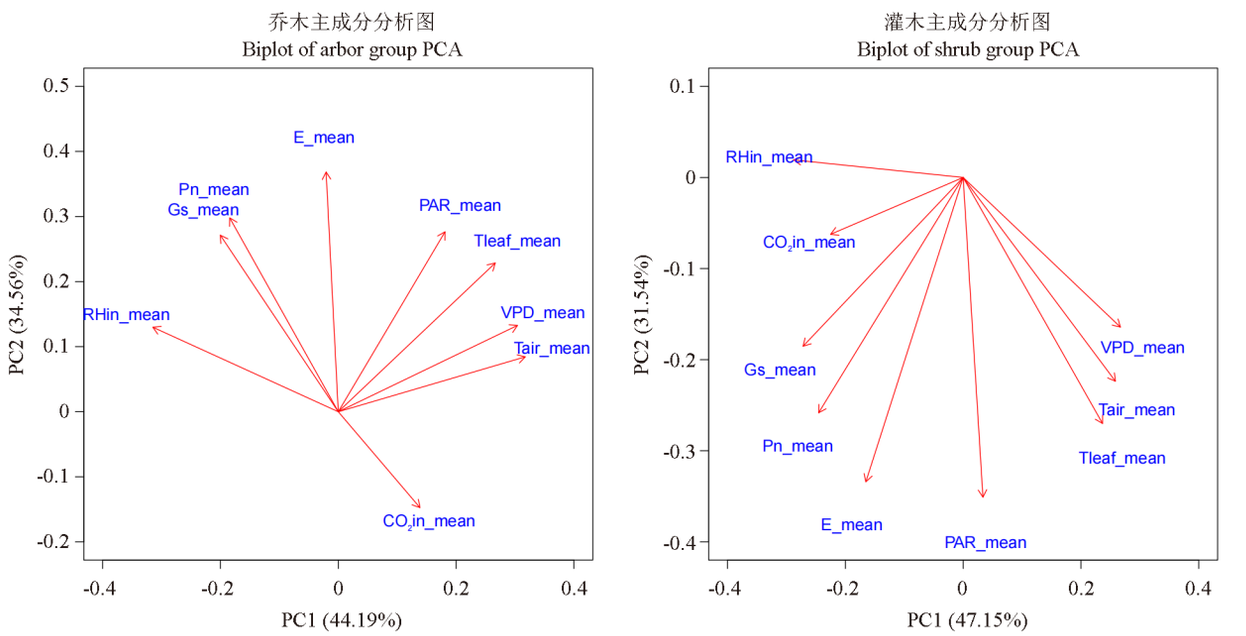
灌木组的 PCA 结果显示，PC1 和 PC2 共同解释了 78.69% 的总变异（PC1 为 47.15%，PC2 为 31.54%）。PC1 主要反映光合速率和气孔导度的变化，表明光合作用和水分管理是影响灌木生理特征的重要因素。PC2 主要与大气温度和叶片温度相关，显示温度对灌木的生理影响也很显著。与乔木组相比，灌木组的 PC1 贡献更高，表明灌木对环境变化的适应性更依赖于水分管理和光合作用效率。综上，PCA 结果表明，乔木和灌木的生理调控机制存在一定差异，乔木主要受水分调节和温度变化影响，而灌木的光合作用更依赖于水分管理。

2.4 光合速率的环境因子识别

为了探究主成分对净光合速率的预测能力，本研究分别对乔木组和灌木组进行了随机森林回归分析（图 4）。乔木组的随机森林模型 R^2 为 72.25%，表明模型能够较好地解释净光合速率的变异。变量重要性评估结果显示，PC2 的重要性（%IncMSE=0.896）显著高于 PC1（%IncMSE=0.256）。这表明 PC2 主要与温度因子在乔木光合作用中的相对影响力大于与 PC1 相关的水分调节相关因子，如气孔导度和蒸腾速率。因此，温度对乔木光合作用的影响在 PC2 维度上得到突出体现。乔木和灌木部分依赖图进一步揭示了 PC1 和 PC2 对净光合速率的影响趋势。乔木组中，PC2 随着数值增加时 P_n 呈现显著上升趋势，表明较高的温度有利于提高乔木的光合能力，而 PC1 变化对 P_n 的影响

不显著。这一结果表明，在乔木光合作用的调控机制中，PC2 作为温度相关变量，对光合速率的影响显著高于 PC1（气孔导度和蒸腾相关变量）。

灌木组的随机森林，模型的 R^2 为 70.11%，同样具有较强的解释能力。PC1 的重要性（%IncMSE=0.709）高于 PC2（%IncMSE=0.465），表明水分调节因子（PC1）对灌木光合速率的相对贡献大于温度因子，与乔木组有差别。乔木和灌木部分依赖图进一步揭示了 PC1 和 PC2 对净光合速率的影响趋势。灌木组中，PC1 和 PC2 均呈现负向影响，即 PC1 和 PC2 增大时 P_n 呈下降趋势，说明灌木的光合作用在较高温度环境下可能受到



P_n_mean 表示净光合速率均值；PAR_mean 表示光合有效辐射均值；CO_2in_mean 表示空气二氧化碳含量均值；E_mean 表示蒸腾速率均值；T_{air}_mean 表示大气温度均值；RHin_mean 表示空气湿度均值；G_s_mean 表示气孔导度均值 T_{leaf}_mean 表示叶片温度均值；VPD_mean 表示饱和水汽压亏缺均值。

P_n_mean represents the average value of net photosynthetic rate; PAR_mean represents the average value of photosynthetically active radiation; CO_2in_mean represents the average value of atmospheric carbon dioxide content; E_mean represents the average value of transpiration rate; T_{air}_mean represents the average value of atmospheric temperature; RHin_mean represents the average value of air humidity; G_s_mean represents the average value of stomatal conductance; T_{leaf}_mean represents the average value of leaf temperature; VPD_mean represents the average value of saturation vapor pressure deficit.

图 3　乔木和灌木主成分分析

Fig. 3　Principal component analysis of arbor and shrub

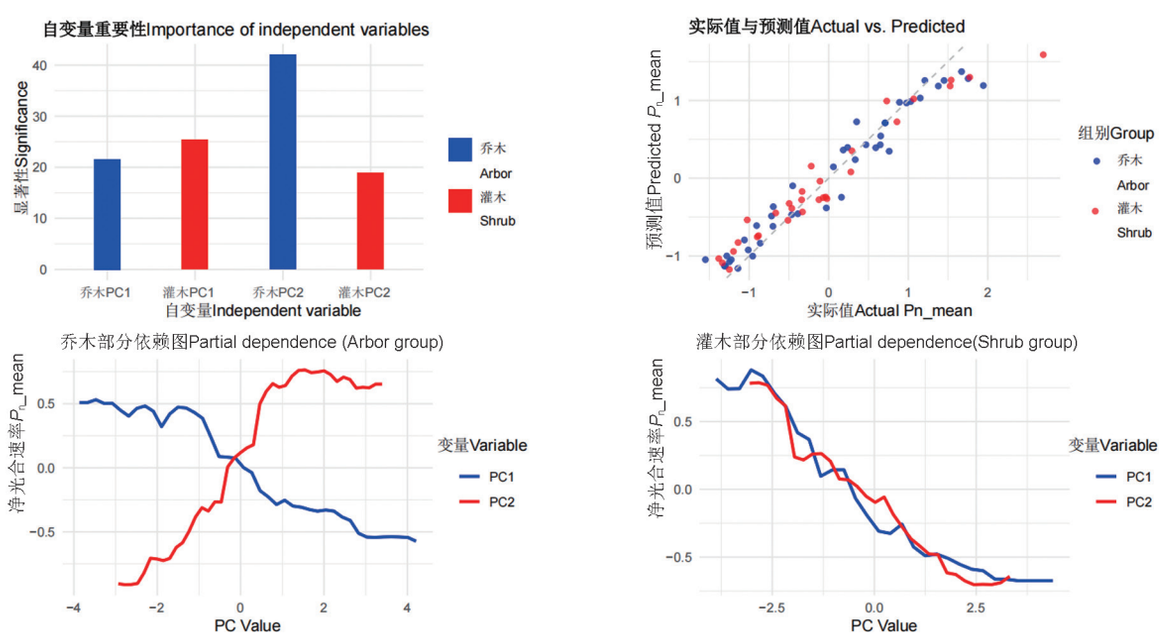


图 4　乔木和灌木随机森林分析

Fig. 4　Random forest analysis of arbor and shrub

抑制。这一现象表明，尽管 PC2 在解释光合速率变异方面占据主导地位，但其作用机制可能与乔木有所不同，暗示灌木可能对高温环境更加敏感。上述结果表明，在乔木和灌木的光合作用调控机制中，PC2（温度相关变量）对光合速率的影响显著高于 PC1（气孔导度和蒸腾相关变量）。这一结论表明，温度因子对乔木和灌木的光合能力有着重要的调控作用。

2.5 不同树种的固碳释氧能力及其生态意义

如表 3 所示，12 个树种的固碳释氧能力存在显著差异，这种差异不仅存在于生活型（乔木与灌木）之间，更体现在种间水平。乔木树种中，白桦展现出最高的净光合速率与单位叶面积固碳量，其日净同化量（364.66±9.85 mmol·m^{-2}·d^{-1}）显著高于其他乔木，表明其具有极强的碳同化能力。值得注意的是，蒙古栎净光合速率与单位叶面积固碳量并非最高，但其单位叶面积释氧量却是所有树种中最多的（17.25±0.54 g·m^{-2}·d^{-1}），这暗示其光合途径或物质积累分配可能存在独特机制。油松和青海云杉的 3 项指标均处于较低水平，这符合针叶树种通常具有较低光合速率但水分利用效率较高的保守策略。灌木树种中，蒙古扁桃和虎榛子的固碳释氧能力尤为突出，其日净同化量甚至超过了多数乔木，彰显了这些灌木在碳汇功能上的巨大潜力。特别是蒙古扁桃，作为适应性强的乡土树种，其高效的固碳能力（11.49±0.13 g·m^{-2}·d^{-1}）对其在干旱、半干旱地区生态修复中的应用价值提供了关键数据支撑。而黄刺玫的各项指标则相对较低。

表 3 固碳释氧能力表

Table 3 Carbon fixation and oxygen release capacity

生活型 Life form	种名 Species	日净同化量 P /(mmol·m^{-2}·d^{-1})	单位叶面积固碳量 W_{CO_2} /(g·m^{-2}·d^{-1})	单位叶面积释氧量 W_{O_2} /(g·m^{-2}·d^{-1})
乔木 Arbor	白桦	364.66±9.85	12.84±0.20	16.02±0.25
	山杨	267.65±11.05	9.42±0.22	11.94±0.28
	辽东栎	333.66±20.11	11.74±0.41	14.69±0.51
	油松	60.08±5.29	2.11±0.11	5.17±0.26
	茶条槭	155.54±4.75	5.48±0.10	8.40±0.15
	蒙古栎	282.79±15.47	9.95±0.31	17.25±0.54
	青海云杉	89.41±3.64	3.15±0.07	7.66±0.18
灌木 Shrub	虎榛子	309.12±13.12	10.88±0.27	12.10±0.30
	黄刺玫	97.33±6.75	3.43±0.14	3.57±0.14
	蒙古扁桃	326.40±6.22	11.49±0.13	13.93±0.15
	柠条	182.47±5.46	6.42±0.11	10.87±0.19
	沙棘	116.18±10.16	4.09±0.21	6.95±0.35

总体而言，本研究发现固碳释氧能力并非严格由生活型决定，树种间的生理生态策略差异更具决定性。白桦、辽东栎、蒙古扁桃和虎榛子等树种表现出较高的固碳效率，是阴山山脉地区优选的生态修复与碳汇树种。研究结果强调了在构建区域性生态工程时，除考虑生活型外，更应优先筛选具有高光合效率和固碳能力的关键物种，以最大化地提升生态系统的服务功能。

本研究利用层次聚类分析（Hierarchical clustering analysis），对 7 种乔木和 5 种灌木的单位叶面积日固碳释氧能力进行分析（图 5）。乔木组中，白桦 *B. platyphylla*、山杨 *P. davidiana* 和辽东栎 *Q. wutaishanica* 在较低的距离值处聚集，表明这些物种在固碳释氧能力方面具有较高的相似性，属于同一类群。相比之下，油松 *P. tabuliformis*、茶条槭 *A. ginnala* 和蒙古栎 *T. mongolica* 的聚类距离较远，表明这些物种在光合作用及固碳效率方面与其他乔木存在较大差异。这种聚类趋势与物种的生态适应性及生理特征高度吻合，并与主成分分析中的 PC1 和 PC2 的分布结果一致，进一步验证了乔木组物种间的生态功能分化，表明不同乔木物种在生态功能、气候适应性及固碳能力方面存在显著的多样性。

灌木组中，物种间亦表现出清晰的分组模式。虎榛子 *O. davidiana* 与黄刺玫 *R. xanthina* 被聚为一类，表明它们在固碳能力和生态适应性方面较为相似。而蒙古扁桃 *A. mongolica*、柠条 *C. microphylla* 和沙棘 *H. rhamnoides* 则位于不同的分支，显示出它们在光合作用效率及气候适应性方面的差异。聚类结果揭示了灌木组物种在固碳

与释氧功能上的生态功能差异，并进一步支持了 PCA 分析中 PC1 和 PC2 变量的分布规律。总体而言，灌木组物种在固碳能力上存在较大变异性，其聚类关系反映了各物种的生理特性及其对环境因子的适应策略。

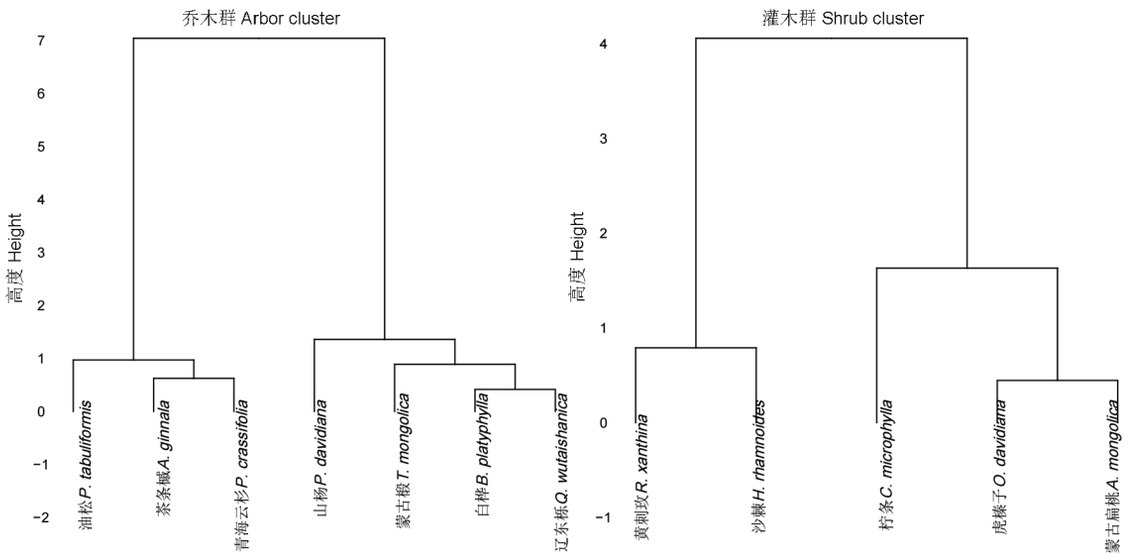


图 5　固碳释氧能力聚类

Fig. 5　Clustering of carbon fixation and oxygen release capacity

3　讨　论

3.1　植物净光合速率与水分利用效率的日变化特征

李德丽等 [14] 的研究位于定西市安定区龙滩小流域大沟岭，其样地选择在东坡和南坡的人工柠条林，其中南坡柠条净光合日变化趋势与本研究中一致，均为双峰型。其原因是本研究中柠条样地同样为南坡，中午气温过高时叶片温度攀升，气孔关闭出现“午休”现象。席晓雪等 [8] 选取阴山山脉中部内蒙古自治区呼和浩特市新城区古路板林场水磨作业区虎榛子进行光合相关测定，其结果与本研究一致，虎榛子净光合日变化趋势为双峰型，第一个峰值出现在 10：00，第二个峰值出现在 14：00 且显著低于第一个峰值。陈高路等 [15] 对贺兰山乔木树种水分利用效率的计算表明，青海云杉和油松的数值较高，而山杨较低，此结论与本研究的发现相似。但是其日变化趋势不同，原因是针叶树种叶面积小于阔叶树种，其蒸腾能力同理，导致青海云杉和油松等针叶树种水分利用效率高于山杨等阔叶树种。曾继娟等 [16] 的研究结果表明，蒙古扁桃抗旱性最强，随着干旱梯度增强其水分利用效率逐步提高，与本研究中水分利用效率最强的是蒙古扁桃的研究结果一致。其原因可能是源于蒙古扁桃特有的干旱适应策略，通过增厚的角质层和气孔快速响应与渗透物质累积的协同作用，使其在水分受限条件下能优先维持碳同化效率，在生态恢复中具有不可替代的节水固碳双优特性。本研究系统阐明了阴山山脉中段 12 种典型木本植物光合水分利用策略的功能群分化，揭示了蒙古扁桃等物种在半干旱环境下兼具高水分利用效率与强固碳能力的“双优”生理适应机制。

3.2　植物生理因子与净光合速率的相关性分析

本研究通过多物种功能群尺度整合分析，有效放大了共性生理响应信号，为解析环境胁迫下植物生理关系的区域性特征提供了新视角。杨芷毓等 [17] 选取苏州市常见的 6 种园林植物在高温环境下进行光合与相关环境因子相关分析，结果表明净光合速率与气孔导度呈极显著正相关，与本研究中乔木和灌木的结果均一致。表明室温偏高的环境中植物叶片通过减小气孔导度降低净光合速率提高环境适应性。本研究中，植物饱和水汽压亏缺与大气温度、叶片温度呈显著正相关，与 Lei 等 [18] 和陈高路等 [15] 的研究结果一致，该现象是由环境温度升高导致空气干燥和叶片温度升高，这种关系通过影响气孔导度和蒸腾速率，进而影响植物的光合速率和水分利用效率。李满乐等 [19] 对北京松山国家级自然保护区绣线菊的研究表明，其净光合速率与其他光合参数及环境因子均无显著相关性。然而，本研究发现，灌木的净光合速

率（P_n）与蒸腾速率（E）及气孔导度（G_s）呈显著正相关。二者的研究结论存在明显差异。这种差异的形成可能源于研究区域生态背景与物种选择策略的交互作用，阴山中段作为干旱胁迫突出的“三北”防护林关键区，其灌木类群在长期适应中可能演化出气孔行为优先响应的生存策略。同时，本研究通过多物种功能群尺度分析，能够整合不同敏感型灌木的共性响应特征，放大气孔相关参数的信号强度。

3.3 环境因子对光合速率的影响及主导因子识别

本研究应用随机森林模型，突破了传统线性模型的局限，首次量化并证实了温度是驱动阴山山脉木本植物光合日变化的关键非线性驱动因子。李喜梅等 [20] 在研究郑州市 4 种园林树木的光合特性及其影响因素时采用了广义线性混合模型，发现温度对 4 种树木净光合速率的影响均不显著，湿度是影响 4 个树种光合作用的最主要因素。与本研究采用随机森林模型表明温度因子对乔木和灌木的光合能力有着重要的调控作用的结论不同，其原因可能是采用的分析方法不同，广义线性混合模型主要揭示了变量间的线性关系，而随机森林模型能够处理高维和非线性的变量交互作用，从而揭示了温度的显著影响。此外，研究对象不同，可能存在的生态适应性差异会导致它们对温度和湿度的响应不同。本研究中，随机森林模型表现出较高的预测精度，这与李珺等 [21] 的研究结果一致。李珺等 [21] 采用随机森林模型进行森林碳储量的遥感反演，证明了该模型在处理复杂生态数据时具有较好的适用性和可行性。尽管李珺等研究的重点是森林碳储量反演，而本研究关注的是植物光合作用能力，二者的研究对象和数据类型存在差异，但随机森林模型在两者中均展现了良好的预测性能。这表明，作为一种强大的非线性机器学习算法，随机森林能够有效处理高维度的环境因子与生物特征数据，具有较强的通用性和适应性。结果凸显了机器学习方法在解析复杂生态过程（如光合 - 环境响应）中的独特优势，为生态学研究方法提供了可靠范例。

3.4 不同植物的固碳释氧能力及生态适应性

本研究证实了关键树种（如白桦和蒙古扁桃）的光合功能性状具有跨地理梯度的稳定性，这为筛选广适性高固碳树种用于生态恢复提供了坚实的理论依据。郑淼 [22] 对冀北山地 4 种典型林分固碳释氧效益进行估算，其中白桦近熟林＞山杨近熟林的固碳量与本研究结果一致，山杨近熟林＞白桦近熟林的释氧量与本研究结果相反。其释氧量排序的差异提示二者代谢策略产生分化，白桦可能通过优化光合酶分配减少氧损耗，而山杨的高暗呼吸特性在特定生境下可能削弱其净释氧优势，这种固碳释氧能力的解耦现象反映了不同树种在碳氧代谢权衡上的生态位分化。本研究中，白桦、茶条槭和云杉的固碳释氧能力与郭杨等 [23] 对哈尔滨城市园林树种的观测结果呈现显著一致性，这种跨越半干旱山地与湿润平原地理梯度，并覆盖自然次生林至城市人工林生态系统类型的趋同现象，可能由树种长期进化形成的保守光合生理性状与人工林管理策略共同驱动。白桦、茶条槭和云杉在光温水条件变化中展现出气孔调节阈值的系统发育稳定性，其羧化效率与气孔开闭阈值响应模式具有跨环境普适性。同时，人工林管理通过精准调控水分与养分供应，旨在非原生境中重构类原生生态位的微环境，以激活林木的最大光合潜能，此举为基于光合功能性状筛选的跨区域生态恢复工程提供了理论依据。本研究发现，阴山中段的优势植物如白桦、辽东栎、蒙古扁桃和虎榛子等在固碳释氧方面表现更优，这些植物对九峰山地区的特殊气候和土壤条件有很好的适应性，从而在碳固定和氧释放方面发挥了重要作用。然而，本研究仅对阴山中段部分优势植物进行了研究，未来可以进一步扩大样本量，并对不同海拔、坡向、土壤类型的植物进行比较，以更全面地了解“三北”防护林典型地区的植物生态特性。

4 结 论

本研究首次结合随机森林回归、主成分分析和层次聚类分析，揭示了“三北”防护林典型地区不同植物在温度、湿度等环境因子变化下的光合作用动态与生态适应性差异。通过分析这些物种的生理特征与固碳释氧能力，本研究发现白桦和蒙古扁桃等物种通过独特的生理调控机制如光合酶分配优化和气孔调节，有效应对温度和水分胁迫，这些机制使它们在特定环境下具有较强的碳固定能力。同时，本研究揭示了山杨较高的暗呼吸特性可能在特定生境下削弱其释氧优势，体现了不同树种在碳 - 氧代谢权衡上的生态位分化。这些发现不仅能加深对植物光合作用机制的理解，也为不同生态环境下的碳汇能力评估提供了理论支持，特别是在气候变化背景下，本研究可为“三北”防护林中干旱和温度波动较大的地区的生态

恢复项目中物种选择和管理提供实践依据。未来的研究可以进一步扩大样本量，涵盖更多不同海拔、坡向和土壤类型的植物，并结合遥感技术和景观尺度分析，为碳和水分管理策略提供更广泛的支持，进一步揭示“三北”防护林在气候变化下的适应性和生态恢复中的潜力。

参考文献：

[1] UEYAMA M, HARAZONO Y, KIM Y, et al. Response of the carbon cycle in sub-arctic black spruce forests to climate change: reduction of a carbon sink related to the sensitivity of heterotrophic respiration[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009,149:582-602.

[2] DAVI H, DUFRÊNE E, FRANCOIS C, et al. Sensitivity of water and carbon fluxes to climate changes from 1960 to 2100 in European forest ecosystems[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2006,141:35-56.

[3] TUITTILA E, VASANDER H, LAINE J. Sensitivity of C sequestration in reintroduced *Sphagnum* to water‐level variation in a cutaway peatland[J]. Restoration Ecology,2004,12(4): 483-493.

[4] 胡文超 . 西北地区 18 种常见灌木光合特性和光合固碳潜力的比较研究 [D]. 银川 : 宁夏大学 ,2014.
HU W C. Comparative study of the photosynthetic characteristics and photosynthetic carbon sequestration of 18 common shrubs in northwest area of China[D]. Yinchuan: Ningxia University,2014.

[5] 叶甜甜 , 左继林 , 周文才 , 等 . 干旱 - 复水处理对 3 个油茶良种的生长与光合生理特性的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2025,45(11):42-54.
YE T T, ZUO J L, ZHOU W C, et al. Effects of drought and rehydration treatment on the growth, photosynthesis and physiological characteristics of three *Camellia oleifera* cultivars[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2025,45(11):42-54.

[6] 陈高路 , 陈林 , 庞丹波 , 等 . 贺兰山 10 种典型植物固碳释氧能力研究 [J]. 水土保持学报 ,2021,35(3):206-213,220.
CHEN G L, CHEN L, PANG D B, et al. Study on carbon sequestration and oxygen release capacity of 10 typical plants in Helan mountain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(3):206-213,220.

[7] 付新华 . 九峰山地区森林资源管理现状及建议 [J]. 内蒙古林业 ,2023(1):16-18.
FU X H. Status quo and suggestions of forest resources management in Jiufengshan area[J]. Inner Mongolia Forest, 2023(1):16-18.

[8] 席晓雪 , 田有亮 , 何炎红 . 虎榛子光合特征变化及其与主要影响因子的关系 [J]. 内蒙古农业大学学报 (自然科学版), 2012,33(4):81-86.
XI X X, TIAN Y L, HE Y H. Photosynthetic characteristics of *Ostryopsis davidiana* Decaisne and relationship with main influencing factor[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition),2012,33(4):81-86.

[9] 党晓宏 . 西鄂尔多斯地区荒漠灌丛生态系统固碳能力研究 [D]. 呼和浩特 : 内蒙古农业大学 ,2016.
DANG X H. Study on carbon fixation of desert shrub ecosystem in west Ordos region[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2016.

[10] 弥宏卓 . 九峰山林场乔木林固碳释氧效益分析 [J]. 内蒙古林业调查设计 ,2016,39(2):122-124.
MI H Z. Analysis on carbon sequestration and oxygen release benefit of forest in Jiufengshan forest farm[J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design,2016,39(2):122-124.

[11] 王效科 , 冯宗炜 . 中国森林生态系统中植物固定大气碳的潜力 [J]. 生态学杂志 ,2000,19(4):72-74.
WANG X K, FENG Z W. The potential to sequester atmospheric carbon through forest ecosystems in China[J]. Chinese Journal of Ecology,2000,19(4):72-74.

[12] 杨永明 . 原始次生林保护——九峰山自然保护区 [J]. 中国城市林业 ,2005(4):58.
YANG Y M. Protection of primary secondary forest: Jiufengshan nature reserve[J]. Chinese Urban Forestry,2005(4):58.

[13] 王皓月 , 郭月峰 , 徐雅洁 , 等 . 九峰山不同林分类型生态恢复植被 - 土壤系统耦合关系评价 [J]. 生态环境学报 ,2021, 30(12):2309-2316.
WANG H Y, GUO Y F, XU Y J, et al. Coupling relationship between vegetation and soil system in ecological restoration of different stand types in Jiufeng mountain[J]. Ecology and Environmental Sciences,2021,30(12):2309-2316.

[14] 李德丽 , 蔡国军 , 莫保儒 , 等 . 半干旱黄土丘陵区不同立地柠条光合特性研究 [J]. 西北林学院学报 ,2023,38(6):38-45.
LI D L, CAI G J, MO B R, et al. Photosynthetic characteristics of *Caragana korshinskii* and its influencing factors under different site conditions in semi-arid loess region[J]. Journal of Northwest Forestry College,2023,38(6):38-45.

[15] 陈高路 , 庞丹波 , 马进鹏 , 等 . 贺兰山 10 种典型植物光合及水分利用效率特征研究 [J]. 西北植物学报 ,2021,41(2): 290-299.
CHEN G L, PANG D B, MA J P, et al. Study on photosynthesis and water use efficiency of ten typical plants in Helan mountain[J]. Acta Botanica Sinica of Northwest China,2021, 41(2):290-299.

[16] 曾继娟 , 朱强 . 水分胁迫对 3 种扁桃的生长与耗水特征的影

响 [J]. 西北林学院学报 ,2018,33(4):145-152.
ZENG J J, ZHU Q. Effects of water stress on the growth and water consumption characteristics of three *Amygdalus* species[J]. Journal of Northwest Forestry College,2018,33(4):145-152.

[17] 杨芷毓 , 张兴 , 张洪运 , 等 . 苏州市城市公园常见植物叶功能性状对热环境的响应机制研究 [J]. 东北农业大学学报 ,2023,54(7):14-24.
YANG Z Y, ZHANG X, ZHANG H Y, et al. Study on response of leaf functional traits of common street trees to urban thermal environment in Suzhou City[J]. Journal of Northeast Agricultural University,2023,54(7):14-24.

[18] LEI Z Q, WANG Q, XIAO H L. Carbon fixation and oxygen release capacity of typical riparian plants in Wuhan City and its influencing factors[J]. Sustainability,2024,16:1168.

[19] 李满乐 , 范雅倩 , 王可 , 等 . 北京松山林下典型灌木绣线菊光、水利用效率的季节动态及其对环境因子的响应 [J]. 水土保持研究 ,2023,30(3):301-309.
LI M L, FAN Y Q, WANG K, et al. Seasonal dynamics in light and water use efficiency of a typical shrub *Spiraea salicifoliain* understory and its response to environmental factors in Songshan of Beijing[J]. Research of Soil and Water Conservation,2023,30(3):301-309.

[20] 李喜梅 , 赵君静 , 回祎 , 等 . 郑州市 4 种园林树木光合特性及其影响因素研究 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版),2024,48(5):105-112.
LI X M, ZHAO J J, HUI Y, et al. A study on photosynthetic characteristics and influencing factors of four kinds of garden trees in Zhengzhou[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition),2024,48(5):105-112.

[21] 李珺 , 张贵 , 庞梓亨 , 等 . 长沙市主要优势树种森林碳储量遥感反演 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(2):20-33.
LI J, ZHANG G, PANG Z H, et al. Remote sensing inversion of forest carbon stocks dominated by major dominant tree species in Changsha[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(2):20-33.

[22] 郑淼 . 冀北山地 4 种典型林分固碳释氧效益估算 [J]. 水土保持研究 ,2019,26(3):154-158.
ZHENG M. Estimating the benefits of carbon sequestration and oxygen release from four typical stands in the mountainous region of north Hebei Province[J]. Research of Soil and Water Conservation,2019,26(3):154-158.

[23] 郭杨 , 刘杨 , 杨维菊 . 基于 GGE 双标图的公园绿地树种生态效益研究 [J]. 北方园艺 ,2022(13):86-95.
GUO Y, LIU Y, YANG W J. Ecological benefits of tree species in park green space based on GGE Biplot analysis[J]. Northern Horticulture,2022(13):86-95.

[本文编校：吴　彬]