

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0552

任志杰,高兵,黄涛,等.2014.不同轮作和管理措施下根系呼吸对土壤呼吸的贡献[J].环境科学学报,34(9):2367-2375

Ren Z J, Gao B, Huang T, et al. 2014. The contribution of root respiration to soil respiration under different crop rotations and managements [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(9): 2367-2375

不同轮作和管理措施下根系呼吸对土壤呼吸的贡献

任志杰,高兵,黄涛,巨晓棠*

中国农业大学资源与环境学院,北京 100193

收稿日期:2013-11-22 修回日期:2013-12-19 录用日期:2013-12-19

摘要:根系呼吸对土壤呼吸的贡献是研究土壤碳排放和土壤碳平衡的重点和难点.本研究采用根系排除法联合运用 Li-8100 土壤碳通量系统测定了华北平原冬小麦-夏玉米一年两熟传统管理体系(Con.W/M)、冬小麦-夏玉米一年两熟优化管理体系(Opt.W/M)、冬小麦-夏玉米(或夏大豆)-春玉米两年三熟优化管理体系(W/M-M、W/S-M)和春玉米一年一熟优化管理体系(M)作物根区土壤呼吸和非根区土壤呼吸,以根区和非根区土壤呼吸差异除以根区土壤呼吸计算根系呼吸的贡献.结果表明,根区土壤呼吸和非根区土壤呼吸具有明显的季节变化特征,二者具有显著的拟合关系.Con.W/M 和 Opt.W/M 处理小麦季非根区土壤呼吸可分别解释根区土壤呼吸变异的 65% 和 87%,玉米季非根区土壤呼吸的分别解释根区土壤呼吸变异的 48% 和 65%.W/M-M、W/S-M 和 M 处理春玉米非根区土壤呼吸可分别解释根区土壤呼吸变异的 68%、76% 和 58%.Con.W/M 处理小麦和玉米季根系呼吸对土壤呼吸贡献分别为 25.0% 和 29.6%,Opt.W/M 处理则分别为 31.1% 和 35.0%.不同轮作和管理措施对春玉米根系呼吸的贡献无显著影响,W/M-M、W/S-M 和 M 处理春玉米季根系呼吸贡献分别为 23.7%、24.8% 和 24.9%.5 cm 土壤温度对根区土壤呼吸的影响程度大于非根区土壤呼吸.

关键词:根系排除法;根区;非根区;土壤呼吸;根系呼吸贡献

文章编号:0253-2468(2014)09-2367-09 中图分类号:X53 文献标识码:A

The contribution of root respiration to soil respiration under different crop rotations and managements

REN Zhijie, GAO Bing, HUANG Tao, JU Xiaotang*

College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193

Received 22 November 2013; received in revised form 19 December 2013; accepted 19 December 2013

Abstract: It is important and difficult for quantifying the contribution of root respiration to soil respiration when study soil carbon balance. The root- and no root-zone respiration from the conventional and optimized winter wheat-summer maize double-cropping system (Con.W/M, Opt.W/M), optimized winter wheat-summer maize or summer soybean-spring maize three harvests over two years (W/M-M, W/S-M) and single spring maize system per year (M) were measured by combining soil CO₂ fluxes system (LI-8100) with the method of root exclusion on the North China Plain, and the difference between root- and no root-zone respiration was calculated as the contribution of root respiration to soil respiration. The results showed that root- and no root-zone respiration had an obviously seasonal variation and had significant correlation each other. No root-zone respiration explained for 65% and 87% of root-zone respiration in winter wheat season in treatments Con.W/M and Opt.W/M, respectively, and they were 48% and 65% in summer maize season. No root-zone respiration explained 68%, 76% and 58% of root-zone respiration in spring maize season in treatments W/M-M, W/S-M and M, respectively. The contributions of root respiration to soil respiration were 25.0% and 29.6% for winter wheat and summer maize in Con.W/M, respectively, and they were 31.1% and 35.0% in Opt.W/M. The ratio of root respiration to soil respiration in spring maize season was not significantly affected by cropping rotations and managements, and they were 23.7%, 24.8% and 24.9% for W/M-M, W/S-M and M, respectively. The root- and no root-zone soil respiration showed positive correlation with 5 cm depth soil temperature, and the root respiration significantly increased this kind of relationship.

Keywords: root exclusion method; root-zone; no root-zone; soil respiration; contribution of root respiration

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(No.201103039);中央高校基本科研业务专项资金(No.2013BH032);中国博士后科学基金(No.2013M530778)

Supported by the Special Fund for Agriculture-Scientific Non-Profit Research, China (No.201103039), the Fundamental Research Funds for the Central University (No.2013BH032) and the China Postdoctoral Science Foundation (No.2013M530778)

作者简介:任志杰(1987—),女,E-mail:weiyi2011@126.com; *通讯作者(责任作者),E-mail:juxt@cau.edu.cn

Biography: REN Zhijie (1987—), female, E-mail: weiyi2011@126.com; *Corresponding author, E-mail: juxt@cau.edu.cn

1 引言 (Introduction)

二氧化碳(CO₂)是一种重要的温室气体,研究表明,2005年大气CO₂浓度已达379 ppm,且以每年1.9 ppm的速度在增加,CO₂是全球增温的最大贡献者,对全球变暖的贡献率约为60%(IPCC,2007).土壤呼吸是陆地生态系统碳返回大气的主要途径,年通量(以C计)达到(98±12) Pg(1 Pg=10¹⁵ g),且以每年0.1 Pg的速度在增加(Bond-Lamberty *et al.*, 2010).农田土壤呼吸对全球碳循环起着重要的作用,约占全球人为CO₂排放量的11%(Robertson *et al.*, 2000; Grace *et al.*, 2000).因此,有关土壤碳排放和提高土壤-作物系统的固碳作用来减缓大气中CO₂浓度增加的研究具有重要意义.

土壤呼吸主要包括植物根系的自养呼吸和植物残留、根系脱落和淀积物及土壤有机质在土壤微生物作用下的异养呼吸(Kuzyakov, 2006; Atarashi-Andoh *et al.*, 2012),然而根系主导的自养呼吸不属于土壤碳损失(Hanson *et al.*, 2000; Wertha *et al.*, 2008).研究表明,非森林生态系统根系呼吸对全年土壤总呼吸的平均贡献达60.4%(Hanson *et al.*, 2000).目前,有关华北平原农田土壤呼吸的研究主要集中在排放通量、特征及影响因素方面(孟凡乔等,2006;牛灵安等,2009;黄涛等,2013;Gao *et al.*, 2013),少数研究报道了农田土壤呼吸和碳平衡(黄斌等,2006;牛灵安等,2009),但因忽略根系呼吸作用导致土壤碳排放量被高估.因此,定量根系呼吸对土壤呼吸的贡献是准确定量农田土壤碳排放的关键.

根系排除法是一种间接测定根系呼吸的方法,其原理是通过测定植物根区土壤呼吸和非根区土壤呼吸的差值来计算根系呼吸,根系呼吸除以根区土壤呼吸则是根系呼吸对土壤呼吸的贡献(Hanson *et al.*, 2000).该方法因简单、便于操作和破坏性小在不同生态系统根系呼吸对土壤呼吸的贡献研究中被采用(Buchmann, 2000; Lee *et al.*, 2003; 刘颖等,2005;周非飞等,2009;朱凡等,2010).

华北平原是我国最大的平原,冬小麦-夏玉米一年两熟轮作是该地区典型的集约化农业种植模式.蔡艳等(2006)和张宇等(2009)采用根系排除法测得夏玉米和不同耕作方式下冬小麦季根系呼吸对土壤呼吸的贡献率分别为46.0%和26.2%~36.4%.近年来,众多研究者提出采用冬小麦-夏玉米(或夏

大豆)-春玉米两年三熟及春玉米一年一熟等轮作制度部分或完全地替代冬小麦-夏玉米一年两熟的轮作制度,来缓解华北平原地下水资源的紧缺形势(刘明等,2008; Meng *et al.*, 2012; Gao *et al.*, 2013).课题组以往的研究结果阐明了新的轮作体系和管理措施会对土壤呼吸产生显著的影响(Gao *et al.*, 2013),但尚缺少冬小麦-夏玉米完整轮作体系及新的替代作物体系下根系呼吸对土壤呼吸贡献的研究.为此,本研究采用根系排除法对冬小麦-夏玉米一年两熟、冬小麦-夏玉米(或夏大豆)-春玉米两年三熟及春玉米一年一熟轮作体系进行田间原位根区和非根区土壤呼吸测定,以了解不同轮作和管理措施下根系呼吸对土壤呼吸的贡献,为准确定量土壤碳排放提供一定的理论支持.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 试验点概况

试验地点位于河北省邯郸市曲周县中国农业大学实验站(36.87° N, 115.02° E),海拔约40 m.该地区属典型的温带半湿润季风气候区,土壤类型为潮土,是黄淮海平原有代表性的一个地区.水热资源丰富,但受季风的影响较为强烈,冬春季寒冷干燥,夏季温暖多雨,蒸发强烈,春旱尤为严重.冬小麦-夏玉米一年两熟轮作是当地典型的集约化种植体系.年平均气温为13.2℃,1980—2010年间降雨量变化范围为213~840 mm,平均值为494 mm,降雨主要集中在6—9月(Meng *et al.*, 2012),年蒸发量为1184 mm.供试土壤0~30 cm土层基础理化性状:容重为1.37 g·cm⁻³,土壤pH为7.72(土水比1:2.5, g·mL⁻¹),全氮含量为0.7 g·kg⁻¹,速效磷含量为4.8 mg·kg⁻¹,速效钾含量为72.7 mg·kg⁻¹,有机质含量为12.6 g·kg⁻¹(Gao *et al.*, 2013).

2.2 试验设计

试验设在2007年建立的“华北平原可持续高产作物生产体系和资源优化利用的长期定位研究”基础上,共设置5个处理,每个处理4次重复,小区面积为60 m×30 m,采用随机区组排列.

2.2.1 冬小麦-夏玉米一年两熟传统管理体系(Con. W/M) 氮肥和灌溉管理采用当地农民习惯方式,小麦季氮肥投入量为300 kg·hm⁻²·a⁻¹(以N计,下同),基肥和拔节期追肥的比例为1:1,小麦播前撒施基肥后旋耕,追肥方式为撒施后灌溉,夏玉米季的氮肥投入量为250 kg·hm⁻²·a⁻¹,基肥和13叶期追

肥比例为 1:1.5 (Meng *et al.*, 2012). 夏玉米季 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 基肥中有 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (15-15-15 的复合肥) 随播种机施入, 剩余氮肥以尿素形式撒施后灌水, 追肥采用开沟机开沟后撒施覆土. 灌溉是根据农民经验由降雨情况而定, 本实验期间小麦季共灌溉 3 次, 玉米季灌溉 1 次, 每次灌溉量约为 60~100 mm, 灌溉方式为漫灌. 冬小麦收获后秸秆移走, 留茬 10~15 mm, 粉碎机打麦茬 2 遍后直播夏玉米, 夏玉米收获后清除地表作物残留, 旋耕 15 cm 后整平播种冬小麦, 为保墒小麦播种后机器镇压.

2.2.2 冬小麦-夏玉米一年两熟优化管理体系 (Opt. W/M) 采用优化的氮肥和灌溉管理, 优化氮肥管理是根据作物关键生育期追肥前根层土壤无机氮 (硝态氮+铵态氮) 含量和氮素供应目标值之间的差值确定施氮量 (Cui *et al.*, 2008); 冬小麦的关键施肥期为播种期和拔节期, 施肥量根据施肥前土壤无机氮含量和氮素供应目标值来确定, 本实验期间冬小麦播种和拔节期分别追肥 40 和 $175 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以 N 计, 下同), 施肥方式同 Con. W/M 处理; 夏玉米季施肥量为 $185 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 关键追肥期为播种期、6 叶期和 13 叶期, 基肥 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (15-15-15 的复合肥) 随机器施入, 6 叶期和 13 叶期分别追施 80 和 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 方式为开沟撒施覆土. 灌溉时间和灌溉量是通过测定作物关键生育期前的土壤含水量来确定, 灌溉标准是保持土壤含水量在 45%~80% 的可利用水含量, 小麦季的关键灌水期可分为播种、返青、拔节和扬花 4 个时期, 玉米季节的灌水则是根据土壤实际情况而定 (Meng *et al.*, 2012). 本实验期间小麦在返青期和抽穗期分别灌溉 75 和 90 mm, 玉米播种后灌溉 90 mm. 小麦秸秆还田后, 秸秆粉碎机打秸秆和麦茬 2 遍后直播夏玉米, 玉米收获后秸秆粉碎机打秸秆 2 遍后深翻 30 cm.

2.2.3 冬小麦-夏玉米-春玉米两年三熟优化管理体系 (W/M-M) 第 1 年为冬小麦-夏玉米, 第 2 年为春玉米. 冬小麦和夏玉米季的氮肥和灌溉管理同 Opt. W/M 处理, 夏玉米收获后秸秆粉碎机打秸秆 2 遍, 而后深翻 30 cm 休闲, 春玉米播前灌溉 50 mm, 旋耕 2 遍 (深度 15 cm) 后整平播种, $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 15-15-15 的复合肥随播种机器施入, 春玉米的关键追肥期为播种期、6 叶期和 13 叶期. 春玉米季的氮肥追施量计算方法同 Opt. W/M 处理小麦季优化氮肥管理, 灌溉量确定方式同 Opt. W/M 处理. 本研究期间春玉米 6 叶期和 13 叶期分别施肥 100 和

$92 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 春玉米收获后秸秆还田, 还田方式和土壤耕作同 Opt. W/M 处理夏玉米季方式.

2.2.4 冬小麦-夏大豆-春玉米两年三熟优化管理体系 (W/S-M) 第 1 年为冬小麦-夏大豆, 第 2 年为春玉米. 冬小麦和春玉米季的氮肥量计算方式同 W/M-M 处理, 夏大豆播种时施肥 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 肥料类型和施肥方式同 Opt. W/M 处理夏玉米季方式. 夏大豆收获脱粒后秸秆还田深翻 30 cm 休闲, 春玉米播前灌溉 60 mm, 播前整地和基肥施用同 W/M-M 处理春玉米季方式. 本研究期间春玉米 6 叶期和 13 叶期分别施肥 100 和 $107 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 春玉米收获后秸秆还田, 还田方式和土壤耕作同 Opt. W/M 处理夏玉米季方式.

2.2.5 春玉米一年一熟优化管理体系 (M) 春玉米季的施氮量和灌溉量计算方式同 W/M-M 处理. 春玉米播前灌溉 60 mm, 播前整地同 W/M-M 处理春玉米季方式, 播种时 $40 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 15-15-15 的复合肥随播种机器施入. 本研究期间 6 叶期和 13 叶期分别施肥 110 和 $101 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以 N 计). 春玉米收获时秸秆还田, 还田方式和土壤耕作同 Opt. W/M 处理夏玉米季方式.

各处理冬小麦季的磷肥施用量为 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以 P_2O_5 计), 钾肥施用量为 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以 K_2O 计), 磷肥和钾肥作为基肥在冬小麦播前一次性施入. 夏玉米和夏大豆季的磷肥施用量为 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 以 15-15-15 的复合肥形式随播种机器施入. 春玉米季磷肥施用量为 $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 播前旋地和 10 叶期分别施用 90 和 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 传统夏玉米和优化夏大豆季钾肥施用量为 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 优化夏玉米季钾肥施用量为 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中, 50% 在播种时以 15-15-15 的复合肥形式带入, 剩余在夏玉米 6 叶期追施. 春玉米季钾肥施用量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 播前旋地和 10 叶期分别施用 80 和 $70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.

2.3 土壤呼吸测定

本研究于 2012 年 10 月初冬小麦播种至 2013 年 9 月底玉米收获期间进行了根区和非根区土壤呼吸的测定, 包括 Con. W/M 和 Opt. W/M 处理一个完整的冬小麦-夏玉米轮作周期及 W/M-M、W/S-M 和 M 处理休闲和春玉米季. 期间 Con. W/M 处理冬小麦按照当地传统于 2012 年 10 月 17 日播种, 优化冬小麦于 2012 年 10 月 6 日播种, 由于播种日期的差异, 两个处理冬小麦返青期长势具有明显差异 (图 1). 每小区安置 3 个高 8 cm、内径 20 cm 的 PVC 底座,

嵌入土壤 3 cm. 一个底座安置在 1 m×1 m 不种任何作物的裸地, 为阻止作物根系进入底座, 同时保证水肥的畅通, 裸地周围用长 1 m、宽 0.3 m 的 400 目尼龙纱隔开, 所测呼吸视作非根区土壤呼吸, 同时将休闲季土壤呼吸视作非根区土壤呼吸. 另两个底座安置在作物种植区内, 小麦季随机打入土壤, 玉米季则分别安置在玉米行上和行间, 两个点的平均值代表小区内的根区土壤呼吸. 整个作物生长季, 底座位置固定, 仅在作物收获时挖出, 待下茬作物播种后重新安置. 为减少植物地上部呼吸对试验结果带来的影响, 试验期间底座内无绿色植物. 土壤呼吸测定采用开路式土壤碳通量自动观测系统 (LI-COR LI-8100, Lincoln, NE, USA), 主要包括测定主机和上述 PVC 底座两部分. 其原理是通过测量室内 CO₂ 浓度的增加速率采用指数回归的方法推算测量室外土壤 CO₂ 扩散到空气中的速度. 测定频率为作物播种和施肥后每天测定 1 次, 连续 10 d, 灌溉或较大降雨后 (>20 mm) 每天测定 1 次, 连续测定 2~3 d, 平时 4 d 1 次, 冬季土壤结冰后, 每 1~2 周测定 1 次. 测定时间为早上 8:00~11:30.

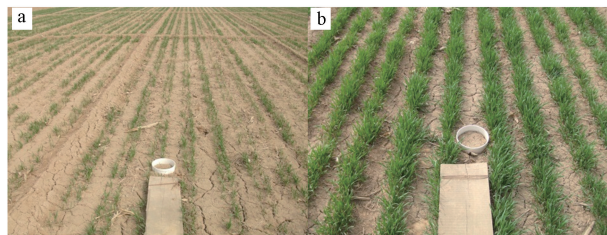


图 1 冬小麦返青期长势比较 (a. 传统播种, b. 优化播种)

Fig. 1 Comparison of the growth of winter wheat at re-greening stage (a. conventional seeding, b. optimized seeding)

2.4 土壤温度和气象数据

土壤呼吸测定期间, 开始和结束时分别采用温度传感器 (JM624, Tianjin Jinming Instrument Co. Ltd. China) 测定 5 cm 土壤温度, 考虑不同轮作体系和水肥管理对土壤温度的影响, 分别测定了重复 II 和 III 每个小区的 5 cm 土壤温度, 开始和结束时的温度平均值代表气体采集期间不同处理的土壤平均温度, 用于分析不同轮作体系和水肥管理下根区和非根区土壤呼吸与对应处理 5 cm 土壤温度之间的相关性. 试验期间的大气温度和降雨量数据来自实验站内部距实验区约 20 m 的气象站. 试验期间大气温度、5 cm 土壤平均温度和降雨量如图 2 所示.

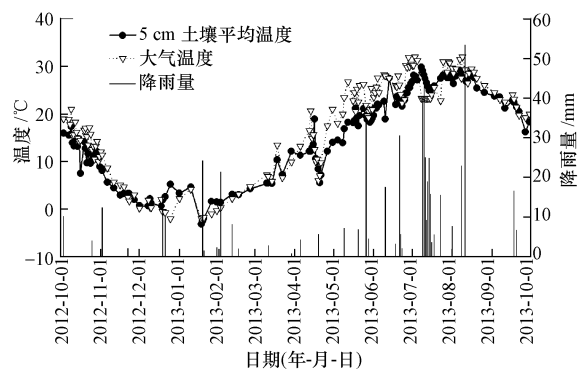


图 2 实验期间平均气温、5 cm 土壤平均温度和降雨量

Fig. 2 The mean daily air temperature, mean soil temperature to 5 cm depth and precipitation during field experiment

2.5 根系呼吸的计算方法

本研究采用根系排除法计算根系呼吸对土壤呼吸的贡献, 用根区土壤呼吸减去非根区土壤呼吸视作根系呼吸, 根系呼吸占土壤呼吸的比率即为根系呼吸对土壤呼吸的贡献, 即根系呼吸贡献 (Jia *et al.*, 2006; 朱凡等, 2010).

2.6 数据处理与统计分析

采用 Microsoft Excel 2010 进行处理数据和相关性分析, SigmaPlot 11.0 软件作图, SAS 8.1 软件 (SAS Institute Inc, Cary, NC, USA) 进行 $\alpha=0.05$ 水平下显著性检验分析.

3 结果与分析 (Results and discussion)

3.1 不同轮作和管理措施下根区和非根区土壤呼吸动态

图 3 显示了不同轮作和管理措施下根区和非根区土壤呼吸的动态变化. 从图中可知, 二者均与温度的变化趋势相同, 冬季处于较低水平, 春天随着温度的升高逐渐增加, 夏季 7、8 月达到呼吸最高峰. 由于根系呼吸作用, 小麦和玉米生育后期的根区土壤呼吸的变化幅度大于非根区. Con. W/M 处理由于冬小麦播种较晚, 返青期前长势较弱 (图 1), 根系呼吸作用较小, 因此, 冬小麦播种至拔节期前根区与非根区土壤呼吸间无显著差异; 拔节灌水后冬小麦迅速生长, 根系呼吸作用增强, 根区和非根区土壤呼吸之间存在较大的差异, 随着小麦生育后期根系的衰败, 根系呼吸作用对土壤呼吸的贡献变小, 根区和非根区土壤呼吸之间差异消失. 夏玉米播种后至 6 叶期, 玉米根系较小, 根系呼吸作用小, 根区和非根区土壤呼吸相同, 夏玉米 6 叶期降雨后, 玉米快速生长, 根系呼吸作用增强, 根区和非根区土壤呼吸之间出现明显差异. 而夏玉米生育后期, 随着根系的衰

败,根区和非根区土壤呼吸之间的差异逐渐减小,

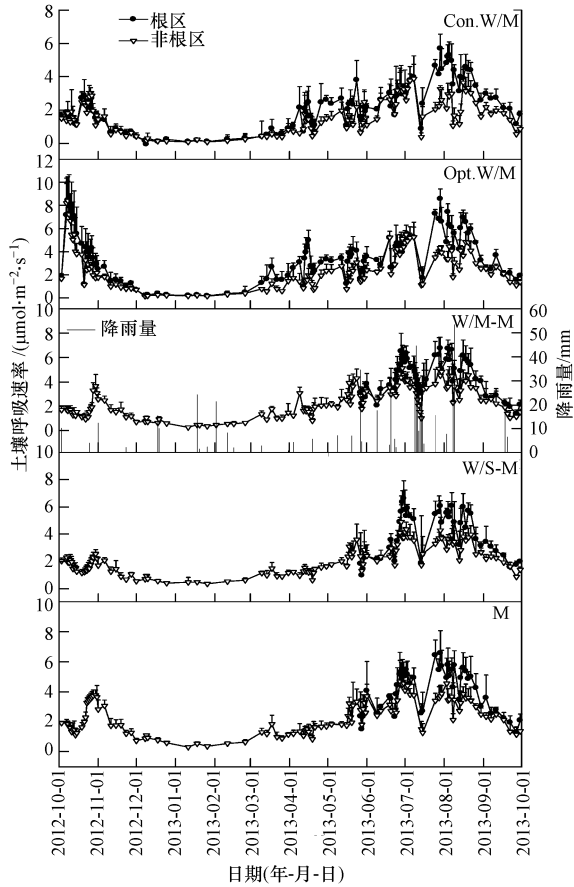
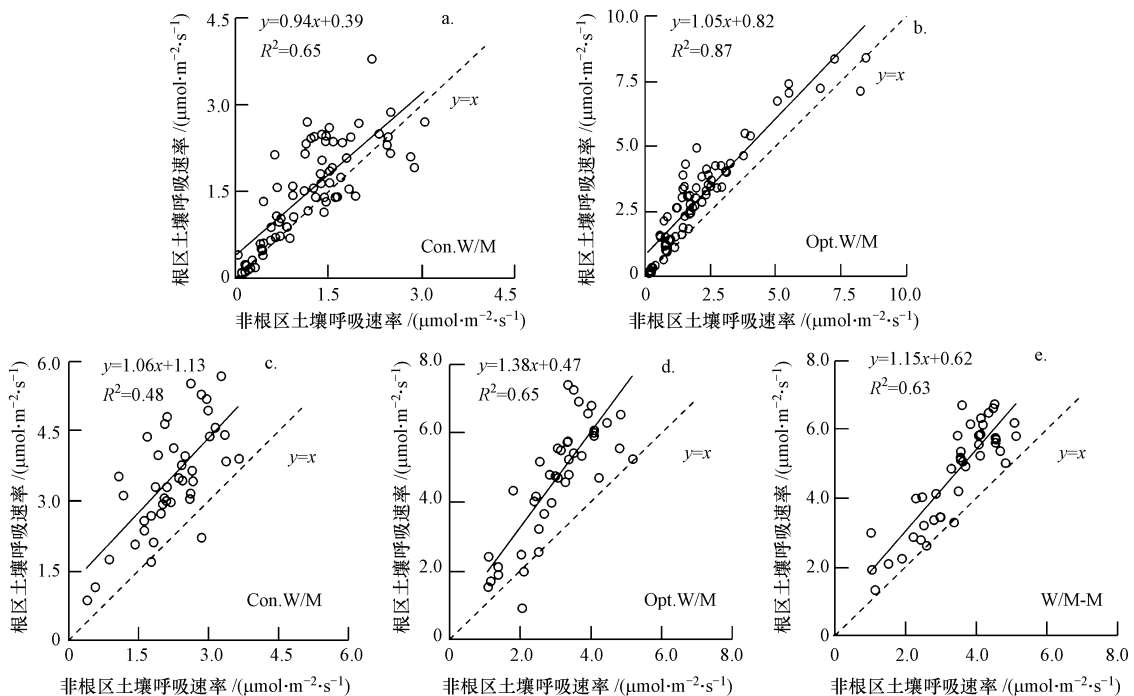


图3 不同轮作和管理措施下根区和非根区土壤呼吸动态变化
Fig.3 Dynamics of the root- and no root-zone soil respiration under different crop rotations and managements

玉米收获时二者之间无明显差异。Opt. W/M 与 Con. W/M 处理的不同之处在于冬小麦播种后温度较高,小麦出苗生长较快,根系呼吸作用较大,因此,根区土壤呼吸略高于非根区土壤呼吸;随着温度的降低,根区和非根区土壤呼吸之间的差异逐渐变小,而小麦返青期开始至夏玉米收获根区和非根区土壤呼吸之间的变化趋势与 Con. W/M 处理相同。W/M-M、W/S-M 和 M 处理,春玉米季根区和非根区土壤呼吸之间的变化与夏玉米季趋势一致。由图 3 还可以看出,较大的降雨(7月9—15日,连续1周的降雨量达178 mm)会短暂地抑制根区和非根区土壤呼吸,雨后玉米的快速生长造成根区和非根区土壤呼吸之间的最大差异。

3.2 不同轮作和管理措施下根区和非根区土壤呼吸的关系

图4显示出不同轮作和管理措施下作物根区和非根区土壤呼吸的关系。小麦季 Con. W/M 和 Opt. W/M 处理非根区土壤呼吸分别可以解释根区土壤呼吸 65%和 87%的变异(图4a和b),夏玉米季,两个处理非根区土壤呼吸分别可以解释根区土壤呼吸 48%和 65%的变异(图4c和d)。W/M-M、W/S-M 和 M 处理春玉米季非根区土壤呼吸分别可以解释根区土壤呼吸 68%、76%和 58%的变异(图4e、f和g)。从图4还可以看出,绝大部分点分布在 $y=x$ 线以上,这说明作物生育期内大部分时间根区土壤呼吸高于非根区土壤呼吸。



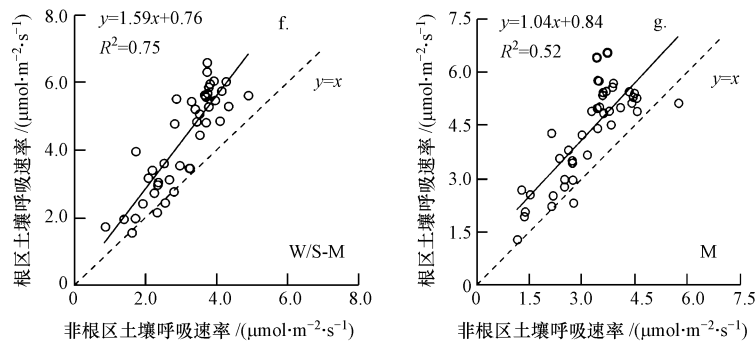


图4 不同轮作和管理措施下根区和非根区土壤呼吸的关系(a, b表示冬小麦季;c, d, e, f, g表示夏玉米和春玉米季)

Fig.4 Relationship of root- and no root-zone soil respiration under different crop rotations and managements (a, b represent winter wheat season; c, d, e, f, g represent summer and spring maize season)

3.3 不同轮作和管理措施下根系呼吸对土壤呼吸的贡献

不同轮作体系和管理措施显著影响了根区和非根区累积土壤呼吸(表1)。如将非根区土壤呼吸视作土壤碳排放, Con.W/M处理小麦和夏玉米季的土壤碳排放分别为7.5和9.5 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (以 CO_2 计)。与Con.W/M处理相比,在秸秆还田的作用下 Opt.W/M处理对应季节的土壤呼吸碳排放分别增加了68.0%和23.2%。W/M-M、W/S-M和M处理春玉米

季土壤碳排放相比 Con.W/M处理夏玉米季土壤碳排放分别增加了54.7%、36.8%和44.2%。由于根系活动,根区土壤呼吸明显高于非根区土壤呼吸。由根系排除法计算得出 Con.W/M和Opt.W/M处理小麦根系呼吸对土壤呼吸的贡献分别为25.0%和31.1%,玉米季根系呼吸对土壤呼吸的贡献分别为29.6%和35.0%。新的轮作体系W/M-M、W/S-M和M处理春玉米季根系呼吸对土壤呼吸的贡献分别为23.8%、24.4%和24.7%。

表1 不同轮作和管理措施下根系呼吸对土壤呼吸的贡献

Table 1 The contribution of root respiration to soil respiration under different crop rotations and managements

处理	区域	小麦季			根系呼吸 贡献	玉米季			根系呼吸 贡献
		范围/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	均值/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	累积排放/ ($\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$)		范围/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	均值/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	累积排放/ ($\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	
Con.W/M	根区	0.11~3.81	1.38	10.0a ^B	25.0%	0.88~5.70	3.40	13.5a ^B	29.6%
	非根区	0.09~2.48	0.97	7.5b _C		0.40~3.65	2.42	9.5b _B	
Opt.W/M	根区	0.17~4.16	3.09	18.3a ^A	31.1%	0.94~8.56	4.46	18.0a ^A	35.0%
	非根区	0.15~4.16	2.07	12.6b _A		1.09~5.18	2.93	11.7b _{AB}	
W/M-M	根区	—	—	—	—	1.36~6.76	4.46	19.3a ^A	23.8%
	非根区	0.26~5.51	1.72	11.6 ^{AB}		1.05~5.12	3.34	14.7b _A	
W/S-M	根区	—	—	—	—	0.97~6.57	4.00	17.2a ^A	24.4%
	非根区	0.35~3.59	1.37	9.7 ^{BC}		0.87~4.89	2.94	13.0b _A	
M	根区	—	—	—	—	1.30~6.57	4.08	18.2a ^A	24.7%
	非根区	0.31~3.76	1.61	11.4 ^{AB}		1.15~5.73	3.14	13.7b _A	

注:同一列带有不同小写字母表示同一处理根区和非根区土壤呼吸间差异显著($p<0.05$);同一列带有不同上标大写字母表示不同处理根区土壤呼吸间差异显著($p<0.05$);同一列带有不同下标大写字母表示不同处理非根区土壤呼吸间差异显著($p<0.05$);“—”表示休闲季无数据。

3.4 根区和非根区土壤呼吸与5 cm土壤温度之间的关系

土壤温度是土壤呼吸的重要影响因素之一。图5显示出不同轮作和管理措施下作物根区和非根区土壤呼吸与5 cm土壤温度的关系,除Con.W/M处理根区和非根区土壤呼吸与5 cm土壤温度呈显著

的直线关系外, Opt.W/M、W/M-M、W/S-M和M处理根区和非根区土壤呼吸均与5 cm土壤温度呈显著的指数关系,并且当温度较低时根区和非根区土壤呼吸之间的差别较小,随着作物季温度的升高,非根区的土壤呼吸和作物根系呼吸均有不同程度的增加,从而导致根区和非根区土壤呼吸与5 cm土

壤温度之间的关系差别逐渐增大,说明温度对根区 土壤呼吸的影响程度大于非根区土壤呼吸。

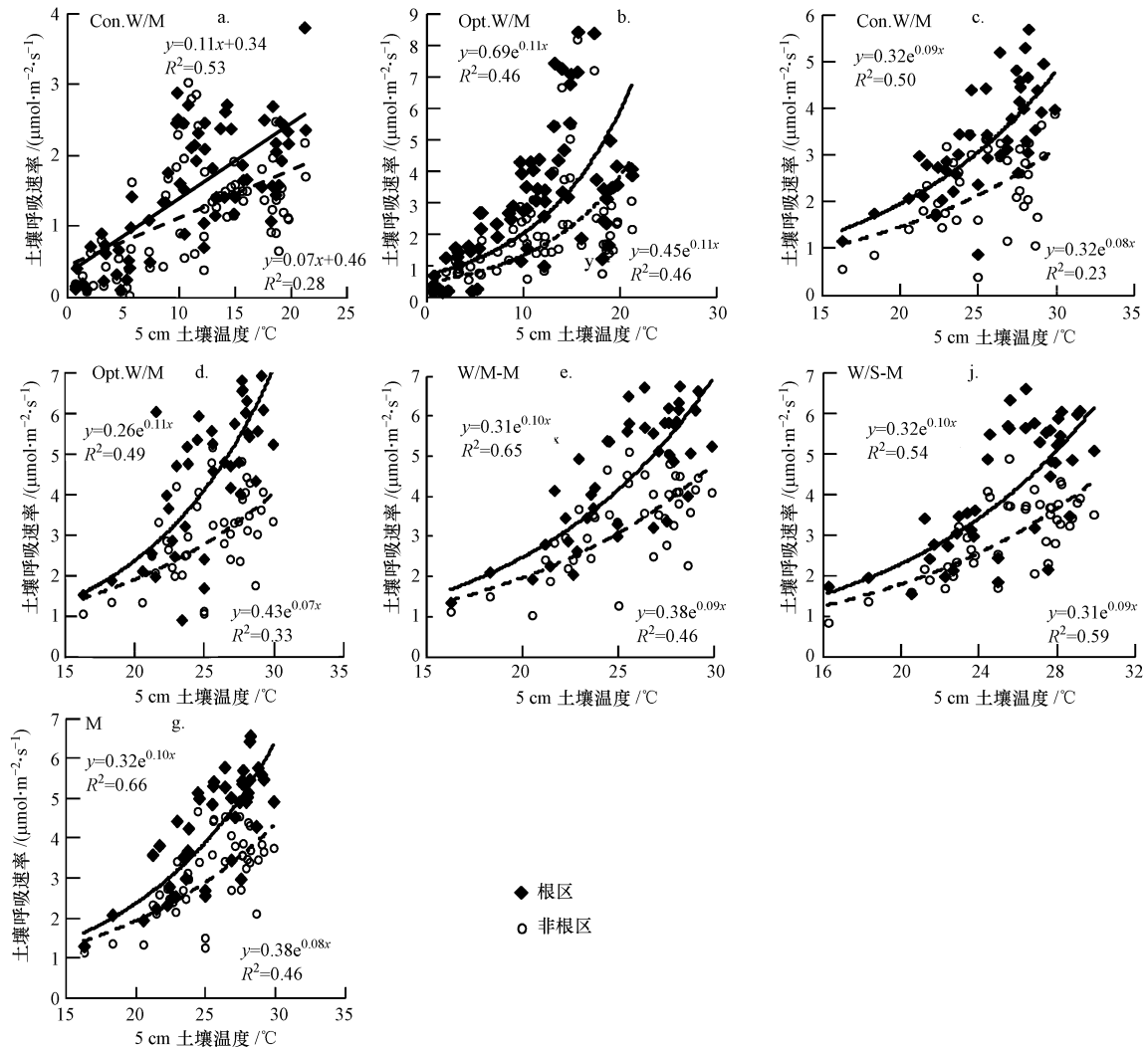


图5 根区和非根区土壤呼吸与5 cm土壤温度之间的关系(a, b表示冬小麦季;c, d, e, f, g表示夏玉米和春玉米季)

Fig.5 Relationship of root- and no root-zone soil respiration with 5 cm depth soil temperature (a, b represent winter wheat season; c, d, e, f, g represent summer and spring maize season)

4 讨论 (Discussion)

4.1 不同轮作和管理措施对根系呼吸贡献的影响

土壤呼吸被认为是由根系呼吸和有机质在土壤微生物和动物作用下的分解作用所组成 (Mosier *et al.*, 2006), 然而根系主导呼吸作用不依靠土壤碳库, 作物根系呼吸产生的 CO_2 不属于土壤碳损失 (Kuz'yakov, 2006; Atarashi-Andoh *et al.*, 2012). 因此, 定量土壤呼吸碳排放首先需弄清根系呼吸对土壤呼吸的贡献. 本研究条件下采用根系排除法得出冬小麦-夏玉米一年两熟传统管理体系小麦和玉米季根系呼吸占土壤呼吸的比例分别为 25.0% 和 29.6%, 冬小麦-夏玉米一年两熟优化管理体系小麦

和玉米季根系呼吸占土壤呼吸的比例分别为 31.1% 和 35.0%. 本研究所得秸秆还田翻耕条件下冬小麦季根系呼吸占土壤呼吸的比例略高于以往同等研究条件下的 26.2% (张宇等, 2009) 的研究中, 其原因可能是由于张宇等 (2009) 的研究中冬小麦季土壤呼吸的测定频率为 $20\sim 30\text{ d}\cdot\text{次}^{-1}$, 整个冬小麦季仅测定了 10 次, 较低的测定频率可能导致根系呼吸对土壤呼吸的贡献被低估; 另一方面可能是由于张宇等 (2009) 秸秆还田后的土壤翻耕深度为 15 cm, 而本研究条件下土壤翻耕深度为 30 cm, 较浅的土壤翻耕使还田的秸秆主要集中于表层土壤, 促进土壤基础呼吸大幅增加, 从而降低了根系呼吸对土壤呼吸的贡献. 蔡艳等 (2006) 采用根系排除法测得的

玉米季根系呼吸对土壤呼吸的平均贡献率为46.0%,高于本研究结果,其原因在于蔡艳等(2006)采用中部允许玉米植株穿过的静态箱法测定包含玉米主茎周围10 cm范围内根系的土壤呼吸和不种作物的裸地呼吸,以根区和裸地土壤呼吸之间的差异除以根区土壤呼吸来计算根系呼吸对土壤呼吸的贡献。然而,该方法未充分考虑玉米生育期内玉米行上和行间根系空间分布差异对土壤呼吸的影响,所测区域属于根系密集区,因此,可能会高估根系呼吸对土壤呼吸的贡献。冬小麦-夏玉米-春玉米、冬小麦-夏大豆-春玉米两年三熟和春玉米一年一熟优化管理体系春玉米根系呼吸对土壤呼吸的贡献分别为23.8%、24.4%和24.7%,轮作体系的改变对春玉米根系呼吸对土壤呼吸的贡献无明显影响。因此,以往忽略根系呼吸对土壤呼吸的贡献会在很大程度上高估土壤呼吸碳排放(牛灵安等,2009;黄涛等,2013)。

4.2 根系排除法测定根系呼吸对土壤呼吸贡献的不确定性

根系排除法是一种间接测定根系呼吸对土壤呼吸贡献的方法,因其简单、便于操作和破坏性小在不同生态系统根系呼吸对土壤呼吸的贡献研究中被广泛采用(Buchmann, 2000; Lee *et al.*, 2003; 刘颖等, 2005; 周非飞等, 2009; 朱凡等, 2010)。Rochette 等(1999)发现采用同位素法和根系排除法测得的根系呼吸贡献都在45%左右,没有明显差异。由此看出,根系排除法在农田系统根系呼吸贡献研究中具有一定的应用价值,可用于了解作物生长对土壤碳排放的贡献及比较不同轮作和管理措施对根系呼吸贡献的影响。但由于相应裸地中不存在作物根系,并未考虑由于根系存在及相应根系分泌物与根系微生物对土壤呼吸的影响,同时未考虑作物种植对土壤温度和水分的影响(Hanson, 2000; Kuzyakov, 2006)。这可能给本研究所计算根系呼吸对土壤呼吸的贡献带来一定的不确定性。考虑根系排除法对测定区域作物根系、根系分泌物、根际微生物和土壤温度与水分的影响,今后研究中可采用较长的PVC底座埋入土壤,同时在PVC底座埋入土壤部分的周围打孔,用尼龙纱缠绕以防止根系进入和保证水肥及物质流动畅通,从而使裸地面积尽可能的小,以保证根区和非根区微环境相接近,降低根系排除对土壤温度、湿度和物质流动的影响造成的土壤呼吸差异,以减少根系呼吸对土壤呼吸贡

献的不确定性。

4.3 土壤碳排放与土壤有机碳固定

土壤净CO₂排放被看作是作物体系固定碳投入和土壤有机质分解输出之间的差值(Mosier *et al.*, 2006)。本研究条件下秸秆还田显著促进了后茬作物季土壤呼吸(Bavin *et al.*, 2009; Gao *et al.*, 2013),即使在去除根系呼吸对土壤呼吸的贡献情况下,土壤仍表现为较大的碳排放。当今农业生产中仍提倡秸秆还田,因为该措施不仅能够增加土壤有机碳库,而且能够改善土壤性质和增加土壤肥力,促进作物产量提高(Huang *et al.*, 2006; Fan *et al.*, 2012)。黄涛等(2013)的研究结果表明,秸秆还田冬小麦-夏玉米一年两熟体系0~20 cm土壤有机碳含量相比秸秆不还田处理增加了3.9%~16.5%,在实验开始初的6年内平均每年的增加速度为0.04~1.44 t·hm⁻²(以C计)。课题组以往的研究结果已经证实不同轮作和管理措施下,0~20 cm土壤有机碳含量相比实验开始时均有不同程度的增加(除春玉米一年一熟体系外)(Gao *et al.*, 2013)。因此,在研究土壤碳排放时除考虑根系呼吸对土壤呼吸的贡献外,还应结合土壤有机碳的变化情况,以全面认识和评价土壤碳排放和碳固定。

5 结论(Conclusions)

华北平原农田土壤根区和非根区土壤呼吸具有明显的季节变化规律,非根区土壤呼吸能够解释大部分根区土壤呼吸。冬小麦-夏玉米一年两熟传统和优化管理体系根系呼吸对土壤呼吸的贡献小麦季分别为25.0%和31.1%,玉米季分别为29.6%和35.0%。轮作体系对春玉米根系呼吸的贡献无显著影响,冬小麦-夏玉米(或夏大豆)-春玉米两年三熟和春玉米一年一熟优化管理体系下,春玉米根系呼吸对土壤呼吸的贡献分别为23.8%、24.4%和24.7%。不同轮作和管理措施均表现为较大的土壤碳排放,忽略根系呼吸的贡献会高估土壤呼吸碳排放。不同轮作和管理措施下,5cm土壤温度对根区土壤呼吸的影响程度大于非根区土壤呼吸。

致谢:非常感谢陈新平教授及其课题组成员和张福锁教授提供的长期定位试验研究平台。

参考文献(References):

Atarashi - Andoh M, Koarashi J, Ishizuka S, *et al.* 2012. Seasonal patterns and control factors of CO₂ effluxes from surface litter, soil

- organic carbon, and root-derived carbon estimated using radiocarbon signatures [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152: 149-158
- Bavin T K, Griffis T J, Baker J M, *et al.* 2009. Impact of reduced tillage and cover cropping on the greenhouse gas budget of a maize/soybean rotation ecosystem [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 134(3/4): 234-242
- Bond-Lamberty B, Thomson A. 2010. Temperature-associated increases in the global soil respiration record [J]. *Nature*, 464(7288): 579-582
- Buchmann N. 2000. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(11/12): 1625-1635
- 蔡艳, 丁维新, 蔡祖聪. 2006. 土壤-玉米系统中土壤呼吸强度及各组分贡献[J]. *生态学报*, 26(12): 4274-4280
- Cui Z L, Zhang F S, Chen X P, *et al.* 2008. On-farm estimates of indigenous nitrogen supply for site-specific nitrogen management in the North China Plain [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 81(1): 37-47
- Fan M S, Shen J B, Yuan L X, *et al.* 2012. Improving crop productivity and resource use efficiency to ensure food security and environmental quality in China [J]. *Journal of Experimental Botany*, 63(1): 13-24
- Gao B, Ju X T, Su F, *et al.* 2013. Comparison of soil respiration in typical conventional and new alternative cereal cropping systems on the North China Plain [J]. *PLoS ONE*, 8(12), doi: 10.1371/journal.pone.0080887
- Grace J, Rayment M. 2000. Respiration in the balance[J]. *Nature*, 404: 819-820
- Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, *et al.* 2000. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations [J]. *Biogeochemistry*, 48(1): 115-146
- 黄斌, 王敬国, 龚元石, 等. 2006. 冬小麦夏玉米农田土壤呼吸及碳平衡的研究[J]. *农业环境科学学报*, 25(1): 156-160
- Huang T, Gao B, Christie P, *et al.* 2000. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in a double cropping cereal rotation as affected by nitrogen and straw management [J]. *Biogeosciences Discussions*, 10(8): 13191-13229
- 黄涛, 仇少君, 杜鹃, 等. 2013. 碳氮管理措施对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量、秸秆腐解、土壤 CO₂排放的影响[J]. *中国农业科学*, 46(4): 756-768
- Huang Y, Sun W J. 2006. Changes in topsoil organic carbon of croplands in mainland China over the last two decades [J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(15): 1785-1803
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: Agriculture*[A]//Metz B, Davidson O R, Bosch P R. *Mitigation, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[C]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press
- Jia B R, Zhou G S, Wang F Y. *et al.* 2006. Partitioning root and microbial contributions to soil respiration in *Leymus chinensis* populations [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(4): 653-660
- Kuzyakov Y. 2006. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(3): 425-448
- Lee M S, Nankeen K, Nkatsubo T, *et al.* 2003. Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperate deciduous forest [J]. *Plant and Soil*, 255(1): 311-318
- 刘明, 陶洪斌, 王璞, 等. 2008. 华北平原水氮优化条件下不同种植制度的水分效应研究[J]. *水土保持学报*, 22(2): 116-125
- 刘颖, 韩士杰, 胡艳玲, 等. 2005. 土壤温度和湿度对长白松林土壤呼吸速率的影响[J]. *应用生态学报*, 16(9): 1581-1585
- 孟凡乔, 官桂红, 张庆忠, 等. 2006. 华北高产农田长期不同耕作方式下土壤呼吸及其季节变化规律[J]. *环境科学学报*, 26(6): 992-999
- Meng Q F, Sun Q P, Chen X P, *et al.* 2012. Alternative cropping systems for sustainable water and nitrogen use in the North China Plain [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 146(1): 93-102
- Mosier A R, Halvorson A D, Reule C A, *et al.* 2006. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in irrigated cropping systems in northeastern Colorado [J]. *Journal of Environmental Quality*, 35(4): 1584-1598
- 牛灵安, 郝晋珉, 张宝忠, 等. 2009. 长期施肥对华北平原农田土壤呼吸及碳平衡的影响[J]. *生态环境学报*, 18(3): 1054-1060
- Robertson G P, Paul E A, Harwood R R. 2000. Greenhouse gases in intensive agriculture: contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere [J]. *Science*, 289: 1922-1926
- Rochette P, Flanagan L B, Gregorich E G. 1999. Separating soil respiration into plant and soil components using analyses of the natural abundance of carbon-13 [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 63(5): 1207-1213
- Wertha M, Kuzyakov Y. 2008. Root-derived carbon in soil respiration and microbial biomass determined by ¹⁴C and ¹³C [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(3): 625-637
- 张宇, 张海林, 陈继康, 等. 2009. 耕作方式对冬小麦田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. *中国农业科学*, 42(9): 3354-3360
- 周非飞, 林波, 刘庆. 2009. 青藏高原东缘亚高山针叶林人工恢复过程中的土壤呼吸特征[J]. *应用生态学报*, 20(8): 1783-1790
- 朱凡, 王光军, 田大伦, 等. 2010. 杉木人工林去除根系土壤呼吸的季节变化及影响因子[J]. *生态学报*, 30(9): 2499-2506