

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

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

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估	张玉欣, 安俊琳, 林旭, 王俊秀, 师远哲, 刘静达 (1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布	蒋磊, 汤莉莉, 潘良宝, 刘丹彤, 花艳, 张运江, 周宏仓, 崔玉航 (13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM _{2.5} 浓度变化的影响	贺祥, 林振山 (22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散	李双德, 徐俊波, 莫胜鹏, 李文辉, 高佳佳, 曹亚裙, 陈运法 (33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量	赵佳玉, 张弥, 肖薇, 王伟, 吴红艳, 张圳, 肖启涛, 胡诚, 于洲, 曹正达, 徐敬争, 刘寿东, 李旭辉 (41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH ₄ 与 CO ₂ 浓度日动态	谭立山, 杨平, 何露露, 黄佳芳, 胡智强, 全川 (52)
河南鸡冠洞 CO ₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较	张萍, 杨琰, 孙喆, 梁沙, 张娜, 田宁, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质 (FDOM) 荧光光谱特征	陈俊伊, 王书航, 姜霞, 黄晓峰, 赵丽 (70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析	韩秀秀, 黄晓虎, 余丽燕, 杨浩, 黄昌春, 黄涛, 余艳红, 罗玉 (78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化	张维, 唐翔宇, 鲜青松 (87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应	祁闯, 王国祥, 吴馨婷, 许晓光, 韩睿明, 吴松峻 (95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性: 以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例	杨朝辉, 苏群, 陈志辉, 白俊武, 钱新强, 张志敏 (104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水温的响应特征	陈小华, 李小平, 钱晓雍, 胡双庆 (113)
深水型水库藻形态功能组 (MBFG) 的季节演替特征	杨毓, 卢金锁, 张颖 (121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素	范志伟, 郝庆菊, 黄哲, 柴雪思, 江长胜 (129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征	华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 崔超, 刘宏斌, 任天志, 张富林, 雷秋良 (138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析: 以羊圈沟为例	贾璐杰, 高扬, 陈维梁, 郝卓, 汪亚峰, 陈利顶 (147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较	金树权, 周金波, 包薇红, 陈君, 李丹丹, 李洋 (156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估	张芹, 张圣虎, 汪贞, 郭敏, 刘济宁, 石利利, 古文 (162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价	张家泉, 胡天鹏, 邢新丽, 郑煌, 张丽, 占长林, 刘红霞, 肖文胜, 祁士华 (170)
pH 和络合剂对五价锑在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响	王华伟, 李晓月, 李卫华, 孙英杰 (180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制	王文东, 王昌鑫, 刘荟, 韩雨 (188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响	艾扬, 孔东东, 于畅, 沈扬, 李剑 (195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证	高婷婷, 杜鹏, 徐泽琼, 杨军, 张华方, 李喜青 (201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯	赵纯, 张帅, 周宇, 李琨, 周炜, 黎鹏宇, 杨广, 孙志华, 郑怀礼 (212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究	王利颖, 石洁, 王凯伦, 关羽琪, 郭瑾 (220)
曝气生物滤池 (Fe ²⁺) -臭氧组合工艺强化处理石化二级出水	徐敏, 吴昌永, 周岳溪, 郭明昆, 王翼 (229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整梯烷脂的特异性	王晗, 方芳, 李凯, 邢晖, 郭劲松, 陈猷鹏, 曾前松 (238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析	张超, 陶华强, 宋圆圆, 逯彩彩, 郭延凯, 廉静, 郭建博 (247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征	刘竹寒, 岳秀, 于广平, 金腊华, 唐嘉丽, 吉世明 (253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制	季民, 刘灵婕, 翟洪艳, 刘京, 苏晓 (260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响	王书永, 钱飞跃, 王建芳, 沈耀良 (269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程	郑莹, 潘杨, 周晓华, 廖炬弘, 孟璇, 夏健伟 (276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制: 基于增强回归树分析	吴雁雯, 张金池, 郭晓平, 刘鑫 (283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响	史广宇, 程媛媛, 施维林 (294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响	石小霞, 赵诣, 张琳, 吴文良, 孟凡乔 (301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸 (PLFAs) 及酶活性的季节变化特征	李南洁, 曾清苹, 何丙辉, 周飞 (309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性	刘晋仙, 李鑫, 景炬辉, 贾彤, 刘兴港, 王小云, 柴宝峰 (318)
安徽省部分城市土壤中全氯化物空间分布及来源解析	李法松, 倪卉, 黄涵宇, 徐志兵, 张倩, 李长霞, 黄文秀, 金陶胜 (327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤活性有机碳的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 刘丹, 王旭东, 张阿凤 (333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响	田桃, 曾敏, 周航, 徐璐, 杨文强, 辜娇峰, 邹佳玲, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (343)
砒、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制	陈欣瑶, 杨惠子, 李敏, 牛晓丛, 苏雨轩, 张园 (352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响	高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 郭光光, 李晚, 胡红青 (361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测	李培中, 吕晓健, 王海见, 杨苏才, 魏文侠, 宋云 (368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力	黄辉, 宁西翠, 郭瞻宇, 郭堤, 张增强, 李荣华, 王力, Ali Amjad (374)
卤系阻燃剂在东江鱼体中的生物富集	何明靖, 杨婷, 李琦, 王登祥, 赵佳渊 (382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价	陈志良, 黄玲, 周存宇, 钟松雄, 王欣, 戴玉, 蒋晓璐 (389)
蔬菜镉 (Cd) 富集因子变化特征及其影响因素	杨阳, 李艳玲, 陈卫平, 王美娥, 彭驰 (399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响	余亚伟, 杨雨洽, 张成, 易建婷, 安思危, 王定勇 (405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局	赵辉, 郑有飞, 曹嘉晨, 徐静馨, 黄积庆, 袁月 (412)
《环境科学》征稿简则 (12) 《环境科学》征订启事 (194) 信息 (21, 51)	

华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响

石小霞, 赵诣, 张琳, 吴文良, 孟凡乔*

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 华北平原是我国重要的粮食生产基地, 土壤碳氮水平直接作用于区域的土壤肥力和粮食生产. 通过长期定位实验, 研究了包括自然恢复(F)、清茬翻耕(N)、秸秆还田免耕(S)和秸秆还田翻耕(TS)这4个处理下土壤有机碳(SOC)、无机碳(SIC)、全碳(TC)、全氮(TN)含量和储量以及 ^{13}C 和 ^{15}N 分布状况. 结果表明, 与F相比, 在0~20 cm土层, N、S和TS的土壤有机碳储量分别降低21.6%、12.3%和3.4%, 土壤无机碳储量变化不显著. 在20~40 cm土层, 土壤有机碳储量变化不显著, 而3个农田耕作处理的土壤无机碳储量较F分别增加4.1%(N)、7.3%(S)和5.0%(TS), 无机碳增加主要是次生碳酸盐的贡献, 农田土壤PIC增加了97%~261%. 与自然恢复地相比, 农田土壤表层 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SIC}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 偏高且 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 达显著差异, 20~40 cm土层 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SIC}}$ 偏低而 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 偏高. 该地区农田土壤中原生碳酸盐以分解作用为主, 土壤-作物系统通过增加 CO_2 含量促进次生碳酸盐的形成, 秸秆还田是恢复农田耕作引起土壤碳库储存下降的有效措施. 对于华北平原, 今后应加强关于秸秆还田和耕作措施对土壤有机碳和无机碳影响的综合研究, 对于表层以下层次土壤的碳转化和变化规律需要更多的长期观测.

关键词: 华北平原; 有机碳; 无机碳; 同位素; 秸秆还田

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0301-08 DOI: 10.13227/j. hjkx. 201605212

Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain

SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, WU Wen-liang, MENG Fan-qiao*

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: North China Plain is an important region of grain production. Soil fertility and grain production in this region are significantly influenced by the levels of soil carbon and nitrogen. In order to explore the effects of agricultural practices on the levels of soil carbon and nitrogen, a long-term field experiment was started in 1999 in Quzhou County, Hebei Province. Four treatments, including following nature (F), tillage without straw (N), no tillage with crushed straw incorporation (S), and tillage with crushed straw incorporation (TS), were chosen to collect soil samples at the layers of 0-20 cm and 20-40 cm in 2013. Soil organic carbon (SOC), soil inorganic carbon (SIC), total carbon (TC), total nitrogen (TN), $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{SIC}}$ and $\delta^{15}\text{N}$ were analyzed. The results indicated that compared with F, SOC stocks of N, S and TS decreased by 21.6%, 12.3% and 3.4% in the 0-20 cm soil layer, but the changes of SIC stocks were not significant. In the 20-40 cm soil layer, the changes of the SOC stocks were not significant, but the SIC stocks increased by 4.1% (N), 7.3% (S) and 5.0% (TS) compared to F, respectively. Major contribution of SIC increase was the pedogenic inorganic carbonate (PIC), which increased by 97%-261% in the farmland soil. In the soil layer of 0-20 cm, the values of $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{SIC}}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ in the farmland treatments were higher than those of F, meanwhile, the values of $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ were significantly higher than that of F. In the soil layer of 20-40 cm, the values of $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{SIC}}$ were lower than those of F, but the value of $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ showed the opposite trend. In North China Plain, lithogenic inorganic carbonate (LIC) of farmland soil decomposed and PIC increased by the soil-crop system, which provided CO_2 for the formation of PIC, and straw returning was an effective agricultural practice to restore the soil carbon decreased by tillage. There should be more long-term monitoring and studies for the impacts of crop straw incorporation and tillage on SOC and SIC, especially for soil in deeper layers.

Key words: North China Plain; soil organic carbon; soil inorganic carbon; natural isotope; crop straw incorporation

土壤碳库是地球表层中最大的碳库, 是继海洋碳库(38 000 Pg)和岩石碳库(5 000 Pg)之后的第三大碳库^[1]. 土壤碳库包括土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)库和无机碳(soil inorganic carbon, SIC)库, 土壤有机碳库作为陆生生态系统中最重要和最活跃的碳库, 对保持土壤肥力、增加粮食产量具有重要作用^[2]. 而农业生产也会对土壤产生扰动, 促进土壤有机质分解, 增加大气中的 CO_2 含量^[3]. 土壤无机碳对全球固碳起着非常重要的作用. 有研究

表明我国土壤SOC固碳潜力是105~198 $\text{Tg}\cdot\text{a}^{-1}$, SIC固碳潜力为7~138 $\text{Tg}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均固碳速率是224 $\text{Tg}\cdot\text{a}^{-1}$, 到2050年可实现累积固碳11 Pg, 可抵消每年工业排放碳的20%^[4]. SIC固碳是通过无机化学

收稿日期: 2016-05-27; 修订日期: 2016-08-27

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAD14B01); 国家自然科学基金项目(31261140367, 31370527)

作者简介: 石小霞(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究领域土壤碳氮循环, E-mail: 1300431807@qq.com

* 通信作者, E-mail: mengfq@cau.edu.cn

反应,将 CO_2 转化为碳酸钙和碳酸镁等^[5],而施肥、灌溉以及耕作等农田措施,能够促进作物生长和微生物活性或者提高水渗透性,都可能有利于形成碳酸盐沉淀而增加 SIC 库,减缓 CO_2 排放^[6, 7].

有研究表明,对土壤碳库影响最大的农田措施主要包括耕作方式和秸秆还田^[2, 8, 9]. 耕作方式的不同会影响土壤暴露在空气中的面积和频率,从而影响 SOC 的氧化程度^[3, 9]; 秸秆还田则直接通过增加有机物料的形式,提升土壤 SOC 水平^[8, 10]. 不同施肥措施^[11]、耕作方式^[12, 13]和秸秆还田^[10, 14]对土壤表层 SOC 的影响已有研究报道,但是各地由于土壤性质和光热条件不同,所得结论也有所不同^[15, 16]. 秸秆还田在直接增加土壤 SOC 的同时^[2],可以显著增加土壤剖面中 SIC 形成的前提因子 CO_2 的浓度^[3, 17]. 尿素等氮肥的施用可以促进作物根系增长,提高土壤酸度,导致土壤 SOC 和 SIC 的分解^[18, 19],灌溉则会增加钙镁离子浓度,增加 SIC 形成的速率^[3, 7],即土壤中 SOC 和 SIC 之间的相互转化以及受农田措施的影响频度,远比人们想象的复杂和剧烈. 在土壤碳循环过程中,碳稳定同位素 ^{13}C 含量可以反映 SOC 分解程度、土壤碳形态变化^[20, 21],同时,由于水氮对植物光合作用的复杂性,导致 ^{13}C 难以反映生物作用的贡献^[22],因此,结合 ^{13}C 和 ^{15}N 能够较好地定性和定量研究土壤碳氮转化.

华北平原是我国重要的粮食产区. 自 20 世纪 80 年代以来,随着高强度化肥、灌溉和高产品种的引进,该区域粮食产量大幅度提高,也对土壤碳库等产生了较大影响^[2],但在华北地区,结合 ^{13}C 和 ^{15}N 自然丰度法,对土壤碳库特别是 SOC 和 SIC 的变化却鲜有研究. 因此,本研究以 1999 年建立的长期定位实验为依托,运用稳定同位素 ^{13}C 和 ^{15}N 方法,探索华北平原不同耕作方式和秸秆还田措施下,表层及亚表层土壤 SOC 和 SIC 含量和储量的变化规律,以期土壤固碳、优化农田管理措施提供技术支持.

1 材料与方法

1.1 实验区概况

该实验点位于河北曲周县境内 ($36^\circ 52' \text{N}$, $115^\circ 01' \text{N}$),平均海拔高度约 40 m,属暖温带半湿润季风气候区,四季分明,冬季寒冷干燥,夏季温暖多雨,具有明显的干湿交替性. 年均日照时间 2 332 h,年均降水量 556 mm,降水主要集中在 7~9 月,年均蒸发量 1 841 mm,多年平均气温 13.2°C ,年均无霜期 201 d^[23]. 实验土壤均发育于近代河流冲积母质,盐碱地

改良后的褐土化潮土. 1999 年实验开始时,供试土壤理化性质为:pH 7.8,有机碳含量 $4.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量 $0.37 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $50.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷含量 $1.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $9.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $92.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[23]. 实验地种植制度为冬小麦 (*Triticum aestivum*)-夏玉米 (*Zea mays*) 一年两熟.

1.2 实验设计

本研究实验主要包括原状草地和原状草地变为农田后不同耕作措施的农田处理. 耕作模式的长期定位实验从 1999 年开始^[24],实验处理分别为:①清茬翻耕处理 (tillage without straw, N):小麦秸秆全量粉碎还田,翻耕播种夏玉米;夏玉米秸秆不还田,根茬还田,翻耕播种冬小麦;耕作深度 10~15 cm;②粉碎还田免耕处理 (not tillage with crushed straw, S):小麦秸秆全量粉碎还田,免耕播种夏玉米;夏玉米秸秆全量粉碎还田,免耕播种冬小麦;③粉碎还田翻耕处理 (tillage with crushed straw, TS):小麦秸秆全量粉碎还田,翻耕播种夏玉米;夏玉米秸秆全量粉碎还田,翻耕播种冬小麦;耕作深度 10~15 cm;④自然恢复地 (nature Fallow, F),即原状草地. 自然恢复地选自实验农田附近 (两地相距 200 m) 的一片实验地,自 1974 年起没有任何农业生产和土地耕作. 植被主要是 C3 型为主的草甸植物,以杂草群落为主,包括碱蒿 (*Artemisia anethifolia*)、白茅 (*Imperata cylindrical*)、榛子 (*Corylus heterophylla*) 和大针茅 (*Stipa grandis*) 等.

1.3 土壤采集与分析

土壤样品采集时间为 2013 年 10 月玉米收获后. 采样在 0~20 cm 和 20~40 cm 两个土壤层次进行. 在农田实验的每个小区,按对角线用土钻 (直径 3.5 cm,深度 20 cm) 取样,每条对角线取 3 钻,6 钻土壤充分混匀作为一个土样装入塑料袋,每个小区采集 3 个土样进行混合作为一个土样. 自然恢复地按照长度均为 3 部分,然后每部分按对角线取土,每条对角线取 3 钻混匀装袋. 采集的样品带回实验室风干,并充分混合后过 2 mm 或 0.15 mm 筛,于自封袋中室温保存. 参照鲁如坤^[25]的方法对土壤理化性质进行测定,即:土壤容重 (环刀法采集测定)、pH (水土比 1:2.5 悬浮液用 pH 计测定) 和土壤含水量 (105°C 烘干至恒重测定).

1.4 碳、氮及其自然同位素的测定

用四分法取过 0.15 mm 筛的土壤样品,进行土壤碳、氮及其同位素丰度的测试.

土壤碳、氮含量:利用 Thermo Elemental Analyzer

1112 元素分析仪测定土壤全氮(TN)和全碳(TC). 土壤无机碳(SIC)采用压力传感器方法测定^[26]. 有机碳(SOC)采用差减法,即 $SOC = TC - SIC$.

土壤碳氮同位素丰度^[7]:土壤全碳、全氮、有机碳以及无机碳的同位素丰度用稳定同位素比例质谱仪(Delta Plus XP, Thermo Fisher Scientific, USA)测试,精度为 0.15‰. 有机碳丰度测定前先进行酸洗去除无机碳,称取土样 2~3 g 放入烧杯中,加入 20 mL 0.5 mol·L⁻¹ 的 HCl 溶液进行酸化,摇匀后放入振荡器振荡 30 min. 静置 12 h 后加去离子水,以 3 000 r·min⁻¹ 的速度离心 3 min,洗去土样中的酸,用试纸检测土样 pH,洗到中性为止,放入烘箱 60℃ 烘干. 土壤无机碳 $\delta^{13}C$ 分析在 Thermo 公司的 DELTA V ADVANTAGE 气体质谱仪上进行. 碳同位素采用 PDB(Peedee Belemnite)标准^[27],PDB 标准物质为美国南卡罗来纳州白垩纪皮狄组拟箭石化石,其 $^{13}C/^{12}C = (11\,237.2 \pm 90) \times 10^{-6}$,定义其 $\delta^{13}C = 0‰$.

1.5 土壤有机碳储量和次生碳酸盐比例计算

土壤有机碳储量:对于分 n 层的土壤剖面而言,有机碳储量的计算公式为:

$$SOC = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^n (SOC_i \times BD_i \times T_i) \quad (1)$$

式中,SOC 为全部土层有机碳储量, $Mg \cdot hm^{-2}$; SOC_i 为第 i 层土壤 SOC 含量, $g \cdot kg^{-1}$; BD_i 为第 i 层土壤容重, $g \cdot cm^{-3}$; T_i 为第 i 层土壤深度, cm; n 为土层数, 1/10 为单位系数.

土壤无机碳中次生碳酸盐(pedogenic inorganic carbonates, PIC)比例:用下述同位素质量平衡方程式来定量 PIC 在土壤无机碳中的比例^[27]:

$$PIC(\%) = \frac{[\delta^{13}C_{soil} - \delta^{13}C_{pm}]}{[\delta^{13}C_{PIC} - \delta^{13}C_{pm}]} \times 100 \quad (2)$$

式中,PIC(%)为无机碳中次生碳酸盐所占的比例; $\delta^{13}C_{soil}$ 为某一层土壤无机碳的 $\delta^{13}C$ 值; $\delta^{13}C_{pm}$ 为母质碳酸盐的 $\delta^{13}C$ 值,本研究假定为 0‰^[28]. $\delta^{13}C_{PIC}$ 为次生碳酸盐的 $\delta^{13}C$ 值,用下面的分馏模型进行估算^[21, 29]:

$$\delta^{13}C_{PIC} = (1 - \lambda) \delta^{13}C_{SOM} + \Delta CO_{2diffusion} + \Delta CO_2 - CaCO_3 + \lambda \delta^{13}C_{air} \quad (3)$$

式中, $\delta^{13}C_{PIC}$ 为次生碳酸盐的 $\delta^{13}C$ 估计值; $\delta^{13}C_{SOM}$ 为土壤有机质的 $\delta^{13}C$ 测定值; $\Delta CO_{2diffusion}$ 为 $^{12}CO_2$ 和 $^{13}CO_2$ 分子之间 $\delta^{13}C$ 值的扩散差异,理论值为 4.4‰^[21]; $\Delta CO_2 - CaCO_3$ 为平衡反应过程中 CO_2 和碳酸盐 ΔCO_2 值差异,本研究取 20℃ 下的理论值 9.48‰^[21], $\delta^{13}C_{air}$ 为大气中的 $\delta^{13}C$ 值,取平均值 -8‰^[29], λ 为大气中二氧化碳对形成 PIC 的贡献比例.

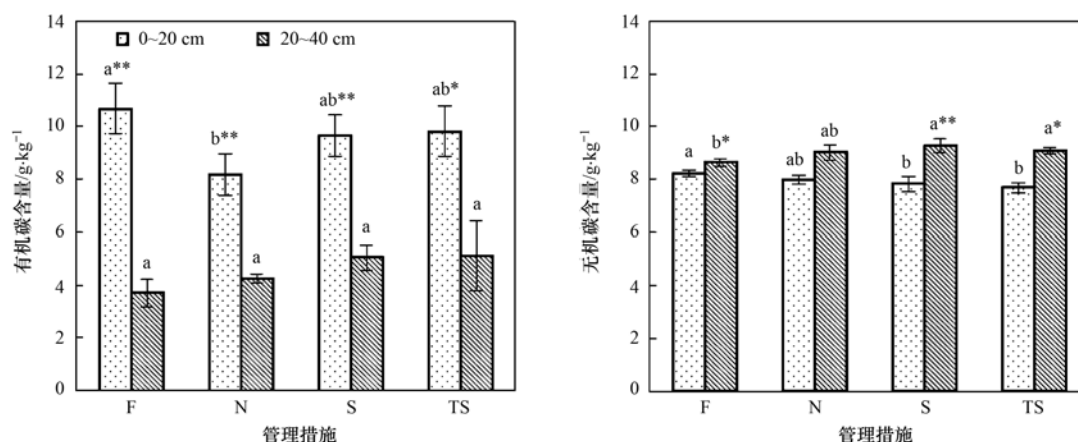
1.6 数据分析

方差分析和相关性分析用 SPSS 20.0 软件计算,处理之间的显著性差异分析均设为 $\alpha = 0.05$ 水平,且平均值比较采用最小显著差异法(least significant difference, LSD). 画图采用 EXCEL 软件.

2 结果与分析

2.1 耕作和秸秆还田对土壤碳含量及自然同位素丰度的影响

经过 15 a 的农田耕作,与自然恢复地(F)相比(图 1),在 0~20 cm 层次各处理有机碳含量(SOC)均有所下降,其中清茬翻耕(N)达显著性差异;秸秆还田的两个处理(S 和 TS)土壤 SOC 分别比 N 高



不同小写字母表示不同处理间的显著性差异($P < 0.05$), * 表示土壤剖面两层次间的显著性差异($P < 0.05$), ** 为极显著性差异($P < 0.01$),下同

图 1 不同农田管理措施下土壤有机碳和无机碳含量

Fig. 1 Contents of SOC and SIC under different farming treatments

18.3% 和 20.2%。在 20~40 cm 层次,各处理间差异不显著。对于土壤无机碳(SIC),在 0~20 cm 土层,秸秆还田措施(S 和 TS 处理)较 F 显著降低,而在 20~40 cm 层次却呈显著增加,N 处理的 SIC 含量在秸秆还田处理和 F 处理之间。0~20 cm 层次各处理土壤 SOC 含量显著高于 20~40 cm,但土壤 SIC 含量均显著低于 20~40 cm(N 处理除外)。

与 F 相比(图 2),3 个农田耕作处理土壤

$\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 在两个土层均偏高,但仅在 0~20 cm 层次达到显著性水平;类似的,3 个处理土壤 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SIC}}$ 在 0~20 cm 土层也比 F 处理偏高,但未达到显著性水平,而在 20~40 cm 层次却出现了农田耕作处理偏负,且 TS 处理达到显著性水平。两个土层相比,0~20 cm 土壤 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 较 20~40 cm 均显著偏高,而土壤 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SIC}}$ 则较 20~40 cm 偏低,仅 TS 达到显著性水平。

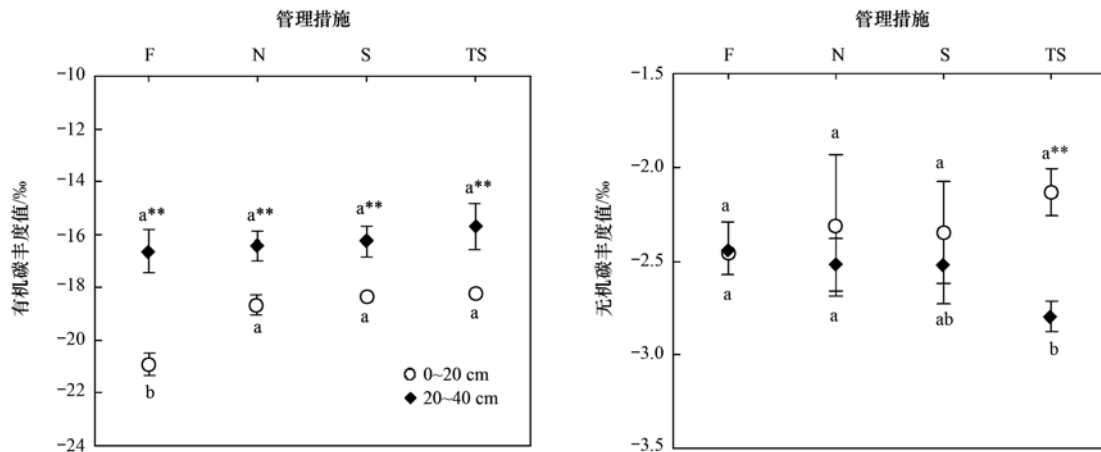


图 2 不同农田管理措施下土壤有机碳和无机碳自然同位素丰度值

Fig. 2 The $\delta^{13}\text{C}$ values of SOC and SIC under different farming treatments

2.2 耕作和秸秆还田对全碳和全氮含量及自然同位素丰度的影响

在 0~20 cm 土层,由于农田耕作处理土壤 SOC 和 SIC 都低于 F,土壤全碳含量显著低于 F,但 3 个农田耕作处理之间差异未达到显著性水平(图 3)。土壤全氮呈现相似规律,且清茬处理(N)显著低于秸秆还田处理(S 和 TS)。

在 20~40 cm 土层,与 0~20 cm 相反,农田耕作处理土壤 SOC 和 SIC 都高于 F,造成土壤全碳含

量显著高于 F, N、S 和 TS 分别高 7.3%、15.8% 和 14.7%,3 个农田耕作处理之间差异不显著(图 3)。全氮含量则是两个秸秆还田处理显著高于 F 和 N,且秸秆还田配合耕作处理 TS 显著高于仅秸秆还田的 S 处理。

在 0~20 cm 土层(图 4),各农田耕作处理土壤全碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 较 F 显著偏高,S 和 TS 之间无显著差异,但较 N 显著偏低,而在 20~40 cm 土层各处理间无显著差异。0~20 cm 土层土壤全碳 $\delta^{13}\text{C}$ 显著低于 20

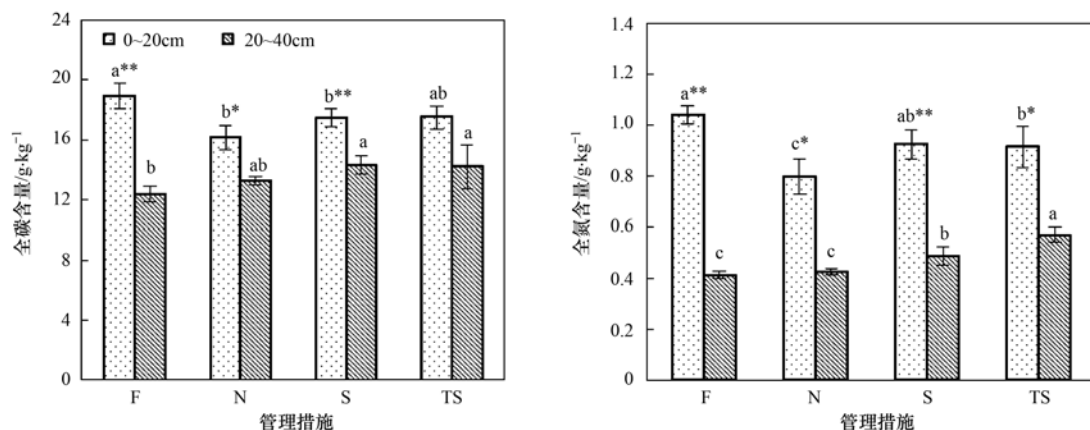


图 3 不同农田管理措施下土壤全碳和全氮含量

Fig. 3 Contents of TC and TN under different farming treatments

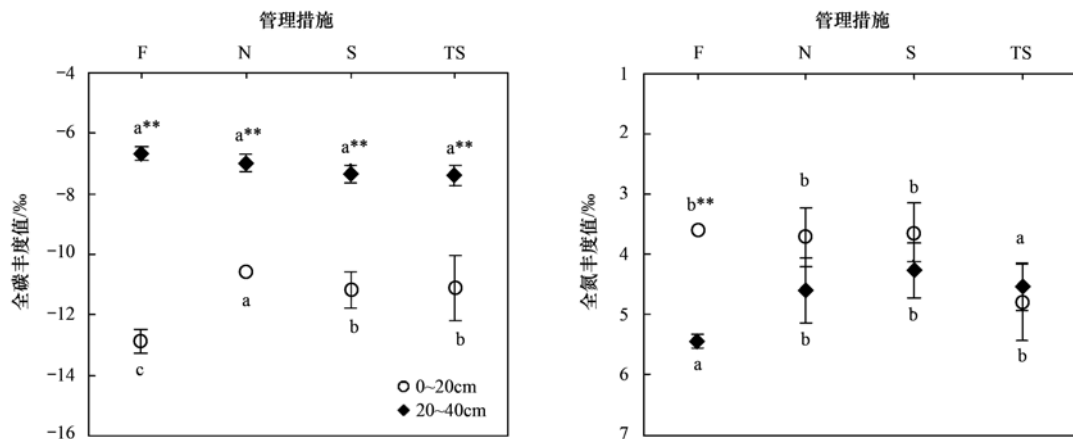


图4 不同农田管理措施下土壤全碳和全氮自然丰度值

Fig. 4 The $\delta^{13}\text{C}$ values of TC and $\delta^{15}\text{N}$ values of TN under different farming treatments

~40 cm 土层. 与土壤全碳 $\delta^{13}\text{C}$ 不同,0~20 cm 层次农田耕作土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 较 F 偏正,其中 TS 处理显著高于其它处理,而在 20~40 cm 层次,呈现相反的规律,即各农田耕作处理土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 显著低于 F 处理,耕作处理间差异不显著.

2.3 不同农田耕作措施下的土壤碳储量

在 0~20 cm 土层(表 1),与 F 相比,3 个农田耕作处理的土壤 SOC 储量分别降低了 21.3% (N)、12.2% (S) 和 3.1% (TS),降低速率分别为 0.4 (N)、0.3 (S) 和 0.1 (TS) $\text{Mg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$,而土壤 SIC 储量则没有显著变化,说明 0~20 cm 土层总碳的降低主要是由于 SOC 造成的.

与 0~20 cm 层次不同,在 20~40 cm 土层,3 个

农田耕作处理的 SOC 和 SIC 储量都较 F 处理高,但 SOC 的差异处理间不显著. 与 F 处理比较,农田 3 个处理 SIC 储量增加速率均为 $0.1 \text{ Mg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$. 两土层相比,所有处理的 0~20 cm 土层 SOC 储量显著高于 20~40 cm,而 0~20 cm 层次的 SIC 储量却显著低于 20~40 cm 层次.

对于土壤 SIC,转换为农田土壤后,原生性碳酸盐 LIC 占总 SIC 的比例从 F 处理的 69% (0~20 cm) 和 72% (20~40 cm),降低到 36~51% (0~20 cm) 和 3.6~47% (20~40 cm). 3 个农田处理的 LIC 占总 SIC 比例降低顺序为 TS>S>N; 而土壤次生性碳酸盐 PIC 占总 SIC 的比例却呈现增加趋势,显著高于 F,其中 20~40 cm 土层两个秸秆处理的比例增加到 83% 和 96%.

表 1 不同农田管理措施的土壤碳储量¹⁾

Table 1 Stock of soil carbon under different farming treatments

层次/cm	处理	土壤碳储量/ $\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$				与 F 处理相比全碳的变化速率/ $\text{Mg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$			
		有机碳	无机碳		总无机碳	有机碳	无机碳		总无机碳
			原生性碳酸盐	次生性碳酸盐			原生性碳酸盐	次生性碳酸盐	
0~20	F	28.6±3.2a**	15.2±0.4a	6.9±0.3b	22.1±0.6a				
	N	22.5±0.6b**	11.2±2.4b	10.9±2.1a	22.1±1.8a	-0.4±0.3a	-0.3±0.2a	0.3±0.1a	0±0.1a
	S	25.1±2.3ab**	7.3±1.6c	13.1±1.7a	20.4±0.4a	-0.3±0.2a	-0.6±0.1b*	0.4±0.1a	-0.1±0a
	TS	27.7±1.6a*	8.9±1.2bc**	12.9±0.8a	21.8±1.4a	-0.1±0.3a	-0.5±0.1ab*	0.4±0.1a	0±0.1a
20~40	F	11.3±1.6a	19.0±0.8a**	7.4±0.5d	26.4±0.6b**				
	N	13.0±0.5a	12.9±2.1b	14.6±1.4c	27.5±0.8ab*	0.1±0.2a*	-0.4±0.2a	0.5±0.1b	0.1±0.1a
	S	15.3±1.4a	4.7±2.0c	23.6±1.8b**	28.3±0.7a**	0.3±0.1a*	-1.0±0.2b	1.2±0.1a**	0.1±0.1a**
	TS	15.5±4.0a	1.0±1.7d	26.7±1.5a**	27.7±0.3a*	0.3±0.3a	-1.3±0.1b	1.4±0.1a**	0.1±0.1a

1) 平均值±标准差; 同一列不同小写字母表示不同处理间差异为显著性水平($P<0.05$), * 表示土壤剖面两层次间为显著性差异($P<0.05$), ** 为极显著性差异($P<0.01$)

3 讨论

3.1 耕作与秸秆还田措施对土壤碳库的影响

有研究表明,自然草地转变为农田耕作土壤后,

由于耕作改变了土壤和植被结构,增加了有机质暴露于空气的机会, SOC 含量呈下降趋势(10%~50%)^[23, 30]. 本研究 SOC 含量下降 8%~24%, 是农田土壤总碳显著下降的主要原因. 耕作引起的

SOC 降低可通过良好的农田措施恢复,其中秸秆还田是主要措施之一. 本研究中,秸秆还田(TS 和 S)措施下耕作层 SOC 储量较不还田(N)提高了 20% 以上,这是因为有机物料的增加以及土壤结构的改善^[31]. 农田措施对于 SOC 的提高主要在表层,对亚表层 20 ~ 40 cm 层次的 SOC 影响较小. 比较 TS 和 S 处理(图 1),发现耕作配合秸秆还田比免耕配合秸秆还田有更好的 SOC 提升效果. 主要原因在于前者更有利于有机物料在表层与土壤颗粒充分混合,形成有机无机复合体;此外,TS 处理相比 S 处理,作物产量更高^[32],进入农田的有机物料更多,也可能是导致 SOC 提升效果更好的原因.

本研究区域属于半湿润半旱区^[24],原状草地土壤在 0 ~ 40 cm 土层 SIC 储量比 SOC 高 22%,在普遍认为的半干旱地区 SIC 是 SOC 的 1 ~ 9 倍范围内^[29],表明该区 SIC 对于土壤固碳的作用可能比 SOC 更重要^[33]. 本研究中,耕作措施在两个土层对 SIC、SOC 的影响规律不尽相同:首先,与 SOC 变化相反,SIC 随土层深度的增加而增加,这可能是由于表层较高含量的 SOC,以及氮肥使用,造成土壤酸性水平提高^[18, 19],从而增加了碳酸盐的溶解^[19]. 其次,与 F 相比,3 个农田处理降低 0 ~ 20 cm 土层的 SIC,秸秆还田条件下下降尤为显著,同样可能是由于耕作改变土壤微环境,加速了碳酸盐的溶解,也可能是根区释放的 HCO_3^- 、酸性分泌物等促进碳酸钙(镁)溶解^[34]. 土壤亚表层,耕作种植导致土壤 CO_2 浓度增加,土壤水分渗透增强而使 pH 升高,以及根区产生的 Ca^{2+} 向下移动,都有利于碳酸钙的形成^[6, 7],使得农田土壤 20 ~ 40 cm 土层 SIC 显著增加(除 N 增加不显著外),使其成为该层次农田土壤总碳提高 7% ~ 18% 的主要贡献者.

3.2 耕作与秸秆还田措施对土壤碳氮同位素特征的影响

一般来说,SOC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与覆盖植物的同位素构成非常相似^[20]. 自然恢复地 0 ~ 20 cm 土层 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 为 -21‰ 左右,体现了 C3 作物对 SOC 的主要贡献,而农田土壤 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 为 -19‰ ~ -18‰ ,体现了 C3(小麦)和 C4 作物(玉米)的共同贡献. 由于土壤有机质分解过程中的同位素分馏效应,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值通常随着深度的增加而升高^[35],即本研究中 0 ~ 20 cm 土层 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 显著低于 20 ~ 40 cm. 对于 3 个农田处理,0 ~ 20 cm 土层 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 无显著差异,说明即使经过 15 年的时间,玉米秸秆还田和耕作对于 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 影响还未达到显著性水平. 一方面,土壤空间异质性降

低了处理间的差异显著性,另一方面,SOC 的分解是一个长期过程,与原 SOC 比较,新有机物料(本研究中玉米)引起的新 SOC 数量较小,还不足以影响土壤 SOC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[17, 23, 36].

土壤无机碳主要是沉淀碳酸盐,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SIC}}$ 与碳酸盐的碳丰度值高度相关. 溶解的碳酸盐和土壤 CO_2 之间存在碳稳定同位素的平衡分馏,因而其碳同位素丰度主要取决于土壤 CO_2 的 ^{13}C 丰度^[37],而土壤 CO_2 主要来自于土壤有机质分解、地面大气 CO_2 以及作物根呼吸^[29, 38]. 本研究中,3 个农田处理土壤受较高 $\delta^{13}\text{C}$ 值的空气 CO_2 ($\delta^{13}\text{C} \approx -8\text{‰}$) 以及玉米秸秆 ($\delta^{13}\text{C}$ 为 -17‰ 左右) 的影响较大,耕作层形成的土壤 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SIC}}$ 值较 20 ~ 40 cm 层次偏高. 对于 TS 处理的 0 ~ 20 cm 土层,由于翻耕增大土壤 CO_2 与大气 CO_2 的交换以及土壤有机质的共同贡献较其他 3 个处理高,虽然未达到显著性水平,相应的土壤 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SIC}}$ 也更偏高. 而对于 20 ~ 40 cm 土层,原生碳酸盐(LIC) ($\delta^{13}\text{C}$ 为 0‰ 左右) 含量低,特别是 TS 处理土壤 LIC 储量显著低于其他处理,造成土壤 SIC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 明显偏负.

土壤中的 $\delta^{15}\text{N}$ 值受环境影响和氮素来源的双重影响. 氮素转化过程中,发生强烈的同位素分馏. 秸秆覆盖和耕作措施改变土壤水分含量与土壤温度,促进微生物活动,促进氮素的硝化与反硝化作用,氮素转化强度远高于 F 处理,留在土壤中的 ^{15}N 含量逐年增加,使得 3 个农田处理土壤耕作层 $\delta^{15}\text{N}$ 偏高^[39, 40].

3.3 土壤次生性碳酸盐的形成

土壤次生性碳酸盐(PIC)是在土壤风化过程中形成,可以固定 CO_2 ,从而对全球碳循环产生重要影响^[7, 41]. 次生碳酸盐与原生碳酸盐溶解/沉积平衡、土壤有机碳分解 CO_2 的再转化密切相关^[29]. 本研究中,自然恢复地(F)不受人为活动的影响,提供了一个独特的情景,用于探讨农田耕作措施对土壤 PIC 形成的影响. 以表层和亚表层空气 CO_2 对形成次生碳酸盐 CO_2 的贡献比例分别为 30% 和 15% 进行模型计算^[21, 29]. 0 ~ 20 cm 层次,与 F 相比,农田土壤 0 ~ 20 cm 土层 PIC 储量增加了 58% ~ 90%; 将各处理 SOC 储量和 LIC 储量分别与 PIC 储量进行相关分析, LIC 与 PIC 储量高度相关 ($r = -0.934^{**}$),与 SOC 储量低度相关 ($r = -0.30$),说明农田土壤表层 PIC 主要来自成土母质 LIC 的溶解与再沉淀.

同样地,20 ~ 40 cm 土层 PIC 储量与 LIC 高度

负相关($r = -0.996^{**}$), 与 SOC 达到中度正相关($r = 0.620^{*}$). 表明表层下 PIC 形成与 LIC 的溶解沉淀以及 SOC 分解转化都有密切联系, 但该层次 SOC 储量在各处理间差异不显著(表 1), 这可能与耕作层 SIC 淋溶以及根区 Ca^{2+} 下移^[6]引起沉淀碳酸盐增加有关. 同时, 翻耕结合秸秆还田处理(TS), PIC 增加尤为显著, 可能是秸秆还田不仅提高了土壤中 Ca^{2+} 浓度, 同时也提高土壤 CO_2 浓度^[42], 从而通过 SOC- CO_2 -SIC 微循环系统 SOC 向 SIC 发生碳的转移^[43], 本研究中农田土壤 LIC 降低了 32% ~ 95%, PIC 增加了 97% ~ 261%, 进一步说明部分土壤 PIC 的增加来源于 SOC 的转化, PIC 是总 SIC 增加的主要贡献者.

4 结论

(1) 自然恢复地变为农田土壤后, 表层土壤有机碳储量下降了 3% ~ 22%, 无机碳储量无显著变化. 耕作措施配合秸秆还田更有利于提升土壤有机碳. 与表层变化规律相反, 20 ~ 40 cm 土层有机碳储量无显著变化, 无机碳储量增加了 4% ~ 7%. 对于农田土壤, 应关注亚表层土壤碳, 包括无机碳的变化.

(2) 农田土壤耕作层次性碳酸盐的形成主要来自原生性碳酸盐的分解与再沉淀, 但亚表层次性碳酸盐储量较自然恢复地极显著增加, 且来源于有机碳转化贡献增加.

(3) 与自然恢复地相比, 农田土壤表层 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SIC}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 偏高且 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 达显著差异, 说明生物作用和高频度的农田管理措施引起了强烈的土壤碳氮同位素分馏, 利用碳氮同位素技术可以更全面和准确分析土壤碳和氮库的变化规律及机制.

参考文献:

- [1] Lal R. Global potential of soil carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2003, **22**(2): 151-184.
- [2] Liao Y, Wu W L, Meng F Q, *et al.* Increase in soil organic carbon by agricultural intensification in northern China[J]. *Biogeosciences*, 2015, **12**(5): 1403-1413.
- [3] 韩广轩, 周广胜, 许振柱. 中国农田生态系统土壤呼吸作用研究与展望[J]. *植物生态学报*, 2008, **32**(3): 719-733.
Han G X, Zhou G S, Xu Z Z. Research and prospects for soil respiration of farmland ecosystems in China[J]. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 2008, **32**(3): 719-733.
- [4] Lal R. Soil carbon sequestration in China through agricultural intensification, and restoration of degraded and desertified ecosystems[J]. *Land Degradation & Development*, 2002, **13**(6): 469-478.
- [5] Burras C L, Kimble J M, Lal R, *et al.* Carbon sequestration: position of the soil science society of America[R]. America: Iowa State University, 2001.
- [6] Denef K, Stewart C E, Brenner J, *et al.* Does long-term center-pivot irrigation increase soil carbon stocks in semi-arid agroecosystems? [J]. *Geoderma*, 2008, **145**(1-2): 121-129.
- [7] Bughio M A, Wang P L, Meng F Q, *et al.* Neoformation of pedogenic carbonates by irrigation and fertilization and their contribution to carbon sequestration in soil [J]. *Geoderma*, 2016, **262**: 12-19.
- [8] Rui W Y, Zhang W J. Effect size and duration of recommended management practices on carbon sequestration in paddy field in Yangtze Delta Plain of China: a meta-analysis[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010, **135**(3): 199-205.
- [9] 耿元波, 罗光强, 袁国富, 等. 农垦及放牧对温带半干旱草原土壤碳素的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(6): 2518-2523.
Geng Y B, Luo G Q, Yuan G F, *et al.* Effects of cultivating and grazing on soil organic carbon and soil inorganic carbon in temperate semiarid grassland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, **27**(6): 2518-2523.
- [10] Zhu L Q, Li J, Tao B R, *et al.* Effect of different fertilization modes on soil organic carbon sequestration in paddy fields in South China: a meta-analysis[J]. *Ecological Indicators*, 2015, **53**: 144-153.
- [11] 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.
- [12] de Moraes Sá J C, Tivet F, Lal R, *et al.* Long-term tillage systems impacts on soil C dynamics, soil resilience and agronomic productivity of a Brazilian Oxisol[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, **136**: 38-50.
- [13] 薛建福, 赵鑫, Dikgwatlhe S B, 等. 保护性耕作对农田碳、氮效应的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2013, **33**(19): 6006-6013.
Xue J F, Zhao X, Dikgwatlhe S B, *et al.* Advances in effects of conservation tillage on soil organic carbon and nitrogen[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(19): 6006-6013.
- [14] Lehtinen T, Schlatter N, Baumgarten A, *et al.* Effect of crop residue incorporation on soil organic carbon and greenhouse gas emissions in European agricultural soils [J]. *Soil Use and Management*, 2014, **30**(4): 524-538.
- [15] 张庆忠, 吴文良, 林光辉. 小麦秸秆还田对华北高产粮区碳截留的作用[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2006, **25**(5): 773-776.
Zhang Q Z, Wu W L, Lin G H. Effect of wheat residue amendment on carbon sequestration in high-yielding region in the North China Plain[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2006, **25**(5): 773-776.
- [16] 魏燕华, 赵鑫, 翟云龙, 等. 耕作方式对华北农田土壤固碳效应的影响[J]. *农业工程学报*, 2013, **29**(17): 87-95.
Wei Y H, Zhao X, Zhai Y L, *et al.* Effects of tillages on soil organic carbon sequestration in North China Plain [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, **29**(17): 87-95.

- [17] 胡立峰, 李洪文, 高焕文. 保护性耕作对温室效应的影响[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(5): 308-312.
Hu L F, Li H W, Gao H W. Influence of conservation tillage on greenhouse effect[J]. Transactions of the CSAE, 2009, **25**(5): 308-312.
- [18] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands [J]. Science, 2010, **327** (5968): 1008-1010.
- [19] Wang J P, Wang X J, Zhang J, *et al.* Soil organic and inorganic carbon and stable carbon isotopes in the Yanqi Basin of northwestern China[J]. European Journal of Soil Science, 2015, **66**(1): 95-103.
- [20] Balesdent J, Mariotti A. Measurement of soil organic matter turnover using ^{13}C natural abundance [A]. In: Boutton T W, Yamasaki S I. Mass Spectrometry of Soils. New York: Marcel Dekker, 1996, **41**: 83-111.
- [21] Nordt L C, Hallmark C T, Wilding L P, *et al.* Quantifying pedogenic carbonate accumulations using stable carbon isotopes [J]. Geoderma, 1998, **82**(1-3): 115-136.
- [22] Tuan V D, Hilger T, Cadisch G. Identifying resource competition in maize-based soil conservation systems using ^{13}C and ^{15}N isotopic discrimination[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2016, **62**(5): 688-707.
- [23] 孟凡乔, 匡星, 杜章留, 等. 不同土地利用方式及栽培措施对土壤有机碳及 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(8): 1733-1739.
Meng F Q, Kuang X, Du Z L, *et al.* Impact of land use change and cultivation measures on soil organic carbon (SOC) and its ^{13}C values[J]. Environmental Science, 2010, **31**(8): 1733-1739.
- [24] 黄志勇. 土壤有机碳及组分对农田管理措施的响应[D]. 北京: 中国农业大学, 2007. 11-15.
- [25] 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, 2000. 1-19.
- [26] Sherrod L A, Dunn G, Peterson G A, *et al.* Inorganic carbon analysis by modified pressure-calimeter method [J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, **66**(1): 299-305.
- [27] Rabenhorst M C, Wilding L P, West L T. Identification of pedogenic carbonates using stable carbon isotope and microfabric analyses[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, **48**(1): 125-132.
- [28] Marion G M, Schlesinger W H, Fonteyn P J. Caldep: a regional model for soil CaCO_3 (caliche) deposition in southwestern deserts [J]. Soil Science, 1985, **139**(5): 468-481.
- [29] Wang X J, Wang J P, Xu M G, *et al.* Carbon accumulation in arid croplands of northwest China: pedogenic carbonate exceeding organic carbon[J]. Scientific Reports, 2015, **5**: 11439.
- [30] 肖胜生, 董云社, 齐玉春, 等. 草地生态系统土壤有机碳库对人为干扰和全球变化的响应研究进展[J]. 地球科学进展, 2009, **24**(10): 1138-1148.
Xiao S S, Dong Y S, Qi Y C, *et al.* Advance in responses of soil organic carbon pool of grassland ecosystem to human effects and global changes[J]. Advances in Earth Science, 2009, **24**(10): 1138-1148.
- [31] 崔新卫, 张杨珠, 吴金水, 等. 秸秆还田对土壤质量与作物生长的影响研究进展[J]. 土壤通报, 2014, **45**(6): 1527-1532.
Cui X W, Zhang Y Z, Wu J S, *et al.* Research progress on the effects of returning straw to fields on soil quality and crop growth [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, **45**(6): 1527-1532.
- [32] 吴菲. 玉米秸秆连续多年还田对土壤理化性状和作物生长的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2005. 33-46.
- [33] Wu H B, Guo Z T, Gao Q, *et al.* Distribution of soil inorganic carbon storage and its changes due to agricultural land use activity in China [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2009, **129**(4): 413-421.
- [34] Kuzyakov Y, Shevtzova E, Pustovoytov K. Carbonate recrystallization in soil revealed by ^{14}C labeling: experiment, model and significance for paleo-environmental reconstructions [J]. Geoderma, 2006, **131**(1-2): 45-58.
- [35] Wang G, Feng X, Han J, *et al.* Paleovegetation reconstruction using (^{13}C of Soil Organic Matter [J]. Biogeosciences, 2008, **5**(5): 1325-1337.
- [36] Meng F Q, Lal R, Kuang X, *et al.* Soil organic carbon dynamics within density and particle-size fractions of Aquic Cambisols under different land use in northern China [J]. Geoderma Regional, 2014, **1**: 1-9.
- [37] 段建南, 李保国, 石元春, 等. 干旱地区土壤碳酸钙淀积过程模拟[J]. 土壤学报, 1999, **36**(3): 318-326.
Duan J N, Li B G, Shi Y C, *et al.* Modeling of soil CaCO_3 deposition process in arid areas [J]. Acta Pedologica Sinica, 1999, **36**(3): 318-326.
- [38] 王兵, 姜艳, 郭浩, 等. 土壤呼吸及其三个生物学过程研究[J]. 土壤通报, 2011, **42**(2): 483-490.
Wang B, Jiang Y, Guo H, *et al.* Soil respiration and its three biological processes[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, **42**(2): 483-490.
- [39] Casciotti K L, Buchwald C, Santoro A E, *et al.* Chapter eleven-assessment of nitrogen and oxygen isotopic fractionation during nitrification and its expression in the marine environment [J]. Methods in Enzymology, 2011, **486**: 253-280.
- [40] 姚凡云, 朱彪, 杜恩在. ^{15}N 自然丰度法在陆地生态系统氮循环研究中的应用[J]. 植物生态学报, 2012, **36**(4): 346-352.
Yao F Y, Zhu B, Du E Z. Use of ^{15}N natural abundance in nitrogen cycling of terrestrial ecosystems[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, **36**(4): 346-352.
- [41] Sanderman J. Can management induced changes in the carbonate system drive soil carbon sequestration? A review with particular focus on Australia[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, **155**: 70-77.
- [42] 田慎重, 宁堂原, 迟淑筠, 等. 不同耕作措施的温室气体排放日变化及最佳观测时间[J]. 生态学报, 2012, **32**(3): 879-888.
Tian S Z, Ning T Y, Chi S Y, *et al.* Diurnal variations of the greenhouse gases emission and their optimal observation duration under different tillage systems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(3): 879-888.
- [43] 张林, 孙向阳, 曹吉鑫, 等. 荒漠草原碳酸盐岩土壤有机碳向无机碳酸盐的转移[J]. 干旱区地理, 2010, **33**(5): 732-739.
Zhang L, Sun X Y, Cao J X, *et al.* Transfer of soil organic carbon to soil inorganic carbon in carbonate rock soil of desert grassland[J]. Arid Land Geography, 2010, **33**(5): 732-739.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibaohe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Jun-hua, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172