

# 不同施氮水平对冬小麦生长期土壤呼吸的影响

金皖豫 李 铭 何杨辉 杜正刚 邵钧炯 张国栋 周灵燕 周旭辉\*

复旦大学教育部生物多样性与生态工程重点实验室, 生物多样性科学研究所, 上海 200433

**摘 要** 在目前全球氮沉降不断增加的背景下, 研究农田土壤呼吸对氮沉降的响应有助于理解未来生态系统碳循环对全球变暖的潜在影响。为探讨不同施氮浓度对华东地区冬小麦(*Triticum aestivum*)生长期土壤呼吸的影响, 该实验设计了对照组(不施加氮肥)和3种浓度施氮处理组(低浓度施氮 $15\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 中等浓度施氮 $30\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ , 高浓度施氮 $45\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )。使用便携式土壤 $\text{CO}_2$ 通量观测仪LI-8100测定不同施氮浓度处理下冬小麦生长期(2013年12月至2014年5月)的土壤呼吸速率, 并探讨土壤呼吸与土壤温度、湿度等环境因素的关系。结果表明: 低、中、高3种浓度施氮处理的土壤呼吸速率平均值分别为 $5.29$ 、 $6.17$ 和 $6.75\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 与对照组(土壤呼吸速率平均值为 $4.90\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )相比, 分别增加了7.8%、23.6%和37.8%; 地上生物量分别增加39.9%、104.4%和200.2%, 并与冬小麦生长季的总土壤呼吸正相关。5 cm深度土壤的温度与土壤呼吸速率呈指数关系( $p < 0.05$ ), 土壤呼吸季节变化的65%–75%由土壤温度引起, 其温度敏感性为2.09–2.32。结果表明, 添加氮肥促进了植物的生长, 增加了生物量, 从而增加了冬小麦农田的土壤呼吸速率。

**关键词** 施氮梯度, 冬小麦, 土壤呼吸

**引用格式:** 金皖豫, 李铭, 何杨辉, 杜正刚, 邵钧炯, 张国栋, 周灵燕, 周旭辉 (2015). 不同施氮水平对冬小麦生长期土壤呼吸的影响. 植物生态学报, 39, 249–257. doi: 10.17521/cjpe.2015.0024

## Effects of different levels of nitrogen fertilization on soil respiration during growing season in winter wheat (*Triticum aestivum*)

JIN Wan-Yu, LI Ming, HE Yang-Hui, DU Zheng-Gang, SHAO Jun-Jiong, ZHANG Guo-Dong, ZHOU Ling-Yan, and ZHOU Xu-Hui\*

Ministry of Education Key Laboratory for Biodiversity Science and Ecological Engineering, Institute of Biodiversity Science, Fudan University, Shanghai 200433, China

### Abstract

**Aims** Our objective was to explore the effects of different levels of nitrogen (N) fertilization on soil respiration and its temperature sensitivity during growing season in winter wheat (*Triticum aestivum*) in East China.

**Methods** Three levels of N fertilization, N1 ( $15\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ), N2 ( $30\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ), and N3 ( $45\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ), and the control group (CK) were set up in winter wheat fields. The LI-8100 Automated Soil  $\text{CO}_2$  Flux System was used to measure soil respiration rate during the growing season (December 2013 to May 2014) of winter wheat.

**Important findings** During the growing season of winter wheat, mean soil respiration rates of N1, N2 and N3 treatments were  $5.29$ ,  $6.17$  and  $6.75\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , respectively, which were 7.8%, 23.6% and 37.8% greater than that of the CK ( $4.90\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Compared to CK, the N1, N2, and N3 treatments increased the aboveground biomass by 39.9%, 104.4%, and 200.2%, respectively, and the increases were significantly correlated with total soil respiration during the growing season. Soil respiration increased exponentially with soil temperature at the depth of 5 cm, which explained 65%–75% of the variation ( $p < 0.05$ ). The temperature sensitivity of soil respiration ( $Q_{10}$ ) calculated based an exponential equation was between 2.09 and 2.32. These results suggested that nitrogen fertilization promoted plant growth, significantly increased biomass of winter wheat, and stimulated the soil respiration.

**Key words** N fertilization levels, *Triticum aestivum*, soil respiration

**Citation:** Jin WY, Li M, He YH, Du ZG, Shao JJ, Zhang GD, Zhou LY, Zhou XH (2015). Effects of different levels of nitrogen fertilization on soil respiration during growing season in winter wheat (*Triticum aestivum*). *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 249–257. doi: 10.17521/cjpe.2015.0024



全球气候变化的主要原因是工业革命以来温室气体(CO<sub>2</sub>、N<sub>x</sub>O、CH<sub>4</sub>等)排放量的急剧增加(IPCC, 2013)。全球生态系统每年经土壤呼吸向大气释放的碳为68–98 Pg (Schlesinger & Andrews, 2000; Bond-Lamberty & Thomson, 2010), 是工业革命以来温室气体(CO<sub>2</sub>、N<sub>x</sub>O、CH<sub>4</sub>等)排放量的10多倍(Marland & Rotty, 1984)。在各类生态系统中, 农田生态系统土壤碳贮量约为170 Pg, 占全球土壤碳储量的10%以上(Paustian *et al.*, 1997)。如此巨大的碳贮量使得农田生态系统土壤呼吸的细微变化都有可能影响大气CO<sub>2</sub>浓度。因此, 农田土壤呼吸在全球碳循环中扮演着非常重要的角色。

氮沉降的增加是全球变化的热点问题(刘博奇等, 2012)。目前关于氮沉降对土壤呼吸影响的研究结果并不一致(Schulze, 2006; 宋学贵等, 2007; Mo *et al.*, 2008)。从机理上讲, 土壤氮素的增加可能通过两条途径影响土壤呼吸速率: 一条途径是土壤中可利用性氮的增加能促进植物的光合作用, 从而提高作物产量的同时, 促进根的自养呼吸, 并为异养呼吸提供更多的底物(Butnor *et al.*, 2003; Zhou *et al.*, 2014); 另一条途径是土壤氮素的增加会改变土壤微生物的组成和活性, 从而影响土壤有机质的矿化和土壤呼吸速率(Hadas *et al.*, 2004; Janssens *et al.*, 2010)。在全球尺度上, 目前已有大量模型研究指出, 氮沉降可能使植物生长所固定的碳超过土壤有机质分解所释放的碳, 从而改变全球碳的净收支(IPCC, 2013)。

目前绝大多数研究在测量土壤呼吸时关注的时段是春季到秋季, 而很少关注冬季的土壤呼吸(王妮等, 2007)。然而有研究指出, 冬季的土壤呼吸量可占到全年的14%–30% (Jones, 1999), 因此是生态系统碳收支的重要组成部分(Monson *et al.*, 2005; Schimel *et al.*, 2006)。上海市崇明地区水稻(*Oryza sativa*)种植面积达2.7万hm<sup>2</sup> (管帮超, 2008), 是上海本地粮食供应的一大来源(施庆等, 2008)。同时, 该地区农田在冬季种植小麦(*Triticum aestivum*)。然而, 关于该地区农田土壤呼吸的状况却未见报道。

因此, 在氮沉降背景下对崇明地区农田冬季土壤呼吸及其调控因子进行研究, 对于深入理解生态系统碳-氮耦合机制, 以及陆地生态系统过程对气候变化的响应机制具有重要意义, 同时也能为估算该地区农田土壤的碳汇能力提供重要信息。本研究

以施用不同水平氮肥的方式模拟氮沉降的不同强度, 并通过监测不同施氮水平下崇明地区冬季小麦田土壤呼吸的时间动态, 探讨土壤呼吸对氮添加的响应情况, 以及温度和湿度等环境因子在其中所起的作用。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验设计

本实验在上海市崇明岛前进农场实验田(121.61° E, 31.64° N)进行。实验田所在区域属于亚热带季风气候, 年平均气温为15.3 °C, 年降水量为1 003.7 mm。11月到翌年2月为冬季, 2–6月初为春季。土壤属性为沙砾夹黄土, 地下水埋深偏高, 一般在0.7–0.8 m, 部分实验田沙性重, pH值为8.0左右。土壤肥力指标多处于中等偏低水平, 速效氮含量为90 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效磷含量为20 mg·kg<sup>-1</sup>, 有效钾含量为90 mg·kg<sup>-1</sup>, 有机质含量为1.1% (张建汉等, 2008<sup>①</sup>)。

2013年11月27日在实验田播种小麦, 2014年6月4日收获小麦, 在小麦的整个生长期, 无人为灌溉。根据当地农田的正常施肥量(30 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>), 本实验共设置3个处理组和1个对照组, 处理组所施氮肥为尿素(N素质量分数为46%), 施氮量分别为15 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> (N1)、30 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> (N2)、45 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> (N3), 对照组不施氮(CK)。由于处理组以固体的形式施加尿素, 因此对照组中不额外添加水分。施氮频率按照农田常规的施肥频率, 每年施肥4次(3、5、7、9月初), 其中小麦生长期施肥2次。每一实验组重复4个样地, 每个样地面积为5 m × 5 m = 25 m<sup>2</sup>, 样地间的缓冲带宽约1 m。

### 1.2 数据收集及分析

#### 1.2.1 土壤呼吸

在每个5 m × 5 m样地中设置1个土壤呼吸基座(内径20 cm, 高度12 cm), 每个基座深入土壤7 cm, 基座内的枯枝落叶保持自然状态。土壤呼吸速率采用闭路式土壤碳通量测量系统进行测定, 测定仪器型号为LI-8100 (LI-COR, Lincoln, USA)。每次测定前24 h去除基座内的一切植物活体。从2013年12月至2014年5月, 选取晴天或者多云天气(如遇下雨,

① 张建汉, 孙永斌, 凌兵, 李有清, 蔡明清, 顾树平, 梅锦培 (2008). 上海市长江农场小麦高产种植. 见: 2008 年全国小麦栽培科学学术研讨会论文集. 扬州. 297–298.



则至少在雨停后24 h才开始测量, 尽量避免降水的干扰), 每两周测定一次土壤呼吸速率, 测定时间段选在气温相对变化幅度较小的9:00–15:00, 每次测量时间为120 s。

### 1.2.2 土壤温度和湿度

在测定土壤呼吸速率的同时, 利用LI-8100土壤呼吸系统的温度和湿度探头配件, 同步测定地下5 cm深处的土壤温度和含水量。

此外, 在实验田里还安装有HOBO土壤温度和湿度系统(S-SMD-M005, Onset Computer Corporation, Bourne, USA), 该系统可对土温和水温进行连续监测。系统的采集频率为30 min一次。

### 1.2.3 大气温度及降水量

大气温度及降水量数据来自中国气象数据网前进农场气象站点。

### 1.2.4 生物量

在生长期结束前对冬小麦地上生物量进行取样。取样框面积为50 cm × 50 cm, 取样时将取样框随机置于每个样地内, 把框内的小麦从贴近地表处取出, 放入密封的塑料袋。回实验室后, 在105 °C下杀青, 然后将所有植株样品在80 °C烘干48 h以上, 直至恒重, 然后称量干燥后的总质量。

### 1.2.5 数据分析

本实验测定的数据统一用Microsoft Excel 2010 进行整理, 并用SPSS 16.0软件进行单因素方差分析, 利用LSD法进行多重比较( $\alpha = 0.05$ ), 以检验不同处理下土壤呼吸速率的差异。为了分析土壤呼吸速率与土壤温度的关系, 将2013年12月至2014年5月土壤呼吸速率( $R_s$ )及相应的5 cm深处土壤温度( $T$ )进行非线性回归( $R_s = ae^{bT}$ ), 其中 $a$ 表示温度为0 °C时的土壤呼吸速率,  $b$ 为温度反应系数。由 $b$ 值可计算土壤呼吸的温度敏感性 $Q_{10}$ :  $Q_{10} = e^{10b}$ 。呼吸总量按下式计算:

$$M = \sum_i \frac{(R_s[i+1] + R_s[i])(t[i+1] - t[i])}{2} \times 24 \times 3600 \times 10^{-6}$$

其中,  $M$ 为土壤呼吸累计量( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ ),  $R_s$ 为土壤呼吸速率( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $i$ 表示第几次取样,  $t$ 为取样时间(播种后天数)。

## 2 结果

### 2.1 大气及土壤温度和湿度变化

由图1可知, 2013年12月至2014年5月, 小麦生

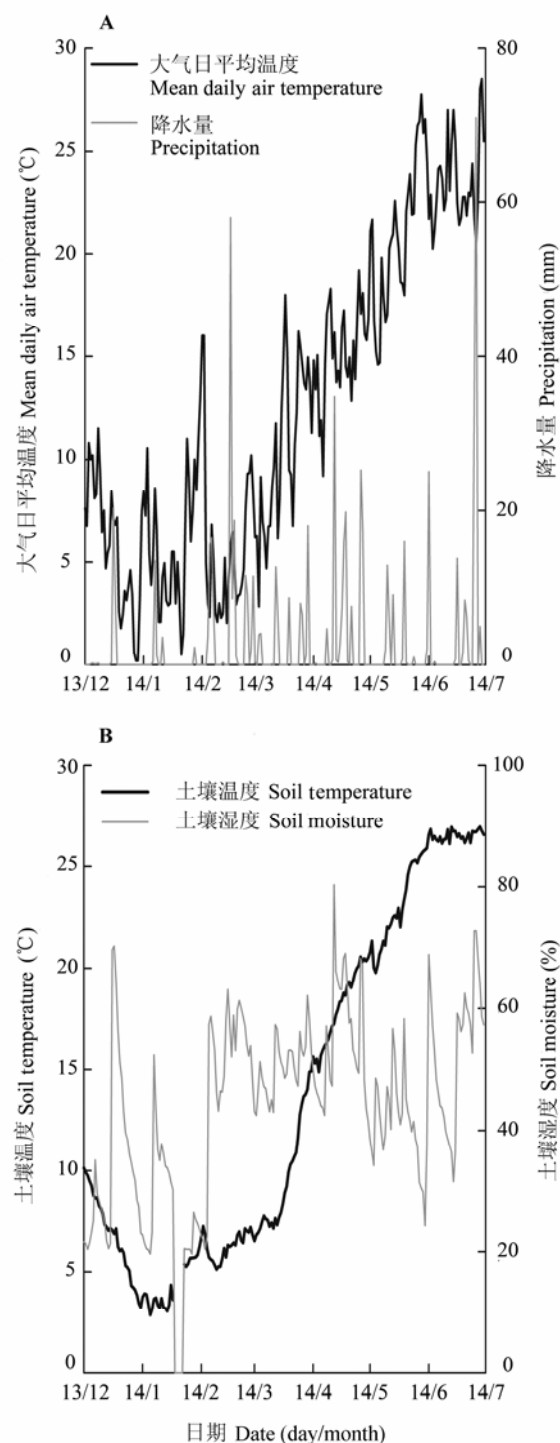


图1 崇明前进农场冬小麦(*Triticum aestivum*)生长期期间(2013年12月至2014年5月)温度和湿度情况。A, 大气日平均温度和降水记录。B, 5 cm深处土壤日平均温度和含水量变化情况。

Fig. 1 Climate conditions (temperature and moisture) of Qianjin Farm, Chongming Island during the growing season (from December 2013 to May 2014) of winter wheat (*Triticum aestivum*). A, Record of mean daily air temperature and precipitation. B, Changes in daily mean temperature and soil moisture at 5 cm soil depth.



表1 各生长阶段不同施氮水平的土壤呼吸总量(平均值±标准误差)

Table 1 Cumulative soil respiration at different growth stages under different levels of nitrogen fertilization ( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$ ) (mean  $\pm$  SE)

	播种出苗期 Planting and seeding stage	返青拔节期 Dressing at jointing stage	孕穗抽穗期 Booting to heading stage	开花成熟期 Flowering and mature stage	总生长期 Whole growing season
CK (Control)	$1.66 \pm 0.09^c$	$3.47 \pm 0.27^b$	$5.51 \pm 0.46^c$	$9.26 \pm 0.83^c$	$18.53 \pm 1.27^c$
N1 ( $15 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )	$1.78 \pm 0.14^{bc}$	$3.57 \pm 0.21^b$	$5.95 \pm 0.45^{bc}$	$10.69 \pm 0.83^c$	$20.26 \pm 1.51^{bc}$
N2 ( $30 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )	$2.07 \pm 0.19^a$	$3.99 \pm 0.36^{ab}$	$6.92 \pm 0.53^{ab}$	$12.96 \pm 1.17^{ab}$	$23.79 \pm 2.13^{ab}$
N3 ( $45 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )	$2.36 \pm 0.18^a$	$4.53 \pm 0.41^a$	$7.77 \pm 0.73^a$	$13.28 \pm 1.21^a$	$25.87 \pm 2.08^a$

不同字母表示同一时期不同施氮处理间的土壤呼吸差异显著( $\alpha = 0.05$ )。

Different letters indicate significant differences of soil respiration among different levels of nitrogen fertilization treatment in the same period ( $\alpha = 0.05$ ).

长期降水量为649 mm, 大于15 mm的降雨15次, 期间最高降水峰值(35 mm)在7月12日。生长期最高气温33.2 °C, 最低气温-5.7 °C, 日平均气温在冬小麦播后第55天(1月21日)达到最低(0.5 °C), 之后呈逐步上升的趋势(图1A)。

冬小麦生长期, 土壤5 cm深处日平均温度整体上先下降后上升(图1B)。在1月5日达到最低值2.8 °C, 然后缓慢上升。到4月, 气温迅速上升, 至6月2日达到最高值26.8 °C。与土壤温度的季节动态变化不同, 各处理土壤5 cm深处含水量与降雨情况基本一致, 两者都无明显变化规律(图1A、1B)。但在2014年2月由于持续降水, 土壤含水量保持在较高水平。

2.2 不同施氮水平下土壤呼吸速率的季节变化

土壤呼吸的季节变化基本与5 cm深度土壤温度的变化一致(图1B, 图2)。在播种后初期(2013年12月至2014年1月), 温度逐渐下降, 土壤呼吸速率也随之降低。2014年3月以后, 天气回暖, 土壤呼吸速率也增加。同时, 土壤呼吸的季节动态也与冬小麦的生长阶段有关, 总体上呼吸量随小麦的生长逐渐增加。在播种出苗期, 土壤呼吸量很小, 仅占生长期土壤呼吸总量的5%, 到开花成熟期, 土壤呼吸量达到生长期土壤呼吸总量的52%。在播种出苗、返青拔节、孕穗抽穗、开花成熟这4个时期, 播种出苗期和返青拔节期是在当地的冬季, 因此各处理冬季的土壤呼吸分别占到整个生长期的27.7%、26.4%、25.5%和26.6%。

随着施氮量的增加, 这种温度对土壤呼吸的促进效应更为明显(图2)。2014年3月以后, 各处理与对照间土壤呼吸速率的差异显著( $p < 0.05$ )。生长初期, 温度较低, 虽然1月17日N3处理的土壤呼吸速率较对照增加最多, 达到118%, 但整体数值偏低。整个生长期, 各施氮处理(N1、N2和N3)的平均土壤呼吸为( $5.29 \pm 0.30$ )、( $6.17 \pm 0.29$ )和( $6.75 \pm 0.28$ )

$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 分别比对照组CK ( $4.90 \pm 0.35$ )  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )高出7.84%、23.57%和37.78%。N1、N2和N3的生长期土壤呼吸总量分别为( $20.26 \pm 1.51$ )、( $23.79 \pm 1.51$ )和( $25.87 \pm 1.51$ )  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$ , 分别比CK增加了9.34%、28.34%和39.61% (表1)。在不同生长阶段, 土壤呼吸总量均为N3 > N2 > N1 > CK, 并且这种差异在孕穗抽穗期最为明显, N3比CK增加43%。

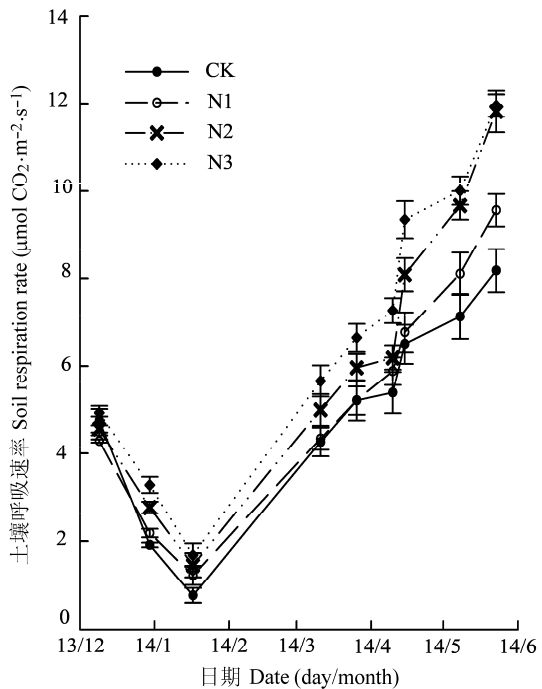


图2 不同施氮水平下冬小麦(*Triticum aestivum*)生长期呼吸速率的季节性变化(平均值±标准误差)。CK, 对照组; N1, 施氮浓度 $15 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ; N2, 施氮浓度 $30 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ; N3, 施氮浓度 $45 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

Fig. 2 Seasonal changes in the rate of soil respiration in winter wheat (*Triticum aestivum*) during growing season under different levels of nitrogen fertilization (mean  $\pm$  SE). CK, control group; N1, N fertilization at  $15 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ; N2, N fertilization at  $30 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ; N3, N fertilization at  $45 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ .



### 2.3 不同施氮水平下土壤呼吸速率和土壤温度的关系

国内外学者一般采用线性模型、二次方程、指数模型等多种方法对土壤呼吸和温度关系进行拟合, 在本研究中, 指数模型拟合效果最好。用指数模型的拟合结果表明, 对照CK、处理N1、N2、N3的土壤呼吸速率( $R_s$ )均与5 cm深处的土壤温度( $T$ )呈指数关系(图3)。对照CK、处理N1、N2、N3指数方程的 $R^2$ 分别为0.65、0.70、0.75和0.74。对照CK、处理N1、N2和N3的土壤呼吸温度敏感性系数 $Q_{10}$ 分别为2.09、2.28、2.32和2.25。

### 2.4 施氮处理对冬小麦地上生物量的影响以及与土壤呼吸的关系

施氮处理明显促进了冬小麦的生长(图4)。N1、N2、N3处理之后的地上总生物量分别比CK增加了

40%、104%、200%。而且冬小麦地上生物量的增加与土壤呼吸总量的增加有密切的关系( $R^2 = 0.86$ ,  $p < 0.05$ , 图5)。

## 3 讨论

### 3.1 施氮对冬小麦土壤呼吸的影响

目前在国内外所做研究中, 氮添加对土壤呼吸的影响并不一致。在一些实验中, 施氮抑制了土壤呼吸(Janssens *et al.*, 2010), 而在另一些实验研究中, 施氮促进了土壤呼吸(Bowden *et al.*, 2004; Burton *et al.*, 2004)或没有反应(Allison *et al.*, 2008)。在本实验中, 施氮处理明显促进了冬小麦生长期的土壤呼吸, 这与Ding等(2007)对小麦-玉米(*Zea mays*)轮作田土壤呼吸的研究结果一致。然而, 当前在施氮对农田生态系统土壤呼吸影响的研究中, 更多考虑的是不

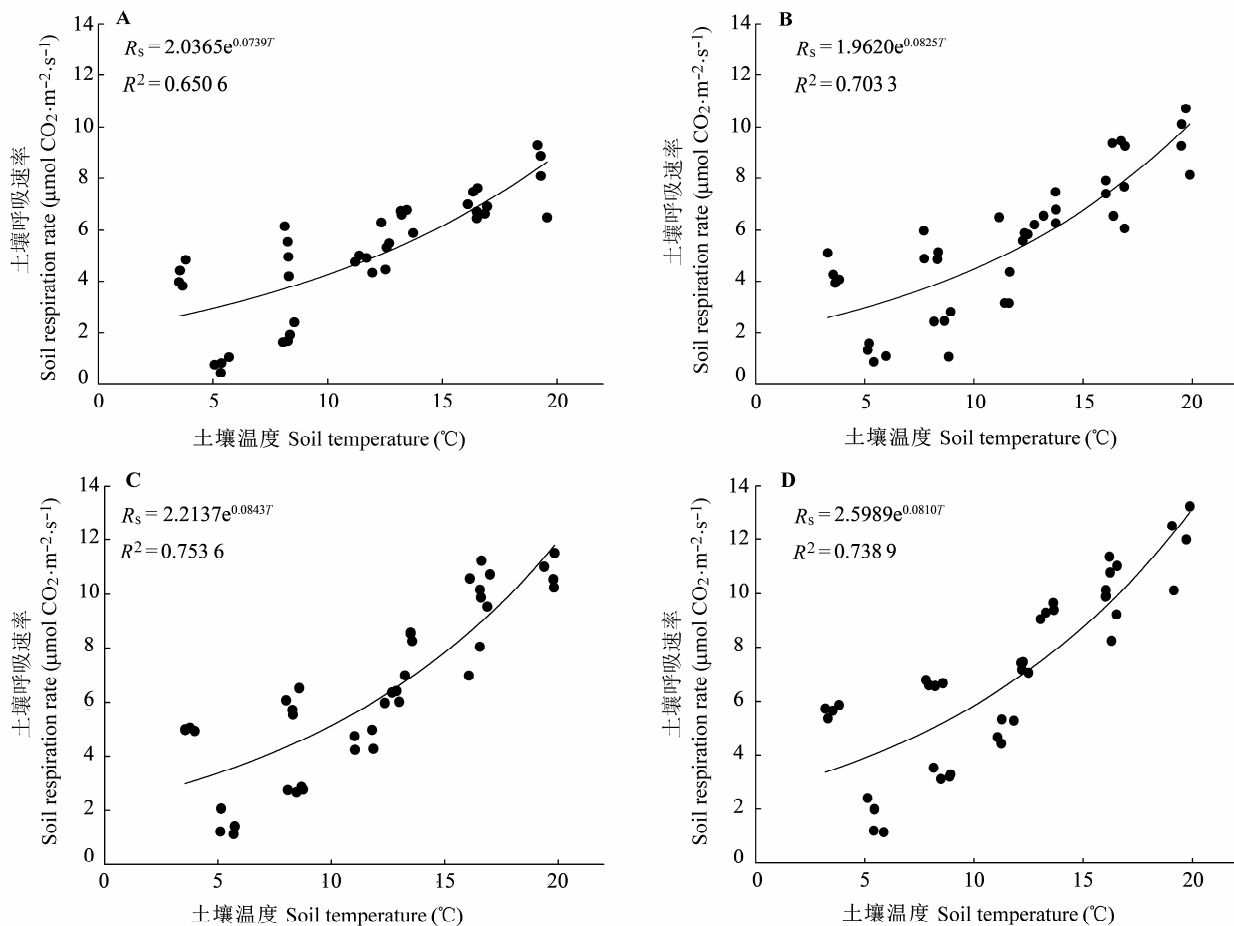


图3 采用指数方程对土壤呼吸速率( $R_s$ )与土壤温度( $T$ )间关系的拟合。A, 对照组CK。B, N1, 施氮浓度为 $15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。C, N2, 施氮浓度为 $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。D, N3, 施氮浓度为 $45 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。每一个数据点是一个观测值。

**Fig. 3** Relationship between soil respiration rate ( $R_s$ ) and soil temperature ( $T$ ) fitted with an exponential model. A, Control group, CK. B, N1, N fertilization at  $15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ . C, N2, N fertilization at  $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ . D, N3, N fertilization at  $45 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ . Each value represents one measurement.



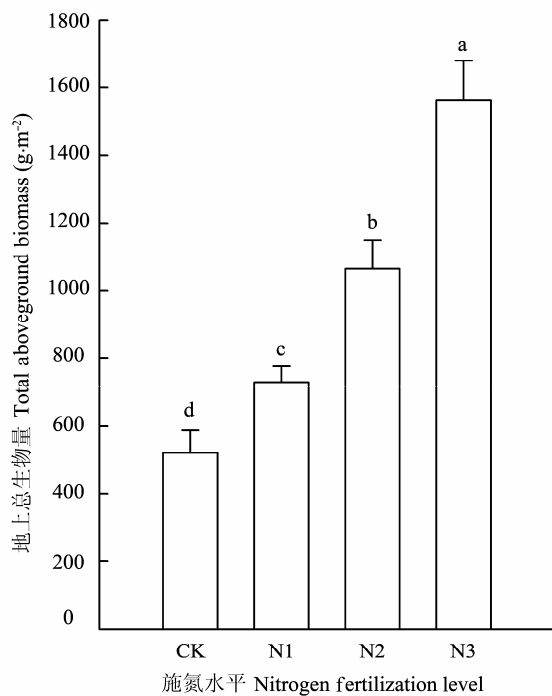


图4 不同施氮水平下冬小麦(*Triticum aestivum*)地上总生物量(平均值±标准误差)。CK, 对照组; N1, 施氮浓度为15 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>; N2, 施氮浓度为30 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>; N3, 施氮浓度为45 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。不同小写字母表示不同处理之间差异显著。

**Fig. 4** Total aboveground biomass of winter wheat (*Triticum aestivum*) under different levels of nitrogen fertilization (mean ± SE). CK, control group; N1, N fertilization at 15 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>; N2, N fertilization at 30 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>; N3, N fertilization at 45 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>. Different lowercase letters denote significant differences among different treatments.

同配比氮肥(高会议等, 2009), 或其他因素, 如水分、CO<sub>2</sub>、火烧、除草等与施氮的联合影响(Xu & Wan, 2008; Deng *et al.*, 2010; 李伟等, 2013), 多梯度的施氮实验在森林(涂利华等, 2009)和草地中(Han *et al.*, 2012)进行得较多, 在农田生态系统中较少。如刘合明和刘树庆(2008)研究了4种梯度的氮肥施用对华北平原冬小麦土壤呼吸的影响, 发现施氮使土壤呼吸总量平均提高了22%。在本实验中, 冬小麦土壤呼吸速率随着施氮水平的增加而增加, 低、中、高浓度施氮处理分别使土壤呼吸速率增加了7.84%、23.57%和37.78%。这种不同施氮水平对土壤呼吸影响的差异, 在小麦的不同生长阶段都有所表现。施氮促进土壤呼吸可能有多方面的原因: 土壤可利用性氮的增加能促进植物的光合作用, 光合作用的增加一方面为自养和异养呼吸提供了更多的底物(刘合明和刘树庆, 2008), 另一方面也增大了

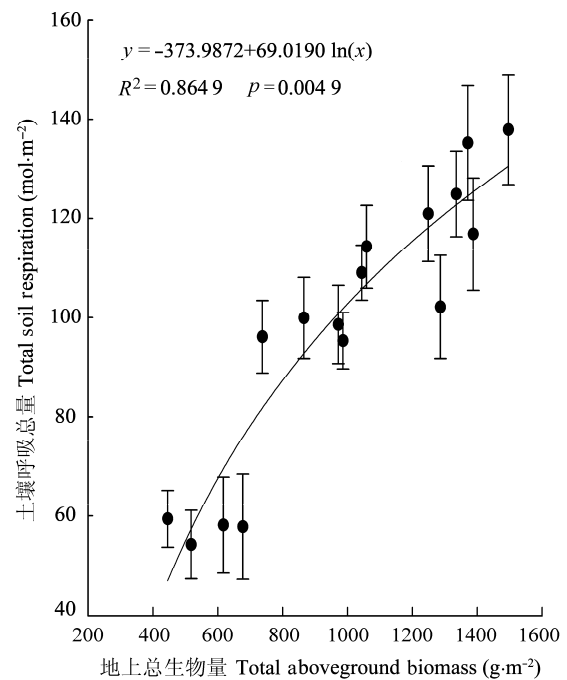


图5 冬小麦(*Triticum aestivum*)生长期土壤呼吸与地上总生物量的关系(平均值±标准误差)。

**Fig. 5** Relationship between soil respiration and total aboveground biomass in winter wheat (*Triticum aestivum*) during growth season (mean ± SE).

植物对营养和水分的需求, 从而促进了根系生长, 增加了根系呼吸(Zhou *et al.*, 2009)。同时, 添加氮肥还可能增加根际微生物的数量和活性(Johnson *et al.*, 1994; Drenovsky *et al.*, 2004), 从而增加微生物呼吸速率(Bowden *et al.*, 2000; Morell *et al.*, 2010)。

### 3.2 土壤呼吸与土壤温度和湿度的关系

土壤水热环境是影响土壤呼吸速率的关键因子(骆亦其和周旭辉, 2007; 刘爽等, 2010)。在崇明地区, 气候湿润, 雨量充沛, 土壤湿度在绝大部分时间保持在较高水平(图1B), 因此土壤湿度不是土壤呼吸的限制因子。在一般情况下, 冬季温度较低, 土壤微生物活性不强, 因此很多研究都忽略了冬季土壤呼吸对全年土壤呼吸总量的贡献。然而, 也有一些研究指出, 冬季土壤呼吸可占到全年土壤呼吸总量的14%–30%, 因此对整个生态系统的碳收支有十分重要的贡献(Jones, 1999; Wickland *et al.*, 2001; Uchida *et al.*, 2005)。同时, 这方面的研究主要集中在苔原、冻土及高山草甸等较为寒冷的生态系统类型(Laternser & Schneebeli, 2003; Mote *et al.*, 2005)。



本研究的结果则显示,在崇明冬小麦农田中,冬季土壤呼吸占到整个生长期总呼吸的25%以上。这表明在该地区农田中,冬季土壤呼吸有很大的贡献。

土壤呼吸与土壤温度之间常常呈现线性、指数或二次方程关系(骆亦其和周旭辉, 2007)。在本研究的对照组及各处理组中,土壤呼吸与5 cm深处土壤温度间的指数型关系表明土壤呼吸动态变化的65.1%–75.4%是由土壤温度引起的(图3),表明土壤温度是影响实验地土壤呼吸速率季节性变化的主要因素。土壤呼吸与土壤温度间的这种关系,在其他不少研究中也有发现(方精云和王妮, 2007; 张耀鸿等, 2011),温度的上升之所以促进土壤呼吸,是因为:一方面,土壤温度增加可促进植物根系生长,从而增加自养呼吸;另一方面,温度的增加能够促进微生物及土壤酶的活性,从而加速有机质分解,增加异养呼吸(陈述悦等, 2004)。

### 3.3 土壤呼吸与地上生物量的关系

经氮添加处理的N1、N2和N3的总生物量分别比CK增加了39%、108%和172%,其中各组小麦生长期土壤总呼吸与生物量的关系密切(图4),生物量和总呼吸量均因氮添加处理而增加(表1; 图4)。各处理在孕穗抽穗期土壤呼吸均增强(表1; 图2),可能是由于单位面积生物量的增加导致单位面积根系呼吸速率增加(寇太记等, 2008)。而经施氮处理的呼吸值高于CK组可能是因为施氮条件下植物光合作用增强、生物量增加,为维持植株正常生长,根呼吸增强(Ainsworth & Long, 2005)。植物生长所需要的矿质营养和水分依赖根系从土壤中吸收得到,而根系吸收养分和水分需要消耗代谢产物,这部分能量则由植物地上部分的同化作用提供。所以植物生长与土壤呼吸是相互协调和统一的。

## 4 结论

1)氮肥的施用能够促进崇明地区冬小麦农田土壤呼吸速率,并且这种促进作用随着施氮量的增加而增加。

2)土壤5 cm深处的温度是该地区冬小麦农田土壤呼吸速率季节性变化的主要影响因子( $R^2 = 0.65\text{--}0.75$ ,  $p < 0.05$ ),冬季土壤呼吸占到整个生长期的25%以上。

3)施氮处理同时也增加了冬小麦的地上生物量,并且地上生物量的增加与冬小麦生长期土壤呼

吸总量的增加密切相关。

**基金项目** 国家自然科学基金(31370489和31100352)、上海高校特聘教授(东方学者)岗位计划和中组部青年千人计划。

**致谢** 感谢复旦大学聂园园、蒋利玲、高杰、卢蒙在工作中给予的帮助。

## 参考文献

- Ainsworth EA, Long SP (2005). What have we learned from 15 years of free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE)? A Meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO<sub>2</sub>. *New Phytologist*, 165, 351–371.
- Allison SD, Czimczik CI, Treseder KK (2008). Microbial activity and soil respiration under nitrogen addition in Alaskan boreal forest. *Global Change Biology*, 14, 1156–1168.
- Bond-Lamberty B, Thomson A (2010). Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature*, 464, 579–582.
- Bowden RD, Davidson E, Savage K, Arabia C, Steudler P (2004). Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest. *Forest Ecology and Management*, 196, 43–56.
- Bowden RD, Rullo G, Stevens GR, Steudler PA (2000). Soil fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide, and methane at a productive temperate deciduous forest. *Journal of Environmental Quality*, 29, 268–276.
- Burton AJ, Pregitzer KS, Crawford JN, Zogg GP, Zak DR (2004). Simulated chronic NO<sub>3</sub><sup>-</sup> deposition reduces soil respiration in northern hardwood forests. *Global Change Biology*, 10, 1080–1091.
- Butnor JR, Johsen KH, Oren R, Katul GG (2003). Reduction of forest floor respiration by fertilization on both carbon dioxide-enriched and reference 17-year-old loblolly pine stands. *Global Change Biology*, 9, 849–861.
- Chen SY, Li J, Lu PL, Wang YH, Yu Q (2004). Soil respiration characteristics in winter wheat field in North China Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 15, 1552–1560. (in Chinese with English abstract) [陈述悦, 李俊, 陆佩玲, 王迎红, 于强 (2004). 华北平原麦田土壤呼吸特征. 应用生态学报, 15, 1552–1560.]
- Deng Q, Zhou G, Liu J, Liu S, Duan H, Zhang D (2010). Responses of soil respiration to elevated carbon dioxide and nitrogen addition in young subtropical forest ecosystems in China. *Biogeosciences*, 7, 315–328.
- Ding WX, Meng L, Yin YF, Cai ZC, Zheng XH (2007). CO<sub>2</sub> emission in an intensively cultivated loam as affected by long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer. *Soil Biology & Biochemistry*, 39, 669–679.



- Drenovsky RE, Vo D, Graham KJ, Scow KM (2004). Soil water content and organic carbon availability are major determinants of soil microbial community composition. *Microbial Ecology*, 48, 424–430.
- Fang JY, Wang W (2007). Soil respiration as a key below-ground process: Issues and perspectives. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 31, 345–347. (in Chinese with English abstract) [方精云, 王妮 (2007). 作为地下过程的土壤呼吸: 我们理解了多少? 植物生态学报, 31, 345–347.]
- Gao HY, Guo SL, Liu WZ, Che SG (2009). Soil respiration and carbon fractions in winter wheat cropping system under fertilization practices in arid-highland of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 2551–2559. (in Chinese with English abstract) [高会议, 郭胜利, 刘文兆, 车升国 (2009). 黄土旱塬区冬小麦不同施肥处理的土壤呼吸及土壤碳动态. 生态学报, 29, 2551–2559.]
- Guan BC (2008). Comparative analysis of new high-yield rice varieties Chongming County. *Shanghai Agricultural Science and Technology*, (3), 27. (in Chinese) [管帮超 (2008). 崇明县优质高产水稻新品种比较分析. 上海农业科技, (3), 27.]
- Hadas A, Kautsky L, Goek M, Kara EE (2004). Rates of decomposition of plant residues and available nitrogen in soil, related to residue composition through simulation of carbon and nitrogen turnover. *Soil Biology & Biochemistry*, 36, 255–266.
- Han Y, Zhang Z, Wang CH, Jiang FH, Xia JY (2012). Effects of mowing and nitrogen addition on soil respiration in three patches in an oldfield grassland in Inner Mongolia. *Journal of Plant Ecology*, 5, 219–228.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2013). Contribution of working group 1 to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. In: Stocker TF, Qin DH, Plattner GK, Tignor MMB, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM eds. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Janssens IA, Dieleman W, Luyssaert S, Subke JA, Reichstein M, Ceulemans R, Ciais P, Dolman AJ, Grace J, Matteucci G, Papale D, Piao SL, Schulze ED, Tang J, Law BE (2010). Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition. *Nature Geoscience*, 3, 315–322.
- Johnson D, Geisinger D, Walker R, Newman J, Vose J, Elliot K, Ball T (1994). Soil pCO<sub>2</sub>, soil respiration, and root activity in CO<sub>2</sub>-fumigated and nitrogen-fertilized ponderosa pine. *Plant and Soil*, 165, 129–138.
- Jones HG (1999). The ecology of snow-covered systems: a brief overview of nutrient cycling and life in the cold. *Hydrological Processes*, 13, 2135–2147.
- Kou TJ, Zhu JG, Xie ZB, Liu G, Zeng Q (2008). Effect of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and level of nitrogen fertilizer on root respiration and biomass of winter wheat. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 32, 922–931. (in Chinese with English abstract) [寇太记, 朱建国, 谢祖彬, 刘钢, 曾青 (2008). CO<sub>2</sub>浓度增加和不同氮肥水平对冬小麦根系呼吸及生物量的影响. 植物生态学报, 32, 922–931.]
- Latenser M, Schneebeli M (2003). Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931–1999). *International Journal of Climatology*, 23, 733–750.
- Li W, Bai E, Li SL, Sun JF, Peng B, Jiang P (2013). Effects of nitrogen addition and precipitation change on soil methane and carbon dioxide fluxes. *Chinese Journal of Ecology*, 32, 1957–1958. (in Chinese with English abstract) [李伟, 白娥, 李善龙, 孙建飞, 彭勃, 姜萍 (2013). 施氮和降水格局改变对土壤CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>通量的影响. 生态学杂志, 32, 1957–1958.]
- Liu BQ, Mu CC, Xing YJ, Wang QG (2012). Effects of simulated nitrogen deposition on soil respiration in spruce-fir-korean pine forest of Xiaoxing'anling Mountains in China. *Forest Research*, 25, 767–772. (in Chinese with English abstract) [刘博奇, 牟长城, 邢亚娟, 王庆贵 (2012). 模拟氮沉降对云冷杉红松林土壤呼吸的影响. 林业科学研究, 25, 767–772.]
- Liu HM, Liu SQ (2008). Effect of different nitrogen levels on soil CO<sub>2</sub> fluxes of winter wheat in North China plain. *Ecology and Environment*, 17, 1125–1129. (in Chinese with English abstract) [刘合明, 刘树庆 (2008). 不同施氮水平对华北平原冬小麦土壤CO<sub>2</sub>通量的影响. 生态环境, 17, 1125–1129.]
- Liu S, Yan CR, He WQ, Liu Q (2010). Soil respiration and its affected factors under different tillage systems in dryland production systems. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 2919–2924. (in Chinese with English abstract) [刘爽, 严昌荣, 何文清, 刘勤 (2010). 不同耕作措施下旱地农田土壤呼吸及其影响因素. 生态学报, 30, 2919–2924.]
- Luo YQ, Zhou XH (2007). *Soil Respiration and the Environment*. Higher Education Press, Beijing. (in Chinese) [骆亦其, 周旭辉 (2007). 土壤呼吸与环境. 高等教育出版社, 北京.]
- Marland G, Rotty RM (1984). Carbon dioxide emissions from fossil fuels: A procedure for estimation and results for 1950–1982. *Tellus B*, 36, 232–261.
- Mo JM, Zhang W, Zhu WX, Gundersen P, Fang YT, Li DJ, Wang H (2008). Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China. *Global Change Biology*, 14, 403–412.
- Monson RK, Sparks JP, Rosenstiel TN, Scott-Denton LE, Huxman TE, Harley PC, Turnipseed AA, Burns SP, Backlund B, Hu J (2005). Climatic influences on net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange during the transition from winter-time carbon source to springtime carbon sink in a



- high-elevation, subalpine forest. *Oecologia*, 146, 130–147.
- Morell FJ, Álvaro-Fuentes J, Lampurlanés J, Cantero-Martínez C (2010). Soil CO<sub>2</sub> fluxes following tillage and rainfall events in a semiarid Mediterranean agroecosystem: Effects of tillage systems and nitrogen fertilization. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 139, 167–173.
- Mote PW, Hamlet AF, Clark MP, Lettenmaier DP (2005). Declining mountain snowpack in western North America. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86, 39–49.
- Paustian K, Andrén O, Janzen HH, Lal R, Smith P, Tian G, Tiessen H, van Noordwijk M, Woomer PL (1997). Agricultural soils as a sink to mitigate CO<sub>2</sub> emissions. *Soil Use and Management*, 13, 230–244.
- Schimel JP, Fahnstock J, Michaelson G, Mikan C, Ping CL, Romanovsky WE, Welker J (2006). Cold-season production of CO<sub>2</sub> in arctic soils: Can laboratory and field estimates be reconciled through a simple modeling approach? *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 38, 249–256.
- Schlesinger WH, Andrews JA (2000). Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 48, 7–20.
- Schulze ED (2006). Biological control of the terrestrial carbon sink. *Biogeosciences*, 3, 147–166.
- Shi Q, Zhu HD, Bao SZ, Zhang XR, Lü WG (2008). Dynamic analysis and control means and ways of agricultural chemicals input in planting industry of Chongming County. *Acta Agriculturae Shanghai*, 24(4), 124–126. (in Chinese with English abstract) [施庆, 诸海焘, 包士忠, 张旭日, 吕卫光 (2008). 崇明种植业农用化学品投入动态分析与控制对策. 上海农业学报, 24(4), 124–126.]
- Song XG, Hu TX, Xian JR, Xiao CL, Liu WT (2007). Soil respiration and its response to simulated nitrogen deposition in evergreen broad-leaved forest, Southwest Sichuan. *Journal of Soil and Water Conservation*, 21, 168–192. (in Chinese with English abstract) [宋学贵, 胡庭兴, 鲜骏仁, 肖春莲, 刘文婷 (2007). 川西南常绿阔叶林土壤呼吸及其对氮沉降的响应. 水土保持学报, 21, 168–192.]
- Tu LH, Hu TX, Huang LH, Li RH, Dai HZ, Luo SH, Xiang YB (2009). Response of soil respiration to simulated nitrogen deposition in *Pleioblastus amarus* forest, rainy area of west China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 33, 728–738. (in Chinese with English abstract) [涂利华, 胡庭兴, 黄立华, 李仁洪, 戴洪忠, 雒守华, 向元彬 (2009). 华西雨屏区苦竹林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应. 植物生态学报, 33, 728–738.]
- Uchida M, Mo WH, Nakatsubo T, Tsuchiya Y, Horikoshi T, Koizumi H (2005). Microbial activity and litter decomposition under snow cover in a cool-temperate broad-leaved deciduous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 134, 102–109.
- Wang W, Wang T, Peng SS, Fang JY (2007). Review of winter CO<sub>2</sub> efflux from soils: A key process of CO<sub>2</sub> exchange between soil and atmosphere. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 31, 394–402. (in Chinese with English abstract) [王妮, 汪涛, 彭书时, 方精云 (2007). 冬季土壤呼吸: 不可忽视的地气CO<sub>2</sub>交换过程. 植物生态学报, 31, 394–402.]
- Wickland KP, Striegl RG, Mast MA, Dlow DW (2001). Carbon gas exchange at a southern Rocky Mountain wetland, 1996–1998. *Global Biogeochemistry Cycles*, 15, 321–335.
- Xu WH, Wan SQ (2008). Water- and plant-mediated responses of soil respiration to topography, fire, and nitrogen fertilization in a semiarid grassland in northern China. *Soil Biology & Biochemistry*, 40, 679–687.
- Zhang YH, Zhu HX, Li YX, Huang BB, Peng XD, Zuo XR, Yu YW (2011). Effects of nitrogen fertilization on temperature sensitivity of rhizosphere respiration during maize growing stages. *Journal of Agro-Environment Science*, 30, 2033–2039. (in Chinese with English abstract) [张耀鸿, 朱红霞, 李映雪, 黄宾宾, 彭晓丹, 左小瑞, 余焰文 (2011). 氮肥施用对玉米根际呼吸温度敏感性的影响. 农业环境科学学报, 30, 2033–2039.]
- Zhou LY, Zhou XH, Zhang BC, Lu M, Luo YQ, Liu LL, Li B (2014). Different responses of soil respiration and its components to nitrogen addition among biomes: A Meta-analysis. *Global Change Biology*, 20, 2332–2343.
- Zhou XH, Talley M, Luo YQ (2009). Biomass, litter, and soil respiration along a precipitation gradient in Southern Great Plains, USA. *Ecosystems*, 12, 1369–1380.

责任编辑: 杨元合 责任编辑: 王 葳