

中国百种杰出学术期刊  
中国精品科技期刊  
中国科协优秀期刊  
中国科学院优秀科技期刊  
新中国 60 年有影响力的期刊  
国家期刊奖

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica

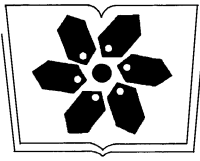
(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 21 期  
Vol.30 No.21  
**2010**



中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 30 卷 第 21 期 2010 年 11 月 (半月刊)

## 目 次

棉铃虫幼虫对人类呈味物质的取食反应.....	李为争,付国需,王英慧,等 (5709)
西藏拉萨机场周边风沙源空间分布及演变趋势.....	李海东,沈渭寿,邹长新,等 (5716)
新疆沙湾冷泉沉积物的细菌系统发育多样性.....	曾 军,杨红梅,徐建华,等 (5728)
应用鱼类完整性评价体系评价辽河流域健康.....	裴雪姣,牛翠娟,高 欣,等 (5736)
不同海拔天山云杉叶功能性状及其与土壤因子的关系.....	张慧文,马剑英,孙 伟,等 (5747)
滨河湿地不同植被对农业非点源氮污染的控制效果.....	徐华山,赵同谦,贺玉晓,等 (5759)
内蒙古温带荒漠草原能量平衡特征及其驱动因子.....	阳伏林,周广胜 (5769)
南北样带温带区栎属树种功能性状对气象因子的响应.....	冯秋红,史作民,董莉莉,等 (5781)
伏牛山自然保护区物种多样性分布格局.....	卢训令,胡 楠,丁圣彦,等 (5790)
减弱 UV-B 辐射对烟草形态、光合及生理生化特性的影响 .....	陈宗瑜,钟 楚,王 毅,等 (5799)
川西亚高山针阔混交林乔木层生物量、生产力随海拔梯度的变化 .....	刘彦春,张远东,刘世荣,等 (5810)
三峡库区消落带水淹初期地上植被与土壤种子库的关系.....	王晓荣,程瑞梅,肖文发,等 (5821)
洞庭湖西岸区防护林土壤和植物营养元素含量特征.....	柏方敏,田大伦,方 晰,等 (5832)
择伐对阔叶红松林主要树种径向与纵向生长的影响.....	蒋子涵,金光泽 (5843)
野鸭湖典型湿地植物光谱特征.....	刘 克,赵文吉,郭逍宇,等 (5853)
三种线性模型在杉木与马尾松地位指数相关关系研究中的比较.....	朱光玉,吕 勇,林 辉,等 (5862)
不同干扰类型下羊草种群的空间格局.....	陈宝瑞,杨桂霞,张宏斌,等 (5868)
基于 SWAT 模型的祁连山区最佳水源涵养植被模式研究——以石羊河上游杂木河流域为例 .....	王军德,李元红,李赞堂,等 (5875)
2D 与 3D 景观指数测定山区植被景观格局变化对比分析 .....	张志明,罗亲普,王文礼,等 (5886)
基于投影寻踪的珠江三角洲景观生态安全评价 .....	高 杨,黄华梅,吴志峰 (5894)
海峡两岸 16 个沿海城市生态系统功能比较 .....	张小飞,王如松,李 锋,等 (5904)
同安湾围(填)海生态系统服务损害的货币化预测评估 .....	王 萱,陈伟琪,张璐平,等 (5914)
太阳辐射对玉米农田土壤呼吸作用的影响 .....	孙敬松,周广胜,韩广轩 (5925)
水分胁迫下 AM 真菌对沙打旺生长和抗旱性的影响.....	郭辉娟,贺学礼 (5933)
宁夏南部旱区坡地不同粮草带比间作种植模式比较.....	路海东,贾志宽,杨宝平,等 (5941)
节节草生长对铜尾矿砂重金属形态转化和土壤酶活性的影响.....	李 影,陈明林 (5949)
自然植物群落形成过程中铜尾矿废弃地氮素组分的变化 .....	安宗胜,詹 婧,孙庆业 (5958)
硅介导的水稻对二化螟幼虫钻蛀行为的影响 .....	韩永强,刘 川,侯茂林 (5967)
饥饿对转基因鲤与野生鲤生长竞争和性腺发育的影响.....	刘春雷,常玉梅,梁利群,等 (5975)
<b>专论与综述</b>	
河流水质的景观组分阈值研究进展 .....	刘珍环,李 猷,彭 建 (5983)
<b>研究简报</b>	
长期模拟增温对岷江冷杉幼苗生长与生物量分配的影响 .....	杨 兵,王进闯,张远彬 (5994)
环境因素对长额斗蟋翅型分化的影响 .....	曾 杨,朱道弘,赵吕权 (6001)

# 太阳辐射对玉米农田土壤呼吸作用的影响

孙敬松<sup>1,3</sup>, 周广胜<sup>2,1,\*</sup>, 韩广轩<sup>1</sup>

(1. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093;  
2. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 水热因子通常被认为是影响土壤呼吸作用的主导因子。对 2004—2005 年东北地区玉米农田土壤呼吸作用的观测资料分析表明: 太阳辐射对土壤呼吸作用有促进作用, 使得白天的土壤呼吸速率高于夜间, 并导致土壤呼吸作用与土壤温度的关系发生变化。太阳总辐射对玉米 (*Zea mays* L.) 生长后期的土壤呼吸作用具有显著影响 (9 月 7 日:  $R^2 = 0.80$ ,  $P < 0.0001$ ; 9 月 29 日:  $R^2 = 0.82$ ,  $P < 0.0001$ )。地上生物量和叶面积指数制约着太阳总辐射对土壤呼吸作用的贡献, 可解释太阳总辐射与土壤呼吸作用关系变异的 83.5%。在玉米生长初期, 散射辐射间接地促进了土壤呼吸作用, 但随着叶面积指数的增加, 散射辐射的透射作用减弱, 使得直射辐射对土壤呼吸作用的影响超过散射辐射; 进入玉米生长后期, 由于叶子枯黄, 叶面积指数减小, 散射辐射又对土壤呼吸起到促进作用。

**关键词:** 土壤呼吸; 太阳辐射; 散射辐射; 土壤温度; 生物因子; 玉米

## Effects of solar radiation on soil respiration of a maize ecosystem

SUN Jingsong<sup>1,3</sup>, ZHOU Guangsheng<sup>2,1,\*</sup>, HAN Guangxuan<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Soil moisture and temperature are often regarded as main controlling factors of soil respiration. This paper analyzed different responses of soil respiration to solar radiation during daytime and nighttime, based on the observing data of soil respiration and its corresponding environmental factors in a maize ecosystem during growing seasons in 2004 and 2005. The results indicated that total solar radiation could enhance soil respiration. Solar radiation enhanced leaf photosynthesis of maize (*Zea mays* L.) during daytime, which lead to more photosynthetic product being carried to roots so as to promote soil respiration indirectly, and finally resulted in higher soil respiration rates during daytime than nighttime under the same temperature. Thus, solar radiation could induce the change of the relationship between soil respiration and soil temperature. There was significant exponential relationship between soil respiration rate and 5cm soil temperature during nighttime, but at late growth stage, the exponential relationship between soil respiration and soil temperature was not obvious during daytime. During daytime, soil respiration enhanced with 5cm soil temperature increasing, but to a certain extent, soil respiration decreased with 5cm soil temperature increasing. Total solar radiation had significant effect on soil respiration at late growth stage (September 7<sup>th</sup>:  $R^2 = 0.80$ ,  $P < 0.0001$ ; September 29<sup>th</sup>:  $R^2 = 0.82$ ,  $P < 0.0001$ ). Further studies showed that aboveground biomass and leaf area index controlled the effects of soil temperature on soil respiration of the maize ecosystem, and these could explain about 83.5% of the variation of the relationship between soil temperature and soil respiration. The effects of solar radiation on soil respiration were different with the seasonal variations of biomass and leaf area index (LAI). The increase of biomass could strengthen the indirect effects of solar radiation on soil respiration, but with the increase of biomass and LAI increased to a certain level, leaves of the maize ecosystem would

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30770413, 40625015); 国家重点基础研究发展规划项目 (973 计划) (2006CB400502)

收稿日期: 2009-10-14; 修订日期: 2010-02-02

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gszhou@ibcas.ac.cn

shelter solar radiation from inner maize canopy, and decreased the whole community photosynthesis, which could indirectly reduce soil respiration. The increments of biomass were helpful to improve the indirect effects of solar radiation on soil respiration rate. However, extremely high *LAI* could produce negative influence on soil respiration. This was one of the main reasons that at late growth stage, total solar radiation had significant effect on soil respiration with *LAI* decreasing.

Diffuse radiation could penetrate more into inner canopy, which not only improved the whole community photosynthesis and indirectly increased soil respiration, but also increased soil temperature and promoted soil microorganism activities, thus resulted in the increase of soil heterotrophic respiration under lower canopy density (early and late growth stages), therefore, effects of diffuse radiation on soil respiration were more than direct radiation did. But with the increase of *LAI* (vigorous growth period), because of high canopy density (high *LAI*), sheltering almost influenced total radiation (direct and diffuse radiation), the penetration effect of diffuse radiation would be reduced. Because the effects of direct radiation on leaf photosynthesis of canopy crown were more than diffuse radiation, and enhanced more of soil respiration indirect effect, made the effect of direct radiation on soil respiration higher than that of diffuse radiation. At late growth stage, leaf withered and yellow result in *LAI* decreasing, diffuse radiation enhanced soil respiration again.

In this paper, nonlinear regression equation was used to analyze the relationship between soil respiration rate and soil temperature, solar radiation (direct and diffuse radiation), and linear regression equation apply to analyze the relationship between the parameters of nonlinear regression and biomass or *LAI*.

**Key Words:** soil respiration; solar radiation; diffuse radiation; soil temperature; biological factors; maize (*Zea mays* L.)

土壤呼吸作用主要包括来自植物根系的自养呼吸作用和土壤微生物的异养呼吸作用。全球土壤呼吸作用年总量仅次于植被光合作用<sup>[1]</sup>,占全球碳排放量的25%,其微小的变化可能引起大气CO<sub>2</sub>浓度和土壤碳累积速率的显著变化<sup>[2-3]</sup>。弄清土壤呼吸作用的变化规律及其影响因子不仅是准确评估全球碳收支的关键,亦是制定应对全球变化策略的关键<sup>[4]</sup>。

一般认为,水热因子是影响土壤呼吸作用的主导因子。土壤呼吸作用先随着温度升高、降水或土壤水分的增加而增加,达到一定值后逐渐减少,此时水热因子对土壤呼吸作用起着抑制作用<sup>[5-6]</sup>。通常采用线性或指数模型来描述土壤呼吸作用与土壤温度、水分或两者协同作用的关系<sup>[7-12]</sup>。韩广轩等<sup>[13-14]</sup>则在指数模型与线性模型中引入植物根系生物量与净第一性生产力(*NPP*)两个生物因素,提高了土壤呼吸作用模拟的准确性。

太阳辐射不仅影响植物的生长环境,而且直接为植物光合作用提供能量,必然与土壤呼吸作用有着密切的关系。研究表明,制约草原植物生长初期和末期土壤呼吸速率的主要因子为太阳辐射,草原植物生长季土壤呼吸作用72%的变异由表层土壤含水量和太阳辐射共同决定<sup>[15]</sup>。太阳辐射通常可分为直接辐射和散射辐射。直接辐射是沿太阳光方向照射到地面的部分,散射辐射则是太阳光经大气层中的空气分子、云滴、气溶胶的散射作用(天空散射)以及地表漫反射(地面散射)等形成的太阳辐射。研究表明,散射辐射变化显著影响陆地生态系统的碳交换<sup>[15-16]</sup>。土壤呼吸作用作为陆地生态系统碳交换的重要组成部分,与太阳辐射及其组成部分(直射辐射和散射辐射)的关系尚未见报道。

本研究试图利用东北地区玉米(*Zea mays* L.)农田连续两个生长季的土壤呼吸作用及其相应环境因子的观测资料,分析研究白天和夜间土壤呼吸作用与土壤温度关系的异同,探讨太阳辐射及其组成部分(散射辐射、直射辐射)对土壤呼吸作用的影响,以期对玉米农田土壤呼吸作用的准确评估提供参考和数据支持。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域位于辽宁省锦州市中国气象局锦州农田生态系统野外观测站(41°49'N, 121°12'E, 海拔17.0m),属温带季风型大陆性气候,最高气温35℃,最低气温-29.9℃,年均气温7.8—11.0℃,年均降水量550—630mm,主要集中在7—9月份。试验田土壤为典型棕壤,土壤pH值6.3,有机质0.6%—0.9%,全氮

0.069%。该地区主要作物是雨养玉米, 样地玉米品种为丹育 47。2004 年 4 月 24 日播种, 9 月 28 日收割; 2005 年 4 月 26 日播种, 9 月 26 日收割。氮肥品种为碳酸氢铵, 玉米生长季用量为 300kg/hm<sup>2</sup>, 在播种前一次性施到田中。玉米收割后, 秸秆从田中带走, 不实施秸秆还田。

## 1.2 土壤呼吸作用测定

土壤呼吸作用采用 Li-6400R 便携式气体分析系统(Licor, Lincoln, NE, USA) 和 Li-6400-09 土壤呼吸室测定。为减少对土壤的干扰, 在测定前一天将 PVC 土壤环插入土壤 1—2 cm, 测定时将土壤呼吸室放置在 PVC 圈上进行测定。考虑到土壤呼吸作用的空间异质性, 每次观测根据距离玉米植株远近的不同, 均匀安装 12 个 PVC 土壤环。每隔 1h 观测 1 次, 获取 12 个样点的土壤呼吸作用, 求其平均值, 作为小时尺度的土壤呼吸速率均值。2004 年和 2005 年的 5—8 月(玉米生长季期间) 每月对土壤呼吸作用至少进行 1 次观测, 时间为 6:00—18:00, 观测期间无降水发生。其中, 2004 年 6 月 27 日、9 月 7 日和 9 月 29 日进行了 24h 连续观测(6:00—翌日 6:00)。

## 1.3 太阳辐射与土壤温度测定

观测样地安装有气象梯度观测塔, 太阳辐射来自气象梯度观测塔 3.5m 高度的 CNR1 净辐射仪和 LI190SB 光子传感器, 土壤温度来自观测塔 107 热敏电阻温度探头观测的 5cm 土壤温度。根据太阳辐射量区分白天和夜间(太阳总辐射 < 20 W/m<sup>2</sup>)<sup>[17]</sup>。

由于没有进行太阳散射辐射观测, 在此采用散射辐射估算模型, 结合气象梯度观测塔观测的太阳总辐射估算散射辐射比例(DFR)。该模型已在多个生态类型得到验证<sup>[18-22]</sup>, 详见附录。

## 1.4 生物因子测定

在观测土壤呼吸作用的同时进行玉米生物量与叶面积指数测定。每隔 20d 左右一次性采集完整的 5 株标准株玉米鲜样, 量取每株叶片的叶面积, 植株鲜样采用通风高温烘炉在 105℃ 杀青, 80℃ 烘干至恒重, 称重计算平均每株地上干物质的重量(g/株)。叶面积指数(LAI) 为单位面积上所有叶片表面积的总和与相应土地面积之比。

## 1.5 统计分析

运用非线性回归方法分析玉米生长季日尺度的土壤呼吸速率与土壤温度、太阳辐射的关系(式(1)和(2)), 探讨散射辐射对土壤呼吸作用的影响(式(3)):

$$f_R = ae^{bT} \quad (1)$$

式中,  $f_R$  为土壤呼吸速率( $\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ),  $T$  为 5cm 土壤温度(℃),  $a$  和  $b$  为参数。

$$f_R = ae^{bT} + cS + d \quad (2)$$

式中,  $S$  为太阳总辐射( $\text{W}/\text{m}^2$ ),  $a$ 、 $b$ 、 $c$  和  $d$  为参数。

$$f_R = ae^{bT} + c_1S_f + c_2S_d + d \quad (3)$$

式中,  $f_T = ae^{bT}$ ,  $S_f$  和  $S_d$  为散射辐射与直射辐射( $\text{W}/\text{m}^2$ ),  $c_1$  和  $c_2$  为回归系数, 参数  $d$  代表随机误差和模型中没有解释的其它环境因子的影响作用。

运用线性回归方法分析生物量、叶面积指数与曲线中参数的关系。采用统计分析软件 SPSS 15.0 (SPSS, Chicago, IL, USA) 和 Excel 进行数据分析。

## 2 结果分析

### 2.1 土壤呼吸作用与土壤温度的关系

#### 2.1.1 白天和夜间的土壤呼吸作用与土壤温度的关系

相同土壤温度下, 白天土壤呼吸速率明显高于夜间(图 1)。夜间(太阳总辐射 < 20  $\text{W}/\text{m}^2$ ) 土壤呼吸速率随 5cm 土壤温度呈显著指数关系(图 1), 与 Chimner、Kang 和 Buyanovsky 等的研究结果一致<sup>[11, 23-24]</sup>。玉米生长后期, 白天(太阳总辐射 > 20  $\text{W}/\text{m}^2$ ) 土壤呼吸速率与温度的指数关系不显著(图 1b 和图 1c)。白天土壤呼吸速率随 5cm 土壤温度的升高而升高, 到达一定程度后, 土壤呼吸作用开始下降(图 1b 和图 1c)。

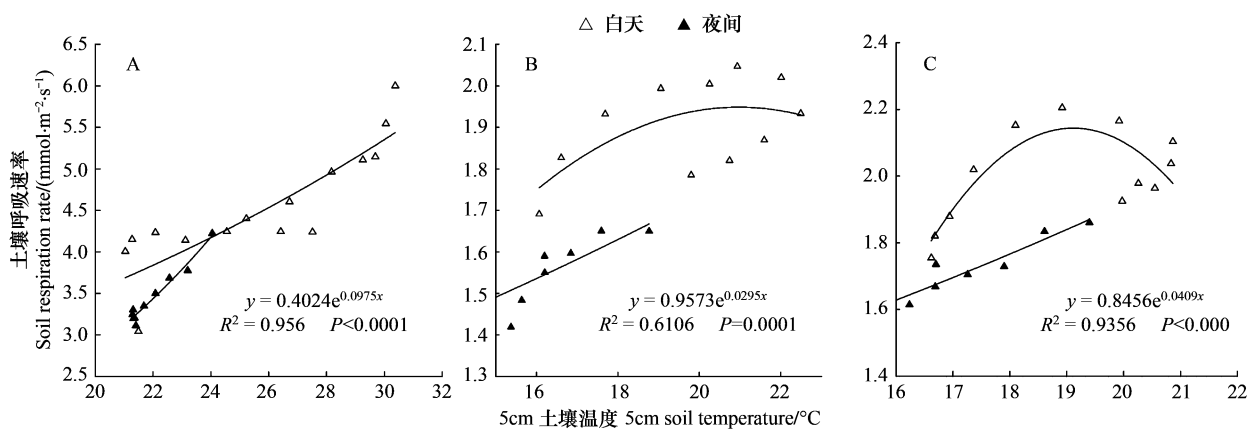


图1 2004年玉米农田昼夜土壤呼吸速率随温度的变化

Fig. 1 Soil respiration rate of the maize farmland versus 5cm soil temperature during daytime and night time in 2004

A: 2004年6月27日土壤呼吸速率随温度的变化; B: 2004年9月7日土壤呼吸速率随温度的变化; C: 2004年9月29日土壤呼吸速率随温度的变化; 图中给出的回归关系是夜间土壤呼吸与土壤温度的指数关系

### 2.1.2 白天的土壤呼吸作用与土壤温度关系的季节动态

玉米农田白天的土壤呼吸作用与土壤温度的关系随季节发生变化(表1)。玉米生长初期和盛期(2004年6月27日,2005年5—8月),白天的土壤呼吸作用与土壤温度呈显著的指数关系,且随着玉米的生长,指数关系逐渐变弱;到玉米生长后期(2004年9月7日、9月29日),白天的土壤呼吸作用与土壤温度的指数关系变为不显著。

表1 回归方程  $f_R = ae^{bT^*}$  的参数( $a$ 、 $b$ 、相关系数( $R^2$ ))、显著性检验( $P$ )和均方根误差分析( $RMSE$ )

Table 1 Regressive parameters ( $a$ ,  $b$ , correlation index ( $R^2$ )), significance test ( $P$ ) and root mean squared error ( $RMSE$ ) of the equation  $f_R = ae^{bT^*}$

观测日期 Observation dates	回归方程 Regression equation				
	$a$	$b$	$R^2$	$P$	$RMSE$
2004-06-27	1.9512	0.0329	0.748	<0.0001	0.2952
2004-09-07	1.3108	0.0222	0.271	0.08	0.1185
2004-09-29	1.6191	0.0085	0.042	0.5	0.1047
2005-05-04	0.3905	0.0589	0.879	<0.0001	0.1121
2005-06-05	0.7420	0.0401	0.981	<0.0001	0.0302
2005-06-28	1.8402	0.0272	0.751	<0.0001	0.2915
2005-07-28	1.9536	0.0337	0.646	0.001	0.3709
2005-08-28	1.3957	0.03601	0.610	0.005	0.2550

\*  $T$  为5cm土壤温度

### 2.2 土壤呼吸作用与太阳辐射的关系

玉米农田土壤呼吸作用影响因子在白天与夜间的差异,造成了白天和夜间的土壤呼吸作用与土壤温度关系的不同(图1)。2004年玉米生长后期(9月7日和9月29日),白天的土壤呼吸作用随土壤温度的变化趋势与夜间的差异最大(图1和表1),导致白天的土壤呼吸作用与土壤温度的指数关系不显著。

研究表明,土壤温度、土壤湿度、根系生物量、凋落物、微生物种群、根系氮含量和土壤质地等都是影响土壤呼吸作用的重要因素<sup>[2,5]</sup>。在日尺度上,变化较大的因子有土壤温度、土壤湿度和太阳辐射等。如果没有剧烈的天气变化,同一日内土壤水分的变化不显著,白天和夜间差异最大的环境因子是温度与太阳辐射。因此,影响土壤呼吸作用与土壤温度关系的环境因子可能是太阳辐射。为此,将玉米生长后期白天的土壤呼吸作用与土壤温度、土壤湿度和太阳辐射进行多元线性回归分析。结果发现:太阳辐射与土壤呼吸作用呈显著

的线性相关关系(9月7日:  $R^2 = 0.80, P < 0.0001$ ; 9月29日:  $R^2 = 0.82, P < 0.0001$ ), 而与土壤湿度和土壤温度的相关关系不显著。

### 2.2.1 太阳总辐射对土壤呼吸作用的影响

利用非线性回归方法(式(2)), 分析土壤温度与太阳总辐射对土壤呼吸作用的影响。结果发现, 太阳总辐射对土壤呼吸作用的影响在玉米生长盛期(2004年6月27日、2005年6月28日、7月28日、8月28日)最大(具体表现为回归系数  $c$  的绝对值)(表2)。

回归系数  $c$  随季节变动较大(表2)。2004年玉米开花期、乳熟期和成熟期,  $c$  为正值, 表明太阳总辐射对土壤呼吸有促进作用; 2005年5—8月,  $c$  均为负值, 太阳总辐射对土壤呼吸起到抑制作用。分析  $c$  与土壤水分、生物量和叶面积指数的关系发现: 玉米地上生物量( $B$ )和叶面积指数( $LAI$ )是影响  $c$  值的两个主导因素( $c = 4.3 \times 10^{-6}B - 0.0007LAI - 0.0003, P = 0.031$ ), 可解释  $c$  值变异的 83.5%。

表2 回归方程  $f_R = ae^{bT} + cS + d$  的参数( $a, b, c, d$ , 相关系数( $R^2$ ))和均方根误差分析( $RMSE$ )

Table 2 Regressive parameters ( $a, b, c, d$ , correlation index ( $R^2$ )) and root mean squared error ( $RMSE$ ) of the equation  $f_R = ae^{bT} + cS + d$

观测时间 Observation dates	回归方程 Regression equation					$R^2$	$RMSE$
	$a$	$b$	$c$	$d$			
2004-06-27	0.0006	0.2567	0.0008	3.8671		0.962	0.1181
2004-09-07	9.4221	0.0015	0.0004	-7.9139		0.849	0.0530
2004-09-29	0.0408	-0.0435	0.0006	1.7054		0.816	0.0439
2005-05-04	0.6406	0.0475	-0.0002	-0.2912		0.892	0.1049
2005-06-05	1.9945	0.0226	$-4.9 \times 10^{-5}$	-1.4627		0.985	0.0274
2005-06-28	2.3698	0.0338	-0.0026	-1.0467		0.964	0.1187
2005-07-28	112.555	0.0019	-0.0023	-112.604		0.738	0.3280
2005-08-28	50.4005	0.0034	-0.001	-51.1445		0.824	0.1692

### 2.2.2 散射辐射和直射辐射对土壤呼吸作用的影响

将式(2)的太阳总辐射项  $S$  分为散射辐射  $S_f$  和直射辐射  $S_d$ , 得到式(3)。非线性回归分析发现, 不同生长季节, 玉米农田散射辐射与直射辐射的回归系数  $c_1$  与  $c_2$  差异较大(表3)。

表3 回归方程  $f_R = ae^{bT} + c_1S_f + c_2S_d + d$  的参数( $a, b, c_1, c_2, d$ , 相关系数( $R^2$ ))和均方根误差分析( $RMSE$ )

Table 3 Regressive parameters ( $a, b, c_1, c_2, d$ , correlation index ( $R^2$ )) and root mean squared error ( $RMSE$ ) of the equation  $f_R = f_T + c_1S_f + c_2S_d + d$

观测时间 Observation dates	回归方程 Regression equation					$R^2$	$RMSE$
	$a$	$b$	$c_1$	$c_2$	$d$		
2004-06-27	0.0367	0.1174	$4 \times 10^{-5}$	0.0023	3.6358	0.993	0.0496
2004-09-07	8.5334	0.004	0.0006	0.0003	-7.4068	0.9	0.0380
2004-09-29	7.9873	0.0003	0.0011	$3 \times 10^{-5}$	-6.3543	0.954	0.0229
2005-05-04	0.1721	0.0820	-0.0011	$-8 \times 10^{-5}$	0.5431	0.902	0.1
2005-06-05	8.858	0.0071	0.0002	$-7 \times 10^{-5}$	-8.5514	0.987	0.0255
2005-06-28	2.2054	0.0355	-0.0023	-0.0026	-0.9015	0.964	0.1182
2005-07-28	202.298	0.0010	-0.0005	-0.0020	-202.27	0.751	0.3201
2005-08-28	99.8148	0.0019	-0.0003	-0.0012	-101.09	0.830	0.1666

为进一步比较散射辐射和直射辐射对土壤呼吸作用的影响, 令  $f = |c_1| / (|c_1| + |c_2|)$ , 表示散射辐射对土壤呼吸作用影响的贡献。玉米生长季  $f$  值与叶面积指数呈显著线性相关关系, 随叶面积指数的增加而下降(图2)。

### 3 讨论

#### 3.1 土壤呼吸作用与土壤温度关系的变化

相同土壤温度下,白天和夜间的土壤呼吸速率不同。白天和夜间的土壤呼吸作用与土壤温度的关系差异表明,除土壤温度外,白天和夜间的其它环境因子差异也影响着土壤呼吸作用,使得白天与夜间的土壤呼吸速率随温度的变化趋势不同。玉米生长后期,白天和夜间的土壤呼吸作用与土壤温度的关系差异最大,导致白天的土壤呼吸作用与土壤温度的指数关系不显著,这是由于这一时期白天与夜间的温度等环境因子差异显著造成的。

白天的土壤呼吸作用与土壤温度的关系随季节变化表明,白天的土壤呼吸作用受生物因子或其它环境因子季节性变化的影响。玉米生长季,玉米的光合速率、净初级生产力、地上和地下生物量、凋落物和微生物种群等生物因子的变动都可能造成这种变异<sup>[1, 24]</sup>。

#### 3.2 太阳总辐射对土壤呼吸作用的影响

玉米生长盛期,太阳总辐射对土壤呼吸作用的影响较玉米生长初期和后期更加明显(表2),与师广旭等在克氏针茅(*Stipa krylovii*)草原的研究结果不一致<sup>[15]</sup>,这可能是由植被的冠层结构和其它环境因子的空间异质性引起的。太阳总辐射对土壤呼吸作用影响的贡献随季节变化而变化,主要是受地上生物量和叶面积指数的影响;太阳总辐射对土壤呼吸作用的影响系数c随生物量的增加而增加,随LAI的增加而减小。

随着玉米地上生物量的增加,玉米根系生物量一般也将增加,从而提高了根系呼吸作用在土壤呼吸作用中所占的比例。在太阳辐射达到植物光合作用饱和点之前,植物光合速率随太阳辐射强度的增加而增加,从而使得较多的光合产物输送到根部,导致根部呼吸作用增加<sup>[24]</sup>。地上生物量的增加使得太阳辐射对土壤呼吸作用的这种间接影响增加。因此,地上生物量越大,太阳总辐射对土壤呼吸作用的影响程度就越强。

玉米生长盛期,随着叶面积指数的增大,透射到冠层底部的太阳辐射受到越来越多的遮挡。冠层上部,由于太阳辐射过饱和,对玉米植株总体光合作用产生抑制,间接地减弱了土壤呼吸作用。玉米生长后期,由于自然和人为的原因,LAI降低,而生物量降低不明显,使得太阳总辐射对土壤呼吸作用产生显著的促进作用。

#### 3.3 散射辐射和直射辐射对土壤呼吸作用的影响

随着LAI增加,散射辐射对土壤呼吸作用的影响降低。玉米生长初期和后期,叶面积指数较低,散射辐射可使更多的光透射到冠层底层<sup>[25]</sup>,促进了植株整体的光合作用,并间接影响土壤呼吸作用。因此,散射辐射在这两个生长阶段对土壤呼吸作用的影响要大于直射辐射(图4)。玉米生长盛期则相反,由于冠层郁闭度较高(高LAI),几乎遮挡了全部的阳光辐射(包括散射辐射和直射辐射),散射辐射的透射作用不明显,导致散射辐射对土壤呼吸作用的影响明显减弱。直射辐射直接影响冠层顶部叶片的光合作用<sup>[27-28]</sup>,从而间接地影响根系的呼吸作用,使得直射辐射对土壤呼吸作用的影响超过散射辐射。

### 4 结论

白天的太阳辐射促进了玉米的光合作用,使更多的光合产物输送到根部,间接地促进了土壤呼吸作用,导致白天的土壤呼吸速率高于夜间,使得土壤呼吸作用与土壤温度的相关关系发生变化。太阳总辐射对土壤呼吸作用的影响随生物量、LAI等生物因子的季节性变化而变化。生物量的增加,增强了太阳辐射对土壤呼吸的间接影响作用。但是,随着生物量的增加,叶面积指数增加到一定程度后,叶面积指数继续增加将遮挡达到冠层内部的太阳辐射,反而降低了群落总体的光合作用,间接减弱了土壤的呼吸作用。生物量的增加有利于

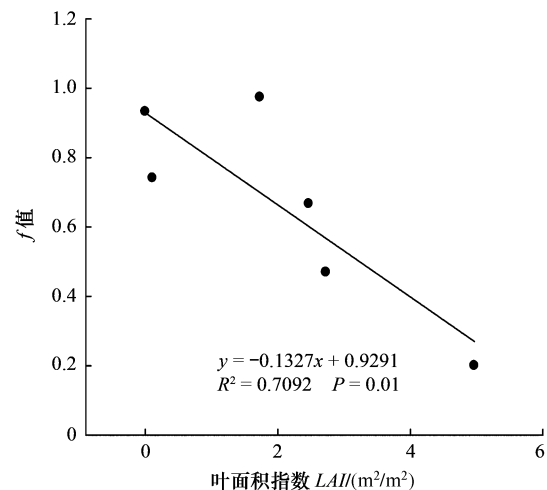


图2  $f$  值与叶面积指数的关系

Fig. 2 Regressive relationship of  $f$  versus leaf area index



提高太阳辐射对土壤呼吸作用的间接影响,而  $LAI$  过高将对土壤呼吸作用产生负面影响,这是玉米生长后期,叶面积指数降低,太阳辐射反而对土壤呼吸作用具有明显促进作用的原因之一。

散射辐射在玉米冠层郁闭度不过高的情况下,能够透射到冠层底部,不仅提高了群落整体的光合作用,间接促进了土壤呼吸作用,而且也增加了地表温度,促进了土壤微生物活动,导致土壤异养呼吸作用增加。但随着叶面积指数的增加,散射辐射的透射率降低,使得直射辐射对冠层叶片光合作用影响的贡献增加,间接增加了直射辐射对土壤呼吸作用影响的贡献。

该研究区域在中国气候区划中属温带气候,太阳辐射较贫乏,光照弱且季节变化较大,散射辐射对该地区陆地生态系统的生产力和碳收支影响较大。本研究将对该区域作物栽培和管理措施的碳增汇技术制定有一定的指导意义。

#### 附: 散射辐射的估算

$$k_t = S/S_0$$

$$S_0 = S_{sc} [1 + 0.033 \cos(360t_d/365)] \sin\theta$$

$$0 \leq k_t \leq 0.3; S_f/S_0 \leq k_t \quad S_f/S_0 = k_t [1.020 - 0.254k_t + 0.0123 \sin\theta]$$

$$0.3 < k_t < 0.78; 0.1k_t \leq S_f/S_0 \leq 0.97k_t \quad S_f/S_0 = k_t [1.400 - 1.749k_t + 0.177 \sin\theta]$$

$$k_t \geq 0.78; S_f/S_0 \geq 0.1k_t \quad S_f/S_0 = k_t [0.486k_t - 0.182 \sin\theta]$$

式中,  $k_t$  为晴空指数;  $S$  为地表水平面总辐照度;  $S_0$  为大气层外水平面总辐射照度;  $S_f$  为地表水平面上接收的散射;  $S_{sc}$  为太阳常数 ( $1367 \text{ W/m}^2$ );  $t_d$  为日期序数;  $\theta$  为太阳高度角。

#### References:

- [ 1 ] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology*, 1992, 44(2): 81-99.
- [ 2 ] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(11/12): 1625-1635.
- [ 3 ] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 7-20.
- [ 4 ] Janssens I A, Pilegaard K. Large seasonal changes in  $Q_{10}$  of soil respiration in a beech forest. *Global Change Biology*, 2003, 9(6): 911-918.
- [ 5 ] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil  $\text{CO}_2$  efflux on temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(2): 155-165.
- [ 6 ] Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest. *Plant and Soil*, 1997, 190(1): 127-141.
- [ 7 ] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 217-227.
- [ 8 ] Sánchez M L, Ozores M I, López, M J, Colle R, Torre B, García M A, Pérez I. Soil  $\text{CO}_2$  fluxes beneath barley on the central Spanish plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 118: 85-95.
- [ 9 ] Reth S, Göckede M, Falge E.  $\text{CO}_2$  efflux from agricultural soils in Eastern Germany-comparison of a closed chamber system with eddy covariance measurements. *Theoretical and Applied Climatology*, 2004, 85: 75-186.
- [ 10 ] Tufekcioglu A, Raich J W, Isenhardt T M, Schultz R C. Soil respiration within riparian buffers and adjacent crop fields. *Plant and Soil*, 2001, 229: 117-124.
- [ 11 ] Chimner R A. Soil respiration rates of tropical peat lands in Micronesia and Hawaii. *Wetlands*, 2004, 24: 51-56.
- [ 12 ] Dong Y S, Qi Y C, Liu J Y, Geng Y B, Yang X H, Liu L X. Variation characteristics of soil respiration fluxes in four types of grassland communities under different precipitation intensity. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(6): 583-591.
- [ 13 ] Han G X, Zhou G S, Xu Z Z, Yang Y, Liu J L, Shi K Q. Biotic and abiotic factors controlling the spatial and temporal variation of soil respiration in an agricultural ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(2): 418-425.
- [ 14 ] Han G X, Zhou G S, Xu Z Z, Yang Y, Liu J L, Shi K Q. Soil temperature and biotic factors drive the seasonal variation of soil respiration in a maize (*Zea mays* L.) agricultural ecosystem. *Plant Soil*, 2007, 291: 15-26.
- [ 15 ] Roderick M L, Farquhar G D, Berry S L, Noble I R. On the direct effect of clouds and atmospheric particles on the productivity and structure of vegetation. *Oecologia*, 2001, 129: 21-30.

- [16] Niyogi D, Chang H I, Saxena V K, Holt T, Alapaty K, Booker F, Chen F, Davis K J, Holben B, Matsu T, Meyers T, Oechel W C, Pielke R, Wells R, Wilson K, Xue Y. Direct observations of the effects of aerosol loading on net ecosystem CO<sub>2</sub> exchanges over different landscapes. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 31: L20506.
- [17] Papale D, Reichstein M, Aubinet M, Canforal E, Bernhofer C, Kutsch W, Longdoz B, Rambal S, Valentini R, Vesala T, Yakir D. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences*, 2006, 3: 571-583.
- [18] Gu L, Baldocchi D, Black T, Vesala T, Falge E, Dowty P. Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 2002, 107: ACL 2-1.
- [19] Gu L, Baldocchi D, Wofsy S, Munger J, Michalsky J, Urbanski S, Boden T. Response of a deciduous forest to the Mount Pinatubo eruption: enhanced photosynthesis. *Science*, 2003, 299: 2035-2038.
- [20] Gu L, Fuentes J, Shugart H, Staebler R, Black T. Responses of net ecosystem exchanges of carbon dioxide to changes in cloudiness: results from two North American deciduous forests. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 31421-31434.
- [21] Misson L, Lunden M, McKay M, Goldstein A H. Atmospheric aerosol light scattering and surface wetness influence the diurnal pattern of net ecosystem exchange in a semi-arid ponderosa pine plantation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 129: 69-83.
- [22] Reindl D T, Beckman W A, Duffie J A. Diffuse fraction correlations. *Solar Energy*, 1990, 45: 1-7.
- [23] Kang S, Doh S, Lee D S, Jin V L, Kimball J S. Topographic and climatic controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea. *Global Change Biology*, 2003, 9(10): 1427-1437.
- [24] Buyanovsky G A, Wagner G H, Gantzer C J. Soil respiration in a winter wheat ecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50: 338-344.
- [25] Edwards N. Root and soil responses to ozone in *Pinus taeda* L. seedling. *New Phytologist*, 1991, 118: 315-321.
- [26] Oechel W C, Lawrence W T, Chabot, B. F. and Mooney, H. A. eds. *Physiological ecology of North American plant communities*. Chapman & Hall, New York, NY, 1985:66-94.
- [27] Brodersen C, Vogelmann T, Williams W, Gorton H. A new paradigm in leaf-level photosynthesis: direct and diffuse lights are not equal. *Plant, Cell and Environment*, 2008, 31: 159-164.
- [28] Brodersen C, Vogelmann T. Do epidermal lens cells facilitate the absorbance of diffuse light?. *American Journal of Botany*, 2007, 94: 1061-1066.

#### 参考文献:

- [1] 韩广轩, 周广胜. 土壤呼吸作用时空动态变化及其影响机制研究与展望. *植物生态学报*, 2009, 33(1): 197-205.
- [4] 韩广轩, 周广胜, 许振柱. 中国农田生态系统土壤呼吸作用研究与展望. *植物生态学报*, 2008, 32(3): 719-733.
- [5] 周广胜, 贾丙瑞, 韩广轩, 周莉. 土壤呼吸作用普适性评估模型构建的设想. *中国科学 C 辑: 生命科学*, 2008, 38(3): 293-302.
- [15] 师广旭, 耿浩林, 王云龙, 王玉辉, 齐晓荣. 克氏针茅 (*Stipa krylovii*) 草原土壤呼吸及其影响因子. *生态学报*, 2008, 28(7): 3408-3416.
- [24] 王妮, 宋日, 郭继勋. 东北松嫩草原碱茅群落的土壤呼吸同枯枝落叶分解 CO<sub>2</sub> 贡献量研究. *草业学报*, 2002, 11(2): 45-50.

# 2008 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊\*

(源于 2009 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	8956	1	生态学报	1.669
2	应用生态学报	7979	2	植物生态学报	1.656
3	植物生态学报	3742	3	应用生态学报	1.632
4	西北植物学报	3584	4	生物多样性	1.474
5	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3460	5	生态学杂志	1.276
6	植物生理学通讯	3187	6	植物学通报	1.058
7	生态学杂志	3148	7	西北植物学报	1.046
8	遗传学报	2142	8	植物生理与分子生物学 学报	1.034
9	植物生理与分子生物学学报	1855	9	遗传学报	0.887
10	昆虫学报	1580	10	遗传	0.835

★《生态学报》2008 年在核心版的 1868 种科技期刊排序中总被引频次 8956 次,全国排名第 2; 影响因子 1.669,全国排名第 14;第 1~8 届连续 8 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生态学报  
(SHENGTAI XUEBAO)  
(半月刊 1981 年 3 月创刊)  
第 30 卷 第 21 期 (2010 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA  
(Semimonthly, Started in 1981)  
Vol. 30 No. 21 2010

**编 辑** 《生态学报》编辑部  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085  
电话:(010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

**主 编** 冯宗炜  
**主 管** 中国科学技术协会  
**主 办** 中国生态学会  
中国科学院生态环境研究中心  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085

**出 版** 科 学 出 版 社  
地址:北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

**印 刷** 北京北林印刷厂  
**发 行** 科 学 出 版 社  
地址:东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717  
电话:(010)64034563  
E-mail:journal@cspg.net

**订 购** 全国各地邮局  
**国外发行** 中国国际图书贸易总公司  
地址:北京 399 信箱  
邮政编码:100044

**广告经营** 京海工商广字第 8013 号  
**许 可 证**

**Edited** by Editorial board of  
ACTA ECOLOGICA SINICA  
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China  
Tel:(010)62941099  
www.ecologica.cn  
Shengtaixuebao@rcees.ac.cn

**Editor-in-chief** FENG Zong-Wei  
**Supervised** by China Association for Science and Technology  
**Sponsored** by Ecological Society of China  
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS  
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

**Published** by Science Press  
Add:16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

**Printed** by Beijing Bei Lin Printing House,  
Beijing 100083, China

**Distributed** by Science Press  
Add:16 Donghuangchenggen North  
Street, Beijing 100717, China  
Tel:(010)64034563  
E-mail:journal@cspg.net

**Domestic** All Local Post Offices in China  
**Foreign** China International Book Trading  
Corporation  
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元