

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国人为源挥发性有机物反应性排放清单	梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)
上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征	高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)
京津冀地区主要排放源减排对 PM _{2.5} 污染改善贡献评估	吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)
北京冬季 PM _{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析	乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)
2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析	路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)
利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染来源	刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)
南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析	迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)
喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性	张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)
生物滴滤塔净化含硫混合废气	叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)
西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析	房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)
城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力	秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)
三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征	王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)
隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素	赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)
白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析	王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)
唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价	吴婷婷, 王明猛, 陈旭锋, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)
三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征	邓晗, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)
电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)
九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险	林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)
厦门筼筮湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价	杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)
龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价	李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)
碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村高铁锰地下水效能与机制	孙楠, 湛燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)
高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成势	张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)
预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验	杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)
Cu-Al ₂ O ₃ 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物	徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)
过硫酸钾氧化去除 Cu(CN) ₂ 中的氰污染物	王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)
微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能	全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)
桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征	李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)
基于 A ² /O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)
污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭碧玲, 孙学成, 吴金水 (1093)
全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性	齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)
饥饿对硫自养反硝化反应器生物群落结构的影响	李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曙 (1109)
快速启动厌氧氨氧化工艺	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)
一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式	完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)
侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响	马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)
厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究	陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)
有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响	戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)
过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制	白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)
不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果	董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)
全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤	杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)
纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应	衣俊, 程金平 (1173)
血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)
纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189)
利用 <i>in vitro</i> 方法研究不同铁矿对土壤砷生物给性的影响	钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)
不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制	温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)
施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变	刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)
施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究	王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)
模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响	陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)
土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO ₂ 浓度和温度升高的响应	刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)
岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)
板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响	宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)
酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响	姜继超, 尧倩 (1272)
《环境科学》征稿简则 (1092)	
《环境科学》征订启事 (1158)	
信息 (1166, 1261, 1271)	

施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变

刘晓¹, 黄林², 郭康莉¹, 张雪凌³, 杨俊诚¹, 姜慧敏^{1*}, 张建峰^{1*}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 2. 郑州市污水净化有限公司, 郑州 450000; 3. 四川农业大学环境学院, 成都 611130)

摘要: 以小麦-玉米轮作体系下的沙质潮土为研究对象, 选用经无害化处理后符合国家标准且在推荐量范围内的商业化污泥产品, 通过2013~2015年田间定位试验, 研究无害化污泥施用对沙质潮土土壤碳库组分和碳库管理指数的影响, 为无害化污泥资源化利用提供理论和技术依据。结果表明, 与不施无害化污泥处理(CK)相比, 土壤总有机碳(TOC)、微生物量碳(SMBC)、易氧化有机碳(LOC)和可溶性有机碳(DOC)施用污泥各处理分别显著增加到了8.40~14.74 g·kg⁻¹、164.45~257.45 mg·kg⁻¹、3.58~4.88 g·kg⁻¹和81.16~101.58 mg·kg⁻¹ ($P < 0.05$), 其中各活性有机碳组分SMBC、LOC和DOC分别显著提高了84.00%~188.07%、26.26%~58.03%和109.58%~185.39% ($P < 0.05$), 其中45 t·hm⁻²污泥(W3)处理提升效果最明显; 施污泥各处理土壤微生物量熵(SMBC/TOC)和易氧化有机碳有效率(LOC/TOC)均有升高趋势, 提高范围分别为8.02%~2.77%和13.75%~46.48%, 土壤可溶性有机碳有效率(DOC/TOC)施污泥各处理分别显著降低了17.06%~40.94% ($P < 0.05$), 并且随污泥施用量的增大, SMBC/TOC、LOC/TOC和DOC/TOC呈下降趋势, 说明施用45 t·hm⁻²污泥增大了土壤中稳定态碳含量, 导致其比值降低; 施污泥各处理土壤碳库活性(L)和碳库指数(LI)随污泥施用量增大而降低, 说明施用45 t·hm⁻²污泥其土壤稳定态碳含量高, 有利于沙质潮土土壤有机碳的积累; 施污泥各处理土壤碳库管理指数(CMPI)显著提高了153.45%~195.40%, 其中W3处理提升效果最为明显; 通过相关性分析及冗余分析得出, 用CMPI来表征土壤肥力的变化比用TOC更灵敏、直接, 能更好地反映出土壤养分及碳库的动态变化。综上, 施用15~45 t·hm⁻²污泥可以显著提高沙质潮土土壤活性碳库各组分含量和碳库管理指数, 尤以施用45 t·hm⁻²(W3)污泥效果最为显著。

关键词: 无害化污泥; 沙质潮土; 土壤碳库; 碳素有效率; 碳库管理指数

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-1218-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201607139

Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index

LIU Xiao¹, HUANG Lin², GUO Kang-li¹, ZHANG Xue-ling³, YANG Jun-cheng¹, JIANG Hui-min^{1*}, ZHANG Jian-feng^{1*}

(1. National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agriculture Science, Beijing 100081, China; 2. Sewage Purification Co., Ltd., of Zhengzhou City, Zhengzhou 450000, China; 3. College of Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: The products of non-hazardous commercial sewage sludge were utilized in the accordance of the national standard in the experiment with sandy fluvo-aquic soil under wheat-maize rotation system during 2013 to 2015. The experiment focused on the effects of the use of non-hazardous sewage sludge on soil carbon pool and carbon pool management index to provide theoretical and technical basis for the resource utilization of non-hazardous sewage sludge. The results showed that compared with CK, soil amended sludge significantly improved soil total organic carbon (TOC), soil microbial biomass carbon (SMBC), labile organic carbon (LOC), and dissolved organic carbon (DOC) to 8.40-14.74 g·kg⁻¹, 164.45-257.45 mg·kg⁻¹, 3.58-4.88 g·kg⁻¹ and 81.16-101.58 mg·kg⁻¹, soil amended sludge significantly enhanced SMBC, LOC and DOC by 84.00%-188.07%, 26.26%-58.03%, and 109.58%-185.39% ($P < 0.05$) respectively, and 45 t·hm⁻² sewage sludge (W3) had the most significant impact on soil carbon pool. The soil microbial entropy (SMBC/TOC), and utilization of labile organic carbon (LOC/TOC) increased by 8.02%-2.77% and 13.75%-46.48% respectively, and the utilization of dissolved organic carbon (DOC/TOC) significantly decreased by 153.45%-195.40% ($P < 0.05$). SMBC/TOC, LOC/TOC, and DOC/TOC declined in treatments of soil amended sludge due to increased application of sewage sludge, which indicated that soil amended with 45 t·hm⁻² of the sewage sludge improved the content of stable carbon resulting

收稿日期: 2016-07-21; 修订日期: 2016-10-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(21577172, 41501322); 国家国际科技合作专项(2015DFA20790); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CB127406); 中央级公益性科研院所科研业务费专项(IARRP-2015-21)

作者简介: 刘晓(1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向土壤培肥与改良, E-mail: 13126533503@163.com

* 通信作者, E-mail: jianghuimin@caas.cn; zhangjianfeng@caas.cn

in the decrease of the ratio. L and LI decreased with the increasing amount of sewage sludge indicating that soil amended with 45 t·hm⁻² of the sewage sludge improved the content of stable carbon and was conducive to the accumulation of organic carbon. Soil amended with sludge significantly increased carbon pool management index (CMPI) by 153.45%-195.40% ($P<0.05$), and W3 had the most significant effect on CMPI. Compared with TOC, CMPI could be more sensitive and direct to reflect the dynamic changes of soil nutrients and carbon pools through the correlation analysis and redundancy analysis. In summary, the application of 15-45 t·hm⁻² sewage sludge could significantly enhance the soil carbon pool and carbon pool management index, especially 45 t·hm⁻² sewage sludge (W3).

Key words: non-hazardous sewage sludge; sandy fluvo-aquic soil; soil carbon pool; the utilization ratio of carbon; carbon pool management index

土壤有机碳作为衡量土壤质量高低的重要指标,可以对土壤质量和作物生产力产生有益的影响^[1].但是多数研究认为,只有活性有机碳参与植株生长的养分供应,并易受到农业管理措施的影响.土壤活性有机碳组分通常可用微生物量碳、可溶性有机碳、易氧化有机碳等来进行表征^[2],直接参与土壤生物化学转化过程,并且被认为是比土壤总有机碳对不同农业管理方式响应更敏感的碳库指标^[3].但这些活性有机碳组分周转快,能够提高土壤有机碳活性,促进土壤养分的供应和循环,却不能揭示土壤有机碳库的固存特征,所以土壤有机碳库的变化还需考虑惰性碳组分的长期累积^[3].另外,有学者提出土壤活性有机碳占总有机碳的比值对土壤碳库质量的变化非常敏感,可以用来指示土壤质量的变化^[4].目前,以 Blair 等^[5]提出的联合土壤有机碳库及其组分计算的碳库管理指数在不同施肥方式下碳库变化的国内外研究中应用最为广泛.经过堆肥等无害化处理后的城市生活污水污泥是一种新型有机物料^[6-8],具有提高土壤有机碳含量^[9],增大土壤对养分的吸附^[10],改善土壤物理性状等效果^[11],能为植物生长提供良好的生存环境.污泥土地利用直接或间接地调控土壤有机质的输入,一定程度上影响土壤有机碳的积累和矿化.因此,研究土壤有机碳在污泥施用条件下的动态变化,对于实现土壤有机碳库的正向培育具有重要意义.近年来,国内外学者对于污泥土地利用的研究主要集中在土壤总有机碳和腐殖态碳的变化上^[12,13].如 Fernández 等^[14]发现在砂壤连续多年施用堆肥污泥后,污泥矿化作用低,有机碳损失少,促进了碳的固定.然而对土壤活性有机碳组分及土壤碳库管理指

数的影响未有深入研究,尤其是典型的沙质潮土.

河南省是我国粮食生产核心区,但该地区土地沙化问题严重,其沙质潮土面积高达1 000万亩.沙化土地因其自身养分及有机质含量低,不利于作物生长,严重制约了当地的农业生产^[15].改良沙化土壤质量,提升有机质内在活性是建立粮食安全长效机制的国家重大战略需求,因此,本文采用田间连续定位试验,以连续3 a 施用无害化污泥的河南沙质潮土为研究对象,分析土壤耕层范围内土壤总有机碳、活性有机碳组分及碳库管理指数的变化特征,以期为无害化污泥改良沙质潮土、提高土壤质量提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试污泥

供试的无害化污泥由郑州市污水净化有限公司提供,是郑州市污水管网分开后处理生活污水产生的污泥,并将秸秆、花生壳等辅料按照一定比例与污泥混合,接入枯草芽孢杆菌、黑曲霉和嗜热侧孢霉等混合菌剂,通过好氧发酵、高温堆肥等工艺处理后制成的商业化产品.含水率为33.08%,pH 为8.05,有机质(SOM)为223.92 g·kg⁻¹,有机碳(TOC)为129.88 g·kg⁻¹,全氮(TN)为17.60 g·kg⁻¹,C/N=7.4,全磷(TP)为9.86 g·kg⁻¹,全钾(TK)为13.90 g·kg⁻¹,可溶性有机碳(DOC)含量2 972 mg·kg⁻¹,DOC/TOC=2.3%,易氧化有机碳(LOC)含量=15.8 g·kg⁻¹,LOC/TOC=12.17%.无害化污泥中主要的重金属元素的含量如表1所示,均低于《农用污泥中污染物控制标准》(GB 4284-84)所规定的值,符合污泥农用的标准.

表1 供试无害化污泥重金属和有机污染物含量/mg·kg⁻¹

Table 1 Content of heavy metals and organic pollutants in the test non-hazardous sewage sludge/mg·kg⁻¹

项目	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	矿物油	苯并芘
无害化污泥	100.49	52.25	163.35	335.24	1.31	21.25	— ¹⁾	—
GB 4284-84 规定最高容量	1 000	200	500	1 000	20	1 000	3 000	3

1) “—”表示指标未检测出

1.2 供试基地

本试验基地位于河南省开封市农林科学研究院试验田(东经 114.27°, 北纬 34.77°), 地处暖温带大陆性季风气候区, 年均气温为 14.52℃, 年均无霜期为 221 d, 年均降水量为 627.5 mm, 降水多集中在夏季 7、8 月. 土壤类型为沙质潮土. 试验前土壤耕层(0~20 cm)的基本理化性质为: 含水率 5.87%, pH 8.42, SOM 12.10 g·kg⁻¹, TN 0.44 g·kg⁻¹, 速效磷(AP) 13.25 mg·kg⁻¹, 速效钾(AK) 40.32 mg·kg⁻¹. 重金属全量为: Cr 26.71 mg·kg⁻¹, Ni 12.31 mg·kg⁻¹, Cu 9.77 mg·kg⁻¹, Zn 28.90 mg·kg⁻¹, Cd 0.14 mg·kg⁻¹, Pb 13.95 mg·kg⁻¹. 试验区种植制度为玉米小麦轮作, 供试作物为当地主栽品种, 小麦品种为“开麦 18”, 玉米品种为“开玉 15”.

1.3 试验设计

本试验从 2012 年 10 月开始, 到 2015 年 9 月已连续种植 3 a 作物. 试验设计 4 个处理, 分别为: ① 单施化肥(CK), ② CK + 无害化污泥 15 t·hm⁻² (W1), ③ CK + 无害化污泥 30 t·hm⁻² (W2), ④ CK + 无害化污泥 45 t·hm⁻² (W3), 每个处理重复 3 次, 区组随机排列. 田间每个小区用水泥墙分割, 小区面积为 5m². 按照当地农民习惯施肥水平在小麦季和玉米季分别施 N 225 kg·hm⁻², 施 P₂O₅ 86 kg·hm⁻², 施 K₂O 113 kg·hm⁻², 肥料分别施用尿素, 磷酸一铵和氯化钾, 由开封市农林科学研究院提供. 种植小麦和玉米前, 无害化污泥随肥料一次性以基肥形式, 采用撒施的方法均匀施于土壤表层, 通过多次翻耕与耕层土壤混合均匀. 无害化污泥施用量参考周东兴等^[16]推荐施用量 0~60 t·hm⁻². 其他大田管理措施如灌溉, 病虫害防治等均与当地农民习惯一致.

1.4 试验方法

1.4.1 土壤采集

于 2015 年 9 月玉米收获期采集耕层 0~20 cm 土壤样品, 通过“四分法”分取两份, 一份带回实验室, 自然风干, 除去作物根系、侵入体及残留的污泥, 过 2 mm 筛后备测 pH、有机质、全氮、速效磷和速效钾等指标; 另一份用白色棉布袋装取, 放入 4℃ 冰盒保存, 带回实验室用于测定土壤微生物量碳、土壤可溶性有机碳以及土壤铵态氮和硝态氮.

1.4.2 分析方法

(1) 测定方法

土壤 pH 采用水土比 5:1 梅特勒 pH 计 (FE20) 测定^[17]; 土壤有机质采用重铬酸钾容量法^[17]; 土

壤全氮采用凯氏定氮法^[17]; 土壤速效磷采用碳酸氢钠浸提分光光度计比色法^[17]; 土壤速效钾采用醋酸铵浸提火焰光度计测定的方法^[17]; 土壤铵态氮、硝态氮采用 KCl 溶液浸取新鲜土样(水土比 5:1)连续流动分析仪测定法^[18]; 土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸浸提法测定^[19].

土壤易氧化有机碳用 KMnO₄ 氧化法测定: 称取约含 15 mg 碳的土壤样品于 50 mL 塑料旋盖的离心管中, 加入 25 mL 333 mmol·L⁻¹ KMnO₄, 常温静置 24 h, 然后在 2 000 r·min⁻¹ 下离心 5 min, 将上清液用去离子水稀释 500 倍, 在分光光度计 565 nm 下测定稀释样品的吸光率, 由不加土壤的空白与土壤样品的吸光率之差, 计算出 KMnO₄ 浓度的变化, 进而计算出被氧化碳含量或有机质即活性有机质含量(氧化过程 1 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 消耗 9 mg C)^[20].

土壤可溶性有机碳测定: 称取新鲜土样 25 g, 加入 50 mL 高纯水, 200 r·min⁻¹ 振荡 2 h, 转移至 50 mL 离心管, 在 10 000 r·min⁻¹ 下离心 15 min, 用带有孔径为 0.45 μm 的滤膜进行抽滤, 滤液直接在岛津 TOC-VCPH 有机碳分析仪上测定.

(2) 土壤碳库管理指数以及碳库有效率计算方法

以试验周围撂荒地土壤为参考土壤(CK₀), 它不耕作不施肥, 与样品土壤类型相同、位置相近、受人为干扰和影响最小. 其总有机碳含量为 5.91 g·kg⁻¹, 活性有机碳含量为 2.01 g·kg⁻¹. 碳库管理指数^[20]和碳库有效率计算方法如下:

碳库指数(CPI) = 样品总有机碳含量(g·kg⁻¹) / 参考土壤总有机碳含量(g·kg⁻¹)

碳库活度(L) = 样本中的易氧化有机碳含量(LOC) / 样本中的非活性有机碳含量(NLOC 为总有机碳和易氧化有机碳之差)

碳库活度指数(LI) = 样本碳库活度(L) / 参考土壤碳库活度(L₀)

基于以上参数可以得到碳库管理指数(CPMI):

$$CPMI = CPI \times LI \times 100$$

微生物量碳 = 微生物量碳含量(SMBC) / 总有机碳含量(TOC) × 100%

易氧化有机碳有效率 = 易氧化有机碳含量(LOC) / 总有机碳含量(TOC) × 100%

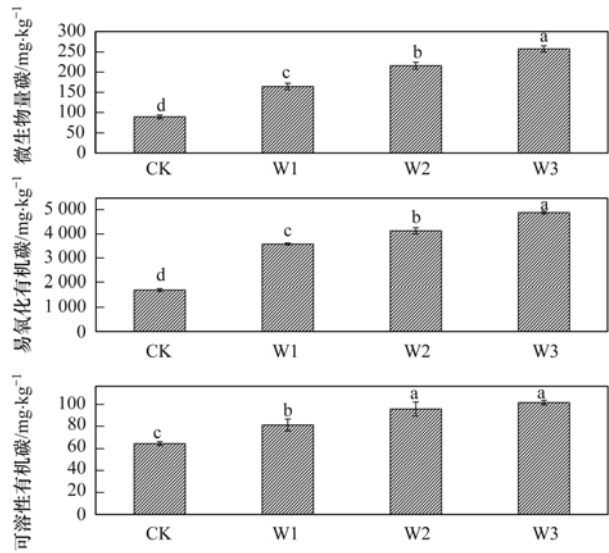
可溶性有机碳有效率 = 可溶性有机碳含量(DOC) / 总有机碳含量(TOC) × 100%

2 结果与分析

2.1 施用无害化污泥对土壤活性碳库各组分的影响

2.1.1 土壤活性碳库各组分含量

由图 1 可知,土壤活性碳库组分含量由高到低依次为:易氧化有机碳>微生物量碳>可溶性有机碳.较 CK 处理,W1、W2、W3 处理土壤微生物量碳(SMBC)分别显著升高了 84.00%、141.61% 和 188.07% ($P < 0.05$);土壤易氧化有机碳含量(LOC)分别显著提高了 109.58%、141.40% 和 185.39% ($P < 0.05$),并且 SMBC、LOC 均随着污泥施用量的增大而显著提高;土壤可溶性有机碳(DOC)分别显著提高了 26.26%、48.87% 和 58.03% ($P < 0.05$),其中 W2、W3 之间无显著差异,但均显著高于 W1.



图中竖棒表示标准偏差,不同小写字母表示各处理在 $P < 0.05$ 水平差异显著,下同

图 1 不同处理下土壤活性碳库各组分含量

Fig. 1 Content of different forms of active carbon in soil of different treatments

2.1.2 土壤活性碳库各组分与总有机碳的相关性

由图 2 可知,通过土壤总有机碳(TOC)与 SMBC、DOC、LOC 的曲线拟合,发现 TOC 与 SMBC 之间呈极显著相关($R^2 = 0.95, n = 12, P < 0.01$);与 DOC 之间呈极显著相关($R^2 = 0.79, n = 12, P < 0.01$);与 LOC 之间呈极显著相关($R^2 = 0.86, n = 12, P < 0.01$).其中相关系数 $SMBC > LOC > DOC$,说明 SMBC 对 TOC 贡献率最大,受 TOC 影响最显著.

2.1.3 土壤活性碳库各组分碳素有效率

由表 2 可知,与 CK 处理相比较, A_1 (SMBC/

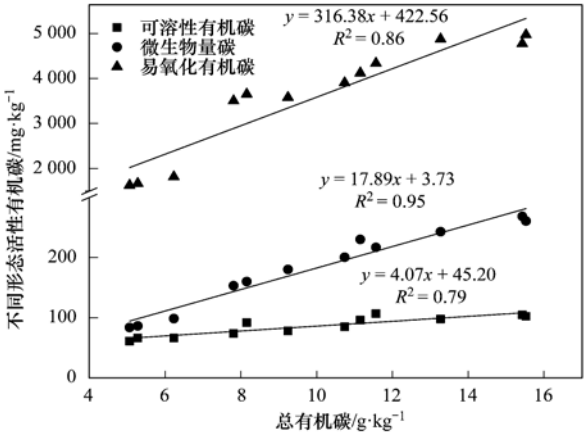


图 2 土壤活性碳库各组分与土壤总有机碳的相关性

Fig. 2 Correlation of the components of soil active carbon pools and soil total organic carbon

TOC) W1、W2 处理分别显著提高了 20.77% 和 19.45% ($P < 0.05$); A_2 (LOC/TOC) W1、W2 处理分别显著提高了 46.48% 和 26.49% ($P < 0.05$); A_3 (DOC/TOC) W1、W2、W3 处理分别显著降低了 17.06%、26.85% 和 40.94% ($P < 0.05$).结果可以看出,随着污泥施用量的增大, A_1 、 A_2 、 A_3 都有下降趋势,W1 处理均显著高于 W3 处理($P < 0.05$).

表 2 不同处理下土壤碳库各组分碳素有效率¹⁾/%

Table 2 Utilization ratio of different components of soil carbon in different treatments/%

处理	A_1	A_2	A_3
	(SMBC/TOC)	(LOC/TOC)	(DOC/TOC)
CK	1.62 ± 0.002b	29.23 ± 0.84c	1.17 ± 0.006a
W1	1.96 ± 0.004a	42.81 ± 2.04a	0.97 ± 0.008b
W2	1.94 ± 0.006a	36.95 ± 0.33b	0.86 ± 0.004bc
W3	1.75 ± 0.044b	33.25 ± 1.78bc	0.69 ± 0.002c

1) 不同小写字母表示各处理在 $P < 0.05$ 水平上差异显著,下同

2.2 施用无害化污泥对土壤碳库管理指数的影响

由表 3 可知,碳库指数(CPI) W1、W2、W3 处理分别显著升高了 52.69%、103.23% 和 167.74% ($P < 0.05$).碳库活度(L) W1、W2 处理较 CK 分别显著升高了 66.7% 和 67.8% ($P < 0.05$),W3 处理与 CK 无显著差异.碳库活度指数(LI) W1、W2 处理较 CK 分别显著升高了 31.1% 和 31.0% ($P < 0.05$),W3 处理与 CK 无显著差异.碳库管理指数(CMPI) W1、W2、W3 处理较 CK 分别显著升高了 153.45%、164.27% 和 195.40% ($P < 0.05$),其中 W3 处理提升效果最为明显,显著高于 W1 和 W2 处理($P < 0.05$),表明在有机质含量低的沙质潮土上施用污泥有利于提高耕作层 CMPI,其中 45 t·hm⁻² 污泥效果最为明显.另外发现 CK 的 CMPI 低于 CK₀.

表 3 不同处理下土壤碳库管理指数
Table 3 CMPI of different treatments after continuous application of sludge

处理	碳库指数 (CPI)	碳库活度 (L)	碳库活度指数 (LI)	碳库管理指数 (CPMI)
CK ₀ ¹⁾	1	0.52	1	100
CK	0.93d	0.45c	0.87c	81.11c
W1	1.42c	0.75a	1.46a	205.57 b
W2	1.89b	0.59b	1.14b	214.36 b
W3	2.49a	0.50bc	0.97bc	239.60 a

1) CK₀ 为参考土壤样本

2.3 土壤碳库各指标的主成分分析

主成分分析结果表明 (图 3), PCA1 能解释 72.72%, 主要与 TOC、土壤活性碳库组分 (SMBC、DOC 和 LOC)、CMPI 和 DOC/TOC 指标有关; PCA2 能解释 21.85%, 主要与 SMBC/TOC 和 LOC/TOC 指标有关. PCA1 主要代表污泥的不同的施用量, 通过污泥施用量的不同把各组区分开来, 很好地反映了施用不同量污泥后土壤碳库的变化.

2.4 土壤活性碳库各组分、碳库管理指数之间及与碳素有效率之间的相关性

从表 4 可以看出, LOC、SMBC 与 DOC 之间存在极显著的相关关系, 说明活性碳库各组分间存在

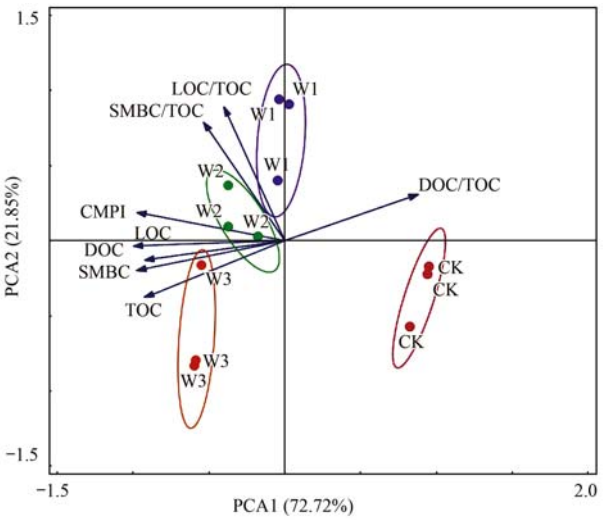


图 3 不同处理土壤碳库指标的主成分分析
Fig. 3 Principal component analyses (PCA) of soil carbon index from different treatments

相互转化的关系; LOC、SMBC、DOC 与 A₁、A₂ 之间均不存在显著关系, 而与 A₃ 存在极显著性关系, 说明 A₃ 是受土壤各种碳库各组分变化影响较敏感的部分; CMPI 与 LOC、SMBC、DOC 均存在着极显著关系, 而且与 A₁、A₂、A₃ 间也存在着显著关系, 说明碳库管理指数可以作为反映土壤碳库变化情况最灵敏的指标.

表 4 土壤活性碳库各组分、碳库管理指数及碳素有效率之间的相关系数¹⁾

Table 4 Correlation coefficients (r) between different components of soil active carbon, CMPI and the carbon utilization ratio

	LOC	SMBC	DOC	CMPI	A ₁	A ₂	A ₃
LOC	1	0.974 **	0.924 **	0.974 **	0.27	0.486	-0.881 **
SMBC		1	0.927 **	0.903 **	0.079	0.391	-0.920 **
DOC			1	0.876 **	0.138	0.381	-0.729 **
CMPI				1	0.607 *	0.633 *	-0.790 **

1) * 为 P<0.05, ** 为 P<0.01

2.5 土壤理化性质与土壤活性碳库组分的冗余分析

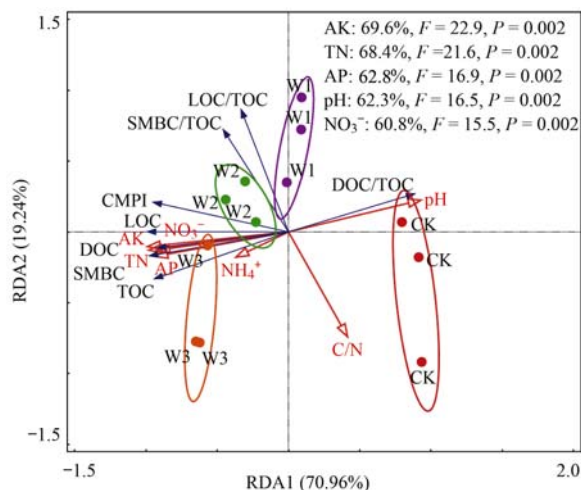
冗余分析结果表明 (图 4), RDA1 能解释 70.69%, 主要与 AK、TN、AP、pH 和 NO₃⁻ 指标有关; RDA2 能解释 19.24%, 主要与 NH₄⁺ 和 C/N 有关. 在 AK、TN、AP、pH 和 NO₃⁻ 指标的影响下, 施用污泥的处理与 CK 处理可以很好地被区分开, 另外施用污泥不同处理相互之间也能被较好地地区分开. 采用 RDA 分析中每个因子单独解释的方法发现 AK 能解释土壤碳库指标变化的 69.6% (P<0.01), TN 能解释土壤碳库指标变化的 68.4% (P<0.01); AP 能解释土壤碳库指标变化的 62.8% (P<0.01); pH 能解释土壤碳库指标变化的 62.3% (P<0.01); NO₃⁻ 能解释土壤碳库指标变化

的 60.8% (P<0.01), 说明污泥施用改变了土壤理化性质, 进而能显著影响土壤碳库的组成.

3 讨论

3.1 施用无害化污泥对土壤活性碳库组分的影响

土壤易氧化有机碳、可溶性有机碳和微生物量碳与总有机碳相比能更客观地反映土壤质量及肥力状况, 同时活性有机碳组分和输入到土壤中有机碳源的生物有效性密切相关^[21]. 有研究发现, 单施有机肥和有机肥-化肥的配合施肥对提高土壤中 LOC 的作用较单纯施用化肥更为显著; 长期有机无机肥料配施可提高土壤 SMBC、DOC 含量以及 CMPI^[22-25]. 本研究发现施用无害化污泥后, 土壤中



图中红箭头表示土壤理化因子,其中 TOC 指土壤总有机碳, SMBC 指土壤微生物量碳,LOC 值土壤易氧化有机碳, DOC 指土壤可溶性有机碳

图 4 土壤碳库指标与土壤理化指标的冗余分析

Fig. 4 Redundancy analyses (RDA) between soil physical and chemical parameters and soil carbon index from different treatments

TOC、LOC、SMBC 均显著升高,且随着污泥用量增大而增加,说明无害化污泥不仅能够提高土壤有机质含量,而且也能够提高土壤活性碳组分含量,改善土壤有机碳质量. 这和 Antolín 等^[26]连续 3 a 在地中海壤土施用厌氧污泥试验与 Pascual 等^[27]在壤土上施用厌氧污泥的室内培养试验的研究结果一致. 这是因为无害化污泥中含有大量好氧活性物质,经过堆肥化处理后形成活性固体小颗粒,释放的 LOC 较多;同时,由于大量易氧化有机质的分解给微生物生长活动提供能源,促进了土壤中土著微生物的生长,加上污泥自身由于堆肥作用含有大量的微生物,导致污泥施入土壤极大地促进了土壤中的微生物量. 并且,土壤有机质含量的提升可以提高土壤保水保肥的能力. 本试验对象为沙质潮土,其自然淋溶能力较强,在施用污泥的处理其有机质含量显著增加,可以提高土壤保水保肥的能力,降低了沙质潮土对 SMBC 和 LOC 的淋溶,从而提高了施用污泥处理的 SMBC 和 LOC 含量. 此外,也有学者报道污泥施用后由于土壤重金属含量的增加会降低 SMBC 的含量^[28],但在本研究中并未发现此类现象,主要是因为连续 3 a 定位试验后,经测定试验土壤重金属含量表明,各处理中 W3 处理土壤重金属含量达到最大值 (Cu 28.97 mg·kg⁻¹, Zn 75.95 mg·kg⁻¹, Cd 0.25 mg·kg⁻¹, Cr 69.60 mg·kg⁻¹, Ni 19.67 mg·kg⁻¹, Pb 19.73 mg·kg⁻¹,均远低于国家土壤环境质量标准 GB 15618-1995),虽然其值较土壤原始

值有不同程度的提升,但是均远小于其他学者研究中对 SMBC 造成抑制作用的重金属含量,如 Charlton 等^[29]发现在长期施用污泥情况下土壤 Cd 含量只有超过 3 mg·kg⁻¹才会抑制微生物量碳. 并且本试验还发现各处理中 W3 处理其 SMBC 也显著增加到最大值,所以本研究中施用 15~45 t·hm⁻²污泥在沙化潮土上不存在土壤重金属对微生物的抑制作用.

有研究证明,DOC 是土壤微生物可直接利用的有机碳源^[30]. 本研究发现,污泥的施入显著增加了土壤中 DOC 的含量,这是因为污泥自身分解释放出了大量 DOC 并且施用污泥提高了土壤的保水保肥能力,降低了土壤对 DOC 的淋溶,从而有效地提高了土壤 DOC 含量. 但施用 45 t·hm⁻²污泥时 DOC 较 30 t·hm⁻²污泥处理无显著差异,这是因为增大污泥施用量时土壤中微生物大量生长,吸收利用了部分 DOC,另外施用污泥可以显著提高植物量而高的植物生物量也会带走土壤更多的 DOC.

有学者研究指出土壤活性碳组分含量占土壤总有机碳的百分率比活性碳的绝对含量更能体现土壤碳库的状况. 由于土壤活性碳常与土壤总有机碳含量有较好相关性,因而采用活性碳占总有机碳百分率指标可以消除土壤总有机碳含量差异对活性碳的影响^[4]. 土壤微生物量碳 (SMBC/TOC) 变化反映了土壤中输入的有机质向微生物生物量碳的转化效率、土壤中碳的损失和土壤矿物对有机质的固定^[31]. 土壤易氧化有机碳有效率 (LOC/TOC) 在一定程度上可以反映土壤有机碳的质量和稳定程度,该比例越高表示有机碳越易被微生物分解矿化、周转期较短或活性高;比例小则表示土壤有机碳较稳定不易被生物所利用^[3]. 土壤可溶性有机碳有效率 (DOC/TOC) 反映了土壤中最活跃部分的碳占总有机碳的比例,其值大小对土壤中生物化学反应意义重大. 有学者研究发现,绿肥^[32]、有机肥^[33,34]可以增加土壤 LOC 有效率以及微生物量. 本研究表明,施用污泥后各处理土壤 LOC/TOC 以及 SMBC/TOC 较 CK 均有升高趋势,其中 W1、W2 显著升高,这与 Sciubba^[35]等利用厌氧污泥进行试验的研究结果一致. 这是因为一方面污泥自身释放的易氧化有机质被土壤所固持,提高了土壤有机质的含量和质量,促进了土壤微生物生长,提高了微生物活性,并降低了沙质潮土对 SMBC 和 LOC 的淋溶;另一方面,污泥中生物有效部分的腐殖质矿化能够给微生物新陈代谢提供能量,刺激微生物生长. 但本研究也发现施用污泥土壤各处理 DOC/TOC 较 CK 均显著降低,这

主要是因为施用污泥的处理极大地促进了微生物和植物的生长,而高的微生物量和植物量在生长过程中吸收利用了较多的 DOC,导致污泥施用后土壤 DOC 的有效率较 CK 降低。

另外,本研究还发现施用污泥处理土壤 LOC、DOC 的有效率和微生物量熵随着污泥施用量的增大而减小,这是因为污泥施用量的增大虽然使 SMBC、LOC、DOC 的绝对含量提高了,但其自身带入了更多的稳定态的有机质被土壤吸附,导致其相对比例下降。本试验虽然没有测定污泥中有机质的形态,但是经许多学者研究表明污泥在好氧堆肥过程中其有机质转换为了更为稳定的状态,如木质素,纤维素,半纤维素等^[8, 35]。并且增大堆肥污泥施用量后,在给土壤提供大量易氧化有机碳的同时,也会增大土壤的电导率(CK: $55.34 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; W1: $71.42 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; W2: $80.73 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; W3: $86.78 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$),降低土壤 pH(CK: 8.90; W1: 8.56; W2: 8.40; W3: 8.07),这些环境因素会给土壤微生物造成生态压力,增加了维持生态平衡所需要的能量,导致土壤微生物活性降低^[8],也从另一角度也体现了增大污泥的施用量可以使土壤碳库更加稳定,更利于有机质的贮存。

3.2 施用无害化污泥对土壤碳库管理指数的影响分析

土壤碳库活度和碳库活度指数反映了土壤碳素的活跃程度,活度越大,土壤有机碳越易被微生物分解。土壤碳库管理指数则可灵敏地反映农业生产措施对土壤肥力、土壤碳库动态变化的影响^[36]。本研究表明,污泥施用能显著提高土壤 CMPI,其中以施用 $45 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 污泥表现最为突出。但随着污泥施用量的增大,施用污泥处理土壤 L 和 LI 均降低且 W3 显著低于 W1,表明增大污泥施用量会使土壤中微生物难利用的非活性有机碳含量增大,使得土壤稳定态碳含量增加,更有利于固定土壤碳,这与上述发现的土壤碳素有效率在高污泥施用量降低的规律一致。这可能是由于污泥经过好氧堆肥后,其有机质多为难降解的木质素,纤维素和半纤维素等,增大污泥施用量后,土壤中难降解的稳定态碳含量增大,导致其碳库活度及碳库活度指数降低。另外,有学者研究发现仅施化肥的土壤其碳库管理指数会下降^[37],本研究也得到一致的结果,发现 CK 处理其碳库管理指数仅为 81.11,低于参考土壤样品 CK₀(碳库管理指数为 100),这是因为长期施用化学肥料后土壤活性碳组分消耗过快,活性碳组分的形成

小于其消耗量导致的。

3.3 土壤活性碳库指标主成分分析、相关性分析和冗余分析

由主成分分析可知,污泥施用后能够明显改变土壤活性碳库各指标的含量,并且不同的施用量下其碳库反映出不同的变化,这主要是由于污泥自身的性质以及土壤特性所导致。从相关性分析和冗余分析可以看出,CMPI 与土壤碳库各指标和土壤理化性质均存在显著相关关系,说明 CMPI 可以作为反映沙质潮土土壤活性碳库和土壤肥力变化最为灵敏的指标,这和兰延等^[38]在水稻土上的研究结果一致。

4 结论

(1) 施用无害化污泥能够显著增加 TOC、SMBC、LOC 和 DOC 含量,且随着污泥施用量的增大而增加;土壤碳素有效率均随污泥用量增大而显著降低,说明污泥施用有利于提高土壤总有机碳和各活性碳库组分含量,并且增大污泥施用量提高了土壤腐殖化程度,有利于沙质潮土土壤有机碳的积累。

(2) 无害化污泥施用后,CMPI 在 W3 处理提高最为显著,说明施用 $45 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 污泥对提升 CMPI 效果最好。

(3) 从土壤碳库各组分、碳素有效率间的相关性及与环境因子的冗余分析得出,用 CMPI 来表征土壤肥力的变化比用土壤总有机碳更灵敏、直接,能更好地反映出土壤养分及碳库的动态变化。

参考文献:

- [1] 何翠翠,王立刚,王迎春,等. 长期施肥下黑土活性有机质和碳库管理指数研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 194-202.
He C C, Wang L G, Wang Y C, et al. Effect of long-term fertilization on labile organic matter in and carbon pool management index of black soil[J]. acta Pedologica Sinica, 2015, 52(1): 194-202.
- [2] Lou Y, Xu M, Wang W, et al. Soil organic carbon fractions and management index after 20 yr of manure and fertilizer application for greenhouse vegetables[J]. Soil Use and Management, 2011, 27(2): 163-169.
- [3] 佟小刚,韩新辉,杨改河,等. 碳库管理指数对退耕还林土壤有机碳库变化的指示作用[J]. 中国环境科学, 2013, 33(3): 466-473.
Tong X G, Han X H, Yang G H, et al. Carbon management index as an indicator for changes in soil organic carbon pool under conversion from cropland to forestland[J]. China Environmental Science, 2013, 33(3): 466-473.
- [4] Leifeld J, Kögel-Knabner I. Soil organic matter fractions as early

- indicators for carbon stock changes under different land-use? [J]. *Geoderma*, 2005, **124**(1-2): 143-155.
- [5] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, **46**(7): 1459-1466.
- [6] 蔡函臻, 宁西翠, 王权, 等. 碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4848-4856.
- Cai H Z, Ning X C, Wang Q, *et al.* Alkali solids amendment on sewage sludge aerobic composting and the related products on infertile soil amelioration[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4848-4856.
- [7] 李霞, 李法云, 荣湘民, 等. 城市污泥改良沙地土壤过程中氮磷的淋溶特征与风险分析[J]. *水土保持学报*, 2013, **27**(4): 93-97, 102.
- Li X, Li F Y, Rong X M, *et al.* Risk and leaching characteristics of nitrogen and phosphorus in sandy soil amended with sewage sludge[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, **27**(4): 93-97, 102.
- [8] Jorge-Mardomingo I, Soler-Rovira P, Casermeiro M Á, *et al.* Seasonal changes in microbial activity in a semiarid soil after application of a high dose of different organic amendments[J]. *Geoderma*, 2013, **206**: 40-48.
- [9] 刘恋, 张建峰, 姜慧敏, 等. 无害化污泥施用对土壤有机质、微生物量碳和氮含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(5): 978-984.
- Liu L, Zhang J F, Jiang H M, *et al.* Effects of non-hazardous sewage sludge application on soil organic matter and soil microbial biomass carbon and nitrogen[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(5): 978-984.
- [10] 辛涛, 白莉萍, 宋金洪, 等. 施用城市污泥对杨树土壤化学特性及金属含量的影响[J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(11): 2722-2727.
- Xin T, Bai L P, Song J H, *et al.* Effects of municipal sewage sludge applications on chemical properties and metal contents in poplar soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, **19**(11): 2722-2727.
- [11] Ojeda G, Ortiz O, Medina C R, *et al.* Carbon sequestration in a limestone quarry mine soil amended with sewage sludge[J]. *Soil Use and Management*, 2015, **31**(2): 270-278.
- [12] Li H L, Qu R H, Yan L G, *et al.* Field study on the uptake and translocation of PBDEs by wheat (*Triticum aestivum* L.) in soils amended with sewage sludge[J]. *Chemosphere*, 2015, **123**: 87-92.
- [13] Ramdani N, Hamou A, Lousdad A, *et al.* Physicochemical characterization of sewage sludge and green waste for agricultural utilization[J]. *Environmental Technology*, 2015, **13**(12): 1594-1604.
- [14] Fernández J M, Plaza C, García-Gil J C, *et al.* Biochemical properties and barley yield in a semiarid Mediterranean soil amended with two kinds of sewage sludge[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, **42**(1): 18-24.
- [15] 刘向华. 可持续发展战略下河南粮食生产能力提高的低碳路径探析[J]. *生态经济*, 2015, **31**(9): 114-117.
- Liu X H. Analysis on low-carbon development of grain productivity in Henan under the strategy of sustainability[J]. *Ecological Economy*, 2015, **31**(9): 114-117.
- [16] 周东兴, Еськов А И, Касатиков В А, 等. 城市污泥对大麦生长发育和土壤肥力的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2009, **40**(4): 37-41.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [18] Best E X. An automated method for determining nitrate-nitrogen in soil extracts[J]. *Queensland Journal of Agricultural and Animal Sciences*, 1976, **33**(2): 161-166.
- [19] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [20] 彭华, 纪雄辉, 吴家梅, 等. 不同稻草还田模式下双季稻土壤有机碳及碳库管理指数研究[J]. *生态学报*, 2016, **25**(4): 563-568.
- Peng H, Ji X H, Wu J M, *et al.* Organic carbon and carbon pool management index in soil under different rice straw returning way in double-cropping paddy fields[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(4): 563-568.
- [21] 肖胜生, 房焕英, 段剑, 等. 植被恢复对侵蚀型红壤碳吸存及活性有机碳的影响[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(5): 728-735.
- Xiao S S, Fang H Y, Duan J, *et al.* Effects of vegetation restoration on soil carbon sequestration and active organic carbon in eroded red soil[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(5): 728-735.
- [22] 张瑞, 张贵龙, 姬艳艳, 等. 不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 277-282.
- Zhang R, Zhang G L, Ji Y Y, *et al.* Effects of different fertilizer application on soil active organic carbon[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 277-282.
- [23] 赵玉皓, 张艳杰, 李贵春, 等. 长期不同施肥下褐土有机碳储量及活性碳组分[J]. *生态学杂志*, 2016, **35**(7): 1826-1833.
- Zhao Y H, Zhang Y J, Li G C, *et al.* Soil organic carbon stock and active carbon fractions under four kinds of long-term fertilization[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(7): 1826-1833.
- [24] 张文峰, 袁颖红, 周际海, 等. 长期施肥对红壤性水稻土壤碳库管理指数和双季水稻产量的影响[J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(4): 569-575.
- Zhang W F, Yuan Y H, Zhou J H, *et al.* Effects of long-term fertilization on the carbon management index and double rice yield in red paddy soils[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(4): 569-575.
- [25] 骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 等. 黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 676-684.
- Luo K, Hu R G, Zhang W J, *et al.* Response of black soil organic carbon, nitrogen and its availability to long-term fertilization[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 676-684.
- [26] Antolín M C, Pascual I, García C, *et al.* Growth, yield and solute content of barley in soils treated with sewage sludge under semiarid Mediterranean conditions[J]. *Field Crops Research*, 2005, **94**(2-3): 224-237.
- [27] Pascual I, Antolín M C, García C, *et al.* Effect of water deficit on microbial characteristics in soil amended with sewage sludge or inorganic fertilizer under laboratory conditions[J]. *Bioresource*

- Technology, 2007, **98**(1): 29-37.
- [28] Paz-Ferreiro J, Gascó G, Gutiérrez B, *et al.* Soil biochemical activities and the geometric mean of enzyme activities after application of sewage sludge and sewage sludge biochar to soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, **48**(5): 511-517.
- [29] Charlton A, Sakrabani R, Tyrrel S, *et al.* Long-term impact of sewage sludge application on soil microbial biomass: an evaluation using meta-analysis [J]. *Environmental Pollution*, 2016, doi: 10.1016/j.envpol.2016.07.050.
- [30] 黄倩, 吴靖霆, 陈杰, 等. 土壤吸附可溶性有机碳研究进展 [J]. *土壤*, 2015, **47**(3): 446-452.
Huang Q, Wu J T, Chen J, *et al.* Adsorption of dissolved organic carbon (DOC) on soil: a review [J]. *Soils*, 2015, **47**(3): 446-452.
- [31] 孙凤霞, 张伟华, 徐明岗, 等. 长期施肥对红壤微生物生物量碳氮和微生物碳源利用的影响 [J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(11): 2792-2798.
Sun F X, Zhang W H, Xu M G, *et al.* Effects of long-term fertilization on microbial biomass carbon and nitrogen and on carbon source utilization of microbes in a red soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(11): 2792-2798.
- [32] 杨滨娟, 黄国勤, 兰延, 等. 施氮和冬种绿肥对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响 [J]. *应用生态学报*, 2014, **25**(10): 2907-2913.
Yang B J, Huang G Q, Lan Y, *et al.* Effects of nitrogen application and winter green manure on soil active organic carbon and the soil carbon pool management index [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(10): 2907-2913.
- [33] 廖敏, 彭英, 陈义, 等. 长期不同施肥管理对稻田土壤有机碳库特征的影响 [J]. *水土保持学报*, 2011, **25**(6): 129-133, 138.
Liao M, Peng Y, Chen Y, *et al.* Effect of long-term different fertilizer management on soil carbon stock characteristics in paddy soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, **25**(6): 129-133, 138.
- [34] 吴建富, 曾研华, 潘晓华, 等. 稻草还田方式对双季水稻产量和土壤碳库管理指数的影响 [J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(6): 1572-1578.
Wu J F, Zeng Y H, Pan X H, *et al.* Effects of rice straw returning mode on rice grain yield and soil carbon pool management index in double rice-cropping system [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(6): 1572-1578.
- [35] Sciubba L, Cavani L, Negroni A, *et al.* Changes in the functional properties of a sandy loam soil amended with biosolids at different application rates [J]. *Geoderma*, 2014, **221-222**: 40-49.
- [36] 李硕, 李有兵, 王淑娟, 等. 关中平原作物秸秆不同还田方式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响 [J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(4): 1215-1222.
Li S, Li Y B, Wang S J, *et al.* Effects of different straw-returning regimes on soil organic carbon and carbon pool management index in Guanzhong Plain, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(4): 1215-1222.
- [37] 王朔林, 杨艳菊, 王改兰, 等. 长期施肥对栗褐土活性有机碳的影响 [J]. *生态学杂志*, 2015, **34**(5): 1223-1228.
Wang S L, Yang Y J, Wang G L, *et al.* Effect of long-term fertilization on labile organic carbon in cinnamon soil [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(5): 1223-1228.
- [38] 兰延, 黄国勤, 杨滨娟, 等. 稻田绿肥轮作提高土壤养分增加有机碳库 [J]. *农业工程学报*, 2014, **30**(13): 146-152.
Lan Y, Huang G Q, Yang B J, *et al.* Effect of green manure rotation on soil fertility and organic carbon pool [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, **30**(13): 146-152.

CONTENTS

Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (845)
Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter	GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> (855)
Assessment of PM _{2.5} Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> (867)
Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM _{2.5} During Wintertime in Beijing	QIAO Bao-wen, LIU Zi-rui, HU Bo, <i>et al.</i> (876)
Online Source Analysis of Particulate Matter (PM _{2.5}) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015	LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> (884)
Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> (894)
Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere	CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> (903)
Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain	ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (911)
Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter	YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> (918)
Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City	FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> (924)
Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe	QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (936)
Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events	WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> (946)
Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China	ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> (954)
Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake	WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> (964)
Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City	WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> (979)
Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (987)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (993)
Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River	LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (1002)
Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen	YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1010)
Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City	LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> (1018)
Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria	SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1028)
Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation	ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> (1038)
Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study	YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> (1046)
Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al ₂ O ₃	XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen (1054)
Oxidation Destruction of Cu(CN) ₂ ²⁻ by Persulfate	WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (1061)
Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells	QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian (1067)
Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template	LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> (1074)
Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A ² /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1084)
Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i>	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1093)
Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater	QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1102)
Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor	LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> (1109)
Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1116)
A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process	WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (1130)
Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process	CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> (1137)
Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues	DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> (1144)
Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge	BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1151)
Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions	DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao (1159)
Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i>	YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1167)
Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions	YI Jun, CHENG Jin-ping (1173)
Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1182)
Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (1189)
Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> (1201)
Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization	WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1209)
Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index	LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> (1218)
Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization	WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> (1227)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest	CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> (1235)
Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO ₂ Concentration and Temperature	LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> (1245)
Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1253)
Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area	SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (1262)
Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw	JIANG Ji-shao, YAO Qian (1272)