

作物生长和氮含量对土壤-作物系统 CO₂ 排放的影响

孙文娟¹, 黄耀^{1,2*}, 陈书涛¹, 杨兆芳¹, 郑循华²

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095, E-mail: sunwenjcn@yahoo.com.cn; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029, E-mail: huangy@mail.iap.ac.cn)

摘要:为探讨作物生物学特征对土壤-作物系统 CO₂ 排放的影响, 本研究基于逐步收割法和静态暗箱-气相色谱技术, 以冬小麦和水稻作物为研究对象, 采用盆栽和大田试验的方法, 在作物生长的主要生育期原位测定了土壤-作物系统 CO₂ 排放速率, 同时测定了作物生物量和氮含量. 研究表明: ①土壤-作物系统 CO₂ 排放在生长季内呈现动态变化, 土壤-水稻系统 CO₂ 排放高于土壤-冬小麦系统. ②作物暗呼吸速率与生物量呈显著线性相关. ③作物暗呼吸系数(R_d)的季节变化可以用植株氮含量来描述. 冬小麦 R_d 与 N 含量的关系可用线性方程 $R_d = 0.0124 N - 0.0076$ ($R^2 = 0.9879, p < 0.001$) 表示; 水稻 R_d 与 N 含量的关系可用二次方程 $R_d = 0.0085 N^2 - 0.0049 N$ ($R^2 = 0.9776, p < 0.001$) 表示. ④作物根系的参与极大地促进了土壤呼吸. 冬小麦生长季土壤表观呼吸 CO₂ 平均值为 $247.2 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 高于未种作物土壤 1.78 倍, 水稻生长季为 $215.3 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ CO₂, 高于未种作物土壤的 3.38 倍. 冬小麦根系呼吸系数大于水稻, 其根际呼吸对土壤表观呼吸的贡献高于水稻.

关键词:土壤-作物系统; CO₂ 排放; 植株氮含量; 作物生长; 呼吸系数

中图分类号: X132 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2004)03-0001-06

CO₂ Emission from Soil-Crop System as Influenced by Crop Growth and Tissue N Content

SUN Wenjuan¹, HUANG Yao^{1,2}, CHEN Shu-tao¹, YANG Zhao-fang¹, ZHENG Xun-hua²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China E-mail: sunwenjcn@yahoo.com.cn; 2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China E-mail: huangy@mail.iap.ac.cn)

Abstract: To understand the CO₂ emission from soil-crop system as influenced by crop growth and tissue N content, pot and field experiments were carried out during 2001-02 wheat and rice growing seasons. Black chambers were used to take gas samples within a closed soil-crop system. The CO₂ emission rate was detected by a gas chromatograph. Seasonal change of the CO₂ emission was observed from the soil-crop system. Respiration from the soil-rice system was higher than that from the soil-wheat system. Dark respiration of the crop shoot was positively correlated to the shoot biomass. The respiration coefficient R_d, defined as the amount of CO₂-C respired by per unit biomass C within one day under a reference temperature of 25 °C, can be well quantitatively expressed by shoot N content for either wheat or rice crop. Relationship between the R_d and the N content can be described as a linear regression of $R_d = 0.0124 N - 0.0076$ ($R^2 = 0.9879, p < 0.001$) for the wheat crop and as a quadratic equation of $R_d = 0.0085 N^2 - 0.0049 N$ ($R^2 = 0.9776, p < 0.001$) for the rice crop, respectively. The crop roots promoted the soil respiration greatly, which increased by 178 % for the wheat and 338 % for the rice in comparison with the respiration from root-free soil. A further calculation of the root respiration, including root autotrophic respiration and rhizosphere respiration, suggested that the contribution of crop rhizosphere respiration to the total soil respiration was greater in the upland soil than that in the irrigated paddy soil.

Key words: soil-crop system; CO₂ emission; N content of crop tissue; crop growth; respiration coefficient

大气中 CO₂、CH₄ 和其它温室气体浓度升高导致的全球气候变化是人类共同关注的问题, 是世界经济可持续发展和国际社会所面临的巨大挑战. 大气中 CO₂ 浓度的变化与全球碳循环过程密切相关, 参与碳循环过程的主要碳库包括大气、海洋、陆地生物圈、土壤和沉积物. 研究表明, 陆地生态系统碳循环对全球碳平衡起着举足轻重的作用^[1,2]. 一方面, 植物通过光合作用固定大气中的 CO₂; 另一方面, 植物和土壤的呼吸作用向大气释放 CO₂. EUROFLUX

研究计划对欧洲 14 类森林的监测结果表明, 生态系统呼吸作用(植被呼吸 + 土壤呼吸) 在全球碳平衡中扮演着极其重要的角色^[2]. 近年来, 关于土壤-植物系统呼吸作用的研究多见于森林生态系统^[3~8]和草原生态系统^[9~11], 而关于农田生态系统的研究,

收稿日期: 2003-07-08; 修订日期: 2003-09-12

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-01)

作者简介: 孙文娟(1972-), 博士研究生, 主要研究方向为陆地碳循环与全球变化.

* 通讯联系人

特别是关于作物生物学特征对土壤-作物系统 CO_2 排放影响的研究则不多见. 本文试图通过对土壤-作物(冬小麦、水稻)系统 CO_2 排放的原位测定、作物生物量的测定及植株氮含量的分析, 探讨作物生长和氮含量对土壤-作物系统 CO_2 排放的影响.

1 材料与方法

1.1 试验设计

盆栽试验于 2001-02 年冬小麦生长季和 2002 年水稻生长季在南京农业大学校园网室进行. 为与大田试验结果进行比较, 2002 年水稻生长季在江苏省农业科学院水稻试验田进行采样分析. 供试小麦品种为扬麦 158, 播种期和出苗期分别为 2001-11-05 和 11-17, 返青期为 2002-02-20, 抽穗期和成熟期分别为 2002-04-15 和 05-28. 供试水稻品种为武育粳 7 号, 盆栽试验分 3 个播期, 分别为 2002-05-10、06-01 和 06-21, 相应的移栽期分别为 2002-06-05、06-21 和 07-11. 大田水稻的生育期与第 2 期盆栽试验的相同. 肥水管理与当地大面积生产一致.

盆钵用紫砂陶土烧制而成, 钵高和内圆直径均为 20cm 左右, 盆钵上口有 1.5cm 深的凹型槽用以在采样时注水与采样箱密封. 小麦盆栽试验所用盆钵底部有若干直径为 2cm 的孔以渗漏降水, 水稻盆栽试验所用盆钵底部密封以防止水分下渗, 每盆装供试土壤 4kg(风干土)左右. 为使盆钵土壤的温度与周围土壤温度一致并减小盆钵间的温度差异, 盆钵的 4/5 高度埋入土壤. 大田水稻试验采用原位测定, 为避免采样时对土壤产生扰动, 不锈钢底座于水稻栽插前固定于土壤中, 底座上有 3cm 深的凹型槽用以在采样时注水与采样箱密封.

1.2 气体采样与分析

土壤-作物系统呼吸作用通过测定该系统的 CO_2 排放来确定, 气体样品的采集与分析采用暗箱-气相色谱法^[12]. 盆栽试验气体采样箱为圆筒型, 用 PVC 材料制成, 高 1m. 大田试验气体采样箱为柱型, 用不锈钢制成, 横截面积为 0.5m × 0.5m, 箱体高度随作物高度而增加. 为减小采样期间由于太阳辐射引起的箱内温度变化, 所有采样箱外侧均先包有一层海绵, 然后覆盖一层铝箔. 气体样品用带有开关的针筒采集, 采样时间分别为关箱后的 0、10、20 min, 每次抽样 60 mL 左右. 样品的 CO_2 混合比用 Agilent 4890D 气相色谱仪检测. 通过对每组 3 个样品的 CO_2 混合比与相对应的采样间隔时间(0、10、20 min)进行直线回归, 可求得 CO_2 排放速率^[13]. 所

有测定结果表明, 20 min 内的 CO_2 排放浓度均呈线性累积($R^2 > 0.99$).

1.3 土壤-作物系统呼吸作用的测定

采用暗箱-气相色谱法测得的土壤-作物系统 CO_2 排放包括作物地上部分暗呼吸和土壤表观呼吸. 土壤表观呼吸主要来自于植物根系的自养呼吸和根际呼吸, 以及土壤有机碳的异养分解^[14,15]. 一般认为, 自养呼吸为植物新陈代谢的基本生理过程, 而根际呼吸则来自于微生物对根系分泌物、根系凋落物和死亡根的分析^[15,16]. 本研究采用逐步收割法确定作物地上部分暗呼吸(RD)和土壤表观呼吸(RS), 同时测定未种作物的土壤呼吸, 得到源于土壤有机碳分解的异养呼吸(RH).

具体操作步骤为: 首先测定土壤-作物系统的呼吸作用(RE), 然后沿土壤表面依次剪除地上部分植株总数的 1/3 左右, 再测定土壤-剩余作物系统的呼吸速率, 直至将作物地上部分全部剪除. 因此, 对每一盆或每一个采样微区(大田)可测得 4 组一一对应的作物地上部分生物量(W)和呼吸速率(RE), 即: ($W_{3/3}, W_{2/3}, W_{1/3}, W_0$) 和 ($RE_{3/3}, RE_{2/3}, RE_{1/3}, RE_0$). 下标表示剩余的植株比例, 2/3 和 0 分别表示剩余 2/3 植株和全部剪除, $RE_{3/3}$ 和 RE_0 则分别表示土壤-作物系统呼吸速率 RE 和土壤表观呼吸速率 RS. 为确定割去作物是否导致短时的根系呼吸增加, 24h 后再次测定土壤表观呼吸速率. 统计分析表明, 2 次测定值之间无明显差异.

将土壤-作物系统呼吸速率减去土壤表观呼吸速率可得到作物地上部分暗呼吸速率(RD), 即: $RD = RE - RS$. 对每一盆或每一个采样微区(大田), 可获得与 4 个不同生物量($W_{3/3}, W_{2/3}, W_{1/3}, W_0$)一一对应的植株暗呼吸速率, 即: $RD_{3/3} = RE_{3/3} - RE_0$, $RD_{2/3} = RE_{2/3} - RE_0$, $RD_{1/3} = RE_{1/3} - RE_0$, $RD_0 = 0$. 由于本研究未能将根系自养呼吸和根际呼吸分别从土壤表观呼吸中分离出来, 因而将由根系活动导致的呼吸(根系自养呼吸和根际呼吸)统称为根系呼吸(RR), RR 由 RS 减去 RH(未种植作物土壤的呼吸)获得, 即: $RR = RS - RH$.

盆栽采样选择 3 盆作为重复, 大田采样选择 2 个微区作为重复. 小麦生长季共测定 6 次, 水稻生长季共测定 4 次, 测定时间见表 1 和表 2. 大田水稻生长季测定 4 次, 测定时间分别为分蘖盛期(07-12)、孕穗期(08-09)、灌浆期(09-06)和黄熟期(10-06).

1.4 环境要素和作物生物学特性测定

采样时记录箱内空气温度, 约 8cm 深处的土壤

温度用 Temp Log 自动记录. 每次气样采集完毕后, 将收割的作物地上部分及根系洗净, 105 °C 杀青 30 min, 80 °C 烘干至恒重, 测定生物量. 整个生长季采样结束后, 用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-凯氏定氮法测定作物地上部分和根的全氮含量.

2 结果与讨论

2.1 土壤-作物系统的呼吸作用

表 1 为土壤-冬小麦系统呼吸作用、作物生物量和环境温度. 为便于比较, 取代表当地适宜播栽期的第 2 期水稻盆栽试验结果(表 2) 进行分析. 可以看出, 土壤-作物系统呼吸速率 RE 具有明显的季节性变化. 冬小麦返青期的 RE 较低, 拔节孕穗至成熟期较高, 生长季平均值为 756.5 mg·(m²·h)⁻¹ CO₂(表 1). 水稻分蘖期的 RE 最高, 其后逐步降低, 平均值

表 1 土壤-冬小麦系统呼吸作用、作物生物量和环境温度

Table 1 Respiration from soil-wheat system, crop biomass and environmental temperature

采样日期 / m-d	呼吸作用(以 CO ₂ 计) / mg·(m ² ·h) ⁻¹			生物量(以 C 计) / g·m ⁻²		温度 / °C	
	RE	RS	RH	地上部分	地下部分	土壤	箱内空气
02-28	477.8 ± 29.3 ¹⁾	245.2 ± 57.7	57.0 ± 15.4	102.2 ± 5.2	26.9 ± 3.1	6.3	9.3 ± 0.3
03-14	903.1 ± 106.6	294.0 ± 47.4	85.6 ± 17.3	212.5 ± 19.5	49.1 ± 7.6	12.0	14.8 ± 0.0
03-28	731.3 ± 97.2	271.7 ± 146.0	68.1 ± 13.6	387.9 ± 34.6	78.3 ± 27.2	8.5	13.4 ± 0.4
04-11	864.3 ± 78.6	251.9 ± 27.5	90.9 ± 10.7	664.8 ± 25.4	132.5 ± 4.8	8.5	13.6 ± 1.1
04-25	642.6 ± 33.9	133.2 ± 36.7	108.6 ± 5.8	776.3 ± 22.2	101.1 ± 9.0	8.4	11.9 ± 0.4
05-09	920.0 ± 64.8	286.9 ± 32.7	123.3 ± 23.1	950.4 ± 4.4	115.4 ± 6.1	11.0	16.4 ± 0.4
平均	756.5	247.2	88.9	515.7	83.9	9.1	13.2

1) 平均值 ± 标准差, Means ± SD.

表 2 土壤-水稻系统呼吸作用、作物生物量和环境温度¹⁾

Table 2 Respiration from soil-rice system, crop biomass and environmental temperature

采样日期 / m-d	呼吸作用(以 CO ₂ 计) / mg·(m ² ·h) ⁻¹			生物量(以 C 计) / g·m ⁻²		温度 / °C	
	RE	RS	RH	地上部分	地下部分	土壤	箱内空气
07-25	1276.9 ± 53.5 ²⁾	206.8 ± 55.4	59.6 ± 24.1	188.8 ± 10.6	75.2 ± 3.1	27.5 ± 0.5	28.0 ± 0.6
08-29	1215.7 ± 91.4	207.9 ± 69.2	56.0 ± 14.1	738.2 ± 82.0	191.6 ± 12.4	25.2 ± 0.3	26.2 ± 0.5
09-24	706.6 ± 63.6	212.3 ± 50.6	32.1 ± 1.7	1042.8 ± 151.9	245.1 ± 30.4	18.9 ± 0.6	21.6 ± 0.4
10-13	654.8 ± 23.0	234.0 ± 20.2	48.6 ± 13.2	1272.2 ± 41.4	209.6 ± 14.4	19.0 ± 0.6	18.6 ± 0.5
平均	963.5	215.3	49.1	810.5	180.4	22.7	23.6

1) 第 2 期盆栽试验结果, 移栽期为 06-21, Pot experiment. Transplanted on June 21; 2) 平均值 ± 标准差, Means ± SD.

2.2 植株暗呼吸系数的确定

参照作者以往的研究^[18], 将作物暗呼吸对生物量和环境温度的依赖关系表达为:

$$RD = R_d \times Q_{10}^{(T-25)/10} \times W \quad (1)$$

式中, RD 为暗呼吸速率(CO₂-C), g/(m²·d). Q₁₀ 为暗呼吸的温度系数, T 为环境温度(°C), W 为作物生物量(C), g/m². R_d 为暗呼吸系数, g/(g·d)⁻¹, 其基本定义是 25 °C 下单位重量生物量碳的呼吸速率. 由(1)式可以看出, 当环境温度(T)和生物量(W)已

为 963.5 mg·(m²·h)⁻¹ CO₂(表 2). 由于水稻的生物量比小麦大得多, 加之土壤温度和气温(表 2) 均高于小麦生长季(表 1), 从而使得土壤-水稻系统的 RE 高于土壤-冬小麦系统.

作物根系的参与大大促进了土壤呼吸作用. 在冬小麦生长季, 由于根系的参与使得 RS 比 RH 增加了 0.23 ~ 3.30 倍, 平均 1.78 倍, RS/RH 平均为 158.3 mg·(m²·h)⁻¹ CO₂(表 1). 水稻生长季 RS 比 RH 增加了 2.47 ~ 5.61 倍, 平均 3.38 倍, RS/RH 平均为 166.2 mg·(m²·h)⁻¹ CO₂(表 2).

在无作物参与的情况下, 尽管水稻生长季的土壤温度(表 2) 高于小麦生长季(表 1), 但 RH 却比小麦生长季低, 且生长季内变化不甚明显(表 2). 一个可能的原因是水稻土长期处于淹水状态抑制了微生物对土壤有机碳的分解, 因而 RH 较低^[17].

知时, 暗呼吸系数(R_d) 是估算暗呼吸速率(RD) 的关键参数. 取温度系数 Q₁₀ 为 2^[18], 将不同温度下的暗呼吸速率 RD 校正到 25 °C, 方程(1) 便可写成:

$$RD_{25} = \frac{RD}{Q_{10}^{(T-25)/10}} = R_d \times W \quad (2)$$

式中, RD₂₅ 表示 25 °C 下的暗呼吸速率. 图 1 和图 2 分别给出小麦和水稻植株的 RD₂₅ 与生物量(W) 的线性关系. 可以看出, 暗呼吸速率随植株生物量的增加而线性增加, 此线性关系的斜率即为暗呼吸系数

R_d , 作物不同生育阶段的 R_d 有显著差异. 用同样的方法, 对小麦生长季 6 次采样、水稻生长季 16 次采样(盆栽为 3 个播期, 每个播期采样 4 次, 大田采样 4 次)的结果进行了计算, 求得主要生育阶段的植株暗呼吸系数 R_d .

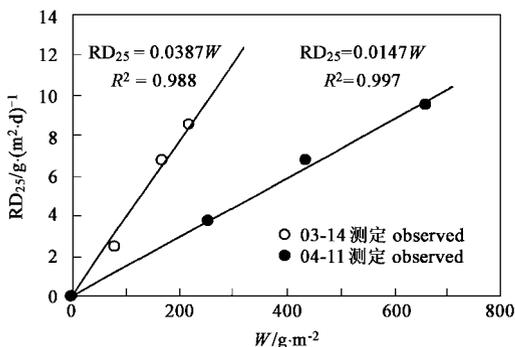


图 1 小麦植株暗呼吸速率对生物量的依赖关系

Fig.1 Dependence of dark respiration on shoot biomass of wheat crop

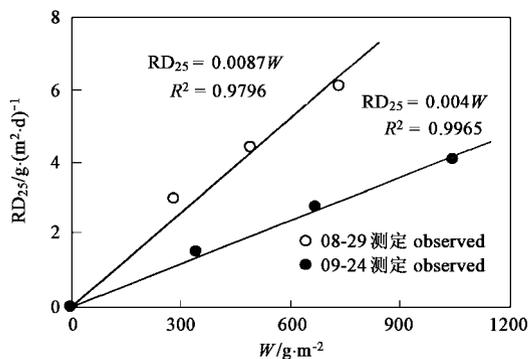


图 2 水稻植株暗呼吸速率对生物量的依赖关系

Fig.2 Dependence of dark respiration on shoot biomass of rice crop

2.3 植株暗呼吸系数与氮含量

Reich 等^[4]和 Lusk 等^[6]通过对森林叶片离体培养研究指出, 叶片的暗呼吸速率与其氮含量呈显著正相关. Spitters 等^[19]研究表明植物的维持性呼吸系数与植物氮含量有关. 本研究对不同生育阶段的暗呼吸系数与植株氮含量($N, \%$)的相关分析结果表明, 冬小麦的 R_d 与氮含量之间存在显著的线性关系(图 3), $R_d = 0.0124N - 0.0076$ ($R^2 = 0.9879, n = 6, p < 0.001$); 水稻盆栽实验的测定结果与大田的测定结果一致, 其暗呼吸系数与氮含量之间存在显著的非线性关系(图 4), $R_d = 0.0085N^2 - 0.0049N$ ($R^2 = 0.9776, n = 16, p < 0.001$).

将每 10d 测定 1 次的大田水稻植株氮含量进行线性内插, 可求得逐日氮含量, 将此代入水稻暗呼吸

系数与氮含量的关系式, 模拟出 2002 年水稻 R_d 的季节性变化动态(图 5), 变化趋势与大田试验的实测结果一致. 模拟结果表明, 水稻暗呼吸系数在移栽后的 20d 左右最大($R_d = 0.088$), 其后逐步下降, 至成熟期下降到 0.0058, 最大值与最小值之间相差约 15 倍. 移栽 ~ 抽穗期 R_d 平均为 0.044, 抽穗 ~ 成熟期为 0.009.

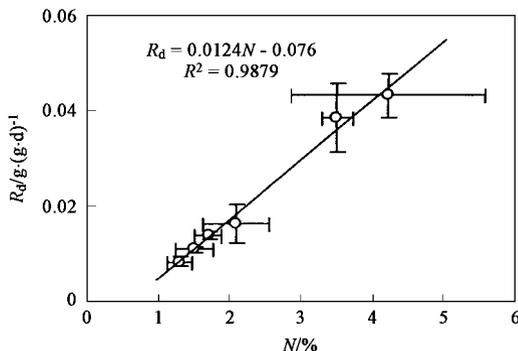


图 3 冬小麦暗呼吸系数与植株氮含量的关系

Fig.3 Linear regression between R_d and shoot N content of winter wheat crop

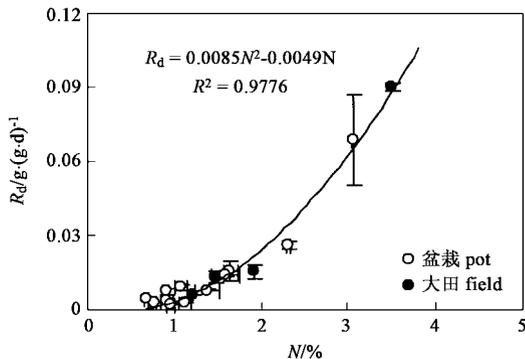


图 4 水稻暗呼吸系数与植株氮含量的关系

Fig.4 Nonlinear regression between R_d and shoot N content of rice crop

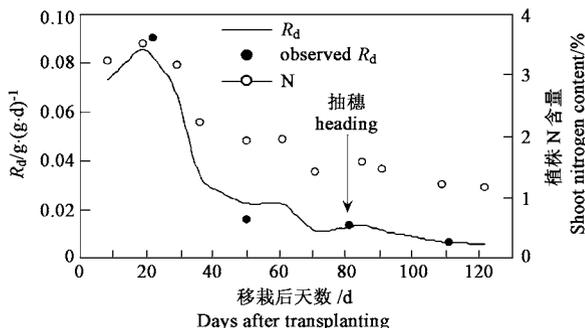


图 5 水稻暗呼吸系数的季节性变化

Fig.5 Seasonal variation of R_d for rice shoot

2.4 根的生长与土壤呼吸

根据各次测定的土壤表观呼吸 RS 和未种植作物土壤的呼吸 RH , 计算了由根系活动(根系自养呼吸 + 根际呼吸)引起的呼吸 RR ($RR = RS - RH$). 由方程(2), 将不同温度下的 RR 校正到 $25\text{ }^\circ\text{C}$ (RR_{25}), 用此呼吸速率除以根的生物量 W_R 可得到根的呼吸系数 R_r , 即 $R_r = RR_{25} / W_R$. 相关分析表明: 小麦根的呼吸速率 RR_{25} 并不随生物量的增加而增加(图 6), 但呼吸系数 R_r 与根的氮含量之间呈显著线性正相关(图 7), 这个结果与冬小麦暗呼吸系数-植株氮含量的关系(图 3) 极为相似. 与冬小麦不同, 水稻根系呼吸速率 RR_{25} 随生物量的增加而增加(图 8). 图 8 中每次采样的 3 个结果依次来自于第 1、第 2 和第 3 播种期. 采用与图 2 类似的方法, 将盆栽实验获得的 RR_{25} 与相应的根生物量 W_R 进行线性相关分析, 得到呼吸系数 R_r 为 0.0066 ± 0.0004 (图 9). 若用 $R_r = RR_{25} / W_R$ 进行计算, 得到平均呼吸系数为 0.0080 ± 0.0049 ($n = 12$), 这些数值比以往文献报道的 0.01 [19, 20] 略小.

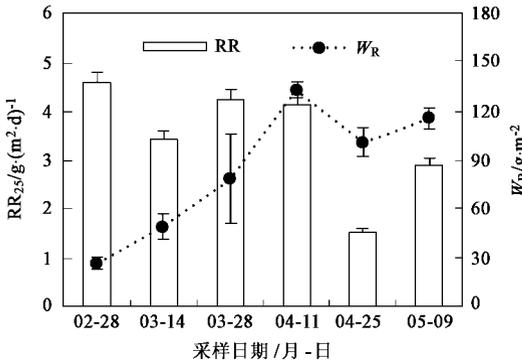


图 6 小麦根系呼吸与生物量的季节动态

Fig. 6 Seasonal variation of RR_{25} and wheat root biomass

虽然小麦的地下部分生物量(表 1) 比水稻的(表 2) 小得多, 但根系呼吸系数(图 7) 比水稻几乎要大一个数量级. 若小麦和水稻根系自养呼吸系数接近, 上述结果则表明小麦根际呼吸对土壤表观呼吸的贡献要高于水稻. 可能的原因在于麦田土壤通气状况良好, 根系分泌物被分解后产生的 CO_2 较易从土壤中释放出来. 而水稻生长处于淹水的厌氧环境中, 部分根系分泌物被微生物利用直接转化为 CH_4 [21], 同时土壤中的 CO_2 在厌氧环境中亦部分地被还原为 CH_4 . 这均使得水稻根的呼吸系数低于小麦.

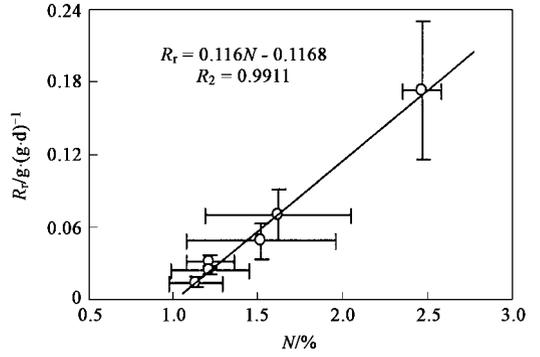


图 7 小麦根系呼吸系数与 N 含量的相关关系

Fig. 7 Correlation of root respiration coefficient against N content of wheat root

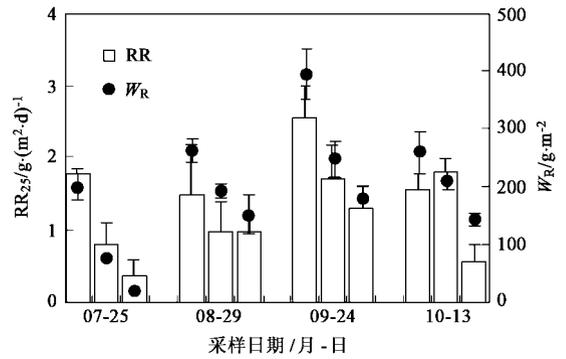


图 8 水稻根系呼吸与生物量的季节动态

Fig. 8 Seasonal variation of RR_{25} and rice root biomass

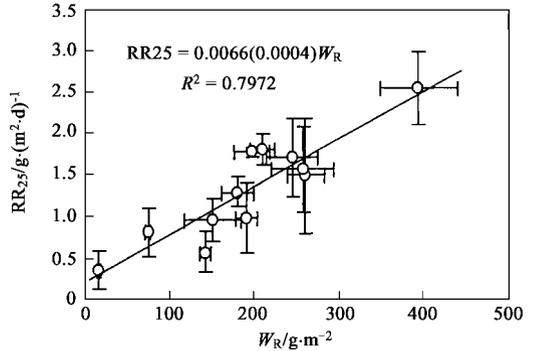


图 9 水稻根系呼吸速率与生物量的相关关系

Fig. 9 Correlation of RR_{25} against root biomass of rice

3 结论

- (1) 土壤-作物系统 CO_2 排放速率呈现明显的季节性变化趋势. 受温度和作物生长的影响, 水稻生长季土壤-作物系统 CO_2 排放速率高于冬小麦生长季.
- (2) 作物地上部分暗呼吸系数在生长季内呈现动态变化, 植株氮含量越高, 呼吸系数越大.

(3) 根系的参与极大地促进了土壤呼吸, 小麦根际呼吸对土壤表观呼吸的贡献高于水稻.

参考文献:

- [1] Schimel DS. The carbon equation[J]. Nature, 1998, **393**:208 ~ 209.
- [2] Valentini R, Matteucci G, Dolman AJ, Schulze ED, Rebmann C, Moors EJ, Granier A, Gross P, Jensen NO, Pilegaard K. Respiration as main determinant of carbon balance in European forests[J]. Nature, 2000, **404**:861 ~ 865.
- [3] Jones JB, Mulholland PJ. Carbon dioxide variation in a Hardwood forest stream: An integrative measure of whole catchment soil respiration[J]. Ecosystems, 1998, **1**(2):183 ~ 196.
- [4] Reich PB, Walters MB, Ellsworth DS, Vose JM, Volin JC, Gresham C, Bowman WD. Relationships of leaf dark respiration to leaf nitrogen, specific leaf area and leaf life-span: a test across biomes and functional groups[J]. Oecologia, 1998, **114**:471 ~ 482.
- [5] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in Picea abies stands[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, **32**(11,12):1625 ~ 1635.
- [6] Lusk CH, Reich PB. Relationships of leaf dark respiration with light environment and tissue nitrogen content in Juveniles of 11 cold temperate tree species[J]. Oecologia, 2000, **123**:318 ~ 329.
- [7] Ohashi M, Gyokusen K, Saito A. Contribution of root respiration to total soil respiration in a Japanese cedar (Cryptomeria japonica D. Don) artificial forest[J]. Ecological Research, 2000, **15**(3):323 ~ 333.
- [8] Ekblad A, Hoegberg P. Natural abundance of ^{13}C in CO_2 respired from forest soils reveals speed of link between tree photosynthesis and root respiration[J]. Oecologia, 2001, **127**(3):305 ~ 308.
- [9] 陈四清, 崔晓勇, 周广胜, 李凌浩. 内蒙古锡林河流域大针茅草原土壤呼吸和凋落物分解的 CO_2 排放速率研究[J]. 植物学报, 1999, **41**(6):645 ~ 650.
- [10] 曹广民, 李英年, 张金鑫, 赵新全. 高寒草甸不同土地利用格局土壤 CO_2 的释放量[J]. 环境科学, 2001, **22**(6):14 ~ 19.
- [11] Li LH, Han XG, Wang QB, Chen QS, Zhang Y, Yang J, Yan ZD, Li X, Bai WM, Song SH. Correlations between plant biomass and soil respiration in a Leymus chinensis community in the Xilin River Basin of Inner Mongolia[J]. Acta Botanica Sinica, 2002, **44**(5):593 ~ 597.
- [12] 邹建文, 焦燕, 王跃思, 黄耀. 稻田 CO_2 , CH_4 和 N_2O 排放通量测定方法研究[J]. 南京农业大学学报, 2002, **25**(4):45 ~ 48.
- [13] 黄耀, 焦燕, 宗良纲, 周权锁, Sass RL, Fisher FM. 土壤理化特性对麦田 N_2O 排放影响的研究[J]. 环境科学学报, 2002, **22**(5):598 ~ 602.
- [14] Kirschbaum MUF, Eamus D, Gifford RM, Roxburgh SH, Sands PJ. Definitions of some ecological terms commonly used in carbon accounting[A]. In: Kirschbaum MUF, Mueller R. Net Ecosystem Exchange[C]. Australia: The Communications Office, CRC for Greenhouse Accounting, 2001. 2 ~ 5.
- [15] Daniel LK, Burger JA, Edwards GS. Estimating root respiration, microbial respiration in the rhizosphere, and root-free soil respiration in forest soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, **30**:961 ~ 968.
- [16] Kuzyakov Y. Separating microbial respiration of exudates from root respiration in non-sterile soils: a comparison of four methods[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, **34**:1621 ~ 1631.
- [17] 黄耀, 刘世梁, 沈其荣, 宗良纲. 农田土壤有机碳动态模拟模型的建立[J]. 中国农业科学, 2001, **34**(5):532 ~ 536.
- [18] Huang Y, Gao LZ, Jin ZQ, Chen H. Simulating the optimal growing season of rice in the Yangtze River Valley and its adjacent area, China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, **91**:251 ~ 262.
- [19] Spitters CJT, van Keulen H, van Kraalingen DWG. A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87[A]. In: Rabbinge R, et al. Simulation and Systems Management in Crop Protection[C]. Pudoc, Wageningen: 1989, 147 ~ 181.
- [20] Penning de Vries FWT, Jansen DM, ten Berge HFM, Bakema A. Simulation of Ecophysiological Processes of Growth in Several Annual Crops[C]. Pudoc, Wageningen and International Rice Research Institute Press, 1989, 271.
- [21] Minoda T, Kimura M, Wada E. Photosynthates as dominant source of CH_4 and CO_2 in soil water and CH_4 emitted to the atmosphere from paddy fields[J]. Journal of Geophysical Research, 1996, **101**:21091 ~ 21097.