

# 土壤呼吸的水热因子模拟及温度敏感性的探讨

邓爱娟, 申双和, 张雪松, 李永秀, 谢轶嵩 (南京信息工程大学应用气象学院, 江苏南京 210044)

**摘要** [目的] 研究水热因子对土壤呼吸的影响, 进而对土壤呼吸温度敏感性进行探讨。[方法] 利用 LICOR-8100 对华北平原典型冬小麦拔节期土壤呼吸进行测定, 分析其与水热因子的关系并建立关系模型。[结果] 土壤呼吸速率与气温、5 cm 层土壤温度均呈显著正相关, 且与土壤温度相关性更好, 温度对土壤呼吸的影响在低温时比高温时更为显著; 按不同温度条件划分的 5 cm 土壤相对含水量与土壤呼吸速率呈显著正相关, 且温度较高时土壤呼吸对土壤含水量变化的响应更显著。[结论] 土壤呼吸速率的水热因子关系模型为  $R = 0.180 \times T_s^{0.878} \times T_a^{0.088} \times \theta^{0.147}$  ( $R^2 = 0.836, P < 0.000 1$ ), 土壤呼吸温度敏感因子  $Q_{10}$  和土壤温度、气温呈负相关, 与土壤含水量呈正相关关系。

**关键词** 土壤呼吸; 土壤温度; 土壤含水量; 气温;  $Q_{10}$

**中图分类号** S154.2 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2009)23-11133-04

## Simulation of Hydro-thermal Factors of Soil Respiration and Discussion on the Temperature Sensitivity

DENG Ai-juan et al (College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044)

**Abstract** [Objective] The research aimed to study the effects of hydro-thermal factors to soil respiration. [Method] Experiments were conducted in North China Plain during winter wheat's jointing stage by LICOR-8100 to investigate the relationship between soil CO<sub>2</sub> emission and hydro-thermal factors. [Result] Significant power function can be obtained to express soil respiration rate increases with air temperature or soil temperature in 5 cm depth, and it was better with the latter. The influence of temperature was more conspicuous at lower temperature whether air or soil temperature. If it was divided based on different temperature, it showed significant positive relationship between soil water content in 5 cm depth and soil respiration rate, and a remarkable response can be found with higher temperature. [Conclusion] The relationship between soil respiration rate R and air temperature, soil temperature and soil moisture in 5 cm depth can be described by a multiple regression equation:  $R = 0.180 \times T_s^{0.878} \times T_a^{0.088} \times \theta^{0.147}$  ( $R^2 = 0.836, P < 0.000 1$ ). Temperature sensitivity of soil respiration  $Q_{10}$  showed a significant negative correlation with soil temperature and air temperature, but positive with soil moisture.

**Key words** Soil respiration rate; Soil temperature; Soil moisture; Air temperature;  $Q_{10}$

土壤呼吸是陆地植被吸收的 CO<sub>2</sub> 返回到大气的基本途径<sup>[1]</sup>。农田生态系统是陆地生态系统中最活跃的部分<sup>[2]</sup>, 农业生产活动在很大程度上影响着农田的土壤呼吸速率, 进而对全球碳收支产生影响。土壤呼吸既是土壤中异养微生物和植物根系进行生命活动的标志, 也是碳循环的重要组成部分<sup>[3]</sup>。研究农田土壤中 CO<sub>2</sub> 释放量并确定其与环境因子和人类活动的关系, 对于估算陆地生态系统在全球碳循环中的功能和地位具有极其重要的意义<sup>[4]</sup>。

尽管土壤呼吸作用在全球碳循环中具有重要意义, 但有关土壤呼吸的影响因素及生态系统间土壤呼吸作用变异性的知识仍相当有限<sup>[5]</sup>。因此, 要准确估算陆地生态系统碳收支就必须加强土壤呼吸过程及其影响因素的研究<sup>[5]</sup>。笔者主要目的是通过对华北典型农田土壤呼吸及相关环境因素的定位观测, 阐明土壤呼吸速率对水热因子的响应和相关关系。

## 1 资料与方法

试验于 2008 年 4 月 5~21 日在中国科学院禹城综合试验站 (36°57' N, 116°38' E, 海拔 28 m) 进行, 当地属大陆性季风气候暖温带地区。该时期平均气温 13.3 °C, 降水量累计 47.2 mm, 其中, 4 月 9 日夜间降水 7.2 mm, 4 月 12 日夜间降水 5.6 mm, 4 月 20~21 日累计降水 34.4 mm; 土壤质地以粉砂和轻壤为主, pH 值为 7.9~8.0; 土壤有机质含量较低, 为 0.6%~1.0%; 全 N 含量为 0.050%~0.065%。从土壤自然条件来看, 该站在华北平原具有典型性和代表性。

试验区在冬小麦大田, 品种为科农 199, 2007 年 10 月 25 日按 225 kg/hm<sup>2</sup> 密度播种, 2007 年 10 月 22 日施底肥昊利达复合肥, 按 750 kg/hm<sup>2</sup> 施入; 2008 年 3 月 16 日灌水并追肥尿素 (总氮 ≥ 46.6%), 施用量为 300 kg/hm<sup>2</sup>, 4 月 19 日仍追施尿素, 施用量为 150 kg/hm<sup>2</sup>。试验仪器为 LICOR-8100 土壤呼吸碳通量自动观测系统, 试验期值冬小麦拔节期。大田中随机选择 4 个观测点埋入土壤 PVC 环 (直径 20 cm, 高 15 cm), 露出地表约 3 cm, 避开小麦植株, 剪去周围对仪器放置有影响的植株, LICOR-8100 长期室温湿度辅助传感器埋入地下 5 cm 深处。

LICOR-8100 估算土壤呼吸 CO<sub>2</sub> 扩散速率的计算方法主要是指指数回归方法。温学发等指出, 利用指数回归方法可比线性回归法更加准确地估算土壤呼吸 CO<sub>2</sub> 扩散速率并更好地描述土壤呼吸 CO<sub>2</sub> 扩散速率昼夜变化的非对称性响应特征<sup>[6]</sup>。

## 2 结果与分析

**2.1 土壤呼吸速率与温度的相关关系** 该时期的土壤呼吸速率及温度资料显示, 土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度和气温均呈显著正相关, 复相关系数分别为 0.800、0.678, 显然, 土壤呼吸速率与土壤温度的相关性比气温更为显著。而锡林河流域草原退化群落的研究结果显示, 气温与土壤呼吸速率的关系最为密切, 其次是地表温度和 10 cm 处土壤温度<sup>[4]</sup>, 这与试验结论有差异。从图 1 a、b 均可看出, 当温度较低 (低于 15 °C) 时, 散点分布聚集在拟合线附近, 而随着温度的升高, 散点逐渐趋于分散。这说明温度较低时, 温度是控制土壤呼吸速率大小的限制因子, 但随着温度的升高, 温度的作用有明显削弱, 其他影响因子作用抬升为控制土壤呼吸速率的重要因素, 这时多种因子共同影响土壤呼吸<sup>[7]</sup>。

**2.2 土壤呼吸速率与土壤湿度的相关关系** 土壤温度与土

**基金项目** 国家自然科学基金项目 (40675067); 中国科学院生态系统网络观测与模拟重点实验室开放基金课题 (LENOM07YC-02); 江苏省普通高校研究生创新计划项目 (CX08B-019Z)。

**作者简介** 邓爱娟 (1985-), 女, 江苏兴化人, 硕士研究生, 研究方向: 农业气象、生态环境气象。

**收稿日期** 2009-04-13

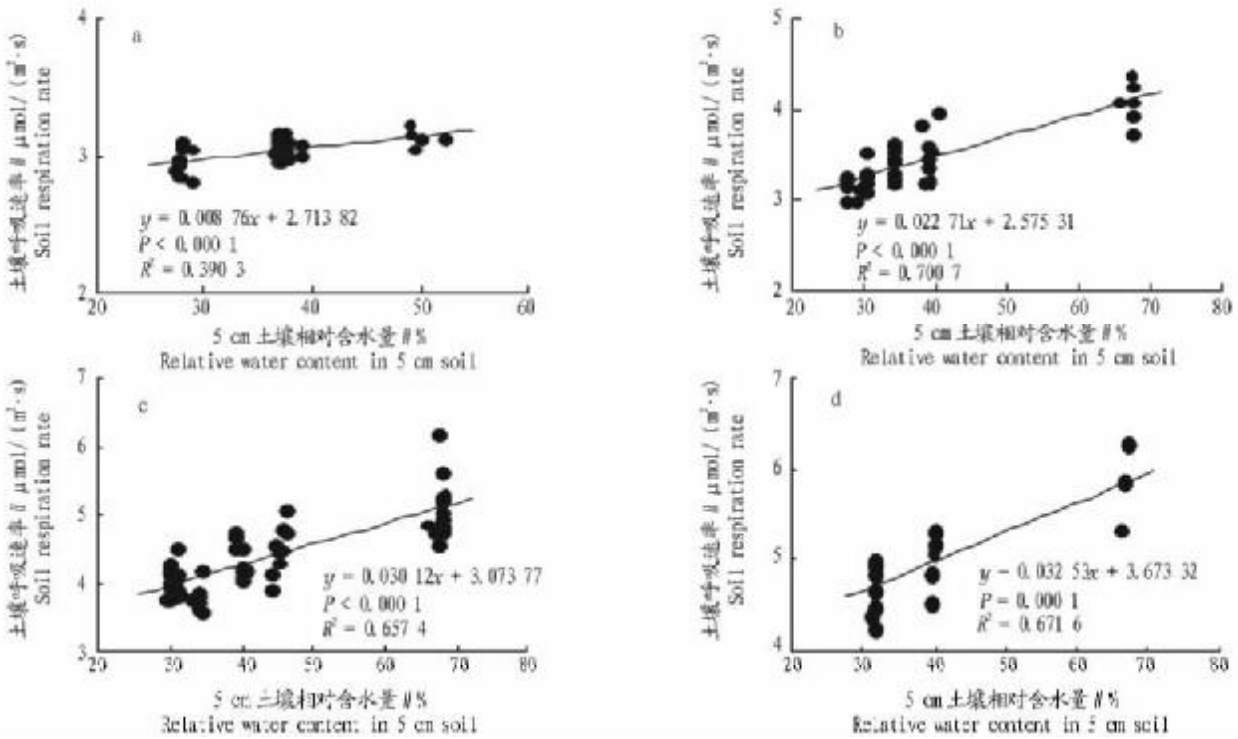


图1 5 cm 土壤温度 (a) 和气温 (b) 与土壤呼吸速率的关系

Fig.1 Relationship between soil temperature in 5 cm depth (a) and air temperature (b) with soil respiration rate

壤呼吸速率相关性较大,这表明土壤温度差异对于土壤含水量对土壤呼吸速率的响应有很大影响,由于土壤温度与水分对土壤呼吸有明显的交互作用<sup>[8]</sup>,若不排除土壤温度差异所带来的影响,土壤呼吸速率与土壤相对含水量的相关性很差;考虑土壤的温度差异,则在温度范围相同的条件下,土壤相对含水量与土壤呼吸速率呈显著正相关(图 2a~d),这与

已有研究结论一致<sup>[4]</sup>。由图 2 可知,当土壤温度较低时,土壤呼吸速率对土壤含水量的变化响应较小;随着温度的升高,土壤呼吸速率随土壤含水量的变率有增大趋势,与土壤含水量的复相关系数也都较高,均在 0.65 以上,这说明土壤温度较高时,土壤含水量对土壤呼吸速率的作用较明显,成为控制土壤呼吸的重要因素。



注:a,b,c,d 分别为土壤温度 <12、12~14、14~16、>16 °C。

Note:a,b,c and d stand for soil temperature of less than 12, 12-14 °C, 14-16 °C and more than 16 °C resp.

图2 5 cm 层土壤相对含水量与土壤呼吸速率的关系

Fig.2 Relationship between soil water content in 5 cm depth and soil respiration rate

2.3 土壤呼吸速率的水热因子模拟 根据以上讨论的土壤呼吸速率与土壤温度、气温和土壤相对含水量的关系,采用

多元逐步回归法,分析土壤呼吸速率自然对数与气温、土壤温度及土壤相对含水量自然对数的相关关系,结果见表 1。

表1 逐步回归结果

Table 1 Results of multiple regression by stepwise method

步数 Step number	变量 Variable	截距 Intercept	$R^2$	$P > F$
	土温 $T_s$ $\theta$	气温 $T_a$		
1	1.005 68	-1.281 76	0.775 8	<0.000 1
2	1.043 93	0.165 46	-1.990 61	0.822 6
3	0.878 24	0.147 03	0.088 35	1.713 99
SDE	0.050 36	0.021 14	0.021 06	0.136 39

注:以上所有留下的变量在 0.15 水平上均显著,所有变量均进入模型。SDE 为标准差。

Note:The above variables are significant at 0.15; All the variables were introduced into the model. SDE stands for standard deviation.

选入模型的因子依次是  $T_s$ 、 $\theta$ 、 $T_a$ ，表明土壤呼吸速率与土壤温度相关性最好，土壤相对含水量处于次要地位，最后是气温。由于气温对土壤温度起决定作用，土壤温度也反映了气温的变化规律，两者具有一定的共线性，故气温对土壤呼吸速率的贡献处于次要地位。土壤呼吸速率关于气温、土壤温度和土壤相对含水量的模型为：

$$\ln(R) = -1.714 + 0.878 \ln(T_s) + 0.147 \ln(\theta) + 0.088 \ln(T_a)$$

$$\text{即: } R = 0.180 \times T_s^{0.878} \times T_a^{0.088} \times \theta^{0.147} \quad (1)$$

式中， $R$  为土壤呼吸速率 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]， $T_a$  为气温 ( $^{\circ}\text{C}$ )， $T_s$  为 5 cm 深土壤温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )， $\theta$  为 5 cm 层土壤相对含水量 (%)。该模型可解释土壤呼吸 83.6% 的变化，与实测值的拟合度达 92.4%，显然比单变量模型更好。

**2.4 土壤呼吸温度敏感因子  $Q_{10}$  的探讨** Van't Hoff 于 1898 年最先提出土壤呼吸的  $Q_{10}$  模型<sup>[9]</sup>：

$$R = R_c \times Q_{10}^{\frac{T-T_c}{10}} \quad (2)$$

式中， $R$ 、 $R_c$  为温度是  $T$ 、 $T_c$  时的土壤呼吸速率， $Q_{10}$  为经验系数，表示温度每增加 10  $^{\circ}\text{C}$  土壤呼吸增加的倍数，即土壤呼吸对温度的敏感因子。温度的变化会影响作物的光合作用、根系生长、地下碳分配的动态以及微生物活动等，进而影响到土壤呼吸的温度敏感性。

除了温度，土壤湿度是对土壤呼吸速率影响的又一重要因子<sup>[10-12]</sup>。土壤水分影响着土壤微生物活性、土壤养分的迁移，同时影响植物根系的生长和呼吸，进而影响土壤  $\text{CO}_2$  释放。关于土壤呼吸与土壤温度、湿度的关系已有大量研究<sup>[11-12]</sup>。基于以上对土壤呼吸有影响的水热因子土壤温度、气温和土壤含水量的研究，而这些也是对土壤呼吸温度敏感因子  $Q_{10}$  有影响的因子<sup>[13]</sup>，可建立  $Q_{10}$  关于土壤温度、气温和土壤含水量的关系。

假设土壤呼吸速率  $R$  与土壤温度  $T_s$  及其他物理生物因子  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ，且  $X$  均为关于  $T_s$  的函数<sup>[13]</sup>，则  $R = f(T_s, X)$ ，若  $dx_i/dT_s = 0$ ，表示  $x_i$  不随  $T_s$  变化，若  $dx_i/dT_s \neq 0$ ，则表示  $x_i$  与  $T_s$  一定程度上存在某种关系。

将土壤呼吸对土壤温度变化的相对瞬时速率  $q$  表示为：

$$q(T_s, X) = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT_s} = \frac{1}{R} \left( \sum \frac{\partial f(T_s, X)}{\partial x_i} \frac{dx_i}{dT_s} + \frac{\partial f(T_s, X)}{\partial T_s} \right) \quad (3)$$

而根据温度敏感因子  $Q_{10}$  的定义：

$$Q_{10}(T_s, X) = \frac{R(T_s + 10, X)}{R(T_s, X)} \quad (4)$$

$$\text{所以 } Q_{10} = \exp \int_{T_s}^{T_s+10} q(\tau, X) d\tau \quad (5)$$

从式 (5) 可看出，对  $q$  有影响的因子同样对  $Q_{10}$  有影响，因此可从  $q$  的角度对温度敏感因子  $Q_{10}$  进行探讨。

根据已建立的土壤呼吸速率关于土壤温度、气温和土壤含水量的关系模型 (1) 式联立 (3) 式，可得：

$$q(T_s, T_a, \theta) = \frac{0.878}{T_s} + \frac{0.088}{T_a} \frac{dT_a}{dT_s} + \frac{0.147}{\theta} \frac{d\theta}{dT_s} \quad (6)$$

由于试验区设备原因，4 月 14 日观测点被灌水，仪器停测，14 日前后土壤相对含水量、气温与土壤温度的关系式分

别为：

$$\begin{cases} T_a = 1.992T_s - 12.972 \quad (P = 0.0169 \quad R^2 = 0.641) \\ \theta = -4.784T_s + 97.010 \quad (P = 0.0220 \quad R^2 = 0.611) \\ T_a = 2.901T_s - 27.043 \quad (P = 0.0389 \quad R^2 = 0.609) \\ \theta = -7.959T_s + 185.835 \quad (P = 0.0274 \quad R^2 = 0.655) \end{cases}$$

所以  $q$  与土壤温度、气温和土壤含水量的关系表达为：

$$\begin{cases} q(T_s, T_a, \theta) = \frac{0.878}{T_s} + \frac{0.176}{T_a} - \frac{0.703}{\theta} \quad (4 \text{ 月 } 14 \text{ 日前}) \\ q(T_s, T_a, \theta) = \frac{0.878}{T_s} + \frac{0.255}{T_a} - \frac{1.170}{\theta} \quad (4 \text{ 月 } 14 \text{ 日后}) \end{cases} \quad (7)$$

从式 (7) 可明显看出，土壤呼吸的相对瞬时速率  $q$  (也反映为温度敏感因子  $Q_{10}$ ) 随气温、土壤温度的升高而减小，从而表现为对高温的适应，说明土壤呼吸速率不是随着温度的升高而无限增大<sup>[13]</sup>，而是在温度达一定的值以后趋于稳定；随着土壤含水量的增加，温度敏感度有增大趋势，表现为随土壤水分的短时激增，如降雨导致土壤呼吸速率迅速增大，有许多研究都证明了这一点<sup>[14-15]</sup>。但也有报道水分增加会降低土壤呼吸温度敏感性<sup>[16]</sup> 或水分对土壤呼吸温度敏感性没有明显影响<sup>[17]</sup>。水分对不同生态系统土壤呼吸温度敏感性影响程度的差异可能同水分对土壤呼吸的影响机制有关，因为水分处于田间持水量和萎蔫系数之间时，土壤呼吸往往对水分变化不敏感，只有当土壤水分超过田间持水量或低于永久萎蔫点时，土壤呼吸才开始下降。一般，过高和过低的水分状况都会限制温度对土壤呼吸的作用，且水分的限制是随着温度的升高而增强的，由于水分的影响混淆了土壤呼吸对温度变化的响应，使得这种响应的敏感性降低<sup>[18]</sup>。

根据  $Q_{10}$  与  $q$  的关系式 (5)，研究  $Q_{10}$  的大小范围是 1.27 ~ 3.07，与德国一个山毛榉—云杉林  $Q_{10}$  变化范围 1.4 ~ 3.1<sup>[16]</sup> 结论接近。 $Q_{10}$  最高值出现在 4 月 13 日 3:30，当时土壤温度、气温分别为 8.81、2.90  $^{\circ}\text{C}$ ，土壤体积含水量为 14.8  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ，最低值出现在土壤温度和气温分别为 17.67 和 25.00  $^{\circ}\text{C}$ 、土壤体积含水量为 10.10  $\text{m}^3/\text{m}^3$  的 4 月 7 日 16:00，在整个观测期间， $Q_{10}$  平均值为 1.78。与仅考虑温度的土壤呼吸温度敏感度相比<sup>[19]</sup>，结论的  $Q_{10}$  平均值偏小，这是由于其他对土壤呼吸产生作用的因子如水分等混淆了土壤呼吸对温度变化的响应，使得土壤呼吸的敏感性降低<sup>[18]</sup>。从图 3 可明显看出， $Q_{10}$  值与土壤温度和气温呈负相关关系，而与土壤含水量呈正相关，这与式 (7) 反映的关系是一致的。

### 3 讨论

(1) 试验结果显示：①土壤呼吸速率与气温和土壤温度均呈显著正相关，且与土壤温度的相关性更好，温度较低时温度对土壤呼吸速率的影响比高温时更为显著。②当土壤温度趋于一致时，土壤呼吸速率与土壤含水量显著正相关。当土壤温度较高时，土壤含水量对土壤呼吸速率的响应更明显，这时土壤含水量成为影响土壤呼吸的主导因素。③土壤呼吸关于土壤温度、土壤含水量和气温的多元回归分析模型可解释土壤呼吸速率的 83.6%，该模型比单变量模型能更好地解释土壤呼吸的变化。④考虑对土壤呼吸温度敏感因子  $Q_{10}$  有影响的水热因子，结果表明， $Q_{10}$  随气温和土壤温度的升

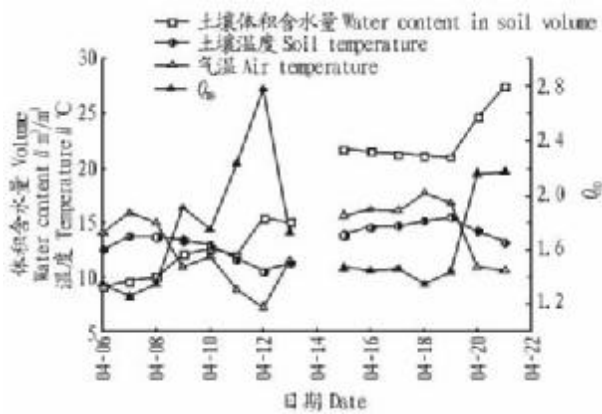


图3 4月6~21日 $Q_{10}$ 与日平均气温、5 cm处土壤温度和土壤体积含水量间关系

Fig. 3 Relationship between  $Q_{10}$  with daily average air temperature, soil temperature and soil water volume capacity in 5 cm depth soil from April 6<sup>th</sup> to 21<sup>st</sup>

高而减小,表现为土壤呼吸速率对高温的适应性;而随着土壤含水量的增加, $Q_{10}$ 呈增大趋势,表现为土壤呼吸速率在一定土壤水分范围内随水分的短时激增而迅速增大。⑤由于土壤含水量对土壤呼吸速率的作用,混淆了土壤呼吸对温度变化的响应,所以考虑水热因子的土壤呼吸温度敏感度要比仅考虑温度作用的温度敏感度偏低。

(2) 土壤呼吸是个复杂的生物地球化学过程,很多因素都可以直接或间接地对土壤 $CO_2$ 产生和排放产生影响。尽管Van't Hoff提出的 $Q_{10}$ 模型与实际值相比有偏差,但它仍在土壤呼吸过程中广泛应用<sup>[20-21]</sup>。土壤呼吸温度敏感因子 $Q_{10}$ 值存在一定的时间和空间变异<sup>[22]</sup>,一般温度较低的冬季 $Q_{10}$ 值明显高于温度较高的夏季的<sup>[23]</sup>。Kirschbaum在实验室控制培养试验后也发现 $Q_{10}$ 值在低温下较高,而在高温下较低<sup>[22]</sup>。土壤湿度是影响土壤呼吸的又一主要因素,它也会对 $Q_{10}$ 产生影响,有研究发现降雨量较大年份的 $Q_{10}$ 值总是明显高于干旱年份。土壤呼吸对温度升高适应的现象非常普遍,产生这一现象的原因主要包括主导因子地位的转变和影响因子之间的协同变化<sup>[24]</sup>,这可能与温度、湿度以外的土壤理化性质等因素的空间分布有关。有研究表明,土壤有机碳数量与结构也是影响土壤呼吸温度敏感性的重要因素<sup>[25]</sup>。此外,由于植物生长速率与土壤呼吸作用是紧密联系的过程,生物因子也可明显影响土壤呼吸作用的温度敏感性,作物NPP和生物量均可影响土壤呼吸作用<sup>[26]</sup>。由于 $Q_{10}$ 与土壤呼吸的非线性关系, $Q_{10}$ 的微小差异便会导致估算的土壤呼吸的显著变化。

(3) 试验只探讨了水热条件对土壤呼吸的影响,没有涉及到微生物的生物多样性,以及生物量、土壤养分、土壤物理性质等因素,而这些因素在作物生长季或多或少都要发生一些变化,这势必会直接或间接影响土壤呼吸,而目前关于这些因素对土壤呼吸的贡献仍不明确,且各因素对温度的敏感性又不同,所以关于土壤呼吸温度敏感性的其他修正的研究

还有待深入。

## 参考文献

- [1] RAICH J W, POTTER C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1995, 9: 23-26.
- [2] 刘允芬. 农业生态系统碳循环研究 [J]. *自然资源学报*, 1995, 10 (1): 1-8.
- [3] RAICH J W, SCHLESINGER W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus*, 1992, 44 (B): 81-99.
- [4] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水热条件对锡林河流域典型草原退化群落土壤呼吸的影响 [J]. *植物生态学报*, 2003, 27 (2): 202-209.
- [5] RAICH J W, TUFEKCI OGLU A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 71-90.
- [6] 温学发, 孙晓敏, 刘允芬, 等. 线性指数回归方法对土壤呼吸 $CO_2$ 扩散速率估算的影响 [J]. *植物生态学报*, 2007, 30 (3): 380-385.
- [7] 陈述悦, 李俊, 陆佩玲, 等. 华北平原麦田土壤呼吸特征 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15 (9): 1552-1560.
- [8] ZAK D R, HOLMES W E, MACDONALD N W, et al. Soil temperature, matrix potential, and the kinetics of microbial respiration and nitrogen mineralization [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1999, 63: 575-584.
- [9] VAN T HOFF J H. Lectures on theoretical and physical chemistry. Part I. Chemical dynamics [M]. London: Edward Arnold, 1898: 224-229.
- [10] SINGH J S, GUPTA S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems [J]. *Bot Rev*, 1977, 43: 449-528.
- [11] GULLEDGE J, SCHIMMEL J P. Controls on soil carbon dioxide and methane fluxes in a variety of Taiga forest stands in interior Alaska [J]. *Ecosystems*, 2000, 3: 269-282.
- [12] XU M, QI Y. Soil surface  $CO_2$  efflux and its spatial and temporal variation in a young ponderosa pine plantation in California [J]. *Glob Change Biol*, 2001, 7: 667-677.
- [13] QI Y, XU M, WU J G. Temperature sensitivity of soil respiration and its effects on ecosystem carbon budget: nonlinearity begets surprises [J]. *Ecological Modeling*, 2002, 153: 131-142.
- [14] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理 [J]. *生态学报*, 2003 (5): 972-978.
- [15] GULLEDGE J, SCHIMMEL J P. Controls on soil carbon dioxide and methane fluxes in a variety of taiga forest stands in Interior Alaska [J]. *Ecosystems*, 2000, 3: 269-282.
- [16] DÖRR H, MÜNNICH K O. Annual variation in soil respiration in selected areas of the temperate zone [J]. *Tellus*, 1987, 39 (B): 114-121.
- [17] LUO Y Q, WAN S Q, HUI D F, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie [J]. *Nature*, 2001, 413: 622-625.
- [18] KIRSCHBAUM, WILL M U F. Changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming [J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 21-51.
- [19] 王鹤松, 张劲松, 孟平, 等. 华北低山丘陵区冬小麦田土壤呼吸变化规律及其影响机制 [J]. *中国农业气象*, 2007, 28 (1): 21-24.
- [20] HEIMANN M, KEELING C D, TUCKER C J. A three-dimensional model of atmospheric  $CO_2$  transport based on observed winds: 3. Seasonal cycle and synoptic timescale variations [M]. Washington D C: Geophys. Monogr., no 55. American Geophysical Union, 1989: 277-303.
- [21] RAICH J W, RASTETTER E B, MELILLO J M, et al. Potential net primary productivity in South America: application of a global model [J]. *Ecol Appl*, 1991 (1): 399-429.
- [22] KIRSCHBAUM M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage [J]. *Soil Biol Biochem*, 1995, 27: 753-760.
- [23] KUTSCH W L, KAPPEN L. Aspects of carbon and nitrogen cycling in soils of the Bornhöved Lake district. II. Modeling the influence of temperature increase on soil respiration and organic carbon content in arable soils under different managements [J]. *Biochem*, 1997, 39: 207-224.
- [24] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 土壤呼吸对温度升高的适应 [J]. *生态学报*, 2004, 24 (11): 2649-2655.
- [25] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 不同土地利用下土壤呼吸温度敏感型差异及影响因素分析 [J]. *环境科学学报*, 2005, 25 (11): 1537-1542.
- [26] 韩广轩, 周广胜, 许振柱, 等. 玉米地土壤呼吸作用对土壤温度和生物因子协同作用的响应 [J]. *植物生态学报*, 2007, 31 (1): 363-371.