

水分胁迫对羊草光合产物分配及其 气体交换特征的影响

王云龙¹ 许振柱¹ 周广胜^{1, 2*}

(1 中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093) (2 中国气象局沈阳大气环境研究所 沈阳 110016)

摘要 通过对典型草原优势植物种羊草 (*Leymus chinensis*) 的盆栽实验, 模拟 5 个土壤水分梯度 (分别为土壤含水量的 75% ~ 80% (对照), 60% ~ 65%、50% ~ 55%、35% ~ 40% 和 25% ~ 30%) 对羊草叶片相对含水量、光合速率、光合产物分配和种群 CO₂ 交换速率的影响。结果表明, 随着土壤水分胁迫的增加, 羊草叶片相对含水量呈先增加而后下降的单峰型变化, 且在 50% ~ 55% 处理下达到最大; 叶片光合速率随着水分胁迫的增加而减小, 且 75% ~ 80%、60% ~ 65%、50% ~ 55% 的水分处理与 35% ~ 40%、25% ~ 30% 的水分处理的叶片光合速度日动态规律不同。羊草总生物量及根、鞘、叶生物量均随着水分胁迫的增加呈下降趋势。干旱促进早期羊草根的分配和根冠比增加, 但到后期却使它们降低, 表明羊草在受到较长期的持续干旱后通过增加根部的比重来提高抗旱性的能力逐渐降低。羊草根茎的生物量和分配随着土壤水分含量降低均呈现出先增加而后下降的趋势, 羊草根茎的生物量在 50% ~ 55% 处理下达最大 (1.28 g·株⁻¹), 而羊草根茎的分配在 35% ~ 40% 处理下达最大 (48.5%)。羊草种群 CO₂ 的净交换速率随着水分胁迫的增加而减小, 其日交换量随着水分胁迫的增加而增加, 且在 60% ~ 65% 处理下达到最高, 而后呈下降趋势, 并在 25% ~ 30% 处理下为负值。研究结果表明, 土壤含水量的 40% 可能是羊草对于水分变化响应的阈值。

关键词 土壤水分胁迫 光合产物分配 光合速率 种群 CO₂ 交换速率 土壤水分阈值

CHANGES IN BIOMASS ALLOCATION AND GAS EXCHANGE CHARACTERISTICS OF *LEYMUS CHINENSIS* IN RESPONSE TO SOIL WATER STRESS

WANG Yun-Long¹ XU Zhen-Zhu¹ and ZHOU Guang-Sheng^{1, 2*}

(1 Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

(2 Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110016, China)

Abstract Global environmental change has already been and will continue to reallocate water and heat resources at a global scale, and, as a result, will affect the structure and function of terrestrial ecosystems. For temperate zone steppe ecosystems, aridification currently is the most significant environmental problem and this may be intensified due to global warming. The responses of the dominant species of these ecosystems to water stress will be important for understanding how terrestrial ecosystems will respond to global change and how species will adapt to the aridification under the backdrop of global warming as well as the impact on the global carbon budget.

The response of leaf relative water content, leaf photosynthetic rate, biomass allocation and net population CO₂ exchange rate of *Leymus chinensis* to soil water stress were studied using a pond cultivation experiment from May to July 2002. Five soil water treatment levels were used: 75% - 80% (control), 60% - 65%, 50% - 55%, 35% - 40% and 25% - 30% of soil water holding capacity. The results are summarized below. 1) The relationship between leaf relative water content of *L. chinensis* and soil water stress could be expressed as a single peak curve with its maximum value appearing in the 50% - 55% soil water treatment. 2) Leaf photosynthetic rates decreased with an increase in soil water stress, and the diurnal pattern of leaf photosynthetic rates in the soil water treatments of 75% - 80%, 60% - 65% and 50% - 55% were different than that under the drier conditions of 35% - 40% and 25% - 30%. 3) The total biomass, root biomass, sheath biomass and leaf biomass of *L. chinensis* decreased with an increase in soil water stress. 4) Soil water stress promoted the allocation of carbon to roots and increased the root to shoot ratio of *L. chinensis* at the early growth stage but not at late growth stages. These results imply that increasing the root to shoot ratio is an adap-

收稿日期: 2003-11-05 接受日期: 2004-06-02

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (G1999043407), 中国科学院创新工程项目 (KZCX1-SW-01-12, KSCX2-1-07) 和国家自然科学基金项目 (40231018, 30070642, 49905005, 39730110, 30300049)

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: zhousg@public2.bta.net.cn

tive strategy for tolerating drought conditions. The relationship between the biomass of roots and sheaths and the percent of carbon allocation to soil water stress could also be expressed as a single peak curve with the maximum value of root and sheath biomass ($1.28 \text{ g} \cdot \text{plant}^{-1}$) appearing at the 50% – 55% soil water treatment and the maximum allocation to root and sheaths (48.5%) at 35% – 40% soil water content. 5) The net population CO_2 exchange of *L. chinensis* decreased with an increase in soil water stress. The relationship between daily net population CO_2 exchange of *L. chinensis* and soil water stress showed a single peak with the maximum value occurring at 60% – 65%. Negative values of daily net population CO_2 exchange of *L. chinensis* occurred at 25% – 30% soil water content. Moreover, the results indicated that 40% soil water holding capacity might be the tolerance threshold for *L. chinensis* below which this species is not able to survive.

Key words Soil water stress, Biomass allocation, Leaf photosynthetic rate, Net population CO_2 exchange, *Leymus chinensis*, Soil water threshold

土壤水分与植物的关系历来是生态学界研究的热点(董学军等,1994;许振柱等,2003)。土壤水分含量远离植物水分适宜范围时将会对植物的生理、形态、结构各方面产生影响(Meyer & Walker,1981;王霞等,2001)。当前正在发生的全球环境变化已经,并将继续引起全球水热格局的重新分布,从而将对全球植物产生严重影响。据预测,我国的干旱和半干旱区在未来将变得更加干旱(周广胜,2002;丁一汇,2002)。正因为如此,许多学者从不同角度、不同层次就植物对干旱化的适应与调控机理进行了大量研究(Singh *et al.*,1986;肖春旺等,2000;2001)。

羊草(*Leymus chinensis*)为广旱生根茎禾草,由羊草作为建群种而形成的羊草草原被认为是欧亚大陆草原区一种典型的草原类型。我国内蒙古东部以及东北地区、蒙古东部及中部和俄罗斯外贝加尔地区广泛分布羊草草原。以羊草为优势种的生态系统是中国东北样带内分布范围最大的陆地生态系统,是我国北方重要的畜牧业基地。因此,选择羊草作为研究材料不仅具有代表性,而且具有重要的现实意义。一些学者已经就羊草叶片的光合作用(杜占池等,1995;王玉辉等,2001)、羊草群落的土壤呼吸动态开展了研究(李凌浩等,2002),但是关于不同土壤水分梯度下羊草的光合速率特征与种群的 CO_2 日变化规律还未见报道。本研究利用控制土壤水分的室内盆栽方法,模拟羊草对土壤干旱的可能响应,以增进羊草对水分胁迫响应的理解,寻找羊草生长的水分阈值,为阐明羊草草原生态系统对全球变化的响应提供依据。

1 实验材料和实验设计

1.1 供试材料和方法

实验于2002年5月至7月在中国科学院植物研究所温室完成。期间,最高日温 $30 \sim 35^\circ\text{C}$,最低夜温 $23 \sim 28^\circ\text{C}$,最高光合有效辐射通量密度在 700

$\sim 1100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。实验使用的羊草种子于2001年秋季在中国内蒙古锡林浩特自然草地采集。进行种子预处理以提高发芽率:使用浓度5%的高锰酸钾溶液消毒8 min后低温($< 0^\circ\text{C}$)贮存,7 d后取出用水冲洗备播。实验用盆为聚乙烯塑料盆(0.56 L),内衬塑料薄膜以防水。盆内装0.64 kg的取自自然草地的烘干土,每盆留苗6株。

在植株开始分蘖时进行水分控制。按Hasio(1973)的方法划分5个土壤水分水平:对照(CON)、轻度干旱(LD)、中度干旱(MD)、严重干旱(SD)和极度干旱(VD)。土壤相对含水量分别为田间持水量的75%~80%(对照)、60%~65%、50%~55%、35%~40%、25%~30%。每天下午17:00用称重法控制土壤水分含量。每个处理15个重复。

1.2 测定项目与方法

根据Wilkinson等(2001)提供的方法略加修改测定叶片相对含水量:取鲜重大约1 g的叶片,放入25 ml的烧杯于黑暗中过夜,得到饱和鲜重。于 80°C 下烘干24 h称干重。叶片相对含水量(LRWC)用下式计算:

$$\text{LRWC}(\%) = \frac{FW - DW}{TW - DW} \times 100\%$$

式中:FW为叶片鲜重,TW为饱和鲜重,DW为干重。

由于羊草是禾本科植物,幼苗无茎,室内培养两个月后仍未见生殖生长,茎极小并深包在鞘内,茎鞘难以分离。在羊草处理初期(2002年5月8日)和处理末期(2002年7月12日)收获称重,每期每个处理收获3盆植株,以盆为单位分叶片、鞘、根茎和根4个部分进行取样。

使用便携式光合测定系统(ADC BioScientific LCI Analyser, Serial No. 30609, UK)在晴朗天气测定羊草刚展开的、最上部连体叶片的气体交换参数。

羊草种群 CO_2 交换速率的测定采用静态箱式法

(王凤玉等 2003)。箱体由透明有机玻璃制成,底面积为 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$,高 15 cm 。设置 3 个重复,每个处理随机选取 3 盆。在温室内光强合适的平坦地面挖一个可放入 3 盆羊草的小坑,深度与羊草盆内土壤高度相同。其上铺设 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的透明塑料布作为待测样地,将气体采集箱的底钢圈砸入待测样地土壤 5 cm 深处,用密封条与气体分析室封闭联接,每 2 h 测定 1 次。测定前进行仪器调零校准,扣箱前让仪器的各项读数在自然状况下稳定,每次测量持续 3 min ,每间隔 10 s 记录箱内 CO_2 浓度和温度,计算 3 min 内的 CO_2 通量代表该测量时间的羊草种群净 CO_2 气体交换量。气压由便携式光合测定系统同时测定,羊草种群的净 CO_2 气体交换速率(CO_2 通量)计算如下:

$$Q = v \times \Delta k \times \frac{27\ 315}{27\ 315 + t} \times \frac{p}{p_0} \times 3\ 600 \times \frac{1}{10^3} \times \frac{1}{n_{\text{pot}}}$$

式中: Q 为种群 CO_2 净交换速率($\text{mg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{pot}^{-1}$), v 为箱体体积(dm^3), Δk 为每次测量过程中箱体内 CO_2 浓度随时间变化的直线斜率($\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$), n_{pot} 为放入箱内的盆数, t 为每次测量时箱内的平均温度($^{\circ}\text{C}$), p 和 p_0 分别为测定时的气压和标准大气压(Mpa)。

1.3 数据分析

使用 EXCEL 对数据进行分析与作图,并对叶片相对含水量和光合产物分配数据进行 ANOVA(单因素方差)分析和 LSD(最小显著差数法)分析。

2 结果与分析

2.1 羊草叶片含水量

羊草叶片相对含水量随生育进程降低幅度在不同土壤水分处理下依次为:10.8%、9.0%、9.5%、8.4%、6.3%。25%~30%土壤水分处理下羊草叶片相对含水量降低幅度最小,可能是因为 25%~30%处理初期的叶片相对含水量相当低(79.8%),表明 25%~30%水分处理在生育初期即对羊草产生严重胁迫(图 1)。随着土壤水分含量的降低,羊草叶片相对含水量先上升,在 35%~40%处理时下降且低于对照处理。75%~80%(对照)和 60%~65%、60%~65%和 50%~55%水分处理下羊草叶片相对含水量的差异不显著,75%~80%(对照)和 50%~55%处理下羊草叶片相对含水量差异显著($LSD > LSD_{0.05}$)。与大于 40%土壤水分处理相比,35%~40%和 25%~30%处理下羊草叶片相对含水量差异极显著($LSD > LSD_{0.01}$)。以上结果表明,轻

微干旱(60%~65%、50%~55%水分处理)对羊草生长具有促进作用,严重干旱(35%~40%和 25%~30%水分处理)则会引起羊草叶片相对含水量的降低,而 40%的土壤水分可能是羊草叶片相对含水量下降的临界值。

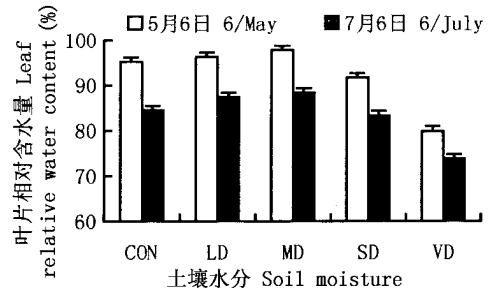


图 1 土壤水分对羊草叶片相对含水量的影响

Fig.1 Effects of soil moisture on leaf relative water content of *Leymus chinensis*

柱形图上方的误差棒代表正负标准误差($n=3$) Vertical bars represent \pm SE of the mean ($n=3$) CON: 75%~80% LD: 60%~65% MD: 50%~55% SD: 35%~40% VD: 25%~30%

2.2 羊草光合产物分配

土壤水分变化首先影响到生物量在植物不同部分的分配,即累积性的 CO_2 净同化产物的分配(Lange *et al.*, 1976)。在本研究中,羊草叶、鞘、根茎、根和总生物量对不同土壤水分含量的响应具有明显差异。土壤水分含量降低时,各器官的生物量累积均受到抑制。在 35%~40%土壤水分处理下羊草生长受到的抑制作用最强烈,并随着生育进程的推进而增大。从图 2 可以看出,羊草总生物量及根、鞘、叶生物量均以 75%~80%(对照)处理最大,60%~65%、50%~55%处理次之,35%~40%和 25%~30%处理下的最低,且以 25%~30%处理下的生物量积累值最小。处理末期,羊草的鞘和根茎的生物量在 75%~80%(对照)、60%~65%和 50%~55%处理之间差异不显著。60%~65%和 50%~55%处理末期的羊草各器官生物量差异均不显著。

从处理初期到处理末期,羊草的叶、鞘、根茎、根和总生物量的绝对值在 35%~40%、25%~30%处理与 75%~80%(对照)、60%~65%和 50%~55%处理之间的多重比较均达到极显著差异水平($LSD > LSD_{0.01}$)。根茎生物量的变化对水分胁迫的响应表现为:在 50%~55%处理下最大,在 60%~65%处理次之。表明一定程度的水分胁迫对于羊草生长的促进作用是通过羊草的根茎生长反映出来的,因为根茎是羊草进行克隆繁殖的重要器官,适度的水分胁迫有利于根茎的生长。无水分胁迫时,根生长

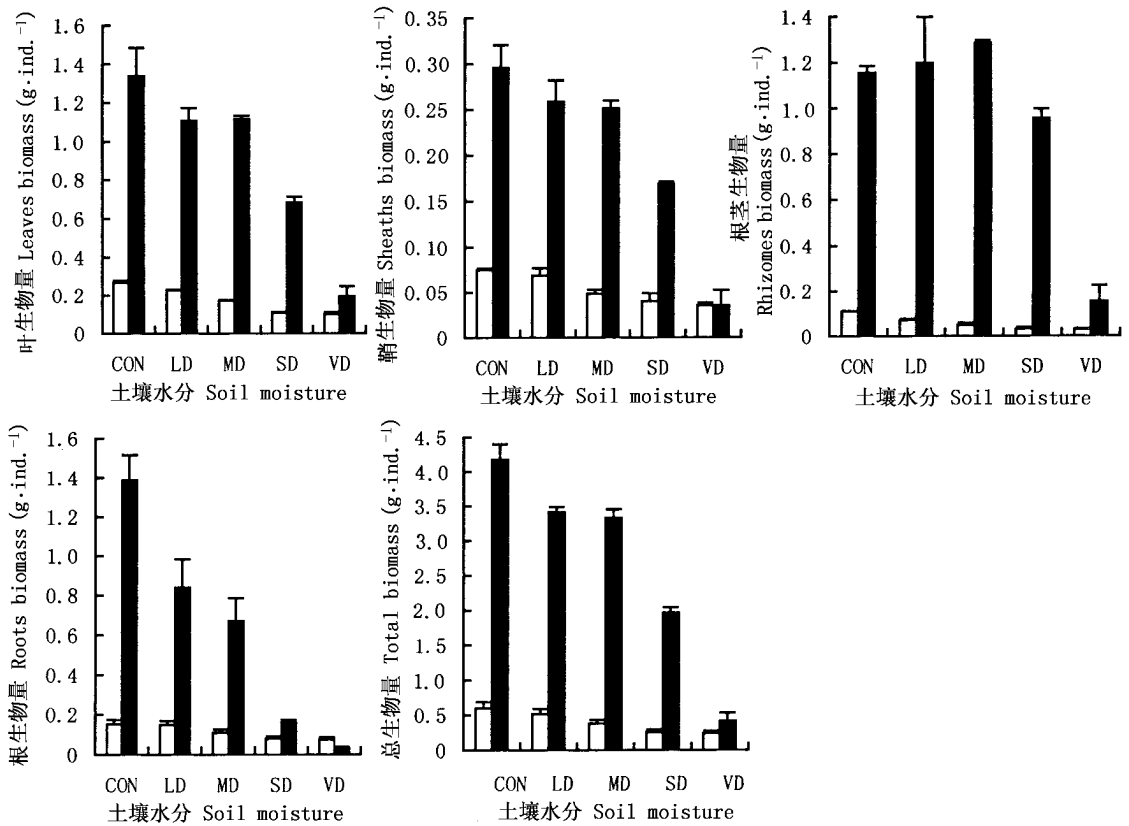


图2 土壤水分对羊草各器官干物质积累动态的影响

Fig. 2 Effects of soil moisture on dry matter of organs of *Leymus chinensis*

柱形图上方的棒代表正负标准误差 ($n = 3$) Vertical bars represent $\pm SE$ of the mean ($n = 3$) CON: 75% ~ 80% LD: 60% ~ 65% MD: 50% ~ 55% SD: 35% ~ 40% VD: 25% ~ 30%

最快,随水分胁迫程度的增加和胁迫时间的延长,羊草根生物量减小速度最快,植株生长变缓。当土壤严重缺水时,基本不再生长,只维持其生命活动。从根和地上部生物量积累值来看,35%~40%、25%~30%处理下羊草根系增长受到的抑制作用比地上部受到的抑制作用要大,这与杨敏生等(2001)的研究结果不同。当土壤含水量降低到田间持水量的40%以下时,生物量积累受到严重的抑制,表现出明显的阈值反应。

羊草各器官生物量的分配随不同土壤水分处理和生育进程而变化(图3)。在各水分处理初期,羊草叶分配、鞘的分配差异均不显著,但对对照处理下羊草的根茎分配、根分配和根冠比与其它处理的差异极显著($LSD > LSD_{0.01}$)。在处理后期,羊草的叶、鞘、根茎、根的分配和根冠比在35%~40%、25%~30%处理与75%~80%(对照)、60%~65%和50%~55%处理之间的多重比较均达到极显著差异($LSD > LSD_{0.01}$),表明低于40%的土壤水分改变了羊草光合产物的分配格局。所有土壤水分处理下羊草的叶、鞘、根的分配平均值随生育进程的发展分别

降低17.4%、39.5%、35.4%,根茎分配平均值则增加了170.3%,且35%~40%和50%~55%处理下羊草的根茎分配增加最多,表明羊草以提高根茎分配的方式适应干旱胁迫,结合羊草生物量积累动态可知:50%~55%处理为羊草较适合的生长条件。35%~40%和25%~30%处理下羊草根的分配显著低于其它处理,表明水分胁迫限制了生物量从地上向地下的迁移。水分状况是影响根冠比的重要因素,根冠比的变化趋势与根生物量分配的变化趋势基本一致,都随着土壤水分含量的降低在生育末期呈下降趋势,表明良好的水分条件利于地下生物量的积累,利于羊草维持自身的水分平衡以适应外界水分环境。

2.3 羊草叶片光合速率

不同土壤水分处理影响羊草叶片光合速率的日变化进程(图4a),75%~80%(对照)、60%~65%和50%~55%处理下的羊草叶片光合速率从早晨8:00开始下降,10:00、11:00再升高,13:00后呈平稳下降,75%~80%(对照)在12:00,60%~65%和50%~55%处理在13:00出现羊草叶片光合速率的峰

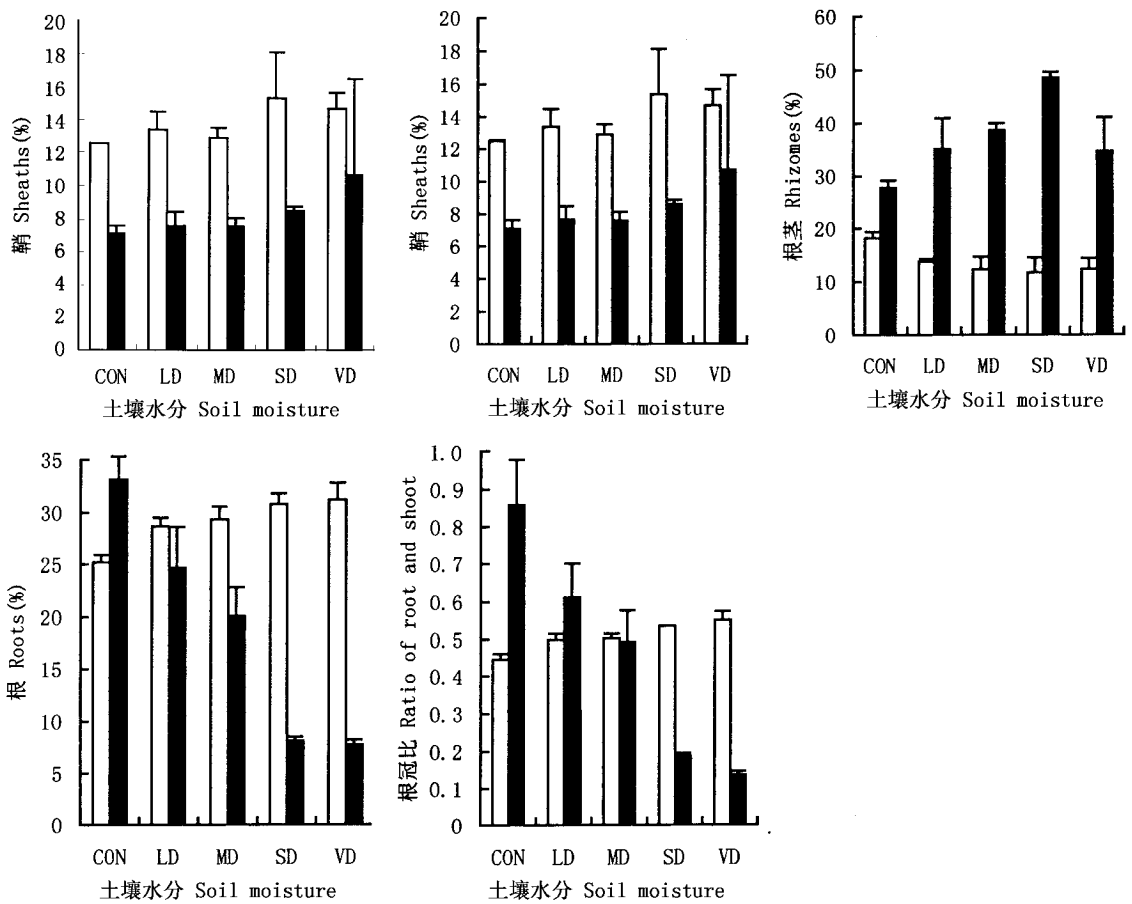


图3 土壤水分对羊草各器官干物质分配的影响

Fig.3 Effects of soil moisture on dry matter allocations of various organs of *Leymus chinensis*

柱形图上方的棒代表正负标准误差 ($n=3$) Vertical bars represent $\pm SE$ of the mean ($n=3$) CON: 75%~80% LD: 60%~65% MD: 50%~55% SD: 35%~40% VD: 25%~30%

值, 75%~80% (对照) 和 60%~65% 处理的日平均叶片光合速率无明显差异, 分别为 11.23 、 $11.26 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 50%~55% 处理下叶片的日平均光合速率有一定程度下降, 为 $9.62 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。35%~40% 处理下叶片的光合速率一直比较平稳, 但在 12:00 至 14:00 有明显的光合午休现象; 25%~30% 处理下叶片的光合作用在 10:00 极微弱, 12:00 反弹后迅速下降, 13:00 的光合速率变为负值, 之后以平稳的小正值持续到 18:00。35%~40% 处理下羊草叶片表现出干旱植物典型的日变化规律 (黄振英等, 2002)。由上可见, 40% 土壤水分可能是阈值, 当土壤水分继续降低时, 羊草根系吸收的水分不足以补充叶片的蒸腾损失, 高温强光对叶片造成伤害, 使叶绿素 a、b 比值发生不可逆的变化, 羊草调整气孔导度抵抗干旱胁迫的能力逐渐丧失。

2.4 羊草种群 CO_2 净交换

土壤水分影响羊草种群 CO_2 交换速率的日变化过程 (图 4b)。75%~80% (对照), 50%~55% 和

60%~65% 处理下羊草种群 CO_2 的日交换速率从凌晨 4:00 后开始迅速增加, 5:00 后转为净吸收 CO_2 , 在上午 10:00 出现吸收峰值, 依次为 14.7 、 17.1 、 $16.0 \text{ mg CO}_2\cdot\text{pot}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, 75%~80% (对照) 在 16:00 又出现一个比较小的峰值, 18:00 后 75%~80% (对照), 50%~55% 和 60%~65% 处理下羊草种群开始释放 CO_2 。35%~40% 和 25%~30% 处理下羊草种群 CO_2 的日交换速率从凌晨 4:00 后缓慢增加, 6:00 后转为净吸收 CO_2 , 8:00 后呈直线下降的趋势, 羊草种群开始释放 CO_2 的时间分别在 16:00 和 14:00。种群最大夜间呼吸均出现在 20:00, 不同土壤水分处理的最大呼吸强度依次为 -12.8 、 -11.3 、 -9.1 、 -5.1 、 $-3 \text{ mg CO}_2\cdot\text{pot}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

白天光合作用吸收 CO_2 , 夜间种群呼吸释放 CO_2 。土壤水分含量大于 50% 的羊草种群在 5:00 到 18:00 吸收 CO_2 , 土壤水分小于 40% 的羊草种群在 6:00 到 14:00 吸收 CO_2 。虽然夜间种群呼吸释放的 CO_2 总量随土壤水分含量同步升高。但小于光合作

用吸收的 CO_2 总量。由图 4c 可见,羊草种群 CO_2 净日交换总量在 60% ~ 65% 处理下最高,比 75% ~ 80% (对照) 增加 21.44%, 而 50% ~ 55% 和 35% ~ 40% 处理下分别比对照降低 8.78% 和 95.66%, 25% ~ 30% 处理下则为负值。这表明,60% ~ 65% 处理有利于羊草植株对 CO_2 的固定,50% ~ 55% 处理下羊草植株对 CO_2 的固定稍有降低,35% ~ 40% 处理下羊草植株对 CO_2 的固定显著降低,25% ~ 30% 处理则表现为释放 CO_2 。

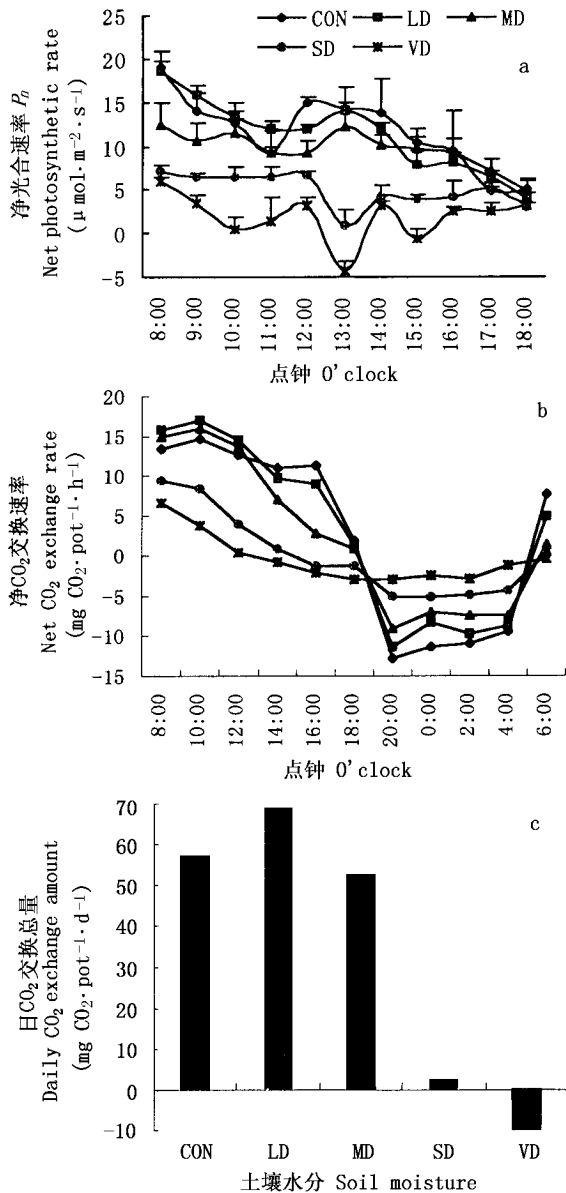


图4 土壤水分对羊草叶片光合速率日变化(a)、种群 CO_2 交换速率昼夜动态(b)、种群 CO_2 日交换量(c)的影响

Fig. 4 Effect of soil moisture on leaf net photosynthetic rate (P_n) of *Leymus chinensis* (a), daily fluctuation of net CO_2 exchange rate (b) and daily net CO_2 exchange amount (c) of *Leymus chinensis* population during 27 ~ 28 May 2002

CON : 75% ~ 80% LD : 60% ~ 65% MD : 50% ~ 55% SD : 35% ~ 40% VD : 25% ~ 30%

3 讨论

全球变化使区域尺度的降水格局发生变化,温度升高增加蒸发散,使我国的羊草草原面临干旱化加剧的威胁(丁一汇,2002)。已有研究表明(冯金朝等,2001;黄振英等,2002),土壤水分是植物光合速率的主要限制因子。植物种群 CO_2 交换受土壤水分影响,不同处理间差异显著。水分亏缺并不总是造成植物生物量减少,轻度的水分亏缺并不影响叶片气孔开放,因而对光合作用速率不会产生明显的影响。羊草光合产物固定在轻度干旱时甚至增加,在某些情况下高于充分供水的植株(山仑等,1991)。这一结论得到本研究证实。但本研究结果进一步表明:60% ~ 65% 土壤水分处理最有助于 CO_2 固定,严重土壤干旱(35% ~ 40% 和 25% ~ 30%) 对羊草生长造成显著影响,越到后期影响越大,证明了土壤水分含量对植物生物量有明显的阈值效应,40% 的土壤水分含量是羊草种群 CO_2 交换的水分阈值。

研究结果表明,在土壤水分小于 40% 时,羊草的生物量分配格局发生了改变。这种改变可能影响到羊草在群落中的优势度,改变羊草群落的种类组成,使羊草草原的分布范围随全球水热格局的重新分布而改变。多数研究认为,植物通过增加地下生物量分配,提高根冠比来适应土壤干旱(李树华等,2003)。本研究表明,干旱促进早期羊草根的分配和根冠比增加,但到后期却使它们降低,表明羊草在受到较长期的干旱持续期后通过增加根部的比重来提高抗旱性的能力逐渐降低,羊草根茎的生物量及其分配随着土壤水分含量降低而增加,羊草根茎的生物量在 50% ~ 55% 处理下达最大 ($1.28\ \text{g}\cdot\text{株}^{-1}$),而羊草根茎的分配在 35% ~ 40% 处理下达最大 (48.5%),表明根茎有作为生物量地下储库的功能。

参 考 文 献

- Ding, Y. H. (丁一汇). 2002. Projection for the future environment in western China. Beijing: Science Press. 1 ~ 123. (in Chinese)
 Dong, X. J. (董学军), B. J. Yang (杨宝珍) & K. Guo (郭柯). 1994. An investigation on the water physioecological characteristics of some psammophytes. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 18: 86 ~ 94. (in Chinese with English abstract)
 Du, Z. C. (杜占池) & Z. G. Yang (杨宗贵). 1995. Comparative study on the characteristics of photosynthesis and transpiration of *Aneurolepidium chinense* of different soil types. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 37: 66 ~ 73. (in Chinese with English abstract)
 Feng, J. Z. (冯金朝), Y. J. Zhou (周宜军), H. Y. Zhou (周海

- 燕) & J.G. Zhang (张景光). 2001. Physiological responses of *Ammopiptanthus mongolicus* (Maxim) to change of soil moisture. *Journal of Desert Research (中国沙漠)*, **21**: 223 ~ 226. (in Chinese with English abstract)
- Hasio, T.C. 1973. Plant responses to water stress. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, **24**: 519 ~ 570.
- Huang, Z.Y. (黄振英), X.J. Dong (董学军), G.M. Jiang (蒋高明) & W.P. Yuan (袁文平). 2002. Primary studies on the daily dynamic changes of photosynthesis and transpiration of *Salix psammophila*. *Acta Botanica Boreal-Occidentalia Sinica (西北植物学报)*, **22**: 817 ~ 813. (in Chinese with English abstract)
- Lange, O.L., L. Kappen & E.D. Schulze. 1976. *Water and plant life: problems and modern approaches*. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag.
- Li, L.H. (李凌浩), X.G. Han (韩兴国), Q.B. Wang (王其兵), Q.S. Chen (陈全胜), Y. Zhang (张焱), J. Yang (杨晶), W.M. Bai (白文明), S.H. Song (宋世环), X.R. Xing (邢雪荣) & S.M. Zhang (张淑敏). 2002. Separating root and soil microbial contributions to total soil respiration of a grazed grassland in the Xilin river basin. *Acta Phytoecologica Sinica (植物生态学报)*, **26**: 29 ~ 32. (in Chinese with English abstract)
- Li, S.H. (李树华), X. Xu (许兴) & H.L. Mi (米海莉). 2003. Effects of water stress on the growing and accumulation of osmolyte of *Cynanchum komarovii*. *Acta Botanica Boreal-Occidentalia Sinica (西北植物学报)*, **23**: 592 ~ 596. (in Chinese with English abstract)
- Meyer, W.S. & S. Walker. 1981. Leaflet orientation in water-stressed soybeans. *Agronomy Journal*, **73**: 1071 ~ 1074.
- Shan, L. (山仑) & M. Xu (徐萌). 1991. Water saving agriculture and its physioecological bases. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, **2**: 70 ~ 76. (in Chinese with English abstract)
- Singh, D.P., P. Singh & H.C. Sharma. 1986. Diurnal patterns of photosynthesis evapotranspiration and water use efficiency in mustard at different growth phases under field conditions. *Photosynthetica*, **2**: 117 ~ 123.
- Wang, F.Y. (王凤玉), G.S. Zhou (周广胜), B.R. Jia (贾丙瑞) & Y.H. Wang (王玉辉). 2003. Effects of heat and water factors on soil respiration of restoring *Leymus chinensis* in degraded land. *Acta Phytoecologica Sinica (植物生态学报)*, **27**: 644 ~ 649. (in Chinese with English abstract)
- Wang, X. (王霞), P. Hou (侯平) & L.K. Yin (尹林克). 2001. Plant adaptation on physiology under drought stress. *Arid Zone Research (干旱区研究)*, **18**: 42 ~ 46. (in Chinese with English abstract)
- Wang, Y.H. (王玉辉) & G.S. Zhou (周广胜). 2001. Analysis on ecophysiological characteristics of leaf photosynthesis of *A-neuyolepidium chinense* in Songnen grassland. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, **12**: 75 ~ 79. (in Chinese with English abstract)
- Wilkinson, S., A.L. Clephan & W.J. Davies. 2001. Rapid low temperature-induced stomatal closure occurs in cold-tolerant *Commelina communis* leaves but not in cold-sensitive tobacco leaves, via a mechanism that involves apoplastic calcium but not abscisic acid. *Plant Physiology*, **126**: 1566 ~ 1578.
- Xiao, C.W. (肖春旺) & X.S. Zhang (张新时). 2000. Ecological adaptation of *Salix psammophylla* seedlings to simulated precipitation change in Ordos Plateau. *Proceedings of International Conference & Young Scientist Workshop on Asian Monsoon Environmental System and Global Change (AMESG)*, November 15 ~ 17.
- Xiao, C.W. (肖春旺) & G.S. Zhou (周广胜). 2001. Study on the water balance in three dominant plants with plants simulated precipitation change in Maowusu sandland. *Acta Botanica Sinica (植物学报)*, **43**: 82 ~ 88. (in Chinese with English abstract)
- Xu, Z.Z. (许振柱) & G.S. Zhou (周广胜). 2003. Study progress of adaptation of terrestrial plant to global change. *Progress in Natural Science (自然科学进展)*, **13**: 113 ~ 119. (in Chinese with English abstract)
- Yang, M.S. (杨敏生), J.C. Qiao (乔进春) & J. Yang (杨洁). 2001. Response of *Amygdulat* seedlings to water stress. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research (河北林果研究)*, **2**: 140 ~ 144. (in Chinese with English abstract)
- Zhou, G.S. (周广胜). 2002. Adaptation and adjustment mechanism of terrestrial ecosystems to aridification. In: Zhou, G.S. (周广胜) ed. *Northeast China transect (NECT) and global change — aridification, human activity and ecosystem*. Beijing: Meteorology Press. 3 ~ 8. (in Chinese)

责任编辑: 杨允菲 责任编辑: 姜联合