

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第6期

Vol.36 No.6

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊春季气溶胶吸湿性分析 徐彬,张泽锋,李艳伟,秦鑫,缪青,沈艳(1911)

南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响 于兴娜,马佳,朱彬,王红磊,严殊祺,夏航(1919)

南京北郊冬季霾天 PM_{2.5} 水溶性离子的污染特征与消光作用研究 周瑶瑶,马嫣,郑军,崔芬萍,王荔(1926)

京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系 李梦,唐贵谦,黄俊,刘子锐,安俊琳,王跃思(1935)

长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征 莫梓伟,牛贺,陆思华,邵敏,勾斌(1944)

贵阳酸雨中溶解态重金属质量浓度及形态分析 朱兆洲,李军,王志如(1952)

北京市火葬场大气污染物排放现状及污染特征 薛亦峰,闫静,田贺忠,熊程程,李敬东,吴晓清,王玮,朱家昕(1959)

北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征 胡月琪,马召辉,冯亚君,王琛,陈圆圆,何明(1966)

燃煤电厂湿烟筒降雨成因分析 欧阳丽华,庄焯,刘科伟,陈振宇,顾鹏(1975)

Mn-Ce/分子筛的脱汞特性研究 谭增强,牛国平,陈晓文,安振(1983)

办公室内颗粒物载带溴系阻燃剂的人体呼吸暴露 李岫雯,曹辉,倪宏刚(1989)

森林生物质燃烧烟尘中的有机碳和元素碳 黄柯,刘刚,周丽敏,李久海,徐慧,吴丹,洪蕾,陈惠雨,杨伟宗(1998)

北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能 王兵,王晓燕,牛香,张维康,汪金松(2005)

气相中乙酸乙酯光解的光子效率:波长和催化剂的影响 方雪慧,赵洁,舒莉,高永,叶招莲(2010)

长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析 刘洋洋,沈芳,李秀珍(2019)

深圳近岸海域全氟化化合物的污染特征 刘宝林,张鸿,谢刘伟,刘国卿,王艳萍,王鑫璇,李静,董炜华(2028)

杭州西湖“香灰土”沉积物轻、重有机质组成特征及其环境意义 李静,朱广伟,朱梦圆,龚志军,许海,杨桂军(2038)

小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价 黄莹,李永霞,高甫威,徐民民,孙博,王宁,杨健(2046)

调水型水库藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应 万由鹏,尹魁浩,彭盛华(2054)

三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系 张磊,蔚建军,付莉,周川, Douglas G. Haffner(2061)

藻华聚集的环境效应:对漂浮植物水葫芦光合作用的影响 包先明,顾东祥,吴婷婷,石祖良,刘国锋,韩士群,周庆(2070)

巢湖沉积物有效磷的原位高分辨分析研究 李超,王丹,杨金燕,王燕,丁士明(2077)

贵州施秉白云岩喀斯特区水化学和溶解无机碳稳定同位素特征 肖时珍,蓝家程,袁道先,王云,杨龙,敖向红(2085)

长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义 李广,章新平,张立峰,王跃峰,邓晓军,杨柳,雷超桂(2094)

元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征 张小娟,宋维峰,吴锦奎,王卓娟(2102)

植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究 黄俊杰,沈庆然,李田(2109)

Fe/Cu 催化还原降解饮用水中溴氯乙腈的性能研究 丁春生,马海龙,傅洋洋,赵世督,李东兵(2116)

三维花状结构 α-FeOOH 协同 H₂O₂ 可见光催化降解双氯芬酸钠 许俊鸽,李云琴,黄华山,苑宝玲,崔浩杰,付明来(2122)

UV/H₂O₂ 降解羟苯甲酮反应动力学及影响因素 冯欣欣,杜尔登,郭迎庆,李华杰,刘翔,周方(2129)

钼掺杂 TiO₂ 光催化降解全氟辛酸 刘晴,喻泽斌,张睿涵,李明洁,陈颖,王莉,匡瑜,张搏,朱有慧(2138)

低频无极灯降解偶氮染料酸性橙 7 吴朋,吴军,高士祥,孙成,蒋正方(2147)

纳米 Fe₃O₄/CeO₂-H₂O₂ 非均相类 Fenton 体系对 3,4-二氯三氟甲苯的降解 孙正男,杨琦,纪冬丽,郑琳(2154)

流变相法制备包覆型 CMC-Fe⁰ 及降解水中 TCE 的研究 樊文井,成岳,余淑贞,范小丰(2161)

Pd-Fe/石墨烯多功能催化阴极降解 4-氯酚机制研究 祁文智,王凡,王辉,施钦,逢磊,卞兆勇(2168)

锰氧化物改性硅藻土对苯胺的去除动力学与机制 肖少丹,刘露,姜理英,陈建孟(2175)

铅-十六烷基三甲基氯化铵改性活性炭对水中硝酸盐和磷酸盐的吸附特性 郑雯婧,林建伟,詹艳慧,王虹(2185)

聚(丙烯酸酰胺-二乙烯基苯)对水溶液中刚果红的吸附 张奕奕,廖运文,高和军,王忠志,帅超(2195)

大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径 杨敏,李亚明,魏源送,吕鑑,郁达伟,刘吉宝,樊耀波(2203)

污泥水热液化水相产物中氮元素变化规律的研究 孙衍卿,孙震,张景来(2210)

不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征 张海芹,王翻翻,李月寒,陈重军,沈耀良(2216)

基于微波-过氧化氢-碱预处理的污泥水解影响因素 贾瑞来,魏源送,刘吉宝(2222)

蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究 雍佳君,成小英(2232)

不同类型及不同浓度抗生素条件下活性污泥丝状菌种群多样性分析 王润芳,王琴,张红,齐嵘(2239)

石油降解菌的分离鉴定及 4 株芽胞杆菌种间效应 王佳楠,石妍云,郑力燕,王喆,蔡章,刘杰(2245)

Shewanella oneidensis MR-1 对针铁矿的还原与汞的生物甲基化 司友斌,孙林,王卉(2252)

根表铁氧化物胶膜对水稻吸收镉的影响 马微,鲍艳宇(2259)

不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响 禄兴丽,廖允成(2266)

城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化 李晓燕,张舒婷(2274)

中山市农业区域土壤-农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染特征 李彬,吴山,梁金明,梁文立,陈桂贤,李拥军,杨国义(2283)

经口摄入土壤多溴联苯醚生物可给性变化及影响因素的体外消化模拟 张云惠,刘伟健,程芳芳,熊冠男,杨笑寒,王歆,陶澍,邢宝山,刘文新(2292)

生物炭输入对土壤本有机碳矿化的影响 陈威,胡学玉,陆海楠(2300)

改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用 曾炜铨,宋波,袁立竹,黄宇妃,伏凤艳(2306)

蒙脱石-OR-SH 复合体材料对土壤镉的钝化及机制 曾燕君,周志军,赵秋香(2314)

焦岗湖湿地土地利用格局演变及区域可持续性评价 杨阳,蔡怡敏,白艳莹,陈卫平,杨秀超(2320)

《环境科学》征订启事(1965) 《环境科学》征稿简则(2115) 信息(1925, 2076, 2084, 2146)

不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响

禄兴丽, 廖允成*

(西北农林科技大学农学院, 杨凌 712100)

摘要: 为了探明不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响, 采用定位试验, 对比研究了深松耕(ST)、免耕(NT)、旋耕(RT)和翻耕(CT)这4种耕作方式下土壤呼吸速率的动态变化特征; 并利用根去除法研究了根呼吸对土壤呼吸的贡献. 结果表明, 夏玉米生长季, 4种耕作方式下土壤呼吸速率随生育期均呈单峰型变化趋势, 在抽雄期达到最大, 各生育期土壤呼吸速率大小顺序依次表现为: 抽雄期 > 开花期 > 灌浆期 > 成熟期 > 拔节期 > 苗期. 不同耕作措施对平均土壤呼吸速率的影响表现为 CT > ST > RT > NT; 土壤呼吸速率与土壤温度的相关系数达到显著性水平 ($P < 0.05$), 不同耕作措施下 5 cm 地温可以解释土壤呼吸速率变异的 35% ~ 75%. 而土壤呼吸速率与土壤水分的相关系数却未达到显著性水平. 夏玉米生长季中, 不同耕作措施下根呼吸作用占土壤呼吸作用的比例在 45.13% ~ 56.86% 之间波动, 均值为 51.72%. 因此, 利用根去除法可以用来了解作物生长对土壤碳排放的贡献及比较不同耕作措施对根系呼吸贡献的影响, 从而为筛选出减缓农田土壤有机碳分解的耕作措施提供依据.

关键词: 土壤呼吸; 根呼吸; 耕作方式; 夏玉米田; 土壤水热状况

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)06-2266-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.06.047

Effects of Tillage on Soil Respiration and Root Respiration Under Rain-Fed Summer Corn Field

LU Xing-li, LIAO Yun-cheng*

(College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: To explore the effects of different tillage systems on soil respiration and root respiration under rain-fed condition. Based on a short-term experiment, this paper investigated soil respiration in summer corn growth season under four tillage treatments including subsoiling tillage (ST), no tillage (NT), rotary tillage (RT) and moldboard plow tillage (CT). The contribution of root respiration using root exclusion method was also discussed. The results showed that soil respiration rate presented a single peak trend under four tillage methods during the summer corn growing season, and the maximum value was recorded at the heading stage. The trends of soil respiration were as follows: heading stage > flowering stage > grain filling stage > maturity stage > jointing stage > seedling stage. The trends of soil respiration under different tillage systems were as follows: CT > ST > RT > NT. There was a significant correlation between soil respiration rate and soil temperatures ($P < 0.05$), which could explain 35% - 75% variability of soil respiration using exponential function equation. However, there was no significant correlation between soil respiration rate and soil moisture. Root respiration accounted for 45.13% - 56.86% of the proportion of soil respiration with the mean value 51.72% during the summer corn growing season under different tillage systems. Therefore, root exclusion method could be used to study the contribution of crop growth to carbon emission, to compare effects of different tillage systems on the contribution of root respiration provides the bases for selecting the measures to slow down the decomposition of soil carbon.

Key words: soil respiration; root respiration; tillage methods; summer corn field; soil hydrothermal conditions

全球变暖是当今人类面临的主要环境问题之一, 大量研究表明, 全球变暖与温室气体的浓度升高密切相关^[1]. 而 CO₂ 是最重要的温室气体之一, 对温室效应的贡献率达 56%^[2], 并且土壤呼吸是陆地生态系统碳返回大气的主要途径^[3,4], 土壤呼吸的微小变化, 就会导致大气 CO₂ 浓度的剧烈改变, 从而影响全球气候变暖^[5]. 土壤呼吸主要由根际的自养呼吸和土壤微生物的异养呼吸组成. 而根际呼吸又分为根系呼吸和根系微生物呼吸, 因为二者很难区分, 一般认为土壤呼吸主要由土壤微生物的异养呼吸和植物根系的自养呼吸组成. Warembourg

等^[6]的研究表明根际呼吸占植物光合作用同化碳量的 10% ~ 40%. 因此, 深入研究土壤呼吸各个组分对土壤呼吸的贡献是评价作物和土壤碳平衡及能量平衡的基础^[7,8].

植物根系呼吸作用对土壤呼吸作用的贡献至关重要, 近年来, 有关土壤呼吸及其根呼吸的研究多集

收稿日期: 2014-11-08; 修订日期: 2015-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(31071375); 中央高校基本科研业务费专项(PY200904); 国家科技支撑计划项目(2007BAD89B16)

作者简介: 禄兴丽(1986~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为高效耕作制度和温室气体减排, E-mail: lu_xing_li@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yunchengliao@163.com

中于森林和草原生态系统^[9,10],而有关农田生态系统土壤呼吸的研究多集中在排放通量、季节和日变化特征及其影响因素方面^[11-13]。而以往研究不同耕作措施下土壤呼吸组分的结果却不相一致^[14,15],并且大多集中在小麦地^[14,16],而夏玉米为西北黄土高原地区的重要粮食作物,夏玉米田土壤呼吸作用在我国生态系统碳循环中具有重要地位。本课题组以往的研究结果表明不同耕作措施会对夏玉米田土壤呼吸速率产生显著差异^[17],但尚缺少根系呼吸对土壤呼吸贡献的研究,忽略根系呼吸作用会高估土壤碳排放量。因此,本研究采用根去除法精确测定不同耕作措施下土壤呼吸速率、量化根系呼吸占土壤呼吸的比例,以期为评估区域碳收支平衡、能量平衡及筛选出减缓农田土壤有机碳分解的耕作措施提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点设在陕西省杨凌区西北农林科技大学旱作一站试验田(E108°10',N34°21'),海拔454.8 m。该区属于暖温带半湿润季风气候区,年均日照时数2 150 h,年平均气温12~14℃,极端最高气温39~40℃,极端最低气温-15~-21℃,全年无霜期约221 d,年均蒸发量993 mm,年平均降水量621.6 mm,集中在7~9月,年内降雨分配不均,年际变化大,土壤为壤土,种植制度为一年两熟的夏玉米冬小麦。0~20 cm土层的土壤容重为1.3 g·cm⁻³,pH值为7.3,土壤有机质14 g·kg⁻¹,全氮740 mg·kg⁻¹,速效磷18 mg·kg⁻¹,速效钾129 mg·kg⁻¹。夏玉米生育期间月平均温度和降雨量见表1。

表1 2014年夏玉米生育期月平均温度和月总降雨量
Table 1 Monthly mean temperature and total precipitation during the experiment in 2014

月份	平均气温/℃	降雨量/mm
6	24.4	22.4
7	26.5	22.9
8	23.8	90.9
9	18.7	203.5
10	17.6	33.9

1.2 试验设计

试验于2014-06-17~2014-10-12在西北农林科技大学旱作一站试验田进行,不同耕作处理在2009年设置^[18]。每年的耕作处理保持一致。共设4个处理,3次重复,随机区组排列,耕作处理前全部移出麦秆:深松耕(ST),利用深松机(西北农林科技大学自行研制)深松耕35 cm;免耕(NT),直接播种;旋

耕(RT),旋耕机旋耕15 cm;翻耕(CT),翻耕机翻耕25 cm,再旋耕15 cm。耕地完成后利用播种机播种玉米。

本研究供试夏玉米品种为陕单609,2014年6月17日播种,10月12日收获,播种量90 kg·hm⁻²,行距70 cm。每种耕作方式的小区面积为25 m×30 m=750 m²,底肥施磷酸二铵(P₂O₅质量分数为46%)375 kg·hm⁻²,拔节期追施尿素(N素质量分数为46%)375 kg·hm⁻²,整个生育期不灌水,其他田间管理措施同当地常规管理。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤呼吸速率的测定

于玉米生育关键期:苗期(6月18日至7月4日)、拔节期(7月5日至23日)、抽雄期(7月24日至8月10日)、开花期(8月11日至26日)、灌浆期(8月27日至9月24日)和成熟期(9月25日至10月12日)每隔3 d测定土壤呼吸速率和微生物呼吸速率,关键生育期的土壤呼吸速率为该时间段内所测定土壤呼吸速率的平均值。土壤呼吸速率采用GXH-3010E1型便携式近红外CO₂气体分析仪(北京华云仪器有限公司生产)测定。玉米播种后,分别在玉米行上和行间安置PVC底座,入土5 cm,两个点的平均值代表小区内的根区土壤呼吸速率。在每处理农田中各安装6个底座进行3次重复测定。另外将一个底座安置在0.4 m×0.2 m不种任何作物的裸地用于测定非根区土壤呼吸速率,裸地周围用铁皮包围,为保证水肥及物质流动畅通,在埋入土壤的铁皮周围打直径大约10 mm的密集小孔,同时为了阻止作物根系进入底座,又用直径大约为2 mm的尼龙纱网缠绕在铁皮外。整个玉米生长季节底座不再移动,外围填土、打平,测量时,按要求利用胶管将大盖进出气管与仪器相连,开启主机泵开关测定该样点起始CO₂浓度值,然后将装有微型风扇和电池的小盖拧紧到大盖上,接通风扇电源,使容器内气体充分混合,立刻记录时间,3 min后,记录该样点的即时浓度值。土壤呼吸速率由气腔内气体浓度随时间的变化率计算得出^[19],计算公式:

$$F = K(X_1 - X_2)H/\Delta t \quad (1)$$

式中, F 为土壤呼吸速率,mg·(m²·h)⁻¹; K 为换算系数,取1.8(25℃,1个标准大气压); X_1 、 X_2 分别为测定时CO₂初始浓度值和CO₂测定时的即时浓度值,mg·kg⁻¹; H 为容器高,m; Δt 为测定时间变化,h。每次测定均在09:00~11:00完成^[20]。由于此时温度也正是处于一天内的上升期,为了避免由

于测定时间的差异人为加大或缩小不同耕作方式间的差异,选用两台完全相同型号,同时在同一环境下标定的仪器同时进行测定,并且测定顺序为奇数次与偶数次完全相反,求其平均值来缩小差异。

采用根去除法计算土壤呼吸中根系呼吸作用对土壤呼吸的贡献,即用根区土壤呼吸速率减去非根区土壤呼吸速率视为根系呼吸速率,根系呼吸作用占土壤呼吸作用的比例即为根呼吸作用对土壤呼吸作用的贡献。

1.3.2 影响因素测定

测定土壤呼吸速率的同时采用曲管地温计测定土壤温度。

采用烘干法测定土壤水分,利用容重环法测定土壤容重,土壤贮水量利用公式(2)计算:

$$W = BD \times W_c \times D \times 10 \quad (2)$$

式中, BD 是土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), D 是土层厚度 (cm), W_c 是土壤重量含水率 (%), W 为土壤水分总贮存量 (mm)。

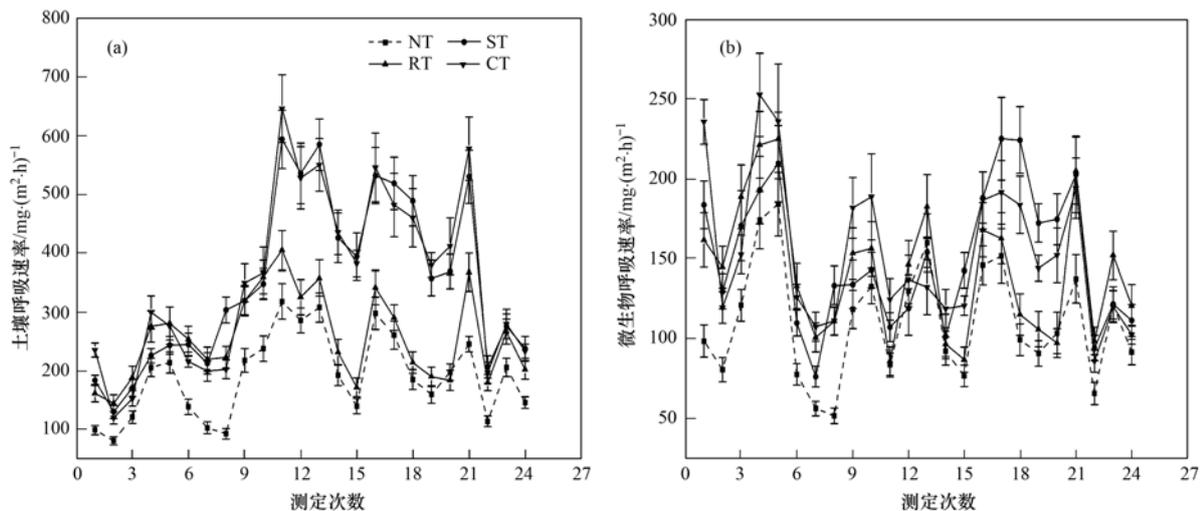


图1 不同耕作措施下土壤呼吸速率和微生物呼吸速率的动态变化

Fig. 1 Dynamics of the soil and microbial respirations under different tillage systems

在整个夏玉米生长季中,NT、ST、RT和CT平均土壤呼吸速率分别为210.3、398.6、277.1、400.6 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,不同耕作措施的土壤呼吸具有明显差异(表3),统计分析表明,平均土壤呼吸速率在不同耕作措施下的大小顺序依次表现为:CT > ST > RT > NT,与CT相比,NT和RT分别降低平均土壤呼吸速率47.52%和30.84% ($P < 0.05$),而CT和ST处理间却没有显著差异。玉米整个生长季,NT与其它耕作处理相比,土壤呼吸速率变化较为平缓且均低于其它耕作处理。在苗期,NT处理分别较ST、RT和CT处理降低土壤呼吸速率26.80%、

1.4 数据分析

利用Excel、SPSS和Original软件处理数据。

2 结果与分析

2.1 耕作措施对土壤呼吸的影响

4种不同耕作方式下旱作夏玉米田土壤呼吸速率变化趋势基本一致[图1(a)],均呈单峰型曲线变化,玉米播种后前10d由于根系呼吸较弱,因此夏玉米田土壤呼吸和微生物呼吸没有显著差异,之后根系呼吸作用增强,土壤呼吸和微生物呼吸存在较大的差异。苗期到抽雄期土壤呼吸速率迅速增大,根系呼吸对土壤呼吸的贡献增强,微生物和土壤呼吸的差异增大。在抽雄期土壤呼吸速率达到最大,之后又降低,根系呼吸作用对土壤呼吸的贡献逐渐降低,土壤呼吸和微生物呼吸的差异变小[图1(b)]。整个生育期土壤呼吸速率变化大小顺序依次为:抽雄期 > 开花期 > 灌浆期 > 成熟期 > 拔节期 > 苗期。

31.43%和33.52%(图2)。

2.2 土壤呼吸与土壤温度、湿度之间的关系

2.2.1 土壤温度

由图3可知,4种耕作措施下的土壤温度变化趋势一致,均表现为先升后降,在抽雄期土壤温度最高,整个生长季NT、ST、RT和CT平均土壤温度依次为21.09、22.30、22.80和23.30 $^{\circ}\text{C}$,表现为CT > RT > ST > NT。整个生长季CT处理土壤温度最高,而免耕处理的土壤温度在拔节期、开花期、灌浆期和成熟期均低于深松耕处理的,其余时期却相反。

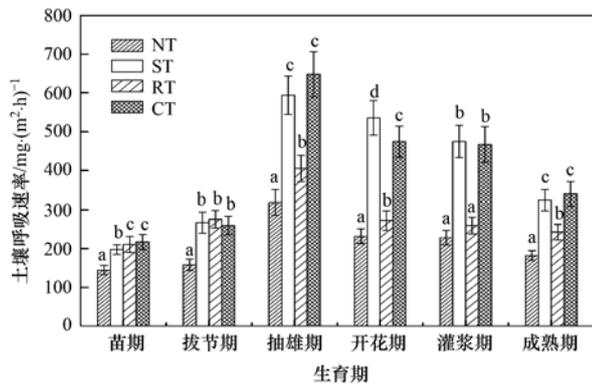


图2 不同耕作措施下夏玉米田土壤呼吸速率变化

Fig. 2 Changes in soil respiration of the summer corn crop field in different tillage systems

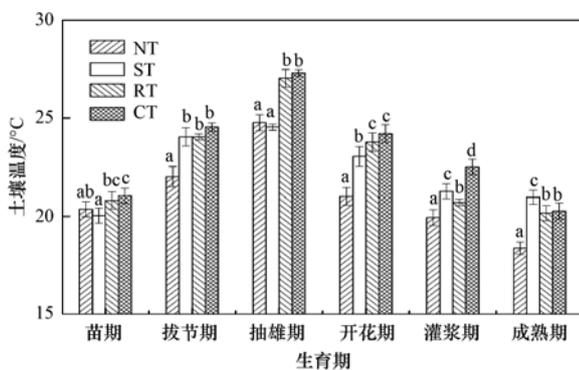


图3 不同耕作措施下夏玉米田土壤温度变化

Fig. 3 Changes in soil temperature of the summer corn crop field in different tillage systems

2.2.2 土壤湿度

土壤贮水量(0~10 cm)随作物生长及降雨量而变化,苗期到拔节期土壤水分含量降低,并且不同处理间在苗期和拔节期土壤水分含量大小顺序依次表现为 NT > ST > RT > CT(图4)。与 NT 相比,ST、RT 和 CT 在拔节期分别降低土壤水分 10.46%、16.40% 和 19.89%,说明与 CT 相比,NT、ST 和 RT 的保墒效果大小顺序依次为 NT > ST > RT。整个玉米生长季 NT、ST、RT 和 CT 处理下平均土壤储水量(0~10 cm)依次为 28.95、26.93、25.05 和 26.31 mm,其大小顺序表现为 NT > ST > CT > RT。并且玉米生长前期(苗期至抽雄期)NT 土壤储水量平均值较 ST、RT 和 CT 处理高 7.20%、18.06% 和 15.23%,生长后期(抽雄期至成熟期)NT 处理土壤贮水量则分别较 ST、RT 和 CT 高 6.75%、9.58% 和 3.94%。

2.2.3 相关关系

由表2可知,5 cm 地温与土壤呼吸的相关系数

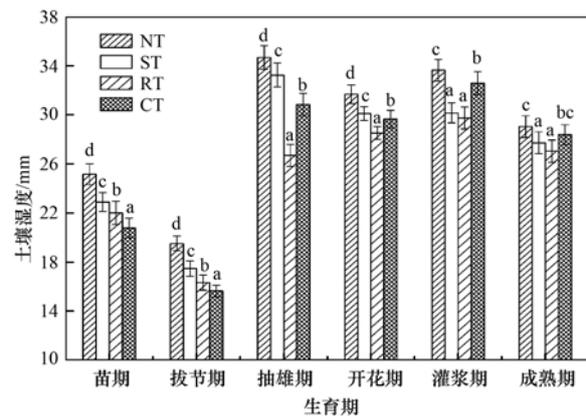


图4 不同耕作措施下夏玉米田土壤湿度变化

Fig. 4 Changes in soil moisture of the summer corn crop field in different tillage systems

最大,相关系数显著,而 10 cm 地温与土壤呼吸的相关系数均小于 5 cm 地温与土壤呼吸的相关系数。因此,用 5 cm 土层地温分析土壤温度与土壤呼吸速率的指数函数关系,结果表明(图5),土壤温度可以解释土壤呼吸季节变化的 35%~75%,不同耕作措施下,RT 处理土壤温度和土壤呼吸速率相关性最高, R^2 为 0.75,其次为 NT 处理, R^2 为 0.57,CT 和 ST 处理最低, R^2 分别为 0.40 和 0.35。土壤水分的改变会影响植物根系生长从而影响土壤呼吸速率,分析土壤水分对土壤呼吸的影响,相关系数并不显著。

表2 土壤呼吸与影响因子之间的相关性¹⁾

Table 2 Correlations between soil respiration, soil temperature and moisture

处理	5 cm 土温	10 cm 土温	土壤湿度
NT	0.75 **	0.71 **	0.37
ST	0.59 **	0.57 **	0.39
RT	0.88 **	0.86 **	0.01
CT	0.65 **	0.59 **	0.38

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$, 样本数为 24

2.3 作物根系对土壤呼吸的贡献

土壤呼吸作用中根呼吸作用所占比例呈单峰型,4 种耕作措施根系呼吸占土壤呼吸的比例均在抽雄期最大,在苗期最小。玉米生长初期(苗期)根系占土壤呼吸作用的比例在不同耕作措施下的范围为 14.26%~19.81%;随着玉米根系生物量的增加,根系呼吸占土壤呼吸的比例也随之增加,在抽雄期达到最大(图6),在玉米生长后期,土壤呼吸开始下降,根呼吸占土壤呼吸的比例也略有降低。整个生长季玉米根系呼吸占土壤呼吸的平均值为 51.72%(表3)。

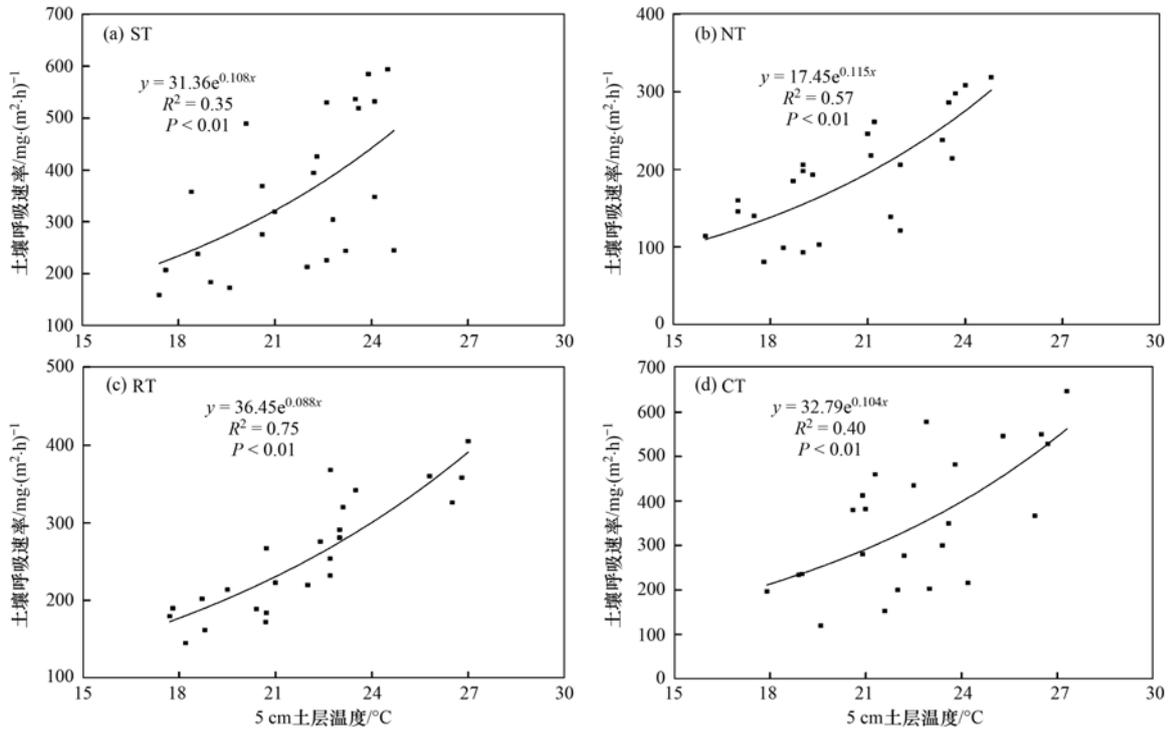


图 5 不同耕作措施下土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度的关系

Fig. 5 Relationship between soil respiration and 5 cm soil depth temperature under different tillage systems

表 3 不同耕作措施下的土壤呼吸及组分¹⁾

Table 3 Soil respiration and components of soil respiration under different tillage systems

处理	微生物呼吸速率 /mg·(m ² ·h) ⁻¹	根呼吸速率 /mg·(m ² ·h) ⁻¹	总呼吸速率 /mg·(m ² ·h) ⁻¹	根呼吸贡献 /%
NT	115.50 ± 25.01a	94.70 ± 13.52a	210.27 ± 33.42a	45.13 ± 3.93a
ST	168.07 ± 29.11c	226.64 ± 20.16c	398.60 ± 57.80c	56.86 ± 4.31c
RT	141.77 ± 24.53b	135.30 ± 13.46b	277.07 ± 27.99b	48.88 ± 3.90b
CT	175.33 ± 30.40c	222.07 ± 13.97c	400.63 ± 62.07c	56.01 ± 4.18c

1) 数字后字母表示在 0.05 水平上的差异

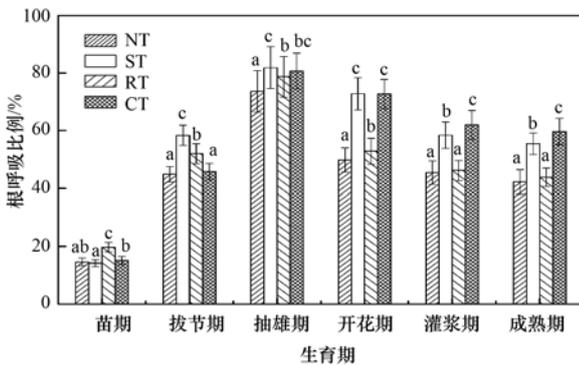


图 6 不同耕作措施下夏玉米田土壤根呼吸比例变化

Fig. 6 Changes in proportions of roots to soil respiration of the summer corn crop field in different tillage systems

不同耕作处理对土壤呼吸、微生物呼吸、玉米根系呼吸及根系呼吸占土壤呼吸比例的平均值影响显著($P < 0.05$), NT 处理的土壤呼吸最低,其根系

呼吸、微生物呼吸及根系呼吸占土壤呼吸的比例也最低, CT 和 ST 处理的土壤呼吸、微生物呼吸及根系呼吸占土壤呼吸的比例却最高(表 3)。

3 讨论

3.1 耕作措施对土壤呼吸的影响

不同耕作措施下土壤呼吸速率随作物生育期变化而变化,表现为玉米生育前期(抽雄期之前)小于后期(抽雄期之后),苗期土壤呼吸速率最小,主要原因是苗期土壤呼吸主要来自土壤微生物呼吸。土壤呼吸速率在拔节期到抽雄期增长幅度最大,可能是因为拔节期施入大量尿素,尿素的施入一方面增加了植物根系呼吸^[21],另一方面为微生物提供了氮源和能源,从而促进了土壤微生物呼吸。

耕作措施对土壤呼吸速率影响显著,本试验结

果测的不同耕作措施下平均土壤呼吸速率大小顺序为翻耕 > 深松 > 旋耕 > 免耕, 主要原因是一方面本试验开展时试验田已经进行了 6 a 的耕作处理, 土壤物理、化学、生物学性状已发生了相应改变, 进而影响了土壤呼吸速率; 另一方面通过耕翻处理, 增加了土壤与空气接触的机会, 从而促进土壤原有有机质的分解。免耕条件下土壤紧实, 与空气接触面积较小, 加之土壤温度较低, 使得土壤呼吸较弱; 翻耕比旋耕对耕层土壤破坏更为强烈, 土壤温度和水分变化剧烈, 使得翻耕条件下土壤呼吸速率较高。

本试验在西北旱作夏玉米田测得的平均土壤呼吸速率在 NT、ST、RT、CT 这 4 种耕作措施下分别为 210.3、390.3、277.1、400.9 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 与其他试验测得的土壤呼吸数据比较接近^[22,23], 然而却低于 Chatskikh 等^[24] 所测的结果: 翻耕, 1056 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$; 免耕, 750 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和少耕, 796 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 这可能与土壤类型、气候条件和测定仪器等因素有关。

3.2 土壤呼吸与土壤水热条件的相关关系

土壤温度和水分含量是土壤呼吸速率的关键影响因子, 大量研究表明土壤呼吸随温度升高呈指数函数增大^[25,26], 然而土壤水分对土壤呼吸的关系较为复杂, 往往同时受温度的相互协调情况^[27,28]。本试验表明 5 cm 土层地温与土壤呼吸显著相关, 这与其他试验结果相一致^[29~31]。

土壤水分是仅次于土壤温度的另一个影响土壤呼吸的重要因子^[32], 试验中苗期和拔节期土壤水分含量均小于其他生育期, 并且不同耕作处理下土壤水分表现为 NT > ST > RT > CT, 主要原因是经过耕翻后大量水分被蒸发掉。此外, 试验期间, 从玉米播种到拔节期降雨量小于 40 mm, 从而使得蒸发掉的土壤水分难以及时通过降雨而补偿上。在抽雄期, 土壤水分达到最大值, 这与降雨量有关, 因为抽雄期出现强降雨, 从而增加了土壤水分含量, 抽雄期之后, 土壤水分含量变化幅度不大, 主要原因与试验期间从抽雄到灌浆期降雨出现频繁有关。本试验中不同耕作措施下玉米不同生育期土壤储水量在较小范围内变化, NT 处理在 19.51 ~ 34.67 mm 之间, 平均为 28.95 mm, ST、RT 和 CT 平均土壤湿度依次为 26.93、25.05 和 26.31 mm。土壤储水量与土壤呼吸相关系数并未达到显著性水平, 可能原因是一方面土壤水分的变化范围太小, 不足以影响土壤微生物和根系生长; 另一方面夏玉米生长期间的多数时间, 土壤水分含量接近土壤呼吸利用的最佳状态, 从

而使得土壤水分对土壤呼吸的作用未能充分表现出来。

3.3 不同耕作措施下土壤根系呼吸作用对土壤呼吸作用的贡献

目前, 在农田条件下, 用于区分自养呼吸和异养呼吸的方法主要包括同位素示踪法^[33], 根去除法^[34], DNDC 模型^[7]等。以往研究结果表明根系呼吸占土壤呼吸的比例从 10% ~ 90% 不等^[35], 张宇等^[14]认为小麦根系呼吸占土壤呼吸的比例为 15% ~ 85%, 张赛等^[36]分别利用根系生物量外推法和根去除法测的小麦根呼吸贡献分别为 47% 和 54%。Hütsch 等^[37]利用 C 示踪技术获得的根际呼吸的贡献在 19% ~ 80% 之间波动。本试验采用根去除法测的不同耕作措施下玉米不同生育期根呼吸作用占土壤呼吸作用的比例为 15% ~ 82%, 平均值为 51.72%, 这与韩广轩等^[38]的研究结果玉米根系占土壤呼吸的比例为 54.5% 基本一致, 从而推论本研究结果是有效可靠的; 但也有研究表明玉米根系呼吸比例在 30% ~ 70% 之间^[39], 其原因可能由于耕作通过影响玉米生长进而影响土壤根系呼吸对土壤呼吸作用的贡献。NT 处理的根呼吸占土壤呼吸的比例最低, 这可能与耕作深度和扰动程度有关, 耕作越深, 有利于植株根系下扎, 促进作物根系生长从而增加根系呼吸速率。RT 处理的根系呼吸占土壤呼吸的比例显著地 ($P < 0.05$) 低于 CT 和 ST 处理, 可能原因是土壤旋耕深度为 15 cm, 较浅的土壤耕作增加了土壤基础呼吸, 从而降低了根系呼吸占土壤呼吸的比例。

4 种耕作措施下, 根系呼吸作用对土壤呼吸作用的贡献随作物生育期而变化, 分别在抽雄期达到最大, 变化范围为 73.62% ~ 81.85%; 在苗期最小, 变化范围为 14.68 ~ 19.10%。主要原因是一方面苗期土壤原有易分解有机质经过耕作措施大量分解, 从而使得根系呼吸作用对土壤呼吸的贡献减小。另一方面苗期植株根系比较弱小, 从而降低了根系呼吸作用对土壤呼吸的贡献。从拔节期至抽雄期, 其所占比例迅速增大, 在抽雄期达到最大(7 月末至 8 月初), 可能原因是一方面在拔节期, 追施了 375 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 尿素, 充足的 N 肥供应有助于根系生长从而增加了土壤根系呼吸作用对土壤呼吸的贡献。Kuzyakov 等^[40]的研究也表明在玉米生长旺盛季, 光合作用较强, 从而为根系生长提供了较多的营养物质, 进而刺激了根系呼吸作用。玉米生长后期, 一方面由于受 N 肥供应水平的限制, 从而减缓了作物生

长,降低了根系活性,进而降低了根系呼吸作用占土壤呼吸作用的比例^[41]. 另一方面可能与玉米死根数量的增加有关. 由此可见,根系去除法在研究根呼吸对土壤呼吸贡献中具有一定的应用价值,但是利用根去除法过程中由于裸地无玉米植株遮荫(尤其是生长后期)以及无植株对养分及水分的吸收,势必会带来裸地与原状处理间土壤温度以及土壤水分的不同,使得两个处理间不单单是有无根系的差异,由此将会带来裸地测定得到的土壤微生物呼吸与实际值存在偏差,进而影响根系呼吸占整个土壤呼吸比例的计算结果. 因此,后续研究应该注重在作物行间选取较小面积作为微生物呼吸的测量.

本文只是针对耕作试验实施 6 a 后的结果进行分析,要研究不同耕作措施对土壤呼吸及其组分的影响,还需要进行长期的试验. 只有综合分析不同耕作措施对土壤呼吸、植物根系呼吸和土壤水温状况的影响,才能评价不同耕作措施的优劣.

4 结论

(1)4 种耕作措施下,旱作夏玉米田土壤呼吸速率均呈单峰型变化趋势,随玉米生长均表现为先增后降,在抽雄期达到最大,玉米生育后期土壤呼吸速率缓慢降低. 整个生长季,不同耕作措施下土壤呼吸速率表现为 CT > ST > RT > NT.

(2)土壤呼吸速率与土壤温度显著正相关,5 cm 土层地温可以解释土壤呼吸季节变化的 35% ~ 75%,土壤呼吸速率与土壤水分的相关性却不显著.

(3)整个夏玉米生长季,不同耕作措施下根系呼吸对土壤呼吸的贡献在 45.13% ~ 56.86% 之间波动,平均值为 51.72%,在玉米不同生育期不同耕作措施下根系呼吸所占比例不同.

参考文献:

- [1] 刘春梅. 土地利用变化对土壤碳库的影响 [J]. 安徽农业科学, 2010, **38**(31): 17479-17481, 17528.
- [2] Hansen J E, Laci A A. Sun and dust versus greenhouse gases: an assessment of their relative roles in global climate change [J]. Nature, 1990, **346**(6286): 713-719.
- [3] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle [J]. Biogeochemistry, 2000, **48**(1): 7-20.
- [4] 丁维新, 蔡祖聪. 土壤有机质和外源有机物对甲烷产生的影响 [J]. 生态学报, 2002, **22**(10): 1672-1679.
- [5] 刘爽, 严昌荣, 何文清, 等. 不同耕作措施下旱地农田土壤呼吸及其影响因素 [J]. 生态学报, 2010, **30**(11): 2919-2924.
- [6] Warembourg F R, Estelrich H D. Towards a better understanding of carbon flow in the rhizosphere: a time-dependent approach using carbon-14 [J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, **30**(5-6): 528-534.
- [7] 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.
- [8] 金钊, 董云社, 齐玉春. 区分纯根呼吸和根际微生物呼吸的争议 [J]. 土壤, 2008, **40**(4): 517-522.
- [9] 张宪权, 王文杰, 祖元刚, 等. 东北地区几种不同林分土壤呼吸组分的差异性 [J]. 东北林业大学学报, 2005, **33**(2): 46-47.
- [10] 常建国, 刘世荣, 史作民, 等. 北亚热带-南暖温带过渡区典型森林生态系统土壤呼吸及其组分分离 [J]. 生态学报, 2007, **27**(5): 1791-1801.
- [11] 潘莹, 胡正华, 吴杨周, 等. 保护性耕作对后茬冬小麦土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响 [J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2771-2776.
- [12] 陈玲, 范会, 蒋静艳. 不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和 N₂O 排放的关系 [J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 3102-3109.
- [13] 张宇, 张海林, 陈继康, 等. 耕作措施对华北农田 CO₂ 排放影响及水热关系分析 [J]. 农业工程学报, 2009, **25**(4): 47-53.
- [14] 张宇, 张海林, 陈继康, 等. 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, 2009, **42**(9): 3354-3360.
- [15] Morell F J, Whitmore A P, Alvaro-Fuentes J, et al. Root respiration of barley in a semiarid Mediterranean agroecosystem: field and modelling approaches [J]. Plant and Soil, 2012, **351**(1-2): 135-147.
- [16] 陈书涛, 古敏, 贾刘敏, 等. 冬小麦返青-拔节期土壤的自养和异养呼吸研究 [J]. 环境科学学报, 2008, **28**(5): 937-944.
- [17] 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.
- [18] 杨玲, 廖允成, 高茂盛, 等. 不同耕作措施下旱作麦田 CO₂ 排放速率与土壤水热关系分析 [J]. 西北农业学报, 2011, **20**(1): 70-75.
- [19] 高程达, 孙向阳, 曹吉鑫, 等. 土壤二氧化碳通量原位测定方法及装置 [J]. 北京林业大学学报, 2008, **30**(2): 102-105.
- [20] 王旭, 周广胜, 蒋延玲, 等. 山杨白桦混交次生林与原始阔叶红松林土壤呼吸作用比较 [J]. 植物生态学报, 2007, **31**(3): 348-354.
- [21] 彭克明, 裴保义. 农业化学 [M]. 北京: 农业出版社, 1980. 73-74.
- [22] Kessavalou A, Mosier A R, Doran J W, et al. Fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide, and methane in grass sod and winter wheat-fallow tillage management [J]. Journal of Environmental Quality, 1998, **27**(5): 1094-1104.
- [23] Ball B C, Scott A, Parker J P. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland [J]. Soil & Tillage Research, 1999, **53**(1): 29-39.

- [24] Chatskikh D, Olesen J E, Hansen E M, *et al.* Effects of reduced tillage on net greenhouse gas fluxes from loamy sand soil under winter crops in Denmark [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2008, **128**(1-2): 117-126.
- [25] 代快, 蔡典雄, 王燕, 等. 不同耕作措施对旱作春玉米农田土壤呼吸影响的研究——土壤温度对土壤呼吸速率的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2010, (6): 64-69.
- [26] 禄兴丽, Tanveer S K, 廖允成, 等. 不同耕作措施下夏玉米生长季农田 CO₂ 排放速率及其与土壤温度的关系 [J]. *西北农业学报*, 2013, **22**(6): 53-59.
- [27] 王立刚, 邱建军, 李维炯. 黄淮海平原地区夏玉米农田土壤呼吸的动态研究 [J]. *中国土壤与肥料*, 2002, (6): 13-17.
- [28] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响 [J]. *生态学报*, 1997, **17**(5): 469-476.
- [29] Rowlings D W, Grace P R, Kiese R, *et al.* Environmental factors controlling temporal and spatial variability in the soil-atmosphere exchange of CO₂, CH₄ and N₂O from an Australian subtropical rainforest [J]. *Global Change Biology*, 2012, **18**(2): 726-738.
- [30] Schauffler G, Kitzler B, Schindlbacher A, *et al.* Greenhouse gas emissions from European soils under different land use: effects of soil moisture and temperature [J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, **61**(5): 683-696.
- [31] Scheer C, Grace P R, Rowlings D W, *et al.* Effect of biochar amendment on the soil-atmosphere exchange of greenhouse gases from an intensive subtropical pasture in northern New South Wales, Australia [J]. *Plant and Soil*, 2011, **345**(1-2): 47-58.
- [32] 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.
- [33] Kuzyakov Y, Ehrensberger H, Stahr K. Carbon partitioning and below-ground translocation by *Lolium perenne* [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**(1): 61-74.
- [34] 任志杰, 高兵, 黄涛, 等. 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*, 2014, **34**(9): 2367-2375.
- [35] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, *et al.* Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 115-146.
- [36] 张赛, 王龙昌, 黄召存, 等. 保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(6): 2419-2425.
- [37] Hütsch B W, Augustin J, Merbach W. Plant rhizodeposition—an important source for carbon turnover in soils [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2002, **165**(4): 397-407.
- [38] 韩广轩, 周广胜, 许振柱, 等. 玉米农田土壤呼吸作用的空间异质性及其根系呼吸作用的贡献 [J]. *生态学报*, 2007, **27**(12): 5254-5261.
- [39] 蔡艳, 丁维新, 蔡祖聪. 土壤-玉米系统中土壤呼吸强度及各组分贡献 [J]. *生态学报*, 2006, **26**(12): 4273-4280.
- [40] Kuzyakov Y, Cheng W. Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**(14): 1915-1925.
- [41] 寇太记, 徐晓峰, 朱建国, 等. CO₂ 浓度升高和施氮条件下小麦根际呼吸对土壤呼吸的贡献 [J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(10): 2533-2538.

CONTENTS

Hygroscopic Properties of Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing in Spring	XU Bin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Relative Humidity and Aerosol Physicochemical Properties on Atmospheric Visibility in Northern Suburb of Nanjing	YU Xing-na, MA Jia, ZHU Bin, <i>et al.</i> (1919)
Pollution Characteristics and Light Extinction Effects of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter Hazy Days at North Suburban Nanjing ...	ZHOU Yao-yao, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1926)
Characteristics of Winter Atmospheric Mixing Layer Height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Their Relationship with the Atmospheric Pollution	LI Meng, TANG Gui-qian, HUANG Jun, <i>et al.</i> (1935)
Process-based Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Paint Industry in the Yangtze River Delta, China	MO Zi-wei, NIU He, LU Si-hua, <i>et al.</i> (1944)
Concentrations and Speciation of Dissolved Heavy Metal in Rainwater in Guiyang, China	ZHU Zhao-zhou, LI Jun, WANG Zhi-ru (1952)
Situation and Characteristics of Air Pollutants Emission from Crematories in Beijing, China	XUE Yi-feng, YAN Jing, TIAN He-zhong, <i>et al.</i> (1959)
Emission Characteristics of Water-Soluble Ions in Fumes of Coal Fired Boilers in Beijing	HU Yue-qi, MA Zhao-hui, FENG Ya-jun, <i>et al.</i> (1966)
Analysis on Mechanism of Rainout Carried by Wet Stack of Thermal Power Plant	OUYANG Li-hua, ZHUANG Ye, LIU Ke-wei, <i>et al.</i> (1975)
Removal Characteristics of Elemental Mercury by Mn-Ce/molecular Sieve	TAN Zeng-qiang, NIU Guo-ping, CHEN Xiao-wen, <i>et al.</i> (1983)
Indoor Exposure to Particle-Bound BFRs via Inhalation	LI Xiu-wen, ZENG Hui, NI Hong-gang (1989)
Organic Carbon and Elemental Carbon in Forest Biomass Burning Smoke	HUANG Ke, LIU Gang, ZHOU Li-min, <i>et al.</i> (1998)
Atmospheric Particle Retaining Function of Common Deciduous Tree Species Leaves in Beijing	WANG Bing, WANG Xiao-yan, NIU Xiang, <i>et al.</i> (2005)
Photonic Efficiency of Ethyl Acetate Photolysis in Gas Phase: Dependence on Wavelength and Catalyst	FANG Xue-hui, ZHAO Jie, SHU Li, <i>et al.</i> (2010)
Phytoplankton Light Absorption Properties During the Blooms in Adjacent Waters of the Changjiang Estuary	LIU Yang-yang, SHEN Fang, LI Xiu-zhen (2019)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Offshore Marine Area of Shenzhen	LIU Bao-lin, ZHANG Hong, XIE Liu-wei, <i>et al.</i> (2028)
Composition and Environmental Effects of LFOM and HFOM in "Incense-Ash" Sediments of West Lake, Hangzhou, China	LI Jing, ZHU Guang-wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (2038)
Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Heavily Polluted Area of Xiaoqing River	HUANG Ying, LI Yong-xia, GAO Fu-wei, <i>et al.</i> (2046)
Response of Algae to Nitrogen and Phosphorus Concentration and Quantity of Pumping Water in Pumped Storage Reservoir	WAN You-peng, YIN Kui-hao, PENG Sheng-hua (2054)
Temporal and Spatial Variation of Nutrients and Chlorophyll a, and Their Relationship in Pengxi River Backwater Area, Three Gorges Reservoir	ZHANG Lei, WEI Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2061)
Environmental Effects of Algae Bloom Cluster: Impact on the Floating Plant Water Hyacinth Photosynthesis	BAO Xian-ming, GU Dong-xiang, WU Ting-ting, <i>et al.</i> (2070)
<i>In Situ</i> High-Resolution Analysis of Labile Phosphorus in Sediments of Lake Chaohu	LI Chao, WANG Dan, YANG Jin-yan, <i>et al.</i> (2077)
Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon Stable Isotope of Shibing Dolomite Karst Area in Guizhou Province	XIAO Shi-zhen, LAN Jia-cheng, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2085)
Stable Isotope Characteristics in Different Water Bodies in Changsha and Implications for the Water Cycle	LI Guang, ZHANG Xin-ping, ZHANG Li-feng, <i>et al.</i> (2094)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Soil Water in the Water Source Area of Yuanyang Terrace	ZHANG Xiao-juan, SONG Wei-feng, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2102)
Performance of Grass Swales for Controlling Pollution of Roadway Runoff in Field Experiments	HUANG Jun-jie, SHEN Qing-ran, LI Tian (2109)
Performance Study of Bromochloroacetonitrile Degradation in Drinking Water by Fe/Cu Catalytic Reduction	DING Chun-sheng, MA Hai-long, FU Yang-ping, <i>et al.</i> (2116)
Catalytic Degradation of Diclofenac Sodium over the Catalyst of 3D Flower-like α -FeOOH Synergized with H ₂ O ₂ Under Visible Light Irradiation	XU Jun-ge, LI Yun-qin, HUANG Hua-shan, <i>et al.</i> (2122)
Degradation of Organic Sunscreens 2-hydroxy-4-methoxybenzophenone by UV/H ₂ O ₂ Process: Kinetics and Factors	FENG Xin-xin, DU Er-deng, GUO Ying-qing, <i>et al.</i> (2129)
Photocatalytic Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Pd-TiO ₂ Photocatalyst	LIU Qing, YU Ze-bin, ZHANG Rui-han, <i>et al.</i> (2138)
Efficient Photolysis of Acid Orange 7 Using Low-frequency Electrodeless Lamp	WU Peng, WU Jun, GAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (2147)
Degradation of 3,4-Dichlorobenzotrifluoride by Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ Heterogeneous Fenton-Like Systems	SUN Zheng-nan, YANG Qi, JI Dong-li, <i>et al.</i> (2154)
Preparation of Coated CMC-Fe ⁰ Using Rheological Phase Reaction Method and Research on Degradation of TCE in Water	FAN Wen-jing, CHENG Yue, YU Shu-zhen, <i>et al.</i> (2161)
Degradation Mechanism of 4-Chlorophenol on a Pd-Fe/graphene Multifunctional Catalytic Cathode	QI Wen-zhi, WANG Fan, WANG Hui, <i>et al.</i> (2168)
Removal Kinetics and Mechanism of Aniline by Manganese-oxide-modified Diatomite	XIAO Shao-dan, LIU Lu, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (2175)
Adsorption Characteristics of Nitrate and Phosphate from Aqueous Solution on Zirconium-Hexadecyltrimethylammonium Chloride Modified Activated Carbon	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2185)
Removal Congo Red from Aqueous Solution Using Poly (AM-co-DVB)	ZHANG Luan-luan, LIAO Yun-wen, GAO He-jun, <i>et al.</i> (2195)
Energy Consumption Comparison and Energy Saving Approaches for Different Wastewater Treatment Processes in a Large-scale Reclaimed Water Plant	YANG Min, LI Ya-ming, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (2203)
Transformation Regularity of Nitrogen in Aqueous Product Derived from Hydrothermal Liquefaction of Sewage Sludge in Subcritical Water	SUN Yan-qing, SUN Zhen, ZHANG Jing-lai (2210)
Start-up Performance of ANAMMOX Enrichment with Different Inoculated Sludge in Anaerobic Baffled Reactor	ZHANG Hai-qin, WANG Fan-fan, LI Yue-han, <i>et al.</i> (2216)
Influencing Factors for Hydrolysis of Sewage Sludge Pretreated by Microwave-H ₂ O ₂ -OH Process	JIA Rui-lai, WEI Yuan-song, LIU Ji-bao (2222)
Enrichment and Characterization of a Denitrifying Bacteria Consortium from Lihe River's Sediment	YONG Jia-jun, CHENG Xiao-ying (2232)
Investigation for Filamentous Bacteria Community Diversity in Activated Sludge Under Various Kinds and Concentration Conditions of Antibiotics	WANG Run-fang, WANG Qin, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2239)
Isolation and Identification of Petroleum Degradation Bacteria and Interspecific Interactions Among Four <i>Bacillus</i> Strains	WANG Jia-nan, SHI Yan-yun, ZHENG Li-yan, <i>et al.</i> (2245)
Effects of Dissimilatory Reduction of Goethite on Mercury Methylation by <i>Sheewanella oneidensis</i> MR-1	SI You-bin, SUN Lin, WANG Hui (2252)
Effect of Root Iron Plaque on Norfloxacin Uptake by Rice	MA Wei, BAO Yan-yu (2259)
Effects of Tillage on Soil Respiration and Root Respiration Under Rain-Fed Summer Corn Field	LU Xing-li, LIAO Yun-cheng (2266)
Seasonal Provincial Characteristics of Vertical Distribution of Dust Loadings and Heavy Metals near Surface in City	LI Xiao-yan, ZHANG Shu-ting (2274)
Characteristics of Phthalic Acid Esters in Agricultural Soils and Products in Areas of Zhongshan City, South China	LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (2283)
Variations and Influencing Factors of Oral Bioaccessibility of Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils Using an <i>In-vitro</i> Gastrointestinal Model	ZHANG Yun-hui, LIU Wei-jian, CHENG Fang-fang, <i>et al.</i> (2292)
Impacts of Biochar Input on Mineralization of Native Soil Organic Carbon	CHEN Wei, HU Xue-yu, LU Hai-nan (2300)
Effects of Remedies on the Remediation of Typical Pb and Zn-contaminated soil in Huanjiang, Guangxi	ZENG Wei-quan, SONG Bo, YUAN Li-zhu, <i>et al.</i> (2306)
Mechanism Study of the Smeectite-OR-SH Compound for Reducing Cadmium Uptake by Plants in Contaminated Soils	ZENG Yan-jun, ZHOU Zhi-jun, ZHAO Qiu-xiang (2314)
Land Use Pattern Change and Regional Sustainability Evaluation of Wetland in Jiaogang Lake	YANG Yang, CAI Yi-min, BAI Yan-ying, <i>et al.</i> (2320)

《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)

2015年6月15日 第36卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 6 Jun. 15, 2015

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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

国内外公开发刊