

# 施氮及豆-禾混播对草地群落及土壤呼吸的影响

唐雪娟<sup>1</sup> 徐丽君<sup>1</sup> 逢焕成<sup>1</sup> 杨云卉<sup>1</sup> 王笛<sup>1</sup> 李达<sup>1</sup> 白可喻<sup>1,2\*</sup>

(<sup>1</sup>中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京100081; <sup>2</sup>国际生物多样性中心东亚办事处,北京100081)

**摘要** 豆-禾混播是提高水土资源保持和利用效率、抑制土地退化和维持土壤健康的重要栽培措施。本实验以紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、无芒雀麦(*Bromus inermis*)、羊草(*Leymus chinensis*)、紫花苜蓿+无芒雀麦、紫花苜蓿+羊草5种不同类型的人工草地为研究对象,以施氮水平为辅因素,通过对地上生物量、光合特性和土壤呼吸强度的比较研究,探明施氮条件下豆-禾混播草地群落动态及土壤呼吸日变化特征,以为内蒙古东部地区人工草地合理建植与利用提供理论依据。结果表明:与苜蓿单播和羊草单播的生物量相比,混播对提高草地总体的生物量效果不显著;与苜蓿混播能在不同程度上提高禾本科牧草的净光合速率,其中无芒雀麦提升效果显著,3种牧草单播的净光合速率表现为紫花苜蓿<无芒雀麦<羊草;施氮提高了不同建植方式下人工草地的平均土壤呼吸强度;与苜蓿混播能显著提高禾草草地的土壤呼吸强度,且最高点一般出现在10:00—12:00。

**关键词** 混播; 施氮; 地上生物量; 土壤呼吸

**Impacts of nitrogen application and legume-grass mixed planting on grassland community and soil respiration.** TANG Xue-juan<sup>1</sup>, XU Li-jun<sup>1</sup>, PANG Huan-cheng<sup>1</sup>, YANG Yun-hui<sup>1</sup>, WANG Di<sup>1</sup>, LI Da<sup>1</sup>, BAI Ke-yu<sup>1,2\*</sup> (<sup>1</sup> Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081, China; <sup>2</sup> Biodiversity International East Asia Office, Beijing 100081, China).

**Abstract:** Legume-grass mixed planting is an important way to improve conservation and use efficiency of water and soil resources, restore degraded land, and maintain soil health. Five types of pastures (*Medicago sativa*, *Bromus inermis*, *Leymus chinensis*, *M. sativa* and *B. inermis* mixed planting, and *M. sativa* and *L. chinensis* mixed planting) were established in Hulunbuir Grassland Station, with different nitrogen fertilization levels being applied. Aboveground biomass, photosynthetic characteristics and soil respiration were measured, aiming to understand the impacts of nitrogen application and legume-grass mixed planting on the characteristics of grassland community and the dynamics of soil respiration and thus provide theoretical basis for pasture establishment and optimal utilization in eastern Inner Mongolia. Results showed that mixed planting did not significantly increase the total biomass of pasture as expected under drought condition. The net photosynthetic rate ( $P_n$ ) of the three species was in the order of: *M. sativa* < *B. inermis* < *L. chinensis*. Mixed sowing with alfalfa significantly improved the  $P_n$  of grasses. Nitrogen application increased the soil respiration intensity under each planting type. Moreover, mixing with alfalfa improved soil respiration intensity, with peak values occurring at 10:00–12:00.

**Key words:** mixed planting; nitrogen application; aboveground biomass; soil respiration.

土壤呼吸是碳循环的重要过程(李昌珍等,

国家重点基础研究计划项目(2015CB150803)、国家重点计划研发项目(2016YFC050050303)、现代农业产业技术体系建设专项资金(Cars-34)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(647-53)资助。

收稿日期: 2017-05-31 接受日期: 2017-11-24

\* 通讯作者 E-mail: K.bai@cgiar.org

2013),通过土壤中的微生物、动物、植物部分使大量的有机碳以CO<sub>2</sub>形式释放到大气中。据估计,全球每年由土壤释放到大气中的碳量约为68~100 Pg(孙振中等2012)。土壤呼吸是陆地生态系统土壤CO<sub>2</sub>排放的最大来源,是土壤碳平衡的决定因子,作

为土壤碳库输出的主要途径,在调节土壤碳库平衡中发挥重要作用(Schlesinger *et al.*, 2000; Geng *et al.*, 2012; 林力涛等, 2015; Zhang *et al.*, 2015)。目前国内外关于土壤呼吸日变化特征的研究主要涉及不同土地利用管理方式和土壤呼吸变化的影响因子。研究表明,梨园、弃耕地、棉田、人工林、草地和天然林土壤呼吸速率日变化均呈单峰曲线,但土壤日呼吸速率差异显著(周洪华等, 2011)。羊草与达乌里胡枝子混播草地,不同混播比例下土壤呼吸速率日变化均为单峰型曲线,峰值出现在12:00—14:00(陈吉等, 2015)。土地利用方式的转变所引起的地表植被及土壤理化状况的变化将直接影响土壤的生物化学环境(如土壤温度和土壤含水量)和微生物学特性,从而影响土壤呼吸强度以及土壤有机碳(SOC)储量(Orchard *et al.*, 1983; Raich *et al.*, 2000; Iqbal *et al.*, 2008; 罗光强等, 2009; Sheng *et al.*, 2010)。传统作物栽培和温度上升会增加土壤CO<sub>2</sub>排放通量,却对SOC储量影响并不显著。150 kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>的施氮量较不施肥处理能提高CO<sub>2</sub>排放通量14.5%,施氮量250 kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>反而会抑制CO<sub>2</sub>的排放(Song *et al.*, 2009)。

长期以来,退化草场的生态恢复与畜牧业的发展之间矛盾尖锐,饲料资源是其矛盾的焦点,天然草地适度放牧、减轻人为干扰策略为人工草地快速发展提供了契机(牛书丽等, 2004)。在生产实践中,如何维护高效、持久的人工草地,提高人工草地的生产性能、经济价值并维持草地的可持续力成为人工草地研究的焦点。为提高草地生产力、优化草群结构、维护草地稳定性并延长草地寿命,不同优质牧草混播逐渐受到国内外专家的认可。豆科植物所固定的氮能向土壤和邻近草类输送(Chalk, 1991),豆-禾混播已经成为目前人工草地优化建植的模式之一(王平等, 2009)。研究表明,向草地引入豆科牧草,可以提高土壤C、N储量、资源利用效率和生态系统的可持续力(Zhang *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2016)。施N能够显著改变生态系统的结构和功能,包括降低物种多样性(Stevens *et al.*, 2004)、提高系统第一生产力(Shaver *et al.*, 2001)、改变土壤C、N储量和N循环过程以及提高土壤呼吸速率(Mack *et al.*, 2004)。研究表明,氮素添加将通过降低种间异质性和种群稳定性使得生态系统稳定性显著降低(Zhang *et al.*, 2016)。施氮对草地群落稳定性的负面影响是否是因为施氮提高了混播草地群落的种间

竞争能力尚不明确。

目前,我国正面临着逐渐加剧的干旱期,水分胁迫严重限制草地植物生长的同时,还威胁了土壤微生物的生长状态(Muhr *et al.*, 2015)。干旱条件下,土壤呼吸强度显著下降的原因主要如下:其一,水分胁迫造成地上植物活性及其相应的植物根系及其共生组织自养呼吸强度显著下降(Peng *et al.*, 2015);其二,干旱对土壤微生物和土壤动物异养呼吸的抑制作用大于温度升高所带来的正向效应(Saleska *et al.*, 1999);其三,干旱限制了土壤气体扩散从而影响土壤含氧量,并且降低了植物和微生物的养分利用效率(Pacific *et al.*, 2009)。

在半干旱地区,禾-豆间作是提高水土资源的保持和利用效率、抑制土地退化和维持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(陈吉等, 2015)。农田土壤随着施氮量的增加土壤呼吸通量也增加,但只有施氮量相差400 kg·hm<sup>-2</sup>时,土壤呼吸通量差异显著(张庆忠等, 2005)。干旱条件下,土壤呼吸日变化对豆-禾牧草混播与氮肥耦合效应的响应情况目前研究较少,了解该机制将有助于人工草地的高效优质管理。

内蒙古自治区处于欧亚大陆草原带的中部,全区草地面积7.88×10<sup>7</sup> hm<sup>2</sup>,是北方分布最广泛的自然生态系统。以温带大陆性季风气候为主,干燥少雨,昼夜温差大。在过去50年中,内蒙古自治区的气候发生明显的改变,整体而言趋于温暖干燥,且在过去30年中变化速率明显加快(苏力德等, 2015)。本文通过在呼伦贝尔建植人工草地,研究干旱气候下,混播和施氮对人工草地群落动态及土壤呼吸日变化的影响特征,提出适合呼伦贝尔地区的人工草地建植管理模式,以期为呼伦贝尔地区人工草地优化管理措施制定提供理论依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

试验地位于内蒙古海拉尔市谢尔塔拉镇呼伦贝尔国家野外站,49°06'N—49°32'N,119°32'E—120°35'E。是大兴安岭西麓丘陵向蒙古高原的过渡区,海拔627~635 m。属中温带半干旱大陆性气候,年均气温-2.4℃,极端最高、最低气温分别为36.17℃和-48.5℃,≥10℃年积温1580~1800℃,无霜

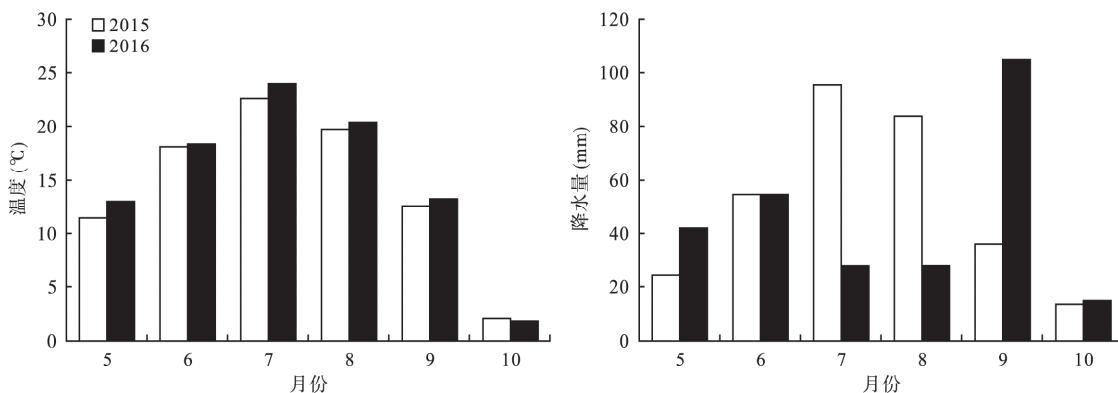


图 1 研究区降水量气温变化概况

Fig.1 Monthly precipitation and temperature in the experimental site in 2015–2016

期 95~110 d。年平均降水量 350~400 mm, 主要集中于 7—9 月, 试验区 2015—2016 年降水量如图 1 所示。日照时效平均为 2808 h, 太阳辐射年总量平均为 5161 MJ·m<sup>-2</sup>。土壤以黑钙土为主, 肥力中等, 主要土地类型有城镇、农田、草原、沙地和水域 5 类。

## 1.2 试验设计

本试验以建植方式为主因素, 选取内蒙古地区适应性强、产量较高且适口性较好的紫花苜蓿 (*Medicago sativa*)、无芒雀麦 (*Bromus inermis*) 和羊草 (*Leymus chinensis*) 3 种多年生牧草品种, 设置紫花苜蓿单播、无芒雀麦单播、羊草单播、紫花苜蓿无芒雀麦 1:1 混播和紫花苜蓿羊草 1:1 混播 5 个处理, 条播, 具体如表 1 所示。以氮肥为辅因素, 设置不施氮 (N0: 0 kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)、低氮 (N1: 75 kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) 和高氮 (N2: 150 kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) 3 个处理水平。随机区组排列, 重复 3 次, 共 45 个试验小区, 每个实验小区面积 3 m×5 m, 行距 0.5 m。

## 1.3 生物量及种间竞争测量方法

于 2016 年 8 月中于各小区内设置 1 m×1 m 的样方, 称量法测定地上生物量, 同时用“S”型取样法于各小区内选取 5 个样点取土 0~10 cm 和 10~20 cm, 测量土壤含水量、土壤容重和土壤有机质含量。

表 1 不同播种模式下人工草地的播种量

Table 1 Pasture seeding amount under different planting patterns

播种模式	发芽率 (%)	播种比例	播种量 (kg·hm <sup>-2</sup> )
紫花苜蓿	97.5		1.0
无芒雀麦	96.0		2.0
羊草	91.6		2.5
紫花苜蓿+羊草		1:1	2.0
紫花苜蓿+无芒雀麦		1:1	2.0

相对产量 (RY) 按下列公式计算:

禾草相对产量

$$RY_g = Y_{gl} / (pY_g)$$

豆科牧草相对产量

$$RY_l = Y_{lg} / (qY_l)$$

相对密度 (RD) 按下列公式计算:

禾草相对密度

$$RD_g = D_{gl} / (pD_g)$$

豆科牧草相对密度

$$RD_l = D_{lg} / (qD_l)$$

相对产量总值 (RYT) 按下列公式计算:

$$RYT = pRY_g + qRY_l$$

式中  $Y_{gl}$  和  $D_{gl}$  是在混播条件下禾草的单位面积产量和分蘖数,  $Y_g$  和  $D_g$  是单播条件下禾草的单位面积产量和分蘖数,  $p$  是禾草在混播地中的播种比例,  $Y_{lg}$  和  $D_{lg}$  是混播条件下豆科牧草的单位面积产量和分枝数,  $Y_l$  和  $D_l$  是单播条件下豆科牧草的单位面积产量和分枝数,  $q$  是豆科牧草在混播地中的播种比例。

$RD_g = 1$  时种内竞争和与豆科牧草的种间竞争对禾草种群数量影响相似,  $RD_g > 1$  时禾草在与豆科牧草混播时扩大了自己的种群,  $RD_g < 1$  时豆科牧草的存在限制了禾草种群数量的扩展,  $RD_l$  值含义同  $RD_g$ ;  $RYT = 1$  时在该组分下, 种间和种内干扰相等;  $RYT < 1$  时种间干扰大于种内干扰, 环境资源没有得到充分利用;  $RYT > 1$  时种间干扰小于种内干扰, 各个竞争种可能有某种程度的生态位分化, 环境资源得到充分利用(郑伟等 2015)。

## 1.4 土壤呼吸强度测定方法

采用动态密闭气室红外 CO<sub>2</sub> 分析法 (IR-GA), 测定仪器为自动便携式 LI-8100 CO<sub>2</sub> 分析仪。每次测定时, 提前 24 h 将测定基座嵌入土壤中, 每试验

区安放3个。基座(直径)为10 cm、高10 cm的PVC圆形筒,嵌入地表平均深度约10 cm。将基座内的绿色植物齐地剪掉,尽可能不扰动地表的凋落物。经过24 h平衡后,土壤呼吸速率会恢复到基座放置前的水平,从而避免因安置气室对土壤扰动造成的短期内呼吸速率波动。测量时土壤呼吸室需要尽量接近土壤表面,以使土壤呼吸室内的气流能够充分与表面气体混和。测定时间选在天气晴朗的时候(2016年8月15—18日),每个测定日08:00—18:00,每隔2 h测定1次,连续测定12 h,连续进行2 d,求其算术平均值。

### 1.5 叶片光合速率测定方法

选择晴朗天气,采用Li-6400便携式光合仪测定草叶片光合生理变化,每个处理中按牧草种类各品种随机选取3个完全新展开叶片重复测定,每月连续测定3天,测定的光合生理生态指标包括光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )等生理因子及大气温度( $T_a$ )、相对湿度( $RH$ )等气象指标。选择牧草生长旺盛季(2016年6月25日)测定各处理中各物种的光合效率。叶片瞬时水分利用效率( $WUE$ )由下式计算:

$$WUE = P_n / T_r$$

### 1.6 数据分析

利用Excel 2013对数据进行整理及计算,再用SPSS 21.0统计软件对各处理下的不同指标进行单因素方差分析,采用Duncan法进行显著性分析。 $t$

表2 试验地土壤养分概况

Table 2 Soil nutrient of experiment site

处理		有机碳 (g·kg <sup>-1</sup> )	速效磷 (mg·kg <sup>-1</sup> )	全氮 (g·kg <sup>-1</sup> )	含水量 (%)	微生物生物量碳 (mg C·kg <sup>-1</sup> )	微生物生物量氮 (mg N·kg <sup>-1</sup> )
紫花苜蓿+	N0	13.34±0.2ABA	20.94±1.00Aa	2.27±0.03ABA	13.01±1.57Aa	359.14±39.16Aa	69.38±23.56Aa
无芒	N1	13.19±0.31ABA	13.22±0.34Bb	2.30±0.01Aa	11.27±2.03Aa	369.72±59.2Aa	82.37±13.32Ba
	N2	13.06±0.44ABA	21.33±2.68ABA	2.08±0.05Bb	12.89±2.68Aa	326.63±28.32Aa	66.81±14.68Aa
紫花苜蓿+	N0	12.04±0.31Ba	20.32±1.41Ab	2.10±0.04Ca	11.77±1.56Aa	259.04±23.72Bb	55.86±18.24Aa
羊草	N1	11.83±0.34Ca	14.61±0.69Bc	2.07±0.02Ca	11.92±3.01Aa	213.01±59.24Bb	68.72±23.92Ba
	N2	11.72±0.54Ba	24.96±2.19Aa	2.02±0.03Ba	10.93±1.35Aa	375.83±35.44Aa	66.16±19.48Aa
无芒	N0	13.32±0.62ABA	13.05±1.19BCb	2.18±0.03BCb	12.76±2.23Aa	313.56±32.28ABA	65.73±6.56Aa
	N1	11.78±0.31Ca	16.44±0.82Bab	2.16±0.03Bb	13.34±0.97Aa	293.1±29.64ABab	55.05±7.68Bab
	N2	12.48±0.76Ba	17.63±1.47Ba	2.30±0.04Aa	13.19±3.31Aa	248.63±27.88Bb	46.12±8.88Ab
羊草	N0	12.82±0.42ABA	14.42±0.42Ba	2.28±0.04Aa	12.48±1.55Aa	327.26±32.56Aa	63.9±18.68Aa
	N1	12.97±0.22Ba	15.73±1.81Ba	2.18±0.02Bb	10.23±2.14Aa	365.63±37Aa	74.54±19.32Ba
	N2	12.93±0.21ABA	15.83±1.89Ba	2.33±0.01Aa	11.62±1.43Aa	329.14±36.88Aa	67.93±20.48Aa
紫花苜蓿	N0	13.6±0.45Aa	10.38±0.43Cb	2.23±0.15ABb	12.36±0.96Aa	381.89±53.32Aa	87.1±28.04Aab
	N1	13.92±0.29Aa	22.32±2.96Aa	2.18±0.01Ba	11.88±1.08Aa	416.18±71.88Aa	81.3±27.32Aa
	N2	14.23±0.31Aa	17.34±0.81Ba	2.32±0.03Ab	11.94±2.05Aa	350.6±43.56Aa	59.81±9.24Ab

NO: 施氮0 kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>; N1: 施氮75 kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>; N2: 施氮150 kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>; 下同。同列不同大写字母表示同一施氮水平不同播种模式之间差异显著, $P<0.05$ ; 同列不同小写字母表示同一播种模式不同施氮水平之间差异显著, $P<0.05$ 。

检验法分别比较RY、RD和RYT与1之间的差异显著性 检验水平 $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理土壤养分的变化

每年6—10月为呼伦贝尔地区牧草主要生长季节,但自2015年以来呼伦贝尔地区气候状况恶化,气温回暖,降水量急剧下降。2015—2016年牧草生长季平均降水量分别为51.8和45.6 mm。2016年牧草生长旺盛季节(6—8月)平均降水量为37.1 mm,严重阻碍了牧草的正常生长。土壤含水量的变化与降水量表现一致,10 cm土层的含水量随季节逐渐降低,8月达到最低,为10.23%。根据Hsiao(1973)提出的干旱胁迫梯度划分方法,低于土壤田间持水量35%的皆为重度胁迫,可见试验地区干旱胁迫严重。混播提高了土壤速效磷含量,而对其他养分含量影响不显著(表2)。

### 2.2 不同处理对地上群落生物量的影响

紫花苜蓿与无芒雀麦或羊草混播并没有提高草地地上总生物量,相反紫花苜蓿单播和羊草单播的生物量最高(图2)。与羊草相比,无芒雀麦单播单位面积产量显著降低。从混播草地不同品种牧草所占比例推测,种间竞争能力无芒雀麦>紫花苜蓿>羊草。干旱条件下,施氮对不同建植方式下的人工草地地上生物量影响并不显著。

紫花苜蓿与无芒雀麦混播 地上生物量比值始

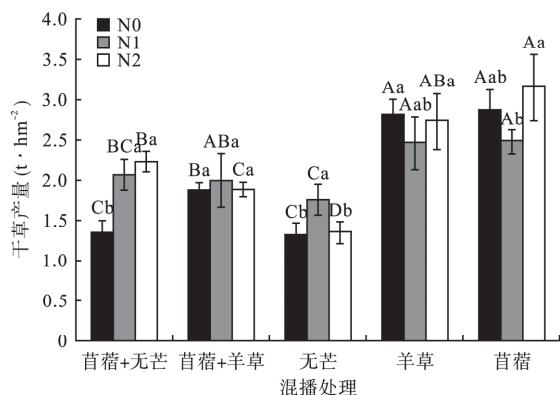


图2 不同处理组合下草地生产力

Fig.2 Aboveground biomass of grassland under different treatments

不同大写字母表示同一施氮水平不同播种模式之间差异显著,  $P < 0.05$ ; 不同小写字母表示同一播种模式不同施氮水平之间差异显著  $P < 0.05$ 。

终小于1,但随着施氮量的增加,紫花苜蓿地上生物量在总生物量中所占比例逐渐增大,表明施氮条件下该混播地中紫花苜蓿的生长优势明显。紫花苜蓿与羊草混播,两者地上生物量比值较不稳定,且随着施氮量的增加无明显变化规律。

### 2.3 不同混播组合种间竞争

在豆-禾混播草地中,紫花苜蓿的相对产量和相对密度显著低于无芒雀麦,高于羊草(图4)。与无芒雀麦混播,紫花苜蓿RY和RD在3种施氮水平下均显著小于1,无芒雀麦则显著大于1;与羊草混播,

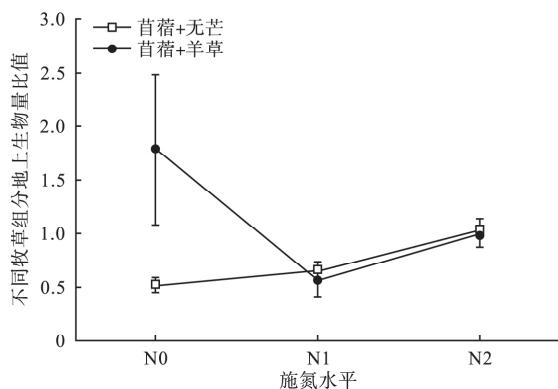


图3 混播地各牧草组分地上生物量比值

Fig.3 Aboveground biomass ratio of pasture components in mixed sowing treatments

二者RY和RD均不超过1。

$75 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的施氮水平下,群落中弱势种群有一定发展,表现为其RY和RD在不同程度上均有所提升,而过量的氮则会限制其竞争能力并抑制其群落的扩展。同时施氮抑制了紫花苜蓿的有效发展。紫花苜蓿与无芒雀麦混播,相对产量总值随着氮肥的添加显著增大;与羊草混播,在3种施氮水平下均显著小于1(图5)。表明施氮减小了紫花苜蓿和无芒雀麦之间的竞争,但紫花苜蓿和羊草混播建植的人工草地两种牧草存在激烈的资源竞争。

### 2.4 不同处理对不同牧草叶片光合特性的影响

如图6所示,不同水平的氮素添加对不同建植

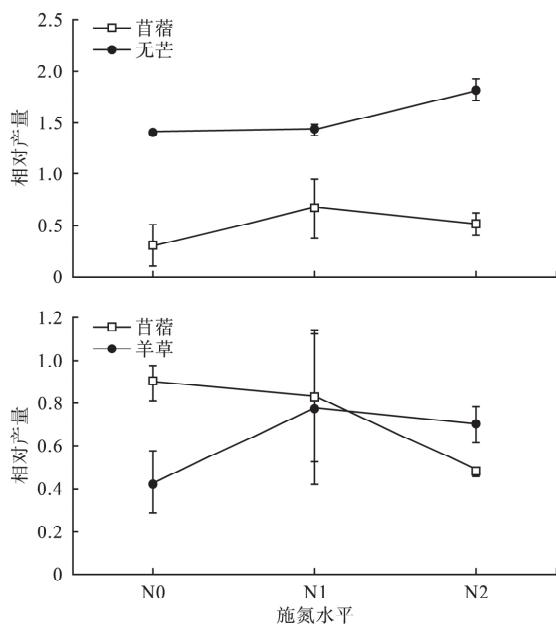
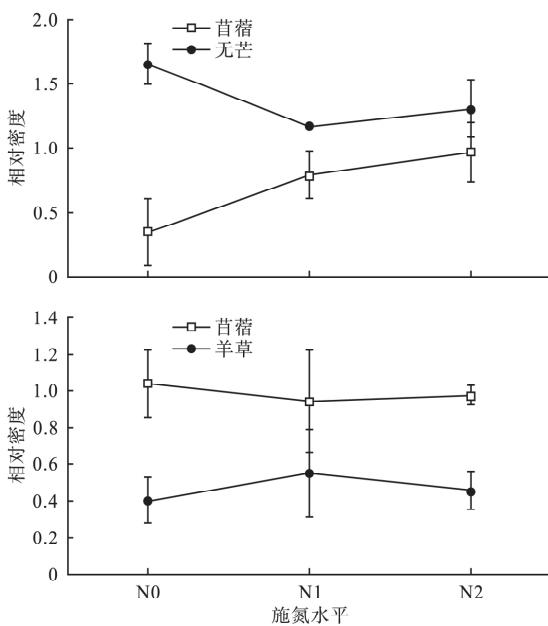


图4 豆-禾混播各牧草的相对产量和相对密度

Fig.4 Relative yield and relative density of various forages in legume-grasses mixture pasture



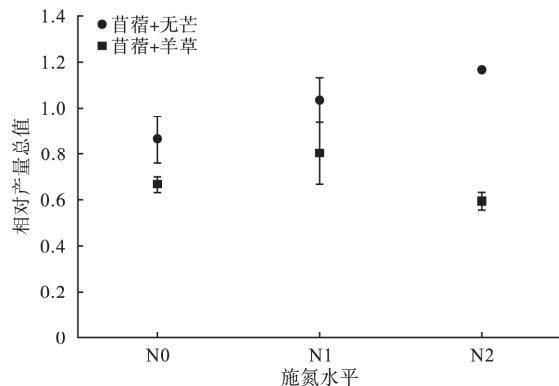


图5 豆-禾混播地相对产量总值

Fig.5 Relative yield total of legume-grasses mixture pasture

方式下各类牧草的光合特性影响并不显著。就总体情况来看,干旱条件下,3种牧草的净光合速率表现为禾本科牧草>豆科牧草,具体而言,羊草>无芒雀麦>紫花苜蓿,各牧草单播条件下羊草和无芒雀麦的平均净光合速率分别较之紫花苜蓿增加了10.61%和117.81%。与禾本科牧草混播能够显著降低紫花苜蓿的蒸腾作用,从而提高其瞬时叶片水分利用效率。此外,与紫花苜蓿混播能在不同程度上提高禾本科牧草的净光合速率,其中无芒雀麦提升效果显著,对蒸腾速率的影响不尽相同,混播并未影响无芒雀麦的叶片水分利用效率,但羊草叶片水分利用效率显著提高。

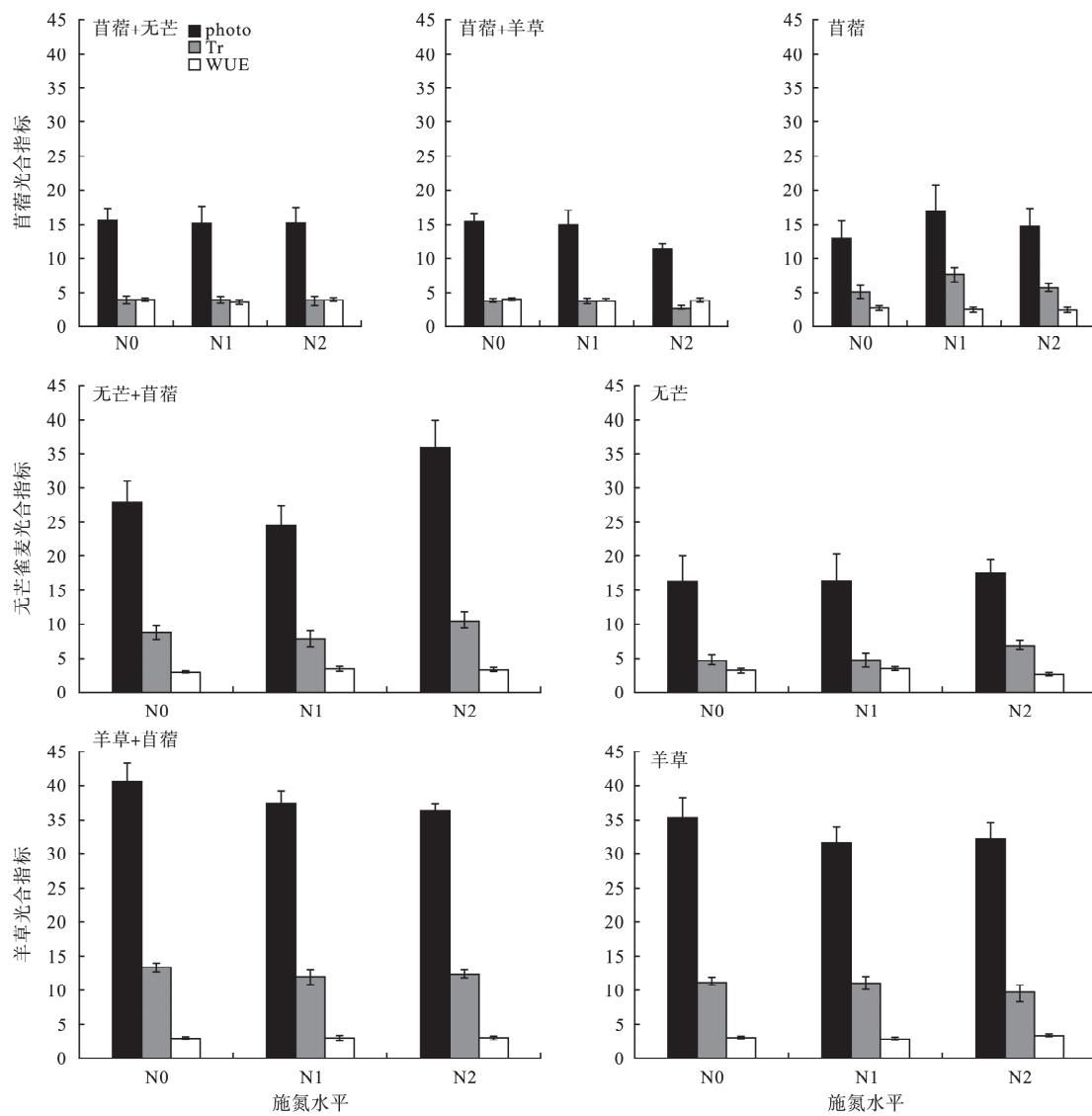


图6 不同处理组合下各类牧草光合特性

Fig.6 Forage photosynthetic characteristics of different treatments

photo 为净光合速率( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ ) , $T_r$  为蒸腾速率( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ ) ,WUE 为叶片瞬时水分利用效率 ( $\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )。

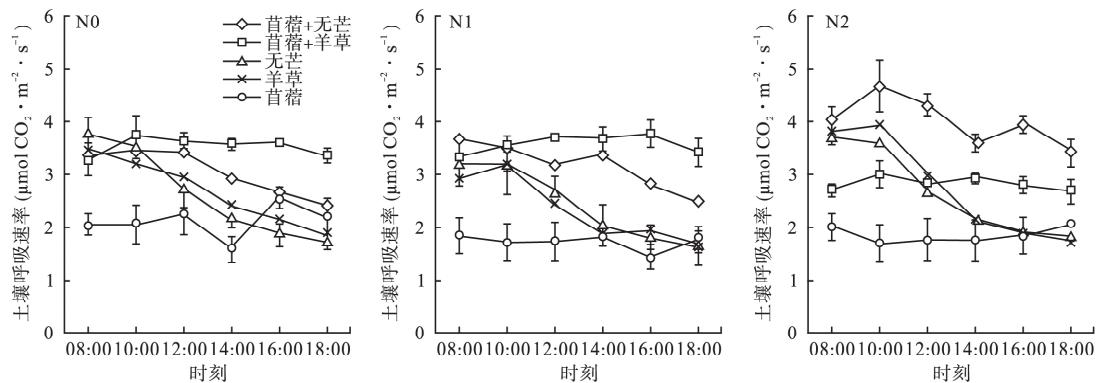


图 7 不同施氮水平下土壤呼吸日动态变化情况

Fig.7 Diurnal dynamics of soil respiration under different nitrogen application levels

## 2.5 不同处理对土壤呼吸日动态的影响

不同处理对土壤呼吸日动态的影响总体来看,无芒雀麦和羊草单播草地土壤呼吸速率大小及变化趋势都是相似的(图 7)。紫花苜蓿单播草地土壤呼吸强度在 3 种氮浓度添加条件下,均为 5 种建植方式中最低的一种。紫花苜蓿和羊草混播、紫花苜蓿与无芒雀麦混播均能显著提高土壤呼吸强度。紫花苜蓿和羊草混播以及紫花苜蓿单播土壤呼吸强度日动态变化并不显著,无芒雀麦、羊草单播全天土壤呼吸强度呈现出显著的下降走向,但与紫花苜蓿混播后能改善该状态,其中紫花苜蓿与无芒雀麦混播仍呈下降趋势。多数处理下,土壤呼吸强度的最高点出现在 10:00—12:00,建议以后测算土壤呼吸年际动态选择该时间段,具有较为显著的功效。

施氮提高了不同建植方式下人工草地的平均土壤呼吸强度,以紫花苜蓿无芒雀麦混播草地效果最为显著。高氮条件下,无芒雀麦和羊草单播草地的呼吸强度日变化幅度加大,具体表现在施氮提高了早晨的土壤呼吸强度。

## 3 讨论

### 3.1 地上生物量对混播和施氮的响应

豆科牧草在改善草地生态系统氮素营养平衡、促进草地动物蛋白质的形成中发挥了非常重要的作用。研究表明,利用豆科牧草补播改良天然草地或建立人工混播草地,其固定的氮素可通过根接触转移或生物体死亡分解后释放到土壤中,再转移至相邻禾本科牧草促其生长,从而明显提高草地质量和产量(王平等,2009)。本试验结果却与前人报道不同甚至呈现出相反的结果,以紫花苜蓿和羊草单播产量最高。具体表现为,紫花苜蓿和羊草各自单独

建植草地时有较高的生产价值,但两种牧草混播,其草地生产力反而下降。生态位理论认为,生态位分离是实现物种共存的唯一途径,唯有足够的资源供应,才能达到不同物种养分吸收平衡,从而提高生态体系功能性。混播草地豆-禾牧草大部分时期种间竞争小于种内竞争,但仍存在资源竞争关系,且夏季尤为激烈;气温升高,禾草竞争力逐渐下降,豆科牧草竞争力则逐渐上升(郑伟等,2010)。本试验紫花苜蓿与羊草混播,相对产量总值显著<1,表明二者之间的可利用资源竞争异常激烈。两种牧草的相对产量和相对密度均不超过 1,是以两个种群为相互抑制的关系。此外,苜蓿和无芒雀麦混作时,无芒雀麦和苜蓿的生长高度模式不受单播、混播的影响,且苜蓿地上生物量积累模式不受单播、混播的影响(宝音陶格涛,2001)。

本试验结果显示,紫花苜蓿与无芒雀麦混播种间竞争较之羊草显著降低,且随着施氮量的升高,地上生物量变化不显著,但种间资源生态位分离愈大(图 4、5),表明氮素可能是紫花苜蓿与无芒混播的限制因素之一。紫花苜蓿和羊草混播地的限制因子则不止氮素,推测 2016 年试验区的极度干旱条件亦是造成特殊产量现状的另一重要原因。水分胁迫降低了紫花苜蓿根系生物量,促使根系脱落酸(ABA)含量升高(毕舒贻等,2016)。高温、干旱条件下,豆科植物的根毛和侧根数量减少,影响结瘤;同时减少输向根瘤的光合产物,导致固氮酶活性下降(关桂兰等,1986)。研究表明,水分短缺会严重削弱豆科植物的共生固氮能力,导致豆科牧草转向对土壤无机氮的吸收(王平等,2010)。Wery 等(1986)研究结果显示,干旱胁迫下紫花苜蓿固氮量的下降程度大于吸收土壤无机氮的下降程度,从而严重阻碍了

豆-禾混播草地优势作用的发挥。羊草在干旱条件下,叶片电解质外渗率、叶绿素含量和脯氨酸含量很高,呈现出较强的耐旱能力(周婵等,2002),本试验中羊草单播时叶片净光合速率显著高于另两种牧草,积累光合产物最多,是以产量最高。但同一植物在混播草地中生长时,对水分亏缺的反应与其在单播条件下的反应差异很大,表现为种间竞争加剧了水分亏缺对植物生长的影响(王平等,2007)。羊草与紫花苜蓿混播后,其叶片蒸腾作用显著提高(图6)。因此,推测水分胁迫的加强和较强的竞争能力是单播产量较高的羊草和紫花苜蓿混播后总体产量下降的两个主要原因。

### 3.2 土壤呼吸强度对混播的响应

全球土壤呼吸作用的碳估计量仅次于全球陆地总初级生产力的估算值 $100\sim120\text{ Pg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,高于净初级生产力的量值 $50\sim60\text{ Pg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,是全球碳循环中一个主要流通途径(李玉宁等,2002;陈全胜等,2003)。土壤呼吸释放的 $\text{CO}_2$ 中约 $30\%\sim50\%$ 来自根系的活动或自养呼吸作用,其余部分主要源于土壤微生物对有机质的分解作用,即异养呼吸作用(李玉宁等,2002)。研究表明,大多数草地类型,其土壤呼吸速率日变化通常表现出单峰效应,且与温度呈指型关系,与土壤含水量关系不甚明确,大体趋势表现为在一定范围内有显著正相关作用(常宗强等,2005)。本研究表明,紫花苜蓿单播时平均呼吸速率最低,豆-禾混播草地土壤呼吸速率显著高于单播草地,与地上生物量呈现出不同甚至相反的结果。与徐丽君等(2012)在该地区不同苜蓿品种人工草地土壤呼吸日动态变化趋势较为一致,究其原因解释为土壤生态环境的异质性,即地理位置、环境气候、植物群落类型和管理措施等之间的差异性,仍需进一步研究。紫花苜蓿地土壤呼吸较弱可能与紫花苜蓿、无芒雀麦和羊草的根系特征有关,苜蓿为根颈型牧草,直根系,而禾本科牧草为根茎型,须根发达,且形成网状,根量的差异必将引起总土壤呼吸强度的差异(陈吉等,2015)。套格图等(2006)在赤峰的研究结果表明,与苜蓿草地、无芒+苜蓿地等12种牧草地相比,无芒雀麦草地土壤表现出较高的微生物生物量和较低的呼吸熵,因此具有较强的土壤呼吸作用。贾丙瑞等(2005)对羊草草原土壤呼吸特征的研究结果表明,围栏样地土壤呼吸作用与其影响因子的相关性从大到小依次为土壤水分、净光合速率、气温、相对湿度、大气 $\text{CO}_2$ 浓度、胞间 $\text{CO}_2$ 浓

度、气孔导度和光合有效辐射,其中净光合速率是最重要的生物因子。本试验中,与苜蓿混播,禾本科牧草的净光合速率均显著提升,同化产物供应量提高,与混播地土壤呼吸强度提高可能有一定的关联性。

### 4 结 论

干旱条件下,苜蓿和羊草混播由于资源限制存在强烈的种间竞争,于两类牧草种群均达到显著的抑制作用,群落生物量下降,而苜蓿与无芒雀麦混播种间竞争较小,建议干旱条件下该地区人工草地建植采用紫花苜蓿+无芒雀麦的混播模式。

3种牧草的净光合速率表现为羊草>无芒雀麦>紫花苜蓿,土壤呼吸强度总体表现为豆-禾混播地>禾本科牧草>苜蓿,与苜蓿混播能在不同程度上提高禾本科牧草的净光合速率和土壤呼吸强度,且呼吸日动态最高点一般出现在10:00—12:00,建议以后该地区土壤呼吸年际动态测定时间选择该时间段。

施氮促进了不同建植方式下人工草地的平均土壤呼吸强度。

### 参考文献

- 宝音陶格涛. 2001. 无芒雀麦与苜蓿混播试验. 草地学报, 9(1): 73-76.
- 毕舒贻, 曹婧, 李跃, 等. 2016. 水分胁迫下紫花苜蓿根系特征与ABA含量的变化. 中国农学通报, 32(33): 119-124.
- 常宗强, 史作民, 冯起, 等. 2005. 黑河流域山区牧坡草地土壤呼吸的时间变化及水热因子影响. 应用生态学报, 16(9): 1603-1606.
- 陈吉, 王京, 高志娟, 等. 2015. 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. 草业科学, 32(1): 19-27.
- 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 2003. 水分对土壤呼吸的影响及机理. 生态学报, 23(5): 972-978.
- 关桂兰, 李仲元, 王卫卫, 等. 1986. 新疆干旱区豆科植物结瘤的固氮特性. 植物生理学报, 4(1): 20-28.
- 贾丙瑞, 周广胜, 王风玉, 等. 2005. 放牧与围栏羊草草原土壤呼吸作用及其影响因子. 环境科学, 26(6): 1-7.
- 李昌珍, 张婷婷, 杨改河, 等. 2013. 粱秆覆盖和施肥对关中灌区夏玉米生长后期土壤呼吸速率的影响. 生态环境学报, 22(3): 411-416.
- 李玉宁, 王关玉, 李伟. 2002. 土壤呼吸作用和全球碳循环. 地学前缘, 9(2): 351-357.
- 林力涛, 孙学凯, 胡亚林, 等. 2015. 氮添加对沙质草地土壤呼吸及其温度敏感性的影响. 生态学杂志, 34(6): 1614-1621.
- 罗光强, 耿元波. 2009. 温度和水分对羊草草原土壤呼吸温度敏感性的影响. 生态环境学报, 18(5): 1938-1943.
- 牛书丽, 蒋高明. 2004. 人工草地在退化草地恢复中的作用及其研究现状. 应用生态学报, 15(9): 1662-1666.

- 苏力德, 杨 勘, 万志强, 等. 2015. 内蒙古地区草地类型分布格局变化及气候原因分析. 中国农业气象, 36(2): 139–148.
- 孙振中, 王吉顺, 潘国艳, 等. 2012. 刈割对华北平原人工草地土壤呼吸速率的影响. 自然资源学报, 27(5): 809–819.
- 套格图, 赵 吉, 孙启忠, 等. 2006. 不同牧草对农牧交错带土壤呼吸作用的效应研究. 农业环境科学学报, 25(6): 1513–1517.
- 王 平, 王天慧, 周 雯, 等. 2007. 禾-豆混播草地中土壤水分与种间关系研究进展. 应用生态学报, 18(3): 653–658.
- 王 平, 周道玮, 姜世成. 2010. 半干旱地区禾-豆混播草地生物固氮作用研究. 草业学报, 19(6): 276–280.
- 王 平, 周道玮, 张宝田. 2009. 禾-豆混播草地种间竞争与共存. 生态学报, 29(5): 2560–2567.
- 徐丽君, 唐华俊, 杨桂霞, 等. 2010. 不同苜蓿品种人工草地土壤呼吸及对土气温度反应. 西北植物学报, 30(9): 1882–1886.
- 张庆忠, 吴文良, 王明新, 等. 2005. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响. 生态学报, 25(11): 2883–2887.
- 郑 伟, 加娜尔古丽, 唐高溶, 等. 2015. 不同混播方式下豆禾混播草地群落稳定性的测度与比较. 草业学报, 24(3): 155–167.
- 郑 伟, 朱进忠, 库尔班, 等. 2010. 不同混播方式下豆禾混播草地种间竞争动态研究. 草地学报, 18(4): 568–575.
- 周 婷, 杨允菲, 李建东. 2002. 松嫩平原两种趋异类型羊草对干旱胁迫的生理响应. 应用生态学报, 13(9): 1109–1112.
- 周洪华, 李卫红, 杨余辉, 等. 2011. 干旱区不同土地利用方式下土壤呼吸日变化差异及影响因素. 地理科学, 26(2): 190–196.
- Chalk PM. 1991. The contribution of associative and symbiotic nitrogen fixation to the nitrogen nutrition of non-legumes. *Plant and Soil*, 13: 29–39.
- Geng Y, Wang YH, Yang K, et al. 2012. Soil respiration in Tibetan alpine grasslands: Belowground biomass and soil moisture, but not soil temperature, best explain the large-scale patterns. *PLoS One*, 7: e34968.
- Iqbal J, Hu R, Du L, et al. 2008. Differences in soil CO<sub>2</sub> flux between different land use types in mid-subtropical China. *Soil Biology & Biochemistry*, 40: 2324–2333.
- Li Q, Yu PJ, Li GD, et al. 2016. Grass-legume ratio can change soil carbon and nitrogen storage in a temperate steppe grassland. *Soil & Tillage Research*, 157: 23–31.
- Mack MC, Schuur EAG, Bret-Harte MS, et al. 2004. Ecosystem carbon storage in arctic tundra reduced by long-term nutrient fertilization. *Nature*, 431: 440–443.
- Muhr J, Borken W. 2015. Delayed recovery of soil respiration after wetting of dry soil further reduces C losses from a Norway spruce forest soil. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114: 1088–1088.
- Orchard VA, Cook FJ. 1983. Relationship between soil respiration and soil moisture. *Soil Biology & Biochemistry*, 15: 447–453.
- Pacific V, McGlynn B, Riveros-Iregui D, et al. 2009. Differential soil respiration responses to changing hydrologic regimes. *Water Resources Research*, 45: 545–561.
- Peng F, Xu MH, You QG, et al. 2015. Different responses of soil respiration and its components to experimental warming with contrasting soil water content. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2: 359–368.
- Raich JW, Tufekcioglu A. 2000. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls. *Biogeochemistry*, 48: 71–90.
- Saleska S, Harte K, Torn M. 1999. The effect of experimental ecosystem warming on CO<sub>2</sub> fluxes in a montane meadow. *Global Change Biology*, 5: 125–141.
- Schlesinger WH, Andrews JA. 2000. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 48: 7–20.
- Shaver GR, Bret-Harte MS, Jones MH, et al. 2001. Species composition interacts with fertilizer to control long-term change in tundra productivity. *Ecology*, 82: 3163–3181.
- Sheng H, Yang Y, Yang Z, et al. 2010. The dynamic response of soil respiration to land-use changes in subtropical China. *Global Change Biology*, 16: 107–1121.
- Song CC, Zhang JB. 2009. Effects of soil moisture, temperature, and nitrogen fertilization on soil respiration and nitrous oxide emission during maize growth period in northeast China. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B: Soil & Plant Science*, 59: 97–106.
- Stevens CJ, Dise NB, Mountford JO, et al. 2004. Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands. *Science*, 303: 876–879.
- Wery J, Turc O, Salsac L. 1986. Relationship between growth, nitrogen fixation and assimilation in a legume (*Medicago sativa* L.). *Plant and Soil*, 96: 17–29.
- Zhang Y, Loreau M, Lü XT, et al. 2016. Nitrogen enrichment weakens ecosystem stability through decreased species asynchrony and population stability in a temperate grassland. *Global Change Biology*, 22: 1445–1455.
- Zhang YJ, Guo SL, Liu QF, et al. 2015. Responses of soil respiration to land use conversions in degraded ecosystem of the semi-arid Loess Plateau. *Ecological Engineering*, 74: 196–205.
- Zhang Z, Duan J, Wang S, et al. 2013. Effects of seeding ratios and nitrogen fertilizer on ecosystem respiration of common vetch and oat on the Tibetan Plateau. *Plant and Soil*, 362: 287–299.

作者简介 唐雪娟,女,1993年生,硕士,主要从事草地生态学研究。E-mail: June\_txj@163.com

责任编辑 李凤芹