赵自强,南益聪,韩高玲,等.地下水对柠条(*Caragana korshinskii*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)光合蒸腾日动态的影响[J].中国沙漠,2026,46(5):415-424.

地下水对柠条(*Caragana korshinskii*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)光合蒸腾日动态的影响

赵自强[1],南益聪[2,3],韩高玲[2,3],柳小妮[1],石亚飞[1],张志山[2],霍建强[2]

(1.甘肃农业大学 草业学院,甘肃 兰州 730070;2.中国科学院西北生态环境资源研究院 沙坡头沙漠研究试验站,甘肃 兰州 730000;3.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:干旱荒漠区生态系统中,土壤水分是限制植被生长与生态功能的关键因子,植物气体交换过程对水分状况及气候变化高度敏感,但其日尺度碳水耦合调控机制仍不明确。本研究以典型固沙灌木柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)和油蒿(*Artemisia ordosica*)为对象,设置有地下水和无地下水两种处理,系统监测叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、叶片水势及环境因子的日变化特征,并分析其调控机制。结果表明:两种灌木的光合和蒸腾速率在日尺度上均呈现典型"双峰型"变化,表现出明显的光合"午休"现象。地下水补给显著提高了两种植物的光合和蒸腾能力。在有地下水条件下,柠条与油蒿的单位叶面积日光合碳同化量(P_nDL)分别为67.9、73.7 g·m^{-2},日蒸腾量(*Tr*DL)分别为44.3、39.9 kg·m^{-2},均显著高于无地下水条件。土壤水分、气温及饱和蒸气压亏缺是驱动光合日变化的主要环境因子。两种灌木在碳获取与水分消耗之间表现出不同的权衡策略。柠条具有较高的气孔导度和蒸腾速率,但水分利用效率相对较低,表现为通过增强气孔开放和蒸腾以促进碳同化的趋利型策略;而油蒿在较低气孔导度和蒸腾水平下维持较高的水分利用效率,呈现保守型水分利用策略。该碳水耦合策略的差异反映了两种物种对干旱环境的不同适应途径,对干旱区植被恢复的稳定性与生态系统适应能力具有重要意义。

关键词:地下水补给;气体交换;日变化;柠条;油蒿

文章编号:1000-694X(2026)05-415-10 **DOI**:10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00064

中图分类号:Q945 **文献标志码**:A

0 引言

干旱荒漠区是地球陆地生态系统中的脆弱区域,水分匮乏是限制植被生长与生态系统功能维持的主要因素[1]。在此类生态系统中,植物生理过程对水分变化高度敏感,尤其是光合和蒸腾作用等气体交换活动,直接反映了植物对干旱胁迫的响应与适应策略。地下水作为重要且相对稳定的水源,对维持干旱区植被生理活动和生态系统稳定具有关键作用。然而,在地下水可利用性差异显著的区域,不同植物对水分利用的依赖程度及其生理调节机制存在明显差异[2],深入探讨这一过程对于理解干旱生态系统中植物的生理适应和水分利用效率具有重要意义。

固沙灌木是干旱区生态系统的主要建群种,在防风固沙、保持水土和改善区域生态环境中发挥着核心作用[3]。其中,柠条(*Caragana korshinskii*)与油蒿(*Artemisia ordosica*)作为中国北方沙区的典型优势种,分别代表深根型与浅根型水分获取策略[4]。柠条为深根型灌木,能够利用深层土壤水分甚至地下水[5],油蒿为浅根型半灌木,依赖浅层土壤水分并具有较强的地表适应能力[6-8]。两者在水分获取途径及生理调控特征上的差异,使其成为研究干旱区植物水分利用与适应策略的理想对象。植物光合与蒸腾速率在日尺度上受光照、气温、空气湿度及叶片水势等多因子驱动,通常呈现单峰或双峰型变化[9-10]。在水分受限或饱和蒸气压亏缺较高条件

收稿日期:2025-10-26; **改回日期**:2026-05-06

资助项目:国家自然科学基金项目(U23A20223)

作者简介:赵自强(2002—),男,甘肃永靖人,硕士研究生,研究方向为生态学。E-mail: 19944159132@163.com

通信作者:石亚飞(E-mail: shiyf@gsau.edu.cn)

下，植物通过气孔调节降低蒸腾损失，从而出现“光合午休”现象[11-12]。然而，关于在不同地下水埋深差异、微气候背景变化等情境下，固沙灌木柠条和油蒿在日尺度上光合速率与蒸腾速率动态变化规律及其碳水耦合策略仍缺乏系统的定量比较研究。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究于2024年7月在宁夏回族自治区中卫市沙坡头区中国科学院沙坡头沙漠研究试验站（简称沙坡头站）进行，沙坡头站位于腾格里沙漠东南缘（37.53°N、105.03°E，海拔1 250 m），处在阿拉善高原荒漠与荒漠草原过渡地带，属于草原化荒漠和荒漠草原的过渡带[13]。该地区年均气温9.6 ℃，冬夏昼夜温差大；多年平均降水量186.2 mm，降雨量分布不均匀，集中在7—9月，年蒸发量2 900 mm，空气相对湿度平均为40%；年均风速为2.8 m·s^{-1}，其中大于5 m·s^{-1}的起沙风年均200 d左右。

1.2 试验材料及设计

本研究以沙坡头站中国北方沙区水量平衡自动模拟监测系统（简称蒸渗仪群）中有地下水补给（G：地下水位为−2.5 m，以地面为零点）和无地下水补给（NG）条件下筒体中栽植的柠条和油蒿为研究对象[14]。于2024年7月27—28日开展试验，首先在G和NG两个处理下分别选取并标记长势良好且健康的柠条和油蒿各3株，从北京时间08:00—20:00，每2 h测定叶片的气体交换参数；同时，测定相邻枝条的叶片水势和叶片导水率。

1.3 环境因子测定

空气温度（T_a）、空气相对湿度（*RH*）、气压（*AP*）和土壤温度（T_s）等气象数据均来自沙坡头站气象站，饱和蒸气压亏缺（*VPD*）的计算公式为：

$$VPD = 0.61078 \times \frac{\exp(17.27 \times T_a)}{T_a + 273.3} \times (1 - RH) \quad (1)$$

式中：T_a和RH分别是空气温度（℃）和空气相对湿度（%）。

土壤含水量采用土壤温湿盐三参数探头（HydraProbe，Stevens，美国）测量，测定土壤水分的深度分别为0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.5、2.1、2.5 m，最后，采用加权平均法计算不同条件下的土壤水分含量。

1.4 气体交换参数日变化测定

于天气晴朗无云时开展试验，试验测定时间为08:00—20:00，每2 h用便携式光合仪系统LI-6400 Portable Photosynthesis System（LI-6400，LI-COR，Lincoln，美国）测定叶片净光合速率（P_n，μmol CO_2·m^{-2}·s^{-1}）、蒸腾速率（*Tr*，mmol H_2O·m^{-2}·s^{-1}）、气孔导度（g_s，mol H_2O·m^{-2}·s^{-1}）、叶温下蒸气压亏缺（VPD_L，kPa）等气体交换参数。光合测定结束后将所测叶片剪下装入自封袋中，立即带回实验室，并利用便携式叶面积仪（LI-3000C，LI-COR，Lincoln，美国）测量其叶面积（*LA*，cm^2），以此校准测量的实际光合叶面积。在此基础上，水分利用效率（*WUE*）和内在水分利用效率（*iWUE*）通过计算得到。

$$WUE = P_n/Tr \quad (2)$$

$$iWUE = P_n/g_s \quad (3)$$

1.5 叶片水势和导水率的测定

测量叶片气体交换参数的同时，测定相邻枝条的叶片水势和叶片导水率，利用压力室（Model 1000，PMS Instrument Company，美国）测定叶片水势（Ψ_L）。在蒸腾速率测定结束后，选择使用锡箔纸包裹进行黑暗处理，半小时后立即剪取同一枝条上包裹的健康小枝（黑暗）和与其相邻具叶小枝，装入保湿袋并尽快带回实验室，测定叶片水势Ψ_1（黑暗，MPa）和Ψ_2（未黑暗），即得水势差（$\Delta\Psi=\Psi_1-\Psi_2$），其中未黑暗的Ψ_2即为叶片水势（Ψ_L）。每株重复3次，取平均值。依据Brodribb等（2020）提出的基于蒸腾速率和水势梯度的估算方法[15]，植物瞬时液流导水率（K_L）按如下公式计算：

$$K_L = \frac{Tr}{\Delta\Psi} \approx \frac{Tr}{\Psi_1 - \Psi_2}$$

式中：K_L表示叶片导水率（mmol·m^{-2}·s^{-1}·MPa^{-1}）；*Tr*为叶片蒸腾速率（mmol·m^{-2}·s^{-1}）；$\Delta\Psi$为叶片水势梯度。

1.6 数据分析

本文采用IBM SPSS Statistics 26.0（SPSS Inc.，Chicago，IL，美国）进行方差分析，并采用独立样本t检验进行同一时段及日总量比较；使用Canoco 5.0进行冗余分析探究功能性状间的关系；使用Origin 2021（OriginLab Corp.，Northampton，MA）进行绘图

和数据可视化。为定量表征光合与蒸腾的日变化过程，采用双峰高斯函数对净光合速率和蒸腾速率的日变化曲线进行拟合，其一般形式为：

$$Y(t) = A_1 \times \exp[-(t-t_1)^2/(2\sigma_1^2)] + A_2 \times \exp[-(t-t_2)^2/(2\sigma_2^2)] \quad (4)$$

式中：A_1和A_2分别表示两个峰值的振幅；t_1和t_2为峰值出现时间；σ_1和σ_2表示峰宽。采用非线性最小二乘法进行参数拟合，并以决定系数(R^2)和显著性水平(P值)评价拟合效果。在此基础上，通过对拟合曲线在观测时间范围内进行积分，计算单位叶面积日光合碳同化量和日蒸腾量，以表征植物日尺度的碳获取和水分消耗能力。

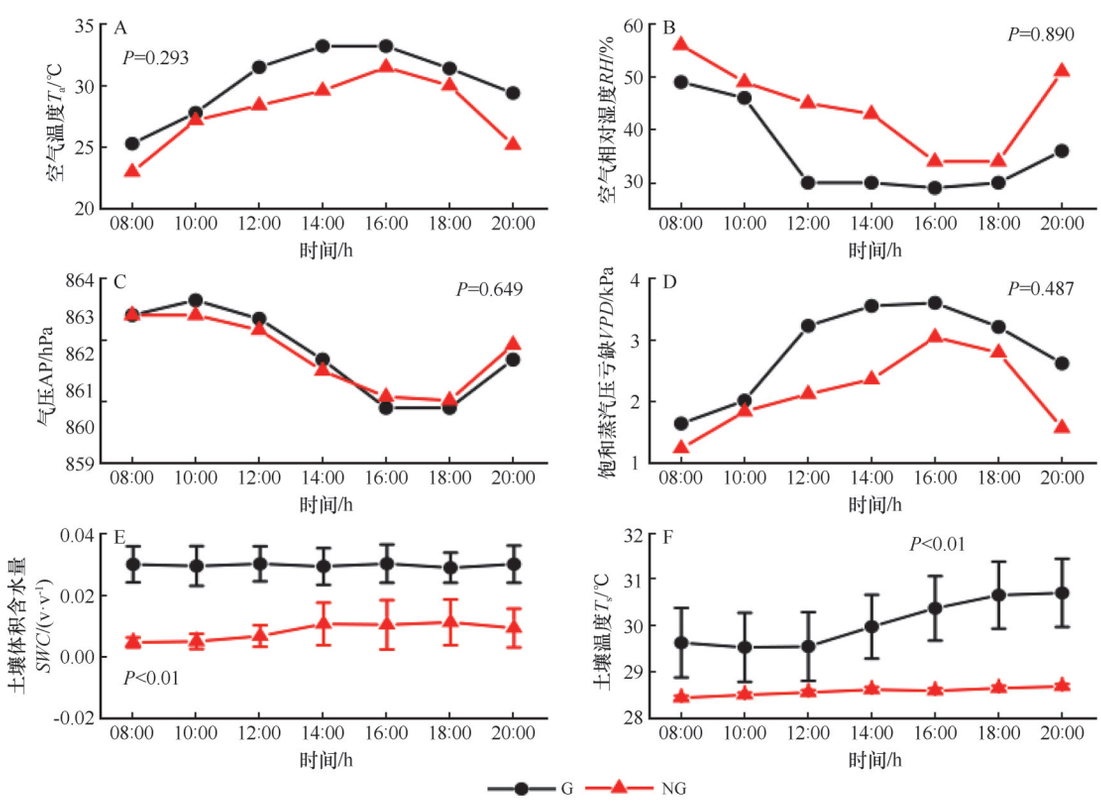
2　结果与分析

2.1　环境因子日变化

试验期间，空气温度(T_a)和饱和蒸汽压亏缺(VPD)均呈现典型的单峰型变化趋势，二者均在16:00达到峰值(图1)。与之相反，空气相对湿度(RH)和气压(AP)总体呈现先下降后回升的变化特征，反映出日变化过程中大气干燥程度与温度变化的协同响应关系。除有地下水条件下T_s略有上升，其他条件下土壤体积含水量(SWC)和土壤温度(T_s)无明显波动，不同处理间比较表明，有地下水条件下SWC和T_s均显著高于无地下水条件(P<0.01)。而空气温度、相对湿度及VPD在两处理间差异不显著(P>0.05)。这表明，两处理间的环境差异主要来源于土壤水分状况，而非大气因子，从而为后续分析植物气体交换对水分条件的响应提供了相对一致的大气背景。

2.2　柠条和油蒿叶片水势和叶片导水率

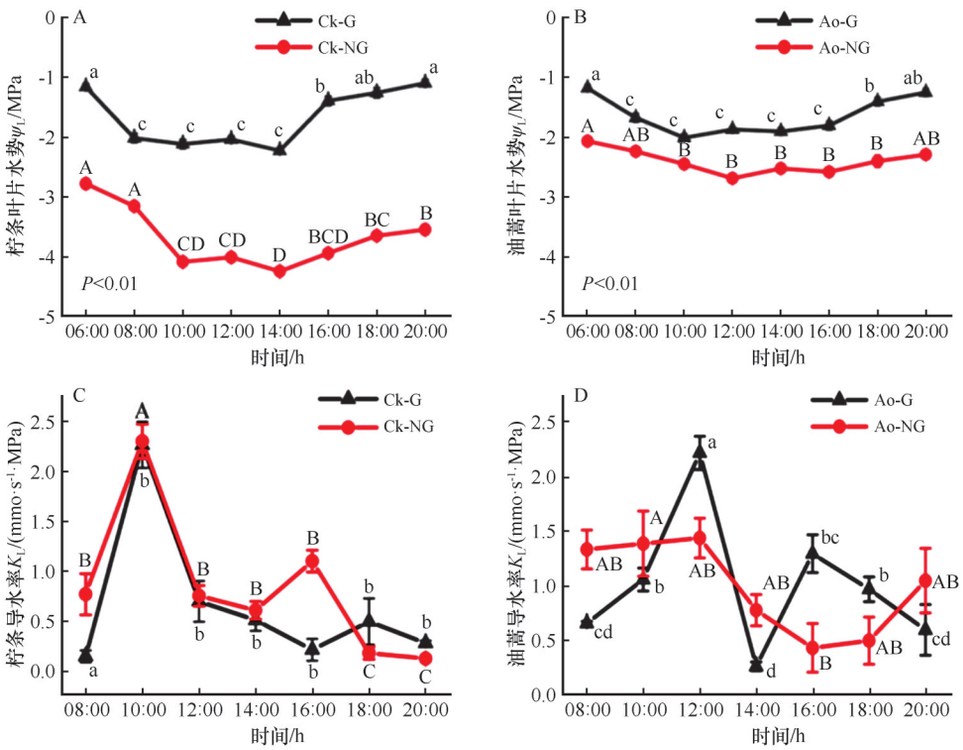
柠条和油蒿的叶片水势(Ψ_L)和导水率(K_L)均表现出明显的日变化特征，两物种Ψ_L在清晨较高，随后逐渐下降，并在14:00前后达到最低值(图2)。不同水分条件下两物种Ψ_L有地下水条件均高于无地下水条件(P<0.01)，无地下水条件下柠条和油蒿的Ψ_L最低值分别为−4.1 MPa和−2.6 MPa，而在有地下水条件下其最低值分别为−2.1 MPa和−2.0 MPa，且柠条在两种处理下的下降幅度均大于油蒿。K_L在两物种中均表现出明显的日变化波动，总体呈现上午升高−中午降低−下午再波动调整的特征。不



注：G和NG分别表示有地下水和无地下水条件

图1　环境因子日变化

Fig.1　Diurnal variation of environmental factors



注:同一曲线中不同小写字母表示有地下水条件不同时间点之间差异显著(P<0.05),
不同大写字母表示无地下水条件下不同时间点之间差异显著(P<0.05)

图2 柠条和油蒿叶片水势和导水率日变化

Fig.2 Diurnal variations in leaf water potential and hydraulic conductance in *C. korshinskii* (*Ck*) and *A. ordosica* (*Ao*)

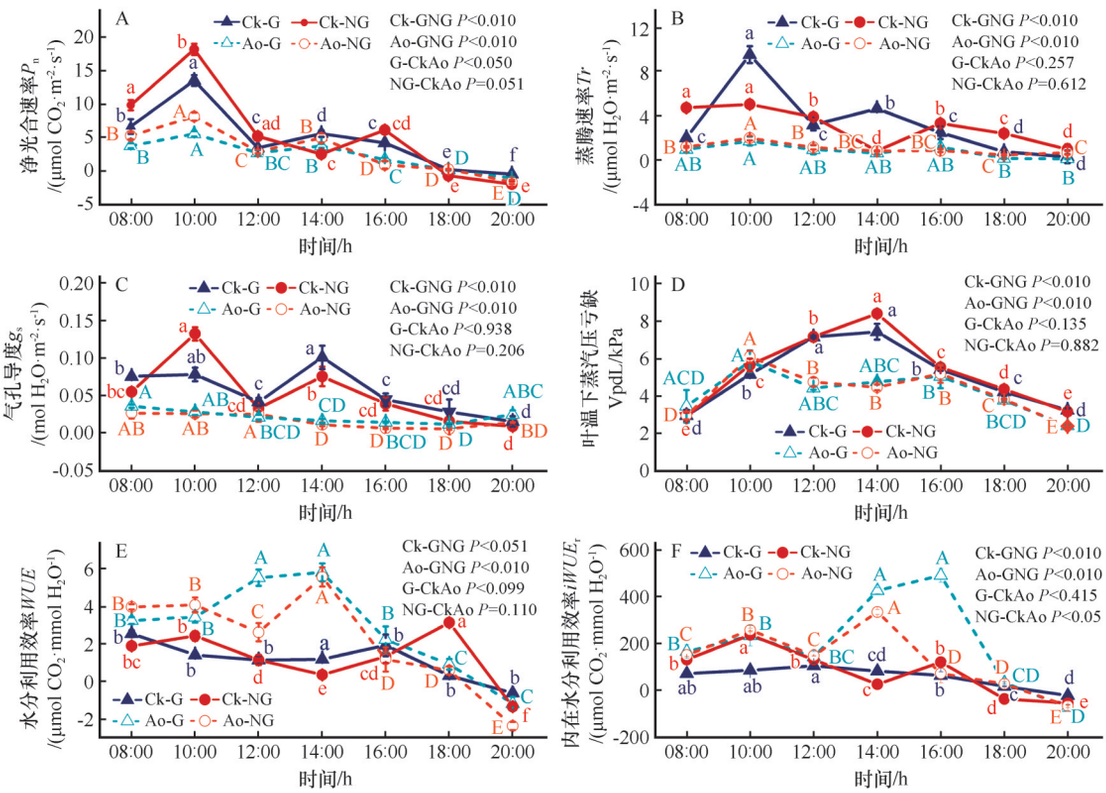
同处理下,K_L的日动态响应存在明显种间差异。柠条在无地下水条件下于部分时段表现出较高的K_L,而油蒿则在有地下水条件下中午至下午时段维持较高的K_L。

2.3 柠条和油蒿叶片的气体交换参数日变化规律

柠条和油蒿P_n和Tr在两种地下水条件下均呈现“双峰”变化趋势,峰值分别出现在10:00和16:00左右,且第一个峰值高于第二个峰值(图3)。有地下水条件下二者的P_n和Tr双峰特征更为明显,整体水平也显著高于无地下水条件(P<0.05)。两物种g_s在有地下水条件下均维持在较高水平,油蒿在10:00达到最高值,而柠条在14:00左右达到峰值;在无地下水条件下两物种g_s整体处于较低水平,日变化幅度较小,基本维持在0~0.05 mol·m^{-2}·s^{-1}。两物种叶温下蒸汽压亏缺(VPD_L)在有地下水条件下表现为先上升后下降的趋势,并在中午至午后时段达到峰值,且有地下水条件显著高于无地下水条件(P<0.05)。无地下水条件下柠条和油蒿的WUE和$iWUE$整体高于有地下水条件(P<0.05),其中$iWUE$的处理间差异更显著。但在有地下水条件下二者的高值出现时间相对滞后,尤其第二个峰值多出现在16:00—18:00。物种间比较表明,在有地下水条件油蒿P_n峰值显著高于柠条,而无地下水条件下油蒿$iWUE$峰值显著高于柠条(P<0.05)。

采用双峰高斯方程对不同处理下柠条和油蒿P_n和Tr日变化进行拟合,结果发现除油蒿无地下水处理外,其余处理下两物种P_n和Tr的日变化能够较好的拟合为双峰高斯方程(表1)。在有地下水条件下柠条的P_n和Tr拟合精度整体较高,其R^2均为0.99(P<0.05),对应的A_1分别为1.97和8.83,A_2分别为0.91和4.80;而油蒿同样表现出较高的拟合精度,P_n和T_r的R^2分别为0.99和0.95(P<0.01),对应的A_1分别为20.61和6.07,A_2分别为8.61和4.74。而在无地下水条件下柠条P_n和Tr的拟合效果仍较好,R^2分别为0.97和0.99(P<0.05),对应的A_1分别为14.68和2.01,A_2分别为9.66和1.27;油蒿P_n和Tr的R^2分别为0.97和0.94,但未达到显著水平(P>0.05),对应的A_1分别为11.65和1.35,A_2分别为5.48和0.24。

基于双峰高斯方程拟合结果,进一步计算了单位叶面积日光合碳同化量(P_nDL)和日蒸腾量(TrDL)。总体来看,地下水补给显著提高了两种灌



注：Ck-GNG 表示柠条有、无地下水条件间的比较，Ao-GNG 表示油蒿有、无地下水条件间的比较，G-CkAo 表示有地下水条件下柠条与油蒿间的比较，NG-CkAo 表示无地下水条件下柠条锦鸡儿与油蒿间的比较。同一曲线中不同小写字母表示有地下水条件下不同时间点之间差异显著（P<0.05），不同大写字母表示无地下水条件下不同时间点之间差异显著（P<0.05）

图 3　不同地下水条件下柠条和油蒿气体交换参数日变化。

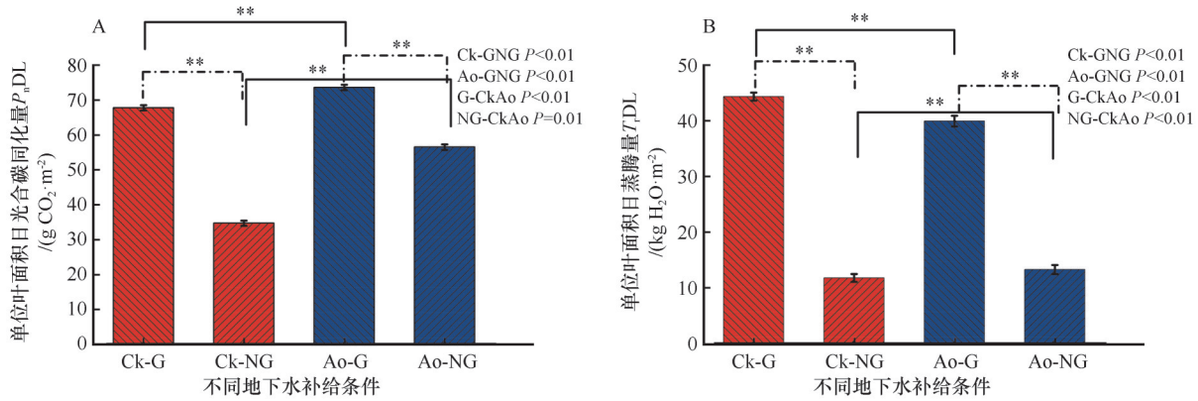
Fig.3　Diurnal variations in gas exchange parameters of *C. korshinskii* and *A. ordosica* under different groundwater conditions

表 1　柠条和油蒿净光合速率和蒸腾速率双峰高斯方程拟合参数

Table 1　Fitting parameters of the bimodal Gaussian equation for net photosynthetic rate and transpiration rate of *Caragana korshinskii* and *Artemisia ordosica*

物种（处理）	指标	R^2	P 值	峰值 1 (A_1)	峰值 2 (A_2)
柠条（有地下水）	净光合速率	0.99	<0.05	1.97	0.91
柠条（无地下水）	净光合速率	0.97	<0.05	14.68	9.66
油蒿（有地下水）	净光合速率	0.99	<0.01	20.61	8.61
油蒿（无地下水）	净光合速率	0.97	0.057	11.65	5.48
柠条（有地下水）	蒸腾速率	0.99	<0.01	8.83	4.80
柠条（无地下水）	蒸腾速率	0.99	<0.05	2.01	1.27
油蒿（有地下水）	蒸腾速率	0.95	<0.01	6.07	4.74
油蒿（无地下水）	蒸腾速率	0.94	0.116	1.35	0.24

木的 P_nDL 和 TrDL（P<0.01）。在有地下水条件下，柠条和油蒿的 P_nDL 分别为 67.9、73.7 g·m^{-2}，均显著高于无地下水条件下的 34.7、56.6 g·m^{-2}，增幅分别为 1.9 倍和 1.3 倍（图 4）。相应地，两物种 TrDL 在有地下水条件下分别达到 44.3、39.9 kg·m^{-2}，显著高于无地下水条件下的 11.8、13.3 kg·m^{-2}，增幅分别为 3.8 倍和 3 倍。物种间比较表明，油蒿在两种水分条件下 P_nDL 均高于柠条，而柠条在有地下水条件下的 TrDL 高于油蒿。总体而言，地下水补给显著增强了两种灌木的日尺度碳同化与水分消耗能力，但油蒿表现出更高的日碳同化水平，而柠条在有地下水条件下表现出更高的蒸腾量。



注：Ck-GNG表示柠条有、无地下水条件间的比较，Ao-GNG表示油蒿有、无地下水条件间的比较，G-CkAo表示有地下水条件下柠条与油蒿间的比较，NG-CkAo表示无地下水条件下柠条锦鸡儿与油蒿间的比较。

图4 不同条件下柠条和油蒿叶片的单位叶面积日光合碳同化量和日蒸腾量。

Fig.4 Daily photosynthetic carbon assimilation and transpiration per unit leaf area of *Caragana korshinskii* and *Artemisia ordosica* leaves under different conditions

2.4 柠条和油蒿气体交换参数与环境因子间的关系

冗余分析(RDA)结果表明，不同水分条件下两种灌木气体交换特征与环境因子的耦合关系存在显著差异(图5)。在有地下水条件下，柠条和油蒿第一轴解释率分别为93.95%和70.42%，变量间关系较为集中；而在无地下水条件下，柠条和油蒿第一轴解释率分别降至59.26%和30.86%。在有地下水条件下，柠条和油蒿 P_n、Tr、g_s、WUE、$iWUE$ 和 K_L 与 SWC 正相关，而与 VPD_L 负相关，Ψ_L 则与 T_s 正相关。相比之下，在无地下水条件下，排序轴解释率下降，柠条和油蒿 VPD_L 与 VPD、SWC 正相关，而 g_s、K_L 和 Ψ_L 则与 VPD、SWC、T_s 负相关，总体来看，有地下水条件下两物种气体交换参数与环境因子的关系较为集中，土壤水分的促进作用更为突出，无地下水条件下气体交换参数与环境因子的关系趋于分散，植物气体交换过程受多因子共同约束的特征更加明显。

3 讨论

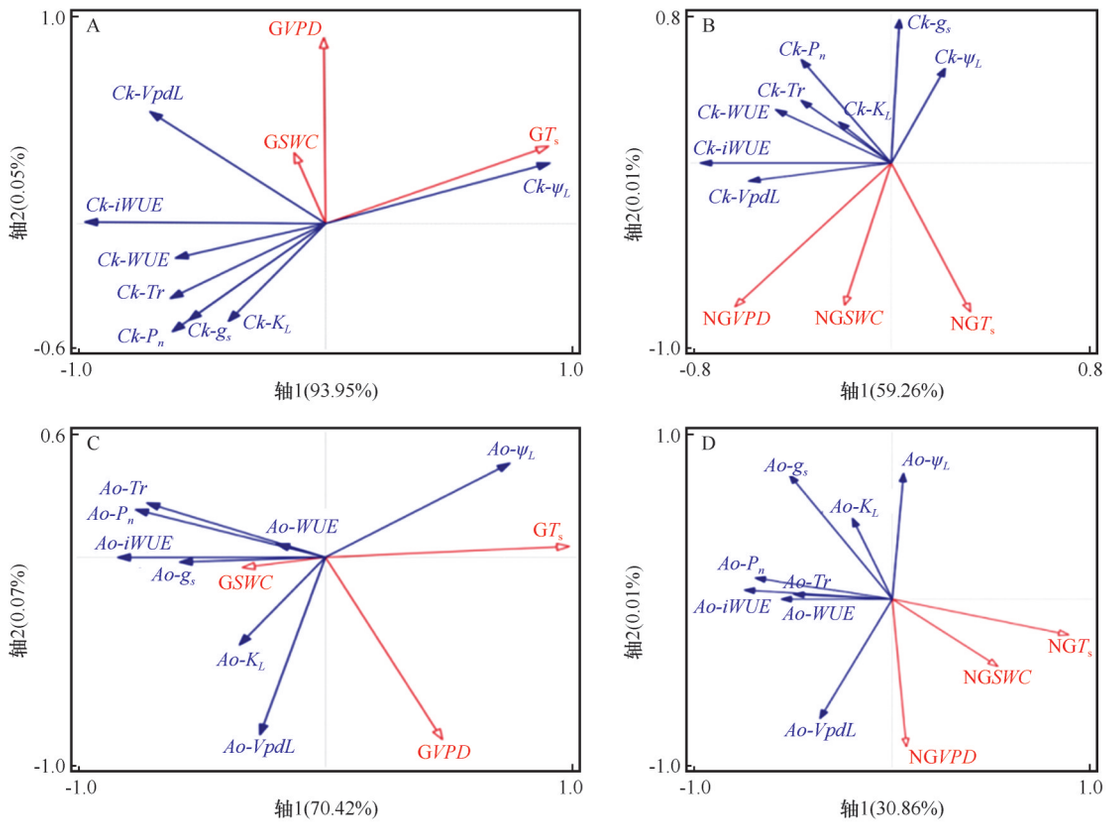
3.1 地下水补给对土壤及植物水分状况的影响

水分是干旱区植被生长与生存的主要限制因子，也是人工植被重建和生态恢复中首要考虑的因子[16]。本研究分析了环境因子变化，测定前后 T_a 和 VPD 等环境因子无显著差异，相比之下 SWC 和 T_s 相差较大，说明地下水补给所造成的主要环境差异并非来自大气因子，而是来自土壤水分条件的改变。地下水补给提高了两物种的 Ψ_L，并重塑了叶片导水率的日动态特征，从而改善了输水过程的稳定性。在有地下水条件下柠条和油蒿维持了较高的 Ψ_L，而在无地下水条件下 Ψ_L 显著降低，说明地下水补给能够有效缓解土壤干旱对植株体内水分平衡的破坏，维持较高的叶片水分状态[17]。与此同时柠条 Ψ_L 下降幅度明显大于油蒿，表明其对地下水变化的敏感性更强，而油蒿在不同水分条件下表现出相对更稳定的水分状态。K_L 进一步揭示了地下水对植株输水过程的调节作用，结果表明两物种 K_L 均表现出明显的日变化波动，其通常在上午达到较高值，随后下降，并在下午出现再次调整。这说明植物输水能力并非静态特征，而是随蒸腾需求和体内水分状况进行动态调节[18]。

总体而言，地下水补给提高了两物种的水分可利用性，维持了较高的叶片水势，并改善了输水过程的稳定性；而在无地下水条件下，土壤干旱加剧植株水分亏缺，导致叶片水势下降并限制体内水分传输；这种输水受限现象通常与木质部空穴化和栓塞加剧、进而引发水力功能失效有关[19]。物种间比较表明，柠条对地下水条件变化的响应幅度更大，表现出较高的环境敏感性；油蒿则在地下水补给下表现出更稳定的输水维持能力和更强的水分缓冲能力。

3.2 光合与蒸腾日变化动态及量化

柠条和油蒿光合和蒸腾速率在日尺度上普遍呈双峰型曲线变化规律，这与环境因子的协同作用密切相关。本研究结果表明柠条和油蒿在两种地



注：Ck-Pn 和 Ao-Pn 分别表示柠条和油蒿的净光合速率，Ck-Tr 和 Ao-Tr 分别表示柠条和油蒿的蒸腾速率，Ck-gs 和 Ao-gs 分别表示柠条和油蒿的气孔导度，Ck-WUE 和 Ao-WUE 分别表示柠条和油蒿的水分利用效率，Ck-iWUE 和 Ao-iWUE 分别表示柠条和油蒿的内在水分利用效率，Ck-ΨL 和 Ao-ΨL 分别表示柠条和油蒿的叶片水势，Ck-KL 和 Ao-KL 分别表示柠条和油蒿的叶片水力导度，Ck-VpdL 和 Ao-VpdL 分别表示柠条和油蒿的叶片与空气间水汽压亏缺。GSWC 和 NGSWC 分别表示有、无地下水条件下的土壤体积含水量，GVPD 和 NGVPD 分别表示有、无地下水条件下的水汽压亏缺，GTs 和 NGTs 分别表示有、无地下水条件下的土壤温度

图 5　环境因子与气体交换参数 RDA 分析

Fig.5　Redundancy analysis（RDA）of environmental factors and gas exchange parameters

下水条件下均表现出双峰型日变化，且中午出现明显的“光合午休”现象，这与已有研究结果一致[20]。此外，在有地下水条件下柠条和油蒿 P_n、g_s 和 *Tr* 的峰值明显高于无地下水条件，整体光合和蒸腾能力更强。表明地下水补给改善了叶片水分状态和输水过程，从而使气孔在关键时段保持较高开放度，并促进了 CO_2 吸收和水分传输。相反在无地下水条件下，土壤水分受限导致叶片水势下降，植物通过气孔调节降低蒸腾以缓解水分亏缺压力，进而限制了碳同化过程。蒸散发是陆地生态系统水量平衡和水循环的关键组成部分，也是干旱沙区主要的水分散失途径[21]。蒸渗仪是目前直接测量蒸散发的常用方法，也是获取实际蒸散发数据的重要手段[22]，然而蒸渗仪无法将土壤蒸散量和植物蒸腾量区分开，因此本研究基于双峰高斯方程对柠条和油蒿 P_n 和 *Tr* 的日变化进行拟合，并计算了单位叶面积 P_nDL 和 *Tr*DL。结果表明，油蒿在两种地下水条件下 P_nDL 均高于柠条，而 *Tr*DL 仅在无地下水条件下高于柠条，说明其在维持较稳定碳收益的同时对水分损失的控制更严格，与此同时地下水补给显著提高了两物种的 P_nDL 和 *Tr*DL，且蒸腾量的增幅显著高于光合碳同化量。本结果表明在水分条件改善时植物首先增强的是水分传输和蒸腾过程，而光合碳固定的提升相对较为缓和；而在水分受限时植物则通过优先抑制蒸腾来降低耗水风险，以维持基本的碳同化功能[23]。

因此，P_nDL 和 *Tr*DL 的量化结果进一步揭示了两种固沙灌木在干旱环境中的碳水权衡特征，即植物并非单纯追求碳收益最大化，而是在碳同化和水分损失之间进行动态调节[24]。该权衡机制反映了植物在水分胁迫下通过气孔行为调控资源利用方式的适应策略，也是其维持生理活动和适应干旱环

境的重要基础。

3.3 柠条和油蒿气体交换日变化的驱动机制

RDA分析表明*SWC*、T_a和*VPD*是驱动气体交换日变化的核心环境因子[25]。不同地下水条件下两物种气体交换参数与环境因子的耦合关系存在明显差异，说明地下水补给不仅改变了土壤水分条件，也进一步影响了环境因子对植物气体交换过程的作用方式。在有地下水条件下，两物种P_n、g_s和*Tr*等气体交换参数均与*SWC*正相关，而与T_a和*VPD*负相关，说明地下水补给增强了土壤水分对气体交换的促进作用，同时高温和大气干旱仍对叶片生理活动形成抑制[26]。在无地下水条件下，两物种气体交换过程均受到*SWC*、T_a和*VPD*的共同约束，其中土壤水分限制作用增强，而较高的VPD和温度进一步抑制了光合与蒸腾过程，表明地下水条件变化改变了环境因子对气体交换的调控方式[27]。K_L始终与P_n、g_s、*Tr*正相关，说明植物体内输水过程是连接外部环境变化与叶片气体交换的重要内在环节[28]。有地下水条件下较高的土壤水分可利用性有助于维持叶片水势和输水能力，从而保证较高的气孔开放程度和碳同化水平；而在无地下水条件下，植株则通过降低g_s和*Tr*来缓解水分亏缺压力，体现出在碳获取与水分消耗之间的共同调节特征[29]。

总体来看，*SWC*、T_a和*VPD*构成了影响两种灌木气体交换的核心环境因子，而叶片导水率和叶片水势所表征的植物水力状态则是连接外部水分环境与叶片气体交换过程的关键内在环节[30]。二者共同决定了柠条和油蒿日尺度气体交换过程的变化规律及物种间差异。柠条对环境因子响应敏感，水分利用效率受水分供给波动影响显著；而油蒿在干旱环境中表现出较强的稳定性，体现出其稳定的水分利用效率[31-33]。

4 结论

地下水补给对柠条与油蒿日尺度气体交换过程具有显著调控作用。有地下水条件下土壤水分可利用性提高，植株水分状况得到改善，叶片水势和输水过程在关键时段得到较好维持，两物种净光合速率和蒸腾速率日动态均呈明显双峰型，且整体水平显著高于无地下水条件；相应地，单位叶面积日累积碳同化量和蒸腾量亦明显增加，表明地下水补给能够有效缓解土壤水分胁迫并增强叶片气体交换能力。两物种对地下水条件变化的响应幅度存在明显差异：柠条在两种地下水条件下气体交换参数及其日累积量变化更为显著，尤其蒸腾过程对地下水补给的响应更强；油蒿相关指标波动相对较小，且在无地下水条件下仍能维持较为稳定的光合与蒸腾水平。上述结果表明，两物种在碳获取与水分利用之间存在不同的权衡方式，柠条在水分条件较好时倾向于通过提高气孔开放和蒸腾强度来增强碳收益，表现为趋利型策略；油蒿则通过相对严格的水分调控维持较稳定的碳水平衡，表现为保守型策略。这种差异不仅反映了两种固沙灌木在水分利用效率和抗旱适应策略上的分化，也为干旱区植被恢复与水分平衡调控提供了重要的生态学依据。

参考文献：

[1] Shu Y, Jiang L, Liu F, et al. Effects of plant diversity and abiotic factors on the multifunctionality of an arid desert ecosystem [J]. PLoS One, 2022, 17(6): e0266320.

[2] Wu X, Wang X, Wang P, et al. Effects of groundwater depth on ecological stoichiometric characteristics of assimilated branches and soil of two desert plants [J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1225907.

[3] 张钰佳，张克海，方桥. 植物固沙技术研究进展及展望[J]. 绿色科技，2020(6)：123-124.

[4] 戴永明，李明亮，徐明哲，等. 毛乌素沙地不同固沙阶段油蒿叶片性状变化[J]. 植物生态学报，2022，46(11)：1376-1387.

[5] Zhang F, Yu M, Zhang J, et al. Which contributes more in predictor of desert shrubs traits: intra-annual or inter-annual precipitation change? [J]. Ecological Indicators, 2024, 163: 112037.

[6] 李锦荣，阿拉腾图雅，张凤杰，等. 乌兰布和沙漠周边典型植物群落防风阻沙效果[J]. 中国沙漠，2022，42(6)：65-72.

[7] Liu H, Zhao W, He Z, et al. Effects of *Artemisia ordosica* on wind speed and sediment transport at different planting densities in arid sandy land [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 543-552.

[8] 徐铭泽，刘鹏，田赟，等. 毛乌素沙地油蒿叶性状对光能利用效率动态的影响[J]. 生态学报，2023，43(12)：1-12.

[9] 冯秋红，史作民，董莉莉. 植物功能性状对环境的响应及其应用[J]. 林业科学，2008，44(4)：125-131.

[10] Xie Q, Chen K, Li T, et al. Heat and drought have exacerbated the midday depression observed in a subtropical fir forest by a geostationary satellite [J]. Forests, 2024, 15(9): 1572.

[11] Guan X, Chen J M, Shen H, et al. A modified two-leaf light use efficiency model for improving the simulation of GPP using a

radiation scalar[J].Agricultural and Forest Meteorology,2021,307:108546.

[12] Miao Y X,Cai Y,Wu H,Wang D.Diurnal and seasonal variations in the photosynthetic characteristics and the gas exchange simulations of two rice cultivars grown at ambient and elevated CO_2[J].Frontiers in Plant Science,2021,12:651606.

[13] 张志山,韩高玲,霍建强,等.固沙灌木柠条锦鸡儿和中间锦鸡儿木质部导水与叶片光合能力对土壤水分的响应[J].植物生态学报,2023,47(10):1422-1431.

[14] 张志山,李新荣,赵洋,等.沙坡头生态水文学研究进展及水量平衡自动模拟监测系统[J].中国沙漠,2018,38(6):1119-1135.

[15] Brodribb T J,Powers J,Cochard H,et al.Hanging by a thread? Forests and drought[J].Science,2020,368(6488):261-266.

[16] Li B B,Li P P,Zhang W T,et al.Deep soil moisture limits the sustainable vegetation restoration in arid and semi-arid Loess Plateau[J].Geoderma,2021,399:115122.

[17] Huo J,Shi Y,Chen J,et al.Hydraulic trade-off and coordination strategies mediated by leaf functional traits of desert shrubs[J].Frontiers in Plant Science,2022,13:938758.

[18] Chen S,Chen Z,Kong Z,et al.The increase of leaf water potential and whole-tree hydraulic conductance promotes canopy conductance and transpiration of *Pinus tabulaeformis* during soil droughts[J].Trees,2023,37:41-52.

[19] Johnson D M,Katul G,Domec J C.Catastrophic hydraulic failure and tipping points in plants[J].Plant,Cell & Environment,2022,45(8):2231-2266.

[20] Xu D H,Fang X W,Su P X,et al.Ecophysiological responses of *Caragana korshinskii* Kom.under extreme drought stress:leaf abscission and stem survives[J].Photosynthetica,2012,50(4):541-548.

[21] Xiong J,Xu L,Chandanpurkar H A,et al.ET-WB:water-balance-based estimations of terrestrial evaporation over global land and major global basins[J].Earth System Science Data,2023,15(10):4571-4597.

[22] Sagar A,Hasan M,Singh D K,et al.Development of smart weighing lysimeter for measuring evapotranspiration and developing crop coefficient for greenhouse chrysanthemum[J].Sensors,2022,22(16):6239.

[23] Johnson D M,Wortemann R,McCulloh K A,et al.A test of the hydraulic vulnerability segmentation hypothesis in angiosperm and conifer tree species[J].Tree Physiology,2016,36(8):983-993.

[24] Luo Z,Nie Y,Chen H,et al.Water age dynamics in plant transpiration:the effects of climate patterns and rooting depth[J].Water Resources Research,2023,59(4):e2022WR033566.

[25] Yu T,Jiapaer G,Bao A,et al.Disentangling the relative effects of soil moisture and vapor pressure deficit on photosynthesis in dryland Central Asia[J].Ecological Indicators,2022,137:108698.

[26] Deng J,Ding G,Gao G,et al.The sap flow dynamics and response of *Hedysarum scoparium* to environmental factors in semiarid Northwestern China[J].PLoS One,2015,10(7):e0131683.

[27] Mao J,Luo Y,Jin C,et al.Response of leaf photosynthesis-transpiration coupling to biotic and abiotic factors in the typical desert shrub *Artemisia ordosica*[J].Sustainability,2023,15(13):10216.

[28] Andivia E,Ruiz-Benito P,Diaz-Martinez P,et al.Inter-specific tolerance to recurrent droughts of pine species revealed in saplings rather than adult trees[J].Forest Ecology and Management,2020,459:117848.

[29] 李鑫豪,闫慧娟,卫腾宙,等.油蒿资源利用效率在生长季的相对变化及对环境因子的响应[J].植物生态学报,2019,43(10):889-898.

[30] Wang X,Manzoni S,et al.Leaf hydraulic vulnerability triggers the decline in stomatal conductance and photosynthesis during drought[J].New Phytologist,2018,218(2):513-525.

[31] Ma F,Na X,Xu T.Drought responses of three closely related *Caragana* species:implication for their vicarious distribution[J].Ecology and Evolution,2016,6(9):2763-2773.

[32] Zhang Y,Wang X,Hu R,et al.Stemflow in two xerophytic shrubs and its significance to soil water and nutrient enrichment[J].Ecological Research,2013,28(4):567-579.

[33] Han G,Huo J,Hu R,et al.Coupling relationships between vegetation and soil in different vegetation types in the Ulan Buh Desert and the Kubuqi Desert[J].Frontiers in Plant Science,2025,16:1505526.

Effects of groundwater on diurnal photosynthetic and transpiration dynamics of *Caragana korshinskii* and *Artemisia ordosica*

Zhao Ziqiang[1], Nan Yicong[2,3], Han Gaoling[2,3], Liu Xiaoni[1],
Shi Yafei[1], Zhang Zhishan[2], Huo Jianqiang[2]

(1. *College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *China*; 2. *Shapotou Desert Research and Experiment Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *China*; 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: In arid desert ecosystems, soil moisture is a key factor limiting vegetation growth and ecosystem functioning, and plant gas exchange is highly sensitive to water status and climatic variation; however, the mechanisms underlying diurnal carbon water coupling remain insufficiently understood. In this study, two typical sand-fixing shrubs, *Caragana korshinskii* and *Artemisia ordosica*, were selected as target species, and two treatments, under groundwater and non-groundwater conditions, were established. Diurnal variations in leaf net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance, leaf water potential, and environmental factors were systematically monitored, and their regulatory mechanisms were analyzed. The results showed that both shrubs exhibited a typical bimodal diurnal pattern in photosynthesis and transpiration, with a pronounced midday depression of photosynthesis. Groundwater supply significantly enhanced the photosynthetic capacity and transpiration rate of both species. Under groundwater conditions, daily photosynthetic carbon assimilation per unit leaf area (P_nDL) of *C. korshinskii* and *A. ordosica* reached 67.9 and 73.7 g $CO_2 \cdot m^{-2}$, respectively, while daily transpiration per unit leaf area (*Tr*DL) reached 44.3 and 39.9 kg $H_2O \cdot m^{-2}$, respectively, all of which were significantly higher than those under non-groundwater conditions. Soil moisture, air temperature, and vapor pressure deficit were identified as the main environmental factors driving diurnal photosynthetic variation. Further analysis showed that the two shrubs adopted distinct trade-off strategies between carbon gain and water consumption. *C. korshinskii* showed relatively high stomatal conductance and transpiration rate but comparatively low water-use efficiency, indicating an "opportunistic" strategy characterized by enhanced stomatal opening and transpiration to promote carbon assimilation. In contrast, *A. ordosica* maintained relatively high water-use efficiency under lower stomatal conductance and transpiration levels, exhibiting a "conservative" water-use strategy. These differences in carbon-water coupling strategies reflect distinct adaptive pathways of the two species to arid environments and provide important implications for vegetation restoration stability and ecosystem adaptability in arid regions.

Key words: gas exchange; groundwater supply; diurnal variation; *Caragana korshinskii*; *Artemisia ordosica*