

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第10期

Vol.39 No.10

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国典型城市环境大气挥发性有机物特征比值	王鸣, 陈文泰, 陆思华, 邵敏 (4393)
2015年北京大气 VOCs 时空分布及反应活性特征	张博韬, 安欣欣, 王琴, 闫贺, 刘保献, 张大伟 (4400)
北京市建筑类涂料 VOCs 排放清单编制技术方法及应用	邓子钰, 高美平, 王庆玮, 聂磊 (4408)
基于实测的建筑类涂料挥发性有机物 (VOCs) 含量水平及组分特征	高美平, 邓子钰, 聂磊, 邵霞, 安小栓 (4414)
2014~2016年京津冀沿山城市空气质量首要污染物特征分析	王晓彦, 王帅, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (4422)
北京市大气环境 PM _{2.5} 和 PM ₁ 及其碳质组分季节变化特征及来源分析	樊啸辰, 郎建奎, 程水源, 王晓琦, 吕喆 (4430)
南京春季北郊地区大气 PM _{2.5} 中主要化学组分及碳同位素特征	周一鸣, 韩珣, 王瑾瑾, 陈善莉, 沈潇雨, 章炎麟, 朱彬, 郭照冰 (4439)
热脱附法快速分析大气细颗粒物中非极性有机物	马英歌, 吴霞, 彭梦梦, 冯加良, 郁建珍, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 李莉 (4446)
杭州市空气细颗粒物浓度与哮喘就诊人次的关系	王安旭, 陈曦, 宋从波, 应颂敏, 李倩, 吴琳, 毛洪钧 (4457)
基于远程通讯技术的混动公交车 SCR 系统运行及 NO _x 排放特征	杨强, 胡馨遥, 黄成, 陈昀, 刘佳栋, 李莉, 熊忠亮, 唐伟 (4463)
基于环境风险排序的流域优先污染物筛选	李奇峰, 吕永龙, 王佩, 张悦清 (4472)
重庆远郊丰都雪玉洞流域大气无机氮湿沉降变化特征与来源分析	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 胡刘婵, 曾泽, 吕现福 (4479)
黑龙江凉水国家级自然保护区大气氮沉降特征	宋蕾, 田鹏, 张金波, 金光泽 (4490)
脱甲河水系 N ₂ O 关键产生过程及氮素来源探讨	赵强, 吕成文, 秦晓波, 吴红宝, 万运帆, 廖育林, 鲁艳红, 李健陵 (4497)
生物炭添加对曝气人工湿地脱氮及氧化亚氮释放的影响	王宁, 黄磊, 罗星, 梁岩, 王燕, 陈玉成 (4505)
黑麦草对水体中镉-壬基酚复合污染的生理响应及修复	史广宇, 李中义, 张路, 程媛媛, 陈宏伟, 施维林 (4512)
城市黑臭水体的吸收特性分析	丁潇蕾, 李云梅, 吕恒, 朱利, 温爽, 雷少华 (4519)
岷江上游水体中 DOM 光谱特征的季节变化	范诗雨, 秦纪洪, 刘堰杨, 孙辉 (4530)
防渗型生物滞留中试系统降雨径流水质与三维荧光特征	林修咏, 王书敏, 李强, 谢云成 (4539)
基于 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的农业区地下河硝酸盐污染来源	盛婷, 杨平恒, 谢国文, 洪爱花, 曹聪, 谢世友, 时伟宇 (4547)
垃圾填埋场地下水溶解性有机物光谱特征	彭莉, 虞敏达, 何小松, 刘思佳, 张鹏 (4556)
铅负载颗粒沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附行为	梁舒静, 林建伟, 詹艳慧, 汪振华, 李雅灵, 何思琪, 陈海洋, 唐凤霞, 李志强 (4565)
基于紫外光谱分析的腐殖质混凝控制	张北辰, 张晓蕾, 秦兰兰, 黄海鸥 (4576)
AAO 工艺联合臭氧削减污水中微量有机污染物及遗传毒性	李默, 汪震哲, 陈志强, 温沁雪 (4584)
抗生素抗性基因在两级废水处理系统中的分布和去除	李奥林, 陈吕军, 张衍, 代天娇, 田金平, 刘锐, 温东辉 (4593)
磁性壳聚糖凝胶球固定厌氧铁氨氧化菌对废水氨氮去除的影响	刘志文, 陈琛, 彭晓春, 谢武明, 黄镇扬, 韩庆吉 (4601)
海藻糖强化厌氧氨氧化耦合反硝化工艺处理高盐废水的脱氮除碳效能	杨振琳, 于德爽, 李津, 王晓霞, 冯莉 (4612)
低温下 A ² /O-BAF 反硝化除磷脱氮特性	黄剑明, 赵智超, 郑隆举, 邵兆伟, 安芳娇, 陈永志 (4621)
O ₃ -BAC 深度处理石化废水厂尾水的特性及菌群结构分析	张超, 单明皓, 许丹宁, 古明哲, 代蓓蓓, 纪轩, 孙井梅 (4628)
基于 MBR 不同种泥短程硝化启动的微生物群落结构分析	吴鹏, 陈亚, 张婷, 沈耀良, 徐乐中 (4636)
3 种不同工艺切换下活性污泥菌群结构及代谢产物对污泥沉降性能的影响	温丹丹, 袁林江, 陈希, 王洋, 申童童, 刘小博 (4644)
硫酸盐还原菌活性污泥胞外聚合物对环丙沙星的吸附机制	张会群, 贾妍艳, 方荷婷, 阴琳婉, 吕慧 (4653)
包埋活性污泥反硝化性能的快速提高及群落分析	杨宏, 徐富, 孟琛, 苏姗, 袁星 (4661)
中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析	尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 黄彩红 (4670)
典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价	马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 侯青叶, 曾庆良, 王锐 (4684)
秸秆与化肥减量配施对菜地土壤温室气体排放的影响	黄容, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 吕盛, 罗梅 (4694)
不同肥料施用对设施蔬菜地 NH ₃ 挥发和 N ₂ O 排放的影响	山楠, 韩圣慧, 刘继培, 陈清, 袁玉玲, 王立刚, 李虎 (4705)
施肥类型和水热变化对农田土壤氮素矿化及可溶性有机氮动态变化的影响	田飞飞, 纪鸿飞, 王乐云, 郑西来, 辛佳, 能惠 (4717)
长期不同施肥量对全程氨氧化细菌丰度的影响	王梅, 王智慧, 石孝均, 蒋先军 (4727)
典型绿洲不同土壤类型有机碳含量及其稳定碳同位素分布特征	陈新, 贡璐, 李杨梅, 安申群, 赵晶晶 (4735)
凹凸棒石及其改性材料对土壤镉生物有效性的影响与机制	陈展祥, 陈传胜, 陈卫平, 焦文涛 (4744)
天然有机物活化过硫酸盐降解土壤有机污染物效果	刘琼枝, 廖晓勇, 李尤, 龚雪刚, 曹红英, 罗俊鹏 (4752)
水分管理和外源硒对水稻吸收累积铅的影响	万亚男, 刘哲, Aboubacar Younoussa Camara, 余垚, 王琪, 李花粉 (4759)
窖水中微生物降解污染物的关键细菌	杨浩, 杨晓妮, 张国珍, 王宝山, 张翔, 李健 (4766)
砷氧化菌对胡敏酸络合 As(III) 的氧化作用	李泽姣, 崔岩山, 尹乃毅, 蔡晓琳, 都慧丽, 王鹏飞 (4778)
海域高温油田 1 株耐高温耐盐硫酸盐还原菌的筛选与生理特性及活性抑制	杨春璐, 苑美玉, 史荣久, 闫鹏举, 赵峰, 韩斯琴, 张颖 (4783)
1 株耐盐异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Zobellella</i> sp. B307 的分离及脱氮特性	白洁, 陈琳, 黄潇, 胡春辉, 赵阳国, 李岍然 (4793)
1 株镰刀菌属 KY123915 的分离及其对 17 β -雌二醇的降解特性	吴蔓莉, 祝长成, 祁燕云, 时艺馨, 徐会宁, 杨瑾如 (4802)
氟喹诺酮对垂直流人工湿地性能及微生物群落的影响	李新慧, 郑权, 李静, 王晓慧, 海热提 (4809)
林可霉素菌渣堆肥微生物群落多样性分析	任省涛, 郭夏丽, 芦阿度, 张倩倩, 郭笑盈, 王岩, 王连忠, 张宝宝 (4817)
DEP 对蚯蚓抗氧化酶系的影响及 DNA 损伤	平令文, 李现旭, 张翠, 宋佩佩, 王金花, 朱鲁生, 王军 (4825)
生活垃圾焚烧灰灰矿物学特性及重金属分布	李建陶, 曾鸣 (4834)
《环境科学》征订启事 (4429) 《环境科学》征稿简则 (4471) 信息 (4529, 4777, 4816)	

典型绿洲不同土壤类型有机碳含量及其稳定碳同位素分布特征

陈新^{1,2}, 贡璐^{1,2*}, 李杨梅^{1,2}, 安申群^{1,2}, 赵晶晶^{1,2}

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 土壤有机碳及其稳定同位素组成反映了生态系统碳循环的关键信息, 对研究全球变化下陆地生态系统碳动态及碳资源的可持续发展具有重要意义. 本研究以阿拉尔绿洲4种土壤类型为研究对象, 测定不同深度土壤有机碳(SOC)含量和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值, 探讨不同土壤类型有机碳分布、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 丰度差异及其与土壤环境因子的关系. 结果表明: ①土壤整体有机碳含量由高到低依次为灌漠土、棕漠土、盐土、风沙土, 且在表层(0~20 cm层)具有较大值; $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 变化范围在-26‰~-23‰, 表层(0~20 cm)由正趋负为盐土>风沙土>灌漠土>棕漠土. ②土壤有机碳含量受土壤类型、深度及其交互作用极显著影响, $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 受土壤类型、交互作用显著影响; 进一步交互效应检验中土壤有机碳受因素水平影响极强, 同位素相对较弱. ③冗余分析发现土壤有机碳与土壤无机碳、全氮、土壤含水量、容重均存在显著或极显著正相关关系, 与C/N具有显著负相关关系; $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 与电导率存在显著正相关关系, 与土壤无机碳、土壤含水量均存在极显著负相关关系. 土壤环境因子的重要性排序为土壤含水量>土壤无机碳>容重>全氮>C/N>电导率>pH. 分析得出土壤有机碳及其同位素在不同土壤类型中呈现出不同变化规律, 其土壤类型的效应强于土壤深度, 受土壤含水量影响最甚.

关键词: 土壤有机碳; 稳定碳同位素; 剖面分布; 阿拉尔绿洲; 冗余分析

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)10-4735-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201801290

Spatial Variation of Soil Organic Carbon and Stable Isotopes in Different Soil Types of a Typical Oasis

CHEN Xin^{1,2}, GONG Lu^{1,2*}, LI Yang-mei^{1,2}, AN Shen-qun^{1,2}, ZHAO Jing-jing^{1,2}

(1. College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi 830046, China)

Abstract: Soil organic carbon (SOC) and its stable isotope composition reflect important information on ecosystem carbon cycle. Under the background of global change, it is of great significance to study carbon dynamics and sustainable development of carbon resources in terrestrial ecosystems. In this study, four soil types in Alar oasis were studied to determine SOC content and $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ value at different layers, and the differences of $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ abundance and its relationship with soil environmental factors were also discussed. Three main outcomes were drawn from the results. ①The total organic carbon (TOC) content of the soil was in the order of irrigated desert soil > brown desert soil > saline soil > aeolian sandy soil, and had a higher value in the surface layer (0-20 cm layer); $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ ranged from -26‰~-23‰, the surface layer (0-20 cm) was in the order saline soil > aeolian sandy soil > irrigated desert soil > brown desert soil. ②Both SOC and $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ were significantly affected by soil type and their interaction, and by soil depth. Furthermore, the effect test of interaction indicated that SOC was significantly impacted by environmental factors, but the impact on $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ was relatively weak. ③The results of redundancy analysis showed that SOC had a significant or extremely significant positive correlation with soil inorganic carbon, total nitrogen, soil water content and bulk density, and had a significant negative correlation with C/N. There was also a significant positive correlation between $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ and conductivity, and in addition, $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ was negatively correlated with soil inorganic carbon and soil water content. The analyses showed that SOC and its isotopes changed with soil types, and that the effect of soil type was stronger than that of soil depth, which was mainly determined by soil moisture content.

Key words: soil organic carbon (SOC); stable carbon isotope; profile distribution; Alar oasis; redundancy analysis (RDA)

土壤碳库是陆地生态系统中最大且周转时间最慢的碳库, 各种物理、化学、生物反应过程既是碳平衡动态的基础^[1], 又是联系生物地球化学循环的关键组分, 在协调土壤、植被及其周围环境的关系中起到主要作用^[2]. 土壤有机碳(SOC)库作为陆地碳库的重要组成, 土壤有机碳的积累和周转不仅决定土壤碳储量, 同时通过土壤肥力供应控制着生态

系统的净生产力大小^[3]. 有机碳同位素自然丰度($\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$)能够有效表征土壤碳库的微小迁移与转

收稿日期: 2018-01-31; 修订日期: 2018-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41461105); 新疆维吾尔自治区教育厅研究生科研创新项目(XJGR12017012)

作者简介: 陈新(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为干旱区资源与环境, E-mail: chenxin_199301@sina.com

* 通信作者, E-mail: gonglu721@163.com

化,定量评价有机碳组分变化及其对碳储量的相对贡献,具有一定的环境指示作用^[4].

近年来,土壤有机碳研究已被国内外学者广泛关注,从生态系统环境的局部变化到地球化学循环过程,涉及碳储量特征、分异规律、周转速率、循环学模型及其时空差异性,发现土壤有机碳的微小变化可能引起大气及环境的巨大波动^[5~9]. 稳定碳同位素技术已广泛应用于生态环境领域并取得重大进展. 包括利用 $\delta^{13}\text{C}$ 追踪生物要素在生态系统中的循环过程^[10,11],定量评价碳组分变化,定性研究碳物质来源,示踪研究气候变化和人文干扰下植被、土壤的长期碳过程等,均表明 $\delta^{13}\text{C}$ 有助于系统分析全球变化情境下的环境动态过程^[12~16]. 目前,关于干旱区土壤有机碳的研究,主要为农田碳储量、不同土地利用方式下有机碳分布特征及其影响因素等^[17],而关于绿洲不同土壤类型的研究相对较少,尤其是结合稳定碳同位素技术探讨有机碳随剖面变化的研究更是鲜有报道. 因此通过 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 研究土壤有机碳特征对于干旱区绿洲有机碳资源的可持续发展具有重要意义^[18].

绿洲是决定干旱区生态系统结构与功能的关键组分,作为干旱区碳素的主要存储场所,其土壤碳库联系着生态系统内部及外部的物质循环,是全球碳平衡及土壤养分科学管理等生态环境问题研究的重要内容^[19]. 本文以塔里木河上游典型绿洲——阿拉尔垦区为靶区,结合稳定碳同位素技术,系统分析了风沙土、盐土、棕漠土、灌漠土在0~100 cm不同土层的有机碳、稳定碳同位素组成的分布特征及其与土壤环境因子的关系. 通过解析土壤有机碳含量和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 在不同土壤类型、土壤深度的差异性,探讨土壤有机碳周转的生态过程及响应机制,通过补充绿洲土壤碳循环的研究,以期促进区域碳资源的可持续性发展,对绿洲土壤碳动态研究具有重要的生态指示作用.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

阿拉尔垦区位于塔里木河上游(80°30'~81°58'E、40°22'~40°57'N),南邻塔克拉玛干沙漠,北靠天山山脉,北高南低,平均海拔1 012 m. 受大陆性气候和山盆格局的长期影响,绿洲属典型的暖温带大陆性干旱荒漠气候. 该地区年均气温10.8℃,1月均温-7.8℃,极端最低温-14.4℃,7月均温24.6℃,极端最高温40.6℃,气温年较差和

日较差大;年均降水量53.5 mm,5~9月降水量约占全年的85%,历年最低降水量为19.8 mm,最大降水量为91.9 mm;年均蒸发量1 125~1 600 mm,蒸发强烈,无霜期220 d,年光辐射量598.672 kJ. 主要有风沙土、盐土、棕漠土、灌漠土4种土壤类型^[2,20],自然植被类型有骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、怪柳(*Tamarix* spp.)、盐穗木(*Halostachys caspica*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、芦苇(*Phragmites communis*)等;主要经济作物为棉花(*Gossypium* spp.)、小麦(*Triticum aestivum*).

1.2 样品采集与处理

于2016年8月在研究区选择4种土壤类型,即风沙土(主要植被类型为骆驼刺,塔克拉玛干沙漠边缘)、盐土(主要植被类型为盐爪爪、怪柳,农田与沙漠交错带)、棕漠土(主要植被类型为盐穗木、芦苇,农田与沙漠交错带)、灌漠土(连作20 a棉田)为研究样地并设置样方,大小为5 m×5 m. 各样方内按照“S”形布设样点,以五点四分法采集剖面0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm层土样样品,去除石块、植物根系等杂质后取1 kg土样封装,重复3次,带回实验室自然风干后研磨过100目筛(0.149 mm),供实验室分析.

1.3 测定方法

土样基本理化性质的测定采用常规分析方法^[21],土壤有机碳含量的测定采用浓硫酸-重铬酸钾外加热法,土壤无机碳酸盐含量的测定采用气量法,全氮采用半微量凯氏定氮法,土壤pH值测定采用电位法,土壤含水量测定采用重量法,土壤容重采用环刀法. 每个测定项目重复3次.

碳稳定性同位素比率的表示方法^[22]: $\delta^{13}\text{C}$ 值表示样品中两种碳同位素比值相对于某一标准对应比值的相对千分差,是描述样品与标准样品相比较时 $\delta^{13}\text{C}$ 天然丰度变异程度的指标, $\delta^{13}\text{C}$ 值的误差在 $\pm 0.2\text{‰}$. 其计算公式为:

$$\delta^{13}\text{C} = \left[\frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{样品}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{标准}}} - 1 \right] \times 1000\text{‰}$$

式中,标准样品一般为美国南卡罗莱纳州白垩系皮狄组地层中的美洲拟箭石(PDB),定义其 $\delta^{13}\text{C} = 0.01124$.

1.4 数据分析

使用Excel 2007进行数据前期处理及作图,采用SPSS 17.0软件进行相关性分析(Pearson)、单因素方差分析(One-Way ANOVA)、多重比较、双因素

方差分析、冗余分析等. 多重比较使用 Duncan 法; 双因素方差分析时, 若交互达到显著, 则需进行简单效应分析.

2 结果与分析

2.1 不同土壤类型有机碳及其稳定碳同位素垂直分布特征

土壤有机碳含量在不同土壤类型中随土壤深度变化而有所差异(图 1), 4 种土壤类型整体有机碳含量由低到高依次为风沙土 < 盐土 < 棕漠土 < 灌漠土, 且灌漠土显著高于盐土、风沙土. 风沙土、盐土的有机碳含量变化趋势大致相同, 随深度增加均表现为先增加后减少再增加再减少的趋势, 且在 10 ~ 20 cm 层最高; 棕漠土呈现出下降趋势, 在各土层中波动变化, 表层(0 ~ 10 cm)最高, 80 ~ 100 cm 层最低; 灌漠土展现出先缓慢减少后急剧下降的趋势, 在 0 ~ 10 cm 层最高, 80 ~ 100 cm 层最低.

土壤有机碳同位素值变化幅度为 -26‰ ~ -23‰ (图 1), 表层土(0 ~ 20 cm)中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$, 由负趋正表现为棕漠土 < 灌漠土 < 风沙土 < 盐土, 整体表现出风沙土、盐土显著高于棕漠土、灌漠土. 风沙土有机碳同位素组成随深度加深变化轻微, 且 60 ~ 80 cm 层最大, 0 ~ 10 cm 层最小; 盐土表现为整体下降的趋势, 仅在 40 ~ 60 cm 层回升偏正, 80 ~ 100 cm 层最低; 棕漠土展现出“偏负(0 ~ 20 cm)→偏正(20 ~ 40 cm)→偏负(40 ~ 60 cm)→偏正(60 ~ 100 cm)”变化趋势, 表层(0 ~ 20 cm)较低, 底层最高(80 ~ 100 cm); 灌漠土表现出“偏正(0 ~ 20 cm)→偏负(20 ~ 60 cm)→偏正(60 ~ 80 cm)→偏负(80 ~ 100 cm)”的规律, 10 ~ 20 cm 层最高, 40 ~ 60 cm 层最低.

2.2 有机碳及其稳定碳同位素值的效应检验分析

SOC、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值受土壤类型、土壤深度及其交互作用影响产生变化, 效应量大小各不相同(效应

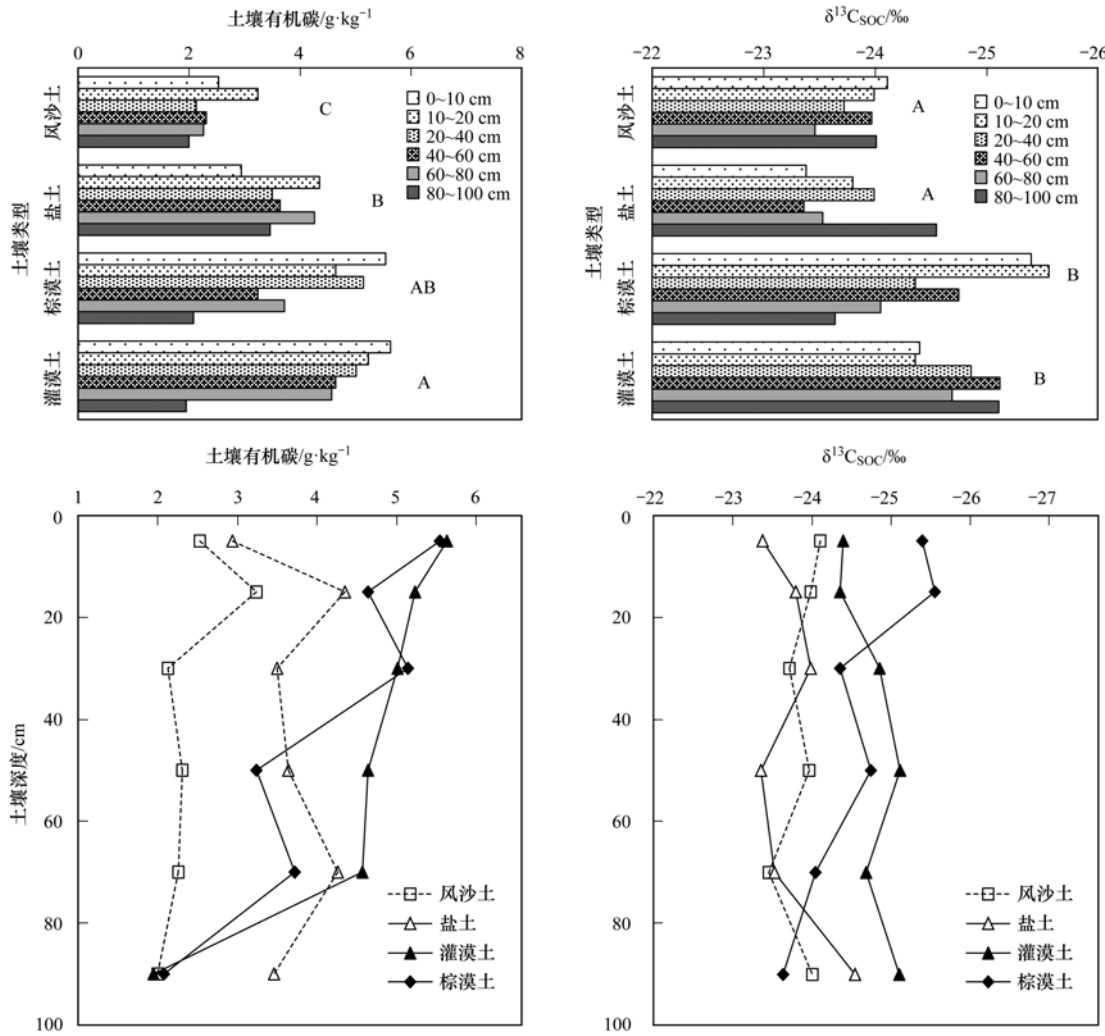


图 1 不同土壤类型有机碳及其稳定碳同位素值的分布特征

Fig. 1 Distribution characteristics of soil organic carbon and its stable carbon isotope values in different types of soils

量的范围在 0 ~ 1 之间, 值越大, 影响效应越高). 双因素方差分析结果表明(表 1), 土壤有机碳含量受土壤类型、深度及其交互作用影响均达到极显著水平, 效应量排序为土壤类型(0.835) > 土壤深度

(0.778) > 交互作用(0.762); 土壤有机碳同位素值受土壤类型极显著影响、受交互作用显著影响, 效应量排序为土壤类型(0.400) > 交互作用(0.392) > 土壤深度(0.043).

表 1 不同土壤类型、土壤深度及其交互作用的主效应分析¹⁾

Table 1 Main effect analysis of different soil types, soil depth and their interaction

性质	变异来源	自由度	离差平方和	均方	<i>F</i>	效应量
土壤有机碳	土壤类型	3	43.900	14.633	81.208 **	0.835
	土壤深度	5	30.386	6.077	33.725 **	0.778
	类型 × 深度	15	27.757	1.85	10.269 **	0.762
	误差	48	8.649	0.18		
$\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$	土壤类型	3	13.772	4.591	10.666 **	0.400
	土壤深度	5	0.920	0.184	0.427	0.043
	类型 × 深度	15	13.298	0.887	2.060 *	0.392
	误差	48	20.659	0.43		

1) * 表示显著性水平($P < 0.05$); ** 表示极显著性水平($P < 0.01$)

交互作用达到显著影响时, 需要进行简单效应分析, 进一步探究各因素在不同水平影响程度. 由表 2 可知, 土壤类型和土壤深度对土壤有机碳的交互作用中, 4 种土壤类型均达到极显著水平, 效应量大小排序为灌漠土(0.749) > 棕漠土(0.745) > 盐土(0.327) > 风沙土(0.254); 不同土层均达到极显著水平, 效应量大小排序为 0 ~ 10 cm 层 > 20 ~ 40 cm 层 > 60 ~ 80 cm 层 > 40 ~ 60 cm 层 > 10 ~ 20 cm 层 > 80 ~ 100 cm 层, 分别为 0.740、0.678、0.520、0.492、0.421、0.354. 对有机碳同位素值的

交互作用中, 4 种土壤类型中仅有棕漠土达到极显著水平, 其余 3 种土壤类型无显著影响; 在不同土层中, 0 ~ 10、10 ~ 20、40 ~ 60、80 ~ 100 cm 层的作用达到显著或极显著水平, 但各水平因素的效应量均较低(< 0.3).

2.3 土壤有机碳、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 与土壤环境因子的关系

对土壤有机碳、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 以及 7 个土壤环境因子进行 RDA(Monte Carlo 检验), 得到环境因子差异性解释量(表 3). RDA 中有机碳、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 在第 I 轴、第 II 轴的解释量分别为 60.0% 和 13.0%, 前

表 2 交互作用的简单效应检验分析¹⁾

Table 2 Simple effect test of interaction

性质	变异来源	自由度	离差平方和	均方	<i>F</i>	效应量	
土壤有机碳	土壤类型	风沙土	5	2.950	0.590	3.275 *	0.254
		盐土	5	4.196	0.839	4.657 **	0.327
		棕漠土	5	25.206	5.041	27.976 **	0.745
		灌漠土	5	25.791	5.158	28.625 **	0.749
	土壤深度	0 ~ 10 cm	3	24.635	8.212	45.571 **	0.740
		10 ~ 20 cm	3	6.296	2.099	11.647 **	0.421
		20 ~ 40 cm	3	18.203	6.068	33.673 **	0.678
		40 ~ 60 cm	3	8.387	2.796	15.514 **	0.492
		60 ~ 80 cm	3	9.388	3.129	17.366 **	0.520
		80 ~ 100 cm	3	4.748	1.583	8.783 **	0.354
$\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$	土壤类型	风沙土	5	0.881	0.176	0.409	0.041
		盐土	5	3.094	0.619	1.438	0.130
		棕漠土	5	8.589	1.718	3.991 **	0.294
		灌漠土	5	1.654	0.331	0.769	0.074
	土壤深度	0 ~ 10 cm	3	6.275	2.092	4.86 **	0.233
		10 ~ 20 cm	3	5.593	1.864	4.332 **	0.213
		20 ~ 40 cm	3	2.172	0.724	1.682	0.095
		40 ~ 60 cm	3	5.564	1.855	4.309 **	0.212
		60 ~ 80 cm	3	2.793	0.931	2.163	0.119
		80 ~ 100 cm	3	4.673	1.558	3.619 *	0.184

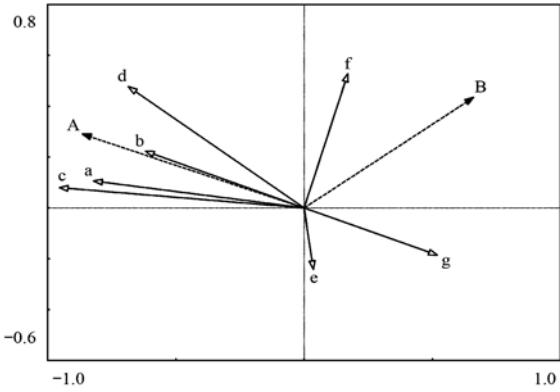
1) * 表示显著性水平($P < 0.05$); ** 表示极显著性水平($P < 0.01$)

两个排序轴保留了土壤有机碳及其同位素组成数据总方差的 73.5%，即 7 个环境因子累计解释量达到 73.5%，有机碳及其同位素特征与环境因子关系的累计解释量达 99.4%。由此得知前两轴已能较好反映 SOC、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 与土壤理化因子的关系，且主要由第 I 轴决定。

由土壤有机碳、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 与土壤环境因子的冗余分析可知(图 2)，土壤有机碳(A)与土壤无机碳(a)、全氮(b)、土壤含水量(c)、容重(d)均存在显著或极显著正相关关系，与 C/N(g) 具有显著负相关关系； $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ (B)与电导率(f)存在显著正相关关系，与土壤无机碳、土壤含水量均存在极显著负相关关系。其中土壤含水量、土壤无机碳、容重的箭头连线较长，可知土壤含水量、土壤无机碳、容重对土壤有机碳及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 的差异性具有较好解释，与表 4 重要性排序分析结果一致。

进一步研究环境因子对有机碳及其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 影响的重要性大小，经蒙特卡洛检验排序得到土壤理化变量的重要性排序(表 4)。重要性由大到小为土壤含水量 > 土壤无机碳 > 容重 > 全氮 > C/N > 电导率 > pH，其中土壤含水量、土壤无机碳、容重、全氮

对土壤有机碳及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 的影响呈极显著水平，差异性解释分别达 54.9%、40.7%、31.3%、23.7%，是造成差异性的关键因子；其次为 C/N(g) 值对其具有显著影响；最后是电导率、pH(g) 对有土壤机碳及其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 的影响均为达到显著水平。



A: 土壤有机碳; B: 有机碳稳定同位素值; a: 土壤无机碳; b: 全氮; c: 土壤含水量; d: 容重; e: pH; f: 电导率

图 2 土壤有机碳及其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 与土壤环境因子的冗余分析

Fig. 2 Redundancy analysis (RDA) of soil organic carbon and $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ with environmental factors

表 3 土壤有机碳及其稳定同位素特征差异的解释变量冗余分析

Table 3 Redundancy analysis (RDA) of ecological characteristics of soil organic carbon and $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$

排序轴 Axis	第 I 轴	第 II 轴	第 III 轴	第 IV 轴
土壤有机碳及其同位素特征解释量/%	60.2	13.3	20.6	6.0
土壤有机碳及其同位素特征与土壤环境因子的相关性	0.880	0.771	0.001	0.001
有机碳及其同位素特征累计解释量/%	60.2	73.5	94.0	100.0
有机碳、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 特征-土壤环境因子关系累计解释量/%	81.9	100.0	0.0	0.0
典范特征值		0.735		
总特征值		1.000		

表 4 土壤环境因子解释的重要性排序和显著性检验

Table 4 Importance and significance level of environmental factors

土壤环境因子	重要性排序	解释量/%	F	P
土壤含水量	1	54.9	26.747	0.002 0
土壤无机碳	2	40.7	15.088	0.002 0
容重	3	31.3	10.003	0.002 0
全氮	4	23.7	6.835	0.006 0
C/N	5	16.7	4.398	0.028 0
电导率	6	5.5	1.274	0.260 0
pH	7	0.9	0.189	0.778 0

3 讨论

3.1 不同土壤类型有机碳及其稳定碳同位素的分布特征

土壤有机碳是影响土壤质量的重要因素，研究绿洲内不同土壤类型有机碳的剖面分布，可揭示有

机碳的贮藏潜力和转运作用特征^[17,23]。本研究中有机碳含量大小排序为灌漠土 > 棕漠土 > 盐土 > 风沙土，与贡璐等^[2]基于绿洲土壤有机碳的研究结果一致，表明该绿洲灌漠土较其他土壤有更为丰富的有机碳资源，风沙土有机碳资源相对稀缺^[16]。因为灌漠土采样点为 20 年棉田，含较多植物残体、人为添加物等，经多种生化作用及微生物分解形成有机质输入土壤，有机碳含量居高^[24,25]；风沙土中凋落物等有机质残枝稀少，又干燥缺水，微生物活动薄弱，无法进行有效的有机碳补充^[16,26]，因此有机碳含量较低。

本研究中土壤有机碳剖面分布特征不一，风沙土、盐土随土层变化较为稳定，土壤质地较为均一，其理化性质波动较小，加之地表植物稀疏，作

用甚微,因此有机碳含量稳定^[27];棕漠土有机碳含量整体降低,但在各土层中波动变化,这是由于风力、人类活动等自然和非自然因素影响,发生土壤添加、剥蚀等生态过程,造成土壤逐层间差异,进而影响有机碳含量^[28];灌漠土中有机碳含量逐层降低,60 cm 以下急剧减少,主要是0~60 cm 层土壤受人为活动影响剧烈,经常翻耕、浇水,土壤性质稳定仅在渗透作用下逐层略微降低,而60~100 cm 层,受此影响较弱,亦无较多有机质沉积,加之有机碳的降解,造成有机碳含量急剧下降^[29]。

有机碳同位素组成在植物残体分解,逐层转化累积埋藏过程中分馏作用极为薄弱,与原始基质相似,可用于反映植被覆盖、气候环境变化,其垂直分布特征对理解土壤形成过程、有机碳转运、同位素分馏有重要的生态意义^[30,31]。本研究中土壤有机碳同位素组成在-26%~-23%,略高于C₃植物同位素组成平均值(-26.64%)^[32],de Rouw 等^[33]基于植物-土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 的研究中亦发现了同样的规律。因为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值由植物到土壤会发生富C现象,有机碳同位素发生分馏,轻同位素(^{12}C)优先进入微生物分解形成的CO₂中,排入土壤,而 ^{13}C 则更多地进入土壤微生物量碳中并最终补充进入到土壤有机碳, $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值增大,因此略高于植物^[33,34]。

土壤有机碳同位素组成的剖面特征为风沙土 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 随剖面加深变化幅度较小,可能是土壤中有机质输入较少,降解基质不足,且受土壤基质影响差异性较小,其分馏作用细微造成^[27,32];盐土 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值整体呈下降趋势,可能是随着植物降解发生,木质素、纤维素等难降解物逐层累积,导致 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值降低^[35],而40~60 cm 层波动偏移,可能是该地区光照强烈、蒸发加剧,水分蒸发带动盐碱上移的同时携带有机碳,与下渗沉淀作用共同造成 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 在此层的积累;棕漠土 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 随土层加深整体表现为趋正的规律,表层偏负,主要为地表植物凋落物添加,其值接近植物同位素值^[36],因此较低,而底层 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值与风沙土接近,可能是当地土壤最初由风沙土堆积逐渐形成;灌漠土 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 随土层加深整体趋负,与盐土类似,只是速率有所差异,由于翻耕、灌溉等活动加速了下渗过程^[37,38]。

3.2 土壤类型、土层深度交互作用影响分析

本研究中土壤有机碳含量受土壤类型、土层深度显著或极显著影响,其效应为土壤类型>土壤深度>交互作用,说明土壤类型是影响土壤有机碳变异的主要因子,其次是土壤深度,最后为两者间的

交互作用。这是由于土壤类型间地表植被覆盖类型、数量存在差异,再者土壤质地不同,其理化性质、贮藏潜力不一,存在本质差异^[26,39];而土壤深度间差异,主要由土壤中水盐运动、物理沉积、渗透以及根系效应等作用引起^[40],因此土壤深度虽然对有机碳作用显著,但却低于土壤类型。对交互作用进一步分析中发现,土壤类型中灌漠土的效应最高,风沙土最低,进一步验证了土壤类型间的差异性,表明灌漠土固存有机碳作用较强^[41];土壤深度中0~10 cm 层作用最强,80~100 cm 层作用最小,因为表层土壤与地表相连,更易接触、累积新鲜有机质,作用显著,而底层土壤由地表向下逐层降解减少,积累量较小,因此形成不同差异^[40,42]。

土壤有机碳同位素组成受土壤类型极显著影响、交互作用显著影响,而土壤深度影响不显著。可能是同类型土壤中地表植物相同,随土层自上而下的凋落物形成,有机质降解累积过程相似,各土层有机质输入源相同,因此深度作用影响不明显^[18];不同土壤类型中理化性质差异显著,植被覆盖不同,凋落降解、有机质输入以及在土壤中所受物理、生化作用差异显著,进而影响碳同位素分馏,造成类型间差异显著^[12,35]。交互作用达到显著水平,进一步效应分析发现土壤类型中受棕漠土极显著影响,因为棕漠土地表植物覆盖类型相对较多,植物凋落残体输入量较大,有机碳同位素值受植物影响明显,因此棕漠土达到显著水平;虽然交互作用下受土壤深度中0~20、40~60、80~100 cm 层显著或极显著影响,但效应量均低于0.25,可能是交互作用下,土壤深度效应发生变化,但仍有限^[43]。

3.3 土壤环境因子对土壤有机碳及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 组成的影响

干旱区绿洲化进程加深,土壤理化性质受干扰严重,使得土壤碳资源对理化性质的响应已成为绿洲土壤生态环境研究的热点^[7,44]。本研究中土壤环境因子重要性排序为土壤含水量>土壤无机碳>容重>全氮>C/N>电导率>pH,说明水资源是干旱区绿洲重要的限制因子,土壤含水量的变化显著影响土壤环境差异,pH的重要性相对较低^[2,45]。前人研究结果发现土壤含水量与SOC、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值具有极显著正、负相关关系^[46],与本研究结果类似。一方面可能因为水作为植物生长发育的必要条件,制约地表植被形成与发展,影响地表有机质积累,削弱土壤有机碳形成;另一方面水环境是绝大多数生化

反应的场所, 生命活动的载体, 有机质降解、有机碳形成等在缺水条件下过程缓慢、效率极低, 因此土壤含水量对 SOC、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 均具有重要作用^[47,48]. 关于土壤 pH 的研究中, 姜俊彦等^[49]认为 pH 值与土壤有机碳含量存在极显著相关性; 贡璐等^[2]则认为 pH 与土壤有机碳间的相关性不明显. 综合表明, pH 值范围不同, 二者的量化关系也不同, 本研究中土壤有机碳、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值均与 pH 值无显著相关性, 且在重要性排序中最低, 可能是土壤类型间存在差异, 受气候条件和人为干扰等因素影响, 造成 pH 值、有机碳及同位素组成在量级间形成明显差异, 因此无法直接表征其内在关系^[50]. 此外, 本研究通过同位素技术探讨了 SOC、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 的区域特征及其影响因素, 丰富了绿洲土壤碳资源的研究, 但随剖面加深土壤性质变化复杂, 还需进一步结合无机碳同位素、土壤 CO_2 同位素系统分析土壤碳循环过程的变化动态, 有助于绿洲土壤碳资源的可持续发展.

4 结论

(1) 绿洲 4 种土壤类型有机碳含量排序为灌漠土 > 棕漠土 > 盐土 > 风沙土, 其中盐土、风沙土随土层变化相对稳定, 灌漠土、棕漠土波动较大; $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 整体为风沙土、盐土显著高于棕漠土、灌漠土, 各土层间变化具有差异性.

(2) SOC 受土壤类型、深度及其交互作用极显著影响, 效应为土壤类型 (0.835) > 土壤深度 (0.778) > 交互作用 (0.762); $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值受土壤类型、交互作用极显著或显著影响, 效应为土壤类型 (0.400) > 交互作用 (0.392) > 土壤深度 (0.043).

(3) SOC、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 受 7 个土壤环境因子影响, 重要性排序为土壤含水量 > 土壤无机碳 > 容重 > 全氮 > C/N > 电导率 > pH, 土壤含水量是重要的限制因子.

参考文献:

- [1] Bhattacharya S S, Kim K H, Das S, *et al.* A review on the role of organic inputs in maintaining the soil carbon pool of the terrestrial ecosystem[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **167**: 214-227.
- [2] 贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 等. 塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1516-1522.
Gong L, Zhu M L, Liu Z Y, *et al.* Correlation among soil organic carbon, soil inorganic carbon and the environmental factors in a typical oasis in the southern edge of the tarim basin [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1516-1522.
- [3] Law B E, Sun O J, Campbell J, *et al.* Changes in carbon storage and fluxes in a chronosequence of ponderosa pine[J]. *Global Change Biology*, 2003, **9**(4): 510-524.
- [4] Guo Q J, Zhu G X, Chen T B, *et al.* Spatial variation and environmental assessment of soil organic carbon isotopes for tracing sources in a typical contaminated site[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, **175**: 11-17.
- [5] Nakane K. A simulation model of the seasonal variation of cycling of soil organic carbon in forest ecosystems[J]. *Japanese Journal of Ecology*, 1980, **30**: 19-29.
- [6] Liu Y, Dang Z Q, Tian F P, *et al.* Soil organic carbon and inorganic carbon accumulation along a 30-year grassland restoration chronosequence in semi-arid regions (China) [J]. *Land Degradation & Development*, 2017, **28**(1): 189-198.
- [7] Li Z W, Liu C, Dong Y T, *et al.* Response of soil organic carbon and nitrogen stocks to soil erosion and land use types in the Loess hilly-gully region of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, **166**: 1-9.
- [8] Fissore C, Dalzell B J, Berhe A A, *et al.* Influence of topography on soil organic carbon dynamics in a Southern California grassland[J]. *Catena*, 2017, **149**: 140-149.
- [9] Wang Z C, Liu S S, Huang C, *et al.* Impact of land use change on profile distributions of organic carbon fractions in peat and mineral soils in Northeast China[J]. *Catena*, 2017, **152**: 1-8.
- [10] 李艳, 曹新星, 王丽, 等. 辽西下白垩统义县组烃类化合物氢同位素组成及古气候环境意义[J]. *地学前缘*, 2017, **24**(5): 416-426.
Li Y, Cao X, Wang L, *et al.* The paleoclimate significance of hydrogen isotopic composition of individual hydrocarbon compounds in the Early Cretaceous Yixian Formation sediments from western Liaoning [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, **24**(5): 416-426.
- [11] 王毛兰, 赖建平, 胡珂图, 等. 鄱阳湖表层沉积物有机碳、氮同位素特征及其来源分析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(4): 1019-1025.
Wang M L, Lai J P, Hu K T, *et al.* Compositions and sources of stable organic carbon and nitrogen isotopes in surface sediments of Poyang Lake[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(4): 1019-1025.
- [12] 许文强, 罗格平, 陈曦, 等. 天山北坡土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 组成随海拔梯度的变化[J]. *同位素*, 2016, **29**(3): 140-145.
Wen-Qiang X U, Luo G P, Chen X, *et al.* Soil organic $\delta^{13}\text{C}$ change along a vertical gradient in the northern slope of Tianshan Mountains[J]. *Journal of Isotopes*, 2016, **29**(3): 140-145.
- [13] Blaser M, Conrad R. Stable carbon isotope fractionation as tracer of carbon cycling in anoxic soil ecosystems[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2016, **41**: 122-129.
- [14] Galdo I D, Six J, Peressotti A, *et al.* Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable C isotopes[J]. *Global Change Biology*, 2003, **9**(8): 1204-1213.
- [15] Rao Z G, Guo W K, Cao J T, *et al.* Relationship between the stable carbon isotopic composition of modern plants and surface soils and climate: a global review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, **165**: 110-119.
- [16] Walker X J, Mack M C, Johnstone J F. Stable carbon isotope analysis reveals widespread drought stress in boreal black spruce

- forests[J]. *Global Change Biology*, 2015, **21**(8): 3102-3113.
- [17] 琼雄, 王玉刚, 邓彩云, 等. 不同农业土地利用年限干旱区土壤剖面碳存储动态变化[J]. *农业工程学报*, 2017, **33**(19): 287-294.
- Luo Q, Wang Y G, Deng C Y, *et al.* Dynamics of soil carbon storage under different land use years in arid agriculture[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, **33**(19): 287-294.
- [18] 王娜, 许文强, 徐华君, 等. 准噶尔盆地南缘荒漠区土壤碳分布及其稳定同位素变化[J]. *应用生态学报*, 2017, **28**(7): 2215-2221.
- Wang N, Xu W Q, Xu H J, *et al.* Spatial variation of soil carbon and stable isotopes in the southern margin desert of Junggar Basin, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(7): 2215-2221.
- [19] Wang Y L, Zhao C Y, Ma Q L, *et al.* Carbon benefits of wolfberry plantation on secondary saline land in Jingtai oasis, Gansu—a case study on application of the CBP model[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, **157**: 303-310.
- [20] 龚子同. 中国土壤系统分类[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [21] 吕贻忠, 李保国. 土壤学实验[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [22] Breecker D O, Bergel S, Nadel M, *et al.* Minor stable carbon isotope fractionation between respired carbon dioxide and bulk soil organic matter during laboratory incubation of topsoil[J]. *Biogeochemistry*, 2015, **123**(1-2): 83-98.
- [23] 兰志龙, 赵英, 张建国, 等. 陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 339-347.
- Lan Z L, Zhao Y, Zhang J G, *et al.* Profile distribution of soil organic and inorganic carbon under different land use types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 339-347.
- [24] 张婷, 王旭东, 逢萌雯, 等. 生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2298-2303.
- Zhang T, Wang X D, Pang M W, *et al.* Impacts of biochar and straw application on soil organic carbon transformation[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2298-2303.
- [25] 陈威, 胡学玉, 陆海楠. 生物炭输入对土壤本体有机碳矿化的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 2300-2305.
- Chen W, Hu X Y, Lu H N. Impacts of biochar input on mineralization of native soil organic carbon[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 2300-2305.
- [26] 黎英华, 姚云峰, 秦富仓, 等. 不同类型土壤的有机碳密度特征[J]. *干旱区研究*, 2016, **33**(3): 455-460.
- Li Y H, Yao Y F, Qin F C, *et al.* Distribution of different types of soil organic carbon density[J]. *Arid Zone Research*, 2016, **33**(3): 455-460.
- [27] 鲁晶晶. 绿洲化过程中塔北灌区农田土壤固碳速率及潜力研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [28] 张珂, 苏永中, 王婷, 等. 荒漠绿洲区不同种植年限人工梭梭林土壤化学计量特征[J]. *生态学报*, 2016, **36**(11): 3235-3243.
- Zhang K, Su Y Z, Wang T, *et al.* Soil stoichiometry characteristics of *Haloxylon ammodendron* with different plantation age in the desert-oasis ecotone, north China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(11): 3235-3243.
- [29] Hassan A, Ijaz S S, Lal R, *et al.* Depth distribution of soil organic carbon fractions in relation to tillage and cropping sequences in some dry lands of Punjab, Pakistan[J]. *Land Degradation & Development*, 2016, **27**(4): 1175-1185.
- [30] Wang C, Wei H W, Liu D W, *et al.* Depth profiles of soil carbon isotopes along a semi-arid grassland transect in northern China[J]. *Plant and Soil*, 2017, **417**(1-2): 43-52.
- [31] Balesdent J, Basile-Doelsch I, Chadoeuf J, *et al.* Turnover of deep organic carbon in cultivated soils: an estimate from a review of isotope data[J]. *Biotechnology, Agronomy, & Society and Environment*, 2017, **21**(3): 181-190.
- [32] 赵丹. 新疆 18 种典型灌木及立地土壤有机稳定碳同位素组成特征[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.
- [33] de Rouw A, Souleuth B, Huon S. Stable carbon isotope ratios in soil and vegetation shift with cultivation practices (Northern Laos)[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, **200**: 161-168.
- [34] 司高月, 李晓玉, 程淑兰, 等. 长白山垂直带森林叶片-凋落物-土壤连续体有机碳动态——基于稳定性碳同位素分析[J]. *生态学报*, 2017, **37**(16): 5285-5293.
- Si G Y, Li X Y, Cheng S L, *et al.* Organic carbon dynamics of the leaf-litter-soil continuum in the typical forests of the Changbai Mountain transect: an analysis of stable carbon isotope technology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(16): 5285-5293.
- [35] 高杰, 李锐, 李今今, 等. 白云岩风化剖面的粒度分布、元素迁移及碳同位素特征——以黔北新蒲剖面为例[J]. *生态学报*, 2016, **36**(5): 1409-1420.
- Gao J, Li R, Li J J, *et al.* Grain size distribution, element migration, and stable carbon isotope characteristics of dolomite weathering profiles in Xinpu, North of Guizhou Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(5): 1409-1420.
- [36] 熊鑫, 张慧玲, 吴建平, 等. 鼎湖山森林演替序列植物-土壤碳氮同位素特征[J]. *植物生态学报*, 2016, **40**(6): 533-542.
- Xiong X, Zhang H L, Wu J P, *et al.* ^{13}C and ^{15}N isotopic signatures of plant-soil continuum along a successional gradient in Dinghushan biosphere reserve[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, **40**(6): 533-542.
- [37] 柯跃进, 胡学玉, 易卿, 等. 水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO_2 释放的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 93-99.
- Ke Y J, Hu X Y, Yi Q, *et al.* Impacts of rice straw biochar on organic carbon and CO_2 release in arable soil[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 93-99.
- [38] 石小霞, 赵诣, 张琳, 等. 华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 301-308.
- Shi X X, Zhao Y, Zhang L, *et al.* Effects of different agricultural practices on soil carbon pool in north China Plain[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 301-308.
- [39] Gonçalves D R P, de Moraes Sá J C, Mishra U, *et al.* Soil type and texture impacts on soil organic carbon storage in a subtropical agro-ecosystem[J]. *Geoderma*, 2017, **286**: 88-97.
- [40] 孟国欣, 查同刚, 张晓霞, 等. 植被类型和地形对黄土区退耕地土壤有机碳垂直分布的影响[J]. *生态学杂志*, 2017, **36**(9): 2447-2454.
- Meng G X, Zha T G, Zhang X X, *et al.* Effects of vegetation

- type and terrain on vertical distribution of soil organic carbon on abandoned farmlands in the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(9): 2447-2454.
- [41] 柴彦君. 灌溉土团聚体稳定性及其固碳机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- [42] Zhao B H, Li Z B, Li P, *et al.* Spatial distribution of soil organic carbon and its influencing factors under the condition of ecological construction in a hilly-gully watershed of the Loess Plateau, China[J]. *Geoderma*, 2017, **296**: 10-17.
- [43] Torres-Sallan G, Creamer R E, Lanigan G J, *et al.* Effects of soil type and depth on carbon distribution within soil macroaggregates from temperate grassland systems [J]. *Geoderma*, 2018, **313**: 56-56.
- [44] Atekwana E A, Molwalefhe L, Kgaodi O, *et al.* Effect of evapotranspiration on dissolved inorganic carbon and stable carbon isotopic evolution in rivers in semi-arid climates: the Okavango Delta in North West Botswana [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2016, **7**: 1-13.
- [45] Manns H R, Parkin G W, Martin R C. Evidence of a union between organic carbon and water content in soil[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2016, **96**(3): 305-316.
- [46] Dou X L, He P, Cheng X L, *et al.* Long-term fertilization alters chemically-separated soil organic carbon pools: based on stable C isotope analyses[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 19061.
- [47] 贾俊仙, 蔚耀洲, 张健, 等. 土壤水分对半干旱区石灰性土壤有机碳矿化的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2017, **36**(9): 62-68.
- Jia J X, Yu Y Z, Zhang J, *et al.* Effect of soil moisture on mineralization of soil carbon in calcareous soils in the Semi-arid Regions of China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, **36**(9): 62-68.
- [48] 韩东亮, 朱新萍, 胡毅, 等. 不同水分条件下巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地土壤有机碳特征[J]. *湿地科学*, 2017, **15**(4): 509-515.
- Han D L, Zhu X P, Hu Y, *et al.* Characteristics of soil organic carbon at Bayinbuluke swan lake alpine wetland under different water levels[J]. *Wetland Science*, 2017, **15**(4): 509-515.
- [49] 姜俊彦, 黄星, 李秀珍, 等. 潮滩湿地土壤有机碳储量及其与土壤理化因子的关系——以崇明东滩为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2015, **31**(4): 540-547.
- Jiang J Y, Huang X, Li X Z, *et al.* Soil organic carbon storage in tidal wetland and its relationships with soil physico-chemical factors: a case study of Dongtan of Chongming, Shanghai[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, **31**(4): 540-547.
- [50] 赵丹, 程军回, 刘耘华, 等. 荒漠植物梭梭稳定碳同位素组成与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2017, **37**(8): 2743-2752.
- Zhao D, Cheng J H, Liu Y H, *et al.* Relationship of stable carbon isotope composition with environmental factors in the desert plant, *Haloxylon ammodendron* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(8): 2743-2752.

CONTENTS

Ratios of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Various Cities of China	WANG Ming, CHEN Wen-tai, LU Si-hua, <i>et al.</i> (4393)
Temporal Variation, Spatial Distribution, and Reactivity Characteristics of Air VOCs in Beijing 2015	ZHANG Bo-tao, AN Xin-xin, WANG Qin, <i>et al.</i> (4400)
Research and Application of the Technical Method for the Compilation of VOCs Emission Inventories from Architectural Coatings in Beijing	DENG Zi-yu, GAO Mei-ping, WANG Qing-wei, <i>et al.</i> (4408)
Content Levels and Compositions Characteristics of Volatile Organic Compounds(VOCs) Emission from Architectural Coatings Based on Actual Measurement	GAO Mei-ping, DENG Zi-yu, NIE Lei, <i>et al.</i> (4414)
Characteristics of Primary Pollutants of Air Quality in Cities Along the Taihang Mountains in Beijing-Tianjin-Hebei Region During 2014-2016	WANG Xiao-yan, WANG Shuai, ZHU Li-li, <i>et al.</i> (4422)
Seasonal Variation and Source Analysis for PM _{2.5} , PM ₁ and Their Carbonaceous Components in Beijing	FAN Xiao-chen, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4430)
Chemical Constitution and Carbon Isotopic Compositions of PM _{2.5} in the Northern Suburb of Nanjing in Spring	ZHOU Yi-ming, HAN Xun, WANG Jin-jin, <i>et al.</i> (4439)
Analysis of Non-polar Organic Compounds in PM _{2.5} by Rapid Thermo-desorption Method Coupled with GC/MS	MA Ying-ge, WU Xia, PENG Meng-meng, <i>et al.</i> (4446)
Association Between Fine Particulate Matter and Asthma Hospital Outpatient Visits in Hangzhou	WANG An-xu, CHEN Xi, SONG Cong-bo, <i>et al.</i> (4457)
Hybrid Electric Bus SCR System Operation and NO _x Emission Characteristics Based on Remote Communication Technology	YANG Qiang, HU Qing-yao, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (4463)
Selection of Priority Contaminants in a Watershed Using Risk Ranking Methodology	LI Qi-feng, LÜ Yong-long, WANG Pei, <i>et al.</i> (4472)
Characteristics and Sources of Atmospheric Inorganic Nitrogen Wet Deposition in Xueyu Cave Watershed, Outer Suburbs of Chongqing City	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (4479)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve	SONG Lei, TIAN Peng, ZHANG Jin-bo, <i>et al.</i> (4490)
Key Production Process of Nitrous Oxide and Nitrogen Sources in Tuojia River	ZHAO Qiang, LÜ Cheng-wen, QIN Xiao-bo, <i>et al.</i> (4497)
Impact of Biochar on Nitrogen Removal and Nitrous Oxide Emission in Aerated Vertical Flow Constructed Wetland	WANG Ning, HUANG Lei, LUO Xing, <i>et al.</i> (4505)
Physiological Responses of Ryegrass in Cadmium-Nonylphenol Co-contaminated Water and the Phytoremediation Effects	SHI Guang-yu, LI Zhong-yi, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (4512)
Analysis of Absorption Characteristics of Urban Black-odor Water	DING Xiao-lei, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (4519)
Seasonal Variations of DOM Spectral Characteristics in the Surface Water of the Upstream Minjiang River	FAN Shi-yu, QIN Ji-hong, LIU Yan-yang, <i>et al.</i> (4530)
Water Quality and Three-Dimensional Fluorescence of Stormwater Runoff from Lined Bioretention Field Cells	LIN Xiu-yong, WANG Shu-min, LI Qiang, <i>et al.</i> (4539)
Nitrate-Nitrogen Pollution Sources of an Underground River in Karst Agricultural Area Using ¹⁵ N and ¹⁸ O Isotope Technique	SHENG Ting, YANG Ping-heng, XIE Guo-wen, <i>et al.</i> (4547)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Landfill Groundwater	PENG Li, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4556)
Adsorption Behavior of Phosphate from Water on Zirconium-loaded Granular Zeolite-amended Sediment	LIANG Shu-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (4565)
Control of Coagulant Dosing for Humic Substances Based on Ultraviolet Spectrum Analysis	ZHANG Bei-chen, ZHANG Xiao-lei, QIN Lan-lan, <i>et al.</i> (4576)
Reduction of Wastewater Organic Micro-pollutants and Genotoxicity in a Hybrid Process Involving Anaerobic-anoxic-oxic and Ozonation Treatments	LI Mo, WANG Zhen-zhe, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4584)
Distribution and Removal of Antibiotic Resistance Genes in Two Sequential Wastewater Treatment Plants	LI Ao-lin, CHEN Li-jun, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (4593)
Effect of Magnetic Chitosan Hydrogel Beads with Immobilized Feamnox Bacteria on the Removal of Ammonium from Wastewater	LIU Zhi-wen, CHEN Chen, PENG Xiao-chun, <i>et al.</i> (4601)
Enhanced Nitrogen and Carbon Removal Performance of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) with Trehalose Addition Treating Saline Wastewater	YANG Zhen-lin, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (4612)
Characteristics of Denitrifying Phosphorus Removal by A ² /O-BAF at Low Temperatures	HUANG Jian-ming, ZHAO Zhi-chao, ZHENG Long-ju, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics of Advanced Treatment of Treated Petrochemical Water by O ₃ -BAC and Analysis of Consortium Structure	ZHANG Chao, SHAN Ming-hao, XU Dan-ning, <i>et al.</i> (4628)
Microbial Community Characteristics of Shortcut Nitrification Start-up in Different MBR-Inoculated Sludges	WU Peng, CHEN Ya, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (4636)
Effect of Microbial Community Structure and Metabolites on Sludge Settling Ability Under Three Different Switching Condition Processes	WEN Dan-dan, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4644)
Adsorption Mechanisms of Ciprofloxacin by Extracellular Polymeric Substances of Sulfate-reducing Bacteria Sludge	ZHANG Hui-qun, JIA Yan-yan, FANG He-ting, <i>et al.</i> (4653)
Rapid Improvement of Denitrification Performance of Embedded Activated Sludge and Community Analysis	YANG Hong, XU Fu, MENG Chen, <i>et al.</i> (4661)
Spatial-Temporal Trends and Pollution Source Analysis for Heavy Metal Contamination of Cultivated Soils in Five Major Grain Producing Regions of China	SHANG Er-ping, XU Er-qi, ZHANG Hong-qi, <i>et al.</i> (4670)
Spatial Interpolation Methods and Pollution Assessment of Heavy Metals of Soil in Typical Areas	MA Hong-hong, YU Tao, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (4684)
Effect of Straw Residues in Combination with Reduced Fertilization Rate on Greenhouse Gas Emissions from a Vegetable Field	HUANG Rong, GAO Ming, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (4694)
Emission of NH ₃ and N ₂ O from Spinach Field Treated with Different Fertilizers	SHAN Nan, HAN Sheng-hui, LIU Ji-pei, <i>et al.</i> (4705)
Effects of Various Combinations of Fertilizer, Soil Moisture, and Temperature on Nitrogen Mineralization and Soluble Organic Nitrogen in Agricultural Soil	TIAN Fei-fei, JI Hong-fei, WANG Le-yun, <i>et al.</i> (4717)
Long-term Fertilization Effects on the Abundance of Complete Ammonia Oxidizing Bacteria(Comammox <i>Nitrospira</i>) in a Neutral Paddy Soil	WANG Mei, WANG Zhi-hui, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4727)
Spatial Variation of Soil Organic Carbon and Stable Isotopes in Different Soil Types of a Typical Oasis	CHEN Xin, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (4735)
Effect and Mechanism of Attapulgite and Its Modified Materials on Bioavailability of Cadmium in Soil	CHEN Zhan-xiang, CHEN Chuan-sheng, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4744)
Persulfate Oxidation Effect of Soil Organic Pollutants by Natural Organic Matters	LIU Qiong-zhi, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4752)
Lead Uptake and Accumulation in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) with Water Management and Selenite Fertilization	WAN Ya-nan, LIU Zhe, Aboubacar Younoussa Camara, <i>et al.</i> (4759)
Key Bacteria for the Microbial Degradation of Pollutants in Cellar Water	YANG Hao, YANG Xiao-ni, ZHANG Guo-zhen, <i>et al.</i> (4766)
Oxidation of Humic Acid Complexing As(III) by As(III)-Oxidizing Bacteria	LI Ze-jiao, CUI Yan-shan, YIN Nai-yi, <i>et al.</i> (4778)
A Thermotolerant and Halotolerant Sulfate-reducing Bacterium in Produced Water from an Offshore High-temperature Oilfield in Bohai Bay, China: Isolation, Phenotypic Characterization, and Inhibition	YANG Chun-lu, YUAN Mei-yu, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (4783)
Isolation and Nitrogen Removal Characteristics of Salt-tolerant Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacteria <i>Zobellella</i> sp. B307	BAI Jie, CHEN Lin, HUANG Xiao, <i>et al.</i> (4793)
Isolation, Identification and Degradation Characteristics of a 17 β -estradiol Degrading Strain <i>Fusarium</i> sp. KY123915	WU Man-li, ZHU Chang-cheng, QI Yan-yun, <i>et al.</i> (4802)
Effect of Fluoroquinolones on Performance and Microbial Community of a Vertical Flow Constructed Wetland	LI Xin-hui, ZHENG Quan, LI Jing, <i>et al.</i> (4809)
Microbial Community Diversity Analysis During Lincomycin Mycelia Dreg with Manure	REN Sheng-tao, GUO Xia-li, LU A-qian, <i>et al.</i> (4817)
Oxidative Stress and DNA Damage Induced by DEP Exposure in Earthworms	PING Ling-wen, LI Xian-xu, ZHANG Cui, <i>et al.</i> (4825)
Mineralogy Characteristics and Heavy Metal Distribution of MSWI Fly Ash	LI Jian-tao, ZENG Ming (4834)