

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第2期

Vol.34 No.2

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

16 届亚运会期间广州城区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对霾天气的影响	陶俊, 柴发合, 高健, 曹军骥, 刘随心, 张仁健 (409)
北京地区秋季雾霾天 PM _{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析	赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 马志强, 董璠, 何迪 (416)
上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究	王倩, 陈长虹, 王红丽, 周敏, 楼晟荣, 乔利平, 黄成, 李莉, 苏雷燕, 牟莹莹, 陈宜然, 陈明华 (424)
杭州市大气超细颗粒物浓度谱季节性特征	谢小芳, 孙在, 付志民, 杨文俊, 林建忠 (434)
保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别	李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 王跃思 (441)
春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究	周变红, 张承中, 王格慧 (448)
华东区域高山背景点 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 背景值及污染特征	苏彬彬, 刘心东, 陶俊 (455)
基于电子鼻土壤与地下水污染修复现场 TVOC 和恶臭的评估	田秀英, 蔡强, 刘锐, 张永明 (462)
积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征	张刚, 王宁, 艾建超, 张蕾, 杨净, 刘子琪 (468)
靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究	徐林波, 高勤峰, 董双林, 刘佳, 傅秀娟 (476)
正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究	欧杰, 王延华, 杨浩, 胡建芳, 陈霞, 邹军, 谢云 (484)
干旱区城市昌吉降雪及积雪中 PGEs 含量分布及其影响因素	刘玉燕, 刘浩峰, 张兰 (494)
降尘收集方法对降尘效率的影响	张正偲, 董治宝 (499)
海河流域水生生态功能一级二级分区	孙然好, 汲玉河, 尚林源, 张海萍, 陈利顶 (509)
长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究	时志强, 张运林, 王明珠, 刘笑茵 (517)
内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究	黄昌春, 李云梅, 徐良将, 杨浩, 吕恒, 陈霞, 王延华 (525)
溶氧对富集培养的河口湿地表层沉积物氨氧化菌多样性及氨氧化速率的影响	邱昭政, 罗专溪, 赵艳玲, 颜昌宙 (532)
自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究	张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 安静, 薛星宇, 侯明行 (540)
淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制	周亮, 徐建刚, 孙东琪, 倪天华 (547)
高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征	崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 陈玲, 肖尚斌, 向坤, 张涛 (555)
城市雨水径流水质演变过程监测与分析	董雯, 李怀恩, 李家科 (561)
复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果	任峰, 陆忆夏, 刘琴, 汤杨杨, 王世和, 高海鹰, 乔红杰, 王为进 (570)
给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究	郑琦, 陈超, 张晓健, 陆品品, 刘源源, 陈雨乔 (576)
1 株溶藻菌的部分生物学特性及溶鱼腥藻作用	李三华, 张奇亚 (583)
水生植物热解生物油中对肋骨藻抗氧化酶活性的影响	姚远, 李锋民, 李媛媛, 单时, 李杰, 王震宇 (589)
TiO ₂ 光催化联合技术降解苯酚机制及动力学	张轶, 黄若男, 王晓敏, 王齐, 丛燕青 (596)
皮革废水有机污染物生物降解特性研究	王勇, 李伟光, 杨力, 宿程远 (604)
链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究	谢练武, 方继前, 郭亚平 (611)
一种负载型生物载体的制备及性能研究	杨基先, 曾红云, 周义, 邱珊, 马放, 王蕾, 肖大伟 (616)
基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 培养研究	嵇雯雯, 夏会龙, 方治国, 刘惠君 (622)
温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响	陈汉龙, 严媛媛, 何群彪, 戴晓虎, 周琪 (629)
天然和水热合成针铁矿对有机物厌氧分解释放 CH ₄ 的影响	姚敦璠, 陈天虎, 王进, 周飞跃, 岳正波 (635)
蚀刻废液及其回收后生产的铜盐产品中 PCDD/Fs 含量水平及分布特征	青宪, 韩静磊, 温炎桑 (642)
基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 夏天翔, 朱笑盈, 韩丹, 张丽娜 (647)
区域地下水污染风险评价方法研究	杨彦, 于云江, 王宗庆, 李定龙, 孙宏伟 (653)
地下水有机污染源识别技术体系研究与示范	王晓红, 魏加华, 成志能, 刘培斌, 纪轶群, 张干 (662)
祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究	朱凌宇, 潘剑君, 张威 (668)
黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应	骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 周宝库, 徐明岗, 张敬业, 夏平 (676)
根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响	张晶, 于玲玲, 辛木贞, 苏德纯 (685)
长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究	罗璐, 周萍, 童成立, 石辉, 吴金水, 黄铁平 (692)
外源 Cr(Ⅲ) 在我国 22 种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究	郑顺安, 郑向群, 李晓辰, 刘书田, 姚秀荣 (698)
某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征	潘峰, 王利利, 赵浩, 尤奇中, 刘林 (705)
大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析	刘芳, 王书肖, 吴清茹, 林海 (712)
天津成人头发指甲中有机氟污染物的残留特征	姚丹, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 王艳萍, 刘国卿 (718)
沉积物中雌激素及壬基酚、辛基酚、双酚 A 的测定	吴唯, 史江红, 陈庆彩, 张晖, 刘晓薇 (724)
动物饲料中砷、铜和锌调查及分析	姚丽贤, 黄连喜, 蒋宗勇, 何兆桓, 周昌敏, 李国良 (732)
氟虫双酰胺在水稻和稻田中的残留动态研究	王点点, 宋宁慧, 吴文铸, 由宗政, 何健, 石利利 (740)
2 株降解菲的植物内生细菌筛选及其降解特性	倪雪, 刘娟, 高彦征, 朱雪竹, 孙凯 (746)
嗜盐拟香味菌 Y6 降解硝基苯的特性研究	厉阗, 钱坤, 肖伟, 王进军, 邓新平 (753)
固定化条件对苯系物细胞传感器检测效果的影响	唐阔, 马安周, 于清, 邓雪梅, 吕迪, 庄国强 (760)
16S rDNA 克隆文库分析高含盐生物脱硫系统细菌多样性	刘卫国, 梁存珍, 杨金生, 王桂萍, 刘苗苗 (767)
氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响	刘涛, 李冬, 曾辉平, 畅晓燕, 张杰 (773)
筒青霉 (<i>Penicillium simplicissimum</i>) 对木质纤维素的降解及相关酶活性特征	沈莹, 胡天觉, 曾光明, 黄丹莲, 尹璐, 刘杨, 吴娟娟, 刘晖 (781)
石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究	杨萌青, 李立明, 李川, 李广贺 (789)
土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响	王桂珍, 李兆君, 张树清, 马晓彤, 梁永超 (795)
生活垃圾填埋过程含水率变化研究	李睿, 刘建国, 薛玉伟, 张媛媛, 岳东北, 聂永丰 (804)
动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化	吴昊, 张盼月, 郭建斌, 吴永杰 (810)
《环境科学》征订启事 (447)	《环境科学》征稿简则 (493)
信息 (508, 588, 610, 731)	专辑征稿通知 (788)

黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应

骆坤^{1,2}, 胡荣桂¹, 张文菊^{2*}, 周宝库³, 徐明岗², 张敬业², 夏平平¹

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3. 黑龙江省农业科学院土壤肥料与环境资源研究所, 哈尔滨 150086)

摘要: 以长期定位试验为基础, 研究不同长期施肥模式对中国东北黑土表层(0~20 cm)及亚表层(20~40 cm)土壤碳、氮的影响。结果表明, 有机肥的施入显著提高了表层土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)含量, 其中以有机无机配施处理最为显著。与不施肥相比, 常量和高量有机无机配施分别增加了表层SOC含量24.6%和25.1%, 分别增加了表层土壤TN含量29.5%和32.8%, 亚表层土壤SOC和TN含量对施肥无响应。尽管常量及高量有机无机配施分别增加了黑土0~40 cm土壤碳储量11.6%和7.6%、氮储量17.3%和12.7%, 但各处理之间无显著差异, 仅增加了黑土碳、氮储量的变异性。与不施肥相比, 有机肥的施用不仅显著增加了表层和亚表层土壤微生物量碳、氮(SMBC、SMBN)及可溶性碳、氮(DOC、DN)的含量, 且显著提高了这些组分在总有机碳、全氮中所占的比例。有机无机配施处理能使表层土壤SMBC/SOC、SMBN/TN值分别提高0.36~0.59和1.21~1.95个百分点, 而DOC/SOC、DN/TN也分别达到0.53%~0.72%和1.41%~1.78%。土壤微生物量碳、氮、可溶性碳氮及其在总有机碳、氮中所占的比例对于施肥的响应在土壤剖面上表现更为敏感, 更能反映土壤肥力对于长期施肥的响应。有机肥的施入尤其是有机无机配施能显著提高黑土表层和亚表层土壤有机碳、氮活性, 有利于提升土壤肥力和养分供应能力, 但同时也导致了农田系统碳、氮的大量损失, 容易引起潜在的环境污染。

关键词: 长期施肥; 有机碳; 全氮; 矿质氮; 土壤微生物生物量碳氮; 可溶性碳氮

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)02-0676-09

Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization

LUO Kun^{1,2}, HU Rong-gui¹, ZHANG Wen-ju², ZHOU Bao-ku³, XU Ming-gang², ZHANG Jing-ye², XIA Ping-ping¹

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agriculture University, Wuhan 430070, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Institute of Soil and Fertilizer and Environment Resources, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

Abstract: Based on the long-term fertilization experiments, effects of various fertilization practices on the soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) in the surface (0-20 cm) and subsurface (20-40 cm) black soil in northeast China were studied. Results showed that, compared with the CK, long-term application of organic manure, especially the combination of mineral fertilizers and organic manure significantly increased the organic SOC and TN in the surface soil. Application of mineral fertilizers plus organic manure with conventional (NPM) and high application ($N_2P_2M_2$) rate increased SOC significantly by 24.6% and 25.1%, and TN by 29.5% and 32.8%, respectively. However, there was no significant difference among the treatments for SOC and TN at the subsurface. Compared with the CK (CK_h), mineral fertilizer plus organic manure (NPM and $N_2P_2M_2$) did not only increase the soil microbial biomass carbon (SMBC) and nitrogen (SMBN), dissolved organic carbon (DOC) and nitrogen (DN), but also significantly increased the ratio of SMBC and DOC to SOC, SMBN and TN to TN. Application of the NPM and $N_2P_2M_2$ increased the value of SMBC/SOC by 0.36 to 0.59 and SMBN/TN by 1.21 to 1.95 percentage points, respectively. The value of DOC/SOC and DN/TN ranged from 0.53% to 0.72% and 1.41% to 1.78%, respectively. This result indicated that SMBC, SMBN, DOC, DN and SMBC/SOC, SMBN/TN, DOC/SOC, DN/TN were more sensitive than SOC and TN to long-term fertilization in the soil profile, and were better indicators for the impact of long-term fertilization soil fertility. The concluded that the application of manure especially manure plus mineral fertilizers can increase soil nutrients activity in the surface and subsurface black soil, acting as a helpful practice to improve soil fertility and the ability of nutrient supply, while it may cause potential environment pollution on carbon and nitrogen loss in the agroecosystem.

Key words: long-term fertilization; soil organic carbon; total nitrogen; mineral nitrogen; soil microbial biomass carbon and nitrogen; dissolved organic carbon and nitrogen

收稿日期: 2012-04-17; 修订日期: 2012-07-31

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2011-4); 公益性行业(农业)科研专项(201203030)

作者简介: 骆坤(1986~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生态, E-mail: luokun0104@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wjzhang@caas.ac.cn

土壤碳、氮循环是农田生态系统最基本的生态过程,对农田生态系统的稳定性、生产力及其环境效应具有关键性的影响。全球约有1 500 Gt 碳是以有机碳形态储存于地球1 m 的土壤中^[1],相当于大气碳库的2 倍,因此土壤有机碳库储量较小幅度的变动,都可能对大气二氧化碳浓度产生重要影响。农田生态系统土壤有机碳、氮含量不仅是土壤肥力的关键指标,而且还与全球变化密切相关。

很多研究表明农业土壤在降低大气CO₂ 升高和减缓温室效应方面具有很大潜力^[2,3]。土壤有机碳、氮的储量受植被、气候、土壤属性以及土地利用方式的变化等多种自然因素和人文因素的综合影响。有报道表明改变土地利用方式主要通过改变有机物料的投入影响土壤有机碳的周转^[4]。气候因素如土壤湿度和土壤温度则会通过影响土壤团聚体的形成^[5]以及土壤呼吸^[4,6]影响土壤有机碳的积累。合理的农业管理措施如轮作、减(免)耕、增施有机肥及秸秆还田均能够提高土壤有机碳的水平^[7~10]。而农田施肥管理、耕作方式等农艺措施也会直接影响土壤氮素的转化过程,引起土壤氮素肥力的差异,进而影响植物的吸收与利用^[11,12]。农业生产中化肥氮的大量输入对土壤碳、氮的累积过程产生了重要影响。国内外大量研究都表明施用有机肥或化肥有机肥配施会使有机碳、全氮含量提高^[13,14]。施用有机肥或实行秸秆还田,可以显著地提高土壤微生物生物量碳的含量^[15];施用化学肥料也有利于提高土壤微生物生物量碳的含量,但过量的施用化肥,却降低了土壤微生物生物量碳的含量^[16]。有机肥的施入同样也会引起土壤微生物生物量氮的增加^[17],然而有研究表明化肥对微生物生物量氮影响不大^[18]。McDowel 等^[19]研究发现,在连续施肥多年后,土壤可溶性有机碳的含量变化十分微小,施入氮肥能够提高可溶性氮的含量,但是并未达到显著的水平。而倪进治等^[20]研究发现有机与无机肥配合施用能增加土壤可溶性碳含量。Vestgarden 等^[21]却发现化肥能够使可溶性氮的含量降低。Gundersen 等^[22]则认为氮肥的施入与可溶性有机氮之间并不存在线性关系。一般情况下,土壤碳含量的提高通常会伴随土壤氮素赋存的增加,二者之间具有良好的耦合效应^[23]。但也有一些研究表明二者之间无明显的相关性^[24]。其原因主要可能是外源碳、氮的加入对土壤碳、氮的活性产生了重要影响,导致微生物对碳源和氮源的利用产生了差异。因此,了解和掌握不同施肥模式下土壤碳、氮积累特征及其活性于揭示土壤

有机碳、全氮对农业措施的响应有着重要的意义。东北黑土区是我国粮食主产区,对于不同施肥模式下黑土有机碳、全氮的积累特征及演变有诸多报道^[25,26],但是对于不同深度土壤碳、氮储量及碳、氮的活性对于不同施肥的响应却并不十分清楚。本研究拟以东北黑土区典型农田长期试验为基础,通过取样分析,考察不同施肥模式对表层和亚表层土壤碳、氮积累特征的影响,探讨土壤碳、氮的活性对长期不同用量化肥及有机无机配施的响应特征,以期为我国粮食主产区土壤肥力提升及可持续管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

本研究土壤样品采自黑龙江省农业科学院黑土肥力长期定位监测试验地,该试验始于1979 年,设有常规施肥量处理,1986 年进行裂区,增加了2 倍量的施肥处理(表1)。供试土壤表层(0~20 cm)有机碳含量为15.4 g·kg⁻¹,全N、全P、全K 分别为1.47、1.07、25.16 g·kg⁻¹,碱解N、速效P、速效K 为151.1、51.0、200.0 mg·kg⁻¹,pH 值为7.22。种植制度为小麦-大豆-玉米的顺序3 a 一个轮作周期,到2010 年共为31 个生长季。试验小区面积168 m²,每区8 垄,垄长30 m,垄距70 cm。本研究选择不施肥(CK)、单施有机肥(M)、氮磷配施(NP)和有机无机配施(NPM)共4 个常规施肥量处理和CK₂(不施肥)、N₂P₂、M₂、N₂P₂M₂这4 个2 倍量施肥处理(施肥量为常量施肥处理的2 倍)。各施肥处理的氮、磷、钾肥均为秋施肥,氮肥为尿素,磷肥为三料过磷酸钙、磷酸二铵,钾肥为硫酸钾。有机肥为纯马粪,每轮作周期施一次,于小麦收获后施入,按纯氮量75 kg·hm⁻²(约马粪18 600 kg·hm⁻²),以M 表示。具体施肥量如表1 所示。

1.2 样品采集

土壤样品的采集于2010 年9 月秋季小麦收获后进行。在每个部分中间位置随机选5 点,取0~20 cm、20~40 cm 土层的田间土壤样品,同时测定各层次土壤容重。采集样品分为两份,一份作为鲜样4℃保存用于微生物生物量碳氮、可溶性碳氮及矿质态氮等的测定,另一份风干过2 mm 筛,挑出肉眼可见的根系,用于土壤有机碳、全氮等的测定。

1.3 项目分析与测试

土壤容重的测定采用环刀法。

土壤有机碳和全氮测定:待测土样先加2

表 1 不同施肥处理的施肥量

Table 1 Fertilization amount in different fertilization treatment

处理	小麦			大豆			玉米		
	N	P ₂ O ₅	M	N	P ₂ O ₅	M	N	P ₂ O ₅	M
CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M	0	0	0	0	0	0	0	0	18.6
NP	150	75	0	75	150	0	150	75	0
NPM	150	75	0	75	150	0	150	75	18.6
CK _h	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	37.2
N ₂ P ₂	300	150	0	150	300	0	300	150	0
N ₂ P ₂ M ₂	300	150	0	150	300	0	300	150	37.2

mol·L⁻¹的盐酸去除碳酸盐后,采用元素分析仪(EA 3000)测定土样的有机碳和全氮含量。

矿质氮测定:称取 10.00 g 鲜土,加入 50 mL 1 mol·L⁻¹的 KCl 溶液,振荡 30 min,过滤后滤液中的硝态氮、铵态氮用流动分析仪(FIA star 5000 Analyzer)测定,同时用烘干法测定土壤含水量,硝态氮、铵态氮之和为矿质氮。

微生物生物量碳、氮的测定:将新鲜土样过 2 mm 筛后混匀,用去离子水调节土壤湿度至田间持水量的 40% 左右,然后将一定量土壤置于密闭的塑料箱中,并放置在 25℃ 恒温箱中进行培养。然后称取 10.00 g 培养土壤 2 份置于烧杯中,一份置于装有去乙醇氯仿的干燥器中(干燥器中放一小杯 NaOH 溶液用于吸收 CO₂),将干燥器抽至真空使氯仿沸腾 5 min,关闭干燥器阀门在 25℃ 暗室放置 24 h,另外一份置于无氯仿的干燥器中,在相同条件下放置 24 h。熏蒸结束后将土壤无损的转移至塑料瓶中,加入 40 mL 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 溶液,振荡 30 min 后过滤,吸取滤液用 Multi N/C 3100 分析仪测定其中的碳、氮含量,同时用烘干法测定土壤含水量,熏蒸土壤的微生物生物量碳氮值与未熏蒸土壤微生物生物量碳氮值的差值即为所测土壤的微生物生物量碳氮值。

可溶性碳氮的测定:称取 10.00 g 过 2 mm 筛的鲜土于塑料瓶中,加入 40 mL 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 溶液振荡 30 min 后过滤,吸取滤液用 Multi N/C 3100 测定可溶性碳、氮的含量,同时用烘干法测定土壤含水量,测定的碳、氮含量即为可溶性碳、氮值。

1.4 数据处理与分析

土壤有机碳、氮储量按以下公式计算:

$$M = C_i \times B_i \times D_i \times 0.1$$

式中, M 为单位面积的碳、氮储量(mg·hm⁻²); C_i 为第 i 层有机碳、氮的含量(g·kg⁻¹); B_i 为第 i 层

土壤容重(g·cm⁻³); D_i 为第 i 层土层厚度(cm)。

土壤矿质氮储量按以下公式计算:

$$M_{\text{Mineral N}} = N_i \times B_i \times D_i \times 0.1$$

式中, $M_{\text{Mineral N}}$ 为单位面积的矿质氮储量(kg·hm⁻²); N_i 为第 i 层矿质氮的含量(mg·kg⁻¹); B_i 为第 i 层土壤容重(g·cm⁻³); D_i 为第 i 层土层厚度(cm)。

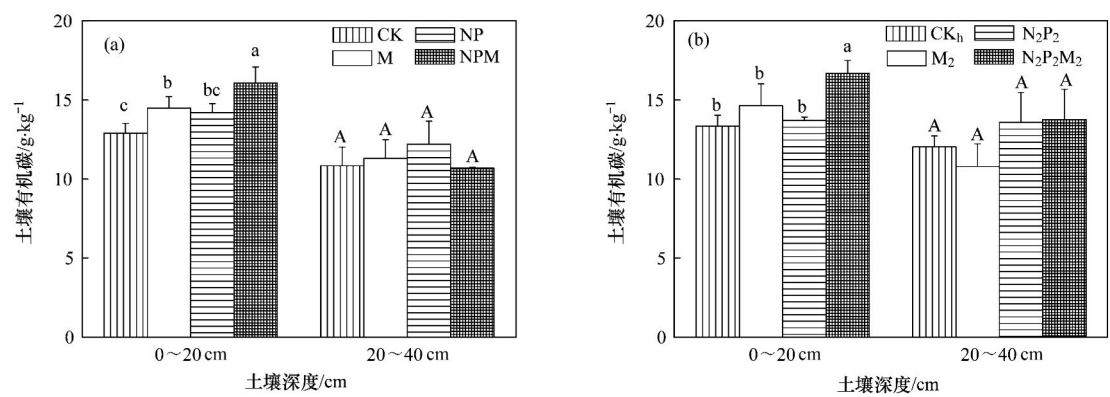
试验结果的统计分析采用 SPSS 16.0 进行差异性检验、多重比较,采用 Origin 8.0 作图。

2 结果与分析

2.1 长期定位施肥对黑土有机碳、全氮含量及储量的影响

长期不同施肥对表层土壤有机碳含量具有显著影响,而亚表层土壤对各施肥处理的响应不显著(图 1)。对于常量施肥处理,有机肥的施入能显著增加表层土壤 SOC,其中有机无机配施(NPM)SOC 含量最高,为 16.09 g·kg⁻¹,相对于 CK 提高了 24.6%,而 M、NP 处理 SOC 相对 CK 仅分别提高了 12.3%、10.2%。而对于高量施肥,仅 N₂P₂M₂ 处理显著提高了表层土壤 SOC 含量,为 16.69 g·kg⁻¹,相对于 CK_h 提高了 25.0%,其余处理间无显著差异。而亚表层土壤 SOC 含量对施肥无响应。

长期施肥对土壤全氮也具有显著影响,如图 2 所示。施肥显著影响了表层土壤全氮含量,而对亚表层全氮含量无显著影响。对于常量施肥表层土壤,M、NP、NPM 处理均能显著增加土壤 TN 含量,其中以 NPM 处理土壤 TN 含量最高,为 1.61 g·kg⁻¹,相对 CK 处理提高了 29.5%,而 M、NP 处理相对于 CK 处理 TN 值仅分别提高了 15.6%、14.8%。对于高量施肥表层土壤,只有 N₂P₂M₂ 处理能够显著提高土壤 TN 值,其值为 1.77,相对于 CK_h 提高了 32.8%,而 M₂、N₂P₂ 处理 TN 含量与 CK_h 处理无显著差异。



图中不同相同字母表示处理之间差异显著性未达到 $P < 0.05$ 水平,下同

图 1 不同施肥处理下土壤有机碳含量

Fig. 1 Soil organic carbon content after various long-term fertilizations

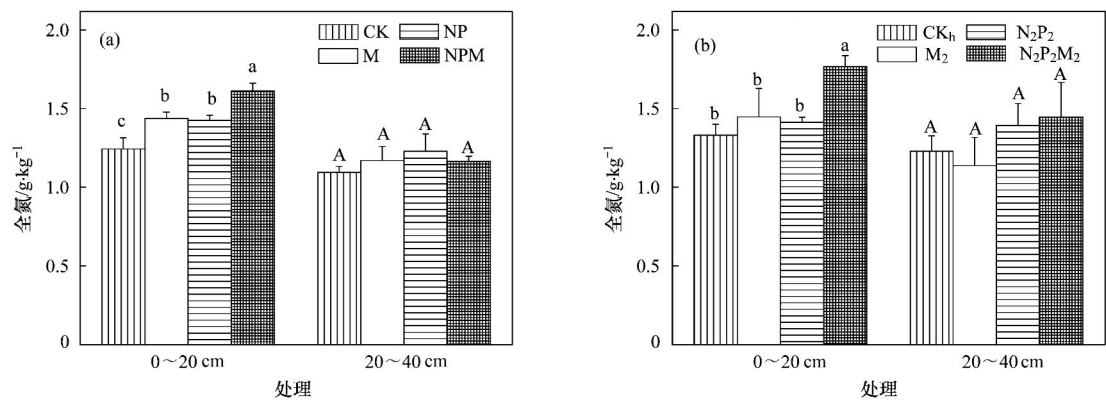


图 2 不同施肥处理下土壤全氮含量

Fig. 2 Soil total nitrogen under different fertilization

土壤表层和亚表层有机碳和氮储量对施肥的响应不仅受到有机碳、全氮含量的影响,也受到土壤容重等影响. 土壤 0~20 cm 碳储量在 38.15~46.41 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 范围内, 20~40 cm 土壤碳储量的范围是

31.34~41.01 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 0~40 cm 土壤碳储量的范围是 69.64~84.34 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 而 0~40 cm 土壤氮储量 6.86~8.67 $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 但各处理间土壤有机碳、氮储量均无显著差异(表 2).

表 2 不同施肥处理下土壤有机碳、全氮储量/ $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$

处理	土壤碳储量			土壤氮储量		
	0~20 cm	20~40 cm	0~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~40 cm
CK	38.15 ± 1.18	31.49 ± 1.33	69.64 ± 0.17	3.68 ± 0.13	3.18 ± 0.11	6.86 ± 0.19
M	42.99 ± 3.33	33.73 ± 2.68	76.72 ± 1.52	4.27 ± 0.35	3.49 ± 0.22	7.76 ± 0.16
NP	41.21 ± 2.59	35.69 ± 3.26	76.91 ± 5.84	4.13 ± 0.20	3.59 ± 0.29	7.72 ± 0.48
NPM	46.41 ± 5.38	31.34 ± 0.27	77.75 ± 5.60	4.63 ± 0.48	3.42 ± 0.02	8.05 ± 0.46
CK _h	39.34 ± 0.93	35.67 ± 1.13	75.01 ± 1.82	3.93 ± 0.17	3.63 ± 0.07	7.56 ± 0.21
M ₂	43.89 ± 4.52	32.92 ± 1.39	76.81 ± 5.91	4.34 ± 0.52	3.46 ± 0.03	7.80 ± 0.55
N ₂ P ₂	43.33 ± 1.24	41.01 ± 7.82	84.34 ± 7.19	4.46 ± 0.09	4.20 ± 0.66	8.67 ± 0.59
N ₂ P ₂ M ₂	40.31 ± 2.93	40.43 ± 2.54	80.75 ± 5.43	4.27 ± 0.32	4.25 ± 0.15	8.52 ± 0.44

2.2 长期定位施肥对土壤矿质氮的影响

土壤矿质氮对不同施肥处理的响应存在差异. 如表 3 所示, 单施氮肥能显著提高表层和亚表层土壤矿质氮的含量. 而单施有机肥以及有机无机配施

则表现不一致, 常量单施有机肥能显著增加 0~20 cm 土壤矿质氮含量, 但增量有机肥 M₂ 处理下矿质氮含量及储量与对照相比无显著差异, 主要原因可能与微生物在高量有机肥分解有机碳时对矿质氮的

消耗有关. 常量及高量化肥和有机无机配施有机肥均能显著增加土壤表层及亚表层矿质氮含量. 从表 3 还可以看出常量或高量单施化肥或有机无机配施

土壤 0~20 cm、20~40 cm 以及 0~40 cm 土壤的矿质氮储量均最高, 尽管矿质氮的增加有利于作物增产, 但也存在潜在的环境污染风险.

表 3 不同施肥处理下土壤矿质氮、矿质氮储量¹⁾

Table 3 Soil mineral nitrogen and mineral nitrogen stock under different fertilization

处理	矿质氮(硝态氮+铵态氮)含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		矿质氮储量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$		
	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~40 cm
CK	$3.68 \pm 0.55\text{c}$	$6.88 \pm 0.24\text{b}$	$10.76 \pm 1.16\text{b}$	$20.04 \pm 1.01\text{b}$	$30.80 \pm 1.20\text{c}$
M	$9.69 \pm 1.28\text{b}$	$6.91 \pm 0.17\text{b}$	$28.99 \pm 4.95\text{a}$	$20.58 \pm 0.44\text{b}$	$49.58 \pm 5.31\text{b}$
NP	$12.79 \pm 1.13\text{a}$	$12.15 \pm 0.50\text{a}$	$37.03 \pm 3.94\text{a}$	$35.53 \pm 2.62\text{a}$	$72.56 \pm 6.53\text{a}$
NPM	$14.12 \pm 0.50\text{a}$	$10.24 \pm 1.31\text{a}$	$40.51 \pm 3.92\text{a}$	$29.98 \pm 3.71\text{a}$	$70.49 \pm 5.20\text{ab}$
CK _h	$4.08 \pm 0.31\text{C}$	$7.02 \pm 0.17\text{B}$	$12.08 \pm 1.18\text{C}$	$20.79 \pm 0.47\text{B}$	$32.87 \pm 1.64\text{C}$
M ₂	$8.60 \pm 0.63\text{C}$	$7.14 \pm 0.43\text{B}$	$25.38 \pm 3.07\text{C}$	$21.67 \pm 0.42\text{B}$	$47.05 \pm 3.08\text{C}$
N ₂ P ₂	$36.44 \pm 3.55\text{A}$	$37.43 \pm 3.65\text{A}$	$115.38 \pm 9.06\text{A}$	$112.73 \pm 13.71\text{A}$	$228.11 \pm 13.27\text{A}$
N ₂ P ₂ M ₂	$19.01 \pm 0.04\text{B}$	$11.02 \pm 0.92\text{B}$	$45.85 \pm 2.55\text{B}$	$32.17 \pm 1.77\text{B}$	$78.02 \pm 0.78\text{B}$

1) 同一列不同大、小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上显著

2.3 长期施肥对可溶性碳、氮的影响

长期施肥后, 不同处理下土壤可溶性碳、氮含量存在显著差异(图 3). 常量施有机肥及有机无机配施能显著增加表层及亚表层土壤可溶性碳含量. 常量施肥处理表层及亚表层土壤可溶性碳含量均以 NPM 处理为最高, 均比对照分别提高了 110% 和 87%. 而高量施肥 0~20 cm 土壤可溶性碳的值要略高于常量施肥相应处理, 其范围为 42.00~105.00 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中 N₂P₂M₂ 处理可溶性碳含量最高, 比对照分别提高了 143% 和 85%.

长期施肥也显著影响了土壤可溶性氮含量(图 3). 有机肥或有机无机配施显著提高了表层及亚表层土壤可溶性氮含量, 其中 NPM 和 N₂P₂M₂ 处理表层土壤可溶性氮含量分别为 22.75 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 27.56 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均比对照提高 87%, 而亚表层土壤可溶性氮含量略低于表层, 比对照分别增加了 120% 和 79%. 值得注意的是, 常量单施化肥也显著提高表层及亚表层土壤可溶性氮含量, 而高量的化肥配施降低了亚表层土壤可溶性氮含量, 可能是化肥单施条件下, 土壤有机质矿化后而向下移动.

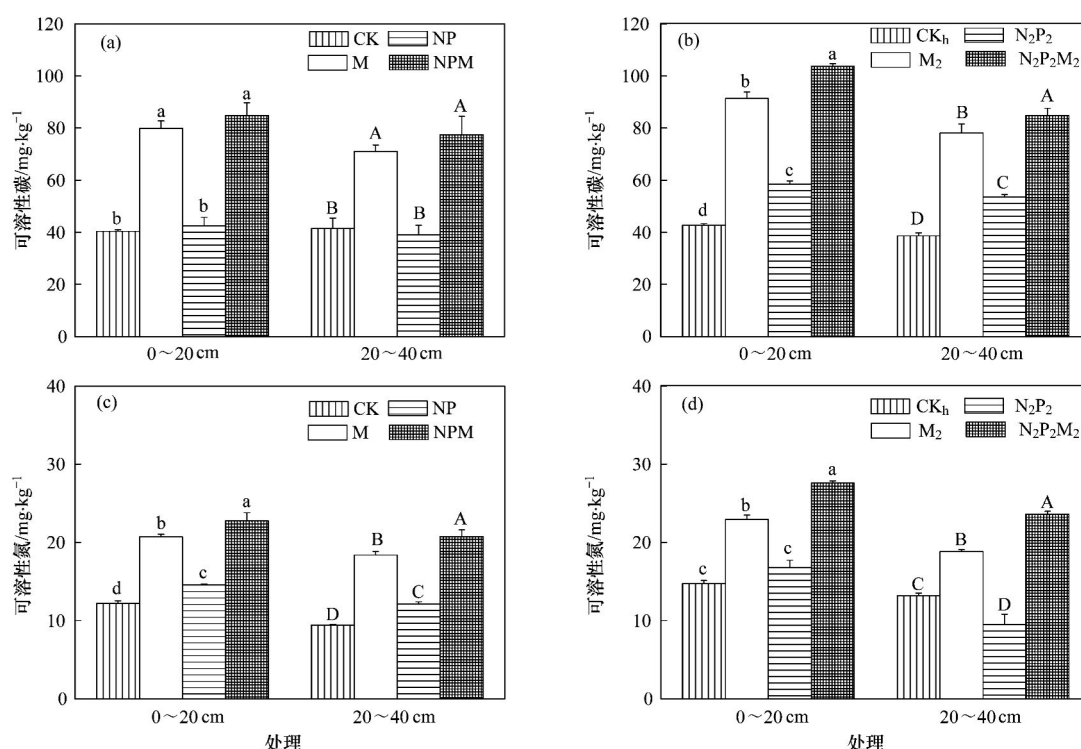


图 3 不同施肥处理下土壤可溶性碳氮

Fig. 3 Soil dissolved organic carbon and nitrogen under different fertilization

2.4 长期施肥对微生物生物量碳、氮的影响

施肥 31 a 后, 不同处理土壤微生物生物量碳、氮含量存在显著差异(图 4)。与对照相比, 单施化肥、有机肥、有机无机配施均能显著增加土壤微生物生物量碳含量。表层土壤微生物生物量碳含量要高于亚表层。各处理土壤微生物生物量碳含量的大小顺序为: 有机无机配施 > 单施有机肥 > 单施化肥 > 不施肥。

对于常量施肥, NPM 处理表层及亚表层土壤微生物生物量碳含量最高, 分别为 $272.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $198.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比对照提高了 57.8% 和 44.7%。高量施肥土壤微生物生物量碳含量要略高于常量施肥对应处理。而 M_2 、 $N_2P_2M_2$ 处理则能显著提高土壤微生物生物量碳含量, 其中 $N_2P_2M_2$ 处理土壤微生物生物量碳含量最高, 为 $316.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比对照提高 75.2%。而对于亚表层土壤 $N_2P_2M_2$ 处理微生物生物量碳含量最高, 为 $237.83 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比对照提高 66.1%。

施肥 31 a 后, 不同处理之间土壤微生物生物量氮含量存在显著差异。对于常量施肥, 土壤微生物生物量氮的变化范围是 $8.00 \sim 40.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表层土壤 M、NPM 处理土壤微生物生物量氮含量显著高于其它处理, 其中 NPM 处理微生物生物量氮含量最高, 为 $39.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比对照提高 218.5%; 亚表层土壤 $N_2P_2M_2$ 处理微生物生物量氮含量最高, 值为 $32.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比对照提高 259.9%。高量施肥土壤微生物生物量氮的变化范围是 $9.00 \sim 39.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 单施有机肥以及有机无机配施显著增加土壤微生物生物量氮, 而单施化肥并不能显著增加土壤微生物生物量氮含量。

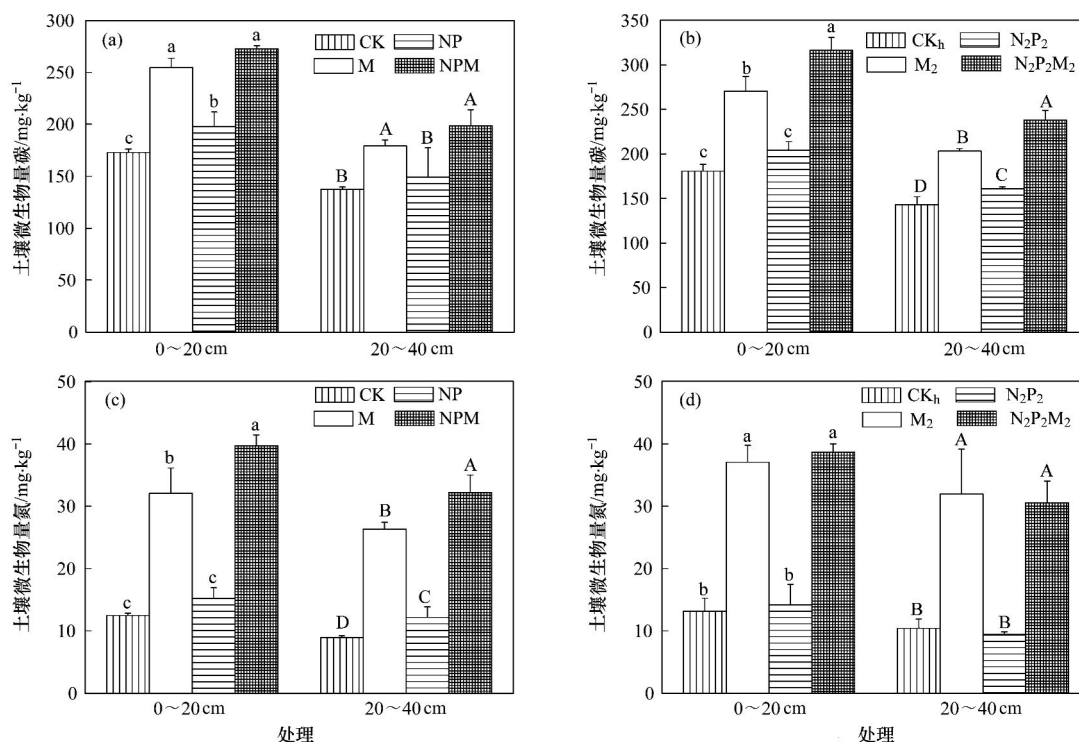


图 4 不同施肥处理下土壤微生物生物量碳、氮含量

Fig. 4 Soil microbial biomass carbon and nitrogen under different fertilization

2.5 长期施肥对土壤活性有机碳、氮比例的影响

长期施肥不仅会影响土壤微生物生物量碳、氮、可溶性碳、氮含量, 也显著改变了土壤微生物生物量碳、氮及可溶性碳、氮在总有机碳及全氮中所占的比例(表 4)。微生物生物量碳/有机碳的值称为土壤微生物熵, 土壤微生物熵的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。从表 4 可以看出, 不

论对于表层土壤还是亚表层土壤, 有机肥的施入均能显著提高土壤的微生物量熵, 但是单施化肥并不能显著提高土壤的微生物量熵。而土壤微生物生物量氮/全氮的规律与土壤微生物量熵基本一致。可溶性碳是有机碳中比较活跃的部分, 总体上说, 不论是对于常量施肥还是高量施肥, 有机无机配施及单施有机肥均能够显著提高表层及亚表层土壤 DOC/SOC 值。但单施化肥仅能提高高量施肥表层土壤 DOC/SOC 值。可

溶性氮的规律与可溶性碳不尽相同,单施有机肥以及化肥配施有机肥均能显著提高 DN/TN 的值,单施化

肥处理并没有显著提高 DN/TN 的值,高量 N_2P_2 处理反而显著降低了 DN/TN 的值。

表 4 长期施肥下土壤 SMBC/SOC、SMBN/TN、DOC/SOC、DN/TN 的变化/%

Table 4 Change of soil SMBC/SOC, SMBN/TN, DOC/SOC, DN/TN under long term fertilization/%

处理	微生物生物量碳/总有机碳		微生物生物量氮/全氮		可溶性碳/总有机碳		可溶性氮/全氮	
	0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm
CK	1.34b	1.27b	1.01b	0.82c	0.31b	0.39b	0.98b	0.86c
M	1.76a	1.60a	2.24a	2.26b	0.55a	0.63a	1.44a	1.58b
NP	1.39b	1.23b	1.07b	1.00c	0.30b	0.32b	1.02b	1.00c
NPM	1.70a	1.86a	2.47a	2.77a	0.53a	0.72a	1.41a	1.78a
CK _h	1.35B	1.19B	0.99B	0.85C	0.32C	0.32B	1.11B	1.07B
M ₂	1.85A	1.89A	2.60A	2.81A	0.62A	0.72A	1.60A	1.66A
N ₂ P ₂	1.49B	1.24B	1.01B	0.70C	0.43B	0.41B	1.18B	0.70C
N ₂ P ₂ M ₂	1.90A	1.73A	2.20A	2.12B	0.62A	0.62A	1.56A	1.64A

3 讨论

土壤有机碳包括动植物及微生物的残体、排泄物、分泌物及其部分分解产物和土壤腐殖质。土壤有机碳的储量则是进入土壤的动植物残体量与其在土壤微生物作用下分解损失量二者之间平衡的结果^[27]。大量研究表明,在土壤类型、气候条件和利用方式相同的条件下,有机肥或有机无机配施都能显著提高土壤有机碳含量^[28~30],本研究结果与此相一致。而随着土壤深度的增加,有机碳含量降低,处理之间的差异逐渐减小。这是由于表层土壤接受植物凋落物、根茬和有机肥,有机碳来源丰富,有机碳投入量大于有机碳的分解损失量,而亚表层土壤有机碳的投入量少,仅为一些植物细根、根系分泌物和部分从土壤表层淋溶下来的有机碳,这些来源的有机碳随着土层的加深数量减少,在土壤剖面中的移动性弱。本研究结果表明化肥单施不能促进有机碳及氮素的累积。Khan 等^[31]认为长期施用化肥,虽然促进了根系生长,增加了作物根茬残留,但同时也使土壤微生物活性提高,加速了土壤中残茬和有机碳的分解矿化,使土壤有机碳总量下降。马成泽等^[28]也认为化肥使有机碳的水平基本保持不变或下降。而孟磊等^[32]结果表明均衡施用化学肥料对土壤有机碳有促进作用,主要是由于试验前原始土壤的有机碳水平不同,当试验前土壤有机碳低于最低平衡点时,施用化肥能够增加土壤有机碳。

土壤中的全氮及其氮储量不仅与土壤本身性质有关,而且与施肥、耕作、所种作物密切相关^[33]。土壤氮储量越高,土壤持续的供氮能力越强。本研究结果证实了有机无机配施可以促进土壤有机碳积累,从而增加土壤全氮的含量。但是本研究中,无论是单施化肥还是有机无机配施对于土壤 0 ~ 40 cm 的氮

处理无显著影响,仅增加了其变异性。梁国庆等^[34]的研究也发现,长期单施化学氮肥不能提高表层土壤的全氮含量,且连续单施用化肥会使土壤质量下降^[35]。而杜建军等^[36]认为,施用氮肥能够明显提高土壤 0 ~ 60 cm 全氮含量。本研究表明在黑土旱地上,长期单施化肥 0 ~ 20 cm 土壤全氮储量增加较小,长期施用有机肥料,会在一定程度上促进土壤氮的积累,但这种施肥方式,也大大增加了矿质氮与土壤总氮的比例。土壤中的可溶性碳、氮是土壤有机碳、全氮中非常活跃的部分。本研究表明有机肥的施入不仅能够引起可溶性碳氮含量的增加,同时还能够显著提高可溶性碳、氮在土壤总有机碳和全氮中所占的比例。倪进治等^[37]研究表明,红砂土中加入稻草秸秆和猪粪后,水溶性有机碳的含量与对照相比都有较大幅度的提高,尤其在有机肥加入后第一周效果较明显。而关于氮肥对于可溶性碳氮的作用,目前研究结论不统一。Cronan 等^[38]发现在森林土壤中施加氮肥 NH_4Cl , DOC 释放速率降低 20%。其主要原因在于 pH 的降低和离子强度的增加。森林地被物或 A 层施加氮后 DOC、DN 增加或无变化的结果也有报道^[19]。Sinsabaugh 等^[39]研究发现,森林系统施用 $NaNO_3$ 后,土壤水溶性碳显著提高。推测原因是氮肥施入后氧化酶活性降低导致。McDowell 等^[19]的研究表明,施氮后森林地被物的 DOC 浓度提高 10% ~ 30%,但差异未达显著水平,而各施氮处理 DN 均显著增加。土壤溶液中 DOC 浓度是一系列 DOC 产生与消耗过程相平衡的结果,McDowell 等^[19]推测森林土壤施氮肥会刺激微生物对 DOC 的消耗,降解新近凋落物、根系分泌物及微生物产物,使得各研究结果不尽一致。

许多研究表明不合理的施肥会导致土壤无机氮的增加,进而引起硝态氮淋溶污染。徐志伟等^[40]研

究发现我国农田生态系统受到施肥等农业活动影响,浅层地下水存在一定程度上的硝态氮污染,巨晓堂等^[41]研究发现氮肥对水体环境的影响主要是由不合理大量施用氮肥造成的,张云贵等^[42]研究表明,氮磷钾配施有机肥是控制农田硝态氮淋失风险的重要措施.而本研究表明,尽管单施化肥显著提高了可溶性碳、氮的含量,但并没有改变其比例,而有机无机配施不仅会引起土壤矿质氮储量的大幅度增加,而且显著的提高了可溶性氮在土壤全氮中的比例,可能会引起潜在的环境污染,因此,在推行大量施用有机肥维持和提升土壤肥力的同时,氮的淋失风险应该引起重视.

土壤微生物生物量碳、氮反映了土壤微生物的活动状态,受土壤温度、水分、营养状况等因素的影响.本研究表明有机肥的施入能够提高土壤微生物生物量碳氮,这与郑勇等^[43]研究长期施厩肥处理能显著提高土壤微生物量的结果相一致.一定程度说明了有机肥的施入提高了土壤的微生物活性,化肥配施有机肥处理显著增加土壤微生物生物量碳含量,主要原因是化肥的施用促进了作物生长,根系分泌物相应增加,同时有机肥带入了大量活的微生物,提供给微生物增殖的大量碳源^[44].但是对于单施化肥对于土壤微生物生物量碳氮的作用,研究结论不一致.土壤微生物生物量氮的含量是土壤微生物对氮素矿化与固持作用的综合反映.有机无机配施土壤微生物生物量氮含量最高,主要原因是有机肥施入土壤后为土壤微生物提供碳源和能源,同时化肥中矿质氮的施入会被微生物所固定,从而使土壤微生物体相应增加^[45].有机肥的施入也增加了土壤微生物量熵,从而提高了土壤中活性碳氮所占的比例.

4 结论

本研究结果表明长期施用有机肥尤其是化肥配施有机肥能增加土壤有机碳、全氮及活性有机碳、氮的含量,但表层及亚表层土壤有机碳、全氮储量对于长期有机肥的施用无响应.土壤微生物生物量碳氮、可溶性碳、氮所占有机碳和全氮的比例对于施肥的响应较为敏感,有机肥的施用不仅能够显著增加土壤微生物生物量碳、氮,可溶性碳、氮的含量,也能显著提高微生物生物量、可溶性碳氮在总有机碳、氮中所占的比例.有机无机配施作为一种有效的施肥模式,显著提高了黑土表层和亚表层土壤有机碳、氮活性,但同时也易引起潜在的环境污染,应当引起重视.

参考文献:

- [1] 陈庆强, 沈承德, 易惟熙, 等. 土壤碳循环研究进展[J]. 地球科学进展, 1998, **13**(6): 555-563.
- [2] 郭李萍, 林而达. 减缓全球变暖与温室气体吸收汇研究进展[J]. 地球科学进展, 1999, **14**(4): 384-390.
- [3] 曲建升, 孙成权, 张志强, 等. 全球变化科学中的碳循环研究进展与趋向[J]. 地球科学进展, 2003, **18**(6): 980-987.
- [4] Pandey C B, Singh G B, Singh S K, *et al.* Soil nitrogen and microbial biomass carbon dynamics in native forests and derived agricultural land uses in humid tropical climate of India[J]. Plant and Soil, 2010, **333**(1-2): 453-467.
- [5] Six J, Feller C, Denef K, *et al.* Soil organic matter biota and aggregation in temperate and tropical soils-effects of no-tillage[J]. Agronomie, 2002, **22**(7-8): 755-775.
- [6] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry, 2000, **48**(1): 7-20.
- [7] Soon Y K, Arshad M A. Effects of cropping systems on nitrogen, phosphorus and potassium forms and soil organic carbon in a Grey Luvisol[J]. Biology and Fertility of Soils, 1996, **22**(1-2): 184-190.
- [8] Janzen H H, Campbell C A, Izaurrealde R C, *et al.* Management effects on soil C storage on the Canadian prairies[J]. Soil and Tillage Research, 1998, **47**(3-4): 181-195.
- [9] Campbell C A, Selles F, Lafond G P, *et al.* Tillage-fertilizer changes: effect on some soil quality attributes under long-term crop rotations in a thin Black Chernozem[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2001, **81**(2): 157-165.
- [10] Mazzoncini M, Sapkota T B, Bärberi P, *et al.* Long-term effect of tillage, nitrogen fertilization and cover crops on soil organic carbon and total nitrogen content[J]. Soil and Tillage Research, 2011, **114**(2): 165-174.
- [11] Bedard-Haughn A, Matson A L, Pennock D J. Land use effects on gross nitrogen mineralization, nitrification, and N₂O emissions in ephemeral wetlands[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, **38**(12): 3398-3406.
- [12] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 不同氮肥施用后土壤各氮库的动态研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, **12**(1): 92-94.
- [13] 劳秀荣, 孙伟红, 王真, 等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2003, **40**(4): 618-623.
- [14] Govi M, Francioso O, Ciavatta C, *et al.* Influence of long-term residue and fertilizer applications on soil humic substances[J]. Soil Science, 1992, **154**(1): 8-13.
- [15] Kautz T, Wirth S, Ellmer F. Microbial activity in a sandy arable soil is governed by the fertilization regime[J]. European Journal of Soil Biology, 2004, **40**(2): 87-94.
- [16] Mastro R E, Chhonkar P K, Singh D, *et al.* Changes in soil biological and biochemical characteristics in a long-term field trial on a sub-tropical inceptisol[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, **38**(7): 1577-1582.
- [17] 李东坡, 陈利军, 武志杰, 等. 不同施肥黑土微生物量氮变化特征及相关因素[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(10): 1891-1896.

- [18] Mc Gill W B, Camnon K R, Robertson J A, *et al.* Dynamics of soil microbial biomass and water-soluble organic C in Breton L after 50 years of cropping to two rotations[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1986, **66**(1): 1-19.
- [19] McDowell W H, Currie W S, Abert J D, *et al.* Effects of chronic nitrogen amendment on production of dissolved organic carbon and nitrogen in forest soils[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1998, **105**(1-2): 175-182.
- [20] 倪进治, 徐建民, 谢正苗. 土壤水溶性有机碳的研究进展[J]. *生态环境*, 2003, **12**(1): 71-75.
- [21] Vestgarden L S, Abrahamsen G, Stuanes A O. Soil solution response to nitrogen and magnesium application in a Scots pine forest[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, **65**(6): 1812-1823.
- [22] Gundersen P, Emmett B A, Kjonaas O J, *et al.* Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests: a synthesis of NITREX data[J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, **101**(1-3): 37-55.
- [23] 刘畅, 唐国勇, 童成立, 等. 不同施肥措施下亚热带稻田土壤碳、氮演变特征及其耦合关系[J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(7): 1489-1493.
- [24] Zhang W J, Xu M G, Wang B, *et al.* Soil organic carbon, total nitrogen and grain yields under long-term fertilizations in the upland red soil of southern China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, **84**(1): 59-69.
- [25] 乔云发, 苗淑杰, 韩晓增. 长期施肥条件下黑土有机碳和氮的动态变化[J]. *土壤通报*, 2008, **39**(3): 545-548.
- [26] 王光华, 齐晓宁, 金剑, 等. 施肥对黑土农田土壤全碳、微生物量碳及土壤酶活性的影响[J]. *土壤通报*, 2007, **38**(4): 661-666.
- [27] Post W M, King A W, Wullschlegel S D. Soil organic matter models and global estimates of soil organic carbon[A]. In: Powlson D S, Smith P, Smith J U, (Eds.). *Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-Term Datasets*[C]. Berlin: Heidelberg, 1996. 201-222.
- [28] 马成泽, 周勤, 何方. 不同肥料配合施用土壤有机碳盈亏分布[J]. *土壤学报*, 1994, **31**(1): 34-41.
- [29] 祝华明, 王美勤, 吴樟梅. 施肥对红砂田有机质及土壤养分演变与作物产量的影响研究[J]. *土壤通报*, 1995, **26**(2): 76-77.
- [30] 张负申. 不同施肥处理对壤土和黄绵土有机质氧化稳定性的影响[J]. *河南农业大学学报*, 1996, **30**(1): 80-84.
- [31] Khan S A, Mulvaney R L, Ellsworth T R, *et al.* The myth of nitrogen fertilization for soil carbon sequestration[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, **36**(6): 1821-1832.
- [32] 孟磊, 丁维新, 蔡祖冲, 等. 长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸影响[J]. *地球科学进展*, 2005, **20**(6): 687-692.
- [33] 田秀平, 薛箐芳, 韩晓日. 长期轮作和连作对白浆土中氮素的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, **21**(1): 185-187.
- [34] 梁国庆, 林葆, 林继雄, 等. 长期施肥对石灰性潮土氮素形态的影响[J]. *植物养与肥料学报*, 2000, **6**(1): 3-10.
- [35] Persson J, Kirchmann H. Carbon and nitrogen in arable soils as affected by supply of N fertilizers and organic manures[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 1994, **51**(1-2): 249-255.
- [36] 杜建军, 李生秀, 李世清, 等. 不同肥水条件对旱地土壤供氮能力的影响[J]. *西北农业大学学报*, 1998, **26**(6): 1-5.
- [37] 倪进治, 徐建民, 谢正苗, 等. 不同有机肥料对土壤生物活性有机质组分的动态影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, **7**(4): 374-378.
- [38] Cronan C S, Lakshman S, Patterson H H. Effects of disturbance and soil amendments on dissolved organic carbon and organic acidity in red pine forest floors[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1992, **21**(3): 457-463.
- [39] Sinsabaugh R L, Zak D R, Gallo M, *et al.* Nitrogen deposition and dissolved organic carbon production in northern temperate forests[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**(9): 1509-1515.
- [40] 徐志伟, 张心昱, 孙晓敏, 等. 2004~2009年我国典型陆地生态系统地下水硝态氮评价[J]. *环境科学*, 2011, **32**(10): 2827-2833.
- [41] 巨晓堂, 张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响[J]. *生态环境*, 2003, **12**(1): 24-28.
- [42] 张云贵, 刘宏斌, 李志宏, 等. 长期施肥条件下华北平原农田硝态氮淋失风险的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, **11**(6): 711-716.
- [43] 郑勇, 高勇生, 张丽梅, 等. 长期施肥对旱地红壤微生物和酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, **14**(2): 316-321.
- [44] 罗明, 文启凯, 纪春燕, 等. 不同施肥措施对棉田土壤微生物量及其活性的影响[J]. *土壤*, 2002, (1): 53-55.
- [45] Aoyama M, Nozawa J. Microbial biomass nitrogen and mineralization-immobilization processes of nitrogen in soils incubated with various organic materials[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1993, **39**(1): 23-32.

CONTENTS

Characterization of Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Hazy Weather During 16 th Asian Games in Guangzhou	TAO Jun, CHAI Fa-he, GAO Jian, <i>et al.</i> (409)
PM _{2.5} Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area	ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, <i>et al.</i> (416)
Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China	WANG Qian, CHEN Chang-hong, WANG Hong-li, <i>et al.</i> (424)
Study on Number Concentration Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles in Hangzhou	XIE Xiao-fang, SUN Zai, FU Zhi-min, <i>et al.</i> (434)
Pollution Characteristics and Source Identification of Atmospheric Particulate Matters <i>n</i> -Alkanes in Baoding City	LI Xing-ru, DU Xi-qiang, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (441)
Study on Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in Xi'an City During the Spring Festival	ZHOU Bian-hong, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ge-hui (448)
Characteristics of PM ₁₀ and PM _{2.5} Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin, LIU Xin-dong, TAO Jun (455)
Assessment of TVOC and Odor in the Remediation Site of Contaminated Soil and Groundwater Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (462)
Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control	ZHANG Gang, WANG Ning, AI Jian-chao, <i>et al.</i> (468)
Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique	XU Lin-bo, GAO Qin-feng, DONG Shuang-lin, <i>et al.</i> (476)
Eco-environmental Evolution Inferred from <i>n</i> -Alkanes and $\delta^{13}\text{C}$ Records in the Sediments of Shijiu Lake	OU Jie, WANG Yan-hua, YANG Hao, <i>et al.</i> (484)
Distribution of PGEs Contents and Its Factors in Snowfall and Snow Cover over the Arid Region in Changji City	LIU Yu-yan, LIU Hao-feng, ZHANG Lan (494)
Effect of Dust Deposition Collection Methods on Collection Efficiency	ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao (499)
Regionalization of the Freshwater Eco-regions in the Haihe River Basin of China	SUN Ran-hao, JI Yu-he, SHANG Lin-yuan, <i>et al.</i> (509)
Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	SHI Zhi-qiang, ZHANG Yun-lin, WANG Ming-zhu, <i>et al.</i> (517)
Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll- <i>a</i> Retrieval Model in Inland Water Body	HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jiao, <i>et al.</i> (525)
Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate	QIU Zhao-zheng, LUO Zhuan-xi, ZHAO Yan-ling, <i>et al.</i> (532)
Spatial Variation of Soil Moisture/Salinity and the Relationship with Vegetation Under Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland	ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (540)
Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin	ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, <i>et al.</i> (547)
Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River	CUI Yu-jie, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (555)
Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area	DONG Wen, LI Huai-en, LI Jia-ke (561)
Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage	REN Feng, LU Yi-xia, LIU Qin, <i>et al.</i> (570)
Inactivation of <i>Mycobacteria mucogenicum</i> in Drinking Water: Chlorine Resistance and Mechanism Analysis	ZHENG Qi, CHEN Chao, ZHANG Xiao-jian, <i>et al.</i> (576)
Partial Biological Characteristics and Algicidal Activity of an Algicidal Bacterium	LI San-hua, ZHANG Qi-ya (583)
Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on <i>Skeletonema costatum</i> Antioxidant Enzyme Activities	YAO Yuan, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (589)
Mechanism and Kinetics of Phenol Degradation by TiO ₂ Photocatalytic Combined Technologies	ZHANG Yi, HUANG Ruo-nan, WANG Xiao-min, <i>et al.</i> (596)
Biodegradation Characteristics of Organic Pollutants Contained in Tannery Wastewater	WANG Yong, LI Wei-guang, YANG Li, <i>et al.</i> (604)
Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by <i>Streptomyces</i> sp. FX645	XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping (611)
Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline	YANG Ji-xian, ZENG Hong-yun, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (616)
Study on the <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization	JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (622)
Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content	CHEN Han-long, YAN Yuan-yuan, HE Qun-biao, <i>et al.</i> (629)
Effect of Natural and Hydrothermal Synthetic Goethite on the Release of Methane in the Anaerobic Decomposition Process of Organic Matter	YAO Dun-fan, CHEN Tian-hu, WANG Jin, <i>et al.</i> (635)
Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Spent Etching Solution and Its Copper Salt Recycling Products	QING Xian, HAN Jing-lei, WEN Yan-shen (642)
Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (647)
Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution	YANG Yan, YU Yun-jiang, WANG Zong-qing, <i>et al.</i> (653)
Groundwater Organic Pollution Source Identification Technology System Research and Application	WANG Xiao-hong, WEI Jia-hua, CHENG Zhi-neng, <i>et al.</i> (662)
Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain	ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei (668)
Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization	LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (676)
Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return	ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, <i>et al.</i> (685)
Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations	LUO Lu, ZHOU Ping, TONG Cheng-li, <i>et al.</i> (692)
Aging Process of Cr(III) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis	ZHENG Shun-an, ZHENG Xiang-qun, LI Xiao-zheng, <i>et al.</i> (698)
Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise	PAN Feng, WANG Li-li, ZHAO Hao, <i>et al.</i> (705)
Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant	LIU Fang, WANG Shu-xiao, WU Qing-ru, <i>et al.</i> (712)
Residue of Organic Fluorine Pollutants in Hair and Nails Collected from Tianjin	YAO Dan, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (718)
Analysis of Estrogens, Nonylphenol, 4-tert-Octylphenol and Bisphenol A in the Sediments	WU Wei, SHI Jiang-hong, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i> (724)
Investigation of As, Cu and Zn Species and Concentrations in Animal Feeds	YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, <i>et al.</i> (732)
Residue Dynamics of Flubendiamide in Paddy Field	WANG Dian-dian, SONG Ning-hui, WU Wen-zhu, <i>et al.</i> (740)
Isolation of Two Endophytic Phenanthrene-Degrading Strains and Their Degradation Capacity	NI Xue, LIU Juan, GAO Yan-zheng, <i>et al.</i> (746)
Biodegradation of Nitrobenzene by a Halophilic <i>Myroides odoratimimus</i> Strain Y6	LI Tian, QIAN Kun, XIAO Wei, <i>et al.</i> (753)
Effect of Immobilization on Biosensor for Benzene Derivates Detection	TANG Kuo, MA An-zhou, YU Qing, <i>et al.</i> (760)
Investigation of Bacterial Diversity in the Biological Desulfurization Reactor for Treating High Salinity Wastewater by the 16S rDNA Cloning Method	LIU Wei-guo, LIANG Cun-zhen, YANG Jin-sheng, <i>et al.</i> (767)
Assessment of the Effect of Influent NH ₄ ⁺ -N Concentration on the Abundance and Community Structure of Functional Bacteria in CANON Process	LIU Tao, LI Dong, ZENG Hui-ping, <i>et al.</i> (773)
Biodegradation of Lignocellulose by <i>Penicillium simplicissimum</i> and Characters of Lignocellulolytic Enzymes	SHEN Ying, HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (781)
Microbial Community Structure and Distribution Characteristics in Oil Contaminated Soil	YANG Meng-qing, LI Li-ming, LI Chuan, <i>et al.</i> (789)
Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters	WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, <i>et al.</i> (795)
Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill	LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yu-wei, <i>et al.</i> (804)
Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms	WU Hao, ZHANG Pan-yue, GUO Jian-ben, <i>et al.</i> (810)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2013年2月15日 34卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 2 Feb. 15, 2013

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: 90.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行