



不同生长年限苜蓿栽培草地 CO₂ 通量的初步研究

庞莹莹¹, 邓波¹, 张英俊¹, 马学敏^{1,2}, 杨世超¹, 刘蒙¹

(1. 中国农业大学动物科技学院草业科学系, 北京 100193; 2. 吉林农业大学园艺学院, 吉林 长春 130118)

摘要:以种植第1年、第2年、第3年和第5年的紫花苜蓿阿尔冈金(*Medicago sativa* cv. Algonquin)为对象,通过研究其光合生理特性、土壤呼吸以及土壤有机碳的净通量等分析不同生长年限苜蓿草地碳通量的变化规律。结果表明,不同生长年限的苜蓿草地净光合速率呈单峰曲线,第1年和第5年在盛花期达到最大,分别为50和69 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,第2年和第3年在结荚期达到最大值,分别为60和72 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,与叶绿素a和b的含量不相关($P>0.05$)。苜蓿草地土壤呼吸的动态变化呈不规则单峰曲线变化,6月24日达到最小值,7月达到最大值,平均值为第5年>第2年>第3年>第1年。土壤呼吸速率与土壤温度无明显的相关性($P>0.05$);除第1年外,与土壤湿度显著相关($P<0.05$),其中,第3年和第5年极显著相关($P<0.01$)。第1年、第2年、第3年和第5年的苜蓿土壤有机碳的净通量分别为3.71、-1.71、12.17和12.53 g/kg。

关键词:苜蓿草地;光合生理特性;土壤呼吸速率;土壤有机碳净通量

中图分类号:S551⁺.7;Q946

文献标识码:A

文章编号:1001-0629(2011)07-1239-07

^{*} 20世纪以来,人类活动使大气CO₂浓度急剧上升,由此导致的温室效应是人类面临的最严峻的环境变化问题。植被在陆地生态系统碳循环中发挥着极为重要的作用,植物通过光合作用将碳固定在植物体内,形成总初级生产量,并通过地表凋落物、细根周转和根系分泌物将光合产物分配给土壤,贮存在土壤中。同时,植物又通过植物自身呼吸作用(自养呼吸)和土壤呼吸作用(异养呼吸)将CO₂返回大气中,其中,土壤呼吸是最主要的释放方式。因此,光合作用和土壤呼吸是碳循环最主要的环节^[1],是碳通量研究的重要部分。

在1981-2000年这20年里,中国森林和其他陆地植被每年的碳汇量为1.9亿~2.6亿t,草地中贮存的碳总量约为266.3 Pg^[2]。国外对碳通量的研究工作最早出现于90年前^[3-4],但大多数集中在北美,尤其是美国温带草原和印度的热带草原,对于欧亚大陆温带干旱、半干旱地区涉及较少。20世纪90年代以后,我国关于碳通量研究结果较多,但大多是基于天然草地的碳通量的研究^[5-6],鲜见栽培草地的碳通量等方面的研究报道^[7]。据统计,我国现有不同类型的草地面积大约4亿hm²,是我国陆地上最大的生态系统,面积约为我国森林面积的3.6倍,耕地面积的4倍。但是,天然草地退化严重,已

不能满足现代畜牧业生产的要求,我国栽培草地的种植面积将逐渐增大,而其中的紫花苜蓿是最主要的栽培牧草。所以探讨苜蓿栽培草地碳通量的特点,对于了解栽培草地生态系统对全球碳循环的作用具有重要意义,同时为苜蓿栽培草地的合理化管理提供科学依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验地自然概况 试验地位于内蒙古锡林郭勒草原南缘,隶属于河北省张家口市塞北管理区,41°42'~41°57' N,115°32'~115°47' E,平均海拔1400 m。该地气候特点为:冬季寒冷少雪,春季干旱多风,夏季炎热少雨,秋季晴朗凉爽,属大陆性季风气候区。年均温1.4℃,≥10℃年积温1513.1℃·d,无霜期100 d左右,年均降水量297 mm,主要集中在7-9月,年均风速4.3 m/s,年均大风时间49 d,年日照时间2930.9 h,土壤以栗钙土为主。

选择生长年限为第1、2、3和5年的紫花苜蓿阿尔冈金(*Medicago sativa* cv. Algonquin)栽培草

收稿日期:2011-04-25 接受日期:2011-05-26
基金项目:农业部公益性行业(农业)项目(201003061);国家牧草产业技术体系资助
作者简介:庞莹莹(1988-),女,河南卫辉人,在读硕士生,主要从事栽培草地碳循环方面的研究。
E-mail:pangyingying521@126.com
通信作者:邓波 E-mail:dengbo67@cau.edu.cn

地,行距为 15 cm,样地面积为 12 m×10 m,第 1 年 龄苜蓿在 5 月初进行播种,生长期不刈割。试验地 土壤基本理化性质如表 1 所示。

表 1 样地表层土壤基本理化性质

时间	全 N (g/kg)	全 P (g/kg)	全 K (g/kg)	土壤有机碳 (g/kg)	容重 (g/cm ³)
第 1 年	0.701	0.503	24.069	3.704	1.11
第 2 年	2.221	0.329	20.873	16.652	1.16
第 3 年	2.101	0.204	21.757	18.986	1.18
第 5 年	1.322	0.325	20.907	18.401	1.21

1.2 测定项目与研究方法

1.2.1 净光合速率的测定 在苜蓿分枝期、初花期、盛花期、结荚期和成熟期用美国 LI-COR 公司生产的便携式光合作用系统(LI-6400 USA)测定叶片的净光合速率。选择生长健康、无病斑、长势一致、光照均一的同一叶位(从顶部向下第 3 片完全展开叶)叶片,在晴天的 10:00—11:00 进行测定,每次随机测定 5 个叶片,每一个叶片连续测定 10 次,取其平均值。

1.2.2 叶绿素相对含量的测定 在测定光合生理指标的同时,采集叶片,带回实验室进行叶绿素的测定。叶绿素相对含量采用比色法测定^[8]。

1.2.3 土壤呼吸的测定 用开路式土壤碳通量测量系统 LI-8100(LI-COR, Lincoln, NE, USA)测定土壤呼吸速率。在样地内随机设 3 个重复。测定时,提前 1~2 d 将测定基座(soil collar)嵌入土壤中。基座为直径 20 cm、高 12 cm 的聚氯乙烯圆柱体,嵌入土中约 8 cm。经过 24 h 的平衡后,土壤呼吸速率会恢复到基座放置前的水平,从而避免了由于安置气室对土壤扰动而造成的短时期内呼吸速率的波动。土壤呼吸的测定日期为 2010 年 6 月 4 日至 8 月 22 日,每 10 d 测定一次,时间为每天的 9:00—10:00。

1.2.4 土壤温度、土壤湿度的测定 在每次测定土壤呼吸时,同时测定 5 cm 土层土壤含水量和土壤温度,其中土壤含水量采用烘干法测定,土壤温度为相应地温计的读数。

1.2.5 土壤有机碳净通量 分别在苜蓿草地的返青期和收获期进行测定,在样地内随机设 3 个 0.6 m×1.0 m 的样方挖掘土壤剖面,采用土壤环刀

法,分 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 5 个层分别测土壤容重,并同时采集相应土层土壤样品风干、过筛,带回室内风干后做有机碳分析。土壤有机质用重铬酸钾容量法^[9-10]。

$$\text{土壤碳储量(g/m}^2\text{)} = \text{土壤容重(g/cm}^3\text{)} \times \text{采样深度(cm)} \times \text{土壤有机碳(g/kg)} \times 10。$$

土壤有机碳的净通量为返青期与收获期土壤有机碳总储量的差值。

1.3 数据统计分析 试验数据采用 EXCEL 及 SPSS 17.0 统计软件,进行方差分析以及相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同生长年限苜蓿光合生理特性的比较

植物的光合性能可以通过净光合速率、叶绿素 a 和叶绿素 b 等指标进行衡量。不同生长年限的苜蓿在不同生育期的光合特性结果显示(图 1),苜蓿的生长年限不同,光合性能各指标存在极显著差异($P < 0.01$)。其中,净光合速率都是随不同生育期逐渐上升到达一个峰值,然后下降。第 1 年的苜蓿只有分枝、现蕾、初花和盛花 4 个时期,无结荚和成熟期,在盛花期达到最大值 $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。第 2 年和第 3 年苜蓿在结荚期达到最大值,分别是 60 和 $72 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,第 5 年在盛花期达到最大值 $69 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。叶绿素 a 第 1 年和第 3 年苜蓿均在盛花期达到最大值,第 2 年和第 5 年苜蓿都是在结荚期达到最大。统计分析表明,第 2 年苜蓿的净光合速率与叶绿素 a 显著相关($P < 0.05$),其余相关不显著($P > 0.05$)。叶绿素 b 第 1 年以现蕾期为最高,第 3 年以盛花期为最高,与净光合速率相关不显著($P > 0.05$)(表 2)。

2.2 不同生长年限的苜蓿草地土壤呼吸以及

土壤温度、湿度的动态变化 土壤呼吸的季节动态变化分别从 2010 年 6 月 4 日—2010 年 8 月 24 日,每 10 d 测量一次。苜蓿草地土壤呼吸的动态变化呈不规则单峰曲线变化(图 2),土壤呼吸速率在 6 月 24 日达到最小值,在 7 月达到最大值,平均值为第 5 年 > 第 2 年 > 第 3 年 > 第 1 年。第 5 年苜蓿草地土壤呼吸速率最大值出现在 7 月 14 日,达到 $8.74 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,最小值出现在 6 月 24 日,为 $2.04 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,差值 $6.70 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。第 3 年苜蓿草地土壤呼吸速率最大值出现在 7 月 24 日,为

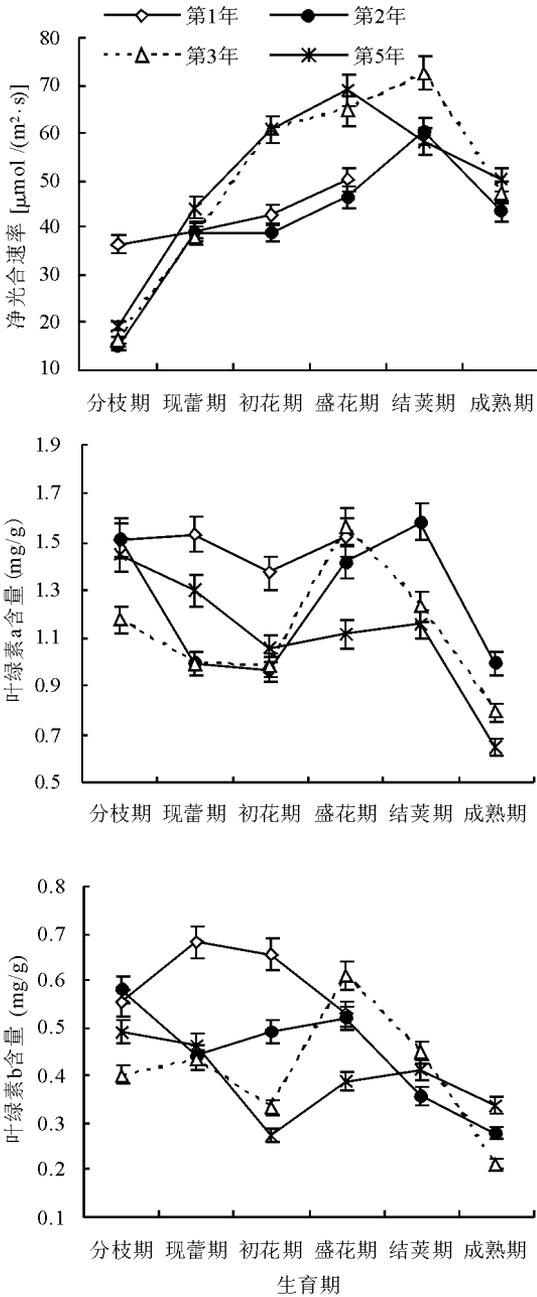


图1 不同生育期各光合生理指标的变化

表2 苜蓿净光合速率与叶绿素 a、b 的相关性分析

时间	叶绿素 a	叶绿素 b
第1年	-0.130	-0.396
第2年	0.033	-0.652
第3年	0.297	0.258
第5年	-0.491	-0.668

5.79 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 最小值出现在6月24日, 为2.48 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 差值为3.31 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。第2年苜

蓿草地土壤呼吸速率最大值出现在7月24日, 为6.42 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 最小值出现在6月24日, 为2.32 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 差值为4.10 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 第1年苜蓿草地土壤呼吸速率最大值出现在8月13日, 为4.83 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 最小值出现在6月24日, 为1.52 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 差值为3.31 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

不同生长年限的苜蓿草地土壤温度的变化趋势趋于一致(图3), 都是呈双峰曲线, 峰值出现在7月4日和7月24日, 最高温度为第2年苜蓿草地(26.2 $^{\circ}\text{C}$)和第5年苜蓿草地(24.9 $^{\circ}\text{C}$), 最小值出现在8月3日与8月23日, 为第2年苜蓿草地(15.6 $^{\circ}\text{C}$)和第1年苜蓿草地(15.0 $^{\circ}\text{C}$)。

不同生长年限的苜蓿的土壤湿度的变化与土壤呼吸速率的变化趋势趋于一致(图4), 都是呈不规

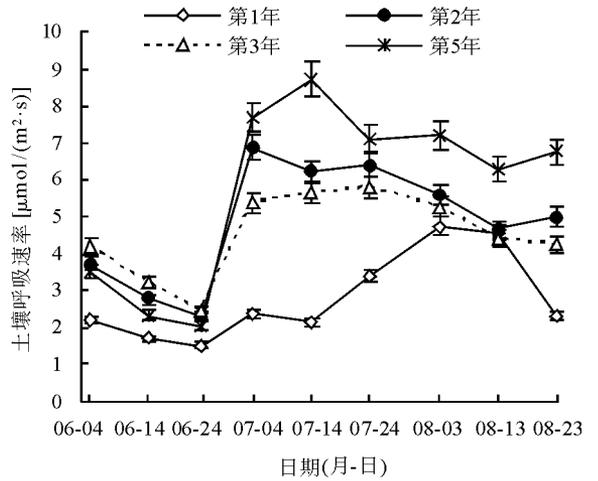


图2 不同生长年限的苜蓿草地土壤呼吸的变化

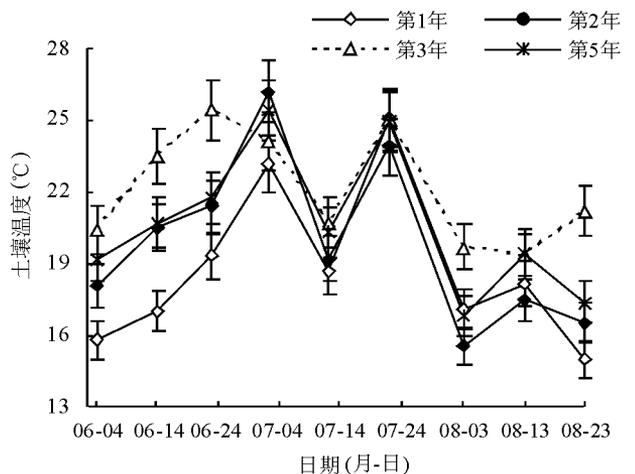


图3 不同生长年限的苜蓿草地土壤温度的变化

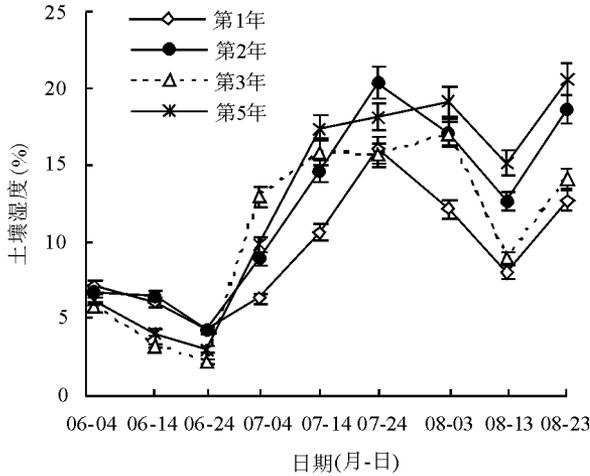


图4 不同生长年限的苜蓿草地土壤湿度的变化

则的单峰曲线变化,在6月24日达到最小值,第3年苜蓿草地达到2.25%,随后逐渐上升,达到峰值以后逐渐下降,最大值出现在7月24日第2年苜蓿草地,达到20.33%。

2.3 不同生长年限的苜蓿草地土壤呼吸与土壤温度、湿度关系 土壤呼吸速率与土壤温度、土壤湿度的关系都可以用指数方程来表示(图5),但是土壤呼吸速率与土壤温度都无明显的相关性($P>0.05$),而与土壤湿度除了第1年外,其他各年都显著相关($P<0.05$),其中,第3年和第5年极显著相关($P<0.01$)。

2.4 苜蓿草地土壤有机碳的净通量 在进行土壤有机碳储量的测量时,把土层按照20 cm一层分为5层,进行土壤容重和土壤有机碳的测定。样地土壤容重都随土层的增加而增加(表3),而且返青期的土壤容重略大于收获期,例如:第1年苜蓿草地0~20 cm土壤容重为1.18 g/cm³,收获期为1.11 g/cm³。土壤有机碳含量为收获期大于返青期,其中,20~40 cm的土层的增加幅度较大,第3年苜蓿的返青期为11.91 g/kg,收获期为13.25 g/kg,增

表3 不同生长年限的苜蓿草地土壤有机碳的净通量

种植年限	土层(cm)	土壤容重(g/cm ³)		土壤有机碳(g/kg)		碳净通量(g/m ²)
		返青期	收获期	返青期	收获期	
第1年	0~20	1.18	1.11	3.41	3.70	3.71
	20~40	1.30	1.30	1.15	2.22	
	40~60	1.49	1.41	1.48	1.70	
	60~80	1.55	1.47	0.45	0.60	
	80~100	1.66	1.51	0	0	
第2年	0~20	1.16	1.16	18.21	18.99	-1.71
	20~40	1.32	1.32	13.59	15.38	
	40~60	1.44	1.30	4.75	4.20	
	60~80	1.55	1.51	1.71	0.57	
	80~100	1.65	1.51	0.57	0	
第3年	0~20	1.18	1.18	15.79	18.40	12.17
	20~40	1.30	1.23	11.91	13.25	
	40~60	1.40	1.24	2.44	3.88	
	60~80	1.46	1.28	0.22	1.36	
	80~100	1.47	1.43	0.12	0.01	
第5年	0~20	1.18	1.21	16.44	16.65	12.53
	20~40	1.29	1.30	7.75	8.43	
	40~60	1.51	1.37	2.54	3.65	
	60~80	1.57	1.41	0.04	2.41	
	80~100	1.65	1.48	0	1.38	

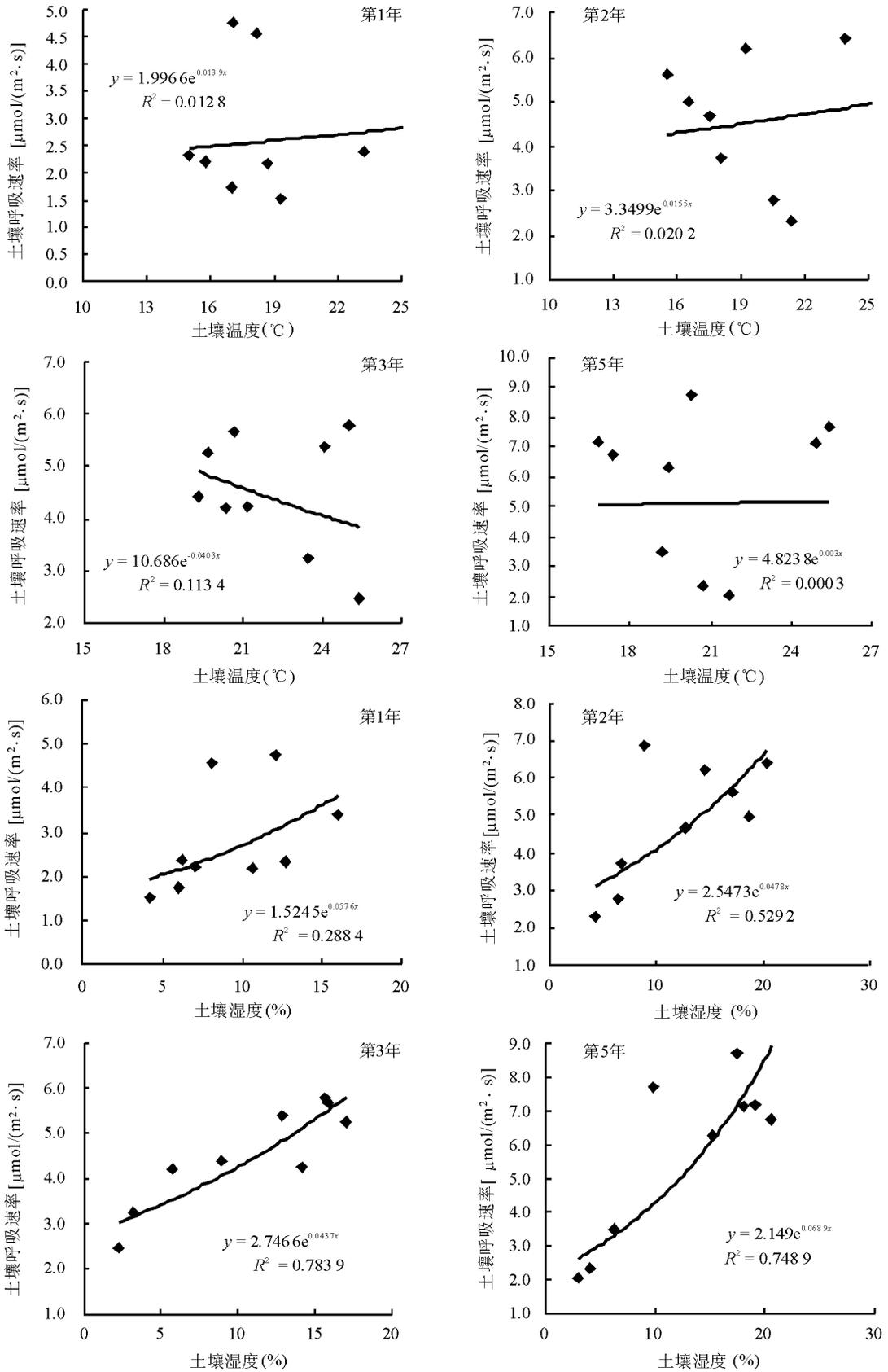


图5 不同生长年限的苜蓿草地土壤呼吸与土壤温度、湿度关系

加了 1.34 g/kg。碳的净通量第 5 年最大, 达到 12.53 g/m², 第 2 年最小, 为 -1.71 g/m², 即土壤有机碳没有增加; 第 1 年苜蓿草地碳的净通量为 3.71 g/m², 增加的幅度较少, 第 3 年为 12.17 g/m²。

3 讨论与结论

3.1 不同生长年限的苜蓿光合生理特性 植物的固碳能力与光合作用密切相关, 植株的生长发育最终决定于植株个体与群体的光合作用^[8]。不同种植年限的苜蓿的净光合速率随着生育期的不同, 逐渐增大, 到盛花期或结荚期达到最大。成熟期净光合速率减小, 这可能与气候条件有关系, 也可能与植物本身的结构有关。第 1 年的净光合速率在分枝期较大, 是因为第 1 年播种比较晚, 测定的时间较晚, 环境条件造成的。苜蓿的净光合速率越大, 整个生态系统固定的 CO₂ 越多, 净通量越大。

3.2 不同生长年限的苜蓿草地土壤呼吸与环境条件的关系 土壤呼吸速率主要受土地利用方式、管理实践和环境条件 3 方面的影响^[11]。本研究分析了环境条件与土壤呼吸的关系, 即土壤温度和湿度对土壤呼吸速率的影响。土壤温度和湿度是通过影响微生物的种群和活性, 进而影响微生物与土壤的呼吸^[12-13]。本研究中, 苜蓿草地土壤呼吸速率与土壤温度无相关性 ($P > 0.05$), 而与土壤湿度显著正相关 ($P < 0.05$), 这与一些研究者^[14-16]得出的土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度显著相关的结论不一致。这是因为土壤温度和土壤湿度是土壤呼吸的主要限制因子^[17-18], 并且在土壤水分充足时, 土壤湿度不是土壤呼吸的主要限制因子, 但是在土壤含水量饱和或干旱、半干旱地区的情况下, 土壤湿度不仅影响根系呼吸和微生物呼吸, 同时还影响 CO₂ 在土壤中的传输, 尤其在土壤含水量成为胁迫因子时, 可能取代温度成为主要控制因子^[19]。本研究的试验地属于半干旱地区, 土壤含水量处于较低水平, 土壤湿度成为主要限制因子。土壤呼吸是碳释放最主要的方式, 在碳平衡中起到了重要作用, Valentini 等^[20]认为呼吸作用是森林生态系统碳平衡的主要决定因素, 其研究发现, 森林的 CO₂ 交换量与呼吸速率显著相关, 而不是光合作用, 说明呼吸在森林碳平衡中的重要性。此结果在栽培草地生态系统中是否适用, 还需进一步探讨。

3.3 苜蓿草地土壤有机碳的净通量 土壤有

机碳库主要包括植物、动物、微生物遗体, 分泌物, 排泄物及部分分解产物和土壤腐殖质等^[21]。土壤有机碳的积累是一个相对缓慢的过程, 而且受很多因素的影响, 比如: 土壤 CaCO₃ 含量、降水量和温度等因素的变化都会使土壤有机碳库发生变化^[22-23]。本研究中, 返青期的土壤容重明显比收获期大, 因为夏季雨较多, 使土层变的疏松; 土壤有机碳的增加主要集中在 0~20 和 20~40 cm 土层, 主要是因为苜蓿的根集中在此, 第 3 年和第 5 年的苜蓿草地土壤有机碳的净通量增加的最多, 因为苜蓿的根比较多, 而第 2 年的净通量为 -1.71 g/m², 可能是由于土壤不均匀或取样不均匀, 亦可能是试验中的误差造成的。

参考文献

- [1] 钟华平, 樊江文, 于贵瑞, 等. 草地生态系统碳循环研究进展[J]. 草地学报, 2005, 13: 67-73.
- [2] Raich J W, Schlesinger W H. The global dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Tellus, 1992, 44(2): 81-99.
- [3] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry, 2000, 48: 7-20.
- [4] Gainey P L. Parallel formation of carbon dioxide, ammonia and nitrate in soil[J]. Soil Science, 1919, 7: 293-311.
- [5] 杜睿, 王庚辰, 吕达仁, 等. 静态箱法原位观测草原 CO₂ 通量的探讨[J]. 生态学报, 2002, 22(2): 2167-2174.
- [6] 李凌浩, 韩兴国, 王其兵, 等. 锡林河流域一个放牧草原群落中根系呼吸占土壤总呼吸比例的初步估计[J]. 植物生态学报, 2002, 26(1): 29-32.
- [7] 徐丽君, 王波, 玉柱, 等. 不同生长年限散汉苜蓿草地土壤呼吸研究[J]. 干旱地区研究, 2009, 26(1): 14-20.
- [8] 吕廷良, 孙明高, 宋尚文, 等. 盐、旱及其交叉胁迫对紫荆幼苗净光合速率及其叶绿素含量的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2010, 41(2): 191-195.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- [10] 白永飞, 许志信, 李德新. 内蒙古高原针茅草原群落土壤水分和碳、氮分布的小尺度空间异质性[J]. 生态学报, 2002, 22(8): 1215-1222.
- [11] Frank A B, Liebig M A, Tanaka D L. Management effects on soil CO₂ efflux in northern semiarid grassland and cropland[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 89: 78-85.
- [12] Doran J W. Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage[J]. Soil Science Society

- of America Journal, 1980, 44, 765-771.
- [13] Fortin M C, Rochette P, Pattey E. Soil carbon dioxide fluxes from conventional and no-till small-grain cropping systems [J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60: 1541-1547.
- [14] 刘颖, 韩士杰, 胡艳玲, 等. 土壤温度和湿度对长白松林土壤呼吸速率的影响 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1581-1585.
- [15] 蒋延玲, 周广胜, 赵敏, 等. 长白山阔叶红松林生态系统土壤呼吸作用研究 [J]. 植物生态学报, 2005, 29(3): 411-414.
- [16] 王光军, 李树战, 闫文德, 等. 樟树人工林土壤呼吸的动态变化 [J]. 中南林业科技大学学报, 2008, 28(4): 118-122.
- [17] Lavigne M B, Boutin R, Foster R J. Soil respiration responses to temperature are controlled more by roots than by decomposition in balsam fir ecosystems [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2003, 33: 1744-1753.
- [18] Smith V R. Soil respiration and its determinants on a sub-Antarctic island [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2003, 35: 77-91.
- [19] 贾丙瑞, 周广胜, 王凤玉. 放牧与围栏羊草草原生态系统土壤呼吸作用比较 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(9): 1611-1615.
- [20] Valentini R, Matteucci G, Dolman A J, *et al.* Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests [J]. Nature, 2000, 404(6780): 861-865.
- [21] 任军, 郭金瑞, 边秀芝, 等. 土壤有机碳研究进展 [J]. 中国土壤与肥料 2009(9): 1-7.
- [22] 方华军, 杨学明, 张晓平. 农田土壤有机碳动态研究进展 [J]. 土壤通报, 2003, 34(6): 562-568.
- [23] Lal R. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland [J]. Environmental Pollution, 2002, 116: 353-362.

CO₂ flux of alfalfa pasture with different ages

PANG Ying-ying¹, DENG Bo¹, ZHANG Ying-jun¹, MA Xue-min^{1,2},
YANG Shi-chao¹, LIU Meng¹

(1. Department of Grassland Science, College of Animal Science and
Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. College of Horticulture, Jilin Agricultural University, Jilin Changchun 130118, China)

Abstract: Alfalfa pasture with 1, 2, 3, and 5 years was used to determine the effect of ages on CO₂ flux of alfalfa pastures by measuring photosynthetic characteristics, soil respiration and net flux of soil organic carbon in the agro-pastoral ecotone of Northern China. This study indicated that the photosynthetic rate of alfalfa with different ages presented a single peaked curve, and the maximum of which was observed at the flowing stage in the first and the fifth year with the value of 50 and 69 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, respectively, while it was observed at the podding stage in the second and the third year with the value of 60 and 72 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, respectively. The photosynthetic rate had no significant correlation to chlorophyll a and chlorophyll b. The soil respiration of alfalfa pasture showed a irregular peak curve, with the minimum value at June and the maximum at July, and followed the pattern with the fifth > the third > the second > the first year. The soil respiration of alfalfa pasture was not significantly correlated to soil temperature; however, was significantly correlated the soil moisture ($P < 0.05$) except the first year. The net fluxes of soil organic carbon of alfalfa pasture were 3.71, -1.71, 12.17 and 12.53 g/kg in the first, the second, the third, and the fifth year.

Key words: alfalfa grassland; photosynthetic characteristics; soil respiration rate; net flux of soil organic carbon