

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第7期

Vol.36 No.7

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

2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析	李莉, 蔡蓓琳, 周敏 (2327)
长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征	王曼婷, 朱彬, 王红磊, 薛国强, 何俊, 徐宏辉, 曹锦飞 (2337)
北京城区大气 PM _{2.5} 主要化学组分构成研究	刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 陈添, 赵红帅, 陈圆圆, 陆皓昀 (2346)
2014年春季山东省 PM _{2.5} 跨界输送研究	贾海鹰, 程念亮, 何友江, 陈云波, 杜晓惠, 单晓丽 (2353)
燃煤电厂产生和排放的 PM _{2.5} 中水溶性离子特征	马子珍, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥, 邓建国, 段雷 (2361)
南京夏季城市冠层大气 CO ₂ 浓度时空分布规律的观测	高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 王淑敏, 邓力琛, 于洲, 张圳, 李旭辉 (2367)
北京市机动车尾气排放因子研究	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2374)
北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力	张维康, 王兵, 牛香 (2381)
长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算	丁青青, 魏伟, 沈群, 孙予罕 (2389)
基于区域循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N ₂ O 排放量估算	韩云芳, 韩圣慧, 严平 (2395)
不同源汇信息提取方法对区域 CO ₂ 源汇估算及其季节变化的影响评估	张芳, 周凌晔, 王玉诏 (2405)
实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估	王晓南, 闫振广, 刘征涛, 张聪, 王伟莉 (2414)
博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价	张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清 (2422)
岩溶泉水化学性质及 δ ¹³ C _{DIC} 影响因素	赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 吕春艳 (2430)
柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析	原雅琼, 何师意, 于爽, 孙平安, 王艳雪, 武招云, 李新桂, 谢明鲜, 刘文, 李瑞, 张华生 (2437)
重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价	庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅 (2446)
三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征	王法, 王强, 木志坚, 杨志丹, 宋娇艳 (2453)
干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响	林俊杰, 张帅, 杨振宇, 何立平, 周依, 张倩茹 (2459)
天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究	王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江 (2465)
西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析	段木春, 肖海丰, 臧淑英 (2472)
草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价	杨敏, 张晟, 刘朔孺 (2480)
宁波三江口水域原核生物群落结构分析	胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 王弘杰, 于昌平 (2487)
全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响	孙雅君, 王铁宇, 彭霞薇, 王佩 (2496)
菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响	马月, 王国祥, 曹勤, 王小云, 马杰 (2504)
生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究	李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 单保庆 (2511)
复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究	王晓璐, 左剑恶, 千里里, 邢薇, 缪恒峰, 阮文权 (2518)
3种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响	吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (2525)
基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响	高燕维, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞, 吴吉春 (2532)
BDD 和 PbO ₂ 电极电化学氧化苯并三氮唑的对比研究	伍娟丽, 张佳维, 王婷, 倪晋仁 (2540)
开放系统下方解石对邻苯二甲酸的吸附	李振炫, 黄利东, 陈艳芳, 缪晔, 刘大刚, 许正文 (2547)
碳纳米管-羟磷灰石对铅的吸附特性研究	张金利, 李宇 (2554)
刚果红分子印迹聚合物纳米微球的合成及吸附性能	常自强, 陈复彬, 张玉, 时作龙, 杨春艳, 章竹君 (2564)
碱热-酸热法合成二氧化钛-钛酸纳米管复合纳米材料对 Cd(II) 和苯酚的同步去除	雷立, 晋银佳, 王婷, 赵泉, 晏友, 刘文 (2573)
固定化菌剂对污水和牛粪中雌二醇和己烯雌酚的去除作用	李欣, 凌婉婷, 刘静娴, 孙敏霞, 高彦征, 刘娟 (2581)
PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水	袁琬, 李祥, 周呈, 陈宗姮 (2591)
Fenton 氧化深度处理石化废水厂二级出水研究	王翼, 吴昌永, 周岳溪, 张雪, 董波, 陈学民 (2597)
制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别	黄利, 陈文艳, 万玉山, 郑国娟, 赵远, 蔡强 (2604)
不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化	陈燕, 刘国华, 范强, 汪俊妍, 齐鲁, 王洪臣 (2610)
利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数	王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 李静文, 李紫棋, 余勇 (2617)
连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能	姚力, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建 (2626)
广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价	张金莲, 丁疆峰, 卢桂宇, 党志, 易筱筠 (2633)
山东省临沂市土壤有机氯农药滴滴涕残留量与空间分布特征	喻超, 王增辉, 王红晋, 代杰瑞, 庞绪贵, 赵西强, 刘华峰 (2641)
金华市萤石矿区土壤氟污染评价	叶群峰, 周小玲 (2648)
土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制	侯亚红, 王磊, 付小花, 乐毅全 (2655)
黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素	李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利 (2662)
缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响	雷利国, 江长胜, 郝庆菊 (2669)
塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析	朱美玲, 贡璐, 张龙龙 (2678)
不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO ₂ 排放和微生物量的影响	刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙 (2686)
1株对叔丁基邻苯二酚降解菌的筛选鉴定及响应面法优化其降解	贺强礼, 刘文斌, 杨海君, 彭晓霞, 关向杰, 黄水娥 (2695)
耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析	杨阳, 王文国, 马丹炜, 汤晓玉, 胡启春 (2707)
水介质中 C ₆₀ 纳米晶体颗粒与 Cu ²⁺ 对小鼠腹腔巨噬细胞的复合毒性研究	于叶, 卞为林, 张慧敏, 张波, 何义亮 (2713)
地表水体中同时分析 18 种糖皮质激素方法的建立	郭文景, 常红, 孙德智, 吴丰昌, 杨浩 (2719)
《环境科学》征订启事 (2553) 《环境科学》征稿简则 (2640) 信息 (2546, 2609, 2616, 2647)	

不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO₂ 排放和微生物量的影响

刘四义^{1,2}, 梁爱珍¹, 杨学明³, 张晓平^{1*}, 贾淑霞¹, 陈学文¹, 张士秀¹, 孙冰洁^{1,2}, 陈升龙^{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; 3. 加拿大农业与农业食品部温室与加工作物研究中心, 安大略 NOR 1G0)

摘要: 秸秆还田后作物残体的分解是农田生态系统碳循环及养分周转平衡的一个至关重要环节. 为了探索秸秆化学性质和土壤质地对黑土区土壤 CO₂ 排放和微生物量的影响, 本文通过室内恒温培养实验研究了添加不同植株部位玉米秸秆(根、茎下部、茎顶部、叶)进入黑土区两种质地土壤(砂壤土和黏壤土)后的 CO₂ 排放、微生物量, 并分析了它们与秸秆 C/N、木质素含量的关系. 结果表明, 添加不同部位秸秆一致增加土壤 CO₂ 排放量, 激发效应值介于 216.53 ~ 335.17 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, 黏壤土大于砂壤土. 激发效应值与木质素/N 之间的线性回归关系明显好于激发效应与木质素含量、C/N、含氮量之间的线性关系. 添加秸秆增加 MBC 和 MBN 含量, 降低 MBC/MBN, 微生物群落氮固持的速率高于碳固持. 添加秸秆后, 砂壤土微生物量增加的幅度大于黏壤土, 总溶解性氮含量小于黏壤土. 结果说明, 秸秆的木质素和氮含量均会对它的分解和 CO₂ 排放产生影响, 木质素/N 比木质素含量、C/N 等更好地说明秸秆分解和 CO₂ 排放的差异; 与黏壤土相比, 在砂壤土中实施秸秆还田可以取得更好的土壤碳固存、微生物量和氮素保持效果.

关键词: 秸秆还田; 木质素; 碳氮比; 土壤 CO₂ 排放; 土壤微生物量; 土壤固碳

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2686-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.07.048

Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO₂ Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils

LIU Si-yi^{1,2}, LIANG Ai-zhen¹, YANG Xue-ming³, ZHANG Xiao-ping^{1*}, JIA Shu-xia¹, CHEN Xue-wen¹, ZHANG Shi-xiu¹, SUN Bing-jie^{1,2}, CHEN Sheng-long^{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; 3. Greenhouse and Processing Crops Research Centre, Agriculture and Agri-Food Canada, Ontario NOR 1G0, Canada)

Abstract: The decomposed rate of crop residues is a major determinant for carbon balance and nutrient cycling in agroecosystem. In this study, a constant temperature incubation study was conducted to evaluate CO₂ emission and microbial biomass based on four different parts of corn straw (roots, lower stem, upper stem and leaves) and two soils with different textures (sandy loam and clay loam) from the black soil region. The relationships between soil CO₂ emission, microbial biomass and the ratio of carbon (C) to nitrogen (N) and lignin of corn residues were analyzed by the linear regression. Results showed that the production of CO₂ was increased with the addition of different parts of corn straw to soil, with the value of priming effect (PE) ranged from 215.53 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ to 335.17 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$. Except for corn leaves, the cumulative CO₂ production and PE of clay loam soil were significantly higher than those in sandy loam soil. The correlation of PE with lignin/N was obviously more significant than that with lignin concentration, nitrogen concentration and C/N of corn residue. The addition of corn straw to soil increased the contents of MBC and MBN and decreased MBC/MBN, which suggested that more nitrogen rather than carbon was conserved in microbial community. The augments of microbial biomass in sandy loam soil was greater than that in clay loam soil, but the total dissolved nitrogen was lower. Our results indicated that the differences in CO₂ emission with the addition of residues to soils were primarily ascribed to the different lignin/N ratio in different corn parts; and the corn residues added into the sandy loam soil could enhance carbon sequestration, microbial biomass and nitrogen holding ability relative to clay loam soil.

Key words: straw amendments; lignin; C/N; soil CO₂ emission; soil microbial biomass; soil carbon sequestration

收稿日期: 2014-11-23; 修订日期: 2015-01-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(31170483, 41101241, 41201217); 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); 中国科学院黑土区农业生态重点实验室开放基金项目(2012 ZKHT-02)

作者简介: 刘四义(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为秸秆还田与土壤有机质提升, E-mail: wuhuliusyi@163.com

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

我国每年的秸秆资源总量为 $7.62 \times 10^8 \sim 8.41 \times 10^8 \text{ t}^{[1,2]}$ ，其中很大一部分被直接焚烧，这对大气环境产生了严重的污染^[3]。实施秸秆还田不仅可以减轻其焚烧对大气环境的污染，也是增加土壤有机碳含量，提升土壤地力的重要措施^[4]。秸秆还田后作物残体的分解是农田生态系统碳循环及养分周转平衡的一个至关重要环节^[5,6]。探明秸秆在土壤中的分解转化特征及其影响因素不仅对全球变暖背景下的秸秆还田固碳研究具有重要意义^[7]，也可以作为秸秆还田后土壤养分管理的重要参考依据^[8]。

植物残体的化学性质对土壤中秸秆分解、CO₂ 排放和微生物演替有重要的影响^[9,10]。张红等^[11]对不同植物秸秆的腐解特征和微生物功能多样性进行了研究，认为 C/N 低、体积小的秸秆在腐解前期分解速度快，而 C/N 高、体积小的秸秆会在腐解后期加快分解。木质素是秸秆中一类很难分解的高分子化合物^[12]，它的含量也会对秸秆的分解产生重要的影响^[13]。碳氮比和木质素含量低的秸秆在土壤中会有较快地分解和氮矿化速率并促进微生物量的增加；而碳氮比和木质素含量较高秸秆的分解速率相对较慢，矿化释放的氮素相对较少^[14]。

除了秸秆的化学性质外，土壤质地也是秸秆分解转化的重要影响因素。由于黏粒与有机质的黏结能力比砂壤土强，黏壤土可以提供比砂壤土更好的物理保护作用^[15]。但是 Fang 等^[16]通过培养实验发现，混合有玉米秸秆的粉质黏土比混合玉米秸秆的砂壤土有更高的 CO₂ 排放量。这可能是因为黏壤土具有比砂壤土更高的养分和水分保持能力，添加秸秆后，土壤中较高的养分含量提高了微生物的生物量和代谢能力^[17]。

玉米是东北黑土区广泛种植的粮食作物，其根、茎、叶等不同部位秸秆的 C/N、木质素含量等化学性质存在显著差异^[18]。本研究分析了添加不同植株部位玉米秸秆对黏壤土 CO₂ 排放和土壤微生物量的影响及其与秸秆碳、氮含量之间关系^[19]，但添加不同植株部位玉米秸秆对砂壤土的 CO₂ 排放和土壤微生物量影响如何，秸秆的木质素含量与土壤的 CO₂ 排放、微生物量之间存在何种关系，两种质地土壤的 CO₂ 排放征、微生物量存在何种差异还有待进一步的研究。因此，本文选择了位于东北黑土区的两种不同质地土壤，通过室内恒温培养实验重点探讨：①添加不同植株部位玉米秸秆后的砂壤土 CO₂ 排放特征和微生物量大小是否与黏壤土存在差异，②添加不同木质素和全氮含量的玉米秸秆进入土壤后，其 CO₂ 排放、微生物量大小是否存在差异；哪个指标最能说明土壤 CO₂ 排放的差异。通过以上研究，旨在明晰秸秆的化学性质和土壤质地对土壤 CO₂ 排放和微生物量的影响，为东北黑土区玉米秸秆还田的实施与农田管理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 土壤与秸秆

培养实验的黏壤土采自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生态试验示范基地的农田黑土表层 (0 ~ 10 cm)。砂壤土采自于吉林省农安县哈拉海镇 (44°42′ N, 125°06′ E) 农田黑土表层 (0 ~ 10 cm)。地表作物均为玉米。采集的土壤过 2 mm 筛后放在 4℃ 保鲜冰箱中保存，用于培养实验和基本理化性质测定。培养实验前土壤的基本性质见表 1。

表 1 培养实验土壤的基本理化性质

Table 1 Selected physical and chemical properties of soils used for incubation trial

质地类型	土壤的机械组成			pH	有机碳 /g·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	碳氮比
	砂粒	粉粒	黏粒				
黏壤土	31.69	26.40	41.91	5.40	17.6	1.7	10.35
砂壤土	67.03	7.65	25.33	5.48	8.0	1.1	7.3

玉米 (*Zea mays*) 秸秆于 2013 年 10 月采自中国科学院东北地理与农业生态研究所长春综合农业试验站。玉米品种为先玉 335，采样时玉米和大豆均已经完全成熟。将采集的玉米秸秆分成根、茎下部 (3 节以下)、茎中间部分、茎顶部 (7 节以上)、叶五部分。由于玉米茎的性质存在垂直分布逐渐过渡现象，茎中部性质介于茎下部和茎顶部之间，而茎下部、茎

顶部秸秆之间有显著的差异，故未将茎中间部分进行培养实验。将上述秸秆装入牛皮纸袋中在 60℃ 条件下烘干至恒重，然后用植物粉碎机以 29 000 r·min⁻¹ 的速率粉碎 5 min，使它们的形状大小基本一致后用于培养实验。使用 FlashEATM 1112 元素分析仪测定总碳和总氮含量，根据 Vonset 方法^[20] 使用 VELP 纤维素分析仪测定木质素含量 (表 2)。

表 2 玉米不同部位全碳、全氮、木质素含量及比值

Table 2 Total carbon, total nitrogen, lignin contents, C/N and lignin/N in different parts of corn residues

秸秆类型	全碳/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	碳氮比	木质素/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	木质素/全氮
根	397.06 ± 3.45	9.44 ± 0.26	42.11 ± 1.37	133.81 ± 7.07	14.18 ± 0.75
茎下部	429.52 ± 13.39	7.97 ± 1.08	54.70 ± 9.07	72.39 ± 8.17	9.08 ± 1.03
茎顶部	440.82 ± 24.53	4.04 ± 0.40	109.74 ± 12.21	74.57 ± 7.59	18.50 ± 1.88
叶	427.61 ± 3.39	9.68 ± 0.46	44.27 ± 2.40	41.27 ± 1.95	4.26 ± 0.20

1.2 培养实验设计

培养实验采用两因素设计,每个处理设置 4 个重复. 实验因素为添加秸秆类型:玉米根、茎下部、茎顶部和叶,土壤质地:黏壤土、砂壤土. 取烘干粉碎后的玉米根、茎下部、茎顶部、叶 1.5 g 分别与相当于烘干土 150 g 的鲜土进行充分混合,然后置于 500 mL 广口瓶中进行培养,同时设置不加秸秆的空白对照. 调节土壤含水量至 40% 的孔隙含水率,然后用保鲜膜将广口瓶瓶口封住,并用注射器针头扎若干细孔保证土壤含水量和培养瓶中的氧气浓度. 将装有土壤的广口瓶置于 25℃ 的恒温培养箱中进行培养,每两天进行称重补水. 广口瓶放入培养箱稳定 2 d 后,在培养的第 3、4、5、6、7、8、9、11、13、15、17、21、25、29、33、37、41、45、49、53、57、61 d 对土壤的 CO₂ 排放速率进行测定,然后破坏性取样测定土壤的微生物量碳、氮和总溶解性氮浓度.

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤 CO₂ 排放速率的测定与计算

利用 LI-820 CO₂ 红外气体分析仪,根据封闭动态箱原理对土壤 CO₂ 排放速率进行测定计算^[21]. 将广口瓶、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 α . CO₂ 排放速率根据公式(1)进行计算:

$$F = \frac{\alpha \times V}{V_m \times M} \tag{1}$$

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

1.3.2 土壤微生物量碳(MBC)、氮(MBN)测定

采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提法,用岛津 TOC-VCPH 分析仪测定提取液中的碳、氮含量^[22]. 根据熏蒸和未熏蒸处理的提取液中有机碳之差除以转换系数 0.38 为 MBC^[23],根据熏蒸和未熏蒸处理的提取液中全氮之差除以转换系数 0.45 为 MBN^[24].

1.3.3 土壤总溶解性氮测定

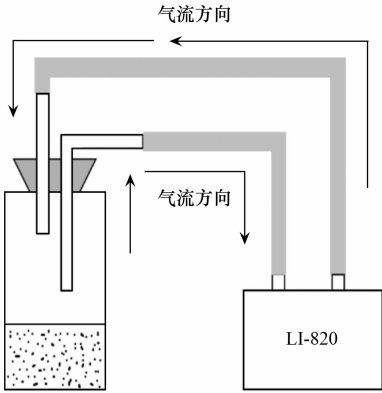


图 1 测定 CO₂ 排放速率时的封闭动态体系示意

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

土壤中的总溶解性氮(TDN)使用 0.5 mol·L⁻¹ 的 K₂SO₄(土壤、溶液比为 1:4)浸提,用岛津 TOC-VCPH/CPN 分析仪测定浸提液中的总氮含量.

1.4 数据处理与统计分析

1.4.1 CO₂ 累积排放量计算

参考文献[25]的方法,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. 具体计算方法见公式(2):

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

式中,CCE 表示培养期间的 CO₂ 累积排放量, V_1 是第一次测定时的 CO₂ 排放速率, t_1 指从开始培养到第一次测定的间隔时间, V_k 为第 k 次测定时的 CO₂ 排放速率, Δt_k 表示第 $k-1$ 次测量到第 k 次测量的间隔时间.

1.4.2 激发效应计算

秸秆添加后的激发效应(priming effect, PE)根据公式(3)计算^[26]:

$$\text{PE} = C_{\text{R,SOC}} - C_{\text{SOC}} \tag{3}$$

式中, $C_{\text{R,SOC}}$ 指添加秸秆的土壤 CO₂ 累积排放量, C_{SOC} 是未添加秸秆的土壤 CO₂ 排放量.

1.4.3 统计分析

使用 Excel 2013 进行平均值及标准差计算;使用 SAS 9.3 PROC 组块的 GLM 过程进行双因素方差分析和 Tukey 多重比较进行显著性差异检验(P

=0.05)；用 REG 过程进行线性回归,分析秸秆化学属性与与土壤激发效应之间的相关关系；使用 SigmaPlot 10.0 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤的 CO₂ 排放

由图 2 可知,添加秸秆显著提高了两种质地土壤的 CO₂ 排放速率,其 CO₂ 排放速率[26 ~ 160 pmol·(g·s)⁻¹]是未添加秸秆土壤 CO₂ 排放速率[12 ~ 18 pmol·(g·s)⁻¹]的 2 ~ 13 倍。在 61 d 的培养实验中,未添加秸秆的土壤 CO₂ 排放速率基本稳定,而添加秸秆的土壤 CO₂ 排放速率随时间均整体呈现出“快速下降-稳定-出现一较高值(在 30 d 前后)-持续下降”的过程。除玉米叶

外,秸秆添加处理的黏壤土 CO₂ 排放速率在培养的绝大多数时间段均显著小于对应的砂壤土 CO₂ 排放速率。

双因素方差分析显示,秸秆类型、土壤质地及其它们的交互作用对土壤 CO₂ 累积排放量有显著影响(表 3)。由图 3 可知,添加秸秆显著提高了黏壤土和砂壤土的 CO₂ 累积排放量,其数值分别是相应对照处理的 4.5 ~ 5.64 倍和 4.8 ~ 6.6 倍。两种土壤中根和茎顶部秸秆的 CO₂ 累积排放量均显著小于对应茎下部和叶的 CO₂ 累积排放量。对照处理、根、茎下部、茎顶部在黏壤土中的 CO₂ 累积排放量均显著大于对应的砂壤土 18.38% ~ 25.64%,但是玉米叶在两种质地土壤中的 CO₂ 累积排放量没有显著性差异。

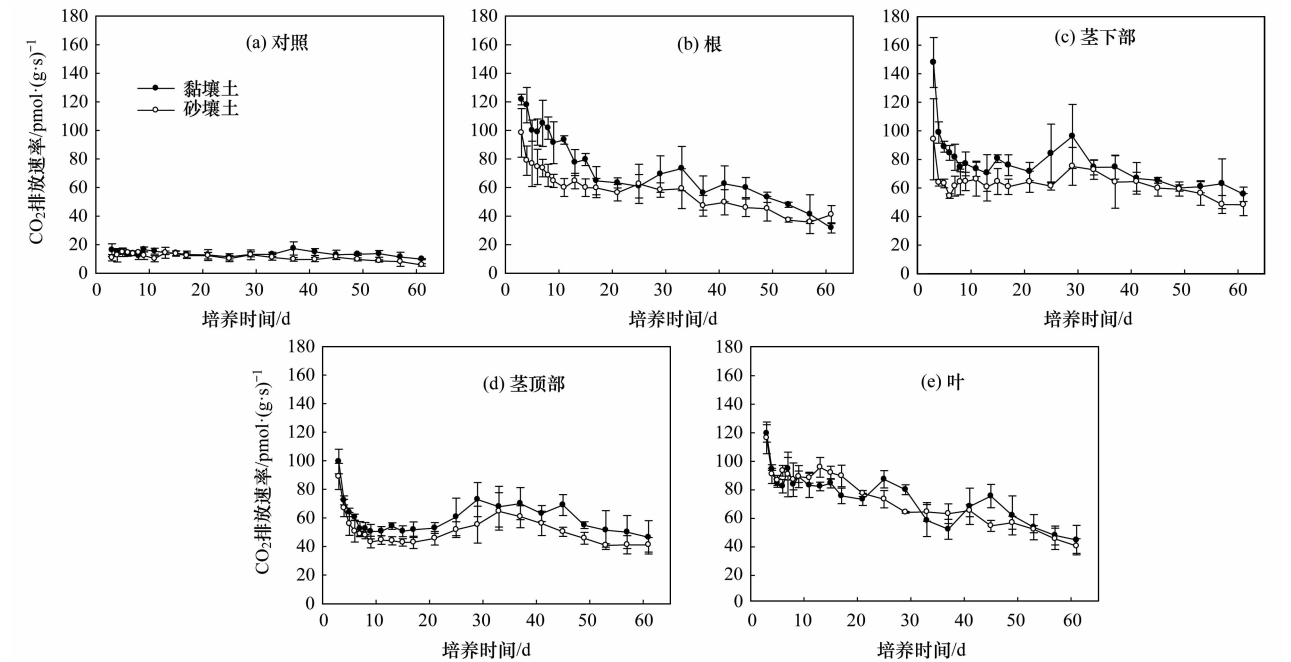
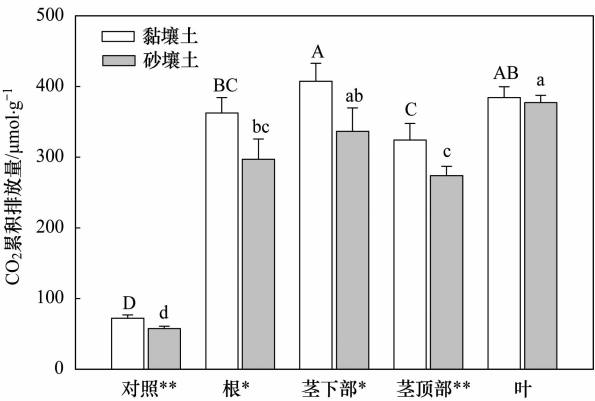


图 2 玉米不同部位秸秆在培养期间的土壤 CO₂ 排放速率(均值 ± 标准差)

Fig. 2 CO₂ emission rate of clay loam and sandy loam soils amended with different crop residue samples(Mean value ± standard deviation)

表 3 秸秆类型、土壤质地及其交互作用对土壤 CO ₂ 累积排放量、MBC、MBN、MBC/MBN、TDN、PE 值的影响 ¹⁾					Table 3 Effects of residue type, soil texture and their interaction on cumulative CO ₂ efflux, MBC, MBN, MBC/MBN, TDN and PE of soil amended with different crop residues				
项目	效应	自由度	F 值	显著性	项目	效应	自由度	F 值	显著性
CO ₂ 累积排放量	秸秆	4	323.6	***	MBC/MBN	秸秆	4	30.64	***
	质地	1	41.76	***		质地	1	2.14	ns
	秸秆 × 质地	4	4.09	**		秸秆 × 质地	4	2.25	ns
MBC	秸秆	4	209.55	***	TDN	秸秆	4	1 627.48	***
	质地	1	27.64	***		质地	1	137.96	***
	秸秆 × 质地	4	5.92	**		秸秆 × 质地	4	5.95	**
MBN	秸秆	4	145.27	***	PE	秸秆	3	22.41	***
	质地	1	0.50	ns		质地	1	17.61	**
	秸秆 × 质地	4	2.06	ns		秸秆 × 质地	3	3.22	*

1) * 表示 0.01 ≤ P < 0.05; ** 表示 0.000 1 ≤ P < 0.01; *** 表示 P < 0.000 1; ns 表示无显著影响(P ≥ 0.05)



不同大写字母表示黏壤土下不同秸秆添加处理的差异显著 ($P < 0.05$),不同小写字母表示砂壤土下不同秸秆添加处理的差异显著 ($P < 0.05$), * 表示该秸秆添加处理下的两种质地土壤差异显著 ($P < 0.05$), ** 表示该秸秆添加处理下的两种质地土壤差异极显著 ($P < 0.01$),下同

图 3 不同类型秸秆培养期间的 CO₂ 累积排放量 (均值 ± 标准差)

Fig. 3 Cumulative CO₂ efflux from clay loam and sandy loam soils amended with different crop residues (Mean value ± standard deviation)

2.2 PE 值及其与秸秆化学属性的关系

由图 4 可知,添加不同秸秆进入两种土壤后产

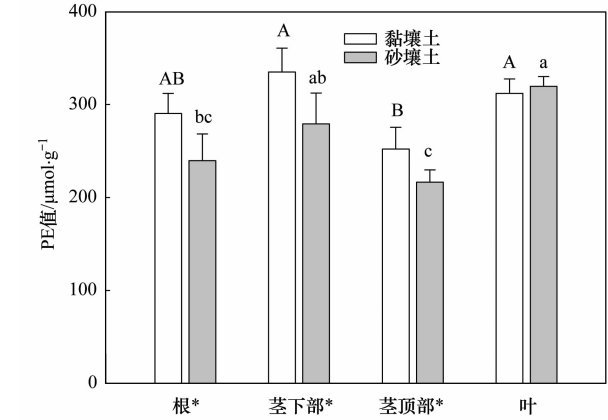
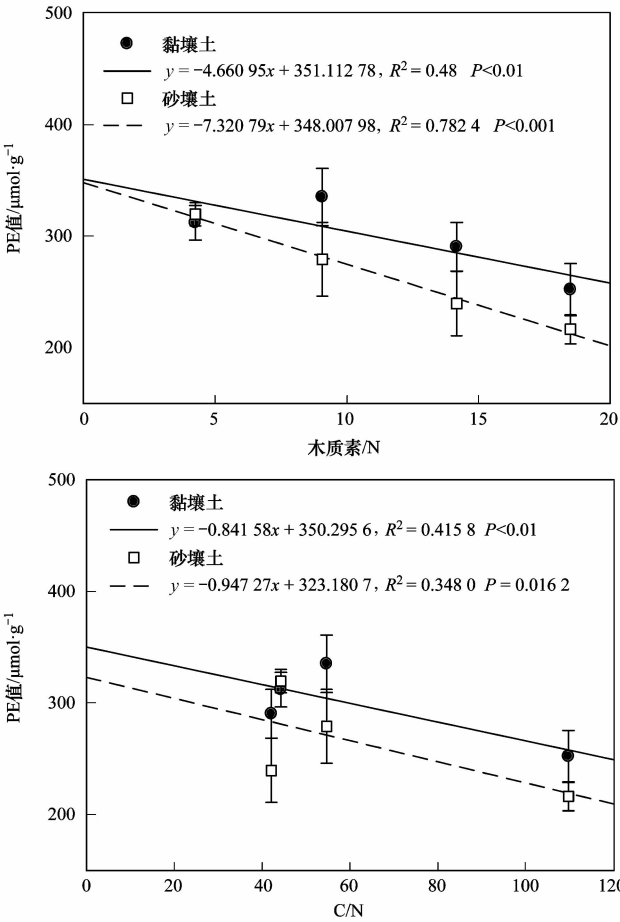


图 4 不同类型秸秆在培养期间的激发效应值 (均值 ± 标准差)
Fig. 4 Priming effect of soil amended with different crop residues (Mean value ± standard deviation)

生的激发效应有明显差别,其 PE 值介于 216.53 ~ 335.17 μmol·g⁻¹. 双因素方差分析显示,添加秸秆产生的激发效应值受到秸秆类型、土壤质地以及土壤质地与秸秆类型交互作用的显著影响,秸秆类型对 PE 值的影响最显著,土壤质地以及土壤质地与秸秆类型交互作用对 PE 值影响的显著性依次减小

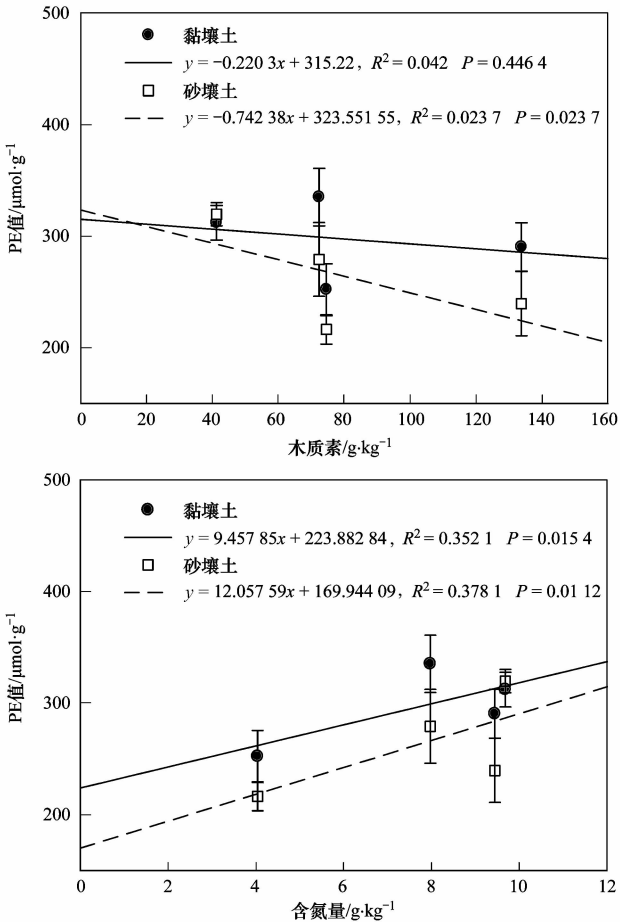


图 5 秸秆化学属性与砂壤土、黏壤土 PE 值的相关关系
Fig. 5 Correlation of priming effect with residue chemistry of clay loam and sandy loam soils amended with different crop residues

(表 3). 两种土壤中根和茎顶部秸秆 PE 值平均值均小于茎下部和叶; 且两种土壤中茎顶部秸秆的 PE 值均显著小于茎下部和叶, 砂壤土中根的 PE 值也显著小于叶. 除砂壤土中叶的 PE 值略大于对应的砂壤土外, 其他各类型秸秆的 PE 值均表现为黏壤土显著大于砂壤土.

由图 5 可知, PE 值与秸秆的木质素/N 之间的线性关系明显好于 PE 值与秸秆木质素含量、C/N、含氮量之间的线性关系. 两种土壤中 PE 值与木质素/N 之间线性回归方程的截距比较接近, 但是砂壤土的斜率(-7.320 79) 比黏壤土的斜率(-4.660 95) 小 57.07%. 当秸秆木质素/N 较低时, 两种土壤的 PE 值比较接近; 而随着木质素/N 增大, 两种土壤的 PE 值之差也逐渐增大.

2.3 土壤微生物量和 TDN 含量

双因素方差分析表明, 土壤 MBC、TDN 受到秸

秆类型、土壤质地及其交互作用的显著影响, 而 MBN、MBC/MBN 只受到秸秆类型的显著影响(表 4). 添加秸秆的土壤 MBC、MBN 显著大于未添加秸秆的对照处理, 而 MBC/MBN、TDN 则显著小于未添加秸秆的对照处理. 在两种土壤中, 茎下部和叶的 MBC 和 MBN 均显著大于根和茎顶部的 MBC 和 MBN; 而 TDN 则表现为根和叶的含量显著大于茎下部和茎顶部, 茎下部的含量显著大于茎顶部. 虽然同种秸秆添加下的两种质地土壤 MBC、MBN 没有显著差异, 但添加秸秆后砂壤土中微生物量增加的幅度大于黏壤土的微生物量增加幅度. 黏壤土中添加秸秆的土壤 MBC、MBN 分别比对照处理大 105% ~ 146%、185% ~ 299%; 砂壤土中添加秸秆的土壤 MBC、MBN 分别比对照处理大 150% ~ 295%、423% ~ 552%. 各处理下的砂壤土中 TDN 含量都显著小于对应处理黏壤土的矿质态氮含量 11.77% ~ 31.33%.

表 4 不同部位玉米秸秆在土壤中培养后的微生物量碳、微生物量氮、矿质态氮含量(均值 ± 标准差)¹⁾
Table 4 Concentration of soil microbial biomass and mineral N in soil amended with different parts of corn residues

质地类型	秸秆种类	MBC/mg·kg ⁻¹	MBN/mg·kg ⁻¹	MBC/MBN	TDN/mg·kg ⁻¹
黏壤土	对照	91 ± 7.4Da	8.5 ± 2.2Ca	11 ± 1.8Aa	45.4 ± 1.2Aa
	根	186.9 ± 12.7Ca	25.4 ± 2.7Ba	7.4 ± 0.7BCa	17.6 ± 0.5Ba
	茎下部	224.1 ± 10.1Aa	33.9 ± 3.8Aa	6.7 ± 0.9BCa	10.9 ± 0.7Da
	茎顶部	193.8 ± 20.9BCa	24.3 ± 2.6Ba	8 ± 1.1Ba	8.3 ± 0.6Ea
	叶	208.7 ± 11.6ABa	33.3 ± 1.1Aa	6.3 ± 0.3Ca	15.3 ± 1.1Ca
砂壤土	对照	56.3 ± 2.0Db	5.2 ± 1.8Cb	12.1 ± 4.3Aa	39.5 ± 0.8Ab
	根	141.9 ± 26.3Cb	27.2 ± 7.4Ba	5.5 ± 1.2Bb	12.5 ± 3.8Bb
	茎下部	222.1 ± 12.5Aa	33.9 ± 2.6Aa	6.6 ± 0.6Ba	7.8 ± 0.8Cb
	茎顶部	180.9 ± 15.6Ba	28.2 ± 3.8ABb	6.5 ± 0.6Bb	5.7 ± 0.7Db
	叶	207.6 ± 27.9ABa	33.8 ± 5Aa	6.1 ± 0.4Ba	13.5 ± 0.5Bb

1) 表中不同小写字母表示同种秸秆类型下不同土壤质地处理的差异显著(P < 0.05), 不同大写字母表示同种土壤质地下不同秸秆类型处理的差异显著(P < 0.05)

3 讨论

3.1 秸秆类型对两种质地土壤 CO₂ 排放的影响

添加秸秆的土壤 CO₂ 排放速率随时间表现出“快速下降-稳定-出现较高值-持续下降”的过程, 这与土壤中易分解有机物质耗竭和微生物类群的增长有关. 秸秆与土壤混合后 CO₂ 排放速率由较高的排放速率迅速下降, 是因为秸秆进入土壤后易分解的短链有机物质(单糖、淀粉和简单蛋白质等)被耗竭所致; 在培养 30 d 左右出现的“较高值”, 与能分解长链或环状有机物微生物类群的增长有关; 之后可分解的有机物质继续减少, 这导致了 CO₂ 排放速率的进一步衰减^[27, 28].

文中玉米秸秆各部位木质素含量表现为: 根 > 茎 > 叶, 与 Abiven 等^[18] 观察到的结果一致. 茎下部和茎顶部秸秆的木质素含量基本一致, 而茎顶部秸秆的含氮量只有茎下部秸秆的一半. 这说明玉米秸秆的全氮含量在玉米茎中存在垂直分布的差异, 而木质素含量则没有. 由于具有最高的木质素含量, 根的 CO₂ 累积排放量显著小于茎下部和叶的 CO₂ 累积排放量. 但是, 由于茎顶部秸秆的含氮量很低, 尽管它的木质素含量平均值只有根的 54%, CO₂ 累积排放量却并没有显著小于根. 这说明根的 CO₂ 累积排放量小是由于高的木质素含量, 而茎顶部的 CO₂ 累积排放量小是受限于较低氮的含量. 显然, 玉米秸秆的分解与 CO₂ 排放受到自身木质素及氮

含量的共同影响,根部和茎顶部秸秆的共同特点是有较高的木质素/N. 所以,木质素/N 比木质素含量、C/N 等更好地说明秸秆分解和 CO₂ 排放的差异. Johnson 等^[29]和 Yanni 等^[30]也认为木质素全氮比高的秸秆在土壤中的分解速率会相对缓慢,这与本研究结果一致.

除玉米叶外,添加其他秸秆的黏壤土 CO₂ 排放速率和 CO₂ 累积排放量均显著大于对应的砂壤土,这意味着黏粒保护作用不是两种土壤中秸秆分解差异的主要原因. 添加秸秆后,土壤中的有效氮等营养物质成为分解植物残体微生物活性的限制因素;而黏壤土的营养物质丰富,有利于土壤中微生物数量和活性的提高,从而促进了秸秆的分解和 CO₂ 的排放^[17]. 而叶在两种土壤中的 CO₂ 累积排放量没有差异,是因为叶的 C/N、木质素/N 比较小(表 2). 一方面,是因为叶的氮素含量高、木质素含量低,微生物对它的分解作用较少受到土壤中矿质氮等营养物质含量的限制^[14];另一方面,这类秸秆与黏粒的结合能力比含氮少、木质素多的秸秆强,可以减少一部分微生物的分解作用^[31]. 由此可以认为,秸秆木质素含量越高、总氮越低受到土壤质地的影响就越大;而类似玉米叶等木质素含量较低、总氮含量较高的秸秆在两种土壤中的分解速率差异就很小.

3.2 秸秆化学属性与两种质地土壤激发效应的关系

由于两种质地土壤的 CO₂ 排放本底值存在显著差异,计算添加秸秆的 PE 值可以更好确定不同处理下 CO₂ 排放的变化的来源^[32]. 双因素方差分析的结果显示,秸秆类型对 PE 值有极显著影响,而土壤质地以及土壤质地与秸秆类型的交互作用对 PE 值影响的显著性依次降低,说明秸秆类型比土壤质地对 CO₂ 排放差异的贡献更大. 不同秸秆添加下 PE 值差异与土壤 CO₂ 累积排放量的差异基本一致,PE 值与秸秆木质素/N 的呈负的线性关系,且明显好于其他指标与 PE 值的线性关系. 这进一步证明了前文关于秸秆类型和土壤质地对秸秆分解、CO₂ 排放影响的论断,木质素/N 确实比木质素含量、含氮量、C/N 等更好地说明秸秆分解和 CO₂ 排放的差异.

两种质地土壤的 PE 值与木质素/N 线性回归方程的截距比较接近,但砂壤土的斜率却明显小于黏壤土的斜率. 两种质地土壤的激发效应对不同木质素/N 的响应不一致,随着秸秆木质素/N 的增大,砂壤土 PE 值降低的速率更快,与相应黏壤土的差

值更大. 正如前文论断,由于氮素限制作用和黏粒结合能力的差异^[14,31],随着秸秆木质素/N 的增加,质地对秸秆分解、CO₂ 排放的影响逐渐增大. 这意味着,在黑土区实施秸秆还田时应更加注意木质素/N 较高的秸秆在不同质地土壤中的分解、CO₂ 排放的差异.

3.3 秸秆类型对两种质地土壤微生物量和 TDN 含量的影响

添加秸秆的土壤微生物量显著大于未添加秸秆的对照处理,而 TDN 含量显著小于未添加秸秆的对照处理. 这是因为添加秸秆提供了物质和能源促进了微生物的生长繁殖,为了满足生长繁殖和分解秸秆的需要,微生物必须从土壤中吸收含氮底物,从而降低了土壤中的 TDN 含量^[33]. 添加玉米秸秆增加了 MBC、MBN 含量,但 MBC/MBN 降低,说明更多的含氮底物被微生物固持,微生物群落氮固持的速率高于碳固持. 同时,MBC/MBN 还可以大致反映出微生物的种群结构信息^[34],添加秸秆的土壤 MBC/MBN 显著减小,是因为添加的秸秆在分解早期具有较多可利用碳源(糖类、半纤维素、纤维素等)和营养物质更有利于细菌、放线菌等具有较低 C/N 微生物的生长繁殖,而这类微生物往往以 r 策略生存(r-strategy)^[27,28].

植物残体的化学性质在影响植物残体分解速率的同时也会对土壤的 TDN 含量、微生物量及微生物的群落结构产生一定影响. 有研究认为木质素含量和 C/N 较低的残体在土壤中比较容易分解,有较高的 CO₂ 排放、矿质氮含量以及微生物量;而较高 C/N 和木质素含量的植物残体更难分解,其 CO₂ 排放、矿质氮含量、微生物量相对较小,同时还会促使真菌等适应营养贫乏环境的微生物丰度增加^[14,35]. 本研究结果也部分证实了上述观点. 在本研究中,玉米根和茎顶部秸秆的木质素/N 显著大于茎下部和叶,它们的 MBC、MBN 也和 CO₂ 累积排放量一样显著小于茎下部和叶;黏壤土中玉米根和茎顶部秸秆的 MBC/MBN 显著大于茎下部和叶,说明根和茎顶部的真菌比例显著大于茎下部和叶^[34].

然而,根的 TDN 含量和砂壤土 MBC/MBN 的数据与已有的研究结果不一致. 根的 TDN 含量没有显著小于其它类型秸秆可能是因为,土壤中 TDN 含量受到土壤中微生物同化固定和秸秆矿化作用的共同影响^[36,37]. 一方面,根的木质素含量比较高,较难被微生物分解利用,土壤中微生物增加量相对较低,微生物从土壤中吸收固定的含氮底物数量比其

它类型秸秆少; 另一方面, 由于根的全氮含量较高, 虽然根的腐解速率比较慢, 依然可以通过矿化作用向土壤中补充较多的矿质氮. 而砂壤土中 MBC/MBN 反映的微生物群落结构信息与黏壤土有较大差异, 这说明秸秆性质对土壤微生物群落结构影响因土壤种类而异. 土壤微生物遗传背景以及土壤机械组成的差异可能是不同土壤中微生物群落结构对秸秆添加响应不同的主要原因^[36,38]. 必须指出的是, MBC/MBN 只能大致反映土壤微生物群落结构的变化, 需要 PLFA、高通量测序等方法才能更好解读出土壤中微生物群落结构信息.

砂壤土各处理的土壤 TDN 含量均显著小于对应的黏壤土, 这与砂壤土的 CO₂ 累积排放量小于对应处理黏壤土的结果一致. 而尽管砂壤土 MBC 平均含量比黏壤土小, 但相同秸秆添加处理下的砂壤土 MBC、MBN 没有显著性差异. 这意味着土壤有效氮含量导致的微生物代谢能力差异可能是砂壤土中秸秆分解速率小于对应黏壤土的重要原因.

3.4 对秸秆还田实施与管理的探讨

秸秆还田被很多研究人员认为是提高土壤地力、增加土壤碳库储量的重要措施^[39]. 本研究通过两种质地土壤的秸秆添加实验发现, 砂壤土中秸秆的分解矿化速率、CO₂ 排放量显著小于黏壤土; 砂壤土中微生物量增加的幅度比黏壤土中微生物量增加的幅度大. 这意味着, 与黏壤土相比, 在砂壤土中实施秸秆还田可以取得更好的土壤碳固存和微生物量保持效果. 而土壤微生物量既是土壤有机质和养分转化的动力, 又是土壤中植物有效养分的储备库, 对土壤养分的循环和有效性有着至关重要的作用^[40]. 与此同时, 因为黏粒含量较少, 砂壤土中的 TDN 更容易被降雨、径流淋失, 这不仅降低了农田土壤的氮肥利用率, 也会对地下水和地表水产生污染^[41]. 而添加秸秆后砂壤土中的 TDN 可以被微生物吸收同化固定, 有利于土壤氮素的保存和周转. 陈维梁等也认为秸秆还田能够有效缓解施肥带来的氮淋溶效应, 降低地下水氮素污染风险, 从而达到改善土壤肥力从而增加农作物产量的目的^[42]. 当然, 在田间实践时还需要适当补充速效氮肥, 来防止秸秆分解过程中微生物与作物争夺土壤有效态氮引起的土壤有效养分短期供给不足的问题. 由此可以认为, 就土壤碳固存、微生物量保持和氮保存而言, 在砂壤土中实施秸秆还田的效果可能比黏壤土更好.

4 结论

(1) 不同植株部位秸秆的 C/N、木质素含量等

有较大差异, 其分解的难易程度也不同. 玉米根和茎顶部秸秆具有较高的 C/N 或木质素含量相对较难分解, 其 CO₂ 排放、激发效应和微生物量均显著小于茎下部和叶. 秸秆的木质素和氮含量均会对它的分解和 CO₂ 排放产生影响, 木质素/N 比木质素含量、C/N 等更好地说明秸秆分解和 CO₂ 排放的差异.

(2) 除玉米叶外, 添加其他秸秆的黏壤土在培养期间的 CO₂ 排放速率、CO₂ 累积排放量和激发效应均显著大于对应的砂壤土. 黏粒保护的作用不是两种土壤中秸秆分解差异的主要原因, 土壤中的有效氮等营养物质可能是植物残体分解的限制因素. 砂壤土中微生物量增加的幅度比黏壤土中微生物量增加的幅度大. 与黏壤土相比, 在砂壤土中实施秸秆还田更有利于土壤碳固存、微生物量保持和氮保存.

参考文献:

- [1] 高利伟, 马林, 张卫峰, 等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(7): 173-179.
- [2] 谢光辉, 王晓玉, 任兰天. 中国作物秸秆资源评估研究现状[J]. 生物工程学报, 2010, **26**(7): 855-863.
- [3] 唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 等. 长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1623-1632.
- [4] 王如芳, 张吉旺, 董树亭, 等. 我国玉米主产区秸秆资源利用现状及其效果[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(6): 1504-1510.
- [5] Parton W, Silver W, *et al.* Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long term decomposition [J]. Science, 2007, **315**(5184): 361-364.
- [6] Randlett D L, Zak D R, Pregitzer K S, *et al.* Elevated atmospheric carbon dioxide and leaf litter chemistry: Influences on microbial respiration and net nitrogen mineralization [J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, **60**(5): 1571-1577.
- [7] 韩冰, 王效科, 逯非, 等. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, **28**(2): 612-619.
- [8] 马超, 周静, 刘满强, 等. 秸秆促腐还田对土壤养分及活性有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2013, **50**(5): 915-921.
- [9] Baumann K, Marschner P, Smernik R J, *et al.* Residue chemistry and microbial community structure during decomposition of eucalypt, wheat and vetch residues [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, **41**(9): 1966-1975.
- [10] 史学军, 潘剑君, 陈锦盈, 等. 不同类型凋落物对土壤有机碳矿化的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(6): 254-259.
- [11] 张红, 吕家珑, 曹莹菲, 等. 不同植物秸秆腐解特性与土壤微生物功能多样性研究[J]. 土壤学报, 2014, **51**(4): 743-752.
- [12] Austin A T, Ballare C L. Dual role of lignin in plant litter decomposition in terrestrial ecosystems [J]. Proceedings of the

National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, **107**(10): 4618-4622.

[13] Walela C, Daniel H, Wilson B, *et al.* The initial lignin: nitrogen ratio of litter from above and below ground sources strongly and negatively influenced decay rates of slowly decomposing litter carbon pools [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **77**: 268-275.

[14] Gul S M, Whalen J K, Ellis B E, *et al.* Plant residue chemistry impacts soil processes and microbial community structure: A study with *Arabidopsis thaliana* cell wall mutants [J]. *Applied Soil Ecology*, 2012, **60**: 94-91

[15] Chivenge P, Vanlauwe B, Gentile R, *et al.* Comparison of organic versus mineral resource effects on short-term aggregate carbon and nitrogen dynamics in a sandy soil versus a fine textured soil [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2011, **140**(3-4): 361-371

[16] Fang M, Motavalli P P, Kremer R J, *et al.* Assessing changes in soil microbial communities and carbon mineralization in Bt and non-Bt corn residue-amended soils [J]. *Applied Soil Ecology*, 2007 **37**(1-2): 150-160.

[17] Gul S M, Whalen J K. Plant life history and residue chemistry influences emissions of CO₂ and N₂O from soil perspectives for genetically modified cell wall mutants [J]. *Plant Sciences*, 2013, **32**(5): 344-368.

[18] Abiven S, Heim A, Schmidt M W I. Lignin content and chemical characteristics in maize and wheat vary between plant organs and growth stages: consequences for assessing lignin dynamics in soil [J]. *Plant and Soil*, 2011, **343**(1-2): 369-378.

[19] 刘四义, 贾淑霞, 张晓平, 等. 玉米和大豆秸秆还田对黑土微生物量及呼吸的影响[J]. *土壤与作物*, 2014, **3**(3): 105-111.

[20] Van Soest P J, Robertson J B, Lewis B A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition[J]. *Journal of Dairy Science*, 1991, **74**(10): 3583-3597.

[21] 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]. 中国专利: CN 103776971, 2014-05-07.

[22] 鲁如坤. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 228-235.

[23] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, **19**(6): 703-707.

[24] Jenkinson D S. Determination of microbial biomass carbon and nitrogen in soil [A]. In: Wilson J R, (ed.). *Advances in Nitrogen Cycling in Agricultural Ecosystems*. Wallingford: C. A. B International, 1988. 368-386.

[25] 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.

[26] Fang Y, Singh B, Singh B P. Effect of temperature on biochar priming effects and its stability in soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **80**: 136-145.

[27] 王晓羽, 孙波. 植物残体分解过程中微生物群落变化影响因素研究进展[J]. *土壤*, 2012, **44**(3): 353-359.

[28] Rui J P, Peng J J, Lu Y H. Succession of bacterial populations during plant residue decomposition in rice field soil [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, **75**(14): 4879-4886

[29] Johnson J M F, Barbour N W, Weyers S L. Chemical composition of crop biomass impacts its decomposition [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, **71**(1): 155-162.

[30] Yanni S F, Whalen J K, Simpson M J, *et al.* Plant lignin and nitrogen contents control carbon dioxide production and nitrogen mineralization in soils incubated with Bt and non-Bt corn residues [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(1): 63-69.

[31] Kleber M, Sollins P, Sutton R. A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces [J]. *Biogeochemistry*, 2007, **85**(1): 9-24.

[32] Kuzyakov Y, Bol R. Sources and mechanisms of priming effect induced in two grassland soils amended with slurry and sugar [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(4): 747-758.

[33] Ros G H, Hoffland E, Temminghoff E J M. Dynamics of dissolved and extractable organic nitrogen upon soil amendment with crop residues [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**(12): 2094-2101.

[34] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, **41**(1): 144-152.

[35] Eskelinen A, Stark S, Männistö M. Links between plant community composition, soil organic matter quality and microbial communities in contrasting tundra habitats [J]. *Oecologia*, 2009, **161**(1):113-123.

[36] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2010. 195-202.

[37] Chen B Q, Liu E K, Tian Q, *et al.* Soil nitrogen dynamics and crop residues. A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, **34**(2): 429-442.

[38] Henriksen T M, Breland T A. Carbon mineralization, fungal and bacterial growth, and enzyme activities as affected by contact between crop residues and soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, **35**(1): 41-48.

[39] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2013, **21**(5): 526-535.

[40] 林先贵, 胡君利. 土壤微生物多样性的科学内涵及其生态服务功能[J]. *土壤学报*, 2008, **45**(5): 892-900.

[41] 黄云凤, 张珞平, 洪华生, 等. 小流域氮流失特征及其影响因素[J]. *水利学报*, 2006, **37**(7): 801-806, 812.

[42] 陈继梁, 高扬, 林勇明, 等. 紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应[J]. *环境科学*, 2014, **35**(6): 2129-2138.

CONTENTS

Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013	Li Li, CAI Jun-lin, ZHOU Min (2327)
Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period	WANG Man-ting, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2337)
Chemical Species of PM _{2.5} in the Urban Area of Beijing	LIU Bao-xian, YANG Dong-yan, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2346)
Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Shandong Province During Spring in 2014	JIA Hai-ying, CHENG Nian-liang, HE You-jiang, <i>et al.</i> (2353)
Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} Emitted from Coal-Fired Power Plants	MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, <i>et al.</i> (2361)
Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO ₂ Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer	GAO Yun-qiu, LIU Shou-dong, HU Ning, <i>et al.</i> (2367)
Emission Factors of Vehicle Exhaust in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2374)
Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing	ZHANG Wei-kang, WANG Bing, NIU Xiang (2381)
Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta	DING Qing-qing, WEI Wei, SHEN Qun, <i>et al.</i> (2389)
Estimation of N ₂ O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N	HAN Yun-fang, HAN Sheng-hui, YAN Ping (2395)
Evaluation on the Impacts of Different Background Determination Methods on CO ₂ Sources and Sinks Estimation and Seasonal Variations	ZHANG Fang, ZHOU Ling-xi, WANG Yu-zhao (2405)
Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium (VI) in Liaohe River	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, <i>et al.</i> (2414)
Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaile, JIANG Feng-qing (2422)
Influencing Factors for Hydrochemistry and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ of Karst Springs	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi, <i>et al.</i> (2430)
Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin	YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, <i>et al.</i> (2437)
Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing	QING Xu-yao, REN Yu-fen, LÜ Zhi-qiang, <i>et al.</i> (2446)
Static Migration and Release of Dibutyl-Phthalate in the Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir	WANG Fa, WANG Qiang, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (2453)
Effect of Drought and Subsequent Re-wetting Cycles on Transferable Nitrogen and Its Form Distribution in the Sediment of Water Level Fluctuating Zone in the Tributary of Three Gorge Reservoir Areas	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, YANG Zhen-yu, <i>et al.</i> (2459)
Distribution of Chlorophyll-a and Eutrophication State in Tianchi Lake of Tianshan Mountains in Summer	WANG Bin, MA Jian, WANG Yin-ya, <i>et al.</i> (2465)
Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidaihai Lake	DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying (2472)
Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Jialing River After the Impoundment of Caojie Reservoir	YANG Min, ZHANG Sheng, LIU Shuo-ru (2480)
Analysis of Prokaryotic Community Structure in River Waters of the Ningbo Sanjiang Mouth	HU An-yi, LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, <i>et al.</i> (2487)
Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China	SUN Ya-jun, WANG Tie-yu, PENG Xia-wei, <i>et al.</i> (2496)
Coupling Effects of Decomposed <i>Potamogeton crispus</i> and Growing <i>Ceratophyllum demersum</i> on Water Quality and Plant Growth	MA Yue, WANG Guo-xiang, CAO Xun, <i>et al.</i> (2504)
Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater	LI Li-qing, GONG Yan-fang, YAN Zi-qin, <i>et al.</i> (2511)
Treatment of Urban Runoff Pollutants by a Multilayer Biofiltration System	WANG Xiao-lu, ZUO Jian-e, GAN Li-li, <i>et al.</i> (2518)
Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance	LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, <i>et al.</i> (2525)
Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method	GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, <i>et al.</i> (2532)
Comparative Study of Benzotriazole Electrochemical Oxidation at Boron-doped Diamond and PbO ₂ Anodes	WU Juan-li, ZHANG Jia-wei, WANG Ting, <i>et al.</i> (2540)
Sorption of <i>o</i> -Phthalate onto Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, HUANG Li-dong, CHEN Yan-fang, <i>et al.</i> (2547)
Adsorption Behaviors of Lead on Multi-Walled Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composites	ZHANG Jin-li, LI Yu (2554)
Synthesis and Study on Adsorption Property of Congo Red Molecularly Imprinted Polymer Nanospheres	CHANG Zi-qiang, CHEN Fu-bin, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2564)
Simultaneous Removal of Cd(II) and Phenol by Titanium Dioxide-Titanate Nanotubes Composite Nanomaterial Synthesized Through Alkaline-Acid Hydrothermal Method	LEI Li, JIN Yin-jia, WANG Ting, <i>et al.</i> (2573)
Immobilization of Estrogen-degrading Bacteria to Remove the 17 β -estradiol and Diethylstilbestrol from Polluted Water and Cow Dung	LI Xin, LING Wan-ting, LIU Jing-xian, <i>et al.</i> (2581)
Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor	YUAN Yan, LI Xiang, ZHOU Cheng, <i>et al.</i> (2591)
Treatment of Petrochemical Treatment Plant Secondary Effluent by Fenton Oxidation	WANG Yi, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2597)
Comprehensive Toxicity Evaluation and Toxicity Identification Used in Tannery and Textile Wastewaters	HUANG Li, CHEN Wen-yan, WAN Yu-shan, <i>et al.</i> (2604)
Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions	CHEN Yan, LIU Guo-hua, FAN Qiang, <i>et al.</i> (2610)
ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow	WANG Xiao-ling, SONG Tie-hong, YIN Bao-yong, <i>et al.</i> (2617)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow	YAO Li, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2626)
Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China	ZHANG Jin-lian, DING Jiang-feng, LU Gui-ning, <i>et al.</i> (2633)
Residues and Spatial Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides DDTs in Soil of Linyi City, Shandong Province	YU Chao, WANG Zeng-hui, WANG Hong-jin, <i>et al.</i> (2641)
Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas	YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling (2648)
Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism	HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, <i>et al.</i> (2655)
Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China	LI Ru-jian, WANG Rui, LI Na-na, <i>et al.</i> (2662)
Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain	LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2669)
Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River	ZHU Mei-ling, GONG Lu, ZHANG Long-long (2678)
Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO ₂ Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils	LIU Si-yi, LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, <i>et al.</i> (2686)
Isolation, Identification of a <i>p</i> - <i>tert</i> -Butylcatechol-Degrading Strains and Optimization for Its Degradation by Response Surface Methodology	HE Qiang-li, LIU Wen-bin, YANG Hai-jun, <i>et al.</i> (2695)
Isolation, Identification and Characteristic Analysis of an Oil-producing <i>Chlorella</i> sp. Tolerant to High-strength Anaerobic Digestion Effluent	YANG Chuang, WANG Wen-guo, MA Dan-wei, <i>et al.</i> (2707)
Coupled Cytotoxicity of C ₆₀ Nano-Crystal Particle with Cu ²⁺ to the Mouse Peritoneal Microphage RAW 264.7	YU Ye, BIAN Wei-lin, ZHANG Hui-min, <i>et al.</i> (2713)
Simultaneous Analysis of 18 Glucocorticoids in Surface Water	GUO Wen-jing, CHANG Hong, SUN De-zhi, <i>et al.</i> (2719)

《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 7 月 15 日 第 36 卷 第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 7 Jul. 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 国内邮发代号: 2-821
CN 11-1895/X

国 内 定 价: 120.00 元 国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行