

不同生长期盆栽大豆的土壤呼吸昼夜变化及其影响因子

杨兰芳^{1,2}, 蔡祖聪¹

(1. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2. 湖北大学资源与环境学院, 武汉 430062)

摘要:通过盆栽试验,用静态箱法采样,气相色谱测定样品 CO₂ 浓度,分别在大豆开花期、结荚期和鼓粒期测定土壤呼吸速率,研究大豆不同生长期土壤呼吸的昼夜变化规律及其主要影响因素。在结荚期灌水后测定土壤呼吸速率,以研究水分对土壤呼吸昼夜变化的影响。结果表明在大豆不同生长期中,土壤呼吸均具有明显的昼夜变化规律,且均呈单峰曲线型,峰值出现在 12:00 到 16:00 之间。6:00~18:00 的 CO₂ 排放占总排放的 61%~69%,昼夜平均土壤呼吸速率最接近于 18:00~21:00 之间的速率。如果忽略大豆生长对土壤有机质分解的激发效应,大豆根际呼吸占总土壤呼吸的 85%~96%。裸土土壤呼吸与温度呈极显著的指数和线性相关,种大豆的土壤呼吸与温度的关系因生长期而异,鼓粒期的相关性最好,结荚期最差。这些都说明大豆生长和生长阶段影响土壤呼吸及其与温度的关系。灌水后使大豆土壤呼吸昼夜变化增强,平均土壤呼吸速率增大。由此可见植物生长时期、温度和水分是影响土壤呼吸昼夜变化的主要因素。

关键词:大豆;土壤呼吸;生长时期;昼夜变化;温度;灌水

Diurnal variation of soil respiration in soil-potted with soybean (*Glycine max* L.) at various growth stages and its affecting factors

YANG Lan-Fang^{1,2}, CAI Zu-Cong¹ (1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. College of Resource and Environment, Hubei University, Wuhan 430062, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2955~2960.

Abstract: The diurnal variation of soil respiration at various growth stages of soybean and the influencing factors are investigated with static dark chamber method and gas chromatograph technique in pot experiment. In the flowering, pod, and grain-filling stage, soil respiration rate was measured consecutively 3 day-nights at 2 hours interval in daytime (6:00~18:00) and 3 hours interval in night (18:00~6:00). In the course of sampling, the temperature in air, on surface, and at 5 cm depth soil were recorded. The soil respiration rate was also determined one day-night at three hours interval after watering in the pod stage. Results showed that there was a substantial diurnal variation of soil respiration rate with a single peaked rate occurring from 12:00 to 16:00 in soybean-planted soil. The maximum soil respiration rate and the averaged rate in soybean-planted treatment were higher in pod and grain-filling stage than in flowering stage. The cumulative CO₂ emission during daytime accounted up 61%~69% of total emission over a day-night. The daily average of soil respiration rate was most close to the rate between 18:00 and 21:00. Rhizosphere respiration made up 85%~96% of soil respiration if the priming effect of soybean growth on decomposition of native soil organic matter were neglected. In the bare soil, the soil respiration rate was significantly correlated with temperatures exponentially, but in soybean-planted treatment, the relationships were poor and depending on growth stages. The correlation was most significant in grain-filling plumping stage and lowest in pod stage, and more significant with temperature on surface and at 5cm depth soil than with air temperature. The results suggested that the

基金项目:国家杰出青年基金资助项目(40125004);中国科学院知识创新工程重大资助项目(KZCX1-SW-01-05)

收稿日期:2003-08-13; **修订日期:**2004-06-10

作者简介:杨兰芳(1964~),男,土家族,湖北来凤人,博士生,讲师,主要从事土壤圈物质循环与全球变化关系研究。E-mail: lfyang@issas.ac.cn; lfyang2003@hotmail.com.

Foundation item: National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (No. 40125004); Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX-SW-01-05)

Received date: 2003-08-13; **Accepted date:** 2004-06-10

Biography: YANG Lan-Fang, Ph. D. candidat, mainly engaged in relationship between material cycling in pedosphere and global change.

soybean growth as well as growth stage influenced soil respiration rate and the relationship with temperatures. Watering affected the magnitude and intensity of soil respiration rate and enhanced the diurnal variation of soil respiration. All the results indicated that soybean growth and growth stages, temperatures, and watering are important factors affecting soil respiration rate and its diurnal cycle.

Key words:soybean; soil respiration; growing stage; diurnal variation; temperature; watering

文章编号:1000-0933(2004)12-2955-06 中图分类号:S152.6 文献标识码:A

二氧化碳对整个温室效应的贡献大约为 60%^[1]。土壤呼吸是陆地植物固定的 CO₂ 返回到大气的主要途径,估计每年达 75 Pg C^[2],几乎占大气 CO₂ 总量的 10%,是化石燃料燃烧释放 CO₂ 的 10 倍多^[3]。所以全球土壤呼吸在数量上的微小变化将对大气 CO₂ 浓度产生巨大影响^[4]。土壤呼吸具有高度的时间和空间变异性^[5],研究表明土壤呼吸具有明显的昼夜变化^[6,7]。但是大豆不同生长期土壤呼吸昼夜变化的研究尚未见报道。本试验测定了盆栽条件下大豆不同生长期土壤呼吸的昼夜变化,分析了土壤呼吸昼夜变化的主要影响因素。目的在于认识大豆的土壤呼吸昼夜变化以及大豆生长阶段、温度和灌水对土壤呼吸昼夜变化的影响。

1 材料与方法

1.1 材料

试验用土壤由第四纪下蜀黄土母质发育,在系统分类中为淋溶土,发生分类中为黄褐土。有机碳含量为 10.56 g/kg,全氮为 0.95 g/kg,pH 为 7.50,质地为重壤土。供试植物为大豆(拉丁名为 *Glycine max* L.),品种为南农 99-10,由南京农业大学农学院提供。

1.2 方法

1.2.1 盆栽实验 为了便于采样,专门用 PVC 材料设计了培养盆。培养盆主体为圆柱形,高 20 cm,内径 15 cm,外缘装有边长 25 cm,高 5 cm 的正方形水槽。盆口中央安装有 1 根长 6 cm 的 PVC 管,管子插入土中 3.5 cm,伸出培养盆上沿 2.5 cm。每个培养盆配套一个采样箱,采样箱为长 20.5 cm,宽 20.5 cm,高 6 cm,其上开有采样孔,采样孔装有硅橡胶密封塞,箱子中央开有圆孔,圆孔的大小正好能套在 PVC 隔离管外。每盆装过 5 mm 筛的风干土 3.75kg。每 kg 土施用 (NH₄)₂SO₄ 0.236 g, KH₂PO₄ 0.439 g 作底肥。每盆播种大豆 2 颗于管中约 3 cm 深的土壤中,出苗后每盆保留长势一致的大豆苗 1 株。设置种植大豆和裸土 2 个处理,每处理重复 3 次。

1.2.2 采样 分别在大豆的开花期(出苗后 54d)、结荚期(出苗后 80d)、鼓粒期(出苗后 101d)进行连续 3 个昼夜的采样分析。白天每隔 2h,晚上每隔 3h 采样一次。采样时先测定气温、土表温度和 5 cm 土壤的温度,然后将采样箱套在 PVC 隔离管外并放入水槽中,水槽中加水密封采样箱的底边,采样箱与 PVC 隔离管的交接处用硅胶密封。分别在密封后 0、10、20min 时通过固定于采样箱上的硅橡胶塞用注射器抽取 20ml 气体注入 18 ml 的真空玻璃小瓶中。每次采样后立即刮去密封硅胶,将盖子提起,交错放置于水槽口上,以便进行正常的气体交换。

1.2.3 样品分析 用气相色谱测定 CO₂ 含量。气相色谱的检测器为热传导检测器,炉温、柱温和检测器温度分别为 60、100 和 60°C,载气为高纯氢,流量为 80 ml/min,进样量为 1 ml。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸的昼夜变化规律

大豆开花期采样从 2002 年 8 月 19 日(出苗后的 54d)早上 8:00 开始,到 22 日早上 8:00 结束;结荚期采样从 2002 年 9 月 12 日(出苗后的 80d)18:00 开始,到 9 月 15 日 18:00 结束;鼓粒期采样从 2002 年 10 月 3 日(出苗后的 101d)12:00 开始到 10 月 6 日 12:00 结束。大豆生长正常,各重复之间一致性较好。3 个生长时期,种植大豆土壤呼吸速率的昼夜变化见图 1,裸土相应时期的土壤呼吸速率昼夜变化见图 2。

图 1 可见,大豆开花期、结荚期和鼓粒期的土壤呼吸速率均具有明显的昼夜变化且呈单峰曲线,峰值出现在 12:00 到 16:00 之间,最小土壤呼吸速率多出现在 3:00 到 8:00 之间。大豆不同生长期的最大土壤呼吸速率不同,表现为结荚期(1.88 g C/(m² · h))>鼓粒期(1.54 g C/(m² · h))>开花期(0.86 g C/(m² · h))。

裸土土壤呼吸速率昼夜变化幅度较小,且不同时期的变化不尽相同(图 2)。在开花期,相应裸土的土壤呼吸昼夜变化幅度最大,鼓粒期次之,结荚期最小。裸土在大豆开花期的土壤呼吸峰值出现在 12:00 到 16:00 之间,最小值在 0:00 到 3:00 之间;鼓粒期分别为 12:00 到 16:00 和 3:00 到 6:00 之间;大豆结荚期,相应的裸土土壤呼吸速率的昼夜变化不明显。

在所测定的 3 个生长期中,裸土的土壤呼吸以开花期最大,结荚期和鼓粒期昼夜平均土壤呼吸速率几乎相等。但种植大豆的土壤呼吸随生长期的变化与裸土不同,以鼓粒期的平均土壤呼吸速率最大,开花期最小(表 1)。无论是裸土还是种植大豆的

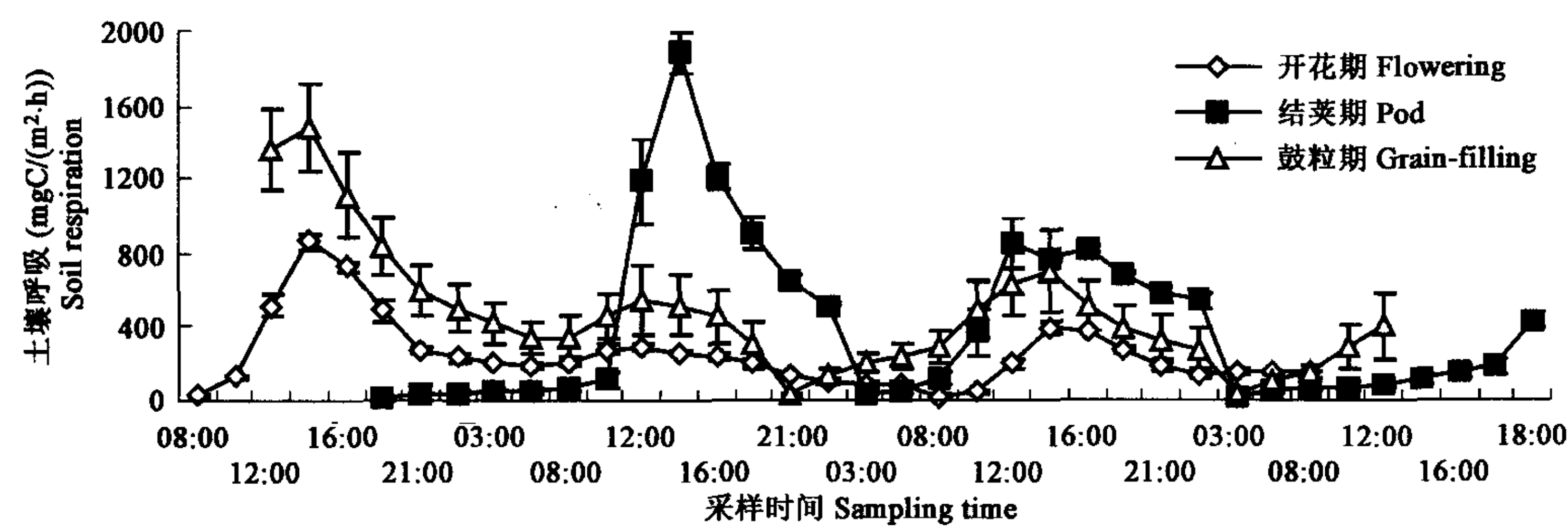


图 1 大豆不同生长期土壤呼吸昼夜变化规律

Fig. 1 Diurnal variation of soil respiration rate in the soybean-planted soil in various growing stages of soybean

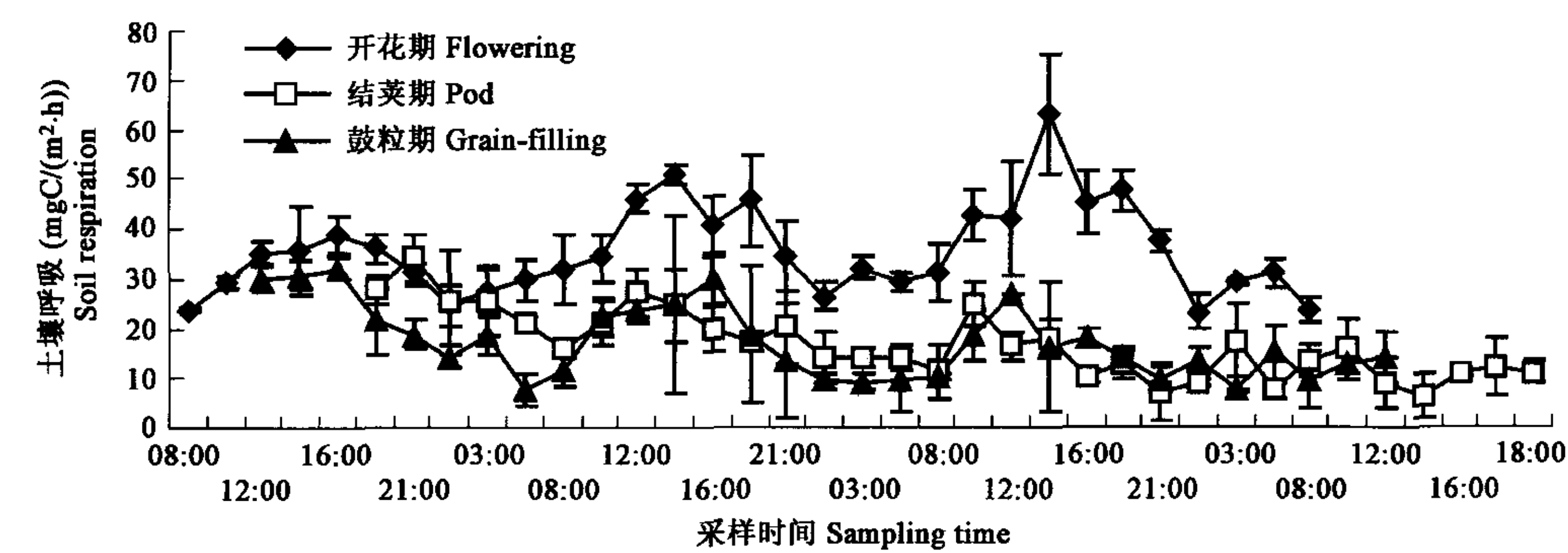


图 2 裸土不同时期土壤呼吸的昼夜变化规律

Fig. 2 Diurnal variation of soil respiration rate in the bare soil in various growth stages of soybean

土壤,也无论是开花期、结荚期还是鼓粒期,土壤呼吸速率的昼夜平均值均与 18:00~21:00 之间的呼吸速率十分接近,两者统计上无显著差异。

表 2 结果表明,种植大豆显著改变了白天(6:00~18:00)土壤呼吸速率与夜间(18:00~6:00)土壤呼吸速率的比值。种植大豆的土壤白天土壤呼吸占全天总呼吸量的 61%~68%,而且从开花到鼓粒期呈增加趋势。未种大豆的裸土,这一比例为 48%~61%,在不同的生长期没有明显的规律性。

2.2 温度对土壤呼吸的影响

本实验在测定土壤呼吸的同时测定了气温、土壤表面温度和 5cm 土壤温度,并计算了温度与土壤呼吸速率之间的指数和线性相关系数,见表 3。

无论是在开花期、结荚期还是鼓粒期,也无论是气温、土壤表面温度还是 5cm 处土壤温度,裸土的土壤呼吸速率均与温度呈极显著的指数和线性相关,线性相关系数略高于指数相关系数。 Q_{10} 是指温度每增加 10℃土壤呼吸所增加的倍数,通过指数关系 $R=ae^{kT}$,可以得到 $Q_{10}=e^{10k}$ (R 是土壤呼吸速率, T 是温度, a 和 k 是回归系数), Q_{10} 可用于表示温度对土壤呼吸的影响效应^[8,9]。本试验下,裸土的 Q_{10} 值在 1.55 到 4.25 之间,且呈结荚期>鼓粒期>开花期的趋势,说明大豆不同生长期土壤呼吸速率对温度变化的反应不同。将 3 个时期测定的数据置于同一体系中,裸土的土壤呼吸速率与气温、土壤表面温度和 5cm 土温也均呈极显著的指数和线性相关,指数相关系数和线性相关系数十分接近,而 Q_{10} 在 2.4~2.9 之间(表 3)。

与裸土比较,种植大豆处理的土壤呼吸速率与温度的相关性相对较差,土壤呼吸速率与温度的相关系数均小于相应裸土下的相关系数。种植大豆的土壤呼吸速率与温度的指数相关系数为鼓粒期>开花期>结荚期;3 个时期的综合相关系数表现为 5cm>表土>气温,指数>线性。鼓粒期土壤呼吸速率与气温、表土温度及 5cm 处土温度的相关性表现为极显著,开花期只有表土和 5cm 处土温为极显著,而结荚期土壤呼吸与 3 种温度的指数相关性均不显著。根据指数关系计算的 Q_{10} 值在 1.8~5.0

表 1 土壤呼吸昼夜平均速率与 18:00~21:00 呼吸速率

Table 1 The daily averaged soil respiration rate and the rate at 18:00~21:00

生长时期 Growth stage	土壤呼吸速率 Soil respiration rate (mg C/(m²·h))			
	裸土 Bare soil		种植大豆土壤 Soybean-planted soil	
	18:00~21:00	昼夜平均 Mean	18:00~21:00	昼夜平均 Mean
开花期 Flowering	38.5±3.1	35.0±1.4	258±14	237±8
结荚期 Pod	17.7±2.0	16.7±2.4	420±19	384±13
鼓粒期 Grain-filling	16.2±3.5	16.2±1.0	386±100	427±110

之间。

表 2 土壤呼吸速率的昼(6:00~18:00)夜(18:00~6:00)差异

Table 2 The difference in soil respiration rate at day time and night time					
时期 Stage	处理 Treatment	速率 Rate (mg C/(m ² · h))		分配 Distribution(%)	
		白天 Day	夜间 Night	白天 Day	夜间 Night
开花期 Flowering	裸土 Bare	38.8±2.8	31.1±0.8	55.5±2.0	44.5±2.0
	大豆 Planted	292±7	182±9	61.6±0.7	38.4±0.7
结荚期 Pod	裸土 Bare	16.2±1.4	17.3±3.5	48.6±2.9	51.4±2.9
	大豆 Planted	492±28	276±12	64.0±2.0	36.0±2.0
鼓粒期 Grain filling	裸土 Bare	20.0±2.7	12.5±0.9	61.4±4.9	37.6±4.9
	大豆 Planted	577±146	277±73	67.7±0.8	32.4±0.8

表 3 土壤呼吸速率与温度的关系

Table 3 The relationships between soil respiration rate and temperature							
时期 Stage	温度 Temperature	裸土 Bare soil			种植大豆 Soybean planted		
		相关系数 Correlation coefficient		Q ₁₀	相关系数 Correlation coefficient		Q ₁₀
		指数 Exponential	线性 linear		相关系数 coefficient	线性 linear	
开花期 Flowering	空气 Air	0.677**	0.697**	1.55	0.275	0.372*	1.80
	表土 Surface	0.699**	0.708**	1.69	0.547**	0.523**	4.69
	5 cm	0.763**	0.770**	1.76	0.65**	0.604**	4.85
结荚期 Pod	空气 Air	0.752**	0.758**	3.08	0.194	0.444*	3.12
	表土 Surface	0.784**	0.811**	4.25	0.186	0.443*	2.46
	5 cm	0.737**	0.747**	3.14	0.233	0.494**	2.69
鼓粒期 Grain filling	空气 Air	0.802**	0.801**	2.40	0.624**	0.642**	4.36
	表土 Surface	0.851**	0.856**	2.60	0.643**	0.708**	5.00
	5 cm	0.823**	0.832**	2.38	0.611**	0.694**	4.08
综合相关系数 Total coefficient	空气 Air	0.789**	0.797**	2.46	0.263*	0.237	1.86
	表土 Surface	0.814**	0.818**	2.86	0.317*	0.294*	2.47
	5 cm	0.806**	0.809**	2.71	0.362**	0.337**	2.58

2.3 灌水对昼夜变化的影响

本实验还测定了结荚期一次灌水后一昼夜的土壤呼吸测定,结果如图 3。与不灌水相比,灌水以后(17:00 取样后立即灌水),土壤呼吸速率急剧下降,3h 后处于比较稳定的水平,直到第 2 天早上 8:00(灌水后 12h)急剧上升,到 14:00 达到最大值,然后又下降,而不灌水的土壤呼吸速率变化幅度小。灌水后一昼夜的土壤呼吸总量和最大土壤呼吸速率均显著高于不灌水的处理,灌水处理的最高土壤呼吸速率近 2 倍于不灌水处理。由此可以说明灌水后土壤呼吸速率的变化幅度增加,昼夜变化更加明显,而不灌水处理由于水分胁迫使得其昼夜变化减弱。

3 讨论

本实验结果表明,种植大豆的土壤,其土壤呼吸速率具有明显的昼夜变化,均表现出单峰型,最大呼吸速率出现于 12:00 到 16:00 之间,白天土壤呼吸量显著大于夜间,白天释放的碳占昼夜总释放碳的 61%~69%。张金霞等^[10]发现草毡寒冻维形土的 CO₂ 释放速率有明显的日变化,最大排放速率多出现在 14:00~16:00,最小排放速率在 6:00~8:00,白天的 CO₂ 排放大于夜晚;贾金生等^[11]研究表明,玉米生长盛期土壤 CO₂ 为单峰型,峰值出现在 12:00~16:00,白天排放量占总排放量的 58%~64%;Ben-Asher 等^[7]发现土壤 CO₂ 排放具有明显的日变化,峰值接近太阳正午和最大太阳辐射;Bajracharya^[6]等的研究表明土壤 CO₂ 排放的日变化峰值在春季、夏季和秋季出现在 3:00 左右。这些结果都与本试验相一致。但是李明峰等^[12]发现干旱半干旱羊草群落土壤呼吸昼夜变化中有两个峰值,一个在 7:00~8:00,另一个与最高温度一致,他们认为第一个峰值是日出前后露水的大量形成造成的。本试验还发现在大豆不同生长期,18:00 到 21:00 之间的土壤呼吸速率均与昼夜平均土壤呼吸速率无统计上的显著差别(表 1)。因此,当受条件限制,不能进行昼夜连续测定时,选择该时段测定土壤呼吸速率可以较准确地反映土壤呼吸量。本试验中裸土土壤呼吸的日变化没有种植大豆的土壤明显,主要

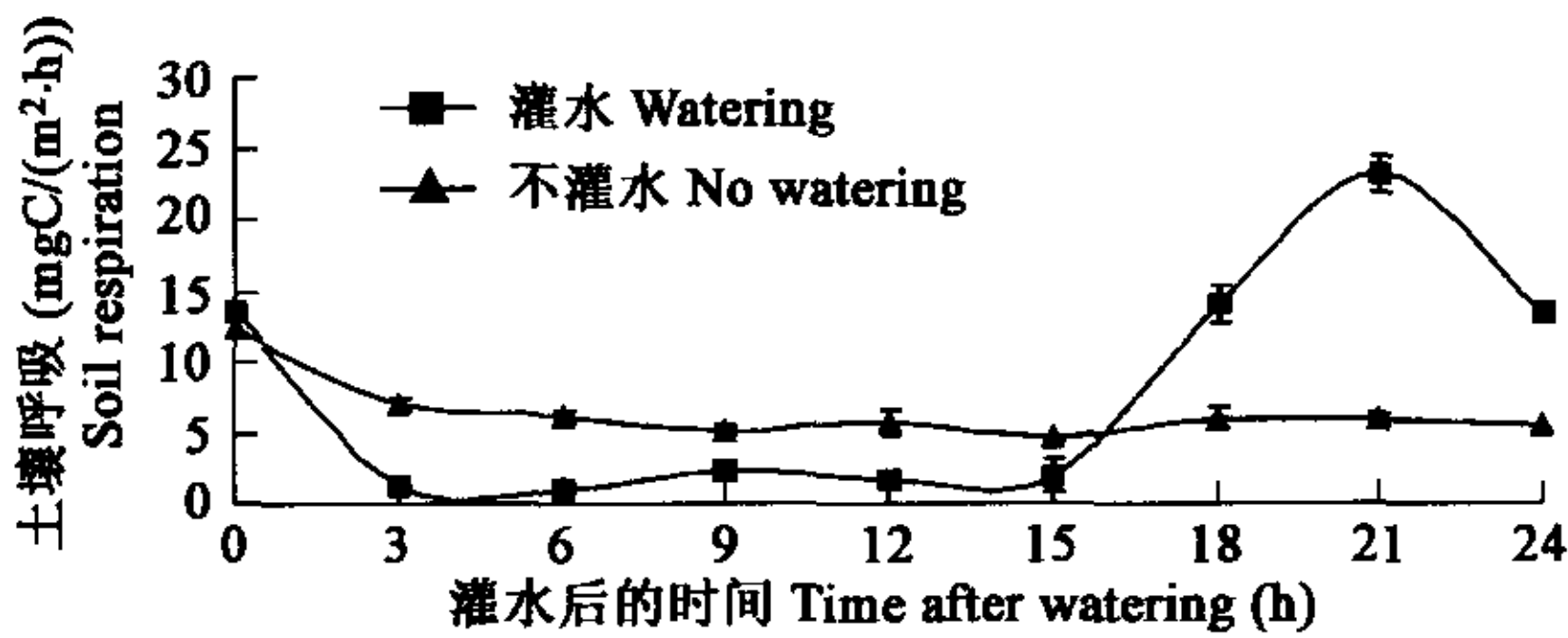


图 3 灌水对大豆土壤呼吸的影响

Fig. 3 The effect of irrigation on soil respiration in the soybean-planted treatment

原因可能是土壤有机质含量偏低(10.45 g C/kg)。有机质低,土壤呼吸速率低,从而日变化幅度就小。Lohila 等^[13]发现泥炭土的土壤呼吸是矿质土的 3 倍多,原因是因为 20 cm 土壤中有机碳含量(24 g C/kg)是相应矿质土的 4 倍多。

种植大豆极显著地提高土壤呼吸速率和昼夜土壤呼吸速率差异,在所测定的 3 个时期,种植大豆的昼夜平均土壤呼吸速率是裸土的 6.8~26.4 倍,说明在植物生长期,土壤呼吸主要受植物生长控制。土壤呼吸主要包括根系呼吸、微生物分解根系来源物质和微生物分解土壤有机质^[4,14],前两部分合称为根际呼吸。根际呼吸占土壤呼吸的 60%以上^[4]。相当部分光合产物被根际呼吸消耗掉,例如在玉米生长期的大部分时间,根际呼吸的消耗相当于作物净光合产物 18%~25%和净二氧化碳同化产物的 24%~35%的碳^[15],小麦根际呼吸消耗 30%的总净光合产物^[16]。根系呼吸以及微生物分解根系来源物质与植物生长密切联系,植物为根系呼吸提供光合产物,而根系通过呼吸为植物提供吸收养分和水分所需要的能量。用¹⁴C 标记技术表明,在耕地作物系统根际分泌物和脱落物占总净同化产物的 10%~40%^[17]。他们大多为易分解物,有利于微生物呼吸。植物不同生长期光合能力和对养分的需求不同,根系活力也不一样,根系呼吸和由根系释放到土壤中的有机物也就不同,从而导致不同生长期土壤呼吸速率的差异。如果忽略植物生长对土壤有机质分解的激发效应,那么种大豆的土壤呼吸减去裸土的土壤呼吸即为大豆的根际呼吸。由表 1 的土壤呼吸速率可以计算出大豆根际呼吸占土壤呼吸的 85%~96%。已有的报道结果表明,根际呼吸在土壤呼吸中的比例变化范围很宽,对于谷物和草来说,从 51%到 89%^[13],Fu 等^[4]利用 C3 土壤种 C4 植物,C4 土壤种 C3 植物的盆栽实验表明,整个实验期间累计根际呼吸占总土壤呼吸的 61%~82%。与这些结果相比较,大豆根际呼吸占土壤呼吸的比例偏高。这一结果表明,作为共生固氮植物,大豆可能需要消耗比非共生固氮植物更多的光合产物以固定大气氮。研究表明,每固定 1mg N 需要呼吸消耗 4~7mg C^[18]。另外土壤有机质含量较低,来源于土壤有机质的呼吸所占比例小也是造成本试验中根际呼吸比例偏大的原因。

温度一方面影响土壤微生物的活性,另一方面也影响根系的生长与活性,土壤呼吸对温度的反应则是这两种活性对温度反应的综合表现。土壤中绝大多数微生物最适生长温度在 25~40℃,当温度过低或过高时,微生物停止生长或死亡^[19]。在一定范围内根系活性随温度升高而增加,但温度过高降低根系活性;适当的低温促进根系生长,适当高温促进地上部分生长^[20]。常用于模拟土壤呼吸速率与温度的关系式主要有指数、线性、幂函数等形式^[21]。由于用指数形式表达可以计算温度效应,所以以指数形式表达的较多^[22,8]。本实验结果表明指数和线性都能较好地反映裸土土壤呼吸速率与温度的关系。但是,种植大豆的土壤呼吸速率与温度的相关性比裸土差,相关系数较小,鼓粒期和结荚期的线性相关系数明显大于指数相关系数,而 3 个时期的综合相关系数则是指数大于线性(表 3)。种植作物的土壤中,土壤呼吸以根际呼吸为主,而根际呼吸除了受环境因素影响外,还受植物本身生长规律的控制,同时根系影响土壤微生物的活性^[23]。因此,种植大豆的土壤呼吸速率与温度的相关性相对较差(表 3),这也说明植物生长不仅影响土壤呼吸的数量,也会影响土壤呼吸与温度的相互关系。

水分也是影响土壤呼吸的重要因素之一。在持水量范围内,土壤呼吸和水分含量呈正相关关系,而大多数情况下是温度与水分两者相结合对土壤呼吸产生影响^[24]。Keith^[25]等认为土壤温度、湿度可以解释土壤呼吸变异的 97%。Hall 等^[26]对向日葵的研究表明,在鼓粒期水分胁迫减少根系呼吸。Orchard 和 Cook^[27]研究表明,土壤呼吸与土壤水势呈指数(对数线性)关系,重新湿润土壤可迅速而大量地增加呼吸速率。本实验结果表明,灌水后一定时间,土壤呼吸速率下降,这可能与灌水迫使土壤积累的 CO₂ 释放,降低土壤 CO₂ 浓度有关。但 8:00 后,随着光合作用的增强,土壤呼吸速率急剧增加,在测定的一昼夜中,土壤呼吸速率和最大速率均显著高于不灌水的处理。表明较高的土壤水分有利于土壤呼吸。本试验在每次进行土壤呼吸昼夜变化测定之前,都进行了灌水。结荚期在 16:00 以后灌水,土壤呼吸速率至次日 8:00 仅微小的增加,但随后则急剧增加,说明夜间大豆不进行光合作用时,土壤呼吸较弱。由于强烈的蒸腾作用,土壤水分随着时间而迅速下降,因而在连续 3 昼夜的测定中都表现中第 1 昼夜的土壤呼吸大于第 2 和第 3 昼夜的结果(图 1)。

References:

- [1] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect. *Science*, 1990, **248**: 1217~1219.
- [2] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 7~20.
- [3] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: Correlation and controls. *Biogeochemistry*, **48**: 71~90.
- [4] Shenglei F, Weixin C and Susfalk R. Rhizosphere respiration varies with plant species and phenology: a greenhouse pot experiment. *Plant and Soil*, 2002, **239**: 133~140.
- [5] Rochette, Desjardins R L and Pattery E. Spatial and temporal variability of soil respiration in agricultural fields. *Can. J. Soil Sci.*, 1991, **71**: 189~196.
- [6] Bajracharya R M, Lal R and Kinble J M. Diurnal and seasonal CO₂-C flux from soil as related to erosion phases in central Ohio. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, **64**: 286~293.
- [7] Ben-Asher J, Cardon G E, Peters D, et al. Determining root activity distribution by measuring surface carbon dioxide fluxes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, **58**: 926~930.

- [8] Chen Q S, Li L H, Han X G, *et al.* Influence of temperature and soil moisture on soil respiration of a degraded steppe community in the Xilin River Basin of Inner Mongolia. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2003, **27**(2): 202~209.
- [9] Bekku Y S, Nakatsubo T, Kume A, *et al.* Effect of warming on the temperature dependence of soil, respiration rate in arctic, temperate and tropical soils. *Applied Soil Ecology*, 2003 **22**, 250~220.
- [10] Zhang J X, Cao G M, Zhou D W, *et al.* Carbon dioxide emission of Mat cryo-sod soil in the Haibei alpine meadow ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(4): 544~549.
- [11] Jia J H, Li J and Zhang Y Q. Study on CO₂ emission from soil of farmland in North China Plain. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003 **11**(3): 1~4.
- [12] Li M F, Dong Y S, Qi Y C, *et al.* The analysis of Diurnal variation of CO₂ flux in *Leymus chinensis* Grassland of Xilin River Basin. *Grassland of China*, 2003 **25**(3): 9~14.
- [13] Lohila A, Aurela M, Regina K, *et al.* Soil and total ecosystem respiration in agricultural fields: Effect of soil and crop type. *Plant and Soil*, 2003, **251**: 303~317.
- [14] Domanski G, Kuzyakov Y, Siniakina S V, *et al.* Carbon flows in the rhizosphere of ryegrass (*Lolium perenne*). *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2001, **164**: 381~387.
- [15] Rochette P and Flanagan L B. Quantifying rhizosphere respiration in a corn crop under field conditions. *Soil Sci. Socl Am. J.*, 1997, **61**: 466~474.
- [16] Weixin C, Coleman D C, Carroll C R, *et al.* In stiu measurement of root respiration and soluble C concentrations in the rhizosphere. *Soil Biol. Biochem.*, 1993, **25** (9): 1189~1196.
- [17] Cheng W, Coleman D C, Carroll C R, *et al.* Investigating short-term flows in the rhizospheres of different plant species using isotopic trapping. *Agronomy Journal*, 1994, **86**: 782~788.
- [18] Warembourg F R and Roumet C. Why and how to estimate the cost of symbiotic N₂ fixation? A progressive approach based on the use of ¹⁴C and ¹⁵N isotopes. *Plant and Soil*, 1989, **115**: 176~177.
- [19] Huang C Y. *Soil Science*. Beijing: Chinese Agriculture Press, 200.
- [20] Peng K M and Pei B Y. *Agricultural Chemistry*. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1980.
- [21] Liu S H and Fang J Y. Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, **17**(5): 469~476.
- [22] Alvarez R. and Alvarez C. R., Temperature regulation of soil carbon dioxide production in the Humid Pampa od Aregentina; estimation of carbon fluxes under climate change, *Biol. Fertil. Soils*, 2001, **34**: 282~285.
- [23] Kuzyakov Y. Review; Factors affecting rhizosphere priming effects, *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2002, **5**: 382~396.
- [24] Li L H and Chen Z Z. Soil respiration in grassland communities in the world. *Chinese Journal of Ecology*, 1998, **17**(4): 45~51.
- [25] Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorous availability, temperature and moisture on soil respiration in Eucalyptus pauciflora forest. *Plant and soil*, 1997, **190**(1): 127~141.
- [26] Hall A J, Connnor D J and Whitfileld D M, Root respiration during grain filling in sunflower; The effect of water stress. *Plant and Soil*, 1990, **121**: 57~66.
- [27] Orchard V A and Cook F J. Relationship between soil respiration and soil moisture. *Soil Biology and Biochemistry*, 1983, **15**(4): 447~453.

参考文献:

- [8] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水热条件对锡河流域典型草原退化群落土壤呼吸的影响, 植物生态学报, 2003, **27**(2): 202~209.
- [10] 张金霞, 曹广民, 周党卫, 等. 草毡寒冬锥形土 CO₂ 释放特征. 生态学报, 2001, **21**(4): 544~549.
- [11] 贾金生, 李俊, 张永强, 夏玉米生长盛期农田土壤 CO₂ 排放的研究, 中国生态农业学报, 2003, **11**(3): 1~4.
- [12] 李明峰, 董云社, 齐玉春, 等. 锡林河流域羊草群落初级 CO₂ 排放日变化特征分析. 中国草地, 2003, **25** (3): 9~14.
- [19] 黄昌勇主编, 土壤学, 北京: 中国农业出版社, 200.
- [20] 彭克明, 裴保义主编, 农业化学, 北京, 农业出版社, 1980.
- [21] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响. 生态学报, 1997, **17**(5): 469~476.
- [24] 李凌浩, 陈佐忠. 草地群落的土壤呼吸. 生态学杂志, 1998, **37**(4): 45~51.