

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

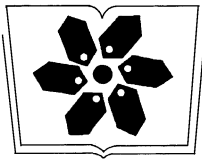
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第6期 Vol.33 No.6 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 6 期

2013 年 3 月 (半月刊)

目 次

专论与综述

- 基于遥感技术的森林健康研究综述..... 高广磊,信忠保,丁国栋,等 (1675)
Agent 农业土地变化模型研究进展..... 余强毅,吴文斌,杨 鹏,等 (1690)

个体与基础生态

- 辽东湾北部近海沙蜃的动态分布..... 王 彬,秦宇博,董 婧,等 (1701)
口虾蛄 proPO 基因全长 cDNA 的克隆与组织表达..... 刘海映,刘连为,姜玉声,等 (1713)
中缅树鼯头骨及下臼齿几何形态与环境的关系..... 朱万龙,贾 婷,黄春梅,等 (1721)
亚热带 3 种树种凋落叶厚度对其分解速率及酶活性的影响..... 季晓燕,江 洪,洪江华,等 (1731)
浙北地区常见绿化树种光合固碳特征..... 张 娇,施拥军,朱月清,等 (1740)
两种高质牧草不同生育期光合生理日变化及光响应特征..... 郭春燕,李晋川,岳建英,等 (1751)
基于 WOFOST 作物生长模型的冬小麦干旱影响评估技术..... 张建平,赵艳霞,王春乙,等 (1762)
基于线粒体 DNA 控制区的斑翅草螽不同地理种群遗传分化研究..... 周志军,尚 娜,刘 静,等 (1770)
圈养尖吻蝾螈雌体大小、窝卵数和卵大小之间的关系..... 胡明行,谭群英,杨道德 (1778)
应用寄生蜂和不育雄虫防控田间橘小实蝇..... 郑思宁,黄居昌,叶光禄,等 (1784)
青蒿素对外生菌根真菌化感效应..... 李 倩,袁 玲,王明霞,等 (1791)

种群、群落和生态系统

- 海湾生态系统健康评价方法构建及在大亚湾的应用..... 李纯厚,林 琳,徐姗姗,等 (1798)
上升流和水团对浙江中部近海浮游动物生态类群分布的影响..... 孙鲁峰,柯 昶,徐兆礼,等 (1811)
半干旱区生态恢复关键生态系统识别——以内蒙古自治区和林县为例.....
..... 彭 羽,高 英,冯金朝,等 (1822)
太岳山油松人工林土壤呼吸对强降雨的响应..... 金冠一,赵秀海,康峰峰,等 (1832)
重庆酸雨区马尾松林凋落物特征及对干旱胁迫的响应..... 王轶浩,王彦辉,于澎湃,等 (1842)

景观、区域和全球生态

- 城市典型水域景观的热环境效应..... 岳文泽,徐丽华 (1852)
外来树种桉树引种的景观生态安全格局..... 赵筱青,和春兰 (1860)
基于耕地生态足迹的重庆市耕地生态承载力供需平衡研究..... 施开放,刁承泰,孙秀峰,等 (1872)
大气 CO₂ 浓度升高对稻田根际土壤甲烷氧化细菌丰度的影响..... 严 陈,许 静,钟文辉,等 (1881)

资源与产业生态

- 基于可变模糊识别模型的海水环境质量评价..... 柯丽娜,王权明,孙新国,等 (1889)
亚热带养殖海湾皱瘤海鞘生物沉积的现场研究..... 闫家国,齐占会,田梓杨,等 (1900)
黄土高原典型苹果园地深层土壤氮磷钾养分含量与分布特征..... 张丽娜,李 军,范 鹏,等 (1907)

旱作农田不同耕作土壤呼吸及其对水热因子的响应..... 张丁辰,蔡典雄,代 快,等 (1916)

商洛低山丘陵区农林复合生态系统中大豆与丹参的光合生理特性..... 彭晓邦,张硕新 (1926)

外源油菜素内酯对镉胁迫下菊芋幼苗光合作用及镉富集的调控效应..... 高会玲,刘金隆,郑青松,等 (1935)

基于侧柏液流的测定对 Granier 原始公式系数进行校正 刘庆新,孟 平,张劲松,等 (1944)

研究简报

湿地自然保护区保护价值评价方法..... 孙 锐,崔国发,雷 霆,等 (1952)

干热河谷印楝和大叶相思人工林根系生物量及其分布特征..... 高成杰,唐国勇,李 昆,等 (1964)

海滨沙滩单叶蔓荆对沙埋的生理响应特征..... 周瑞莲,王 进,杨淑琴,等 (1973)

宁夏贺兰山、六盘山典型森林类型土壤主要肥力特征 姜 林,耿增超,张 雯,等 (1982)

学术争鸣

小兴安岭十种典型森林群落凋落物生物量及其动态变化..... 侯玲玲,毛子军,孙 涛,等 (1994)

中国生态学会 2013 年学术年会征稿通知 (2002)

第七届现代生态学讲座、第四届国际青年生态学者论坛通知 (I)

中、美生态学会联合招聘国际期刊主编 (i)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 328 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 34 * 2013-03



封面图说: 亭亭玉立的白桦树——白桦为落叶乔木,可高达 25m,胸径 50cm。其树冠呈卵圆形,树皮白色,纸状分层剥离;叶三角状、卵形或菱状卵形;花单性,雌雄同株。白桦树喜光,耐严寒,对土壤适应性强,喜酸性土,沼泽地、干燥阳坡及湿润阴坡都能生长。常与红松、落叶松、山杨、蒙古栎混生。白桦的天然更新好,生长较快,萌芽强,在人为的采伐迹地或火灾、风灾等自然损毁的迹地里,往往由白桦首先进入,为先锋树种,而形成白桦次生林。白桦分布甚广,我国大、小兴安岭及长白山均有成片纯林,在华北平原和黄土高原山区、西南山地亦为阔叶落叶林及针叶阔叶混交林中的常见树种。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201112081882

郭春燕, 李晋川, 岳建英, 杨生权, 卢宁, 王翔. 两种高质牧草不同生育期光合生理日变化及光响应特征. 生态学报, 2013, 33(6): 1751-1761.

Guo C Y, Li J C, Yue J Y, Yang S Q, Lu N, Wang X. Diurnal changes in the photosynthetic characteristics of two high yield and high quality grasses during different stages of growth and their response to changes in light intensity. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(6): 1751-1761.

两种高质牧草不同生育期光合生理日变化 及光响应特征

郭春燕*, 李晋川, 岳建英, 杨生权, 卢宁, 王翔

(山西省生物研究所, 太原 030006)

摘要:于 2010 年 5 月 25 日(拔节、分枝期)、7 月 6 日(抽穗、结荚期)、8 月 25 日(开花期)晴朗天气,采用 LI-6400 便携式光合作
用测定系统对新引 1 号东方山羊豆和柳枝稷各项光合生理生态指标进行了测定。结果表明:(1)新引 1 号东方山羊豆净光合速
率(P_n)日变化呈双峰曲线,存在“光合午休”现象;分枝期 P_n 、光能利用效率(LUE)、水分利用效率(WUE)日均值高于结荚期,
而结荚期的叶温(T_l)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)日均值高于分枝期。(2)柳枝稷的 P_n 日变化呈单峰曲
线,拔节期 P_n 、 T_r 日均值高于抽穗期,开花期最低;WUE 与 C_i 日均值在开花期最高,拔节期次之,抽穗期最小; T_l 、LUE 日均值在
抽穗期最高,拔节期次之,开花期最小。(3) P_n 与 T_r 、 G_s 、叶片气孔限制值(L_s)、光合有效辐射(PAR)具有极显著正相关关系,与
 C_i 呈极显著负相关; T_r 与 G_s 、叶温下蒸汽压亏缺(V_{pdl})、气温(T_a)、 T_l 、PAR 均呈极显著正相关关系,与大气 CO_2 浓度(C_a)呈显
著负相关; T_l 、 G_s 与 PAR 呈极显著正相关。(4)通过光响应曲线的绘制及相关生理指标的计算,结合相关评价标准,得出柳枝稷
为阳生植物,而新引 1 号东方山羊豆为耐荫植物,且柳枝稷比新引 1 号东方山羊豆对光环境的适应性强。

关键词:新引 1 号东方山羊豆;生育期;柳枝稷;光合特性;山西太原

Diurnal changes in the photosynthetic characteristics of two high yield and high quality grasses during different stages of growth and their response to changes in light intensity

GUO Chunyan*, LI Jinchuan, YUE Jianying, YANG Shengquan, LU Ning, WANG Xiang

Shanxi Institute of Biology, Taiyuan 030006, Shanxi Province, China

Abstract: Shanxi Province is located in the east of China's Loess Plateau. Traditional agriculture is restricted by the poor
environmental conditions, water shortages and low soil fertility. The only way to develop agriculture is by adjusting the
methods used to the local conditions and the development of animal husbandry. The shortage of browse and forage resources
requires us to find appropriate grass species for the local conditions. *Panicum virgatum* L. and *Galega orientalis* Lam. cv.
xinyin No. 1 are two high yield and high quality grasses, so we introduced and cultivated them in the city of Taiyuan,
Shanxi Province, China. By observing their phenophases, production, suitability, nutritional content, and so on, we found
these two forage species can complete their reproductive cycle in the local climate and environmental conditions and they
have many strong points such as better suitability, higher production and better quality than other species. We needed to do
further study on them before introducing them as new species for Shanxi Province. We studied the photosynthetic
characteristics of these two grasses in detail to determine if they could be introduced and cultivated in the Province. We

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划(2012BAC10B04);山西省科技重大专项(20121101007)

收稿日期:2011-12-08; 修订日期:2012-10-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pai109@126.com

analyzed the relationships between the diurnal changes of photosynthetic characteristics and environmental factors at different stages of growth. We also studied the characteristics of how leaf gas exchange indicators responded to changes in the natural environment, including especially light intensity. The findings confirm the adaptability of these two grasses and provide theoretical reference for their introduction and cultivation as well as a scientific basis for the establishment of sustainable grassland agriculture in this region.

We selected different stages of growth in these two species to measure their photosynthetic and ecophysiological characteristics using a Portable LI-6400 Photosynthesis System (LI-COR, Inc., Lincoln, NE, USA) on 25 May, 6 July and 25 August 2010. The results show there were significant differences in the diurnal variations and light-response curves. (1) *Xinyin* No. 1: The diurnal change of the net photosynthetic rate (P_n) had a bimodal pattern and had a clear midday depression. The daily averages of P_n , light use efficiency (LUE) and water use efficiency (WUE) during the branching stage were higher than in the podding stage. However, the daily averages of leaf temperature (T_l), transpiration rate (T_r), stomatal conductance (G_s) and intercellular CO_2 concentration (C_i) in the podding stage were higher than in the branching stage. (2) *Panicum virgatum*: The diurnal change of P_n had a unimodal pattern. The daily averages of P_n and T_r in the jointing stage were higher than in the heading stage, and were also lowest during the flowering stage. The daily averages of WUE and C_i in the flowering stage were higher than in the jointing stage, which were the lowest during the heading stage. The daily averages of LUE and T_l in the heading stage were higher than in the jointing stage, and were the lowest during the flowering stage. (3) P_n was significantly positively correlated with T_r , G_s , stomatal limiting value (L_s), and photosynthetically active radiation (PAR), but significantly negatively correlated with C_i . T_r was significantly positively correlated with G_s , vapor pressure deficit (V_{pd}), air temperature (T_a), T_l and PAR, but was also significantly negatively correlated with air CO_2 concentration (C_a). T_l and G_s were significantly positively correlated with PAR. (4) By drawing the light response curves and by taking the relative physiological indexes into account, we could draw the conclusion *P. virgatum* is a heliophilic plant and *Xinyin* No. 1 is a shade tolerant plant based on relevant evaluation criteria. Also, *P. virgatum* has greater adaptability to diverse environments than *Xinyin* No. 1.

Key Words: *Galega orientalis* cv. *xinyin* No. 1; growth stages; *Panicum virgatum*; photosynthetic characteristics; Taiyuan

柳枝稷(*Panicum virgatum* L.)是禾本科黍属多年生丛生 C_4 高大草本,原产北美,在贫瘠缺水的边际土地上也保持较高产量,并能够有效地抵御病虫害发生,是一种理想的纤维素类多年生草本资源植物^[1]。柳枝稷根系发达,株高 1—2m,最高可达 4 m,叶片绿色扁平,长约 150 cm,宽约 1.3 cm,6—8 月开花,花序呈圆锥状,15—55 cm 长,分枝末端有小穗。种子呈浅褐色,光滑且有光泽,新收获的种子具有较强的休眠性,品种间千粒重变化较大^[2-4]。冬季地上部枯死,地下宿生根系依然存活,翌年 5 月返青。在长期的进化过程中,形成了许多生态型和变种,主要的 2 种生态型为:细秆高地生态型,主要分布在美国中部和北部地区,适应干旱环境,茎秆较细分枝多,在半干旱环境中生长良好,主要变种有 Trailblazer、Blackwell、Cave-in-Rock、Pathfinder;粗秆低地生态型,主要分布于潮湿地带,诸如漫滩、涝原,植株高大,茎秆粗壮,成束生长,主要变种有 Alamo、Kanlow^[5]。

东方山羊豆(*Galega orientalis* Lam.)是一种多年生、根蘖型豆科草本植物,原产于高加索山和阿拉套山海拔 330—1800 m 的草原、森林草原和亚高山草甸,在爱沙尼亚、格鲁吉亚、达格斯坦和阿塞拜疆地区有天然分布,我国无此野生种质资源分布^[6]。近年来,东方山羊豆在加拿大、前苏联、芬兰等国成为有生产优势的豆科牧草之一^[7-11],我国也引进试种^[12-17]。新疆畜牧科学院草业研究所从哈萨克斯坦共和国引进东方山羊豆,通过在新疆北部进行多点引种试验,品系、品比相关试验后,于 2004 年登记为全国引进牧草新品种“新引 1 号东方山羊豆(*G. orientalis* Lam. cv. *xinyin* No. 1)”,该品种具有产量高、抗逆性强、农艺性状好、叶量丰富、适口性

好等特点^[18-20]。

柳枝稷与东方山羊豆的光合特性虽已有报道,但只是进行了日变化的初步测量^[21-22],对其不同生育期光合生理特征日变化及光合响应的研究尚未见报道。因此,本文在引种栽培的基础上,对适应山西太原地区的两种高产优质牧草进行了深入的光合特性的研究,分析了不同生育期光合日变化特征与环境因子间的相关关系,叶片气体交换指标对其自然环境特别是对光照强度的响应特征,旨在揭示两种牧草对环境的适应性,以期为该牧草的引种栽培提供理论参考,为建立可持续草地农业系统提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在山西省生物研究所苗圃内,地理坐标为东经 111°30′—113°09′、北纬 37°27′—38°25′,海拔 800 m,北温带大陆性气候。年平均降雨量 456—500 mm,年平均气温 9.5 ℃,全年日照时数平均 2808 h,无霜期年均 202 d。

1.2 试验材料

柳枝稷种子(Traiblazer)购于中国农业大学;

新引 1 号东方山羊豆种子购于新疆畜牧科学院草业研究所。

1.3 试验方法

两种牧草于 2009 年 5 月 4 日人工条播,行距 30 cm,小区间隔 50 cm,试验小区面积 6 m²(1.5 m×4 m)。播种第 1 年,于播种前与拔节(抽穗)期施普利浓复合肥、浇水各两次,第 2 年自然生长。2010 年选择晴朗无风日对不同生育期的两种牧草进行光合日变化及光合响应测定。

1.3.1 光合作用日变化测定

于 2010 年 5 月 25 日(拔节、分枝期)、7 月 6 日(抽穗、结荚期)、8 月 25 日(开花期),采用 LI-6400 便携式光合作用测定系统(Li-Cor, Lincoln, NE, USA)对两种牧草各项光合生理指标进行测定。选取两种牧草充分展开的健康叶,测量叶片中部,测定的指标有净光合速率(P_n , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、蒸腾速率(T_r , $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、气孔导度(G_s , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、胞间 CO₂ 浓度(C_i , $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)、气温(T_a , ℃)、叶温(T_l , ℃)、叶片光合有效辐射(PAR, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)、空气相对湿度(RH, %)、大气 CO₂ 浓度(C_a , $\mu\text{mol}/\text{mol}$)和叶温下蒸汽压亏缺(V_{pd} , $\mu\text{g}/\text{L}$)。每次连续读取 3 个稳定的数据,3 次重复,测定时间为每日 8:00—18:00,每隔 2 h 测定 1 次,计算机采集数据后计算平均值。根据测定的指标计算叶片气孔限制值(L_s)、水分利用效率(WUE)和叶片的光能利用率(LUE)^[23]。计算公式为: $L_s = 1 - C_i/C_a$; $\text{WUE} = P_n/T_r$; $\text{LUE} = P_n/\text{PAR}$ 。

1.3.2 光响应曲线测定

于 2010 年 5 月 24—25 日(拔节、分枝期)、6 月 28—29 日(抽穗、结荚期)、8 月 25 日(开花期)每日 9:00—11:00,用便携式光合作用测定系统 LI-6400-02B 叶室对两种牧草进行光响应曲线的测定。光合有效辐射分别设定为 1800、1600、1400、1200、1000、800、600、400、200、150、100、50、20、0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 共计 14 个梯度。测定时随机选择健康叶,以叶的中部作为测试部位,3 次重复,结果取平均值。根据非直线双曲线模型公式^[24]: $P_n = (\text{PAR}Q + P_{n\text{max}} - \sqrt{(Q\text{PAR} + P_{n\text{max}})^2 - 4kQP_{n\text{max}}\text{PAR}})/(2k) - R_{\text{day}}$, 式中 P_n 为净光合速率, $P_{n\text{max}}$ 为最大净光合速率, PAR 为光合有效辐射, Q 为表观量子效率, R_{day} 为暗呼吸速率, k 为光响应曲线曲角。根据该模型利用 SPSS 非线性回归,得到相应的预测值 P_v ,同时计算出 Q 、 R_{day} 、 $P_{n\text{max}}$ 及 k 值,绘制 PAR- P_v 的拟合曲线。当 PAR < 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,使用实测数据(P_n),对 PAR- P_n 进行直线回归,得到拟合直线方程 $y = ax + b$, 式中 y 为净光合速率实测值 P_n , x 为光合有效辐射 PAR, 光补偿点(LCP, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)为拟合直线与 X 轴的交点、表观量子效率为 a , 将 $P_{n\text{max}}$ 预测值代入拟合直线方程求得光饱和点(LSP, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。

1.4 数据处理

所有数据统计与分析均在 Excel 2003 和 SPSS 17.0 软件下完成。

2 结果与分析

2.1 环境因子日变化

从图 1 可以看出,两种牧草不同生育期的环境因子日变化趋势基本一致。 T_a 从 9:00 开始上升,14:00 左右达到全天的最高温度,然后开始下降,与 PAR 日变化趋势相同; C_a 与 RH 变化趋势相似,呈倒钟型,均为早晚较高,14:00 左右出现最低值,与 T_a 变化趋势相反。 T_a 升高引起空气密度的降低,植物光合作用增强是午间 RH 和 C_a 降低的两个重要原因;PAR 在 48.39—1492.27 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 波动,变化日程为显著单峰曲线,峰值均于 10:00—12:00 出现。由于牧草不同生育期所属季节不同,外界环境因子变化很大,总体来说, T_a 与 PAR 的日均值为抽穗(结荚)期 > 拔节(分枝)期 > 开花期; C_a 与 RH 的日均值为开花期 > 拔节(分枝)期 > 抽穗(结荚)期。

综上分析,在这 4 个主要影响植物光合作用的环境因子中,PAR 是驱动因子,它的变化引起了 T_a 的变化,而 C_a 与 RH 的变化受 T_a 的影响较大。

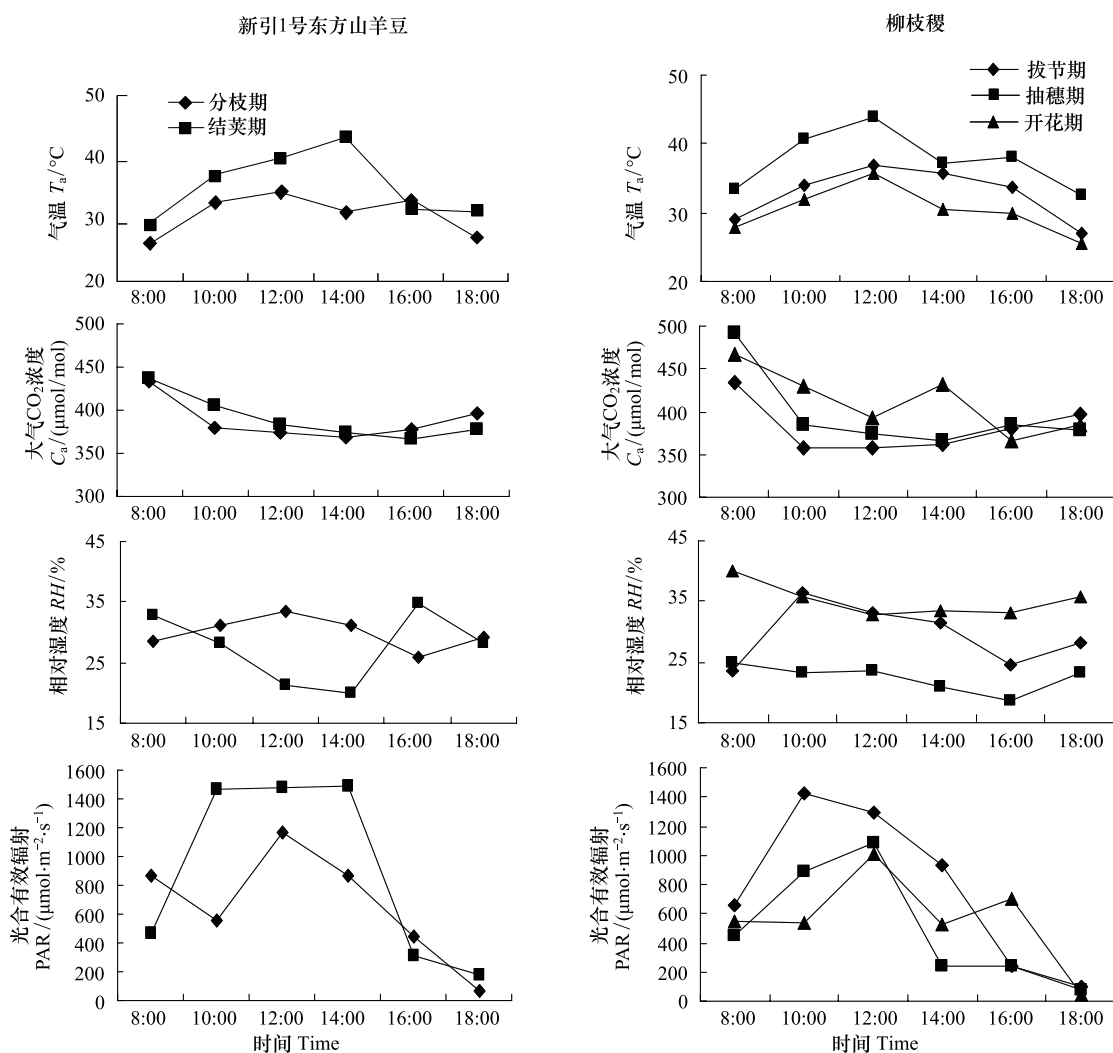


图 1 新引 1 号东方山羊豆与柳枝稷不同生育期环境因子日变化

Fig. 1 Diurnal variations of environmental factors of *G. orientalis* Lam. cv. xinyin No. 1 and *P. virgatum* L. in different growth stages

2.2 光合生理指标的日变化

2.2.1 新引 1 号东方山羊豆光合生理指标的日变化

从图 2 可以看出,在 8:00—18:00 时间段内,新引 1 号东方山羊豆在分枝期与结荚期 T_l 均随气温的升高

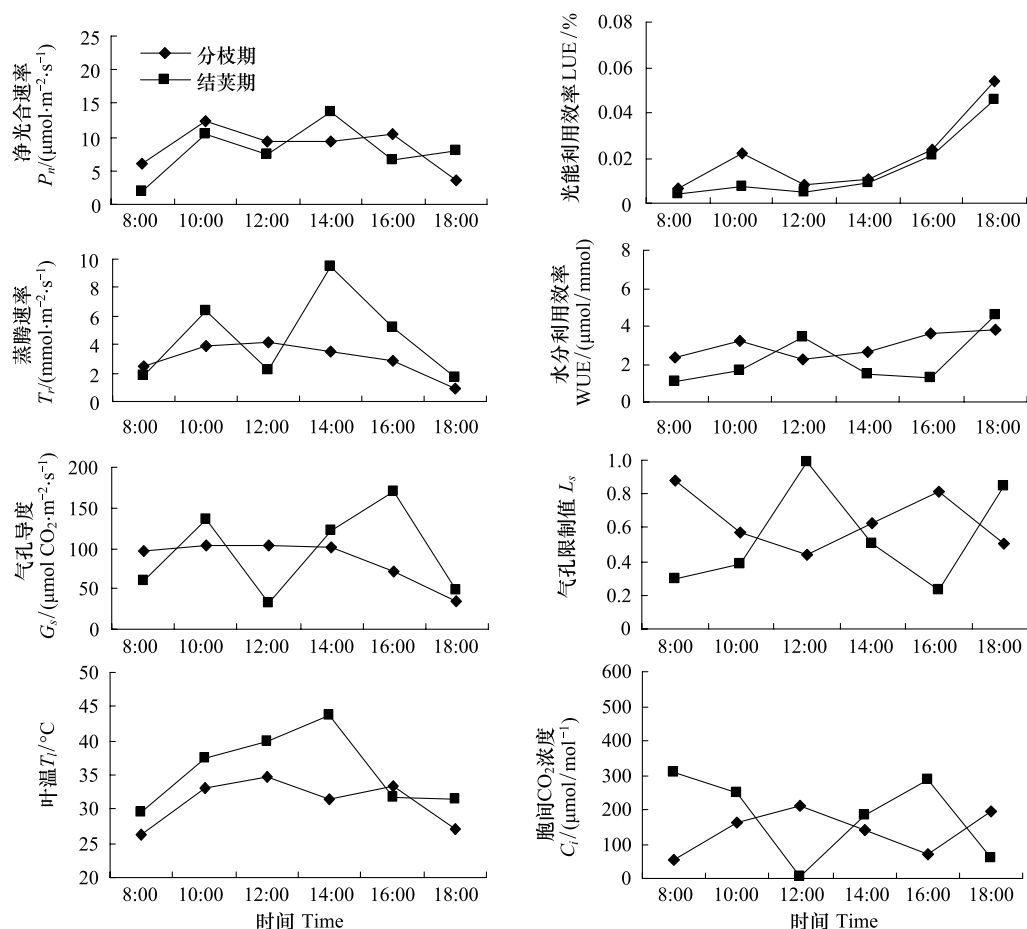


图2 新引1号东方山羊豆不同生育期光合生理指标的日变化

Fig. 2 Diurnal variations of photosynthetic physiological characteristics of *G. orientalis* Lam. cv. xinyin No. 1 in different growth stages

而逐渐升高,在14:00时达最高值后,逐渐降低,且结荚期日均 T_l 高于分枝期;两个生育期 P_n 的变化趋势也一致,均是先升高后降低再升高,呈双峰曲线,说明存在“光合午休”现象。只是达到峰值的时间和峰值大小存在差异,第1个峰均出现在10:00,第2个峰分枝期出现在16:00,而结荚期出现在14:00。分枝期日均 P_n 值高于结荚期。从LUE图中也证实了这一点,分枝期日均LUE值高,且在10:00出现一个峰,与 P_n 图中第1峰出现的时间相同。

T_r 与 G_s 变化趋势基本一致,结荚期呈现双峰曲线,第2峰值高于第1峰值,变化幅度大;分枝期呈单峰曲线,变化幅度小,且日均值为结荚期高于分枝期。结荚期 T_r 第1峰出现在10:00,第2峰出现在14:00,而 G_s 第1峰也是出现在10:00,但第2峰出现在16:00。 G_s 第2峰比 T_r 第2峰滞后2h,说明在这段时间中 T_r 达到最高值受气温的影响大于 G_s 的影响。WUE日变化趋势与 T_r 、 G_s 正好相反,且日均值为分枝期高于结荚期, WUE日变化趋势为先升高后降低再升高,分枝期12:00为WUE的低谷,结荚期10:00与16:00为WUE的两个低谷,正好与 G_s 的变化趋势相反,但拐点相同。这说明WUE主要受 G_s 的调控。 C_i 与 L_s 日变化趋势相反,在分枝期为先升高后降低再升高,在结荚期为先降低后升高再降低,但拐点均为12:00与16:00,只是变化趋势不同。说明 C_i 受 L_s 的调控。结荚期 C_i 日均值高于分枝期,但其日均 P_n 值却低于分枝期,这可能是由牧草生长节律引起的。

2.2.2 柳枝稷光合生理特征的日变化

从图3可以看出,柳枝稷拔节期、抽穗期和开花期光合生理指标日变化趋势各不同。 T_l 均为随日照强度的增强,从8:00至12:00不断升高达到最大值后,逐渐下降。 P_n 受 T_l 影响也是先升高后降低,呈单峰曲线,

没有“光合午休”现象,但不同生育期峰值大小以及出现的时间不同。拔节期峰值最高,出现在 14:00;抽穗期峰值次之,出现在 10:00;开花期峰值最小,出现在 12:00。拔节期 P_n 的日均值最大,抽穗期次之,开花期最小。抽穗期 LUE 日变化曲线呈现出双峰的情况,第 1 峰出现在 10:00,第 2 峰出现在 14:00,且第 2 峰值是第 1 峰值的 2.5 倍;拔节期与开花期均为单峰曲线,拔节期峰值出现在 16:00,开花期峰值出现在 10:00。抽穗期 LUE 日均值最高,说明柳枝稷在高温、高光强下,光合利用效率明显提高。

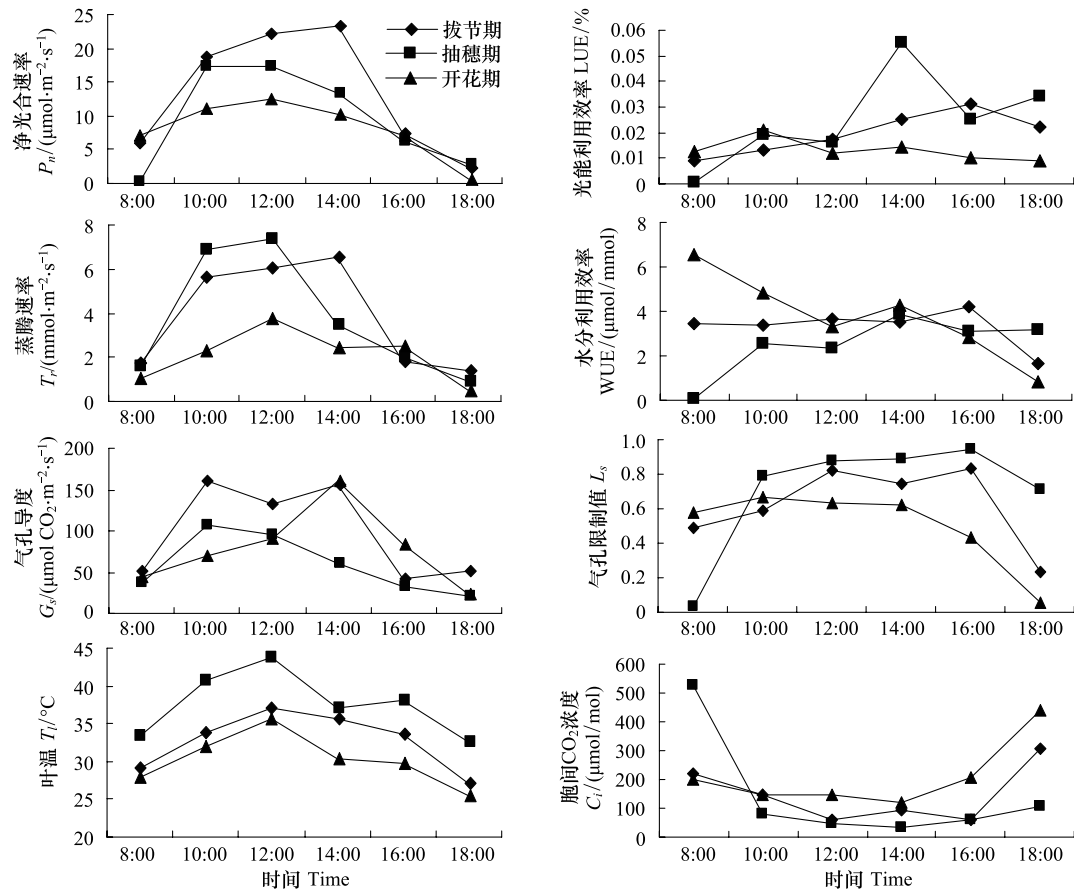


图3 柳枝稷不同生育期光合生理指标的日变化

Fig. 3 Diurnal variations of photosynthetic physiological characteristics of *P. virgatum* L. in different growth stages

柳枝稷拔节期 T_l 日均值高于抽穗期,开花期最低,其不同生育期 T_l 日变化曲线均为单峰曲线,拔节期峰值出现在 14:00,抽穗期、开花期峰值出现在 12:00。抽穗期 10:00—12:00 的 T_l 值高于拔节期相应时间段的 T_l 值,此阶段主要受温度的影响,而 14:00 低于拔节期,此时主要受气孔收缩的影响。从 WUE 图可看出,拔节期全天 WUE 变化不大;开花期全天 WUE 变化幅度最大,12:00 出现 1 个低谷;抽穗期 WUE 曲线呈双峰变化,10:00 水分利用效率较高,14:00 水分利用效率最高;这可能是由于午间温度最高, T_l 的加快造成 WUE 的下降。从全天来看,开花期 WUE 最高,拔节期次之,抽穗期最小。

气孔是植物与外界进行物质交换的大门,气孔导度很好地反应了气孔的开放程度,在 G_s 图中,抽穗期与开花期呈单峰曲线,拔节期呈双峰曲线,两个峰值分别出现在 10:00 与 14:00;抽穗期单峰出现在 10:00,开花期单峰出现在 14:00。这一现象说明气孔为防止水分的过分损失,在高温、高光强的天气里,会提前收缩气孔。 L_s 与 C_i 日变化趋势正好相反, L_s 图呈正钟型,抽穗期值大于拔节期,开花期最小; C_i 图呈倒钟型,开花期值大于拔节期,抽穗期值最小。

2.3 气体交换指标与环境因子的相关性

植物光合作用过程中,气体交换受环境因子的影响很大。表 1 统计了两种牧草光合作用中所涉及的 13

种光合生理特征指标及环境因子间的相关关系。从表中可看出 P_n 与 T_r 、 G_s 、 L_s 、PAR 具有极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.706、0.711、0.560、0.619, 其中与 G_s 相关性最高; 与 C_i 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 相关系数为 -0.591; 与 C_a 呈显著负相关 ($P < 0.05$, $r = -0.397$); 与 T_l 呈显著正相关 ($P < 0.05$, $r = 0.446$)。 T_r 与 G_s 、 V_{pdl} 、 T_a 、 T_l 、PAR 均呈极显著正相关关系, 但与 G_s 相关性最高 ($P < 0.01$, $r = 0.815$), 其次为 T_a ($P < 0.01$, $r = 0.754$); 与 C_a 呈显著负相关 ($P < 0.05$, $r = -0.448$)。 G_s 与 PAR 呈极显著正相关 ($P < 0.01$, $r = 0.615$)。 C_i 与 L_s 、WUE 呈极显著负相关 ($P < 0.01$, $r = -0.969$; $r = -0.546$)。 V_{pdl} 与 T_a 、 T_l 、PAR 呈极显著正相关 ($P < 0.01$, $r = 0.953$; $r = 0.962$; $r = 0.494$), 与 RH 呈极显著负相关 ($P < 0.01$, $r = -0.705$)。 T_l 与 RH 呈极显著负相关 ($P < 0.01$, $r = -0.539$), 与 PAR 呈极显著正相关 ($P < 0.01$, $r = 0.590$)。

表 1 气体交换指标与环境因子间的相关性分析

Table 1 The correlation among the gas exchanges indexes and environmental factors

	P_n	T_r	G_s	C_i	L_s	LUE	WUE	C_a	V_{pdl}	T_a	T_l	RH	PAR
P_n	1.000	0.706 **	0.711 **	-0.591 **	0.560 **	-0.024	0.230	-0.397 *	0.346	0.423	0.446 *	0.050	0.619 **
T_r		1.000	0.815 **	-0.192	0.161	-0.175	-0.218	-0.448 *	0.659 **	0.754 **	0.745 **	-0.133	0.714 **
G_s			1.000	-0.084	-0.010	-0.219	-0.167	-0.412 *	0.168	0.351	0.335	0.286	0.615 **
C_i				1.000	-0.969 **	-0.379 *	-0.546 **	0.435 *	-0.404 *	-0.363 *	-0.391 *	0.363 *	-0.196
L_s					1.000	-0.375 *	0.608 **	-0.356	0.459 *	0.419 *	0.452 *	-0.392 *	0.200
LUE						1.000	0.441 *	-0.359	-0.014	-0.042	-0.049	-0.226	-0.559 **
WUE							1.000	-0.009	-0.140	-0.117	-0.085	0.211	-0.082
C_a								1.000	-0.328	-0.385 *	-0.379 *	0.147	-0.183
V_{pdl}									1.000	0.953 **	0.962 **	-0.705 **	0.494 **
T_a										1.000	0.993 **	-0.537 **	0.567 **
T_l											1.000	-0.539 **	0.590 **
RH												1.000	0.015
PAR													1.000

** 和 * 分别表示相关显著性水平达到 0.01 和 0.05

2.4 光响应曲线及其相关指标

光是光合作用的主导因子, 对每种绿色植物均可作出光合作用对光的响应曲线。通过光响应曲线, 可以确定光 LCP、LSP、 Q 、 P_{nmax} 等指标。图 4 与图 5 为两种牧草不同生育期 PAR- P_n 与 PAR- P_v 光响应曲线。从 PAR- P_n 曲线图中可以看出, P_n 在 PAR 达 $1500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右时为最高, 随 PAR 继续升高而降低; PAR- P_v 曲线正好相反, P_v 在 PAR 为 $1500—2000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间时保持微小的增长。该曲线图完整地反映了两种牧草在晴朗天气下, P_n 随 PAR 变化的趋势。因此, PAR- P_v 拟合曲线效果较为理想。

表 2 为两种牧草在低光强下与 PAR 的拟合直线方程及相关指标。从图 5 中可以看出, 新引 1 号东方山

表 2 不同生育期光合作用-光响应曲线方程及相关指标

Table 2 Fitting equation of PAR- P_n response curves and correlative indexes in different growth stages

材料 Material	生育期 Growth stage	拟合直线方程 Fitting equation	r	最大净光合速率 $P_{nmax}/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	光饱和点 LSP/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	光补偿点 LCP/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	暗呼吸速率 $R_{day}/$ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
	拔节期	$y = 0.0556x - 3.4624$	0.6641	18.69	398.42	62.27	-3.54
柳枝稷	抽穗期	$y = 0.0263x - 1.9222$	0.3949	20.71	860.54	73.09	-1.89
<i>Panicum virgatum</i> L.	开花期	$y = 0.0384x - 3.1819$	0.8020	15.83	495.10	82.86	-2.47
山羊豆	分枝期	$y = 0.0305x - 1.629$	0.9102	16.93	608.49	53.41	-1.75
<i>Galega orientalis</i> Lam.	结荚期	$y = 0.0579x - 3.6663$	0.9911	13.92	303.74	63.32	-3.14

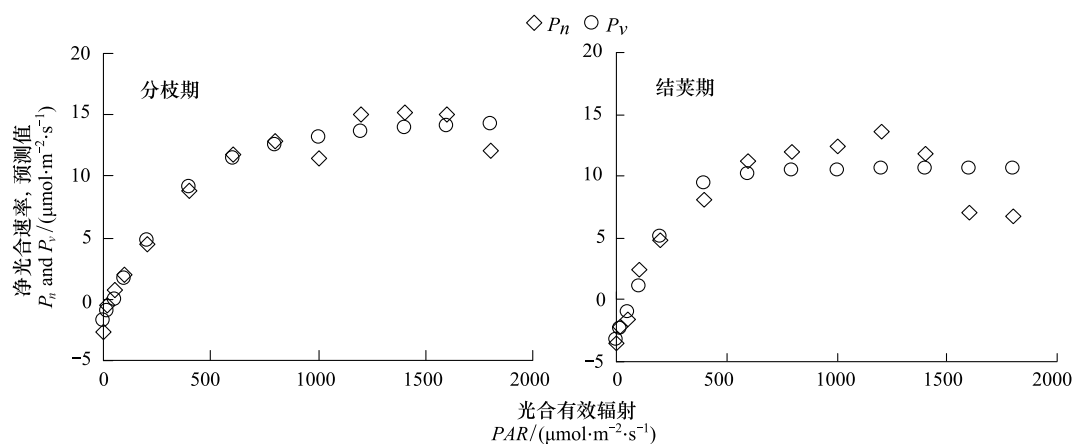


图4 新引1号东方山羊豆分枝期与结荚期光响应曲线

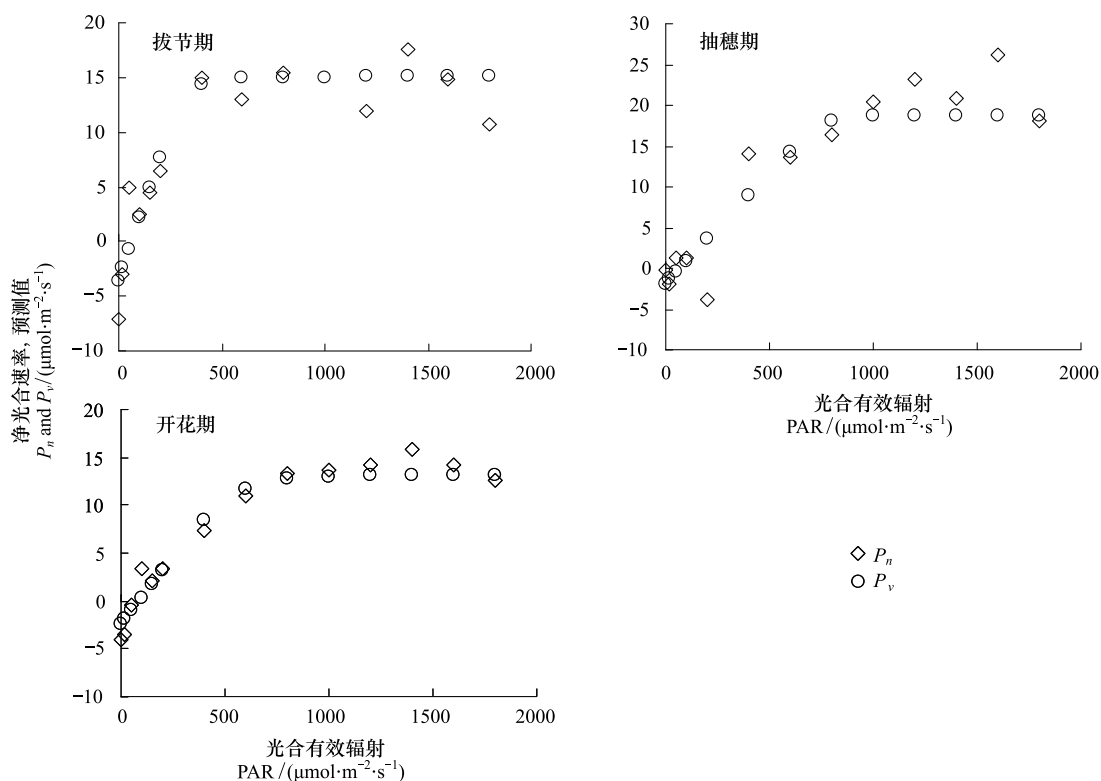
Fig. 4 Light response-curve of *G. orientalis* cv. *xinyin* No. 1 in branching and podding stage

图5 柳枝稷拔节期、抽穗期与开花期光响应曲线

Fig. 5 Light response-curve of *P. virgatum* L. in jointing, heading and flowering stage

羊豆拟合直线方程的相关系数较高,而柳枝稷较低,这可能与当时测定时天气变化有关。新引1号东方山羊豆分枝期 P_{nmax} 、LSP 高于结荚期, LCP 、 R_{day} 低于结荚期。柳枝稷抽穗期 P_{nmax} 高于拔节期,开花期最低;LSP 抽穗期最高,其次是开花期,拔节期最低; LCP 拔节期最低,抽穗期次之,开花期最高; R_{day} 抽穗期最低,开花期较高,拔节期最高。

3 讨论

光是太阳的辐射能以电磁波的形式投射到地球表面的辐射线,太阳辐射能是地球上一切能量的最终来源。因此,PAR 是植物光合作用的驱动因子,它的变化引起了 T_a 的变化,而 C_a 与 RH 的变化受 T_a 的影响较大。同一种牧草不同生育期 P_n 日变化的差异是由外界环境因子、牧草的不同生理特点、气孔构造特点及其自

身生长节律决定的。在外界环境因子的影响下, T_l 、 C_i 、 G_s 、 T_r 等植物光合生理指标发生变化,最终引起 P_n 的变化。新引 1 号东方山羊豆 P_n 日变化呈双峰曲线,说明存在“光合午休”现象,这与大多数植物光合日变化趋势相似^[25-28]。在此阶段,新引 1 号东方山羊豆在高光合有效辐射与高温的胁迫下,气孔导度降低,蒸腾作用减弱,这可能是引起该牧草光合“午休”现象的最主要原因,与谢田玲等^[22]的分析结果相同。柳枝稷 P_n 日变化呈单峰曲线,说明其对高光合有效辐射及高温有较强的耐受能力,这与高鹤等^[29]较早的研究结果相符。总体来说,新引 1 号东方山羊豆分枝期 P_n 日均值高于结荚期;柳枝稷拔节期 P_n 日均值最高,抽穗期次之,开花期最小。这与牧草的生长节律相符,拔节(分枝)期是牧草生长旺盛期,开花(结荚)是其生长衰退期。

光合作用是十分复杂的生理过程,除与环境因子有关外,还与植物自身因素有关,其中 P_n 与 T_r 是该生理过程中两个重要指标。影响 P_n 与 T_r 的因子很多,并且这些因子相互影响。从相关性分析中可知,PAR 与 T_a 、 T_l 、 V_{pld} 、 G_s 、 T_r 、 P_n 显著正相关,它的变化引起这些因子的显著变化,这与光合作用机理相符。其中 P_n 和 T_r 均与 G_s 相关性最高,说明在整个光合作用中,植物气孔发挥了很大的调控作用。它作为植物体发育中复杂的调节功能器官,其中一个重要功能是防止由于蒸腾作用引起水分过分的损失。

光响应曲线很好地反映了植物 P_n 随 PAR 的变化趋势。在低光强下, P_n 迅速直线上升,即光合作用诱导期。在诱导期初期,CO₂ 浓度相对饱和,羧化限制等非气孔限制占优势;在这一阶段,光合机构高速运转,需要 Calvin 循环中间产物水平提高、光合碳同化酶系充分活化和气孔更为开放,在这个阶段叶片 P_n 主要受中间产物水平和酶活化水平的限制。在诱导后期,在光合速率的气孔限制和非气孔限制两种因素中,主次关系发生了转变,气孔限制变成了主要限制因素,这时虽然气孔导度在增加, P_n 也在增加,但是两者增长速度并不同步,则 CO₂ 同化不能与光能吸收协调,光合电子传递受阻,Rubisco 羧化活性降低,这一阶段通常认为光合作用是被气孔导度所限制,升高缓慢。

植物叶片的光饱和点和光补偿点反映了植物对光照条件的要求,是判断植物耐阴性的一个重要指标,根据植物对光强的要求,传统上将植物分为阳性植物、阴性植物和居于两者之间的耐阴植物。一般情况下光饱和点和光补偿点均较低,属于耐阴植物,反之属于阳性植物^[30-31]。光补偿点较低,光饱和点较高的植物对光环境的适应性较强;而光补偿点较高,光饱和点较低的植物对光照的适应性较弱^[32]。大体上阴性植物的光补偿点小于 20 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,光饱和点为 500—1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 或更低,而阳性植物的光补偿点为 50—100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,光饱和点为 1500—2000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 或更高^[33]。结合杜占池和杨宗贵^[34]总结出的不同植物光补偿点和饱和点范围,柳枝稷为阳生植物,而新引 1 号东方山羊豆为耐阴植物,且柳枝稷比新引 1 号东方山羊豆对光环境的适应性强。表观量子效率反映了植物对光能的利用情况,对于长势良好的植物,表观量子效率 AQY 一般在 0.04—0.07 之间^[35]。本文研究的两种牧草均在此范围内,不同生育期 AQY 值略有差异,不排除天气的影响,需要进一步的测定与分析。

山西处于我国由东部湿润农区向西部干旱绿洲农区过渡的半干旱农区,生态环境恶劣,水资源短缺,土壤肥力不高,是制约本省传统农业发展的瓶颈。大力种植优良牧草和饲料作物发展养殖业,对于推动耗粮型畜牧业向节粮型畜牧业转变,调整农业产业结构,建立良性循环的农业生态系统,提高农民生活水平等具有重大现实意义。本文在引种栽培的基础上,对筛选出的两种牧草进行了光合生理生态的研究,认定了这两种牧草在山西太原地区是比较适宜的,还需在栽培技术方面开展相关试验研究,以期推动生态草地农业的发展。

References:

- [1] Boylan D, Bush V, Bransby D I. Switchgrass cofiring: pilot scale and field evaluation. *Biomass and Bioenergy*, 2000, 19(6): 411-417.
- [2] Li G Y, Li J L, Wang Y, Pan Y N, Dou G Y. Research progress on the clean bio-energy production from high yield *Panicum virgatum*. *Pratacultural Science*, 2008, 25(5): 15-21.
- [3] Li J L, Zhu W B, Xie G H, Lin C S, Cheng X. The development of *Panicum virgatum* as an energy crop. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(3): 232-240.
- [4] Hu S M, Gong Z X, Jiang D S. Brief introduction of a bio-energy crop- *Panicum virgatum*. *Pratacultural Science*, 2008, 25(6): 29-33.

- [5] Elbersen H W, Christian D G, Bassam N E L. Switchgrass variety choice in Europe. *Aspects of Applied Biology*, 2001, 65: 21-28.
- [6] Nõmmsalu H, Meripõld H, Metlitskaja J, Raig H. *Galega orientalis* Lam. // Zeng Y J, trans. *Foreign Animal Husbandry: Grassland and Pasture*, 1998, 80(1): 40-42.
- [7] Carreck N L, Mand M, Williams I H. Goat's rue. *Bee World*, 2001, 82(3): 142-146.
- [8] Fairey N A, Lefkovitch L P, Coulman B E, Fairey D T, Kunelius T, Mckenzie D B, Michand R, Thomas W G. Cross-Canada comparison of the productivity of fodder galega (*Galega orientalis* Lam.) with traditional herbage legumes. *Canadian Journal of Plant Science*, 2000, 80(4): 793-800.
- [9] Dorofejuk M T, Dorofejuk V F, Addrusewitsch V T. Cultivation of eastern goat's rue (*Galega orientalis* Lam.) as a perennial fodder plant on turf-podzol soils in the republic of Belarus. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 1999, 44(2): 131-148.
- [10] Møller E, Hostrup S B, Boelt B. Yield and quality of fodder galega (*Galega orientalis* Lam.) at different harvest managements compared with lucerne (*Medicago sativa* L.). *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B: Soil and Plant Science*, 1997, 47(2): 89-97.
- [11] Arapetyan E, Martyniak L, Gorb L, Cherevko M. *Galega orientalis* Lam. as fodder // Scannerini S, Baker A, Charlwood B V, Damiano C, Franz C. *Biotechnology As A Tool for the Exploitation of Mountain Lands. Acta Horticulturae*, 1998: 21-25.
- [12] Aptemob H B. *Galega orientalis* Lam. in the blank soil belt of central Russia // Zhang Z H, trans. *Foreign Animal Husbandry: Grassland and Pasture*, 1996, (2): 7-11.
- [13] He S W, Chang S H, Wu D L. Preliminary study on induction of *Galega orientalis*. *Pratacultural Science*, 2003, 20(11): 28-29.
- [14] Ning B, Chen F L. A promising grass- *Galega orientalis* Lam. Inner Mongolia Prataculture, 2000, (3): 64-64.
- [15] Shen Y Y, Zhang Z H, Xie T L. Research progress on goat's rue. *Acta Prataculturae Sinica*, 2003, 12(6): 105-109.
- [16] Zhang Q B, Yang Z Z, Jia N T, Gu X, Meng H, Ling W S. Preliminary introduction study on *Galega orientalis* L. *Grassland of China*, 2001, 23(4): 17-20.
- [17] Zhang Z H. Biological characteristics and planting technology of Goat's-rue. *Grassland and Turf*, 2002, (1): 19-21.
- [18] Munire, Zhang Q B, Tian C, Zhu Z Y, Wang C J, Alim. Evaluation of forage quality of *Galega orientalis* cv. Xinyin NO. 1. *Pratacultural Science*, 2011, 28(3): 410-413.
- [19] Zhang Q B, Zhu Z Y, Yang X Z, Meng H, Gu X, Liu W S, Li Y G. Preliminary experiement on rules of culture technology of *Galega orientalis* L. *Grass-Feeding Livestock*, 2003, 119(2): 61-62.
- [20] Zhang Q B, Li Z, Zhu Z Y, Yang Z Z, Fu A L, Meng H. Comparison experiment between *Galega orientalis* L. and other Leguminosae grasses // The Abstract Collection of the Seventh National Member Representative Congress of Ecological Society of China. Beijing: Ecological Society of China, 2004: 18-18.
- [21] Zhou Q P, Chen J M, Wan H E. Comparison of photosynthetic characteristics between *Stipa Bungeana* and *Panicum Virgatum*. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(2): 129-133.
- [22] Xie T L, Shen Y Y, Shao X Q, Gao C Y. Differences in photosynthetic rate, transpiration rate and water use efficiency between four legume species on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1679-1686.
- [23] Berry J A, Downton W J S. Environmental regulation of photosynthesis // Govind J, ed. *Photosynthesis (Vol III)*. New York: Academic Press, 1982: 263-343.
- [24] Liu Y F, Xiao L T, Tong J H, Li X B. Primary application on the non-rectangular hyperbola model for photosynthetic light-response curve. *Chinese Agriculture Science Bulletin*, 2005, 21(8): 76-79.
- [25] Chen D X, Li Y D, Luo T S, Chen B F, Lin M X. Study on photosynthetic physiological ecology of *Cryptocarya chinensis* in tropical montane rain forest in Jianfengling, Hainan Island. *Forest Research*, 2003, 16(5): 540-547.
- [26] Shun C H, Li Y, He H Y, Du W. Photosynthetic characteristics of *Chenopodium album*. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, 26(2): 416-419.
- [27] Tan H J, Zhou H Y, Li X R, Zhang Z S. Primary studies on daily photosynthetic changes of rare and endangered plant *Helianthemum soongoricum*. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(2): 262-267.
- [28] Qi J, Xu Z, Wang H Q, Yan W H, Ma Y B. Study on the photosynthetic characteristics of *Elymus excelsus*. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, 29(3): 561-567.
- [29] Gao H, Zong J Q, Chen J B, Guo A G, Liu J X. Diurnal change of photosynthetic characteristics and response to light intensity of seven ornamental grasses. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, 19(4): 87-93.
- [30] Leng P S, Yang X H, Hu Y, Zhu H Y. Studies on the characteristics of photosynthesis and transpiration of five gardening trees. *Journal of Beijing Agricultural College*, 2000, 15(4): 13-18.
- [31] Wei J Q, Jiang S Y, Tang H, Jiang Y S, Qi X X, Wang M L. Photosynthetic and transpiration characteristics of *Corydalis saxicola* and its response

to light intensity and concentration of CO_2 . Guihai, 2006, 26(3): 317-320.

- [32] Zhang Z A, Yang F, Chen Z Y, Xu K Z. Relationship between diurnal changes of net photosynthetic rate and environmental factors in leaves of *Zizania latifolia*. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(3): 502-509.
- [33] Jiang G M. Plant Ecophysiology. Beijing: Higher Education Press, 2004: 65-66.
- [34] Du Z C, Yang Z G, Cui X Y. Study on photosynthetic physiological ecology of plants in the typical steppe zone. Grassland of China, 1999, (3): 20-27.
- [35] Long S P, Humphries S, Falkowski P G. Photoinhibition of photosynthesis in nature. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1994, 45: 633-662.

参考文献:

- [2] 李高扬, 李建龙, 王艳, 潘永年, 窦观一. 利用高产牧草柳枝稷生产清洁生物质能源的研究进展. 草业科学, 2008, 25(5): 15-21.
- [3] 刘吉利, 朱万斌, 谢光辉, 林长松, 程序. 能源作物柳枝稷研究进展. 草业学报, 2009, 18(3): 232-240.
- [4] 胡松梅, 龚修珍, 蒋道松. 生物能源植物柳枝稷简介. 草业科学, 2008, 25(6): 29-33.
- [6] Nõmmsalu H, Meripõld H, Metlitskaja J, Raig H. 饲用东方山羊豆. 曾彦军, 译. 饲用东方山羊豆. 国外畜牧学: 草原与牧草, 1998, 80(1): 40-42.
- [12] 张自和译. 俄罗斯中部黑土带的东方山羊豆. 国外畜牧学: 草原与牧草, 1996, (2): 7-11.
- [13] 何世伟, 常生华, 武得礼. 饲用山羊豆引种研究初报. 草业科学, 2003, 20(11): 28-29.
- [14] 宁布, 陈凤林. 有希望的草种——东方山羊豆. 内蒙古草业, 2000, (3): 64-64.
- [15] 沈禹颖, 张自和, 谢田玲. 优良豆科牧草——东方山羊豆的研究与利用. 草业学报, 2003, 12(6): 105-109.
- [16] 张清斌, 杨志忠, 贾纳提, 顾祥, 孟辉, 刘万胜. 东方山羊豆引种研究初报. 中国草地, 2001, 23(4): 17-20.
- [17] 张自和. 东方山羊豆的生物学特性与栽培技术. 草原与草坪, 2002, (1): 19-21.
- [18] 穆尼热, 张清斌, 田聪, 朱忠艳, 王承军, 阿力木. 新引1号东方山羊豆牧草品质的评价. 草业科学, 2011, 28(3): 410-413.
- [19] 张清斌, 朱忠艳, 杨志忠, 孟辉, 顾祥, 刘万胜, 李银贵. 东方山羊豆栽培技术规程初探. 草食家畜, 2003, 119(2): 61-62.
- [20] 张清斌, 李柱, 朱忠艳, 杨志忠, 付爱良, 孟辉. 东方山羊豆与其它豆科牧草品种比较试验 // 中国生态学会第七届全国会员代表大会论文摘要荟萃. 北京: 中国生态学会, 2004: 18-18.
- [21] 周秋平, 程积民, 万惠娥. 本氏针茅与柳枝稷光合生理生态特征比较研究. 水土保持通报, 2009, 29(2): 129-133.
- [22] 谢田玲, 沈禹颖, 邵新庆, 高崇岳. 黄土高原4种豆科牧草的净光合速率和蒸腾速率日动态及水分利用效率. 生态学报, 2004, 24(8): 1679-1686.
- [24] 刘宇峰, 萧浪涛, 童建华, 李晓波. 非直线双曲线模型在光合光响应曲线数据分析中的应用. 中国农学通报, 2005, 21(8): 76-79.
- [25] 陈得祥, 李意德, 骆士寿, 陈步峰, 林明献. 海南岛尖峰岭热带山地雨林下层乔木中华厚壳桂光合生理生态特性的研究. 林业科学研究, 2003, 16(5): 540-547.
- [26] 孙存华, 李扬, 贺鸿雁, 杜伟. 藜的光合特性研究. 西北植物学报, 2006, 26(2): 416-419.
- [27] 谭会娟, 周海燕, 李新荣, 张志山. 珍稀濒危植物半日花光合作用日动态变化的初步研究. 中国沙漠, 2005, 25(2): 262-267.
- [28] 祁娟, 徐柱, 王海清, 闫伟红, 马玉宝. 肥披碱草叶片光合特性研究. 西北植物学报, 2009, 29(3): 561-567.
- [29] 高鹤, 宗俊勤, 陈静波, 郭爱桂, 刘建秀. 7种优良观赏草光合生理日变化及光响应特征研究. 草业学报, 2010, 19(4): 87-93.
- [30] 冷平生, 杨晓红, 胡悦, 朱慧盈. 5种园林树木的光合和蒸腾特性的研究. 北京农学院学报, 2000, 15(4): 13-18.
- [31] 韦记青, 蒋水元, 唐辉, 蒋运生, 漆小雪, 王满莲. 岩黄连光合与蒸腾特性及其对光照强度和 CO_2 浓度的响应. 广西植物, 2006, 26(3): 317-320.
- [32] 张治安, 杨福, 陈展宇, 徐克章. 菰叶片净光合速率日变化及其与环境因子的相互关系. 中国农业科学, 2006, 39(3): 502-509.
- [33] 蒋高明. 植物生理生态学. 北京: 高等教育出版社, 2004: 65-66.
- [34] 杜占池, 杨宗贵, 崔晓勇. 草原植物光合生理生态研究. 中国草地, 1999, (3): 20-27.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 6 March, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Review and Monograph

- Forest health studies based on remote sensing: a review GAO Guanglei, XIN Zhongbao, DING Guodong, et al (1675)
- Progress of agent-based agricultural land change modeling: a review YU Qiangyi, WU Wenbin, YANG Peng, et al (1690)

Autecology & Fundamentals

- Dynamic distribution of *Nemopilema nomurai* in inshore waters of the northern Liaodong Bay, Bohai Sea WANG Bin, QIN Yubo, DONG Jing, et al (1701)
- Full length cDNA cloning and tissue expression of prophenoloxidase from *Oratosquilla oratoria* LIU Haiying, LIU Lianwei, JIANG Yusheng, et al (1713)
- Morphometrics investigation of the skulls, mandibles and molar in *Tupaia belangeri* from Yunnan, Guizhou, Guangxi ZHU Wanlong, JIA Ting, HUANG Chunmei, et al (1721)
- Effects of litter thickness on leaf litter decomposition and enzyme activity of three trees in the subtropical forests JI Xiaoyan, JIANG Hong, HONG Jianghua, et al (1731)
- The photosynthetic carbon fixation characteristics of common tree species in northern Zhejiang ZHANG Jiao, SHI Yongjun, ZHU Yueqing, et al (1740)
- Diurnal changes in the photosynthetic characteristics of two high yield and high quality grasses during different stages of growth and their response to changes in light intensity GUO Chunyan, LI Jinchuan, YUE Jianying, et al (1751)
- Evaluation technology on drought disaster to yields of winter wheat based on WOFOST crop growth model ZHANG Jianping, ZHAO Yanxia, WANG Chunyi, et al (1762)
- Genetic diversity of *Conocephalus maculatus* of different geographic populations based on mitochondrial DNA control region analysis ZHOU Zhijun, SHANG Na, LIU Jing, et al (1770)
- Relationships among female body size, clutch size, and egg size in captive *Deinagkistrodon acutus* HU Minghang, TAN Qunying, YANG Daode (1778)
- The field control of *Bactrocera dorsalis* (Hendel) with parasitoid and sterile male ZHENG Sining, HUANG Juchang, YE Guanglu, et al (1784)
- Allelopathic effects of artemisinin on ectomycorrhizal fungi LI Qian, YUAN Ling, WANG Mingxia, et al (1791)

Population, Community and Ecosystem

- Establishment of integrated methodology for bay ecosystem health assessment and its application in Daya Bay LI Chunhou, LIN Lin, XU Shannan, et al (1798)
- The influence of upwelling and water mass on the ecological group distribution of zooplankton in Zhejiang coastal waters SUN Lufeng, KE Chang, XU Zhaoli, et al (1811)
- Identification of key ecosystem for ecological restoration in semi-arid areas: a case study in Helin County, Inner Mongolia PENG Yu, GAO Ying, FENG Jinzhao, et al (1822)
- The great rainfall effect on soil respiration of *Pinus tabulaeformis* plantation in Taiyue Mountain JIN Guanyi, ZHAO Xiuhai, KANG Fengfeng, et al (1832)
- The litter-fall characteristics and their response to drought stress in the Masson pins forests damaged by acid rain at Chongqing, China WANG Yihao, WANG Yanhui, YU Pengtao, et al (1842)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Thermal environment effect of urban water landscape YUE Wenzhe, XU Lihua (1852)
- Landscape ecological security pattern associated with the introduction of exotic tree species *Eucalyptus* ZHAO Xiaoqing, HE Chunlan (1860)
- Ecological balance between supply and demand in Chongqing City based on cultivated land ecological footprint method SHI Kaifang, DIAO Chengtai, SUN Xiufeng, et al (1872)
- Effect of elevated CO₂ on methanotrophs in the rhizosphere of rice plant YAN Chen, XU Jing, ZHONG Wenhui, et al (1881)

Resource and Industrial Ecology

- The seawater environment quality evaluation research base on variable fuzzy pattern recognition model KE Lina, WANG Quanming, SUN Xinguo, et al (1889)
- An *in situ* study on biodeposition of ascidian (*Styela plicata*) in a subtropical aquaculture bay, southern China YAN Jiaguo, QI Zhanhui, TIAN Ziyang, et al (1900)
- Distribution of soil NPK nutrient content in deep soil profile of typical apple orchards on the Loess Plateau ZHANG Lina, LI Jun, FAN Peng, et al (1907)
- Soil respiration and its responses to soil moisture and temperature under different tillage systems in dryland maize fields ZHANG Dingchen, CAI Dianxiong, DAI Kuai, et al (1916)
- Photosynthetic characteristics of soybean and salvia in an agroforestry system in the Hilly Region, Shangluo, China PENG Xiaobang, ZHANG Shuoxin (1926)
- Regulation of exogenous brassinosteroid on growth and photosynthesis of *Helianthus tuberosus* seedlings and cadmium biological enrichment under cadmium stress GAO Huiling, LIU Jinlong, ZHENG Qingsong, et al (1935)
- Calibration coefficients of Granier original formula based on sap flow of *Platycladus orientalis* LIU Qingxin, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (1944)

Research Notes

- An evaluation index system classifying the conservation value of wetland nature reserves based on AHP SUN Rui, CUI Guofa, LEI Ting, et al (1952)
- Root biomass and its distribution of *Azadirachta indica* and *Acacia auriculiformis* plantations in the Dry-hot Valley GAO Chengjie, TANG Guoyong, LI Kun, et al (1964)
- Physiological response of *Vitex trifolia* to sand burial in the sand coast ... ZHOU Ruilian, WANG Jin, YANG Shuqin, et al (1973)
- Soil fertility under different forest types in the Helan and Liupan Mountain ranges of Ningxia Province JIANG Lin, GENG Zengchao, ZHANG Wen, et al (1982)

Opinions

- Dynamic of litterfall in ten typical community types of Xiaoxing'an Mountain, China HOU Lingling, MAO Zijun, SUN Tao, et al (1994)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

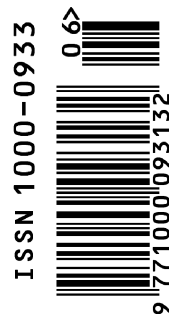
第 33 卷 第 6 期 (2013 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 6 (March, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元