

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第8期

Vol.35 No.8

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

2012年春季京津冀地区一次沙尘暴天气过程中颗粒物的污染特征分析 刘庆阳, 刘艳菊, 赵强, 张婷婷, 张美根, 王存美 (2843)

杭州灰霾天气超细颗粒浓度分布特征 陈秋方, 孙在, 谢小芳 (2851)

气象因素对广州市大气中二噁英污染特征的影响 杜国勇, 苏原, 任明忠, 张素坤, 青宪 (2857)

龙凤山本底站大气 CO₂ 数据筛分及浓度特征研究 栾天, 周凌晔, 方双喜, 姚波, 王红阳, 刘钊 (2864)

区域传输对华东森林及高山背景点位大气污染物浓度的影响 苏彬彬, 许榕洋, 张若宇, 纪贤鑫 (2871)

天津市夏季蜂窝状溶蚀器涂层溶液浓度确定的实验研究 张诗建, 姬亚芹, 张雷波, 赵雪艳, 朱振宇, 杨文 (2878)

铅锌冶炼厂不同工艺铅元素粒径分布特征 梁俊宁, 李文慧, 葛毅, 陈浩, 宋丽娜, 刘杰 (2883)

KI 改性黏土脱除烟气中单质汞的研究 沈伯雄, 陈建宏, 蔡记, 何川, 李卓 (2890)

污泥直接干化产生的恶臭及挥发性有机物特征研究 陈文和, 邓明佳, 罗辉, 张婧赢, 丁文杰, 刘俊新, 李琳 (2897)

基于风险管理的区域(流域)地下水污染预警方法研究 白利平, 王业耀, 郭永丽, 周友亚, 刘俐, 颜增光, 李发生 (2903)

1980~2010年浙江某典型河流硝态氮通量对净人类活动氮输入的动态响应 张柏发, 陈丁江 (2911)

南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究 蔡春晓, 刘红玉, 李玉凤, 王聪, 侯明行 (2920)

三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 石福臣, Sasa Kaichiro (2928)

岩溶地下河流域表层土壤多环芳烃污染特征及来源分析 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 徐昕, 袁道先, 胡宁 (2937)

亚热带典型岩溶区地表流水文地球化学昼夜变化及其影响因素研究 张陶, 蒲俊兵, 袁道先, 章程, 何师意, 于爽, 刘文, 莫雪, 周建超, 杨会, 唐伟 (2944)

藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究 肖可, 沈立成, 王鹏 (2952)

广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究 刘文, 蒲俊兵, 于爽, 章程, 区绎如, 袁道先, 杨会, 唐伟 (2959)

铜陵相思河流域重金属分布特征研究 陈莉薇, 徐晓春, 王军, 陈芳 (2967)

不同压力作用下太湖蓝藻气囊体积分数及上浮特性研究 王巍, 丛海兵, 徐亚军, 陈雯婧, 徐思涛, 吴军, 蒋新跃 (2974)

酸性条件下Ti(IV)催化 O₃/H₂O₂ 降解邻苯二甲酸二甲酯 高燕, 沈佟栋, 陈尧, 周慧华, 童少平 (2980)

无机离子与胡敏酸对零价铁去除水中Pb(II)、Hg(II)的影响 施秋伶, 周欣, 张进忠, 邱昕凯 (2985)

羟基磷灰石-四氧化三铁-沸石复合材料制备及去除水中刚果红研究 方巧, 林建伟, 詹艳艳, 杨孟娟, 郑雯婧 (2992)

不锈钢 201、304 和 316L 在模拟污水管道反应器中的腐蚀 鲍国栋, 左剑恶, 王雅娇, 于里 (3002)

微滤过程中腐殖酸与膜表面黏附特性的试验研究 王磊, 王磊, 黄丹曦, 王旭东 (3007)

不同类型 LDHs 对垂直流人工湿地无烟煤基质的覆膜改性及其脱氮效果研究 张翔凌, 郭露, 陈俊杰, 刘小婷, 徐璐, 陈巧珍, 王晓晓 (3012)

SPG 膜曝气-基因工程菌生物膜反应器处理阿特拉津废水研究 刘春, 龚鹏飞, 肖太民, 张明, 年永嘉, 杨景亮, 张晶 (3018)

SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器运行性能影响因素研究 张磊, 张明, 刘春, 张静, 刘俊良 (3024)

曝气膜生物反应器运行过程中污泥活性特征变化及其对膜污染的影响 陈烜, 汤兵, 张姿, 宾丽英, 黄绍松, 付丰连, 邱兵 (3031)

限量曝气进水时间对硝化颗粒污泥的影响特性研究 刘文如, 阴方芳, 王建芳, 沈耀良 (3038)

UASBB 厌氧氨氧化反应器处理污泥脱水液的影响因素研究 李亚峰, 马晨曦, 张驰 (3044)

开封周边地区地表灰尘中汞背景值及其应用 陈彦芳, 马建华, 董运武, 刘德新, 陈星 (3052)

北京市幼儿园地面尘中有毒金属浓度及其健康风险 段恒轶, 吴亚涛, 王珏, 刘兆荣 (3060)

珠三角电子垃圾和城市地区家庭灰尘中多氯联苯的来源及暴露风险 朱智成, 陈社军, 丁南, 王璟, 罗孝俊, 麦碧娟 (3066)

温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应 齐玉春, 彭琴, 董云社, 肖胜生, 孙良杰, 刘欣超, 何亚婷, 贾军强, 曹丛丛 (3073)

不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响 刘希玉, 邹敬东, 徐丽丽, 张心昱, 杨风亭, 戴晓琴, 王忠强, 孙晓敏 (3083)

低分子有机酸对土壤中 Cu 化学形态的影响 黄国勇, 付庆灵, 朱俊, 万田英, 胡红青 (3091)

EDTA 与柠檬酸复配洗修多重金属污染土壤效果研究 尹雪, 陈家军, 蔡文敏 (3096)

不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和 N₂O 排放的关系 陈玲, 范会, 蒋静艳 (3102)

黄河口不同恢复阶段湿地土壤 N₂O 产生的不同过程及贡献 孙文广, 孙志高, 甘卓亭, 孙万龙, 王伟 (3110)

猪粪化肥配施对双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及其全球增温潜势的影响 王聪, 沈健林, 郑亮, 刘杰云, 秦红灵, 李勇, 吴金水 (3120)

我国北方两地环境臭氧浓度对矮菜豆生长的影响 袁相洋, 张巍巍, 孙敬松, 胡恩柱, 张玉龙, 张红星, 田媛, 冯兆忠 (3128)

丛枝菌根影响纳米 ZnO 对玉米的生物效应 王卫中, 王发园, 李帅, 刘雪琴 (3135)

丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响 李霞, 彭霞薇, 伍松林, 李志茹, 冯红梅, 江泽平 (3142)

含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响 雷鸣, 曾敏, 廖柏寒, 胡立琼, 周航, 龙水波 (3149)

重金属铬(VI)的生态毒性及其土壤环境基准 王晓南, 刘征涛, 王婉华, 张聪, 陈丽红 (3155)

维生素 B₆ 对脱氯功能蓝藻降解 2,4,4'-三氯联苯的促进作用研究 刘嘉裕, 肖文丰, 鲁莉萍, 张杭君 (3162)

己烯雌酚降解菌株沙雷氏菌的分离鉴定及其降解特性 徐冉芳, 孙敏霞, 刘娟, 汪泓, 李欣, 朱雪竹, 凌婉婷 (3169)

多溴联苯醚在市场鲫鱼体内分布和食鱼暴露量 王俊霞, 王春艳, 刘莉莉, 周啸宇, 刘洋成, 林匡飞 (3175)

稀有鮐鲫 HMGR 基因全长克隆及雌鱼经五氯酚暴露基因表达的分析 邓川, 毛思予, 熊力, 张晓峰, 李伟, 高香, 刘秋萍, 陈韵, 刘堰 (3183)

藻细胞和高岭土的存在对病毒 MS2 存活的影响 何强, 吴庆庆, 马红芳, 周真明, 苑宝玲 (3192)

多胺功能化介孔炭对 Pb(II) 的吸附动力学与机制 李坤权, 王艳锦, 杨美蓉, 朱志强, 郑正 (3198)

生物活性炭投加量对垃圾渗滤液处理效果的影响 崔延瑞, 郭焱, 吴青, 马罗丹, 孙剑辉, 崔凤灵 (3206)

经济结构调整的污染减排效应: 以 COD 减排为例 李名升, 周磊, 陈远航, 李茜, 张建辉 (3212)

中国铅流改变原因分析 马兰, 毛建素 (3219)

放牧阉牦牛提前出栏甲烷排放强度减排潜力探讨 汪诗平, Andreas Wilkes, 汪亚运, 白玲 (3225)

中国水体硝酸盐氮氧双稳定同位素溯源研究进展 徐志伟, 张心昱, 于贵瑞, 孙晓敏, 温学发 (3230)

《环境科学》征稿简则(2936) 《环境科学》征订启事(3051) 信息(2882,2927,3059,3218)

温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应

齐玉春¹, 彭琴¹, 董云社^{1*}, 肖胜生², 孙良杰^{1,3}, 刘欣超^{1,3}, 何亚婷⁴, 贾军强^{1,3}, 曹丛丛^{1,3}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 江西省水土保持科学研究所, 南昌 330029; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 2008 年 5 月~2011 年 10 月, 以内蒙古温带典型草原为研究对象, 利用小区模拟控制试验, 设置对照[$0 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]、低氮[$5 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]、中氮[$10 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]、高氮[$20 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]这 4 个净氮输入量处理, 模拟研究了大气氮沉降水平变化对土壤总有机碳 (TOC) 以及溶解性有机碳 (DOC) 含量、年际变化及其垂直分布格局的影响, 并分析了两者的关系。结果表明, 除个别年份外, 土壤 TOC 与 DOC 含量均随土壤深度增加而递减, 4 a 的连续施氮并未改变土壤 TOC 与 DOC 的垂直分布规律, 但施氮降低了土壤 TOC 的垂直变异, 增加了土壤 DOC 的垂直变异; 施氮 4 a 对于草地表层 0~20 cm 土壤 TOC 与 DOC 含量的变化并未表现出显著影响 ($P > 0.05$)。不同氮输入水平处理 0~20 cm 土层有机碳密度在 $3.9 \sim 5.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间变动, 试验前两年不同氮处理 0~20 cm 土壤有机碳密度均低于对照或与对照接近, 试验后两年, 施氮对土壤总有机碳密度逐渐呈现出一定的促进作用, 但与对照的差异仍不显著 ($P > 0.05$); 不同处理 0~20 cm 土层 DOC/TOC 约为 0.32%~1.09%, 氮输入增加普遍降低了 DOC 在整个 TOC 中所占的比例; 草地土壤 TOC 与 DOC 的变化呈显著正相关 ($P < 0.01$)。不同处理草地土壤 DOC 随时间的变异均远大于 TOC, 与 TOC 相比, 草地土壤 DOC 的变化更为迅速, 是研究草地土壤碳库对氮沉降变化响应的重要敏感性指标。

关键词: 温带典型草原; 氮沉降; 土壤; 总有机碳; 溶解性有机碳

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)08-3073-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.08.034

Responses of Soil Total Organic Carbon and Dissolved Organic Carbon to Simulated Nitrogen Deposition in Temperate Typical Steppe in Inner Mongolia, China

QI Yu-chun¹, PENG Qin¹, DONG Yun-she¹, XIAO Sheng-sheng², SUN Liang-jie^{1,3}, LIU Xin-chao^{1,3}, HE Ya-ting⁴, JIA Jun-qiang^{1,3}, CAO Cong-cong^{1,3}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang 330029, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on a field manipulative nitrogen (N) addition experiment, the effects of atmospheric N deposition level change on the contents, inter-annual variation and profile distribution of soil total organic carbon (TOC) and dissolved organic carbon (DOC) were investigated from May, 2008 to October, 2011 in a temperate typical steppe in Inner Mongolia of China, and the relationship between TOC and DOC was also discussed. The treatments in the manipulative experiment included N additions at rates of 0, 5, 10, and 20 $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, representing the control (CK), low N (LN), medium N (MN), and high N (HN) treatment, respectively. The results indicated that the concentrations of soil TOC and DOC decreased progressively with soil depth in all cases except for the DOC at 10-20 cm depth in individual years. The increase of N input in typical steppe did not change the vertical distribution of soil TOC and DOC, but reduced the vertical variation of TOC and increased the vertical variation of DOC in the surface soil horizon. In addition, the contents of soil TOC and DOC at 0-10 cm and 10-20 cm soil layers changed insignificantly after the continuous increase in anthropogenic N input for four years. The soil organic C density of 0-20 cm soil layer for different N treatment levels varied between $3.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ and $5.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, and the soil organic C densities of fertilized treatments in the first two years were similar to or slightly lower than those of CK, while in the following two years, the increase in N deposition gradually played a positive role in increasing soil organic C density, but the differences in soil TOC and DOC contents between CK and fertilized plots were not significant ($P > 0.05$). The ratio of soil DOC to TOC (DOC/TOC) varied from 0.32% to 1.09%. The increase in N deposition generally lowered the

收稿日期: 2013-12-17; 修订日期: 2014-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41330528, 41373084, 41203054); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX2-EW-302)

作者简介: 齐玉春(1972~), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为全球变化与陆地生态系统碳氮生物地球化学循环, E-mail: qiyu@igsnrr.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: dongys@igsnrr.ac.cn

proportion of DOC in soil TOC, which was conducive to the accumulation of soil organic C. The change of soil DOC was positively correlated with that of TOC ($P < 0.01$). The temporal variations of soil DOC in different N treatments were all far greater than those of TOC, and the soil DOC was the important sensitive indicator for predicting and evaluating the response of soil C pool to the change in atmospheric N deposition in the temperate grassland ecosystem.

Key words: temperate typical steppe; N deposition; soil; total organic carbon; dissolved organic carbon

土壤有机碳作为土壤肥力及环境质量的重要特征,一直以来都是土壤学研究的热点^[1,2]. 同时,作为陆地生态系统目前已知的最大碳贮存库,土壤碳库变化近年来也逐渐成为碳循环以及全球变化研究重点关注的核心内容^[3-5]. 由于全球每年由土壤释放到大气中的 CO_2 量最高可达化石燃料燃烧排放量的 10 倍以上^[6],因此,加强土壤碳库变化的研究与管理,揭示其对环境变化的响应机制,对于科学增加土壤对大气碳素的固持,缓解全球温室效应至关重要. 其中,对于更易受到全球环境变化影响、且与温室气体排放密切相关的土壤活性碳库的研究更加尤为重要^[7,8].

近年来,化石燃料的燃烧以及化肥的大量使用带来全球大气氮沉降量的日趋增加. 我国作为除欧洲、美国外的第三大氮沉降集中区^[9,10],大气氮沉降量也在逐年上升. 据 2013 年 Nature 杂志的最新报道,从 1980~2010 年,中国总的氮沉降量平均每年以 $0.41 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的速率在增加,并且这种趋势在未来的数十年内还将持续下去,进而带来土壤外源氮输入状态的显著改变^[11]. Holland 等^[12]的研究认为,几乎所有以 CO_2 形式丢失的碳汇都可以通过植物生长响应氮沉降的促进作用来调节. 虽然这个结论准确与否仍需进一步探讨,但氮对陆地生态系统碳固存能力存在显著影响是毋庸置疑的. 加强大气氮沉降水平变化对土壤有机碳库影响效应的定量研究不仅对于科学预测未来全球氮沉降变化情景下陆地生态系统土壤碳库的可能变化具有重要科学意义,也是人类进入以管理全球碳循环为目标的后京都时代的迫切需要^[13,14].

有关大气氮沉降增加对土壤碳库影响的试验研究虽然近些年来逐渐受到关注,但不同研究获得的结论存在较大的差异. 对于土壤总有机碳 (TOC) 库, Hagedorn 等^[15]、Huang 等^[16] 以及 Ochoa-Hueso 等^[17] 在森林生态系统, Jung 等^[18] 在农田生态系统的研究中均发现,氮沉降能促进碳固定,从而在一定程度上增加了土壤有机碳含量及碳储量; Mack 等^[19] 与 Conant 等^[20] 的研究则发现氮沉降水平的增加将会导致森林与农田土壤有机碳含量的减少;对于土壤活性碳库的影响效应也存在类似的研究结

论. 以目前逐渐受到关注的土壤溶解性有机碳 (DOC) 为例, Aber^[21] 认为增加氮肥会引起凋落物中氮的含量增加、微生物活动加强而导致 DOC 的减少;也有学者研究认为 DOC 的变化与氮输入的增加趋势相同^[22]; 而刘德燕等^[23] 对中国三江平原沼泽湿地研究时则发现:好气条件下,净氮输入量为 $1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 的氮处理水平对土壤 DOC 含量的影响不显著,而净氮输入量为 $2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时,土壤 DOC 含量则显著增加. 由此可以看出,无论是土壤总有机碳还是土壤活性有机碳库,其对氮沉降水平变化的响应依然存在较大的不确定性,且缺乏相对较长期的试验研究. 并且,从研究对象来看,以往大量研究主要集中在森林、农田以及部分湿地的研究上,对于草地生态系统的研究还十分薄弱,尤其是对草地土壤活性碳库影响的相关报道更为有限^[24-26]. 草地 TOC 以及土壤活性有机碳对大气氮沉降变化的响应仍然是陆地生态系统土壤碳循环研究的薄弱环节.

在中国,草地是分布面积最大的陆地生态系统,约占国土面积的 40% 左右^[27]. 由于长期过度放牧以及风蚀等的影响,土壤有效氮素供给存在严重不足,从而使得草地碳源、汇对于氮沉降的变化更加敏感,是我国碳循环以及全球变化研究的重点区域之一^[28]. 因此,本研究基于我国草地相关长期试验数据缺乏的研究现状,选取了我国内蒙古温带典型草原中的羊草草原为研究对象,自 2008~2011 年开展了连续 4 a 的氮沉降野外模拟控制试验,探讨了草地土壤 TOC 以及 DOC 含量对外源氮输入水平变化的定量响应,并对其可能的影响机制进行了初步的分析与讨论,以期科学评价与预测未来大气氮沉降水平变化对中国温带草地土壤有机碳库的可能影响提供数据基础,同时也为合理利用与管理草地,科学增加土壤碳固存以及减缓草地温室效应贡献提供一定的理论指导.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古的锡林河流域. 该流域地处国际地圈-生物圈计划 (IGBP) 全球变化研究中国东

北陆地样带 (NECT) 之内, 区域内草原原始面貌保存较好, 在中国温带草原区乃至整个欧亚大陆草原区都具有典型性与代表性^[29,30]. 试验选取了典型草原中的羊草草原作为研究对象. 羊草草原是锡林河流域面积最大的草原类型, 也是当地经济价值最高的天然草场, 广泛分布于我国东北、内蒙古东部、蒙古共和国东部、俄罗斯外贝加尔地区^[30], 总面积约为 $4.2 \times 10^5 \text{ km}^2$, 其中一半以上分布在中国. 本研究建立的控制试验小区位于北纬 $43^\circ 33' 3''$, 东经 $116^\circ 40' 31''$, 海拔约 1 265 m, 建群种为根茎禾草羊草 (*Leymus chinensis*), 优势种为大针茅 (*Stipa grandis*) 和冰草 (*Agropyron michnoi*) 等密丛禾草. 土壤为暗栗钙土, 土层深度 100 ~ 150 cm, 其中, 土壤有机层厚度约为 20 ~ 30 cm. 年降水量 350 ~ 450 mm, 年均气温 $-0.3 \sim 1^\circ\text{C}$, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 $1\ 800^\circ\text{C} \sim 2\ 000^\circ\text{C}$. 该样地于 2008 年围封, 围封前一直作为打草场, 除自然大气氮沉降外, 试验地块在本试验实施前未受到任何人为施氮的影响.

1.2 试验设计

2008 年生长季初, 在选定的羊草草原内选取地势较平坦, 植被群落密度、盖度和种群结构具有代表性且植被土壤性质较为均一的地块划分控制试验小区. 围栏小区面积约为 $86 \text{ m} \times 64 \text{ m}$, 样地中心区域面积为 $76 \text{ m} \times 54 \text{ m}$, 围栏网四周与中心区域各留有 5 m 的缓冲区. 中心区域共划分为 40 个试验小区, 每个小区面积均为 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$, 同时两两小区之间设有 1 m 宽的缓冲隔离带. 氮沉降处理水平的设置主要基于目前的自然氮沉降水平及其至本世纪末的可能变化, 同时参考国际上同类研究以及国内已有施氮试验^[9,31~33]. 据有长期数据的欧洲大气氮沉降监测结果表明, 在过去的一个世纪, 大气氮沉降量约增加了 5 ~ 10 倍^[34], 因此, 在目前国内外许多相关模拟试验中, 通常采用短期内高于当前氮沉降水平 5 ~ 10 倍的氮输入剂量来模拟未来氮沉降变化的可能情景^[35]. 基于 Liu 等^[11] 对我国氮沉降水平变化的研究结果 [2000 年我国氮沉降平均水平约为 $21.1 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 其中, 北方的氮沉降水平约为 $22.6 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$], 本研究将模拟氮沉降水平的最大剂量设为 $200 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 40 个小区共设置 4 个净氮输入水平, 分别为 CK: $0 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, LN: $50 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, MN: $100 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, HN: $200 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 每个处理各设 10 个重复小区, 不同处理的设置为完全随机区组设计.

模拟氮沉降试验自 2008 年生长季开始, 进行了

连续 4 a 的处理与采样. 2008 ~ 2011 年, 在每年当地多雨季节的 7 月初与 8 月初 (研究表明, 温带草原区氮沉降多为脉冲式输入, 且多随降雨 (雪)、降雾形式输入^[36]) 将拟添加的氮量均匀施入控制试验小区, 每次的氮添加量均为全年拟加氮量的一半. 氮肥类型为兼有铵态氮与硝态氮的高效复合中性氮肥硝酸铵钙 (含氮量为 26%), 具体施用方法是: 将需要施入的氮量换算成每个小区所需的硝酸铵钙量, 将硝酸铵钙充分溶于 20 L 水中, 以喷壶于施氮日清晨在草地人工来回喷洒, 对照小区不施肥, 但喷施等量的水, 以尽量减少因外加水因素导致的小区间羊草生长及土壤特征变化的差异.

1.3 样品的采集与分析

土壤样品利用土钻法进行采集. 分别在 2008 ~ 2011 年生长季, 在各氮处理水平的 10 个重复小区中选取 3 个小区采集土壤样品. 在每个小区 S 形布点, 9 点采样, 除 2008 年与 2009 年采集层次为 0 ~ 40 cm (0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm、30 ~ 40 cm) 外, 其余年份均采集的是表层 0 ~ 20 cm 的土壤样品 (0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm). 采集频率为 7、8 月每个月 2 次, 其他月份每个月 1 次. 每次样品采集后, 同小区同层次 9 钻样品混合, 每个处理 3 个重复. 充分混合后的一部分样品挑除砾石与可见根系后, 风干、磨细、过 80 目筛, 用于分析土壤 TOC 含量. 另取混合后的一部分新鲜土样, 经超纯水浸提后用于土壤 DOC 含量的测定.

土壤样品中 TOC 含量利用重铬酸钾-外加热法分析^[37]. DOC 含量利用超纯水浸提-有机碳分析仪法测定. DOC 测定的具体步骤为: 取过 2 mm 筛的鲜土 10 g 放入 100 mL 的离心管中, 加入 50 mL 超纯水振荡 30 min 后离心 ($5\ 000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) 10 min (若浑浊则重新离心), 上清液通过循环水真空泵抽滤过 $0.45 \mu\text{m}$ 的微孔滤膜, 滤液中的有机碳浓度利用总有机碳分析仪 (Elementar vario TOC cube, 德国 elementar 元素分析系统公司) 测定. 同时, 每份土样用烘干法测质量含水量, 用以换算成以烘干土为基准的 DOC 浓度. 土壤容重利用环刀法获得.

1.4 数据分析方法

土壤有机碳密度利用以下公式计算^[38]:

$$P = \sum_{i=1}^n (d_i \times H_i \times b_i \times 0.1)$$

式中, P 为土壤碳密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), i 为土壤层次, d_i 为土壤有机碳含量 (%), H_i 为土层厚度 (cm), b_i 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$).

对土壤不同形态有机碳组分的统计分析 (Pearson 相关分析、单向方差分析以及曲线估计等) 主要利用 SPSS 17.0 软件包完成; 文中图件利用 Excel 2007 绘制。

2 结果与分析

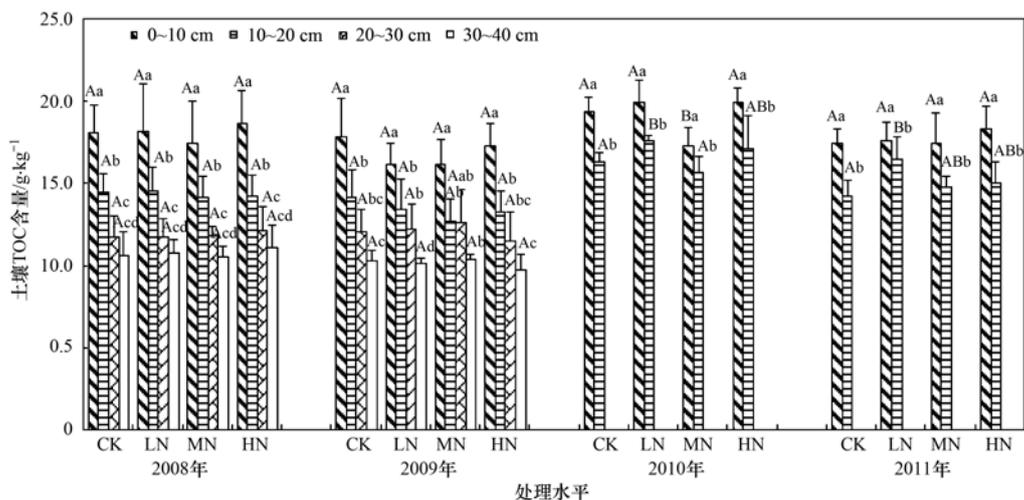
2.1 氮沉降对草原土壤 TOC 含量的影响

图 1 为不同年份、不同氮处理水平下羊草草原土壤 TOC 分布特征。从中可以看出, 不同年份各处理土壤 TOC 含量均随土壤深度增加而降低, 同一氮处理水平各土层 TOC 含量均以表层 0~10 cm 最高。施氮前两年, 不同氮处理 0~10 cm 土壤 TOC 含量均显著高于其下 3 个土层 ($P < 0.01$), 但 20~30 cm 与 30~40 cm 土层间 TOC 含量差异不显著 ($P > 0.05$)。其中, 施氮第 1 a, 与 0~10 cm 土层相比, 10~20 cm、20~30 cm 以及 30~40 cm 土层 TOC 含量的下降幅度分别约为 19.0%~23.8%、32.4%~35.3% 以及 39.6%~41.5%。施氮第 2 a, 不同氮水平处理土壤 TOC 随深度增加的下降幅度与第 1 a 基本相近, 0~10 cm 以下各土层 TOC 的下降幅度分别约为 16.9%~23.2%、24.1%~33.5% 与 37.3%~43.6%。施氮第 3 a 与第 4 a, 虽然 0~10 cm 土层 TOC 含量仍显著高于 10~20 cm 土层, 但不同处理 10~20 cm 土壤 TOC 含量降低幅度约为 9.5%~16.0% 以及 6.4%~18.6%, 垂直分异较前两年明显降低。此外, 计算不同氮处理水平土壤 TOC 的垂直变异系数可知, 除前两年的 HN 处理外, 连续 4 个

年份 3 个施氮处理土壤 TOC 的垂直变异系数均略小于 CK, 氮沉降增加降低了土壤 TOC 的垂直变异, 但 TOC 垂直变异系数与氮输入水平变化无明显的线性关系, 梯度效应不明显。

比较同一年份不同氮处理水平间土壤 TOC 含量的差异 (图 1), 无论是 0~10 cm 还是 10~20 cm 土层, 4 个处理水平的土壤 TOC 含量在不同年份互有高低, 并没有表现出一致的对比关系, 且除 2010 年 0~10 cm 土层 MN 处理土壤 TOC 含量显著低于其他处理水平 ($P < 0.01$)、2010 年与 2011 年 10~20 cm 土层 LN 处理显著高于 CK ($P < 0.01$) 或 MN 处理 ($P < 0.05$) 外, 其他年份不同处理两两间的差异并不显著 ($P > 0.05$)。施氮 4 a 对于草地土壤表层 0~20 cm 的 TOC 含量变化并未表现出显著的影响, 但 LN 水平处理在施氮后两年对于 10~20 cm 土层 TOC 含量的增加已呈现出一定的促进作用。

同时, 分析同一处理土壤 TOC 含量的年际变化, 对于 0~10 cm 土层, 除 MN 处理年际差异规律较为特殊外, 包含 CK 在内的不同处理均以控制试验开始后的第 3 a (2010 年) 土壤 TOC 含量显著高于其他 3 个试验年份 ($P < 0.01$), 但其他年份间差异不显著 ($P > 0.05$), MN 处理 2010 年土壤 TOC 平均含量仅与 2009 年差异显著 ($P < 0.05$)。对于 10~20 cm 土层, 除 CK 处理外, 3 个施氮处理在施氮后两年均显著高于前两年 ($P < 0.01$), 随着施氮的进行, 土壤亚表层 TOC 含量有所增加。



图中数据为整个生长季平均含量, 误差线为生长季多次测定值的标准偏差 ($n=8$); 不同大写字母表示同一年份不同处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一年份不同层次间差异达到显著水平 ($P < 0.05$)

图 1 典型草原不同氮处理土壤 TOC 分布特征

Fig. 1 Soil TOC with different depths at four nitrogen treatment levels in temperate typical steppe

此外,利用表层土壤 TOC 含量以及容重数据计算得到表层 0~20 cm 土壤总有机碳密度(图 2). 从整个 0~20 cm 土层来看,不同氮处理水平土壤有机碳密度在 3.9~5.6 kg·m⁻²之间变动. 施氮前两年不同氮处理 0~20 cm 土壤总有机碳密度均低于 CK 或与 CK 接近,而施氮后两年,施氮对土壤总有机碳密度逐渐呈现出一定的促进作用,除施氮第 3 a MN 处理显著低于 CK 外($P < 0.01$),其余施氮处理 0~20 cm 土壤总有机碳密度均大于 CK,但同一年份不同处理间差异并未达到 0.05 的显著性水平. 对于同一氮处理总有机碳密度的年际差异,从图 2 可以看出,不同氮处理土壤表层有机碳密度的年际变化动态基本一致,不同氮处理 0~20 cm 土层总有机碳密度均以施氮第 3 a 为最高,且与其他年份的差异达到了极显著($P < 0.01$),其他年份间土壤有机碳密度虽有明显波动,但年际间差异不显著($P > 0.05$).

2.2 氮沉降对草原土壤 DOC 含量的影响

与土壤 TOC 的垂直分布格局有所差异,施氮后土壤 DOC 含量并未完全呈现出随土壤深度增加而降低(图 3),尤其是施氮第 4 a 表层 10~20 cm 土壤 DOC 含量反而略高于 0~10 cm 土层. 但总的来说,除施氮第 2 a 不同氮处理 30~40 cm 土层 DOC 含量普遍显著低于 0~10 cm 土层外,4 a 连续施氮后 0~10 cm 与 10~20 cm 土层 DOC 含量的差异并不显著. 与 CK 相比,施氮增加了表层 0~40 cm 土壤

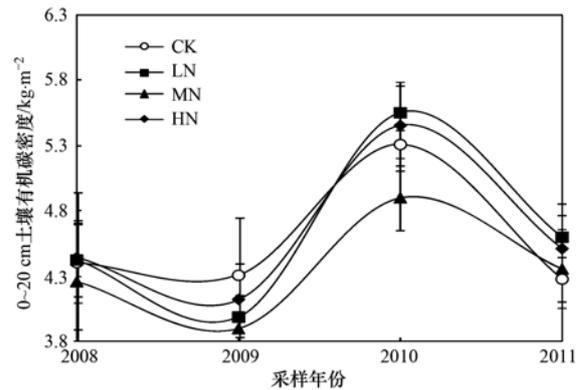
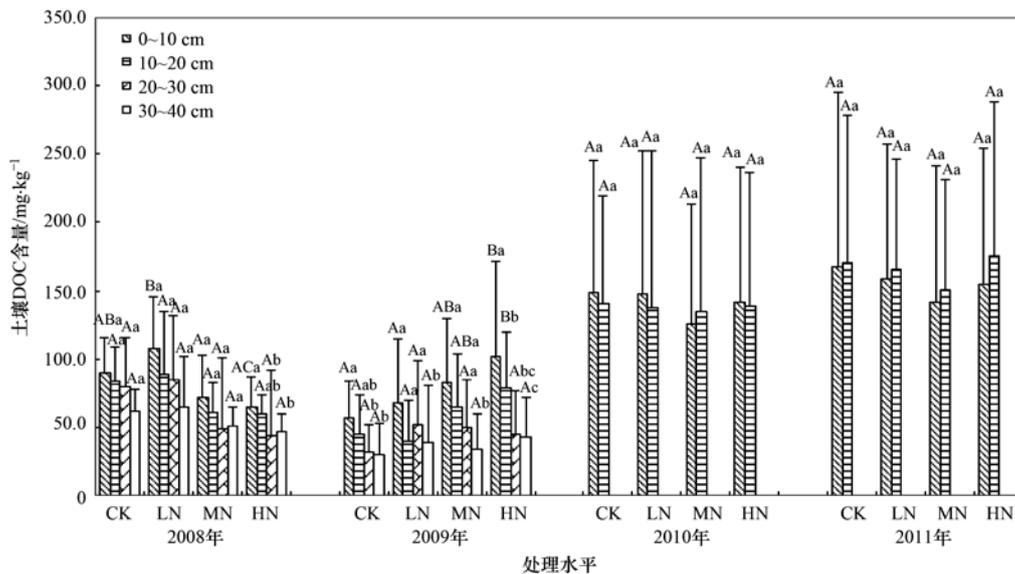


图 2 不同氮水平处理 0~20 cm 土壤总有机碳密度及其年际变化
Fig. 2 Soil organic carbon density of 0-20 cm soil layer and its inter-annual variation in different nitrogen treatment plots

DOC 的垂直变异,但随着施氮的进行,试验后两年土壤 DOC 垂直分异明显小于前两年. 此外,与 TOC 垂直变异相比,除施氮第 2 a 外,其他年份土壤 DOC 的垂直变异均小于 TOC.

与不同氮处理水平间土壤 TOC 含量的对比关系相类似,不同年份土壤 DOC 含量在 4 个处理间也并未表现出一致的对比关系(图 3). 同一土层各处理土壤 DOC 含量在不同年份互有高低,且无论是 0~10 cm 还是 10~20 cm 土层,除了施氮第 2 a 的 0~10 cm 以及 10~20 cm 土层 HN 处理显著高于 CK 处理外,其他年份施氮对土壤 DOC 含量的影响并不显著. 4 a 连续施氮对于草地表层 0~20 cm 土壤 DOC 含量并未表现出显著的影响.



图中数据为整个生长季平均含量,误差线为生长季多次测定值的标准偏差($n=8$); 不同大写字母表示同一年份不同处理间差异达到显著水平($P < 0.05$),不同小写字母表示同一年份不同层次间差异达到显著水平($P < 0.05$)

图 3 典型草原不同氮处理土壤 DOC 分布特征

Fig. 3 Soil DOC with different soil depths at four nitrogen treatment levels in temperate typical steppe

对比同一氮处理水平土壤 DOC 的年际变异(图 3),对于 0~10 cm 土层,试验后两年土壤 DOC 含量均高于前两年,但除 CK 与 LN 处理在第 2 a 显著低于其他年份外,其他处理不同年份间差异并未达到 0.05 的显著性水平;对于 10~20 cm 土层,后两年土壤 DOC 含量虽然也明显高于前两年,但不同处理的年际差异并不完全相同. 3 个施氮处理主要表现为施氮第 4 a 显著高于第 1 a(MN 与 HN)或第 2 a(LN 与 HN),而 CK 处理则表现为施氮第 2 a 显著低于其他年份($P < 0.05$),与 CK 处理 0~10 cm 土层 DOC 年际对比关系相同.

2.3 土壤 TOC 与 DOC 的耦合变化关系分析

土壤 DOC 占 TOC 的比率(DOC/TOC)被称为土壤 DOC 的分配比例^[39]. 通过求算 DOC 的分配比例可以消除不同研究地点 TOC 含量差异对 DOC 的影响,比 DOC 的绝对含量更能体现土壤碳库的状况并且可以更加真实地反映出土壤有机碳质量的差异. 研究表明,土壤中 DOC 所占比例越高,说明土壤碳的活性越大,稳定性越差^[40].

对于 0~10 cm 土层(表 1), DOC/TOC 分别在 0.34%~0.87%(CK)、0.47%~0.83%(LN)、0.41%~0.74%(MN)以及 0.35%~0.76%(HN)范围内变动,且除施氮第 1 a 的 LN 处理以及施氮第 2 a 的 3 个施氮处理其 DOC/TOC 略高于 CK 外,其余年份施氮处理 DOC/TOC 的比例均小于 CK;而对于 10~20 cm 土层,不同处理 DOC/TOC 的变化范围分别为 0.32%~1.09%(CK)、0.32%~0.92%(LN)、0.43%~0.93%(MN)以及 0.42%~1.06%(HN). 与 0~10 cm 土层相类似,除施氮第 1 a 的 LN 处理以及施氮第 2 a 的 3 个施氮处理其 DOC/TOC 略高于 CK 外,其余年份施氮处理 DOC/TOC 的

比例也均小于 CK. 施氮处理普遍降低了表层土壤 DOC 在 TOC 中所占的比例. 此外,从不同层次的比较来看,除施氮第 2 a 的 0~10 cm 土层 DOC/TOC 略高于 10~20 cm 外,其余年份 10~20 cm 土壤 DOC 在 TOC 所占比例均高于同一处理的 0~10 cm 土层.

表 1 不同氮处理水平土壤 DOC 占 TOC 的比例¹⁾

年份	氮处理水平	DOC/TOC/%	
		0~10 cm	10~20 cm
2008	CK	0.50(0.13)	0.58(0.18)
	LN	0.60(0.18)	0.61(0.29)
	MN	0.41(0.21)	0.43(0.15)
	HN	0.35(0.13)	0.42(0.10)
2009	CK	0.34(0.12)	0.32(0.25)
	LN	0.47(0.21)	0.32(0.15)
	MN	0.57(0.16)	0.51(0.27)
	HN	0.65(0.34)	0.59(0.17)
2010	CK	0.77(0.41)	0.86(0.33)
	LN	0.74(0.13)	0.78(0.51)
	MN	0.72(0.43)	0.86(0.66)
	HN	0.71(0.51)	0.81(0.50)
2011	CK	0.87(0.92)	1.09(1.20)
	LN	0.83(0.75)	0.92(0.65)
	MN	0.74(0.32)	0.93(0.40)
	HN	0.76(0.80)	1.06(0.88)

1) 表中数值为平均值(标准偏差)

此外,综合分析各年份不同处理土壤 TOC 与 DOC 变化之间的关系可以看出(图 4),两者之间的变化表现出显著的正相关关系($P < 0.01$). 这表明,土壤 TOC 的变化在一定程度上制约着土壤 DOC 的变化. 同时,比较 TOC 与 DOC 的时间变异可知,不同氮处理土壤 DOC 含量随时间的变异均远

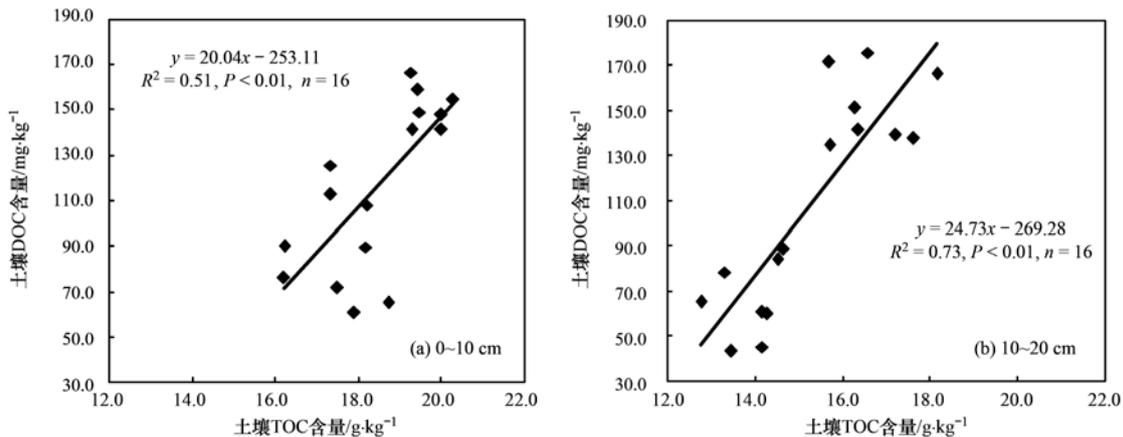


图 4 试验区土壤 DOC 与 TOC 的耦合变化关系

Fig. 4 Relationship between DOC and TOC in the experiment plots

大于 TOC, 与 TOC 的变化相比, 土壤 DOC 的变化更为敏感和迅速.

3 讨论

3.1 施氮对土壤 TOC、DOC 含量变化及其相互关系的影响

本研究连续 4 a 的小区模拟试验发现, 施氮对草地表层 0 ~ 20 cm 土壤 TOC 与 DOC 含量并无显著影响. 与本研究的结论相类似, Unlu 等^[41]在沙地农田、Neff 等^[42]在高山苔原带、Zeng 等^[43]在中国科尔沁沙地草地 5 a 的施氮试验中均未发现土壤 TOC 含量的显著变化. 对于土壤 DOC, Sjöberg 等^[44]在瑞典挪威云杉林中以及 Currie 等^[45]在美国哈佛大学森林施氮试验中也未发现施氮对地表土壤 DOC 的显著影响. 分析原因可能与氮可利用性变化对土壤有机碳的不同来源影响存在差异甚至相反密切相关. 一般来说, 枯落物、死亡根系及其根系分泌物等是土壤 TOC 的主要来源. 本试验中, 在施氮的第 2 a 与第 3 a 对不同氮处理的地上与根系生物量变化进行了同期测定, 结果表明, LN, MN 与 HN 处理生长季平均地上生物量在施氮第 2 a 分别比 CK 增加了 13.5%、11.7% 以及 18.5%, 施氮第 3 a 这 3 个氮处理较 CK 分别增加了 26.1%、38.0% 与 36.8% (具体数据未列出, 另文发表), 增加的地上生物量以枯枝落叶的形式为土壤提供了更多的有机碳来源. 但随着土壤氮有效性的逐步提高, 生物量分配比例逐渐向地上部分转移以利于获取更多的光能进行光合作用, 植被的根冠比逐渐减低, 且均小于 CK (表 2). 植物向根系分配比例的降低减少了根系残体及其分泌物向土壤的碳归还, 在一定程度上抵消了地上部分的正效应; 与此同时, 对同一草地凋落物分解过程的研究表明, 在凋落物分解早期, 不同氮添加水平对凋落物分解速率无显著影响, 但是在分解的 398 d 之后, MN 和 HN 处理对凋落物分解过程则逐渐表现出一定的抑制作用^[46]. 施氮在增加草地凋落物量的同时也降低了凋落物的分解速率. 因此, 在上述相反效应的共同影响下, 土壤 TOC 含量的变化并不显著. 由于有机碳不同来源对氮可利用性变化的响应存在一定差异, 因此, 利用同位素示踪技术等方法定量区分氮输入变化后草地土壤有机碳不同来源的相对贡献变化并开展长期的定位模拟试验研究对于准确预测未来氮沉降变化情景下草地土壤有机碳的可能响应至关重要.

对于土壤 DOC, 一般认为其成分主要是以富啡

酸、胡敏酸以及分子量较小的有机酸、碳水化合物为主^[47,48], 由于其来源为枯枝落叶、死亡根系及其分泌物、微生物代谢产物以及土壤有机碳本身, 因此同样受到上述变化的共同影响. 同时, 由于其水溶性以及较容易被植物与微生物利用等特点, 其含量变化对气候变化尤其是降水变化的响应较 TOC 更加敏感^[49], 与土壤质地、pH、矿质氮含量等土壤理化参数变化的关系也更密切^[50,51]. 研究表明, 施氮后 NH_4^+ 的增加由于其与胡敏酸和富里酸可结合形成类似“溶解盐”的物质, 将会提高有机质的溶解性^[51], 而施肥后土壤 pH 的下降又会通过减少腐殖质胶体表面的负电荷数量而降低土壤有机物质的可溶性^[52], 施氮后微生物固氮增加对土壤有效碳的需求也会带来土壤 DOC 含量的下降^[53,54]. 因此, 相比 TOC, 土壤 DOC 时空变异对氮沉降变化的响应更加敏感而复杂. 与此同时, 大量研究表明, 长期单施化肥对土壤有机碳的影响主要是增加了非活性有机碳的含量^[55], 而对有机碳活性部分的影响较小, 或是由于长期施氮后土壤团聚体受到破坏^[56]以及微生物可利用碳源的逐渐缺乏^[23]带来活性有机碳的减少, 进而降低了施氮后土壤 DOC 等活性有机碳在整个有机碳中所占的比例. DOC 比例的降低增加了土壤有机碳的稳定性.

表 2 不同氮处理草地植物根冠比比较

Table 2 Comparison of root-shoot ratios of grassland vegetation among different nitrogen treatments

氮处理水平	根冠比	
	2009 年	2010 年
CK	7.85	4.89
LN	7.62	3.97
MN	7.47	4.27
HN	6.33	4.18

3.2 施氮对土壤 TOC 及 DOC 垂直分布特征的影响

本研究中, 不同年份各处理土壤 TOC 含量均随土壤深度的增加而降低. 不同处理表层 0 ~ 10 cm 土壤有机碳含量均显著高于其下 3 个土层 ($P < 0.01$), 但 20 ~ 30 cm 与 30 ~ 40 cm 土层间 TOC 含量差异不显著 ($P > 0.05$). 与其他许多研究结果相类似^[57,58], 土壤 TOC 分布具有明显的表聚性. 在草地生态系统中, 地表凋落物的分解和淋溶对土壤的影响主要集中在表层^[59], 研究区草地植被根系虽然发达, 但也主要密集分布于表层. 其中, 0 ~ 20 cm 根系生物量约占 0 ~ 130 cm 总根系生物量的 52.6%^[60], 表层 0 ~ 10 cm 生产力约为 0 ~ 30 cm 总生产力的 77.8%^[27]. 外源氮输入水平的变化也并

未改变草地植被根系的垂直分布格局. 本研究对施氮样地植物生物量的测定结果显示, 施氮后生长季 0~20 cm 根系生物量最高约为 20~40 cm 根系生物量的 5 倍左右, 平均约 3 倍左右. 由于植物有 20%~50% 左右的光合产物通过根系的分泌和死亡输入土壤^[61], 因此根系生物量以及凋落物的表聚现象也就在很大程度上决定了土壤 TOC 的垂直分布特征.

受表层 TOC 的高含量、凋落物与根系等的表聚分布以及土壤表层适宜水热条件的影响, 土壤 DOC 含量也呈现随深度增加而递减的总体变化趋势. 但在施氮条件下, 随着氮素可利用性的增加, 除植被地上、地下分配格局发生变化外, 还有另外一个重要的表现就是根系分布的变浅^[62], 这就进一步增强了土壤 DOC 的表聚趋势, 导致施氮处理土壤表层与亚表层 DOC 垂直分异明显高于 CK. 但由于 DOC 易溶于水, 并可能随降水淋溶而下渗迁移至下层土壤, 因此, 在降水稍大年份, 土壤个别层次 DOC 含量随土壤深度的增加反而出现递增的状况. 本研究中, 施氮第 4 a 不同处理表层 10~20 cm 土壤 DOC 含量约比 0~10 cm 土层高 4.3%~13.5%. 高俊琴等^[63]对若尔盖高寒湿地沼泽土和泥炭土 DOC 垂直变化的研究也发现, DOC 含量的最高值不是出现在近地表, 而是出现在 8~10 cm 土层, 其原因可能是由于不同深度土壤 DOC 受到了微生物或降水淋溶作用的不同影响. 但需要指出的是, 由于干旱、半干旱草原区降水量低, 强度小, 因此, 这种淋溶作用通常也只发生在近地表, 使得 10~20 cm 土层 DOC 含量以及 DOC/TOC 略高于 0~10 cm, 而对于下层影响较小. 此外, 氮输入水平的增加虽然在一定程度上增强了土壤 DOC 的垂直分异, 但随着氮素可利用性的增加, 根系生物量分配比例将逐渐降低. 同时, 由于单施化学氮肥而缺乏有效的外加碳源补充, 微生物的数量与活性也会因碳源的缺乏而受到影响, 氮素对凋落物分解将逐渐呈现出抑制效应^[46], 凋落物、根系对土壤 DOC 表聚效应的影响也会有所减小, 因此, 施氮后两年土壤 DOC 的垂直分异较前两年有所降低, 但其长期分布特征的变化还有待于今后试验的进一步验证.

4 结论

(1) 施氮处理 4 a 对草地表层 0~20 cm 土壤 TOC 含量变化并无显著影响. 不同氮处理 0~20 cm 土壤有机碳密度约为 3.9~5.6 kg·m⁻², 施氮前两

年不同氮处理 0~20 cm 土壤总有机碳密度均低于 CK 或与 CK 接近, 但在施氮后两年, 氮素增加对土壤总有机碳密度逐渐呈现一定的促进作用. 不同年份、不同氮处理草地土壤 TOC 含量均随土壤深度的增加而递减, 施氮降低了土壤 TOC 的垂直变异.

(2) 经过 4 a 的连续施氮处理, 不同氮处理水平间以及 0~10 cm 与 10~20 cm 土层间土壤 DOC 均未表现出显著差异; 受淋溶作用等影响, 个别年份 10~20 cm 土壤 DOC 含量略高于 0~10 cm 土层. 与 CK 相比, 施氮没有改变土壤 DOC 的垂直分布特征, 但增加了其垂直变异; 3 个施氮处理除施氮第 4 a 的 10~20 cm 土层 DOC 含量显著高于第 1 a (MN 与 HN) 或第 2 a (LN 与 HN) 外, 其余年份间土壤 DOC 的年际差异不显著, 而 CK 处理 0~10 cm 与 10~20 cm 土层均表现为施氮第 2 a 显著低于其他年份.

(3) 不同处理 0~20 cm 土层 DOC/TOC 在 0.32~1.89 范围内变动, 施氮处理普遍降低了 DOC 在整个 TOC 中所占的比例; 除施氮第 2 a 的 0~10 cm 土层 DOC 占 TOC 的比例略高于 10~20 cm 外, 其余年份 10~20 cm 的 DOC/TOC 均高于同一处理的 0~10 cm 土层.

(4) 草地土壤 TOC 与 DOC 的变化显著正相关; 不同氮处理土壤 DOC 含量随时间的变异均远大于 TOC, 草地土壤 DOC 较 TOC 对氮沉降水平的变化更为敏感.

参考文献:

- [1] de Paul Obade V, Lal R. Assessing land cover and soil quality by remote sensing and geographical information systems (GIS) [J]. *Catena*, 2013, **104**: 77-92.
- [2] Hernanz J L, López R, Navarret L, et al. Long-term effects of tillage systems and rotations on soil structural stability and organic carbon stratification in semiarid central Spain [J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, **66**(2): 129-141.
- [3] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential [J]. *Global Change Biology*, 2000, **6**(3): 317-327.
- [4] Franzluebbers A J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality [J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, **66**(2): 95-106.
- [5] 黄山, 芮雯奕, 彭现宪, 等. 稻田转变为旱地下土壤有机碳含量及其组分变化特征 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(4): 1146-1151.
- [6] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, **9**(1): 23-36.
- [7] 黄威, 陈安磊, 王卫, 等. 长期施肥对稻田土壤活性有机碳

- 和氮的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(9): 1854-1861.
- [8] 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.
- [9] 莫江明, 薛璟花, 方运霆. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对 N 沉降的响应[J]. 生态学报, 2004, **24**(7): 1413-1420.
- [10] 介冬梅, 葛勇, 郭继勋, 等. 中国松嫩草原羊草植硅体对全球变暖和氮沉降模拟的响应研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(8): 1708-1715.
- [11] Liu X J, Zhang Y, Han W X, *et al.* Enhanced nitrogen deposition over China [J]. *Nature*, 2013, **494**(7438): 459-462.
- [12] Holland E A, Braswell B H, Lamarque J F, *et al.* Variations in the predicted spatial distribution of atmospheric nitrogen deposition and their impact on carbon uptake by terrestrial ecosystems [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(D13): 15849-15866.
- [13] Tian H Q, Melillo J M, Kicklighter D W, *et al.* Effect of interannual climate variability on carbon storage in Amazonian ecosystems [J]. *Nature*, 1998, **396**(6712): 664-667.
- [14] Tans P P, Wallace D W R. Carbon cycle research after Kyoto [J]. *Tellus*, 1999, **51B**(2): 562-571.
- [15] Hagedorn F, Spinnler D, Siegwolf R. Increased N deposition retards mineralization of old soil organic matter [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**(12): 1683-1692.
- [16] Huang S, Peng X X, Huang Q R, *et al.* Soil aggregation and organic carbon fractions affected by long-term fertilization in a red soil of subtropical China [J]. *Geoderma*, 2010, **154**(3-4): 364-369.
- [17] Ochoa-Hueso R, Maestre F T, de los Ríos A, *et al.* Nitrogen deposition alters nitrogen cycling and reduces soil carbon content in low-productivity semiarid Mediterranean ecosystems [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **179**: 185-193.
- [18] Jung J Y, Lal R. Impacts of nitrogen fertilization on biomass production of switchgrass (*Panicum Virgatum* L.) and changes in soil organic carbon in Ohio [J]. *Geoderma*, 2011, **166**(1): 145-152.
- [19] Mack M C, Schuur E A G, Bret-Harte M S, *et al.* Ecosystem carbon storage in arctic tundra reduced by long-term nutrient fertilization [J]. *Nature*, 2004, **431**(7007): 440-443.
- [20] Conant R T, Easter M, Paustian K, *et al.* Impacts of periodic tillage on soil C stocks: a synthesis [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, **95**(1-2): 1-10.
- [21] Aber J D. Nitrogen cycling and nitrogen saturation in temperate forest ecosystems [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 1992, **7**(7): 220-224.
- [22] Guggenberger G, Zech W. Dissolved organic carbon controls in acid forest soils of the Fichtelgebirge (Germany) as revealed by distribution patterns and structural composition analyses [J]. *Geoderma*, 1993, **59**(1-4): 109-129.
- [23] 刘德燕, 宋长春, 王丽, 等. 外源氮输入对湿地土壤有机碳矿化及可溶性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3525-3530.
- [24] Zhang N L, Wan S Q, Li L H, *et al.* Impacts of urea N addition on soil microbial community in a semi-arid temperate steppe in northern China [J]. *Plant and Soil*, 2008, **311**(1-2): 19-28.
- [25] 王长庭, 王根绪, 刘伟, 等. 施肥梯度对高寒草甸群落结构、功能和土壤质量的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**(10): 3103-3113.
- [26] 王建林, 欧阳华, 王忠红, 等. 青藏高原高寒草原土壤活性有机碳的分布特征[J]. 地理学报, 2009, **64**(7): 771-781.
- [27] 陈佐忠, 汪诗平. 中国典型草原生态系统[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [28] 穆少杰, 李建龙, 杨红飞, 等. 内蒙古草地生态系统近 10 年 NPP 时空变化及其与气候的关系[J]. 草业学报, 2013, **22**(3): 6-15.
- [29] 张新时, 高琼, 杨奠安, 等. 中国东北样带的梯度分析及其预测[J]. 植物学报, 1997, **39**(9): 785-799.
- [30] 李博, 雍世鹏, 李忠厚. 锡林河流域植被及其利用[A]. 见: 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站. 草地生态系统研究第 3 集[C]. 北京: 科学出版社, 1988. 84-184.
- [31] Lee K H, Jose S. Soil respiration, fine root production, and microbial biomass in cottonwood and loblolly pine plantations along a nitrogen fertilization gradient [J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, **185**(3): 263-273.
- [32] 潘庆民, 白永飞, 韩兴国, 等. 氮素对内蒙古典型草原羊草种群的影响[J]. 植物生态学报, 2005, **29**(2): 311-317.
- [33] 樊后保, 袁颖红, 王强, 等. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳和全氮的影响[J]. 福建林学院学报, 2007, **27**(1): 1-6.
- [34] Goulding K W T, Bailey N J, Bradbury N J, *et al.* Nitrogen deposition and its contribution to nitrogen cycling and associated soil processes [J]. *New Phytologist*, 1998, **139**(1): 49-58.
- [35] Dise N B, Stevens J. Nitrogen deposition and reduction of terrestrial biodiversity: Evidence from temperate grasslands [J]. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2005, **48**(S2): 720-728.
- [36] 周晓兵, 张元明. 干旱半干旱区氮沉降生态效应研究进展[J]. 生态学报, 2009, **29**(7): 3835-3845.
- [37] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. 146-226.
- [38] 萨茹拉, 侯向阳, 李金祥, 等. 不同放牧退化程度典型草原植被-土壤系统的有机碳储量[J]. 草业学报, 2013, **22**(5): 18-26.
- [39] Garten C T Jr, Post W M III, Hanson P J, *et al.* Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains [J]. *Biogeochemistry*, 1999, **45**(2): 115-145.
- [40] 朱志建, 姜培坤, 徐秋芳. 不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化态碳的比较[J]. 林业科学研究, 2006, **19**(4): 523-526.
- [41] Unlu K, Ozenirler G, Yurteri C. Nitrogen fertilizer leaching from cropped and irrigated sandy soil in central Turkey [J]. *European Journal of Soil Science*, 1999, **50**(4): 609-620.

- [42] Neff J C, Townsend A R, Gleixner G, *et al.* Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon [J]. *Nature*, 2002, **419**(6910): 915-917.
- [43] Zeng D H, Li L J, Timothy J F, *et al.* Effects of nitrogen addition on vegetation and ecosystem carbon in a semi-arid grassland[J]. *Biogeochemistry*, 2010, **98**(1-3): 185-193.
- [44] Sjöberg G, Bergkvist B, Berggren D, *et al.* Long-term N addition effects on the C mineralization and DOC production in mor humus under spruce [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**(10): 1305-1315.
- [45] Currie W S, Aber J D, McDowell W H, *et al.* Vertical transport of dissolved organic C and N under long-term N amendments in pine and hardwood forests [J]. *Biogeochemistry*, 1996, **35**(3): 471-505.
- [46] Peng Q, Qi Y C, Dong Y S, *et al.* Decomposing litter and the C and N dynamics as affected by N additions in a semi-arid temperate steppe, Inner Mongolia of China [J]. *Journal of Arid Land*, 2014, **6**(4): 432-444.
- [47] 陶澍, 曹军. 山地土壤表层水溶性有机物淋溶动力学模型研究[J]. *中国环境科学*, 1996, **16**(6): 410-414.
- [48] 姜培坤. 不同林分下土壤活性有机碳库研究[J]. *林业科学*, 2005, **41**(1): 10-13.
- [49] 王淑平, 周广胜, 高素华, 等. 中国东北样带土壤活性有机碳的分布及其对气候变化的响应[J]. *植物生态学报*, 2003, **27**(6): 780-785.
- [50] 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.
- [51] 杨继松, 刘景双, 于君宝, 等. 草甸湿地土壤溶解有机碳淋溶动态及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2006, **17**(1): 113-117.
- [52] Andersson S, Nilsson S I, Saetre P. Leaching of dissolved organic carbon (DOC) and dissolved organic nitrogen (DON) in mor humus as affected by temperature and pH [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**(1): 1-10.
- [53] Yano Y, McDowell W H, Aber J D. Biodegradable dissolved organic carbon in forest soil solution and effects of chronic nitrogen deposition [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**(11-12): 1743-1751.
- [54] 方华军, 程淑兰, 于贵瑞. 森林土壤碳、氮淋失过程及其形成机制研究进展[J]. *地理科学进展*, 2007, **26**(3): 29-37.
- [55] 张璐, 张文菊, 徐明岗, 等. 长期施肥对中国3种典型农田土壤活性有机碳库变化的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, **42**(5): 1646-1655.
- [56] 柳敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 土壤活性有机碳[J]. *生态学杂志*, 2006, **25**(11): 1412-1417.
- [57] 陶贞, 沈承德, 高全洲, 等. 高寒草甸土壤有机碳储量及其垂直分布特征[J]. *地理学报*, 2006, **61**(7): 720-728.
- [58] 杨晓梅, 程积民, 孟蕾, 等. 不同林地土壤有机碳储量及垂直分布特征[J]. *中国农学通报*, 2010, **26**(9): 132-135.
- [59] 王波. 松嫩平原羊草草地凋落物对土壤理化性质的影响[D]. 长春: 东北师范大学, 2006.
- [60] 姜恕, 戚秋慧, 孔德珍. 内蒙古羊草大针茅草地群落生物量初步研究[A]. 见: 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站. 草原生态系统研究第1集[C]. 北京: 科学出版社, 1985. 12-22.
- [61] 林伟宏, 张福锁, 白克智. 大气 CO₂ 浓度升高对植物根际微生态系统的影响[J]. *科学通报*, 1999, **44**(16): 1690-1696.
- [62] 李德军, 莫江明, 方运霆, 等. 氮沉降对森林植物的影响[J]. *生态学报*, 2003, **23**(9): 1891-1900.
- [63] 高俊琴, 欧阳华, 白军红. 若尔盖高寒湿地土壤活性有机碳垂直分布特征[J]. *水土保持学报*, 2006, **20**(1): 76-79, 86.

CONTENTS

Chemical Characteristics in Airborne Particulate Matter (PM ₁₀) During a High Pollution Spring Dust Storm Episode in Beijing, Tianjin and Zhangjiakou, China	LIU Qing-yang, LIU Yan-ju, ZHAO Qiang, <i>et al.</i> (2843)
Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles During Haze Weather in Hangzhou	CHEN Qiu-fang, SUN Zai, XIE Xiao-fang (2851)
Effect of Meteorological Factors on Characteristics of PCDD/F Pollution in Guangzhou	DU Guo-yong, SU Yuan, REN Ming-zhong, <i>et al.</i> (2857)
Atmospheric CO ₂ Data Filtering Method and Characteristics of the Molar Fractions at the Longfengshan WMO/GAW Regional Station in China	LUAN Tian, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (2864)
Influence of Atmospheric Transport on Air Pollutant Levels at a Mountain Background Site of East China	SU Bin-bin, XU Ju-yang, ZHANG Ruo-yu, <i>et al.</i> (2871)
Determining the Concentration of Coating Solution Attaching to Honeycomb Denuder in Summer in Tianjin	ZHANG Shi-jian, JI Ya-qin, ZHANG Lei-bo, <i>et al.</i> (2878)
Characterization of Lead Size Distributions with Different Process in Lead-Zinc Smelter	LIANG Jun-ning, LI Wen-hui, GE Yi, <i>et al.</i> (2883)
Effect of KI Modified Clay on Elemental Mercury Removal Efficiency	SHEN Bo-xiong, CHEN Jian-hong, CAI Ji, <i>et al.</i> (2890)
Characteristics of Odors and VOCs from Sludge Direct Drying Process	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (2897)
Research of Early-warning Method for Regional Groundwater Pollution Based on Risk Management	BAI Li-ping, WANG Ye-yao, GUO Yong-li, <i>et al.</i> (2903)
Dynamic Response of Riverine Nitrate Flux to Net Anthropogenic Nitrogen Inputs in A Typical River in Zhejiang Province over the 1980-2010 Period	ZHANG Bai-fa, CHEN Ding-jiang (2911)
Research on the Influence of Urban Land Use Structure and Pattern on Nitrogen, Phosphorus of Wetland Water Environment in Xianlin New Town of Nanjing	CAI Chun-xiao, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2920)
Profile Nutrient Distribution and Sedimentary Characteristics in Typical Marshes of Sanjiang Plain	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (2928)
Source and Contamination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil in Karst Underground River Basin	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI JIAN, <i>et al.</i> (2937)
Diel Variations of Hydrochemistry and Influencing Factors in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	ZHANG Tao, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2944)
Hydrogen and Oxygen Isotopes of Lake Water and Geothermal Spring Water in Arid Area of South Tibet	XIAO Ke, SHEN Li-cheng, WANG Peng (2952)
Preliminary Research on the Feature of Dissolved Inorganic Carbon in Wulixia Reservoir in Summer, Guangxi, China	LIU Wen, PU Jun-bing, YU Shi, <i>et al.</i> (2959)
Distribution of Heavy Metals in Xiangsi River Valley of Tongling, China	CHEN Li-wei, XU Xiao-chun, WANG Jun, <i>et al.</i> (2967)
Volume Fraction of Gas Vesicle and Floating Characteristics of Cyanobacteria in Taihu Lake Under Different Pressures	WANG Wei, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i> (2974)
Degradation of Dimethyl Phthalate by Ti(IV)-catalyzed O ₃ /H ₂ O ₂ Under Acidic Conditions	GAO Yan, SHEN Tong-dong, CHEN Yao, <i>et al.</i> (2980)
Influence of Inorganic Ions and Humic Acid on the Removal of Pb(II) and Hg(II) in Water by Zero-Valent Iron	SHI Qiu-ling, ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2985)
Synthesis of Hydroxyapatite/Magnetite/Zelite Composite for Congo Red Removal from Aqueous Solution	FANG Qiao, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2992)
Corrosion of Stainless Steel 201, 304 and 316L in the Simulated Sewage Pipes Reactor	BAO Guo-dong, ZUO Jian-e, WANG Ya-jiao, <i>et al.</i> (3002)
Experimental Study of Adhesion Properties Between Membrane Surface and Humic Acid During Microfiltration	WANG Lei, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (3007)
Coating Modification of Anthracite Substrates in Vertical-flow Constructed Wetlands by LDHs Synthesized from Different Metal Compounds and the Nitrogen Removal Efficiencies	ZHANG Xiang-ling, GUO Lu, CHEN Jun-jie, <i>et al.</i> (3012)
Atrazine Wastewater Treatment in a SPG Membrane-Aerated Genetically Engineered Microorganism Biofilm Reactor	LIU Chun, GONG Peng-fei, XIAO Tai-min, <i>et al.</i> (3018)
Influencing Factors for Operational Performance of a Biofilm Reactor with Microbubble Aeration Using SPG Membrane	ZHANG Lei, ZHANG Ming, LIU Chun, <i>et al.</i> (3024)
Variations in the Active Characteristics of Sludge During the Operation of an Aerobic Membrane Bioreactor and Their Effects on Membrane Fouling	CHEN Xuan, TANG Bing, ZHANG Zi, <i>et al.</i> (3031)
Effects of Anaerobic Feeding Period on Nitrifying Granular	LIU Wen-ru, YIN Fang-fang, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3038)
Influencing Factors of Sludge Liquor Treatment in UASBB	LI Ya-feng, MA Chen-xi, ZHANG Chi (3044)
Background Values of As and Hg in Surface Dusts in the Vicinity of Kaifeng City and Their Application	CHEN Yan-fang, MA Jian-hua, DONG Yun-wu, <i>et al.</i> (3052)
Concentrations and Health Risks of Toxic Metals in Surface Dust in Kindergartens of Beijing	DUAN Heng-yi, WU Ya-tao, WANG Jue, <i>et al.</i> (3060)
Polychlorinated Biphenyls in House Dust at an E-waste Site and Urban Site in the Pearl River Delta, Southern China; Sources and Human Exposure and Health Risks	ZHU Zhi-cheng, CHEN She-jun, DING Nan, <i>et al.</i> (3066)
Responses of Soil Total Organic Carbon and Dissolved Organic Carbon to Simulated Nitrogen Deposition in Temperate Typical Steppe in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (3073)
Effects of Different Fertilizer Species on Carbon and Nitrogen Leaching in a Reddish Paddy Soil	LIU Xi-yu, ZOU Jing-dong, XU Li-li, <i>et al.</i> (3083)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Speciation of Exogenous Cu in an Acid Soil	HUANG Guo-yong, FU Qing-ling, ZHU Jun, <i>et al.</i> (3091)
Evaluation of Compounding EDTA and Citric Acid on Remediation of Heavy Metals Contaminated Soil	YIN Xue, CHEN Jia-jun, CAI Wen-min (3096)
Soil Biochemical Characteristics in Different Ecological Systems and Their Relationships with Soil Respiration and N ₂ O Emission	CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jing-yan (3102)
Contribution of Different Processes in Wetland Soil N ₂ O Production in Different Restoration Phases of the Yellow River Estuary, China	SUN Wen-guang, SUN Zhi-gao, GAN Zhuo-ting, <i>et al.</i> (3110)
Effects of Combined Applications of Pig Manure and Chemical Fertilizers on CH ₄ and N ₂ O Emissions and Their Global Warming Potentials in Paddy Fields with Double-Rice Cropping	WANG Cong, SHEN Jian-lin, ZHENG Liang, <i>et al.</i> (3120)
Influence of Ozone on Snap Bean Under Ambient Air in Two Sites of Northern China	YUAN Xiang-yang, ZHANG Wei-wei, SUN Jing-song, <i>et al.</i> (3128)
Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Influences the Biological Effects of Nano-ZnO on Maize	WANG Wei-zhong, WANG Fa-yuan, LI Shuai, <i>et al.</i> (3135)
Effect of Arbuscular Mycorrhizae on Growth, Heavy Metal Uptake and Accumulation of <i>Zenia insignis</i> Chun Seedlings	LI Xia, PENG Xia-wei, WU Song-lin, <i>et al.</i> (3142)
Effects of Phosphorus-containing Substances on Arsenic Uptake by Rice	LEI Ming, ZENG min, LIAO Bo-han, <i>et al.</i> (3149)
Ecotoxicological Effect and Soil Environmental Criteria of the Heavy Metal Chromium(VI)	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, WANG Wan-hua, <i>et al.</i> (3155)
Promotion Effects of Vitamin B ₁₂ on the Degradation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl by <i>Nostoc</i> PD-2	LIU Jia-yu, XIAO Wen-feng, LU Li-ping, <i>et al.</i> (3162)
Isolation, Identification and Characterization of a Diethylstilbestrol-degrading Bacterial Strain <i>Serratia</i> sp.	XU Ran-fang, SUN Min-xia, LIU Juan, <i>et al.</i> (3169)
Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers in Wild Crucian Carp and Exposure Estimation of Dietary Intake	WANG Jun-xia, WANG Chun-yan, LIU Li-li, <i>et al.</i> (3175)
Cloning of Full-length cDNA of HMGR from <i>Gobiocypris rarus</i> and Analysis of Its Expression Profiles in Male Exposed to Pentachlorophenol	DENG Chuan, MAO Si-yu, XIONG Li, <i>et al.</i> (3183)
Effects of Algae and Kaolinite Particles on the Survival of Bacteriophage MS2	HE Qiang, WU Qing-qing, MA Hong-fang, <i>et al.</i> (3192)
Adsorption Kinetics and Mechanism of Lead(II) on Polyamine-Functionalized Mesoporous Activated Carbon	LI Kun-quan, WANG Yan-jin, YANG Mei-rong, <i>et al.</i> (3198)
Influence of Biological Activated Carbon Dosage on Landfill Leachate Treatment	CUI Yan-ni, GUO Yan, WU Qing, <i>et al.</i> (3206)
Effect of Economic Structure Adjustment on Pollution Emission: A Case Study of COD	LI Ming-sheng, ZHOU Lei, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (3212)
Reasons for the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su (3219)
Discussion on Reduction Potential of CH ₄ Emission Intensity for Early Off-take Practice of Grazing Yak	WANG Shi-ping, Andreas Wilkes, WANG Ya-yun, <i>et al.</i> (3225)
Review of Dual Stable Isotope Technique for Nitrate Source Identification in Surface- and Groundwater in China	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, YU Gui-rui, <i>et al.</i> (3230)

《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)

2014年8月15日 第35卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 8 Aug. 15, 2014

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