

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估	陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明 (789)
空气细菌真菌污染的分级评价构建方法	张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁 (795)
2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析	何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌 (801)
北京市夏季不同O ₃ 和PM _{2.5} 污染状况研究	王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪 (807)
2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性	王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶 (816)
上海典型持续性PM _{2.5} 重度污染的数值模拟	常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰 (825)
厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平	韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛 (834)
复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究	黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (847)
环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究	孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康 (854)
面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究	杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒 (862)
三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系	周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊 (873)
三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征	陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙 (884)
黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析	冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉 (893)
岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析	谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕 (900)
长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征	王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇 (910)
长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征	尹肃, 冯成洪, 李扬飏, 殷立峰, 沈珍瑶 (917)
巢湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价	熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿 (925)
三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价	王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良 (935)
海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估	童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军 (942)
三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征	何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰 (950)
三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响	梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇 (955)
不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究	周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃 (963)
富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征	贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩 (970)
间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响	汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东 (980)
非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究	张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博 (988)
紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响	王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹 (994)
类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子	顾怡冰, 马邕文, 万金泉, 王艳, 关泽宇 (1000)
富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响	李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛 (1008)
铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能	孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷 (1016)
富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性	方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇 (1023)
3种低分子量有机酸对紫色土吸附菲的影响	谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬 (1032)
HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究	蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞 (1039)
水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响	王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广伟, 汪印 (1048)
煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究	张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚 (1055)
硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究	周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉 (1061)
低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究	端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀朵, 赵乐军, 方乐琪 (1070)
游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响	孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航 (1075)
1株Arthrobacter arilaitensis菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用	何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义 (1082)
海洋菌株y3的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性	孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津 (1089)
几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁 (1098)
不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响	张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义 (1106)
绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响	周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐 (1114)
黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究	方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼 (1121)
黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征	张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽 (1128)
包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析	张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大 (1139)
砷污染土壤复合淋洗修复技术研究	陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝 (1147)
以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性	赵艳辉, 赵阳国, 郭亮 (1156)
废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究	王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东 (1163)
淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响	耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇 (1171)
《环境科学》征订启事 (1138) 《环境科学》征稿简则 (1155) 信息 (824, 853, 883)	

不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响

张延^{1,2}, 梁爱珍^{1*}, 张晓平¹, 陈升龙^{1,2}, 孙冰洁^{1,2}, 刘四义^{1,2}

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 以 2001 年在东北典型黑土上进行的保护性耕作长期定位试验下免耕、垄作及常规耕作土壤进行了室内培养实验, 按照田间持水量 (water-holding capacity, WHC) 的 30%、60%、90%、120%、150%、180%、210%、240%、270% 设定了 9 个水分梯度, 并分别对其二氧化碳 (CO₂) 排放量进行了 22 d 的短期观测, 以研究不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响。结果表明: ①干土条件下在加水培养初期, 3 种耕作方式均产生了明显的激发效应, 并且土壤呼吸速率与土壤含水量间存在正相关关系。②除干旱 (30% WHC) 及淹水 (240% WHC、270% WHC) 条件下, 3 种耕作方式 CO₂ 排放通量分别为免耕 > 垄作 > 常规耕作。③对不同耕作方式下土壤水分状况及 CO₂ 排放通量进行了方程拟合, 在 30% ~ 270% WHC 条件下, 免耕的 CO₂ 排放通量与水分状况拟合为二次回归方程, 而垄作与常规耕作则是线性回归方程。在 30% ~ 210% WHC 条件下, 免耕与垄作下土壤 CO₂ 排放通量与水分状况均可拟合为较好的对数方程, 可决系数 R^2 分别为 0.966、0.956。

关键词: 耕作方式; 土壤水分; 土壤呼吸; CO₂ 排放通量; 拟合方程

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-1106-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.03.041

Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices

ZHANG Yan^{1,2}, LIANG Ai-zhen^{1*}, ZHANG Xiao-ping¹, CHEN Sheng-long^{1,2}, SUN Bing-jie^{1,2}, LIU Si-yi^{1,2}

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In the early stage of an incubation experiment, soil respiration has a sensitive response to different levels of soil moisture. To investigate the effects of soil moisture on soil respiration under different tillage practices, we designed an incubation trial using air-dried soil samples collected from tillage experiment station established on black soils in 2001. The tillage experiment consisted of no-tillage (NT), ridge tillage (RT), and conventional tillage (CT). According to field capacity (water-holding capacity, WHC), we set nine moisture levels including 30%, 60%, 90%, 120%, 150%, 180%, 210%, 240%, 270% WHC. During the 22-day short-term incubation, soil CO₂ emission was measured. In the early stage of incubation, the priming effects occurred under all tillage practices. There were positive correlations between soil respiration and soil moisture. In addition to drought and flood conditions, soil CO₂ fluxes followed the order of NT > RT > CT. We fitted the relationship between soil moisture and soil CO₂ fluxes under different tillage practices. In the range of 30%-270% WHC, soil CO₂ fluxes and soil moisture fitted a quadratic regression equation under NT, and linear regression equations under RT and CT. Under the conditions of 30%-210% WHC of both NT and RT, soil CO₂ fluxes and soil moisture were well fitted by the logarithmic equation with fitting coefficient $R^2 = 0.966$ and 0.956, respectively.

Key words: tillage practices; soil moisture; soil respiration; carbon dioxide fluxes; fitting equation

农田生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分, 是陆地生态系统碳循环研究的重要环节^[1], 它在维持全球碳平衡和减缓温室效应中有重要作用。以往的研究侧重于温度对土壤呼吸的影响^[2~7], 而研究水分对土壤呼吸的影响, 能为探索陆地生态系统在碳循环方面的源-汇功能和揭示碳的源汇之谜提供更有力的证据^[8]。土壤水分在土壤的生物与非生物进程中发挥着重要作用, 因此明显影响土壤 CO₂ 的排放^[9]。已有研究表明, 全球气候变化除导致温度发生了变化之外, 也使得世界水分分布状况发生了巨大改变^[10], 这将直接影响到土壤呼吸的情况, 所以土壤水分的变化对 CO₂ 排放影响的研究有着至关重要的意义。在干旱及淹水等极端天气下,

水分对土壤呼吸速率影响尤为重要, 短期内土壤呼吸对水分从干旱到湿润的响应变化比较明显, 从干旱到淹水条件, 土壤 CO₂ 排放量先增加达到稳定然后再下降^[11,12]。在土壤 CO₂ 排放的研究中, 将土壤进行室内培养并观测已经成为广泛使用的方法^[13~16]。Wei 等^[17]的研究表明, 土壤 CO₂ 排放速

收稿日期: 2015-06-25; 修订日期: 2015-11-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31170483); 中国科学院重点部署项目 (KZZD-EW-TZ-16-02); 中国科学院东北地理与农业生态研究所“优秀青年人才”基金项目 (DLSYQ12003); 中国科学院青年创新促进会项目 (2015183)

作者简介: 张延 (1992 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为土壤团聚体与有机碳固定, E-mail: zhangyan13@mails.ucas.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: liangaizhen@iga.ac.cn

率在培养前 27d 内土壤 CO₂ 排放速率随水分梯度的变化在培养初期响应敏感,水分是主要影响因素,随着培养时间的推移,土壤 CO₂ 排放速率不再随水分变化而显著变化,土壤温度成为影响 CO₂ 排放通量的主要因素. 同时,耕作方式的不同会导致土壤呼吸速率存在较明显差异^[18],保护性耕作对土壤 CO₂ 排放的影响研究也已经成为关注焦点^[19~22]. 因此为了全面地研究不同耕作方式下土壤呼吸对土壤水分状况的初期响应,以及在干旱和淹水条件下土壤呼吸的状况,本研究采用实施了 12a 的保护性耕作土壤与常规耕作土壤作为供试土壤,设置 9 个不同水分梯度,在室内恒温(25℃)条件下培养以观测土壤呼吸状况. 通过实验主要探讨:①同一耕作方式中不同水分梯度对土壤呼吸速率及 CO₂ 排放通量的初期影响;②不同耕作方式下土壤水分状况与 CO₂ 短期排放通量间存在的差异及其相关关系.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于吉林省德惠市米沙子乡(44°12'N, 125°33'E)中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土农业试验示范基地,海拔约为 177 m. 试验区气候属于中温带大陆性季风气候,冬季寒冷漫长(11 月至次年 3 月)且干旱,积雪覆盖一般低于 0.25 m,季节性积雪覆盖通常始于 11 月,次年 4 月初融化. 过去 30 年年均气温为 4.4℃,年均降水量为 520 mm,大于 70% 的降水主要集中在 6~8 月. 土壤类型为中层典型黑土(Typic Hapludoll, USDA 土壤分类法).

1.2 田间试验设计

试验小区采用单因素裂区、随机区组设计,每

个处理 4 次重复. 单因素为耕作处理:免耕(no-tillage, NT)、垄作(ridge tillage, RT)和常规耕作(conventional tillage, CT)这 3 种,每种耕作方式裂分为玉米和大豆轮作辅助处理,两种作物同时存在. 每个小区面积为 5.2 m×30 m. 每两个小区分界线处理有一固定标记,确保耕种时不发生偏移. 不同于传统耕作方式,所有处理均将秸秆全部还田覆盖于地表. 2003~2008 年播种所用机械为美国产免耕播种机(KINZE-3000),2009 年至今采用经改造后的两行牵引式免耕播种机(JohnDeer-7200),可以在秸秆覆盖地表的情况下一次性完成精确播种、施肥和镇压作业. 免耕除进行播种外,全年不再搅动土壤;常规耕作秋季收获后进行耕翻(深度约为 18~20 cm),春季进行整地(深度约 7.5~10 cm)、播种、中耕和起垄作业;垄作除播种和 6 月左右进行中耕和起垄外,收获后到播种前不再扰动土壤. 耕翻等作业所用机械为拖拉机和三角犁犁. 3 种耕作处理施用底肥和追肥相同,底肥都在播种时通过免耕播种机直接施入. 追肥方式为:MP 和 RT 处理在 6 月下旬或第二次中耕时施入,NT 处理为在相近时间的雨后或雨前面施. 大豆只施底肥,氮(N)、磷(P)、钾(K)肥的施用量分别为 40、60 和 80 kg·hm⁻²,玉米的氮肥分别作为底肥和追肥施入,施用量共为 150 kg·hm⁻²,磷肥和钾肥只作底肥施入,施用量分别为 45.5 kg·hm⁻²和 80 kg·hm⁻².

1.3 供试土壤

选取定位试验免耕、垄作及常规耕作小区,采集表层(0~10 cm)土壤,7 点混合. 样品带回实验室风干后去除可见的草根后分成两份,一份样品过 2 mm 筛用来做培养实验;一份样品用于土壤基本理化性质的测定. 研究区各土壤某些理化性质详见表 1.

表 1 培养实验土壤的基本理化性质

Table 1 Selected soil physical and chemical properties					
耕作方式	土壤类型	pH 值	有机碳/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	C/N
免耕(NT)	壤质黏土	4.9	19.1	1.7	11.2
垄作(RT)	壤质黏土	5.1	20.9	1.8	11.6
常规耕作(CT)	壤质黏土	4.9	18.9	1.8	10.5

1.4 培养实验设计

培养实验有 3 种供试土壤 NT、RT、CT,按照威尔科克斯法测定田间持水量(water-holding capacity, WHC)并按照田间持水量的 30%、60%、90%、120%、150%、180%、210%、240%、270% 设定 9 个水分梯度,每个水分梯度设置 5 个重复,加 10 个空白对照组,共 145 组. 称取干土 200 g 至 500 mL

玻璃三角瓶中,放置在实验台上轻轻地晃动至表面平整,按照不同水分梯度用注射器向三角瓶中沿瓶壁旋转缓缓加水,防止将土壤表面冲刷出明显痕迹. 加水完成后用无菌培养容器封口膜(透气不透水)将三角瓶封口,使三角瓶内水分基本保持恒定,将样品放入稳定性测试箱(HPP750, Memmert, 德国)中,温度调节至 25℃ 进行培养,稳定 48 h 后再进行呼

吸速率的测试,且测量间隔为 48 h. 根据观测确定其呼吸速率基本达到恒定值停止培养,共计 22 d,培养期间通过称重的方式保持水分恒定^[9]. 根据实验观测在 240% WHC、270% WHC 条件下,加入的水量已完全浸没土层,故认为其为淹水状态.

1.5 测定方法与数据处理

利用美国 LI-COR 公司生产的 LI-820 CO₂ 红外气体分析仪测定土壤 CO₂ 排放速率,根据封闭动态箱原理对土壤 CO₂ 排放速率进行测定计算^[23],将玻璃瓶、LI-820 构建成封闭动态体系(图 1),并对封闭动态体系内的 CO₂ 浓度进行 120 s 实时动态测定. 将测定的 CO₂ 浓度与测定时间进行线性回归,计算出封闭动态体系内 CO₂ 浓度的增加速率 a . CO₂ 排放速率根据公式(1)进行计算:

$$F = \frac{a \times V}{V_m \times M} \quad (1)$$

式中, F 为培养物质的 CO₂ 产生速率 [$\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{s})^{-1}$]; V_m 是 CO₂ 摩尔体积 ($\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$), M 是培养物质的质量 (g); V 为封闭动态系统内的体积 (L).

根据培养期间测定的 CO₂ 排放速率进行分段积分计算培养期间的 CO₂ 累积排放量^[24]. 具体计算方法见公式(2):

$$\text{CCE} = V_1 t_1 + \sum_{k=2}^n \frac{V_k + V_{k-1}}{2} \Delta t_k \quad (2)$$

式中, CCE 表示培养期间的 CO₂ 累积排放量 ($\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$); V_1 是第一次测定时的 CO₂ 排放速率 [$\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{s})^{-1}$], t_1 指从开始培养到第一次测定的间隔时间 (s), V_k 为第 k 次测定时的 CO₂ 排放速率 [$\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{s})^{-1}$], Δt_k 表示第 $k-1$ 次测量到第 k 次

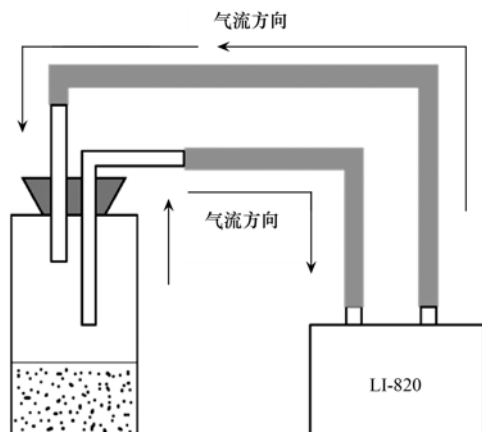


图 1 测定 CO₂ 排放速率时的封闭动态体系示意

Fig. 1 Diagrammatic sketch of enclosed dynamic system for CO₂ emission rate measuring

测量的间隔时间 (s).

采用 Excel 2013 进行平均值及标准差计算, SPSS 19.0 进行方差分析、Tukey 多重比较进行显著性差异检验 ($P = 0.05$) 及回归分析, Pearson 法分析不同耕作方式下土壤水分含量与土壤呼吸间相关关系, SigmaPlot 10.0 进行绘图.

2 结果与分析

2.1 不同耕作方式和水分梯度下土壤呼吸速率

由图 2 可知, 3 种耕作方式在不同水分梯度下均表现出在培养最初 48 h 时的土壤呼吸速率较高, 随后逐渐下降. 水分梯度介于 30% ~ 210% WHC 范围内的土壤呼吸速率均随着水分的增加呈上升趋势

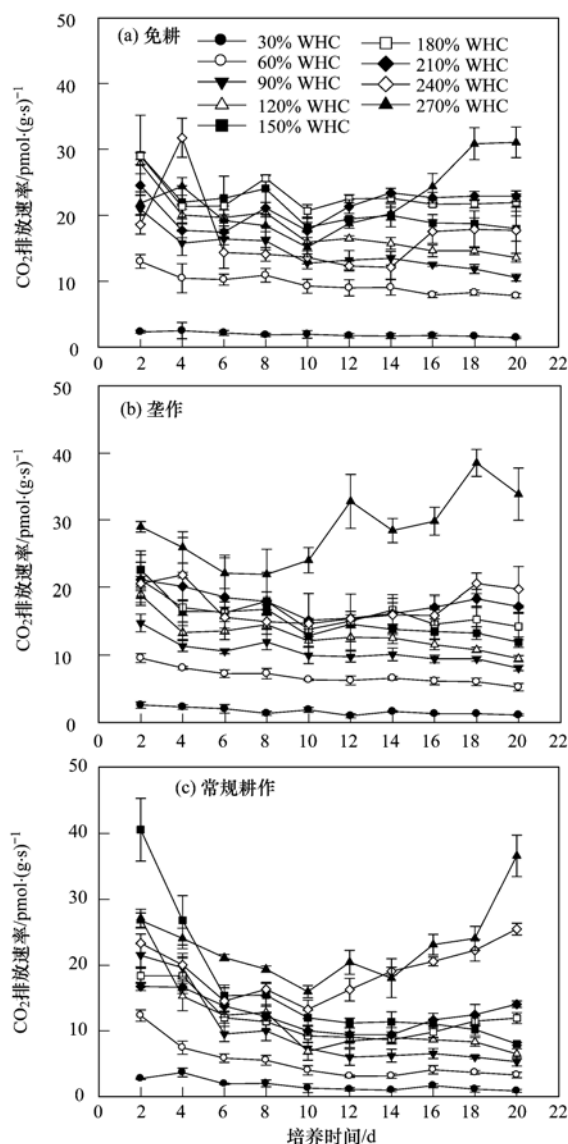


图 2 不同耕作方式和水分梯度下土壤呼吸速率 (均值 ± 标准差)

Fig. 2 Soil respiration rate under different tillage practices and soil moisture (mean value ± standard deviation)

势。当土壤水分到达 240% WHC、270% WHC 的淹水状态时,土壤呼吸速率极其不稳定。NT 条件下,除 240% WHC、270% WHC 水分梯度外,其它都表现为在培养 16 d 后,呼吸速率趋于稳定,前期波动也不明显,而淹水条件下有较大的波动情况,270% WHC 在 18 d 到达峰值后趋于平稳。RT 条件下,除 240% WHC、270% WHC 水分梯度外其波动与 NT 类似,但总体的呼吸速率小于 NT。RT 在 270% WHC 淹水条件下,呼吸速率明显高于其他水分梯度,且波动较为明显。CT 条件下,除 150% WHC、240% WHC、270% WHC 水分梯度外,其他水分梯度呼吸速率也均随着培养时间的延长趋于平稳;在 150% WHC 下土壤呼吸波动明显,表现为初始较高,之后快速降低,而淹水条件下(240% WHC、270% WHC),土壤呼吸速率先下降,再升高,波动幅度较大。

2.2 土壤 CO₂ 排放通量

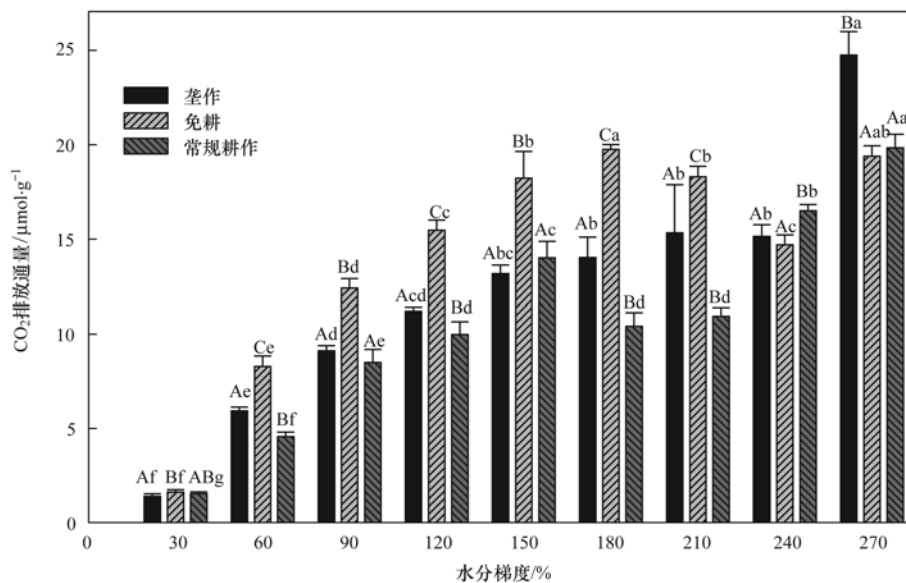
2.2.1 相同耕作方式不同水分梯度下 CO₂ 排放通量

由图 3 可知,NT 条件下,180% WHC 与 270% WHC 下 CO₂ 排放通量较高,分别为 19.75 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 19.4 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,且不存在显著性差异;150% WHC (18.23 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)、210% WHC (18.3 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)与 270% WHC (19.4 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)及 120% WHC (15.47 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)与 240% WHC (14.69 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)间也均不存在显著性差异,其它处理间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。RT 条件下,150%

WHC、180% WHC、210% WHC、240% WHC 处理间 CO₂ 排放通量不存在显著性差异,分别为 13.17、14.02、15.32、15.14 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。但在绝对淹水条件(270% WHC)下,排放通量显著增高(24.75 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)。90% WHC (9.11 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)与 120% WHC (11.20 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)、120% WHC (11.20 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)与 150% WHC (13.17 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)间均不存在显著性差异,其它处理间差异均显著 ($P < 0.05$)。CT 处理下,120% WHC (9.98 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)、180% WHC (10.41 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)、210% WHC (10.93 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)间不存在显著性差异,其它处理下均存在显著性差异 ($P < 0.05$)。3 种不同耕作方式下,排放通量最低均为 30% WHC,而 60% WHC 与 90% WHC 条件下 CO₂ 排放通量也较低。整体来看,3 种耕作方式下土壤 CO₂ 排放通量均随着水分的增加呈现出先增加后降低再增加的趋势,但不同耕作方式两个转折点对应的水分含量均不同,RT 下为 210% 和 240%,NT 下为 180% 和 240%,CT 下则为 150% 和 180%。

2.2.2 相同水分不同耕作方式下 CO₂ 排放通量

由图 3 可知,60% WHC、120% WHC、180% WHC、210% WHC 水分梯度下,3 种耕作方式的 CO₂ 排放通量均存在显著差异 ($P < 0.05$),且 CO₂ 排放通量均为 NT > RT > CT。在 30% WHC 和 270% WHC 水分梯度下,NT 与 CT 间不存在显著性差异,



相同小写字母表示在同种耕作方式不同水分梯度下 CO₂ 排放通量在 0.05 水平不显著;

相同大写字母表示在同种水分梯度不同耕作方式下 CO₂ 排放通量在 0.05 水平不显著

图 3 不同耕作方式和水分梯度下土壤 CO₂ 排放通量

Fig. 3 Soil CO₂ fluxes under different tillage practices and soil moisture levels

但二者均与 RT 间存在显著性差异 ($P < 0.05$), 30% WHC 条件下 NT、CT 均大于 RT, 但在 270% WHC 条件下, NT、CT 均明显小于 RT. 在 90% WHC 下 RT 和 CT 土壤 CO_2 排放通量不存在显著性差异, 但均显著小于 NT ($P < 0.05$). 在 240% WHC 水分条件下, NT 和 RT 土壤 CO_2 排放通量不存在显著性差异, 但均显著小于 CT ($P < 0.05$).

2.2.3 不同耕作方式与不同水分梯度下 CO_2 排放通量拟合方程

图 4 为不同耕作方式在 30% ~ 270% WHC 水分梯度下 CO_2 排放通量变化趋势的拟合曲线, 表 2 为 3 种耕作方式下 CO_2 排放通量与水分的关系所对应的拟合方程, 经过不同方程拟合后, 选择了可决系数 R^2 较高的为最后拟合方程. NT 下, CO_2 排

放量与水分含量呈一元二次回归关系 $y = -3.733 + 22.477x - 5.523x^2$, $R^2 = 0.907$, $P < 0.01$. RT 与 CT 下 CO_2 排放通量则与土壤水分含量呈直线回归关系 RT: $y = 7.568x + 0.878$, $R^2 = 0.873$, $P < 0.01$; NT: $y = 6.35x + 1.173$, $R^2 = 0.845$, $P < 0.01$.

由图 4 可知, NT、RT 与 CT 下 CO_2 排放通量在 30% ~ 210% WHC 条件下, 拟合曲线呈较好趋势, 考虑到 240% 及 270% WHC 为淹水状态, 有可能呼吸对水分的响应与其它水分梯度有所差异, 因此, 本研究对 3 种耕作方式在 30% ~ 210% 水分梯度下 CO_2 排放通量也进行了方程拟合. 由表 3 可知, 3 种耕作方式下土壤 CO_2 排放通量均与 30% ~ 210% 水分呈较好的对数关系, 并且 NT 与 RT 的可决系数 R^2 分别高达 0.966 与 0.956 ($P < 0.01$).

表 2 不同耕作方式下水分梯度介于 30% ~ 270% 范围时与 CO_2 排放通量的拟合方程

Table 2 Regression equations of CO_2 fluxes and soil moisture in range of 30%-270% WHC under different tillage practices				
耕作方式	拟合方程	样本数	可决系数 (R^2)	差异显著性
NT	$y = -3.733 + 22.477x - 5.523x^2$	45	0.907	$P < 0.01$
RT	$y = 7.568x + 0.878$	45	0.873	$P < 0.01$
CT	$y = 6.35x + 1.173$	45	0.845	$P < 0.01$

表 3 不同耕作方式下水分梯度介于 30% ~ 210% WHC 范围时与 CO_2 排放通量的拟合方程

Table 3 Regression equations of CO_2 fluxes and soil moisture in range of 30%-210% WHC under different tillage practices				
耕作方式	拟合方程	样本数	可决系数	差异显著性
NT	$y = 9.447 \ln x + 13.309$	35	0.966	$P < 0.01$
RT	$y = 7.226 \ln x + 9.926$	35	0.956	$P < 0.01$
CT	$y = 5.619 \ln x + 8.484$	35	0.823	$P < 0.01$

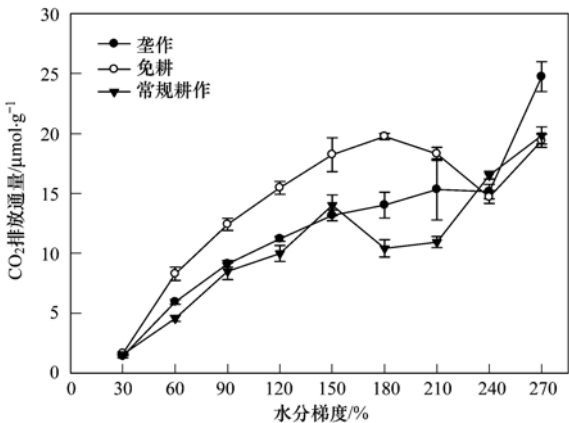


图 4 不同耕作方式下土壤 CO_2 排放通量与水分梯度的拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves between soil CO_2 flux and soil moisture under different tillage practices

3 讨论

3.1 耕作方式对土壤呼吸的影响

诸多研究指出, 水分对土壤呼吸的影响具有复

杂性与不确定性, 不同生态系统土壤水分与土壤呼吸间存在不同的相关关系^[25,26]. Franzluebbers 等^[27]认为当土壤受耕作扰动时, 破坏了土壤的团粒结构, 使有机质更易于被分解, 而导致大量 CO_2 释放, 有机质含量降低. 孟凡乔等^[28]研究发现, 耕作能显著提高华北高产农田土壤呼吸速率. 本研究结果显示, 3 种耕作方式下土壤呼吸速率与水分含量存在正相关关系, 均随着土壤水分含量的上升也有所上升. 实验初始, 3 种耕作方式在不同水分梯度下呼吸速率均较高, 这是由于供试土壤为风干土, 较为干旱, 土壤水分状况的增加也会迅速激发土壤呼吸, 通常这种激发效应会持续 2 ~ 6 d^[29~33]. Birch^[34]早在 1958 年就观测到这一现象, 因此称之为“Birch 效应”(Birch effect). NT 与 RT 条件下, 除 240% WHC 与 270% WHC 外, 其呼吸速率波动均不大, 变化趋势较为平稳, 而 CT 条件下, 除淹水条件下波动较大外, 150% WHC 呼吸速率波动也较明显. 这与 Reichstein 等^[35]和 Conant 等^[36]的研究结果相

似,他们认为只有在土壤水分含量适中时土壤呼吸速率最大. 淹水条件(240% WHC、270% WHC)下,3种耕作方式土壤呼吸速率都不稳定且值较高,这与Bowden等^[37]的研究结果相反,他认为水分过高会抑制CO₂的释放,淹水抑制了微生物活性,降低了土壤中有机碳的矿化速率. 但是,由于淹水也增加了水溶性有机碳的溶出,提高微生物活动的底物浓度,有可能增加土壤有机碳的矿化量^[38]. 近年来,已有一些研究报道了淹水条件下土壤有机碳矿化速率高于好气处理的结果^[39,40]. 30% WHC、60% WHC条件下土壤呼吸速率很低,有可能是因为在干旱环境中,土壤微生物会因缺少水分而处于休眠状态,活性降低,导致呼吸速率较低^[27,41].

孙小花等^[19]在黄土区的研究结果显示,与保护性耕作相比,常规耕作显著增加土壤排放量. 本研究结果显示,除淹水条件(240% WHC、270% WHC)和干旱条件30% WHC条件下,NT均与RT和CT间存在显著性差异($P < 0.05$),并且NT的CO₂排放通量均明显高于RT和CT. 而RT的CO₂排放通量也高于CT,这与以往的研究结果不同. 国外的研究认为,免耕与传统耕作相比,由于减少耕作次数,加之秸秆覆盖,减低了土壤有机质的腐解,增加了有机质在土壤中的停留时间,所以可以明显减少土壤CO₂的排放^[42~45]. 而本研究出现的结果有可能是因为NT和RT条件下秸秆还田后混匀在土壤中,所以在实验中会明显提高CO₂的排放量,又因为NT下秸秆还田但不扰动土壤,使得土壤微生物在获得充足可利用碳源的同时可以在稳定环境中进行代谢繁殖,促进了土壤微生物的多样性和生物量的增加^[46,47],加速了CO₂的排放,所以其CO₂排放量会明显高于RT和CT. 官情等^[48]在黄土旱塬区观测冬小麦农田土壤呼吸在秸秆覆盖措施下显著高于对照,张庆忠等^[49]在田间对比试验表明随着秸秆还田量的增加,土壤呼吸速率显著增加,且在秸秆还田后随着时间的推移增加效应逐渐减小,这都与本研究结果相一致. 同时,本研究结果促进笔者进一步探讨保护性耕作下对于土壤微生物、土壤团聚体及土壤结构等性质的改变.

3.2 水分梯度对土壤呼吸的影响

3种耕作方式下土壤CO₂排放通量均分别表现出30% WHC条件下最低,其次为60% WHC、90% WHC. 这有可能是因为较低的土壤含水量造成微生物活性下降,从而对土壤呼吸产生抑制作用. 这种抑制作用主要体现在降低土壤有机质的可利用性和

过低水势导致土壤微生物死亡两方面^[50,51]. 一般地,土壤水分含量较多或过少都会限制土壤呼吸,致使土壤呼吸强度减弱,在饱和或永久萎蔫含水量时,呼吸作用停滞;接近田间持水量时,土壤呼吸量达到最高,在此范围内,土壤湿度与土壤呼吸量成显著正相关^[52]. 而本研究结果显示,3种耕作方式除淹水条件下(240% WHC、270% WHC),CO₂排放通量与土壤水分含量呈显著正相关. RT和CT下排放通量达到最高值的均为270% WHC淹水状态下,NT下排放通量最高值出现在180% WHC时,但和270% WHC下仅相差0.35 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$. 说明淹水条件下,CO₂排放通量最大,有可能是因为同一生态系统不同时期土壤呼吸对土壤水分的响应程度和响应机制是不同的^[53],在某些地区中二者不存在显著相关性^[54],有些地区则存在显著相关关系^[55,56]. 以后的研究可以针对水分对于风干土的激发效应机制进行深层探讨,以利于揭示干旱区土壤呼吸对于降雨的响应原理.

3.3 不同耕作方式土壤CO₂排放通量与水分的关系

土壤水分是土壤重要的物理性质,影响土壤中所进行的所有反应和过程. 土壤微生物的活性、土壤养分的迁移转化等均与土壤水分密切相关. 部分研究用抛物线函数、线性函数、指数函数等形式拟合了土壤呼吸与土壤水分的关系^[57~59]. 本研究结果表明,在30%~270% WHC水分条件下,NT、RT、CT下土壤CO₂排放通量与水分的拟合函数不同,NT下为一元二次方程,RT和CT下为线性回归方程. 根据拟合趋势图可知,3种耕作方式的拟合曲线均在240% WHC、270% WHC条件下出现较大波动,之前变化较为平稳并且RT和NT与水分呈较好的对数关系,所以将淹水状态(240% WHC、270% WHC)剔除后又进行了方程拟合. 拟合结果显示,在30%~210% WHC条件下NT与RT土壤CO₂排放通量与水分呈较好的对数关系,其可决系数 R^2 分别高达0.966、0.956. 而CT条件下由于在150% WHC下CO₂排放通量较高,导致其可决系数 $R^2 = 0.823$ 较低. Dong等^[9]的研究表示土壤呼吸与水分(30%~100% WHC)间存在显著的二次回归关系($y = -0.0208x^2 + 4.0689x + 0.0071$, $R^2 = 0.999$),由于研究的水分梯度和供试土壤的不同,本研究的结果与其研究并未一致. 下一步可以将实验时间加长,并结合室外实测数据用于检验室内模拟实验得出的拟合方程,为今后土壤呼吸与土壤水分间关系模型的建立奠定基础.

4 结论

(1)耕作方式的不同导致土壤 CO₂ 排放通量在培养初期在不同水分梯度间出现差异. 除干旱条件(30% WHC)和淹水条件(240% WHC、270% WHC)外,NT 下土壤 CO₂ 排放通量显著高于 RT、CT,但 RT 下 CO₂ 排放通量又高于 CT.

(2)3 种耕作方式下风干土加水培养 2~6 d 均产生了激发效应,呼吸速率明显较高. 整体来看,3 种耕作方式下土壤呼吸速率与土壤水分含量存在正相关关系. 在水分含量过低(30% WHC 和 60% WHC)的情况下土壤呼吸速率和 CO₂ 排放通量较低,在淹水条件下(240% WHC、270% WHC)土壤呼吸速率和 CO₂ 排放通量较高.

(3)培养初期,在所有水分梯度下,NT 土壤 CO₂ 排放通量与水分含量存在一元二次回归关系,可决系数 R^2 为 0.907. 而 RT 与 CT 条件下 CO₂ 排放通量与水分含量均存在直线回归关系,可决系数 R^2 分别为 0.873 和 0.845. 除去淹水状态(240% WHC、270% WHC),NT、RT 与 CT 均呈现较好的对数关系,可决系数 R^2 分别为 0.966、0.956 及 0.823.

参考文献:

- [1] 姜勇, 庄秋丽, 梁文举. 农田生态系统土壤有机碳库及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2007, **26**(2): 278-285.
- [2] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 不同土地利用下土壤呼吸温度敏感性差异及影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(11): 1537-1542.
- [3] 栾军伟, 刘世荣. 土壤呼吸的温度敏感性——全球变暖正负反馈的不确定因素[J]. 生态学报, 2012, **32**(15): 4902-4913.
- [4] 王小国, 朱波, 王艳强, 等. 不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性[J]. 生态学报, 2007, **27**(5): 1960-1968.
- [5] Buragiene S, Šarauskis E, Romanekas K, *et al.* Soil temperature and gas (CO₂ and O₂) emissions from soils under different tillage machinery systems [J]. Journal of Food Agriculture and Environment, 2011, **9**(2): 480-485.
- [6] Zanchi F B, Meesters A G C A, Waterloo M J, *et al.* Soil CO₂ exchange in seven pristine Amazonian rain forest sites in relation to soil temperature [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, **192-193**: 96-107.
- [7] Zanchi F B, Waterloo M J, Kruijt B, *et al.* Soil CO₂ efflux in central Amazonia: Environmental and methodological effects[J]. Acta Amazonica, 2012, **42**(2): 173-184.
- [8] 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, **23**(5): 972-978.
- [9] Dong Y J, Cai M, Zhou J B. Effects of moisture and carbonate additions on CO₂ emission from calcareous soil during closed-jar incubation[J]. Journal of Arid Land, 2014, **6**(1): 37-43.
- [10] Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J. Climate change: The IPCC scientific assessments [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [11] Vicca S, Bahn M, Estiarte M, *et al.* Can current moisture responses predict soil CO₂ efflux under altered precipitation regimes? A synthesis of manipulation experiments [J]. Biogeosciences, 2014, **11**(11): 2991-3013.
- [12] Lin Z B, Zhang R D, Tang J, *et al.* Effects of high soil water content and temperature on soil respiration [J]. Soil Science, 2011, **176**(3): 150-155.
- [13] Borken W, Davidson E A, Savage K, *et al.* Drying and wetting effects on carbon dioxide release from organic horizons [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, **67**(6): 1888-1896.
- [14] Rey A, Petsikos C, Jarvis P G, *et al.* Effect of temperature and moisture on rates of carbon mineralization in a Mediterranean oak forest soil under controlled and field conditions [J]. European Journal of Soil Science, 2005, **56**(5): 589-599.
- [15] Inglima I, Alberti G, Bertolini T, *et al.* Precipitation pulses enhance respiration of Mediterranean ecosystems: the balance between organic and inorganic components of increased soil CO₂ efflux [J]. Global Change Biology, 2009, **15**(5): 1289-1301.
- [16] Muhr J, Franke J, Borken W. Drying-rewetting events reduce C and N losses from a Norway spruce forest floor [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, **42**(8): 1303-1312.
- [17] Wei S C, Zhang X P, McLaughlin N B, *et al.* Effect of soil temperature and soil moisture on CO₂ flux from eroded landscape positions on black soil in Northeast China [J]. Soil and Tillage Research, 2014, **144**: 119-125.
- [18] 张俊丽, Tanveer S K, 温晓霞, 等. 不同耕作方式下旱作玉米田土壤呼吸及其影响因素 [J]. 农业工程学报, 2012, **28**(18): 192-199.
- [19] 孙小花, 张仁陟, 蔡立群, 等. 不同耕作措施对黄土高原旱地土壤呼吸的影响 [J]. 应用生态学报, 2009, **20**(9): 2173-2180.
- [20] 牛新胜, 牛灵安, 张宏彦, 等. 玉米秸秆覆盖免耕对土壤呼吸的影响 [J]. 生态环境, 2008, **17**(1): 256-260.
- [21] Franzluebbers A J, Hons F M, Zuberer D A. Tillage-induced seasonal changes in soil physical properties affecting soil CO₂ evolution under intensive cropping [J]. Soil and Tillage Research, 1995, **34**(1): 41-60.
- [22] Marquina S, Pérez T, Donoso L, *et al.* NO, N₂O and CO₂ soil emissions from Venezuelan corn fields under tillage and no-tillage agriculture [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, **101**(1): 123-137.
- [23] 刘四义, 张晓平, 贾淑霞, 等. 一种室内培养条件下采用封闭动态系统测定培养物质的 CO₂ 产生速率的方法 [P]. 中国, CN 103776971, 2014-05-07.
- [24] Shi X H, Zhang X P, Yang X M, *et al.* Contribution of winter soil respiration to annual soil CO₂ emission in a Mollisol under different tillage practices in northeast China [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2012, **26**(2): GB2007.
- [25] Jia B R, Zhou G S, Wang F Y, *et al.* Effects of grazing on soil respiration of *Leymus chinensis* steppe [J]. Climatic Change,

- 2007, **82**(1-2): 211-223.
- [26] Reth S, Reichstein M, Falge E. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO₂ efflux-a modified model[J]. *Plant and Soil*, 2005, **268**(1): 21-33.
- [27] Franzluebbers A J, Haney R L, Honeycutt C W, *et al.* Flush of carbon dioxide following rewetting of dried soil relates to active organic pools [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64**(2): 613-623.
- [28] 孟凡乔, 关桂红, 张庆忠, 等. 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*, 2006, **26**(6): 992-999.
- [29] Clein J S, Schimel J P. Reduction in microbial activity in Birch litter due to drying and rewetting event [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, **26**(3): 403-406.
- [30] Franzluebbers A J, Stuedemann J A, Schomberg H H, *et al.* Soil organic C and N pools under long-term pasture management in the Southern Piedmont USA [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**(4): 469-478.
- [31] Xu L K, Baldocchi D D, Tang J W. How soil moisture, rain pulses, and growth alter the response of ecosystem respiration to temperature[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, **18**(4): GB4002.
- [32] Sponseller R A. Precipitation pulses and soil CO₂ flux in a Sonoran Desert ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 2007, **13**(2): 426-436.
- [33] Norton U, Mosier A R, Morgan J A, *et al.* Moisture pulses, trace gas emissions and soil C and N in cheatgrass and native grass-dominated sagebrush-steppe in Wyoming, USA [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**(6): 1421-1431.
- [34] Birch H F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability[J]. *Plant and Soil*, 1958, **10**(1): 9-31.
- [35] Reichstein M, Tenhunen J D, Rouspard O, *et al.* Ecosystem respiration in two Mediterranean evergreen Holm Oak forests: drought effects and decomposition dynamics [J]. *Functional Ecology*, 2002, **16**(1): 27-39.
- [36] Conant R T, Dalla-Betta P, Klopatek C C, *et al.* Controls on soil respiration in semiarid soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**(6): 945-951.
- [37] Bowden R D, Newkirk K M, Rullo G M. Carbon dioxide and methane fluxes by a forest soil under laboratory-controlled moisture and temperature conditions [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, **30**(12): 1591-1597.
- [38] 尤琛. 水分梯度上不同灌木生长对干旱河谷土壤理化和生物学性质的影响[D]. 成都: 中国科学院研究生院(成都生物研究所), 2007.
- [39] 朱培立, 黄东迈, 余晓鹤, 等. ¹⁴C标记秸秆和根茬在淹水及旱地土壤中的矿化特征[J]. *土壤通报*, 1994, (S1): 67-70.
- [40] 蔡祖聪, Mosier A R. 土壤水分状况对 CH₄ 氧化, N₂O 和 CO₂ 排放的影响[J]. *土壤*, 1999, **31**(6): 289-294, 298.
- [41] Casals P, Romanyà J, Cortina J, *et al.* CO₂ efflux from a Mediterranean semi-arid forest soil. I. Seasonality and effects of stoniness[J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(3): 261-281.
- [42] 李玉宁, 王关玉, 李伟. 土壤呼吸作用和全球碳循环[J]. *地学前缘*, 2002, **9**(2): 351-357.
- [43] Ellert B H, Janzen H H. Short-term influence of tillage on CO₂ fluxes from a semi-arid soil on the Canadian Prairies [J]. *Soil and Tillage Research*, 1999, **50**(1): 21-32.
- [44] Prior S A, Reicosky D C, Reeves D W, *et al.* Residue and tillage effects on planting implement-induced short-term CO₂ and water loss from a loamy sand soil in Alabama [J]. *Soil and Tillage Research*, 2000, **54**(3-4): 197-199.
- [45] Reicosky D C, Dugas W A, Torbert H A. Tillage-induced soil carbon dioxide loss from different cropping systems[J]. *Soil and Tillage Research*, 1997, **41**(1-2): 105-118.
- [46] Al-Kaisi M M, Yin X H. Tillage and crop residue effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn-soybean rotations [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, **34**(2): 437-445.
- [47] Liebig M A, Tanaka D L, Wienhold B J. Tillage and cropping effects on soil quality indicators in the northern Great Plains [J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, **78**(2): 131-141.
- [48] 官情, 王俊, 宋淑亚, 等. 黄土旱塬区不同覆盖措施对冬小麦农田土壤呼吸的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(6): 1471-1476.
- [49] 张庆忠, 吴文良, 王明新, 等. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2005, **25**(11): 2883-2887.
- [50] Sims P L, Singh J S. The structure and function of ten western North American grasslands: III. Net primary production, turnover and efficiencies of energy capture and water use [J]. *Journal of Ecology*, 1978, **66**(2): 573-597.
- [51] Burke I C, Lauenroth W K, Vinton M A, *et al.* Plant-soil interactions in temperate grasslands [A]. In: Van Breemen N (Ed.). *Plant-induced Soil Changes: Processes and Feedbacks* [M]. Amsterdam, Netherlands: Springer, 1998. 121-143.
- [52] Davidson E C, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest [J]. *Global Change Biology*, 1998, **4**(2): 217-227.
- [53] 邓东周, 范志平, 王红, 等. 土壤水分对土壤呼吸的影响[J]. *林业科学研究*, 2009, **22**(5): 722-727.
- [54] Tufekcioglu A, Raich J W, Isenhardt T M, *et al.* Soil respiration within riparian buffers and adjacent crop fields [J]. *Plant and Soil*, 2001, **229**(1): 117-124.
- [55] Davidson E A, Verchot L V, Cattaneo J H, *et al.* Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 53-69.
- [56] Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest [J]. *Plant and Soil*, 1997, **190**(1): 127-141.
- [57] 李虎, 邱建军, 王立刚. 农田土壤呼吸特征及根呼吸贡献的模拟分析[J]. *农业工程学报*, 2008, **24**(4): 14-20.
- [58] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 2003, **23**(6): 758-764.
- [59] 孟磊, 丁维新, 蔡祖聪. 长期施肥潮土土壤呼吸的温度和水分效应[J]. *生态环境*, 2008, **17**(2): 693-698.

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supramicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration	CHEN Xiao-tong, JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (789)
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> (801)
Different Air Pollution Situations of O ₃ and PM _{2.5} During Summer in Beijing	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (807)
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (816)
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM _{2.5} in Shanghai	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> (825)
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> (834)
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO ₂ /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> (847)
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay	KONG Xiu-jun, ZHANG Peng, YANG Nan-nan, <i>et al.</i> (854)
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (862)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (873)
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (884)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (893)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (900)
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (910)
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> (917)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China	XIONG Chun-hui, ZHANG Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (925)
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> (935)
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> (942)
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> (950)
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (955)
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> (963)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (970)
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> (980)
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (988)
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (994)
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (1000)
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> (1008)
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (1016)
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> (1023)
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1032)
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> (1039)
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> (1048)
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> (1055)
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> (1061)
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> (1070)
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> (1075)
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i>	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1082)
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (1089)
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> (1106)
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> (1114)
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1121)
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> (1128)
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (1139)
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (1147)
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> (1163)
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> (1171)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年3月15日 第37卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in-Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发 行