

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2014-0134

陈吉,王京,高志娟,郭亚力,吴爱姣,徐炳成.黄土丘陵区白羊草与达乌里胡枝子混播草地土壤呼吸日变化特征[J].草业科学, 2015,32(1):19-27.

CHEN Ji, WANG Jing, GAO Zhi-juan, GUO Ya-li, WU Ai-jiao, XU Bing-cheng. Diurnal variations of soil respiration in *Bothriochloa ischaemum* and *Lespedeza davurica* mixture pasture at Loess Hilly Region[J]. Pratacultural Science, 2015, 32(1): 19-27.

黄土丘陵区白羊草与达乌里胡枝子 混播草地土壤呼吸日变化特征

陈吉¹, 王京^{1,2}, 高志娟¹, 郭亚力¹, 吴爱姣¹, 徐炳成^{1,3}

(1.西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 陕西省动物研究所, 陕西 西安 710032; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:土壤呼吸是反映土壤质量和肥力性状的重要指标, 阐明禾—豆混播草地土壤呼吸作用的变化规律及其影响因素, 可以为准确评估混播草地的环境效应及响应提供依据。在 2011 和 2012 年 6 月份, 采用动态密闭气室分析法, 比较了白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)与达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)不同比例间作混播草地总土壤呼吸速率的日变化特征、混播植物贡献率以及温度敏感性等。结果表明, 不同混播比例草地的总土壤呼吸速率日变化为单峰型曲线, 峰值出现在 12:00~14:00。总土壤呼吸速率日均值高低顺序为单播白羊草>白羊草和达乌里胡枝子间作>单播达乌里胡枝子。不同间作比例草地的总土壤呼吸速率与白昼气温相关显著($P<0.05$), 而与 5、10 和 15 cm 土层白昼土壤温度关系不明显; 单播条件下, 白羊草草丛的土壤呼吸对温度的敏感性高于达乌里胡枝子; 各草地土壤呼吸 Q_{10} 值的变化范围为 1.48~2.61, 以单播白羊草最高, 单播达乌里胡枝子和两者间作混播草地间无显著差异($P>0.05$)。

关键词:土壤呼吸; 混播比例; 贡献率; 温度; Q_{10} 值

中图分类号: S812.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2015)01-0019-09*

Diurnal variations of soil respiration in *Bothriochloa ischaemum* and *Lespedeza davurica* mixture pasture at Loess Hilly Region

CHEN Ji¹, WANG Jing^{1,2}, GAO Zhi-juan¹, GUO Ya-li¹, WU Ai-jiao¹, XU Bing-cheng^{1,3}

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,
Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2.Shaanxi Institute of Zoology, Xi'an 710032, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation,
Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: Soil respiration is an important index for evaluation of soil quality and fertility properties. The clarification of the variations and influence factors of soil respiration in grass-legume mixture pasture will provide evidence for accurately assessment of the effects and response of mixture pasture. In order to comprehensively evaluate the performance of mixture pasture of *Bothriochloa ischaemum* and *Lespedeza davurica*, diurnal changes of total soil respiration rate with different mixture ratio of the two species, the

* 收稿日期: 2014-03-25 接受日期: 2014-07-15

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NECT-11-0444); 国家自然科学基金 (41371509); 中央高校基本科研业务费专项 (ZD2013020)

第一作者: 陈吉 (1989-), 男, 湖北黄陂人, 在读硕士生, 研究方向为植物生理生态适应性。E-mail: chenji000000@163.com

通信作者: 徐炳成 (1973-), 男, 安徽肥东人, 研究员, 博导, 博士, 主要从事植物生理生态研究。E-mail: Bcxu@ms.iswc.ac.cn

contribution of each species and temperature responses of each species were investigated and analyzed in June, 2011 and 2012. The diurnal variation of total soil respiration rates were asymmetric unimodal curves which peaked between 12:00 and 14:00. The daily average of total soil respiration rate decreased in the following order: *B. ischaemum* monoculture > *B. ischaemum* and *L. davurica* intercropping > *L. davurica* monoculture. There were significant correlations between total soil respiration rate and air temperature ($P < 0.05$), while there was no significant correlations between soil respiration rate and soil temperature at 5, 10 or 15 cm soil layers. In monoculture, soil respiration rate of *B. ischaemum* was more sensitive to temperature than that of *L. davurica*. Q_{10} values ranged from 1.48 to 2.61 with the highest Q_{10} value of *B. ischaemum* monoculture. There was no significant differences between *L. davurica* monoculture and mixtures.

Key words: soil respiration; mixture ratio; contribution rate; temperature; Q_{10} value

Corresponding author: XU Bing-cheng E-mail: Bcxu@ms.iswc.ac.cn

建设高产栽培草地,促进放牧与舍饲相结合,是缓解黄土丘陵区天然草地放牧压力、促进退化草地恢复和农业产业结构调整的重要举措^[1-2]。在该区栽培草地建设中,长期存在草种单一、结构不合理、土壤肥力减退等问题,制约了草地效益发挥与畜牧业的健康发展,因此,结合当地生态条件,选择优良牧草草种,构建不同草种混播草地,建立优质高效的栽培草地就显得尤为重要^[3]。混播是指在同一地块上同时播种两种或者两种以上植物的栽培模式,是合理利用资源、提高产量的重要措施之一,有混播、套作、间作等类型,间作主要包括作物与作物间作、草本植物与草本植物间作等^[4-6]。其中,禾—豆混播因在生产力稳定性及维持年限、资源利用效率、混播植物质量等方面具有诸多优势,是半干旱区农业生产中较为常用的栽培措施^[7-9]。

黄土丘陵区天然植被群落中蕴含着大量乡土牧草品种,经过长期自然选择,这些牧草形成了高产、优质、抗旱、耐寒、耐贫瘠等优良特性,加强对其生产力、生态适应性研究,对区域植物资源保护和合理开发利用具有重要的理论与实践意义^[10]。白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)与达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)是陕北黄土丘陵区森林草原地带的重要建群种,又是各类牲畜喜食的优良牧草植物,在维持区域生态景观和水土保持中具有重要作用^[11]。达乌里胡枝子是白羊草群落的主要伴生种之一,二者在不同立地和演替阶段群落中表现出良好的共存关系,因此,二者在群落中存在着一定的相互适应机制,依据这种关系探索和建立二者混播草地,对生产和生态均具有重要意义^[12]。

在半干旱地区,禾—豆间作不仅可以提高对水土资源的保持和利用效率,也是保持和提高土地尤其是退化土地土壤健康的重要栽培措施,其原因主要是混播豆科植物根瘤固定的部分氮可为非豆科植物所利用,从而减少化肥的投入,有利于提高和保持土地质量^[13]。目前,关于禾—豆牧草混播草地的研究主要集中于混播牧草生理生态学、混播草地生产力、牧草种间关系、混播牧草固氮和氮素转移,以及土壤环境效应等方面^[8,12,14-15],就禾—豆混播草地土壤呼吸的研究较少^[16]。土壤呼吸是表征土壤质量和肥力性状的重要生物学指标^[17],阐明混播草地土壤呼吸作用随混播比例和物种构成而变化的规律及其影响要素,可以为准确评估禾—豆混播栽培草地土壤功能以及明确合理的混播比例提供依据,并为全面评价混播草地的环境效应及响应奠定基础。本研究以白羊草与达乌里胡枝子混播草地为研究对象,通过比较不同混播比例草地土壤呼吸速率及其日变化特征、混播植物土壤呼吸速率贡献率及温度敏感性等,以期为全面评估白羊草与达乌里胡枝子混播草地的效应及其影响因素提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于陕西省安塞县中国科学院安塞水土保持综合试验站,地理位置为 109° 19' 23" E, 36° 51' 31" N,海拔 1 068~1 309 m。该区年均气温为 8.8 °C,最冷月 1 月平均气温 - 6.9 °C,最热月 7 月平均气温 22.6 °C,全年 ≥ 10 °C 积温 3 113.9 °C · d,无霜期 159 d。多年平均降水量 520 mm,季

节分布不均,其中7—9月占60%~80%。主要土壤类型为黄绵土,约占总面积的77%。气候属暖温带半干旱气候,植被属暖温带半干旱森林草原区,天然植被以草本群落为主,主要由白羊草、达乌里胡枝子、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、长芒草(*Stipa bungeana*)等组成。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 白羊草和达乌里胡枝子混播草地位于山地梯田,于2009年7月15日建立,采用条播播种,播种量均为 $15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。2010年4月设置380 cm中子管,用于土壤水分测定。试验采用生态替代法设计^[18],即种群总行数(10行)保持不变,按照白羊草(B)和达乌里胡枝子(D)行比设置了7种混播比例组合(表1),即 $B_{10}D_0$ 、 B_8D_2 、 B_6D_4 、 B_5D_5 、 B_4D_6 、 B_2D_8 和 B_0D_{10} ,每种组合重复3次,共21个小区,小区面积为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$,行距为20 cm,完全随机区组排列。试验期间不施肥,不灌溉,生长季适时除草,每年生育期结束时全部齐地刈割。

表1 不同混播比例下白羊草与达乌里胡枝子行比

Table 1 Row mixture ratios of *Bothriochloa ischaemum* and *Lespedeza davurica* in the experiment

处理 Treatment	混播比例 Mixture ratio	
	白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i> (B)	达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i> (D)
$B_{10}D_0$	10	0
B_8D_2	8	2
B_6D_4	6	4
B_5D_5	5	5
B_4D_6	4	6
B_2D_8	2	8
B_0D_{10}	0	10

1.2.2 测定项目与方法

土壤呼吸速率:采用英国PP System公司产EGM-4便携式 CO_2 分析仪测定。白羊草和达乌里胡枝子草带分别测定,在各小区内随机选取测定点,3次重复。每次测定前将待测草带植物齐地刈割,在尽量不扰动土壤和凋落物的前提下,将基座嵌入土壤2~3 cm,基座为直径10 cm、高度15 cm的不锈钢圆形筒。测定时间分别为2011年6月11日和2012年6月17日,时段为08:00—18:00,每2 h测定一次。

混播草地总土壤呼吸速率($R_{S\text{总}}$):主要根据间作草地的草带行距和小区面积以及间作比例,采用下式计算:

$$R_{S\text{总}} = \frac{R_{SB} \times 0.2 \times 3 \times m + R_{SD} \times 0.2 \times 3 \times n}{3 \times 3}$$

式中, R_{SB} 和 R_{SD} 分别表示白羊草和达乌里胡枝子草带土壤呼吸速率; m 和 n 分别表示白羊草和达乌里胡枝子的行数;0.2×3和3×3分别表示草带面积和小区面积。

根据间作草地中白羊草所占比例,采用下式计算其在各比例草地总土壤呼吸中的贡献率:

$$\theta = \frac{R_{SB} \times 0.2 \times 3 \times m}{R_{S\text{总}} \times 3 \times 3}$$

土壤温度:采用直角地温计测定,与土壤呼吸速率测定同步,分5、10和15 cm 3个土层。

土壤水分:采用北京核业超能科技有限公司生产的CNC503B中子仪测定,测定深度为20 cm,每10 cm测定一次,每小区测定一次。土壤体积含水量= $(X/737) \times 58.624 + 3.28$,其中, X 为中子仪计数。

气象因子:日光合有效辐射、相对湿度和气温由美国PP System公司生产的CIRAS-2光合仪测得。

大气和土壤温度与总土壤呼吸速率间关系采用指数模型 $R_{S\text{总}} = a \cdot e^{bT}$ 进行拟合,土壤呼吸温度敏感性 Q_{10} 值采用指数关系模型 $Q_{10} = e^{10b}$ 计算,其中, T 为气温和不同土层土壤温度; a 为温度 0°C 时的土壤呼吸速率($\text{g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$),又称基础呼吸速率; b 为温度反应系数^[19-20]。

1.3 数据处理与分析

采用Excel 2007和SPSS 17.0统计软件进行,绘图采用SigmaPlot 10.0,年份及混播比例间数值差异显著性采用Duncan法进行单因素方差检验($P=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 大气因子

在试验期间的2011和2012年6月,光合有效辐射(PAR)和气温(T_a)的日变化均呈单峰型曲线,空气相对湿度(RH)呈“V”型变化(图1)。PAR值的变化范围均在 $200 \sim 2000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,峰值出现在12:00,傍晚18:00降至最低。RH的日变化范围在15.9%~19.4%,低谷出现在14:00。 T_a

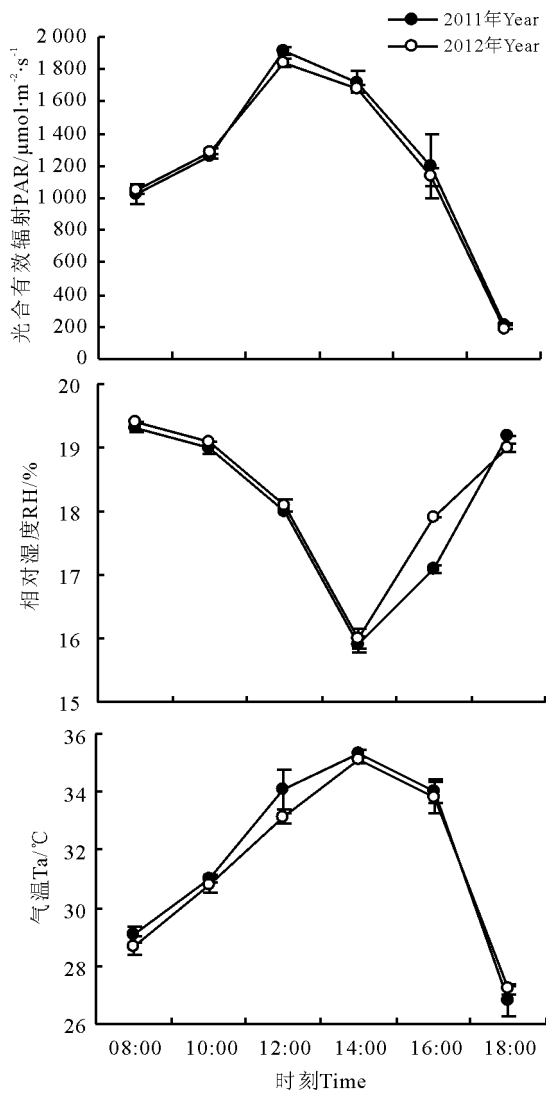


图1 2011和2012年试验期间环境因子日变化

Fig.1 Diurnal changes of environment factors during the experiment in 2011 and 2012

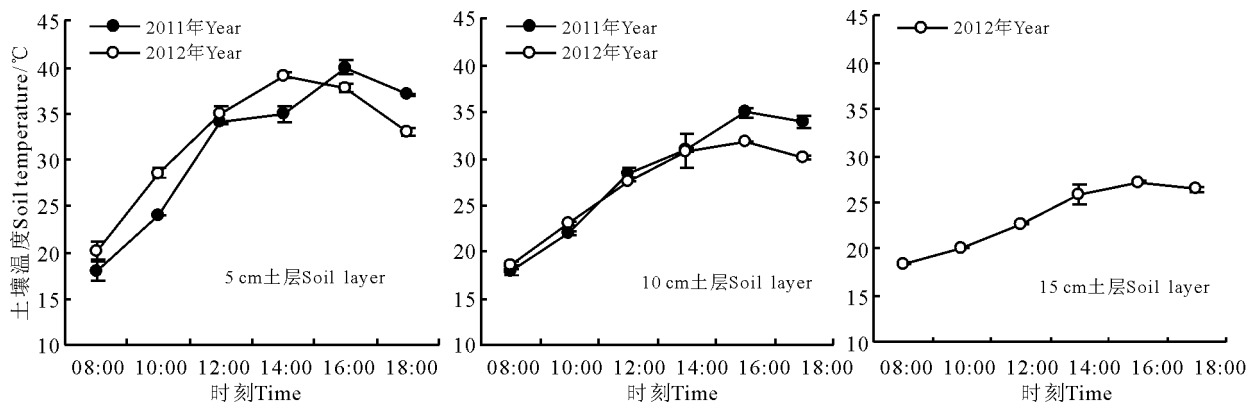


图2 2011和2012年试验期间草地不同土层土壤温度日变化

Fig.2 Diurnal change of soil temperature in different soil layers of the pasture during the experiment in 2011 and 2012

与 PAR 的日变化趋势相似,变化范围在 26.8~35.3 °C,峰值出现在 14:00。

2.2 土壤温度

5、10 和 15 cm 土层土壤温度的日变化均呈单峰曲线。除 2012 年 5 cm 深度的土壤温度峰值出现在 14:00 外,其他均出现在 16:00,且随着土层深度加深,土壤温度呈下降趋势。5、10 和 15 cm 土层土壤温度变化范围分别在 18~40 °C、18~35 °C 和 18.4~27.2 °C(图 2)。

2.3 土壤体积含水量

2011-2012 年,各混播比例下土壤体积含水量均随着土层深度增加而增加,同一土层土壤体积含水量不同混播比例间无显著差异($P > 0.05$)。除 B₅D₅ 比例外,其他各比例间 10 cm 土层土壤体积含水量均表现为 2012 年显著高于 2011 年($P < 0.05$),20 cm 土层土壤体积含水量所有混播比例均表现为 2012 年显著高于 2011 年(表 2)。

2.4 土壤呼吸速率

不同混播比例下总土壤呼吸速率日变化均呈单峰曲线,峰值出现在 12:00~14:00(图 3)。2011 年,除 B₀D₁₀ 比例下的峰值出现在 12:00 外,其他各混播比例草地土壤总呼吸速率峰值均出现在 14:00。2012 年,除 B₀D₁₀ 和 B₂D₈ 比例下出现在 14:00 外,其他均出现在 12:00。两年间不同混播比例草地的总土壤呼吸速率峰值大小存在差异。在 2011 年, B₁₀D₀、B₈D₂、B₆D₄、B₅D₅、B₄D₆、B₂D₈ 和 B₀D₁₀ 比例下的总土壤呼吸速率峰值分别为 1.23、0.84、0.80、0.81、0.62、0.45 和 0.34 g CO₂ · m⁻² · h⁻¹,对应比例下 2012 年分别为 0.98、0.72、0.62、0.57、0.37、0.40

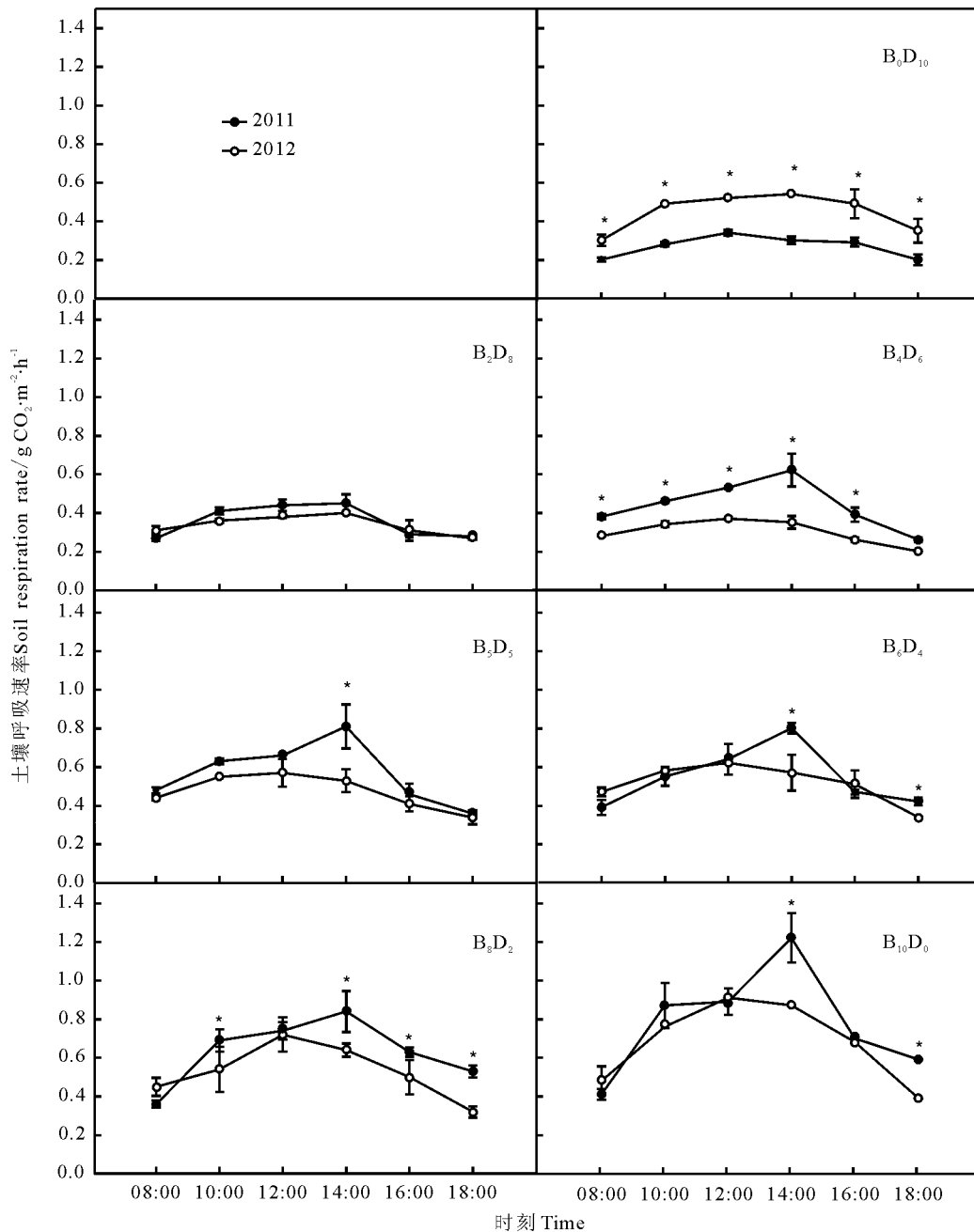


图3 2011和2012年试验期间不同混播比例下总土壤呼吸速率日变化

Fig.3 Diurnal variation of total soil respiration rates for different mixture ratios in 2011 and 2012

注: *表示同一混播比例不同年份间差异显著($P < 0.05$)。

Note: * for the same mixture ration mean significant difference between 2011 and 2012 year at 0.05 level.

和 $0.54 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。除 B_2D_8 外,其他混播比例的峰值两年间均存在显著差异($P < 0.05$),其中除 B_0D_{10} 外,均以 2011 年较高。

2011—2012 年间,不同混播比例总土壤呼吸速率日均值总体差异显著($P < 0.05$),除 B_0D_{10} 和 B_4D_6 比例外,其他比例下的土壤总呼吸速率日均值

2011 和 2012 年间无显著差异($P > 0.05$) (表 3)。2011 年,以 $B_{10}D_0$ 比例总土壤呼吸速率日均值最大 ($0.79 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), B_0D_{10} 比例的最小 ($0.27 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), B_2D_8 、 B_4D_6 、 B_5D_5 、 B_6D_4 、 B_8D_2 比例分别为 0.36 、 0.44 、 0.56 、 0.54 和 $0.63 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。2012 年,仍以 $B_{10}D_0$ 比例下总土

壤呼吸速率日均值最大($0.69 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$),而最小的为 B_4D_6 ($0.30 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)。 B_0D_{10} 、 B_2D_8 、 B_5D_5 、 B_6D_4 、 B_8D_2 比例分别为 0.45、0.34、0.47、0.51 和 $0.53 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

2011 年,混播草地总土壤呼吸速率日变幅在 $0.20 \sim 1.23$,2012 年在 $0.20 \sim 0.92$,日变幅倍数最大的混播比例是 $B_{10}D_0$,最小的是 B_2D_8 (表 3)。不同混播比例下总土壤呼吸速率日均值与 10:00 时的瞬

表 2 2011 和 2012 年试验期间不同混播比例草地 0—20 cm 土壤体积含水量

Table 2 Soil volumetric water content (0—20 cm) for each mixture ratio during the experiment in 2011 and 2012 %

混播比例 Mixture ratio	10 cm 土层 Soil layer		20 cm 土层 Soil layer	
	2011	2012	2011	2012
B_0D_{10}	$3.76 \pm 0.08\text{a}(\text{b})$	$4.04 \pm 0.17\text{a}(\text{a})$	$4.16 \pm 0.28\text{a}(\text{b})$	$5.21 \pm 0.60\text{a}(\text{a})$
B_2D_8	$3.63 \pm 0.05\text{a}(\text{b})$	$3.89 \pm 0.26\text{a}(\text{a})$	$4.26 \pm 0.20\text{a}(\text{b})$	$5.35 \pm 0.63\text{a}(\text{a})$
B_4D_6	$3.65 \pm 0.05\text{a}(\text{b})$	$3.92 \pm 0.24\text{a}(\text{a})$	$4.44 \pm 0.12\text{a}(\text{b})$	$5.51 \pm 0.72\text{a}(\text{a})$
B_5D_5	$3.73 \pm 0.05\text{a}(\text{a})$	$3.89 \pm 0.09\text{a}(\text{a})$	$4.20 \pm 0.05\text{a}(\text{b})$	$5.14 \pm 0.52\text{a}(\text{a})$
B_6D_4	$3.68 \pm 0.08\text{a}(\text{b})$	$3.97 \pm 0.12\text{a}(\text{a})$	$4.26 \pm 0.24\text{a}(\text{b})$	$5.30 \pm 0.32\text{a}(\text{a})$
B_8D_2	$3.65 \pm 0.09\text{a}(\text{b})$	$3.94 \pm 0.12\text{a}(\text{a})$	$4.21 \pm 0.28\text{a}(\text{b})$	$5.14 \pm 0.28\text{a}(\text{a})$
$B_{10}D_0$	$3.60 \pm 0.08\text{a}(\text{b})$	$4.15 \pm 0.00\text{a}(\text{a})$	$4.18 \pm 0.18\text{a}(\text{b})$	$5.59 \pm 0.55\text{a}(\text{a})$

注: 同列不同小写字母表示不同混播比例间差异显著($P < 0.05$),同行括号内不同小写字母表示相同混播比例下同一土层不同年份间差异显著($P < 0.05$),下同。

Note: Different lower case letters mean significant difference among different mixture ratios at 0.05 level, while those within parentheses for the same mixture ratio within the same row mean significant difference between 2011 and 2012 at 0.05 level. The same below.

表 3 2011 和 2012 年不同混播比例草地土壤呼吸速率日均值、日变幅及白羊草贡献率

Table 3 Daily mean and variation for soil respiration rate and contribution of *B. ischaemum* under different mixture ratios in 2011 and 2012

混播比例 Mixture ratio	日最大值 Daily max. value/ $\text{g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$		日最小值 Daily min. value/ $\text{g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$		白羊草贡献率	
	2011	2012	2011	2012	2011	2012
B_0D_{10}	$0.34 \pm 0.02\text{c}(\text{b})$	$0.54 \pm 0.00\text{c}(\text{a})$	$0.20 \pm 0.01\text{d}(\text{b})$	$0.30 \pm 0.03\text{bc}(\text{a})$		
B_2D_8	$0.45 \pm 0.05\text{bc}(\text{a})$	$0.40 \pm 0.03\text{d}(\text{a})$	$0.27 \pm 0.01\text{c}(\text{a})$	$0.27 \pm 0.01\text{c}(\text{a})$		
B_4D_6	$0.62 \pm 0.09\text{bc}(\text{a})$	$0.37 \pm 0.07\text{d}(\text{b})$	$0.26 \pm 0.04\text{c}(\text{a})$	$0.20 \pm 0.00\text{d}(\text{a})$		
B_5D_5	$0.81 \pm 0.11\text{abc}(\text{a})$	$0.57 \pm 0.00\text{c}(\text{b})$	$0.36 \pm 0.06\text{b}(\text{a})$	$0.34 \pm 0.04\text{b}(\text{a})$		
B_6D_4	$0.80 \pm 0.03\text{abc}(\text{a})$	$0.62 \pm 0.00\text{c}(\text{b})$	$0.39 \pm 0.04\text{ab}(\text{a})$	$0.34 \pm 0.01\text{b}(\text{a})$		
B_8D_2	$0.84 \pm 0.11\text{ab}(\text{a})$	$0.72 \pm 0.09\text{b}(\text{b})$	$0.36 \pm 0.02\text{b}(\text{a})$	$0.32 \pm 0.03\text{b}(\text{a})$		
$B_{10}D_0$	$1.23 \pm 0.13\text{a}(\text{a})$	$0.92 \pm 0.00\text{a}(\text{b})$	$0.42 \pm 0.03\text{a}(\text{a})$	$0.40 \pm 0.00\text{a}(\text{a})$		
混播比例 Mixture ratio	日均值 Daily mean/ $\text{g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$		日最大值/最小值 Daily max. /min.		白羊草贡献率 Contribution of <i>B. ischaemum</i> /%	
	2011	2012	2011	2012	2011	2012
B_0D_{10}	$0.27 \pm 0.06\text{d}(\text{b})$	$0.45 \pm 0.10\text{bc}(\text{a})$	1.72	1.80	0	0
B_2D_8	$0.36 \pm 0.08\text{cd}(\text{a})$	$0.34 \pm 0.05\text{cd}(\text{a})$	1.66	1.52	38.60	17.72
B_4D_6	$0.44 \pm 0.13\text{bcd}(\text{a})$	$0.30 \pm 0.06\text{d}(\text{b})$	2.40	1.80	68.70	58.14
B_5D_5	$0.56 \pm 0.16\text{b}(\text{a})$	$0.47 \pm 0.09\text{bc}(\text{a})$	2.28	1.69	75.00	62.58
B_6D_4	$0.54 \pm 0.15\text{bc}(\text{a})$	$0.51 \pm 0.10\text{b}(\text{a})$	2.04	1.82	78.65	67.51
B_8D_2	$0.63 \pm 0.17\text{ab}(\text{a})$	$0.53 \pm 0.14\text{b}(\text{a})$	2.31	2.24	91.05	86.30
$B_{10}D_0$	$0.79 \pm 0.28\text{a}(\text{a})$	$0.69 \pm 0.21\text{a}(\text{a})$	2.93	2.30	100.00	100.00

时呼吸速率最接近。混播草地总土壤呼吸速率日均值随白羊草所占比例增加而增加,2012年贡献率比2011年有所下降。

2.5 Q_{10} 值

2011和2012年的气温与白羊草与达乌里胡枝子混播草地总土壤呼吸速率的指数关系均达显著水平($P < 0.05$),2012年计算得出的 Q_{10} 值中最高的是 $B_{10}D_0$ (2.61),最低的为 B_2D_8 (1.48)(表4)。在2011年,除 B_8D_2 比例下5 cm 土层土壤温度与该比

例混播草地总土壤呼吸速率的指数关系显著外(对应的 Q_{10} 值为1.21),其余各比例草地的总土壤呼吸与5或10 cm 土层的土壤温度指数关系不明显。在2012年,除 B_0D_{10} 和 $B_{10}D_0$ 比例下5 cm 土层,及 B_0D_{10} 比例下10 cm 土层的土壤温度与其总土壤呼吸速率指数关系显著外(对应的 Q_{10} 值分别为1.31、1.27和1.30),其余各比例草地的总土壤呼吸与5、10和15 cm 土层的土壤温度指数关系不明显(表4)。

表4 不同混播比例草地总土壤呼吸速率与气温及土壤温度回归分析

Table 4 Regression between soil respiration rate with air and soil temperature in different mixture ratios

温度参数 Temperature parameter	混播比例 Mixture ratio	2011年 Year					2012年 Year				
		<i>a</i>	<i>b</i>	R^2	<i>P</i>	Q_{10}	<i>a</i>	<i>b</i>	R^2	<i>P</i>	Q_{10}
气温 Air temperature	B_0D_{10}	0.037	0.062	0.713	0.000	1.86	0.048	0.070	0.625	0.000	2.01
	B_2D_8	0.077	0.048	0.399	0.005	1.62	0.097	0.039	0.437	0.003	1.48
	B_4D_6	0.034	0.079	0.702	0.000	2.20	0.067	0.047	0.417	0.004	1.60
	B_5D_5	0.063	0.068	0.543	0.000	1.97	0.129	0.040	0.282	0.023	1.49
	B_6D_4	0.069	0.064	0.571	0.000	1.90	0.083	0.058	0.533	0.001	1.79
	B_8D_2	0.084	0.062	0.399	0.005	1.86	0.045	0.077	0.537	0.001	2.16
	$B_{10}D_0$	0.060	0.079	0.443	0.003	2.20	0.032	0.096	0.744	0.000	2.61
5 cm 土温 Soil temperature	B_0D_{10}	0.188	0.010	0.131	0.141	—	0.182	0.027	0.481	0.001	1.31
	B_2D_8	0.322	0.002	0.006	0.754	—	0.273	0.006	0.060	0.329	—
	B_4D_6	0.444	-0.002	0.002	0.858	—	0.262	0.004	0.012	0.664	—
	B_5D_5	0.615	-0.004	0.012	0.665	—	0.447	0.001	0.001	0.918	—
	B_6D_4	0.387	0.010	0.087	0.235	—	0.393	0.008	0.051	0.367	—
	B_8D_2	0.330	0.019	0.253	0.033	1.21	0.323	0.014	0.091	0.225	—
	$B_{10}D_0$	0.401	0.019	0.175	0.085	—	0.306	0.024	0.238	0.040	1.27
10 cm 土温 Soil temperature	B_0D_{10}	0.205	0.009	0.056	0.344	—	0.216	0.026	0.243	0.038	1.30
	B_2D_8	0.355	0.000	0.001	0.922	—	0.342	0.000	0.000	0.934	—
	B_4D_6	0.515	-0.007	0.024	0.538	—	0.365	-0.008	0.035	0.457	—
	B_5D_5	0.707	-0.009	0.043	0.409	—	0.624	-0.011	0.062	0.319	—
	B_6D_4	0.412	0.009	0.044	0.405	—	0.537	-0.002	0.002	0.857	—
	B_8D_2	0.340	0.021	0.181	0.078	—	0.462	0.003	0.003	0.834	—
	$B_{10}D_0$	0.422	0.020	0.117	0.164	—	0.454	0.014	0.044	0.404	—
15 cm 土温 Soil temperature	B_0D_{10}						0.240	0.025	0.114	0.171	—
	B_2D_8						0.414	-0.009	0.031	0.483	—
	B_4D_6						0.498	-0.023	0.134	0.135	—
	B_5D_5						0.858	-0.027	0.169	0.090	—
	B_6D_4						0.699	-0.014	0.042	0.414	—
	B_8D_2						0.624	-0.009	0.010	0.691	—
	$B_{10}D_0$						0.621	0.002	0.001	0.923	—

注:*a* 为基础呼吸速率,即温度 0 °C 时的土壤呼吸速率($g\ CO_2 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$);*b* 为温度反应系数; Q_{10} 为土壤呼吸敏感系数;2011年15 cm 土温未测量。

Note:*a* is basic respiration rate, namely soil respiration rate at 0 °C; *b* is coefficient of temperature; and Q_{10} is coefficient of soil respiration sensitivity to temperature; soil temperature at 15 cm soil layer in 2011 was not measured.

3 讨论与结论

白羊草与达乌里胡枝子混播草地总土壤呼吸速率日变化为单峰曲线,与在该类型地区天然草地和栽培草地的相关结果类似^[20-21]。其中2012年的峰值较2011年提前,原因可能是在2012年0—20 cm土层土壤体积含水量较高(表2)。有研究表明,在其他环境因子无显著差异的情况下,旱季土壤体积含水量很难达到田间持水量,而偏低的土壤含水量会造成微生物活性下降,对土壤呼吸产生抑制^[22]。

草地总土壤呼吸主要是土壤微生物(包括微生物分解根系来源物质和微生物分解土壤有机质)的异养呼吸和根系的自养呼吸^[23]。在相同立地(气候和土壤等)条件下,植物根系在土壤呼吸中有重要作用,研究表明,非森林生态系统全年或生长季中根系呼吸作用占总土壤呼吸的比例达60.4%^[24]。本研究中,总土壤呼吸速率日均值高低顺序为单播白羊草>白羊草和达乌里胡枝子混播>单播达乌里胡枝子,可能与白羊草和达乌里胡枝子的根系特性有关,白羊草为短根茎型下繁丛生禾草,分蘖力强,须根发达,常形成根网,且主要集中在地表0—30 cm深度^[12,25],相对于直根系的达乌里胡枝子,混播草地中白羊草根对水肥的竞争能力强于达乌里胡枝子,且随着白羊草混播比例的增大,白羊草竞争力会提高,而达乌里胡枝子竞争力在降低^[14-15],所以混播草地总土壤呼吸速率日均值随白羊草所占比例的增加而增加。同时也表明单播白羊草土壤物质代谢强度最大,白羊草和达乌里胡枝子混播次之,单播达乌

里胡枝子土壤物质的代谢强度最小。

2011和2012年,白羊草与达乌里胡枝子混播草地总土壤呼吸速率与气温呈指数关系,且显著相关,说明气温是影响二者混播草地日间总土壤呼吸速率的重要因素。 Q_{10} 值是衡量土壤呼吸对温度变化响应敏感程度的重要参数,即温度每增加10℃土壤呼吸所增加的倍数^[26],本研究中根据温度计算的 Q_{10} 值介于1.48~2.61,在1.3~3.3范围内^[27],与黄土区农田(Q_{10} 值为2.30)和草地(Q_{10} 值为1.74)生态系统的结果基本相同^[19-20]。本研究中,单播白羊草总土壤呼吸速率日变幅倍数和 Q_{10} 值最大,说明其对外界因子变化最敏感,受大气和土壤环境因子的影响最大^[28-29]。单播达乌里胡枝子和混播草地间没有显著差异,可能与达乌里胡枝子共生固氮菌微生物有关^[26,30]。

综上所述,黄土丘陵区白羊草与达乌里胡枝子混播草地的总土壤呼吸速率日变化特征呈单峰型曲线,峰值出现在12:00~14:00;土壤呼吸速率日均值高低顺序为单播白羊草>白羊草和达乌里胡枝子混播>单播达乌里胡枝子,两年里均以单播白羊草显著最高;二者混播草地总土壤呼吸速率与白昼气温指数关系达显著相关,而与土壤温度指数关系不明显;单播白羊草土壤呼吸对温度变化的敏感性显著高于单播达乌里胡枝子;混播草地的 Q_{10} 值变化范围在1.48~2.61,以单播白羊草 Q_{10} 值最高,单播达乌里胡枝子和二者混播草地间无显著差异。本研究没有细化测定与分析混播草地草带间隙裸地的土壤呼吸速率,后续工作将重点探讨其土壤呼吸瞬时值和随混播草种比例变化的趋势及其贡献。

参考文献

- [1] 任继周,侯扶江.要正确对待西部种草[J].草业科学,2002,19(2):1-6.
- [2] 常生华,侯扶江,于应文,南志标.黄土丘陵沟壑区三种豆科人工草地的植被与土壤特征[J].生态学报,2004,24(5):932-937.
- [3] 山仑,徐炳成.黄土高原半干旱地区建设稳定人工草地的探讨[J].草业学报,2009,18(2):1-2.
- [4] 余丽娜,郑毅,朱有勇.小麦蚕豆间作中作物对氮的吸收利用[J].云南农业大学学报,2003,18(3):256-258,269.
- [5] 陈玉香,周道玮,张玉芬.玉米、苜蓿间作的产草量及光合作用[J].草地学报,2004,12(2):107-112.
- [6] 何春霞,孟平,张劲松,高峻,孙守家.基于稳定碳同位素技术的华北低丘山区核桃—小麦复合系统种间水分利用研究[J].生态学报,2012,32(7):2047-2055.
- [7] Nyfeler D, Huguenin-Elie O, Suter M, Frossard E, Lüscher A. Grass-legume mixtures can yield more nitrogen than legume pure stands due to mutual stimulation of nitrogen uptake from symbiotic and non-symbiotic sources[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2011, 140(1):155-163.

- [8] 王平,周道玮,姜世成.半干旱地区禾—豆混播草地生物固氮作用研究[J].草业学报,2010,19(6):276-280.
- [9] Ghosh P K.Growth, yield, competition and economics of groundnut/cereal fodder intercropping systems in the semi-arid tropics of India[J].Field Crops Research,2004,88:227-237.
- [10] 徐炳成,山仑.半干旱黄土丘陵区白羊草人工草地生产力和土壤水分特征研究[J].草业科学,2004,21(6):6-10.
- [11] Jiao J Y, Tzanopoulos J, Xofis P, Bai W J, Ma X H, Mitchley J.Can the study of natural vegetation succession assist in the control of soil erosion on abandoned croplands on the Loess Plateau, China[J].Restoration Ecology,2007,15(3):391-399.
- [12] 王京,徐炳成,高志娟,段东平,牛富荣,徐伟洲.黄土丘陵区白羊草与达乌里胡枝子混播的光合生理日变化研究[J].草地学报,2012,20(4):692-698.
- [13] Li L, Sun J H, Zhang F S, Guo T W, Bao X G, Smith F A, Smith S E.Root distribution and interactions between intercropped species[J].Oecologia,2006,147:280-290.
- [14] Xu B C, Xu W Z, Huang J, Shan L, Li F M.Biomass production and relative competitiveness of a C₃ legume and a C₄ grass co-dominant in the semiarid Loess Plateau of China[J].Plant and Soil,2011,347:25-39.
- [15] Xu B C, Xu W Z, Huang J, Shan L, Li F M.Biomass allocation, relative competitive ability and water use efficiency of two dominant species in semiarid Loess Plateau under water stress[J].Plant Science,2011,181:644-651.
- [16] Zhang Z H, Duan J C, Wang S P, Luo C Y, Zhu X X, Xu B, Chang X F, Cui S J.Effects of seeding ratios and nitrogen fertilizer on ecosystem respiration of common vetch and oat on the Tibetan Plateau[J].Plant and Soil,2013,362:287-299.
- [17] Liebig M A, Doran J W, Gardner J C.Evaluation of a field test kit for measuring selected soil quality indicators[J].Agronomy Journal,1996,88(4):683-686.
- [18] Jolliffe P A.The replacement series[J].Journal of Ecology,2000,88(3):371-385.
- [19] 周小刚,张彦军,南雅芳,刘庆芳,郭胜利.黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素[J].环境科学,2013,34(3):1026-1033.
- [20] 王爱国,赵允格,许明祥,王一贺,杨丽娜,明姣.黄土高原不同侵蚀区生物结皮土壤 CO₂ 通量日动态特征及其温度敏感性[J].环境科学学报,2013,33(9):2605-2611.
- [21] 徐坤,吴旭东,谢应忠,杨菁.干旱区不同种植年限苜蓿人工草地土壤 CO₂ 排放的主要影响因素[J].生态环境学报,2013,22(10):1671-1677.
- [22] 王新源,李玉霖,赵学勇,毛伟,崔夺,曲浩,连杰,罗永清.干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展[J].生态学报,2012,32(15):4890-4901.
- [23] Singh J S, Gupta S R.Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems[J].The Botanical Review,1977,43:449-528.
- [24] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, Andrews J A.Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations[J].Biogeochemistry,2000,48(1):115-146.
- [25] 程杰,呼天明,程积民.黄土高原白羊草种群分布格局对水热梯度的响应[J].草地学报,2010,18(2):167-171.
- [26] 杨庆朋,徐明,刘洪升,王劲松,刘丽香,迟永刚,郑云普.土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性[J].生态学报,2011,31(8):2301-2311.
- [27] Loveys B R, Atkinson L J, Sherlock D J, Roberts R L, Fitter A H, Atkin O K.Thermal acclimation of leaf and root respiration: An investigation comparing inherently fast- and slow-growing plant species[J].Global Change Biology,2003,9(6):895-910.
- [28] 骆东玲,张金屯,陈林美.白羊草群落优势种群生态位研究[J].山西大学学报(自然科学版),2003,26(1):76-80.
- [29] 徐炳成,山仑,李凤民.半干旱黄土丘陵区五种植物的生理生态特征比较[J].应用生态学报,2007,18(5):990-996.
- [30] Biasi C, Rusalimova O, Meyer H, Kaiser C, Wanek W, Barsukov P, Junger H, Richter A.Temperature-dependent shift from labile to recalcitrant carbon sources of arctic heterotrophs[J].Rapid Communications in Mass Spectrometry,2005,19(11):1401-1408.