

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

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

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化	薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)
北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源	周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)
利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布	刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)
兰州城区大气 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)
成都市西南郊区春季大气 PM _{2.5} 的污染水平及来源解析	林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晓芬(1629)
中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征	刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)
固定源排放污染物健康风险评价方法的建立	陈强,吴焕波(1646)
北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试	胡月琪,郭晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)
南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价	王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金花(1662)
CoCuMnO ₂ 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学	孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)
大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化	张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)
典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征	史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)
利用δ ¹⁵ N-NO ₃ ⁻ 和 δ ¹⁸ O-NO ₃ ⁻ 示踪北京城区河流硝酸盐来源	赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)
柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析	王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)
三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响	陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)
亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究	王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)
平原河网典型污染物生物降解系数的研究	冯帅,李叙勇,邓建才(1724)
沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例	张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)
苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素	任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)
河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价	王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)
顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价	蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)
台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险	陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)
乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芙宁,张连凯,苏春田(1779)
岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例	王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)
广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素	黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)
基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(<i>Bacteroides</i>) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例	张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)
典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征	梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)
钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成	刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)
天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究	丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)
臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素	董秉直,张佳丽,何畅(1837)
污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析	程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)
HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学	郭俊元,王彬(1852)
放射性废水处理中吸附铀的优势藻种筛选	李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)
微米 Fe ₃ O ₄ 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究	钱旭,王毅力,赵丽(1864)
间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能	宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)
不同灌溉方式对华北平原冬小麦田土壤 CO ₂ 和 N ₂ O 排放通量的影响	郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)
卫河新乡市区段春季溶解 CH ₄ 与 N ₂ O 浓度特征	侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)
模拟氮沉降对内蒙古克氏针茅草原 N ₂ O 排放的影响	杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)
土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制	曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)
黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局	高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)
耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响	史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)
北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险	赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)
准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析	刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)
纳米 TiO ₂ 对土壤重金属释放及形态变化的影响	张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)
纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学	马少云,祝方,商执峰(1953)
低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响	宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)
粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响	黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)
萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析	王亚男,程立娟,周启星(1978)
高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响	郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旻,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)
磺胺抗性消长与堆肥进程交互特征	林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)
《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)	

土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制

曹湛波^{1,2}, 王磊², 李凡², 付小花², 乐毅全², 吴纪华³, 陆兵¹, 徐殿胜^{1*}

(1. 华东理工大学生物反应器工程国家重点实验室, 上海 200237; 2. 同济大学污染控制与资源利用重点实验室, 上海 200092; 3. 复旦大学生物多样性与生态工程教育部重点实验室, 上海 200433)

摘要:以黄豆、玉米、水稻这 3 种农业秸秆为原料, 崇明东滩围垦土地为试验样区, 以景观植物地肤草为目标植物, 研究土壤呼吸和土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其可能的机制。结果表明, 不同秸秆直接还田的土壤呼吸和地上植物量均高于对照组; 黄豆秸秆还田后土壤呼吸相对最低, 土壤有机碳最高, 因此黄豆秸秆还田的土壤碳封存能力高于玉米和水稻秸秆。秸秆还田显著促进土壤微生物活性, 增加了土壤微生物量以及 β -糖苷酶、脱氢酶活性, 脱氢酶活性与土壤呼吸相关性最显著。黄豆秸秆还田脱氢酶活性最低, 相应的土壤呼吸也最低。黄豆秸秆纤维素、木质素和 C/N 含量最高, 可降解性最低, 表明黄豆秸秆难以被微生物降解利用, 因而还田后其土壤微生物活性最低, 最终导致最低的土壤呼吸和较高的土壤有机碳。

关键词:土壤有机碳; 土壤呼吸; 还田秸秆; 土壤微生物; 可生物降解性

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1908-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2016.05.039

Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism

CAO Zhan-bo^{1,2}, WANG Lei², LI Fan², FU Xiao-hua², LE Yi-quan², WU Ji-hua³, LU Bing¹, XU Dian-sheng^{1*}

(1. State Key Laboratory of Bioreactor Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Key Laboratory of Biodiversity and Ecological Engineering, Ministry of Education, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Soybean, maize and rice straws were selected as raw materials to study the response of the soil respiration (SR) and soil organic carbon (SOC) to returning of different straws in the Chongming Dongtan area. The results showed that all of SR, SOC and the plant biomass of the lands with returning of different straws were higher than those of the controls. The soil with soybean straw returning possessed the lowest SR and highest SOC among the three kinds of straws, meaning its higher soil organic carbon sequestration capability than corn and maize straws returning. Straw returning significantly enhanced soil dehydrogenase, β -glycosidase activities and microbial biomass, and soil dehydrogenase activity was significantly correlated with soil respiration. The dehydrogenase activity of the soil with soybean straw returning was the lowest, thus, the lowest SR and highest SOC. Soybean straw had the highest cellulose and lignin contents and the lowest N content among the three kinds of straws, resulting in its lowest biodegradability. Therefore, when soybean straw was returned to soil, it was difficult to degrade completely by soil microorganisms, thus the lowest soil microbial activity, eventually leading to the lowest SR and highest SOC.

Key words: soil organic carbon; soil respiration; straw returned; soil microorganisms; biodegradability

海洋碳库、大气碳库及陆地生态系统碳库之间存在一个动态平衡^[1]。土壤是陆地生态系统的核心之一, 是陆地生态系统中最大的碳库, 全球土壤碳库的含量约为 2 500 Pg, 其中土壤有机碳库 (soil organic carbon, SOC) 约为 1 550 Pg, 是大气碳库 (760 Pg) 的 3.3 倍, 生物碳库 (560 Pg) 的 4.5 倍^[2]。土壤有机碳库的平衡由输入和输出两个方面共同决定, 前者主要通过生物质的输入, 并经过微生物的作用形成土壤有机质, 后者通过土壤呼吸 (soil respiration, SR) 作用向大气排放 CO₂^[3]。土壤有机碳库储量较小幅度的变动, 都会影响全球大气 CO₂ 的变化。

农田生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分

分、全球碳库最活跃的部分, 其变化不仅影响到土壤肥力和土地生产力, 还会影响到 CO₂ 的排放^[4]。秸秆还田是农田系统主要的有机碳输入途径, 但是由于农田系统的常年翻耕和氮/磷肥的施加, 为异养微生物生长提供了适宜的环境, 导致还田的秸秆被迅速分解, 显著增加了土壤呼吸, 形成稳定的土壤有机碳较少^[5]。因此, 目前普遍认为农田是典型的碳源^[6]。很多学者都在研究秸秆还田的有效措施来降低土壤呼

收稿日期: 2015-10-24; 修订日期: 2015-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21577101); 上海市科委重大科技攻关项目 (14231200404)

作者简介: 曹湛波 (1991 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生物技术, E-mail: zhanbocao@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: xuds@ecust.edu.cn

吸^[7],从而为发展低碳农业提供技术支持。

不同农作物秸秆的性质不同,还田后其分解过程有差异,因此不同农业秸秆还田后土壤的碳源/碳汇性质也有差异^[8]。有研究表明不同农作物还田后在不同土壤环境中的保留性质是不同的,黄豆秸秆在原位还田后分解较快,但是还田于其它土壤中,分解却较慢。相反小麦秸秆在异位还田后,其分解速率明显提高^[9]。但这些农作物秸秆分解后转变为土壤有机质保留在土壤中还是彻底降解为 CO₂ 释放到大气中目前尚缺乏系统的研究。

本研究在上海市崇明岛上进行。生态农业是崇明的支柱产业,水稻、小麦、黄豆和玉米是主要作物。为了避免土壤环境差异导致对不同秸秆还田的影响,试验选择在同样土壤背景条件下进行。本研究选取水稻、黄豆和玉米这 3 种秸秆作为对象,探讨了 3 种秸秆还田对土壤呼吸和土壤有机碳的影响,从还田土壤微生物性质、秸秆性质等方面分析了导致土壤呼吸差异的可能原因,并讨论了 3 种秸秆还田与土壤呼吸和碳封存之间的相关性,对于进一步了解和丰富农田系统的碳源/碳汇问题具有参考价值。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

上海市崇明岛是中国第三大岛,也是最大的冲积沙洲,三面环江,东濒东海,东西长 76 km,南北宽 13 ~ 18 km。崇明东滩位于崇明岛最东边(121°45'E, 31°30'N),近年来进行了多次围垦,其中农业用地面积增加了 4 050. 21 hm²,占据了围垦面积的 62%。本试验地选址上海市崇明岛东围垦区内。试验田土壤为新围垦的贫瘠土壤,含盐量较高,土壤肥力较差,植物生物量低,土壤容重 1. 53 ~ 1. 75 g·cm⁻³,土壤总氮 24. 5 ~ 76. 6 mg·kg⁻¹,土壤速效磷 11. 7 ~ 39. 3 mg·kg⁻¹,土壤有机碳 1. 66 ~ 3. 85 g·kg⁻¹^[10]。

1.2 秸秆收集与预处理

试验用的水稻、黄豆、玉米秸秆收割于崇明东滩农业园区,刈割植物秸秆部分,应用秸秆粉碎机将其粉碎为 2 ~ 3 cm 的碎屑,放置待用,秸秆碳的含量分别是水稻 35. 99%、玉米 40. 12%、黄豆 41. 76%^[9]。试验种植植物为地肤草。

1.3 试验设计

采用分区试验设计,将土壤划分成 8 个 2 m × 2 m 的样地小区块(见图 1),并对样地土壤进行了 - 20 cm 的翻耕。3 种还田材料分别对应 2 个改良区

块,并同时设置 2 个对照。8 个小区块随机排列,每个改良小区块间设置 0. 2 ~ 0. 3 m 宽的排水沟,以利于夏季排除雨水冲洗土壤盐分。各区块均匀翻入秸秆材料 2 kg(干重),同时对每一块改良小区块施加干重为 2 kg 的有机肥。对照组仅施加干重为 2 kg 的有机肥。1 个月后,每个改良样区种植 12 株地肤草幼苗,并根据降水情况,定期浇水和除草。

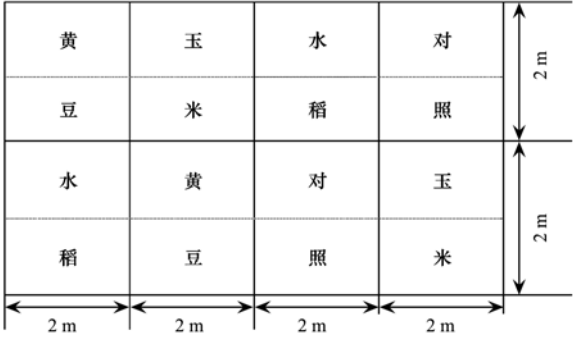


图 1 试验样区设置示意
Fig. 1 Layout of the experimental sample region

1.4 样品采集与预处理

试验过程共采集了 4 次土壤样品,时间分别为 2013 年 4、6、8、11 月,其中 4 月为各个不同区块土壤本底采样。采样时,每块改良小区块分为 2 块区域(见图 1 虚线),每个区域设置 3 个采样点,每点采集次表层土(- 5 ~ - 20 cm)150 g,新鲜土样去掉较大根系和秸秆后,混合均匀,利用 4 分法分出两份,一份风干后过 60 目筛于常温下保存,一份鲜样保存在 4℃ 冰箱中。11 月采集每个小区块植物(包括地上部分和地下根茎),用聚乙烯袋包装,带回实验室测定生物量和 C/N 含量。

1.5 理化指标测定

土壤含水率:称湿土样约 15. 0 g 放入铝盒中,开盖,放入 105 ~ 110℃ 的烘箱内烘 12 h 至恒重,取出开盖,立刻放入干燥器内冷却至室温,取出称重,计算含水率。

土壤有机碳:采用日本岛津总有机碳测定仪 TOC-V-CPN 进行测定^[11]。

土壤呼吸:采用 LI-8100 土壤碳通量自动测量系统(Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA)。该系统由分析 CO₂ 流量的红外检测主机和气室组成,测定前,提前一天在每个土壤改良小区块随机布置 1 个直径为 10 cm 高 15 cm 的 PVC 土壤圈,布置土壤圈之前,先用剪刀贴着地面剪去其上的植物,以减少土壤扰动对土壤呼吸测定的影响,每个样点测定 3 次平行样,并现场测定 CO₂ 的释放量。

秸秆可降解性:不同类型秸秆的降解特性研究采用分解袋法.其基本原理是将已知重量的植物枯落物装进不可降解的网袋中,然后将分解袋置于土壤表层或者埋入深度 5~10 cm 土层中,定期取样分析.在本试验中,采集崇明当地的水稻、黄豆、玉米 3 种秸秆,首先进行杀青,将样品置于 105℃ 的烘箱中烘 15 min,以终止样品中酶的活动.然后降低烘箱的温度,使其维持在 70℃ 烘干至恒量.将 4 种植物用铡刀切成 15 cm 左右,分成若干等份,装入尼龙分解袋中(20 cm×20 cm,孔径为 200 μm,排除了大中型无脊椎动物的影响).在同济大学校园花坛内,将装有相同量的 4 种植物分解袋埋入土壤中.经过 0、30、90、180 d 后于同济大学花坛异位还田样地内,每种植物分解袋取回 2 袋,去除袋内杂物和泥土,蒸馏水冲洗后干燥称重、粉碎并过筛(60 目)进行后续分析.

植物秸秆中纤维素、木质素含量:采用 Van Soest 法测定^[12].

C、N 元素含量:采用德国 Elementar 公司 Vario EL III 元素分析测定.称取 5~10 mg 过 60 目筛植物颗粒进行包样后直接上样检测.仪器碳的分析精度为 ±2%,氮的为 ±8%.

1.6 生物指标测定

土壤微生物生物量:采用 ATP 法^[13].

植物生物量:采集的 11 月地肤草植物样品先用自来水将表层泥沙冲洗干净,再用蒸馏水冲洗 2 遍,植物生物量的测定采用常压恒温干燥法.

土壤脱氢酶活性:采用氯化三苯四氯唑 TTC 法^[14].

土壤 β-葡萄糖苷酶活性:以对硝基苯-β-D-葡萄糖苷为底物,称取一定量新鲜土壤样品,在 37℃ 条件下恒温培养 1 h,400 nm 下比色法测定反应生成的产物对硝基苯酚(*p*-nitrophenol, PNP)的量^[15].

1.7 数据处理

采用 Excel 软件对数据进行处理,采用 SPSS 19.0 软件对数据进行方差和相关性分析,对数据进行 ANOVA 方差分析,并在方差分析的基础上用 LSD 或 DUNCAN 法进行多重区组检验指标之间的差异性(*P* 为 0.05 或 0.01).用 Origin 8.0 作图.

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田后土壤呼吸强度和有机碳含量的差异性

植物生物量可综合反映土壤改良剂对土壤的改

良效果,也反映植物的固碳量^[16],不同秸秆还田后对地肤草的生长都有一定的促生效果,水稻、黄豆和玉米秸秆还田后地肤草生物量分别比对照增加了 96.2%、51.3% 和 41.5%.土壤有机碳含量是土壤碳库的重要指标也是土壤养分的重要指标^[17].由图 2 所示,不同改良样区的土壤有机碳含量大致随时间呈升高趋势,反映了秸秆还田后持续分解进入土壤中的过程,至 11 月收获地肤草时,各个改良样区的土壤有机碳含量有较明显的差异.黄豆秸秆还田样区土壤有机碳增加量最高为 2.71 g·kg⁻¹,玉米样区土壤有机碳增加量为 2.68 g·kg⁻¹,而水稻秸秆样区土壤有机碳增加量最低为 1.11 g·kg⁻¹,而对照样区土壤有机碳基本无增加.根据不同类型秸秆自身含碳量的差异以及各处理样区土壤有机碳增加量的差异,可以初步得出黄豆秸秆还田后碳保留最多,稻草最少.这可能主要与秸秆的可降解性与土壤呼吸有关.

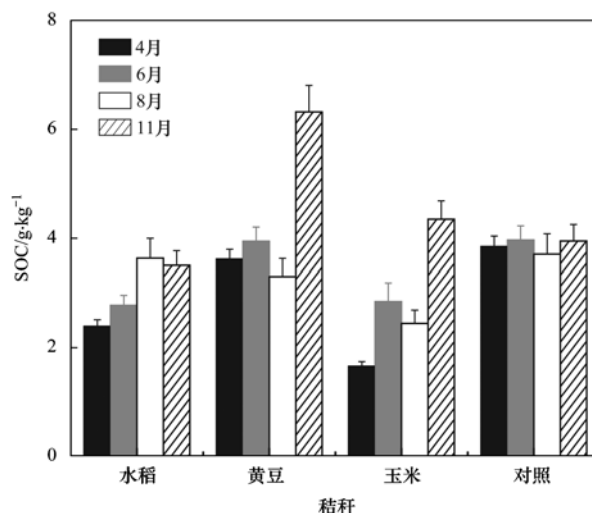


图 2 不同秸秆还田对土壤有机碳(SOC)的影响

Fig. 2 Effect of kinds of straw returning on SOC

土壤呼吸作为土壤碳库输出的一个关键环节,是植物固定碳后,又以 CO₂ 形式返回大气的主要途径,是土壤碳排放的一个重要过程^[18].如图 3 所示,添加不同秸秆还田之后,各个样区的土壤呼吸强度随时间的变化呈现出先增后减的趋势,在 6 月和 8 月达到峰值,这可能与不同季节的水热条件有关.各改良样区土壤呼吸均较对照样区有所提高,其中水稻改良样区土壤呼吸最高为 18.96 μmol·(m²·s)⁻¹,较对照样区土壤呼吸提高 194%,添加玉米秸秆的改良样区土壤呼吸相对较低,而添加黄豆秸秆的改良土壤呼吸最低和对照相差无几.不同秸秆还田后土壤呼吸提高程度不同,且和图 2

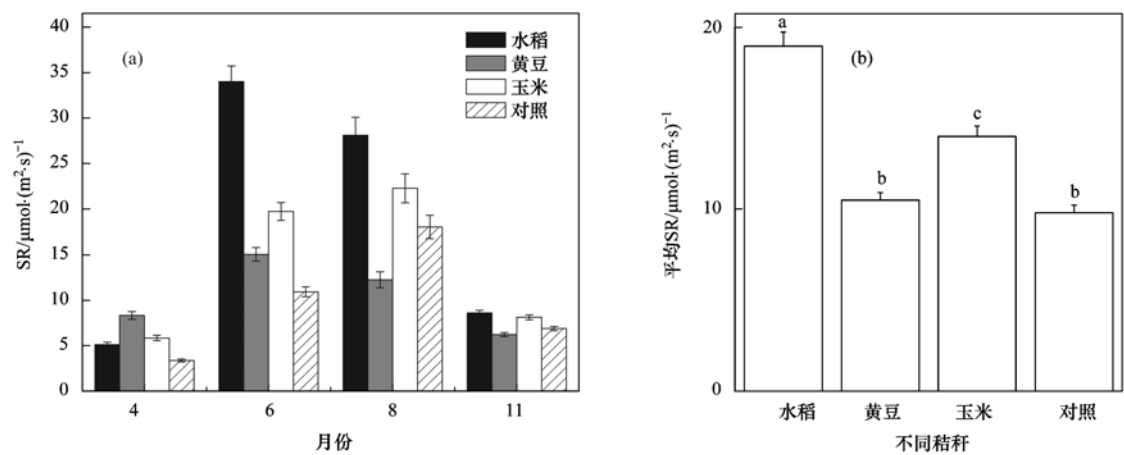


图3 不同种类秸秆还田后土壤呼吸(SR)的变化和平均土壤呼吸的差异性

Fig. 3 Change of SR and the differences of average SR for different kinds of straw returning

中土壤有机碳的增加成负相关。

总体来看,水稻秸秆还田后土壤有机碳最低,土壤呼吸最强,而黄豆秸秆还田后土壤有机碳最高,土壤呼吸最低,因此水稻秸秆还田后土壤碳保留最少,流失最多,而黄豆秸秆还田后土壤碳保留最多,流失最少,碳封存能力较强。

秸秆还田后有两种分解途径,一种是在微生物腐殖化作用下形成腐殖质保留在土壤中,另一种是以异养型微生物分解形成 CO_2 进入大气中(表现为土壤呼吸),这两个过程均和土壤微生物性质有关^[19]。黄豆秸秆还田分解后,土壤有机碳增加量高,土壤呼吸低,水稻秸秆反之,这可能是植物秸秆性质的差异影响土壤微生物群落结构的差异,从而影响土壤呼吸和土壤有机碳。为了验证这点,进一步研究了不同秸秆性质与土壤微生物活性及其与土壤呼吸的相关性。

2.2 不同秸秆还田土壤的微生物活性及其与土壤呼吸的相关性

土壤微生物是生态系统的重要组成部分,在生态系统的物质循环和能量转化中占有重要地位^[20],是评价土壤环境质量的重要参数。土壤酶作为土壤中一切生物化学反应的主要参与者,在

土壤生态系统的物质循环和能量转化中起着非常重要的作用,反映了土壤中各种生物化学过程的强度和方向^[21],其活性大小代表了土壤中物质代谢的旺盛程度^[22]。

表1是水稻、黄豆、玉米这3种秸秆还田后土壤活性微生物生物量(以ATP表示)和土壤 β -葡萄糖苷酶、脱氢酶的4次采样分析的平均值。从表1中可以看出,不同类型秸秆还田时ATP、 β -糖苷酶和脱氢酶这3个指标均有显著差异($P < 0.05$)。各指标的变化趋势不尽相同,比较 β -糖苷酶,玉米的 β -糖苷酶值最高,其次是黄豆,最低的是水稻。土壤活性微生物量黄豆最高,水稻和玉米其次。脱氢酶活性,大致为水稻 $>$ 玉米 $>$ 黄豆,与土壤呼吸趋势相似。

表2是4次采样的土壤微生物指标与土壤呼吸进行相关性分析的结果。结果显示,脱氢酶与土壤呼吸有显著的正相关($P < 0.05$),而 β -糖苷酶和ATP与SR几乎无相关性($P > 0.05$)。侯亚红等^[10]研究秸秆与秸秆生物炭还田对土壤呼吸的影响时发现,土壤呼吸与糖苷酶、脱氢酶和ATP具有一定相关性,其中脱氢酶活性是土壤呼吸最主要的影响因子,这与本试验研究结果一致。

表1 秸秆对土壤微生物指标的影响¹⁾

Table 1 Influence of straw type on soil microbial indicators

项目	土壤 β -糖苷酶(以 $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_3$ 计) $/\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$	土壤脱氢酶(以 TPF 计) $/\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$	土壤活性微生物量(以 ATP 计) $\times 10^{-12}/\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$
对照	9.83 ± 0.58 b	6.99 ± 0.50 c	3.58 ± 0.39 c
水稻	8.65 ± 0.36 b	131.36 ± 5.90 a	33.31 ± 2.34 ab
黄豆	12.56 ± 0.26 a	93.36 ± 3.36 b	47.49 ± 3.99 a
玉米	13.05 ± 0.54 a	120.99 ± 4.25 a	30.70 ± 6.16 b

1) 表中数据为4、6、8、11月的平均值;不同字母表示有显著性,相同字母表示无显著性

表 2 土壤呼吸与微生物指标的相关性分析¹⁾
Table 2 Correlation analysis between soil respiration
and microbial indicators

	SR	β -糖苷酶	脱氢酶	ATP
SR	1.000			
β -糖苷酶	0.038	1.000		
脱氢酶	0.659**	0.432	1.000	
ATP	-0.447	0.468*	0.119	1.000

1) **表示相关性在 $P < 0.01$ 水平极其显著; *表示相关性在 $P < 0.05$ 水平显著

土壤脱氢酶活性与微生物代谢活动有关,脱氢酶能催化有机物质脱氢,起着氢的中间转化传递作用,因此脱氢酶活性可以作为微生物氧化还原系统的指标,被认为能很好地表征土壤中微生物的氧化能力^[23]. 不同类型秸秆还田后增加了土壤微生物活性,尤其是增加了土壤脱氢酶的活性^[24],导致土壤呼吸变强. 其中,水稻秸秆的脱氢酶活性最强,土壤呼吸也最强. 而黄豆秸秆还田的土壤脱氢酶活性最低,其土壤呼吸也最低. β -糖苷酶是纤维素分解酶系的重要组成部分,参与物质与能量循环,但不是纤维素降解的关键酶,而纤维素内切酶和外切酶可能是影响还田秸秆分解的最重要因素^[9]. 土壤活性微生物量是微生物新陈代谢速率的一种重要指标^[13],实验中不同秸秆处理微生物量与土壤呼吸和脱氢酶活性不成正比,这意味着土壤微生物量可能不是影响脱氢酶活性和土壤呼吸的唯一因素. 不同秸秆还田可能导致土壤中的优势微生物种类发生变化,从而脱氢酶活性和土壤呼吸有较大差异.

2.3 不同秸秆性质的差异性及其与土壤微生物性质的相关性

秸秆还田土壤的微生物性质的差异和输入的有机物性质、土壤环境有关. 本试验在相同的土壤环境中进行,排除了外在因素的干扰,因此秸秆性质的差异可能是导致还田土壤微生物活性差异的主要原因.

秸秆的可生物降解性是秸秆理化性质的综合反映^[25]. 从图 4 可见,总体来说,3 种秸秆前期均出现了快速分解(0~30 d),30 d 后水稻和黄豆分解趋于平缓. 采用衰减回归方程对分解残留率数据拟合(表 3),可以看出不同类型秸秆异位还田后分解速率存在差异,黄豆秸秆的分解系数最低,玉米和水稻较高且无显著差异.

这说明黄豆秸秆不管是早期还是后期,分解速率最慢,是一种微生物较难利用的碳源. 脱氢酶是催化氧化还原反应的酶,其活性可以很好地反映有

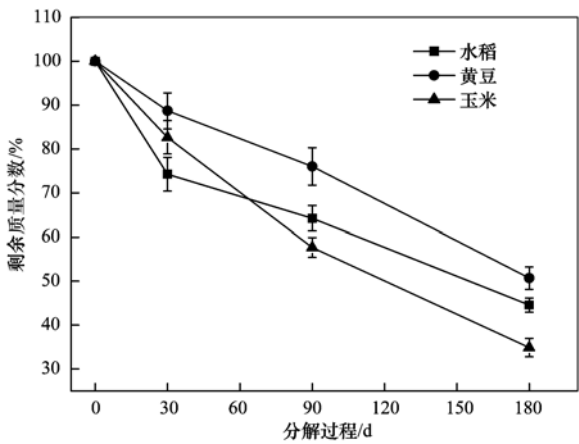


图 4 不同类型秸秆异位还田分解过程中的质量变化
Fig. 4 Mass change of different kinds of ectopic straw
returning in the process of decomposition

机物氧化还原反应的进程. 黄豆秸秆难被微生物利用,因此对应的脱氢酶活性也低. 在相同的环境条件下,影响还田秸秆分解过程的因素包括秸秆的营养元素及有机化合物种类和含量等^[26,27]. 本试验分别测定了秸秆的 N、C/N、纤维素和木质素含量,结果见表 4.

表 3 秸秆异位还田后分解过程的模型拟合
Table 3 Model fitting of decomposition process
of the ectopic straw returning

枯落物类型	回归方程	分解系数 k /d ⁻¹	相关系数 R^2
水稻	$y = -0.0055t + 0.005$	0.0055	0.979
黄豆	$y = -0.0043t - 0.065$	0.0043	0.994
玉米	$y = -0.0059t + 0.0015$	0.0059	0.996

显然,3 种秸秆中的组分存在显著性差异. 为了研究不同类型秸秆分解速率的重要影响因子,对秸秆分解速率常数与 N、C/N、纤维素和木质素的相关性进行判定,结果如表 5.

3 种农业秸秆分解速率常数和其中的纤维素、木质素和 N 存在极其显著的相关性($P < 0.01$),与 C/N 含量无相关性($P > 0.05$),相关系数排序为木质素 > 纤维素 > N(相关系数为 0.917),这同时也反映了在秸秆分解过程中秸秆木质素和纤维素含量是影响分解速率最重要的因素,N次之. 很多研究已经证实,纤维素、木质素是秸秆成分中最难降解的大分子物质^[28,29]. 木质素降解与腐殖质形成有密切联系,一般认为在土壤有机物腐殖化过程中,木质素与它的降解产物如酚型、醌型及脂肪族发化合物是腐殖质形成的最主要前提物质,它们可通过复杂的反应机制形成腐殖质^[30]. N 元素是一类营养元

素,是土壤分解植物秸秆的微生物所需物质^[31],一般微生物自身的 C/N 高于植物枯落物,所以微生物生长需从环境、从枯落物中摄取 N 元素,以达到自身营养需求,因而秸秆 N 含量较高,还田后释放到土壤中的 N 元素充足,微生物群落生长较快,秸秆分解也就越快^[32]. 黄豆秸秆 N 含量低,秸秆分解较慢,且木质素含量高有利于形成腐殖质,从而在土壤中的保留较多(土壤有机碳较高).

表 4 不同秸秆的基本性质¹⁾
Table 4 Basic properties of different straws

项目	纤维素含量/%	木质素含量/%	N/%	C/N
水稻	33.18±0.9 b	5.96±0.3 c	0.924±0.018 b	39.96±1.39 c
黄豆	37.87±0.55 a	19.01±0.45 a	0.545±0.006 c	76.57±1.74 a
玉米	28.48±0.59 c	6.24±0.23 b	1.52±0.012 a	64.59±0.68 b

1) 表中字母不同表示有显著性差异; 秸秆 C 含量已有人测定^[9]

表 5 秸秆分解速率常数与理化指标的相关性分析¹⁾
Table 5 Correlation analysis between straw decomposition rate constant with physical and chemical indicators

	分解速率常数	C/N	纤维素	木质素	N
分解速率常数	1.000				
C/N	-0.561	1.000			
纤维素	-0.945 **	0.319	1.000		
木质素	-0.964 **	0.758 *	0.851 *	1.000	
N	0.917 **	-0.187	-0.978 **	-0.783 *	1.000

1) * 表示相关系数 $P < 0.05$ 水平显著; ** 表示相关系数 $P < 0.01$ 水平极其显著

总体而言,由于秸秆中纤维素、木质素、N 和 C/N 含量有所不同,导致秸秆的可生物降解性的差异,还田后导致土壤微生物性质乃至矿化和腐殖化过程的差异,最终导致土壤呼吸强度和土壤有机碳的差异. 在 3 种秸秆中,黄豆秸秆纤维素、木质素和 C/N 含量最高,而 N 含量最低,降解速率最慢,因而导致微生物异养活性较弱,土壤呼吸最低,且由于其较高的木质素含量有利于腐殖化过程产生土壤有机质,因此土壤有机碳较高,因此黄豆秸秆还田后其土壤碳封存能力较强.

3 结论

(1) 黄豆秸秆还田土壤有机碳增加量最高为 $2.71 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 玉米样区土壤有机碳增加量为 $2.68 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而水稻秸秆样区土壤有机碳增加量最低为 $1.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而对照样区土壤有机碳基本无增加. 添加水稻秸秆的改良样区平均土壤呼吸最高为 $18.96 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 黄豆秸秆的改良样区土壤呼吸最低为 $10.46 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. 黄豆秸秆还田被分解后易变成土壤有机碳, 而水稻秸秆还田易被微生物分解变成 CO_2 输入大气中.

(2) 不同秸秆还田土壤的 β -葡萄糖苷酶、脱氢酶活性和土壤微生物生物量均有显著性差异. 土壤呼吸强度和脱氢酶显著正相关, 与 ATP 相关性不大, 而与 β -糖苷酶没有相关性. 因此土壤呼吸和土

壤酶活性的差异可能还和微生物群落结构有关.
(3) 不同秸秆可生物降解性、C/N、N、纤维素和木质素含量有显著性差异. 秸秆分解过程中纤维素含量和木质素含量是影响分解速率最重要的因素, N 含量和 C/N 对分解进程的影响小于前两者. 由于不同秸秆的可生物降解性不同, 还田后导致还田土壤微生物活性的差异, 进而影响土壤呼吸强度和土壤有机碳含量. 3 种秸秆中, 黄豆秸秆纤维素、木质素和 C/N 含量最高, N 含量最低, 降解速率最慢, 因而导致最低的土壤呼吸和最高的土壤有机碳. 黄豆秸秆还田其碳封存能力相对最强.

参考文献:

[1] 解宪丽. 基于 GIS 的国家尺度和区域尺度土壤有机碳库研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2004.
[2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.
[3] Fontaine S, Bardoux G, Abbadie L, et al. Carbon input to soil may decrease soil carbon content[J]. Ecology Letter, 2004, 7(4): 314-320.
[4] 朱鸿杰, 闫晓明, 何成芳, 等. 秸秆还田条件下农田系统碳循环研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(2): 344-351.
[5] 王成己, 潘根兴, 田有国. 保护性耕作下农田表土有机碳含量变化特征分析——基于中国农业生态系统长期试验资料[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2464-2475.
[6] Wilson A T. Pioneer agriculture explosion and CO_2 levels in the atmosphere[J]. Nature, 1978, 273(5657): 40-41.
[7] 王丙文, 迟淑筠, 田慎重, 等. 不同玉米秸秆还田方式对冬

- 小麦田土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(5): 1374-1380.
- [8] 王晓玥, 蒋璐璐, 隋跃宇, 等. 田间条件下小麦和玉米秸秆腐解过程中微生物群落的变化——BIOLOG 分析[J]. 土壤学报, 2012, **49**(5): 1003-1011.
- [9] 张艳楠. 不同植物枯落物在土壤中的分解特性及其对气候环境变化的响应[D]. 上海: 同济大学, 2013.
- [10] 侯亚红, 王磊, 付小花, 等. 土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2655-2661.
- [11] Hu Y, Wang L, Tang Y S, *et al.* Variability in soil microbial community and activity between coastal and riparian wetlands in the Yangtze River estuary-potential impacts on carbon sequestration[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, **70**: 221-228.
- [12] Van Soest P, 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.
- [13] 席雪飞, 彭晓佳, 王磊, 等. 一种利用 Profile-1 生物发光仪快速测定土壤中微生物量的改良方法[J]. 工业微生物, 2010, **40**(6): 23-327.
- [14] 卢冠男, 夏梦洁, 贾丹阳, 等. 我国 14 种典型土壤脲酶、脱氢酶活性对汞胁迫的响应[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(7): 1788-1793.
- [15] Yang J K, Zhang J J, Yu H Y, *et al.* Community composition and cellulase activity of cellulolytic bacteria from forest soils planted with broad-leaved deciduous and evergreen trees [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2014, **98**(3): 1449-1458.
- [16] 窦晶鑫, 刘景双, 王洋, 等. 模拟氮沉降对湿地植物生物量与土壤活性碳库的影响[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(8): 1714-1720.
- [17] 刘继明, 卢萍, 徐演鹏, 等. 秸秆还田对吉林黑土区土壤有机碳、氮的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013, (3): 96-99.
- [18] 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.
- [19] 柳淑蓉. UV-B 辐射和水分对秸秆降解及土壤有机碳转化的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- [20] 张焱华, 吴敏, 何鹏, 等. 土壤酶活性与土壤肥力关系的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2007, **35**(34): 11139-11142.
- [21] Gao Y, Zhou P, Mao L, *et al.* Assessment of effects of heavy metals combined pollution on soil enzyme activities and microbial community structure: modified ecological dose-response model and PCR-RAPD[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, **60**(3): 603-612.
- [22] 文都日乐, 李刚, 张静妮, 等. 呼伦贝尔不同草地类型土壤微生物量及土壤酶活性研究[J]. 草业学报, 2010, **19**(5): 94-102.
- [23] 韩新忠, 朱利群, 杨敏芳, 等. 不同小麦秸秆还田量对水稻生长、土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(11): 2192-2199.
- [24] 冯爱青, 张民, 李成亮, 等. 秸秆及秸秆黑炭对小麦养分吸收及棕壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2015, **35**(15): 5269-5277.
- [25] Welsch M, Yavitt J B. Early stages of decay of *Lythrum salicaria* L. and *Typha latifolia* L. in a standing-dead position [J]. Aquatic Botany, 2003, **75**(1): 45-47.
- [26] Knežević A, Stajić M, Vukojević J, *et al.* The effect of trace elements on wheat straw degradation by *Trametes gibbosa* [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2014, **96**: 152-156.
- [27] Zeng J, Singh D, Laskar D D, *et al.* Degradation of native wheat straw lignin by *Streptomyces viridosporus* T7A [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2013, **10**(1): 165-174.
- [28] Song W Z, Chen Y C. Enhanced biodegradation of lignin by microbial consortium SW- 1 employing response surface methodology of experiment [J]. Abstracts of Papers of the American Chemical Society, 2014, **248**(8): 2.
- [29] 喻夜兰, 刘强, 荣湘民, 等. 酒糟型生物有机肥初始发酵条件对木质纤维降解的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, **16**(3): 725-731.
- [30] Tripolskaja L, Romanovskaja D, Slepeticene A, *et al.* Effect of the chemical composition of green manure crops on humus formation in a Soddy-Podzolic soil [J]. Agricultural Chemistry and Soil Fertility, 2014, **47**(4): 310-318.
- [31] Pinggera J, Geisseler D, Ludwig B, *et al.* Effect of substrate quality on the N uptake routes of soil microorganisms in an incubation experiment [J]. European Journal of Soil Biology, 2015, **69**: 17-23.
- [32] 伍玉鹏, 刘田, 彭其安, 等. 氮肥配施下不同 C/N 作物残渣还田对红壤温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(10): 2053-2062.

CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Lanzhou City	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM _{2.5} in Southwest Suburb of Chengdu in Spring	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO ₂ Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojinggong Cave in Guangdong Province	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co ²⁺ Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe ₃ O ₄ Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO ₂ and N ₂ O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH ₄ and N ₂ O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N ₂ O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO ₂ on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i>	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorffii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

《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5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 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