

研究报告

DOI:10.14188/j.ajsh.20260023

不同土壤水分条件下长梗绞股蓝光合特性动态及其对环境因子的响应

张晓玲¹, 秦凤园², 郭宝林², 陈霜², 曹显俊³, 索凤梅², 李豆豆², 孙超^{1,2*}

(1. 天津中医药大学 中药学院, 天津 301617;

2. 中国医学科学院 北京协和医学院 药用植物研究所, 北京 100094;

3. 安康正大制药有限公司, 陕西 安康 725000)

摘要: 本研究旨在探究不同土壤水分条件下长梗绞股蓝在生长旺盛阶段(6月—10月)光合生理特性在不同时间尺度(日、月)的动态变化及其对环境因子的响应规律。试验在陕西省镇坪县长梗绞股蓝主产区开展,采用完全随机区组设计,设置4个土壤水分处理:雨养对照(CK)和3个灌溉处理(I-1、I-2、I-3, -20 kPa、-55 kPa、-75 kPa)。在生长旺盛期(6月—10月),测量各处理叶片的净光合速率(A_n)、气孔导度(G_s)等光合参数,并同步实时监测环境因子(太阳总辐射(R)、空气温度(T_a)、空气湿度(RH)、水汽压亏缺(VPD))动态变化规律。结合相关性分析与多元回归模型,分析光合特性对环境因子的响应特征,结果表明:各处理下叶片 A_n 日变化均表现为“先升后降”的变化趋势,且其峰值出现时间晚于 G_s 峰值,但早于VPD峰值;此外,7月份峰值出现前,土壤水分灌溉条件下(I-1、I-2和I-3)的 A_n 显著高于对照(CK); A_n 在地上茎叶快速生长期(6月—8月)较高,8月起逐渐降低,其月动态与 R 及VPD的变化趋势基本一致; A_n 日动态受土壤水分条件显著影响。多元回归分析显示:灌溉处理下 A_n 主要受 R 和RH的协同控制;而在土壤水分亏缺条件(CK)下,除 R 和RH外,VPD也对 A_n 产生显著制约。月尺度上, T_a 是驱动最大净光合速率(A_{n-max})月变化的核心环境因子。本研究明确了不同土壤水分条件下长梗绞股蓝在生长旺盛期内不同时间尺度光合特性对环境因子的响应规律,可为水分波动地区长梗绞股蓝的光合效率提升及精准水分管理提供理论依据。

关键词: 长梗绞股蓝; 土壤水分; 光合特性; 环境因子

中图分类号: Q945.3

文献标志码: A

文章编号: 2096-3491(2026)03-0282-09

Photosynthetic characteristics of *Gynostemma longipes* and their responses to environmental factors under different soil moisture conditionsZHANG Xiaoling¹, QIN Fengyuan², GUO Baolin², CHEN Shuang², CAO Xianjun³, SUO Fengmei²,
LI Doudou², SUN Chao^{1,2*}

(1. School of Chinese Materia Medica, Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, Tianjin 301617, China;

2. Institute of Medicinal Plant Development, Chinese Academy of Medical Sciences & Peking Union Medical College, Beijing 100094, China; 3. Ankang Zhengda Pharmaceutical Co., Ltd., Ankang 725000, Shaanxi, China)

Abstract: This study aimed to investigate the dynamic changes in photosynthetic physiological characteristics of *Gynostemma longipes* at daily and monthly scales during its vigorous growth period (June to October) under different soil

收稿日期: 2026-05-11 修回日期: 2026-06-04 接受日期: 2026-06-15

作者简介: 张晓玲(2002-), 女, 硕士生, 主要从事药用植物栽培研究, E-mail: 19913351130@163.com

* 通信作者: 孙超, 男, 博士, 研究员, 主要从事药用植物资源基因的挖掘与利用研究, E-mail: csun@implad.ac.cn

基金项目: 陕西省2024年重点研发计划项目(2024SF-GJHX-10)

引用格式: 张晓玲, 秦凤园, 郭宝林, 等. 不同土壤水分条件下长梗绞股蓝光合特性动态及其对环境因子的响应[J]. 生物资源, 2026, 48(3): 282-290.

Zhang X L, Qin F Y, Guo B L, et al. Photosynthetic characteristics of *Gynostemma longipes* and their responses to environmental factors under different soil moisture conditions [J]. Biotic Resources, 2026, 48(3): 282-290.

moisture conditions, as well as their response patterns to environmental factors. The experiment was conducted in the main production area of *G. longipes* in Zhenping County, Shaanxi Province. A completely randomized block design was employed, comprising four soil moisture treatments: a rain-fed control (CK) and three irrigation treatments (I-1, I-2, I-3) with soil water potentials maintained at -20 kPa, -55 kPa, -75 kPa, respectively. During the vigorous growth period (June to October), net photosynthetic rate (A_n) and stomatal conductance (G_s) were measured for each treatment, while environmental factors—total solar radiation (R), air temperature (T_a), relative humidity (RH), and vapor pressure deficit (VPD)—were synchronously monitored in real time. Correlation analysis and multiple regression models were applied to determine the response characteristics of photosynthetic parameters to environmental factors. The results showed that under different treatments, the diurnal variation of leaf A_n mostly exhibited a unimodal curve, with the peak of A_n occurring later than that of G_s but earlier than that of VPD. Moreover, before the peak in July, A_n under irrigation treatments (I-1, I-2, I-3) was significantly higher than that under the control (CK). A_n was relatively high during the rapid growth period of aboveground stems and leaves (June to August) and gradually decreased from August onward; its monthly dynamics were generally consistent with the trends of R and VPD. The diurnal dynamics of A_n were significantly influenced by soil moisture conditions. Multiple regression analysis revealed that under irrigated conditions (I-1, I-2, I-3), A_n was primarily co-regulated by R and RH; whereas under soil water deficit conditions (CK), VPD also exerted a significant constraining effect on A_n , in addition to R and RH. At the monthly scale, T_a was identified as the core environmental factor driving the monthly variation of the maximum net photosynthetic rate (A_{n-max}). This study clarifies the response patterns of photosynthetic characteristics of *G. longipes* to environmental factors at different time scales (daily and monthly) under different soil moisture conditions during the vigorous growth period, providing a theoretical basis for improving photosynthetic efficiency and implementing precision water management for *G. longipes* in regions with fluctuating water availability.

Key words: *Gynostemma longipes*; soil moisture; photosynthetic characteristics; environmental factors

0 引言

长梗绞股蓝(*Gynostemma longipes* C. Y. Wu ex C. Y. Wu et S. K. Chen)为葫芦科绞股蓝属的多年生攀援草本植物,主要分布于中国陕西南部及四川等地。现代药理学研究表明,长梗绞股蓝含有多种皂苷,具有显著的降血脂、调节糖脂代谢^[1]、抗肿瘤^[2]等显著功效。其中,绞股蓝皂苷 XLIX 和绞股蓝皂苷 A 等成分是“绞股蓝总苷片(胶囊)”“扶正化瘀胶囊”等中药制剂的有效成分。然而,随着市场需求的不断增加,野生绞股蓝资源因过度采挖等因素而急剧减少,发展人工规范化种植技术已成为缓解其资源紧缺的关键途径^[3]。团队前期研究表明,在不同生境^[4]及不同栽培管理(灌溉、施肥)^[5-6]条件下,长梗绞股蓝的皂苷含量相对稳定,而产量则发生显著变化。然而,环境因素显著影响长梗绞股蓝产量的生理生态机制尚不清楚。

光合作用是决定植物产量的核心生理过程,其效率高低直接制约着干物质积累。同时,光合作用极易受到环境因子影响,光照、空气温湿度、土壤水分及大气 CO_2 浓度等变化均会导致净光合速率、气孔导度等光合特性的波动。此外,植物光合生理特性具有显著的日动态和季节变化规律。研究表明,植物光合特性在日尺度和生长季内月尺度上对环境

因子的响应模式存在显著差异:一般而言,日尺度上太阳总辐射是驱动净光合速率日变化的核心环境因子^[7-10],空气温度(T_a)和水汽压亏缺(VPD)对净光合速率的日动态亦具有显著调控作用。在季节尺度上,光照强度与光周期通常是驱动光合能力波动的主导因素,温度的影响次之;而土壤水分仅在出现持续水分亏缺时,才成为限制光合能力的关键环境因子^[11-12]。绞股蓝在遮阴下的光合日动态、叶片发育与光合能力的关系、光质对光合效率的影响等基础光合特性已有报道^[13-15],但针对其光合生理特性在多时间尺度(日、月)上的动态变化及其与关键环境因子互作关系,尤其是在不同土壤水分条件下的系统研究尚不充分。

因此,本试验以长梗绞股蓝为材料,设置不同土壤水分处理,系统观测其在生长旺盛阶段(6月—10月)光合参数的动态变化特征,解析光合特性对环境因子在不同时间尺度上的响应规律,以期为长梗绞股蓝精准水分管理提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验地况和植物材料

本试验在陕西省安康市镇坪县前进村的安康正大萃源康绞股蓝科研示范基地开展。该基地位于陕

西省东南部,大巴山北麓。该地区地理坐标为东经 $109^{\circ}11' \sim 109^{\circ}38'$,北纬 $31^{\circ}42' \sim 32^{\circ}13'$ 。属于亚热带山地季风气候,气候温和,雨量充沛。年总降水量 $1\,510.2\text{ mm}$,日平均气温为 $13.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,日照时数 $1\,233.3\text{ h}$ 。供试植物材料为长梗绞股蓝,采集自平利县长安镇金沙河村,经郭宝林研究员鉴定,凭证标本保存于中国医学科学院药用植物研究所。采用根状茎作为繁殖材料种植。

1.2 试验方法

试验于2023年3月进行种植,采用完全随机区组设计,设置4个土壤水分处理:雨养对照(CK,自然降水)以及3个灌溉处理,其土壤水势分别控制在I-1(-20 kPa ,水分充足)、I-2(-55 kPa ,轻度亏缺)和I-3(-75 kPa ,中度亏缺)每个处理设3个重复(区组),共计12个试验小区。滴灌系统安装与水分管理参数(滴灌带铺设、张力计布置、灌溉时长、灌溉量及灌溉次数)详见本课题组前期研究^[5]。简而言之,采用“一行一带”滴灌,滴头间距 30 cm ,流量 2.4 L/h ,并于滴头正下方 10 cm 处安装T20张力计(Sinton Technology公司,北京)连续监测土壤水势。各处理灌溉触发阈值如上所述(I-1: -20 kPa ;I-2: -55 kPa ;I-3: -75 kPa),当水势均值降至阈值时启动灌溉至相应上限。依据文献^[5],I-1、I-2、I-3的单次灌溉量依次分别为 13.3 、 20.0 、 26.7 mm ,灌溉次数分别为31、12、4次。CK处理仅依赖自然降水,生长季内土壤水分波动剧烈,频繁处于干旱状态。在长梗绞股蓝生长旺盛期(6月—10月),测定各处理叶片的光合特性指标,并同步连续监测主要环境因子。

1.3 指标测定

光合指标:采用LI-6400光合测定仪(LI-COR,美国Lincoln公司)测定,每处理选取3株长势一致的植株,每株固定1片标记叶片,整个生长季追踪测定。叶片均选取主茎顶端向下第3~4片完全展开的成熟度相似、生长方位一致的健康叶片。测定净光合速率(A_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)。测定时间为长梗绞股蓝地上茎叶快速生长期(6月—8月)和地下根茎快速生长期(9月—10月),每月选定一个典型晴天,于7:00~19:00每小时测定一次各处理叶片的光合特性指标,每次每个处理分别选择3个叶片重复测定,共测定5次日动态。依据上述测定的光合日动态数据,计算各处理叶片光合特性日最大值($A_{n\text{-max}}$ 、 $G_{s\text{-max}}$ 等),用于比较不同处理间光合特性在各月份的变化特征。

环境因子监测:在试验地安装一台全自动气象站,连续监测太阳总辐射(R)、空气温度(T_a)、空气湿度(RH)等气象因子。水汽压亏缺(VPD)根据空气温度和空气湿度,按照文献^[16]的方法进行计算。

1.4 数据处理

使用Microsoft Excel 2019对试验数据进行整理,利用SPSS 26.0软件进行统计分析,包括单因素方差分析(ANOVA)、相关性分析及多元逐步回归分析(Stepwise)。采用Origin 2024软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 长梗绞股蓝光合特性的日动态变化特征

在不同土壤水分处理下,长梗绞股蓝叶片光合特性在地上茎叶快速生长期(6月—8月)和地下根茎快速生长期(9月—10月)的日动态变化如图1所示。环境因子中太阳总辐射(R)与水汽压亏缺(VPD)均呈“单峰型”日变化,VPD随光照增强而上升、午后逐步下降, R 的峰值在各月份均出现在11:00~13:00,VPD的峰值则相对延后,多集中在13:00~14:00,见图1(a)和图1(b)。RH的变化则呈反“单峰型”:清晨最高,随辐射和温度升高而持续下降,至午后15:00~17:00(6月于13:00前后)降至最低,傍晚略有回升,见图1(c)。 T_a 的变化亦为“单峰型”,其峰值较 R 峰值略有延后,多出现在13:00~15:00,见图1(d)。净光合速率 A_n 日动态在整个生长季均表现为“先升后降”的变化趋势,见图2(a)。各月份的 A_n 日最大值出现在9:00~12:00,根茎生长期各处理的 A_n 较茎叶快速生长期明显降低。不同土壤水分处理间 A_n 日动态也存在显著差异:7月和8月,对照(CK)处理的 A_n 显著低于3个灌溉处理(I-1、I-2、I-3);各月份气孔导度(G_s)的日动态呈“先波动上升后缓慢下降”的趋势,其峰值出现在7:30~9:30,早于 A_n 峰值。I-2和I-3处理的 G_s 值普遍低于CK和I-1处理,其中I-3处理降低最为明显,见图2(b)。 A_n 和 G_s 的峰值出现时间均早于 R 和VPD的峰值。

2.2 长梗绞股蓝光合特性的月尺度变化特征

4种土壤水分处理下长梗绞股蓝叶片光合特性及气象因子的月尺度变化(6月—10月),如图3所示。3个灌溉处理下,最大净光合速率($A_{n\text{-max}}$)随月份呈先升高后降低的变化趋势,地上茎叶快速生长期(6月—8月)处于较高水平,且 $A_{n\text{-max}}$ 的月变化与太阳总辐射(R)和水汽压亏缺(VPD)的变化趋势基本一致(图3)。同时,RH随月份呈下降而后上升趋势,而 T_a 先升后降,峰值出现在7月。在7月份3个

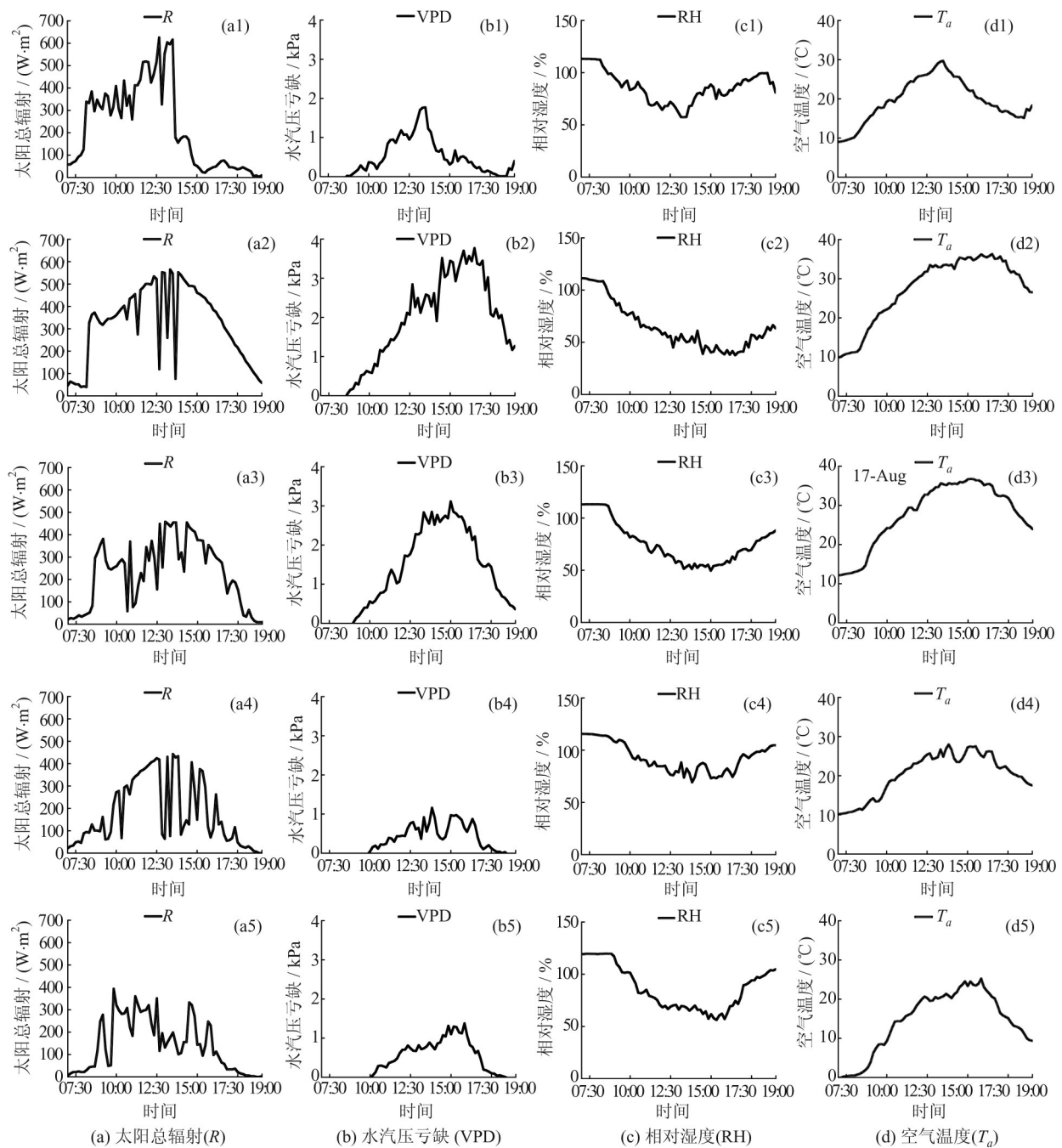


图1 6月—10月份气象因子的日动态变化特征

Figure 1 Diurnal dynamics of meteorological factors from June to October

注:数字1、2、3、4、5分别对应5个测定日期:6月、7月、8月、9月、10月。

Note: Numbers 1, 2, 3, 4, and 5 correspond to the five measurement dates: Jun, Jul, Aug, Sep, and Oct.

灌溉处理(I-1、I-2和I-3)的 A_{n-max} 显著高出CK处理43.2%~61.5%。然而,最大气孔导度(G_{s-max})和蒸腾速率(T_{r-max})在不同处理间无显著差异,两者变化趋势一致,均在8月达到峰值,滞后于 A_{n-max} 的峰值时间。胞间 CO_2 浓度最大值(C_{i-max})变化较为平稳,不同处理间无显著差异。

2.3 长梗绞股蓝叶片光合特性与环境因子关系

不同土壤水分处理下,长梗绞股蓝叶片光合日

动态与环境因子的相关性如表1所示。各处理下, A_n 均与太阳总辐射(R)呈极显著正相关($P < 0.01$),而与相对湿度(RH)、空气温度(T_a)的相关性较弱,表明 R 是驱动 A_n 日变化的核心环境因子。 G_s 与 R 的相关性因土壤水分条件而有所不同;各处理下, G_s 与 RH 均呈极显著负相关、与 T_a 呈极显著正相关($P < 0.01$),表明 RH 、 T_a 是调控 G_s 日变化的关键环境因子。

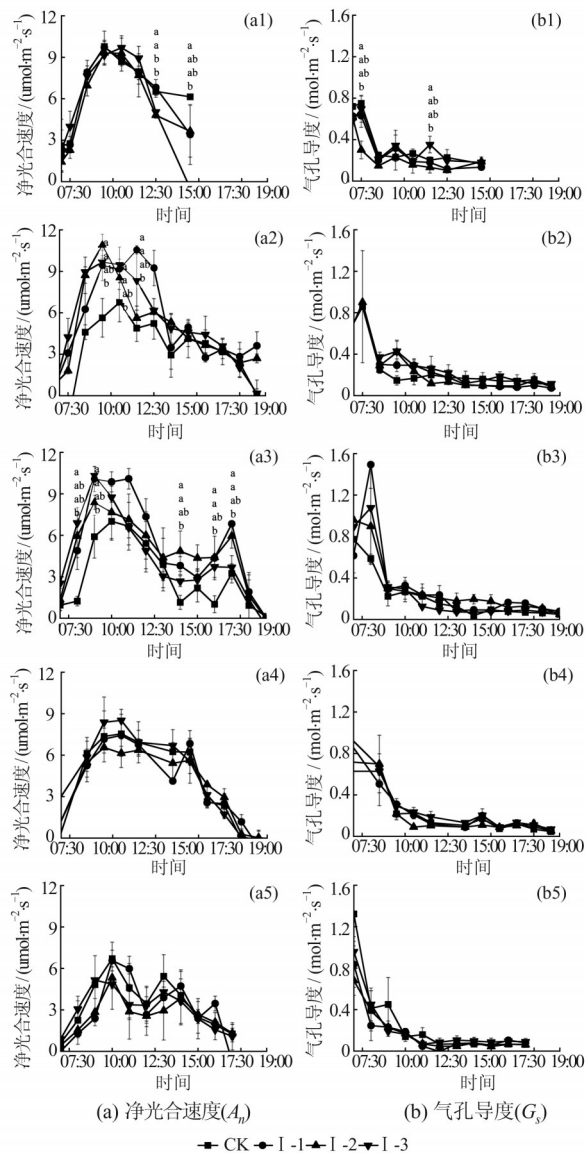


图2 不同土壤水分处理下长梗绞股蓝叶片光合参数的日动态变化特征

Figure 2 Diurnal dynamics of photosynthetic parameters in leaves of *Gynostemma longipes* under different soil moisture treatments

注:数字1、2、3、4、5分别对应5个测定日期:6月、7月、8月、9月、10月。

Note: Numbers 1, 2, 3, 4, and 5 correspond to the five measurement dates: Jun, Jul, Aug, Sep, and Oct.

为进一步明确长梗绞股蓝主要光合特性 A_n 与关键环境因子 R 、 G_s 与环境因子 RH 、 T_a 之间的定量关系,进行了回归分析(图4)。结果表明: A_n 与 R 呈对数函数关系($R^2=0.436$),见图4(a); G_s 与 RH 呈线性正相关($R^2=0.414$),见图4(b),与 T_a 呈二次多项式负相关($R^2=0.747$),见图4(c)。

相关性分析仅能揭示两个变量间的表面关联,多元逐步回归分析能够有效筛选出对目标变量变异

贡献显著的关键影响因子,进而构建最优回归方程,是对相关性分析的深化与延伸。前述结果(§2.1和§2.2)表明,长梗绞股蓝叶片 A_n 的动态变化特征在不同土壤水分处理间存在显著差异,且在不同时间尺度(日、月)上表现各异。为此,本试验采用多元逐步回归分析,探究不同土壤水分处理下 A_n 与环境因子(R 、 VPD 、 RH 、 T_a)之间的定量关系,结果如表2所示:CK处理下, A_n 的最优回归方程包含 R 与 VPD ($R^2=0.746$, $P<0.001$);I-1处理下, A_n 的最优回归方程包含 RH 和 R ($R^2=0.626$, $P=0.001$);I-2处理下,回归方程与I-1一致($R^2=0.704$, $P<0.001$);I-3处理下, A_n 的最优回归方程同样包含 RH 和 R ($R^2=0.803$, $P<0.001$)。综上,在灌溉处理(I-1、I-2和I-3)下,长梗绞股蓝叶片的净光合速率主要受 R 和 RH 的共同控制,而在土壤水分亏缺条件(CK)下,除 R 和 RH 外, VPD 也对 A_n 产生显著的制约作用。

不同土壤水分处理下,长梗绞股蓝叶片月尺度光合参数(A_{n-max} 与 G_{s-max})与环境因子的相关性如表3所示。 A_{n-max} 的月变化与环境因子的相关性因土壤水分条件而有所不同:CK处理下, A_{n-max} 与各环境因子的相关性均未达到显著水平;在灌溉处理(I-1、I-2、I-3)下, A_{n-max} 与 T_a 均呈极显著正相关($P<0.05$);此外,I-1和I-2处理下 A_{n-max} 与 R 、 VPD 、 RH 的相关性也达到显著水平($P<0.05$),而I-3处理下则未显著,这表明 T_a 是驱动 A_{n-max} 月变化的核心环境因子。 G_{s-max} 仅在CK处理下与 R 和 T_a 呈显著负相关($P<0.05$),其余处理下均无显著相关性。

3 讨论

3.1 不同土壤水分条件下长梗绞股蓝光合特性的动态变化

本试验中,各土壤水分处理下长梗绞股蓝叶片净光合速率(A_n)的日动态曲线形态随月份发生变化: A_n 日动态在整个生长季均表现为“先升后降”的变化趋势。曲线形态的月份差异主要与气温及光强等环境因子的变化有关。8月气温较高,午后高温加剧了非气孔限制,导致光合速率下降形成“午休”^[17];10月气温虽已下降,但生长季末期叶片衰老可能增加光合系统对午间胁迫的敏感性,从而再次出现双峰特征^[18]。在生长旺盛期(6月—10月), A_n 峰值出现时间晚于 G_s 峰值,表明气孔导度的变化先于净光合速率达到最大,气孔的充分开放为后续光合作用的快速进行提供了 CO_2 供应条件。 G_s 峰值出现后又早于 VPD 峰值,反映气孔对大气干旱环境(以 VPD 升高为表征)的主动适应调节^[19]。综合来

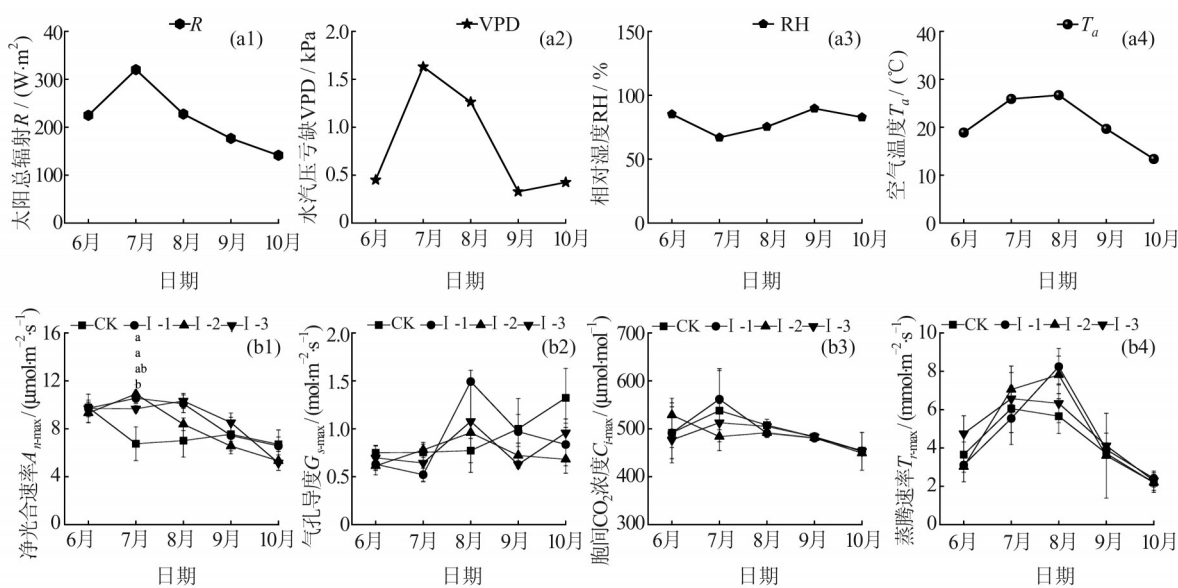


图3 不同土壤水分处理下长梗绞股蓝叶片光合特性及6月—10月环境因子的月尺度变化

Figure 3 Monthly variation of photosynthetic characteristics of *Gynostemma longipes* leaves under different soil moisture treatments and meteorological factors from June to October

表1 不同水分处理下长梗绞股蓝光合参数与环境因子的相关性

Table 1 Correlations between photosynthetic parameters and environmental factors in *Gynostemma longipes* under different soil moisture treatments

处理	光合参数	R	VPD	RH	T_a
CK	A_n	0.505**	-0.370*	-0.114	0.024
	G_s	-0.378*	-0.279	-0.691**	0.630**
I-1	A_n	0.479**	-0.332	-0.04	-0.034
	G_s	-0.355*	-0.465**	-0.610**	0.581**
I-2	A_n	0.543**	-0.286	-0.06	-0.021
	G_s	-0.410**	-0.233	-0.598**	0.570**
I-3	A_n	0.490**	-0.298	-0.268	0.159
	G_s	-0.299	-0.387*	-0.698**	0.624**

*** $P < 0.001$; ** $P < 0.01$; * $P < 0.05$

看,长梗绞股蓝在生长旺盛期的光合作用同时受气孔因素与非气孔因素的共同调控^[20]。在日变化进程中,气孔导度通常先于净光合速率上升,此时气孔因素促进光合;但由于气孔对高温等环境因子的敏感性高于净光合速率,当遭遇环境胁迫时气孔过度关闭,反而成为光合作用的主要制约因素。已有综述指出,在植物遭受轻度和中度水分胁迫时,光合作用下降的主要原因是气孔限制;而在重度胁迫或高温等复合胁迫下,非气孔限制逐渐占主导地位^[21],这与本试验中8月高温加剧非气孔限制、10月叶片衰老可能增加非气孔限制的观测结果一致。

不同土壤水分处理下 A_n 日动态存在显著差异:

7月和8月,对照(CK)处理的 A_n 显著低于3个灌溉处理(I-1、I-2、I-3)。这一差异表明,在陕南湿润气候背景下,CK处理(自然降水)在生长旺盛期的部分时段已出现一定程度的水分制约,限制了光合作用。然而,I-1、I-2、I-3三个灌溉处理之间在7月和8月的 A_n 差异未达到统计显著水平,表明在本试验条件下,上述3个灌溉处理均能为长梗绞股蓝提供较为充足的水分供应,且各处理间的光合作用无显著差异。在9月和10月,各水分处理间的光合特性差异大幅度减小,这一变化主要与生长季末期气温下降、光照减弱等环境因子的变化有关,此时水分不再是光合作用的主要限制因子,因此不同水分处理间的差异趋于消失。因此,在长梗绞股蓝田间栽培管理中,应结合生长旺盛期(6月—10月)净光合速率日动态的峰值出现时段,针对性优化水分供应方案。尤其应注意避免土壤水分过低(如CK),同时也不宜过度灌溉,以匹配其光合生理需求,从而提高光合产物积累效率。

不同水分处理下的长梗绞股蓝叶片光合特性呈现显著的时空差异,已有研究表明光合特性的日变化随月份、环境因子的变化而变化^[22]。在6月—10月,长梗绞股蓝不同光合指标的时间变化规律各异。其中,仅最大净光合速率(A_{n-max})的月变化趋势与环境因子(R 和 VPD)基本一致。7月份,3个灌溉处理(I-1、I-2、I-3)的 A_{n-max} 较对照(CK)处理显著高于43.2%~61.5%,表明在生长旺盛期的高温时段(7月),土壤水分充足对长梗绞股蓝的最大净

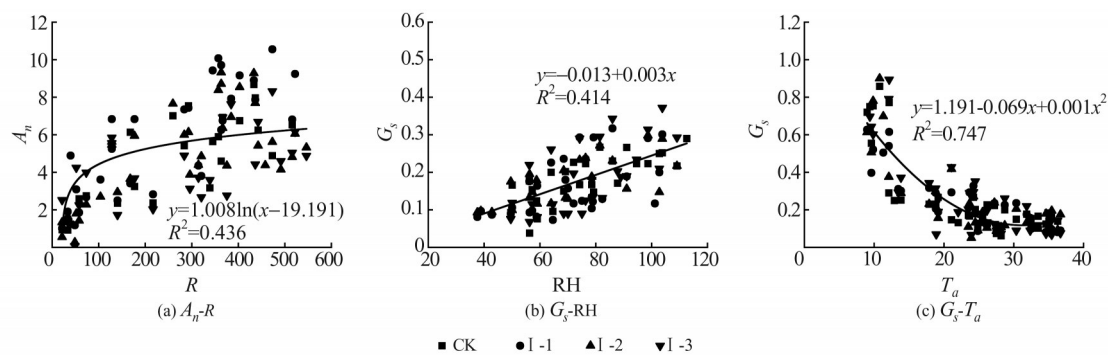


图4 长梗绞股蓝叶片光合特性(A_n 、 G_s)与关键环境因子的回归分析

Figure 4 Regression analysis between leaf photosynthetic characteristics (A_n 、 G_s) of *Gynostemma longipes* and key environmental factors

表2 不同土壤水分处理下长梗绞股蓝净光合速率(A_n)与环境因子的多元逐步回归分析

Table 2 Multiple stepwise regression analysis between net photosynthetic rate (A_n) and environmental factors in <i>Gynostemma longipes</i> under different soil moisture treatments					
光合参数	处理	最优回归分析	决定系数 R^2	F	P
A_n	CK	$Y=2.885+0.012R-1.612VPD$	0.746	19.496	<0.001
	I-1	$Y=10.492-0.278RH+0.009R$	0.626	9.642	$=0.001$
	I-2	$Y=10.492-0.278RH+0.009R$	0.704	14.729	<0.001
	I-3	$Y=10.138-0.343RH+0.014R$	0.803	27.290	<0.001

表3 不同土壤水分处理下长梗绞股蓝月尺度光合参数与环境因子的相关性

Table 3 Correlations between photosynthetic parameters and environmental factors in <i>Gynostemma longipes</i> under different soil moisture treatments					
处理	光合参数	R	VPD	RH	T_a
CK	$A_{n\max}$	0.346	0.123	-0.176	0.045
	$G_{s\max}$	-0.893*	-0.854	0.746	-0.931*
I-1	$A_{n\max}$	0.953*	0.961**	-0.900*	0.964**
	$G_{s\max}$	-0.321	-0.266	0.363	0.045
I-2	$A_{n\max}$	0.982**	0.984**	-0.935*	0.912*
	$G_{s\max}$	0.141	0.29	-0.157	0.542
I-3	$A_{n\max}$	0.783	0.756	-0.609	0.912*
	$G_{s\max}$	-0.278	-0.214	0.139	-0.148

*** $P<0.001$; ** $P<0.01$; * $P<0.05$

光合速率具有显著的提升效应。梁娟^[23]等的研究表明,随着水分胁迫的加剧,最大净光合速率逐渐下降。因此,在长梗绞股蓝田间水分管理中,应兼顾生长旺盛期内不同月份的光合生理特性差异,精准调控灌溉供应。特别应注意在7月高温时段保证充足水分供给以维持高光合能力,而在8月以后则需关注水分的合理调控,以匹配不同光合指标的动态需求,从而优化光合产物积累,提高产量与品质。

3.2 长梗绞股蓝叶片光合特性与环境因子的互作关系

光合速率的动态变化可能是生态、生理及生化等多方面因素共同作用的结果^[24-25]。本试验相关性分析表明,日尺度变化上 A_n 与 R 呈极显著正相关,表明 R 是驱动 A_n 日变化的核心环境因子。此外, G_s 与RH呈极显著负相关、与 T_a 呈极显著正相关($P<0.01$),表明RH和 T_a 是调控 G_s 日变化的关键环境因子。这一结果与徐晓蓝等^[11]对黄精的研究结论一致,即相对湿度是影响气孔导度的主要环境因子。然而,前述结果(§2.1、§2.2)表明, A_n 的动态变化特征因土壤水分条件不同而存在显著差异。为此,本试验进一步采用多元逐步回归分析,探究不同土壤水分处理下 A_n 与环境因子的定量关系。结果表明:在灌溉处理(I-1、I-2、I-3)下, A_n 主要受 R 和RH的共同调控;而在土壤水分亏缺条件(CK)下,除 R 外,VPD也对 A_n 产生显著的制约作用。这表明土壤水分处理显著调节了光合作用与环境因子之间的相互作用关系。对幼龄胡杨的研究也发现,气体交换参数不仅受灌溉量的影响,同时也受外界环境因子的综合影响,且影响程度随土壤水分条件而异^[26]。基于此,在长梗绞股蓝的田间栽培中,水分充足时应注重光照条件的优化以促进光合作用;而水分亏缺时(如自然降水不足的干旱时段),应及时灌溉补充水分,以缓解水分胁迫对光合作用的制约,尤其是在高

温、高 VPD 时段。

本研究揭示了长梗绞股蓝在不同时间尺度(日、月)上光合特性对土壤水分及环境因子的响应规律,明确了影响净 A_n 和 G_s 的关键环境因子,为长梗绞股蓝田间规范化栽培及优化光合环境管理提供了理论依据。

参考文献

- [1] Xie J, Luo M X, Chen Q Y, et al. Hypolipidemic effect and gut microbiota regulation of *Gypenoside aglycones* in rats fed a high-fat diet[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2024, 328: 118066.
- [2] Anh P T, Ky P T, Cuc N T, et al. Damarane-type saponins from *Gynostemma longipes* and their cytotoxic activity[J]. Natural Product Communications, 2015, 10(8): 1934578X1501000808.
- [3] 杨松杰. 陕西安康药用植物绞股蓝种质资源调查研究[J]. 陕西农业科学, 2012, 58(5): 135-137.
Yang S J. Investigation on germplasm resources of *Gynostemma pentaphyllum* in Ankang, Shaanxi Province[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2012, 58(5): 135-137.
- [4] Li D D, Li G, Xi B Y, et al. Response mechanism of growth and gypenosides content for *Gynostemma longipes* cultivated at two altitude habitats to fine root morphological characteristics [J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1143745.
- [5] 秦凤园, 张晓玲, 于德鑫, 等. 不同土壤水分下绞股蓝细根形态及产量特征[J/OL]. 核农学报, 1-16 [2026-06-04]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2265.s.20260227.1754.002>.
Qin F Y, Zhang X L, Yu D X, et al. Fine root morphology and yield characteristics of *Gynostemma longipes* under different soil moisture conditions [J/OL]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 1-16 [2026-06-04]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2265.s.20260227.1754.002>.
- [6] Qin F Y. Assessing the environmental and physiological control of yield of a shallow-rooted medicinal plant under different soil water conditions [J]. Industrial Crops & Products, 2026, (in press).
- [7] 高超, 闫文德, 田大伦, 等. 杜仲光合速率日变化及其与环境因子的关系[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(5): 100-104.
Gao C, Yan W D, Tian D L, et al. Diurnal change in photosynthetic rate of *Eucommia ulmoides* and its relationship with environmental factors[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2011, 31(5): 100-104.
- [8] 丁友芳, 张晓霞, 史玲玲, 等. 葛根净光合速率日变化及其与环境因子的关系[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(5): 132-137.
Ding Y F, Zhang X X, Shi L L, et al. Diurnal change of net photosynthetic rates in *Pueraria lobata* and its relation with environmental factors[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(5): 132-137.
- [9] 徐晓蓝, 徐世浩, 梁宗锁, 等. 不同叶位黄精叶片的光合日变化及其影响因子[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 119-128.
Xu X L, Xu S H, Liang Z S, et al. Photosynthetic physiological characteristics and its influencing factors of *Polygonatum sibiricum* Red. leaves in different positions [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2020, 48(2): 119-128.
- [10] 王建华, 李立颖. 连翘叶片光合速率日变化特征的研究[J]. 林业建设, 2018, 36(1): 34-38.
Wang J H, Li L Y. Diurnal variations of photosynthesis in leaves of *Forsythia suspensa* [J]. Forestry Construction, 2018, 36(1): 34-38.
- [11] Gao Z J, Xu B C, Wang J, et al. Diurnal and seasonal variations in photosynthetic characteristics of switchgrass in semiarid region on the Loess Plateau of China [J]. Photosynthetica, 2015, 53(4): 489-498.
- [12] Li Z Q, Wu Q X, Peng Y Y, et al. Diurnal, seasonal, and vertical changes in photosynthetic rates in *Cinamomum camphora* forests in subtropical China [J]. Forests, 2024, 15(1): 183.
- [13] 黄成林, 吴泽民, 姚永康, 等. 遮荫条件下绞股蓝光合作用特点的研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2099-2103.
Huang C L, Wu Z M, Yao Y K, et al. Photosynthetic characteristics of *Gynostemma pentaphyllum* under shade [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(11): 2099-2103.
- [14] 李馨芸. 光质对绞股蓝生长、光合作用及次生代谢产物积累的影响[D]. 吉首: 吉首大学, 2012.
Li X Y. Effects of light quality on the growth, photosynthesis and accumulation of secondary metabolism in *Gynostemma pentaphyllum* [D]. Jishou: Jishou University, 2012.
- [15] 赵宇哲, 卢敏, 张长泰, 等. 长梗绞股蓝叶片表型与光合生理特性研究[J]. 北方园艺, 2025(13): 73-79.
Zhao Y Z, Lu M, Zhang C T, et al. Study on leaf phenotype and photosynthetic physiological characteristics of *Gynostemma longipes* [J]. Northern Horticulture, 2025(13): 73-79.
- [16] Campbell G S, Norman J M. The light environment of plant canopies[M]//An Introduction to Environmental

- Biophysics. New York, NY: Springer New York, 1998: 247-278.
- [17] 许建新, 徐桂红, 袁玲, 等. 云南无忧花光合速率日变化及其与环境因子的关系研究[J]. 亚热带植物科学, 2025, 54(3): 292-296.
- Xu J X, Xu G H, Yuan L, et al. Relationship between diurnal changes of photosynthetic rate and environmental factors of *Saraca griffithia* [J]. Subtropical Plant Science, 2025, 54(3): 292-296.
- [18] Song X Y, Zhou G S. Responses of leaf senescence for *Stipa krylovii* to interactive environmental factors [J]. Agronomy, 2024, 14(9): 2145.
- [19] Miranda T, Ebner M, Traiser C, et al. Diurnal pattern of stomatal conductance in the large-leaved temperate Liana *Aristolochia macrophylla* depends on spatial position within the leaf lamina [J]. Annals of Botany, 2013, 111(5): 905-915.
- [20] 蔡荣, 廖小锋, 刘济明, 等. 药用植物艾纳香的光合日变化研究[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(8): 61-65.
- Cai R, Liao X F, Liu J M, et al. Study on diurnal variation of photosynthesis of medicinal plant *Blumea balsamifera* [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2013, 41(8): 61-65.
- [21] 张征坤. 土壤水分对不同树种光合作用日动态过程的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
- Zhang Z K. Influences of moisture on dynamic process of photosynthesis: of different tree species [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2012.
- [22] Hua L, Yu F, Qiu Q, et al. Relationships between diurnal and seasonal variation of photosynthetic characteristics of *Eucalyptus* plantation and environmental factors under dry-season irrigation with fertilization [J]. Agricultural Water Management, 2021, 248: 10673.
- [23] 梁娟, 郭泽宇, 叶漪. 不同土壤水分条件对七叶一枝花光合特性及有效成分皂苷含量的影响[J]. 植物生理学报, 2014, 50(1): 56-60.
- Liang J, Guo Z Y, Ye Y. Effects of different soil moisture conditions on photosynthetic characteristics and effective content of saponin of *Paris polyphylla* [J]. Plant Physiology Journal, 2014, 50(1): 56-60.
- [24] Zeng Z L, Wang X Q, Zhang S B, et al. Mesophyll conductance limits photosynthesis in fluctuating light under combined drought and heat stresses [J]. Plant Physiology, 2024, 194(3): 1498-1511.
- [25] Sharkey T D. Transpiration-induced changes in the photosynthetic capacity of leaves [J]. Planta, 1984, 160(2): 143-150.
- [26] 马旭, 韩炜, 武胜利, 等. 不同灌水量对幼龄胡杨光合特性日变化的影响及其与环境因子的关系[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(13): 102-108.
- Ma X, Han W, Wu S L, et al. Effects of different irrigation rates on diurnal changes of photosynthetic characteristics of young *Populus euphratica* and its relationship with environmental factors [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2023, 51(13): 102-108.