

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

**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

|                                                        |                                                      |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 近20年来中国典型区域 PM <sub>2.5</sub> 时空演变过程 .....             | 罗毅,邓琼飞,杨昆,杨扬,商春雪,喻臻钰 (3003)                          |
| 西安市 PM <sub>2.5</sub> 健康损害价值评估 .....                   | 魏国茹,史兴民 (3014)                                       |
| 河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析 .....                        | 江琪,王飞,孙业乐 (3022)                                     |
| 南京北郊秋季 PM <sub>2.5</sub> 碳质组分污染特征及来源分析 .....           | 徐足飞,曹芳,高嵩,鲍孟盈,石一凡,章炎麟,刘晓妍,范美益,张雯淇,卞航,刘寿东 (3033)      |
| 临安夏季霾和清洁天气 PM <sub>2.5</sub> 化学组成特征比较 .....            | 梁林林,孙俊英,张养梅,刘畅,徐婉筠,张根,刘旭艳,马千里 (3042)                 |
| 盘锦市秋冬季节 PM <sub>2.5</sub> 中碳组分特征及来源解析 .....            | 张蕾,姬亚芹,张军,王士宝,李越洋,赵静琦,张伟 (3051)                      |
| 南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应 .....                            | 黄聪聪,马嫣,郑军 (3057)                                     |
| 夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量 .....                     | 李鹏志,李茜,石金辉,高会旺,姚小红 (3067)                            |
| 太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源 .....                              | 叶艾玲,程明超,张璐,何秋生,郭利利,王新明 (3075)                        |
| 杭州地区大气 CO <sub>2</sub> 体积分数变化特征及影响因素 .....             | 浦静姣,徐宏辉,姜瑜君,杜荣光,齐冰 (3082)                            |
| 典型工业源 VOCs 治理现状及排放组成特征 .....                           | 景盛翱,王红丽,朱海林,杨强,卢滨,夏阳,余传冠,陶士康,李莉,楼晟荣,黄成,唐伟,井宝莉 (3090) |
| 地级市域工业 VOCs 排放源产排特性及其控制技术应用现状:以秦皇岛市为例 .....            | 胡旭睿,虎啸宇,王灿 (3096)                                    |
| 青霉素发酵尾气 VOCs 污染特征及健康风险评价 .....                         | 郭斌,么瑞静,张硕,马磊,康江,王姗姗 (3102)                           |
| 轻型汽油车尾气 OC 和 EC 排放因子实测研究 .....                         | 黄成,胡馨遥,鲁君 (3110)                                     |
| 南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价 .....                              | 田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,钱新,王金花,李慧明 (3118)                  |
| 西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析 .....                          | 石栋奇,卢新卫 (3126)                                       |
| 三峡库区主要河流秋季 pCO <sub>2</sub> 及其影响因素 .....               | 罗佳宸,毛蓉,李思悦 (3134)                                    |
| 泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素 .....                           | 寇永朝,华琨,李洲,李志 (3142)                                  |
| 生物滞留对城市地表径流磷的去除途径 .....                                | 李立青,刘雨倩,杨佳敏,王娟 (3150)                                |
| 淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系 .....                         | 杨丽,张玮,尚光霞,张军毅,王丽卿,魏华 (3158)                          |
| 抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系 .....                          | 李蕊,陈光杰,康文刚,陈丽,王教元,陈小林,刘园园,冯钟,张涛 (3168)               |
| 蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响 .....                             | 王永平,谢瑞,晁建颖,姬昌辉,于剑 (3179)                             |
| 生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响 .....                         | 徐德福,潘潜澄,李映雪,陈晓艺,王佳俊,周磊 (3187)                        |
| Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧化对苯二酚效能 .....                      | 张兰河,高伟国,陈子成,张海丰,王旭明 (3194)                           |
| Fe/Cu 双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制 .....                         | 李晶,鲍建国,杜江坤,冷一非,孔淑琼 (3203)                            |
| 铈酸盐改性钛酸纳米片对水中 Cd(II) 的吸附行为及机制 .....                    | 康丽,刘文,刘晓娜,刘宏芳,李一菲 (3212)                             |
| 铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验 .....                                 | 蔡言安,毕学军,张嘉凝,董杨,刘文哲 (3222)                            |
| 制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响:共沉淀法与机械物理混合法 .....                | 仲艳,王建燕,陈静,张高生 (3230)                                 |
| 电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响 .....                  | 陆宇琴,刘金梦,王新华,李秀芬,李晔 (3240)                            |
| 不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的 COD 需求 .....                           | 李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰 (3247)                           |
| 基质浓度对 ABR 反应器 SAD 协同脱氮除碳效能影响 .....                     | 张敏,姜滢,汪瑶琪,韦佳敏,陈重军,沈耀良 (3254)                         |
| 采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除 .....                  | 付炳炳,潘建新,马景德,王丰,吴海珍,韦朝海 (3262)                        |
| 间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性 .....                              | 高春娣,孙大阳,安冉,赵楠,焦二龙,祝海兵 (3271)                         |
| 基于高通量测序的 SBR 反应器丝状膨胀污泥菌群分析 .....                       | 洪颖,姚俊芹,马斌,徐双,张彦江 (3279)                              |
| 纳米零价铁(NZVI)对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响 .....              | 苏润华,丁丽雨,任洪强 (3286)                                   |
| 气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响 .....                        | 张千,吉芳英,付旭芳,陈晴空 (3297)                                |
| 活性污泥胞外多聚物提取方法的比较 .....                                 | 孙秀玥,唐珠,杨新萍 (3306)                                    |
| 耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌 H97 的鉴定及其好氧反硝化特性 .....                      | 蔡茜,何腾霞,冶青,李振轮 (3314)                                 |
| PFOS 前体物质(PreFOSs)降解菌的分离鉴定及其降解特性 .....                 | 赵淑艳,周涛,王博慧,梁田坤,柳丽芬 (3321)                            |
| 采油井场土壤微生物群落结构分布 .....                                  | 蔡萍萍,宁卓,何泽,张敏,石建省 (3329)                              |
| 铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征 .....                          | 王瑞宏,贾彤,曹苗文,柴宝峰 (3339)                                |
| 广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险 .....                               | 郭颖,李玉冰,薛生国,廖嘉欣,王琼丽,吴川 (3349)                         |
| 邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析 .....                      | 杨志豪,何明靖,杨婷,卢俊峰,魏世强 (3358)                            |
| 成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素 .....                           | 李珊,李启权,王昌全,张浩,肖怡,唐嘉玲,代天飞,李一丁 (3365)                  |
| 塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性 .....            | 赵晶晶,贡璐,安申群,李杨梅,陈新 (3373)                             |
| 塔里木盆地北缘绿洲4种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系 .....         | 安申群,贡璐,李杨梅,陈新,孙力 (3382)                              |
| 高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制 .....                            | 唐国勇,张春华,刘方炎,马艳 (3391)                                |
| 施硼对水稻幼苗吸收和分泌砷的影响 .....                                 | 朱毅,孙国新,陈正,胡莹,郑瑞伦 (3400)                              |
| 不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析 .....                    | 胡雪芳,田志清,梁亮,陈俊德,张志民,朱祥民,王士奎 (3409)                    |
| 南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估 .....                        | 赵辉,郑有飞,魏莉,关清 (3418)                                  |
| 三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析 .....                       | 程楠,谢青,樊宇飞,王永敏,张成,王定勇 (3426)                          |
| 人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性 .....                             | 时红蕾,王文昌,李倩 (3434)                                    |
| COD/SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 对青霉素菌渣厌氧消化影响 .....   | 强虹,李玉友,裴梦富 (3443)                                    |
| 果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征 .....                         | 何品晶,蒋宁玲,徐贤,韦顺艳,邵立明,吕凡 (3452)                         |
| 曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田 NH <sub>3</sub> 挥发的影响 .....             | 庞炳坤,张敬沙,吴杰,李志琳,蒋静艳 (3460)                            |
| 《环境科学》征订启事(3141) 《环境科学》征稿简则(3202) 信息(3229, 3433, 3451) |                                                      |

# 塔里木盆地北缘绿洲 4 种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系

安申群<sup>1,2</sup>, 贡璐<sup>1,2\*</sup>, 李杨梅<sup>1,2</sup>, 陈新<sup>1,2</sup>, 孙力<sup>1,2</sup>

(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:** 为明确干旱区土壤有机碳各组分分布状况, 进而合理地开发与利用, 解决土地利用效率低下问题, 以塔里木盆地北缘盐碱地、天然林、沙地、30 a 棉田这 4 种不同土地利用方式土壤为研究对象, 分析不同土地利用方式土壤有机碳、微生物量碳、可溶性有机碳、易氧化有机碳的分布状况, 结合冗余分析探索其与土壤环境因子的关系。结果表明, SOC 在天然林表现出最高值 ( $1.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 在沙地随土层增加而增加, 在其他土地利用类型整体呈现下降趋势; MBC 在天然林表现出最高水平, 且随土层深度增加而降低, 在其他土地利用类型无明显变化趋势。DOC 含量最高值和最低值分别出现在天然林和 30 a 棉田的 80 ~ 100 cm 层 (分别为  $143.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $30.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 在天然林中随土层深度增加而增加, 在盐碱地中随土层深度增加而降低且不同土层含量均表现出显著差异 ( $P < 0.05$ )。EOC 含量在不同土地利用类型和不同土层中未表现出明显规律。将各有机碳组分进行敏感性分析得出: MBC 对不同土层最为敏感, DOC 对土地利用变化最为敏感。通过冗余分析得出各有机碳组分与土壤含水量、全氮、pH 呈正相关关系, 与土壤容重、电导率呈负相关关系。土壤环境因子对各碳组分含量的重要性排序为: 土壤容重 > 含水量 > 电导率 > 土壤氮 > pH, 即容重和含水量为影响干旱区有机碳组分的主要因子。

**关键词:** 有机碳组分; 不同土地利用方式; 土壤环境因子; 敏感性分析; 阿拉尔垦区

中图分类号: X144; X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3382-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201711090

## Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin

AN Shen-qun<sup>1,2</sup>, GONG Lu<sup>1,2\*</sup>, LI Yang-mei<sup>1,2</sup>, CHEN Xin<sup>1,2</sup>, SUN Li<sup>1,2</sup>

(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:** In order to clarify the distribution of each component of soil organic carbon (SOC) in arid areas, and to develop methods to rationally solve problems caused by inefficient land use and blind tillage, we studied the effects of different land use patterns on the SOC, microbial biomass carbon (MBC), dissolved organic carbon carbon (DOC), and easily oxidized organic carbon (EOC) on four different land use types: saline soil, natural forest, sandy land, and 30 a cotton field in the northern Tarim Basin. The relationships between different carbon components and soil physicochemical factors were researched by redundancy analysis (RDA). The results showed that the SOC showed the highest value ( $1.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) in natural forests and increased with soil depth, while the other land use types showed a downward trend as a whole. The MBC showed the highest level in natural forests, and decreased with soil depth, but there was no obvious change trends in other land use types. The highest and lowest DOC contents appeared in the 80-100 cm layer ( $143.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  and  $30.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively) in the natural forest and 30 a cotton field, respectively, and increased with soil depth in the natural forest ( $P < 0.05$ ). In the saline soil, the DOC content of the soil decreased with increased depth, and the contents of different soil layers showed significant differences ( $P < 0.05$ ). The EOC content did not show a obvious regularity in different soil layers of different land use types. Sensitivity analysis of each organic carbon component showed that the MBC was the most sensitive to soil layer changes, and the DOC was the most sensitive to different land use patterns. The MBC has a certain indication of soil layer change, which may be due to the fact that microbial biomass C in different layers has different living environments, so the content was significantly different. The DOC has a certain indication of land use types change, which may be due to the adaptation to different situations. Through the RDA, it was found that there was a positive correlation between soil components and soil water content (SWC), total nitrogen (TN) and pH, and a negative relationship between bulk density (BD) and electrical conductivity (EC). The order of importance of environmental factors to the contents of carbon components is as follows:  $\text{BD} > \text{SWC} > \text{EC} > \text{TN} > \text{pH}$ . This indicates that bulk density and water content are the main factors affecting organic carbon components in arid regions.

**Key words:** organic carbon components; land use type; soil physicochemical factors; sensitivity analysis; Alar reclamation area

收稿日期: 2017-11-09; 修订日期: 2017-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41461105)

作者简介: 安申群(1991 ~ ), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为干旱区资源与环境, E-mail: shenqunan@163.com

\* 通信作者, E-mail: gonglu721@163.com



土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)是地球陆地生态系统最大的碳库,约占地表固碳总量的 60%,其微小变化即可对碳循环过程和大气浓度产生深远影响<sup>[1]</sup>。活性有机碳在土壤中周转较快,主要包括土壤中高度游离态的植物残体、真菌菌丝、微生物量及其渗出物等有机质,易于被微生物利用和转化的有生命体和无生命体的多相组合,并参与土壤生物化学过程,对微生物的生长代谢、土壤有机质分解与固定、土壤养分流和内在生产力有重大影响<sup>[2]</sup>。活性有机碳通常被分为微生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)、可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)、易氧化有机碳(easily oxidized organic, EOC)等不同组分<sup>[3]</sup>,且各组分含量对环境因子较为敏感<sup>[4]</sup>。土地利用方式的变化可直接或间接影响土壤有机碳形成,进而对活性有机碳含量及组分产生影响<sup>[5]</sup>,不同土地利用方式下土壤长期暴露于不同的日照条件、温度、降水、植被覆盖等自然环境中<sup>[6,7]</sup>,且受不同程度人为活动干扰,活性有机碳在各土层的分布也存在差异<sup>[8]</sup>。

20 世纪末国内外学者根据不同标准将土壤碳分为不同组分,其中杨玉海等<sup>[9]</sup>根据碳库转化速率将土壤碳库分为活跃库、慢变库和惰性库,陈志杰等<sup>[10]</sup>根据物理密度将其分为轻组有机碳、重组有机碳和颗粒有机碳。而 Lehmann 等<sup>[11]</sup>则根据不同的测定方法将有机碳分成水溶性有机碳、微生物量碳、易氧化有机碳、轻组有机碳。近年来国内外学者对土壤有机碳组分的研究主要通过化学、生物结合同位素的方法进行<sup>[12]</sup>,并对影响有机碳组分的不同土壤环境因子进行进一步探索,得出不同的土壤环境因子对土壤有机碳分布特征的影响<sup>[13]</sup>。目前关于有机碳组分的研究主要集中于山地、草原、森林、湿地<sup>[14,15]</sup>等生态系统,并得出不同的有机碳组分在山地随海拔梯度呈现不同的规律<sup>[16,17]</sup>;SOC 在高山草甸、典型草地和荒漠草地中含量呈现递减趋势,不同的有机碳组分则呈现不同变化规律<sup>[18]</sup>;湿地 SOC 和 MBC 则在夏季呈现低海拔高于高海拔地区含量,且其他有机碳组分随土层深度增加而降低<sup>[19,20]</sup>。但是,对荒漠绿洲生态系统的研究鲜见报道,荒漠区的有机碳组分分布状况尚不明确,对有机碳组分的研究可为荒漠绿洲生态系统循环机制提供依据。

塔里木盆地北缘荒漠属我国极干旱地区,生态系统脆弱。长期水资源短缺,土壤保肥蓄水能力弱,加剧了土壤养分的流失,加之人为高强度的开发利

用、不合理的管理方式,导致土地贫瘠、土壤盐渍化愈发严重<sup>[21]</sup>。因此该研究区多以耐盐碱耐旱的农作物、荒漠植物为主,若想改变研究区土地利用状况,合理开发利用,减少荒废土地,需对研究区土壤特性及其元素含量进行准确测定。而 MBC、DOC、EOC 虽然占土壤有机碳比重较小,但由于其较高的活性,在土壤与大气、土壤与微生物的物质交换中起到至关重要的作用。那么,研究区土壤活性有机碳各组分在不同土地利用方式下是如何分布的?其分布特征主要受哪些环境因子影响?

本研究土壤采集于塔里木河北缘,选取具有代表性的盐碱地、天然林、沙地、30 a 棉田这 4 种土地利用类型,分析每种土地利用类型的不同有机碳组分及其土壤环境因子对其的影响,旨在揭示不同土地利用方式下土壤活性有机碳分布特征,对区域碳循环过程进行补充,以期当地土地合理开发利用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

阿拉尔垦区地处天山南麓,塔克拉玛干沙漠北缘,塔里木河上游阿克苏河与叶尔羌河冲击平原上,跨 81°15'~81°38'E, 40°22'~41°57'N。海拔介于 996 m~1 012 m 之间,东高西低。年均蒸发量 2 498 mm,年均降水量 44.7 mm,年均日照时数为 2 729.0 h,年均气温 12.4℃,大于 10℃的有效积温为 4 201℃,无霜期 200 d,属暖温带干旱气候。全年干旱少雨,属我国极干旱地区,人类生产活动主要以灌溉农业为主,农作物有经济棉、大枣、核桃、梨等。现辖新疆阿克苏市托喀依乡、新疆建设兵团农一师十个农垦团场。主要土地利用方式为盐碱地、天然林、沙地、农用田等,土壤类型为盐渍土、棕漠土、风沙土和灌漠土。

### 1.2 研究方法

土壤样品采集于 2016 年 8 月阿拉尔垦区。选择具有代表性的盐碱地(土壤类型为盐渍土,植被以盐生植物为主,常见的有芦苇、盐穗木、怪柳;主要分布于农田与荒地的交错带、废弃的农田等)、天然林(土壤类型为棕漠土,植被以灌木、旱生小半灌木为主,常见的有胡杨、骆驼刺等;主要分布于塔里木河两岸含水量较高的区域)、沙地(土壤类型为风沙土,植被覆盖度低,常见的有沙蒿、梭梭;主要分布于塔克拉玛干沙漠)、30 a 棉田(土壤类型为灌漠土)为目标样地,每个样地 3 个重复,每个重复



设置 3 个具有代表性的 10 m × 10 m 样方,用剖面取样法进行取样,剖面深度为 1 m,并将其均分为 5 层,自下而上逐层取土,去除可见残碎植物及其他杂质后装袋。同时嵌入铝盒和环刀用于土壤含水量和容重的测量。将同一重复中同层土壤进行混合,并用四分法取土装入两个自封袋中,其中一袋置于 4℃ 冰箱中进行保鲜。

室内分析中,将用于 SOC、DOC、EOC 测定的土壤进行自然风干,并过 2 mm 筛后编号待测。

SOC 含量由重铬酸钾外加热法测得<sup>[22]</sup>:称取 1 g 土壤于试管中,加入 0.80 mol·L<sup>-1</sup> (1/6 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) 标准溶液 5 mL 后加入浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5 mL 充分摇匀,盖上小漏斗后置于铁丝笼中于 190℃ 油浴锅内加热,油浴锅内温度维持在 170 ~ 180℃,煮沸 5 min。冷却后,将液体置于 250 mL 三角瓶中,加入邻啡罗啉指示剂 3 滴,用 0.2 mol·L<sup>-1</sup> 硫酸亚铁滴定,溶液变为砖红色后,记取 FeSO<sub>4</sub> 消耗量,根据 FeSO<sub>4</sub> 消耗量得出 SOC 含量。

DOC 由消煮法测得<sup>[23]</sup>:取鲜土 10 g,加入 50 mL 超纯水振荡 30 min 后离心 (5 000 r·min<sup>-1</sup>) 10 min,上清液通过循环水真空泵抽滤过 0.45 μm 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含水的质量分数,用以换算成以烘干土为基准的 DOC 浓度。

EOC 由离心法测得<sup>[24]</sup>:取风干土 30 g 于塑料瓶中,加入 333 mmol·L<sup>-1</sup> KMnO<sub>4</sub> 溶液 25 mL 后封口,以 25 r·min<sup>-1</sup> 振荡 1 h 再离心 5 min (4 000 r·min<sup>-1</sup>),提取上清液用去离子水按 1:250 稀释,在 565 nm 分光光度计上比色,根据 KMnO<sub>4</sub> 消耗量求得易氧化有机碳含量。

MBC 以氯仿熏蒸-提取法测得<sup>[25]</sup>:取新鲜土壤 50 g, 25℃ 下培养 15 d 置于真空干燥器内进行氯仿熏蒸 24 h。抽尽氯仿后,用 0.5 mol·L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 抽提,测定提取液中总碳量。比较熏蒸与未熏蒸土样提取液中含碳量的差值,得出土壤微生物碳。

土壤含水量 (soil water content, SWC) 用烘干法测得<sup>[26]</sup>;电导率 (electrical conductivity, EC) 通过电导率仪测得;pH 用 pH 计测得;土壤容重 (bulk density, BD) 由环刀法测得<sup>[27]</sup>;土壤全氮 (total nitrogen, TN) 用凯氏定氮法测得<sup>[28]</sup>。

### 1.3 数据分析

实验所得数据用 Excel 2007 进行整理,用 SPSS

17 进行数据分析。对不同有机碳组分通过 K-S 检验进行正态性分析,其次,对所测数据进行方差齐性检验,若为齐性用 LSD 方法进行显著性多重比较;若为非齐性,用 Tamhane's T2 法进行多重比较,显著性水平为  $\alpha = 0.05$ 。

土壤有机碳含量敏感性指标<sup>[29]</sup> 根据以下公式得出:

$$M_i = (I_{i_{\max}} - I_{i_{\min}}) / I_{i_{\min}} \quad (1)$$

式中,  $M$  为有机碳含量敏感性指标,  $I$  为有机碳含量,  $i$  在计算不同土地利用方式有机碳含量敏感性指标时为不同土壤层,在计算不同土层有机碳含量敏感性指标时为不同土地利用方式。

另外,本文将不同土壤有机碳组分含量作为研究对象,以 SWC、EC、BD 及 TN 为环境变量,用冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 进行土壤 SOC 及各组分含量与土壤环境因子的关系分析。其中,土壤不同有机碳组分、SWC、EC、BD、TN 的变异膨胀系数小于作为环境变量的临界值 20,即可将其作为环境变量进行比较。排序轴梯度长度 LGA < 3,即有机碳组分对环境变量的响应为线性,符合线性排序法,可用 RDA 对其进行分析。

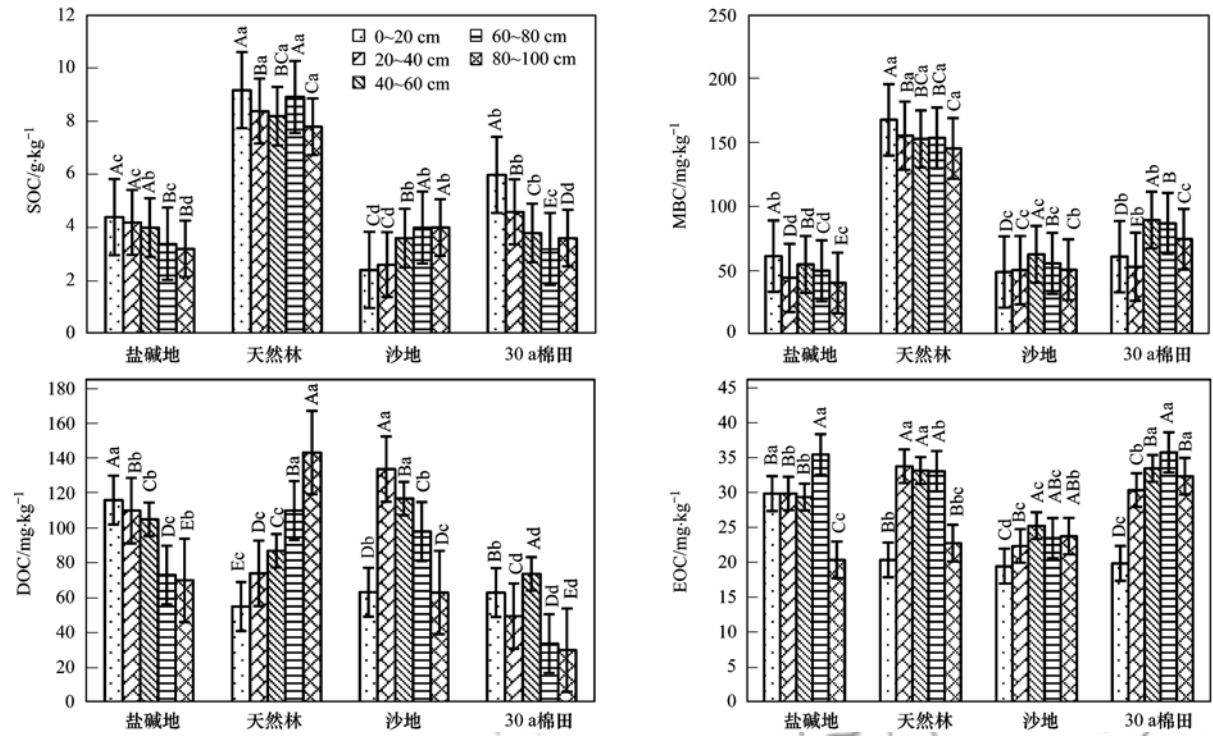
## 2 结果与分析

### 2.1 土壤有机碳各组分在不同土地利用类型的分布特征

图 1 为土壤有机碳各组分在不同土地利用方式下分布特征。其中 SOC 在天然林表现出最高水平,沙地表现出最低水平。在盐碱地、天然林、30 a 棉田 SOC 含量均随深度增加整体呈现下降趋势,沙地呈现上升趋势。MBC 在天然林表现出最高水平,在沙地表现出最低水平。盐碱地、天然林中 MBC 含量随深度增加整体呈现下降趋势,在沙地和 30 a 棉田中变化规律不明显。DOC 含量在 30 a 棉田含量最低,但在不同土层未呈现出明显趋势;在盐碱地中其含量随土层深度增加而降低,天然林中随土层深度增加而增加,且不同土层含量均表现出显著差异 ( $P < 0.05$ )。EOC 最高值出现在 30 a 棉田的 60 ~ 80 cm 层 (35.8 mg·kg<sup>-1</sup>),且在 0 ~ 80 cm 随深度增加而增加;但在 4 种土地利用类型中,EOC 含量未表现出明显规律。

### 2.2 土壤有机碳各组分含量对土地利用变化和土层变化的敏感性分析

表 1 为不同土层各有机碳组分的敏感性分析。由敏感性指数均值可知,不同有机碳组分对土层变化



小写字母：相同土层不同土地利用类型差异性；大写字母：相同土地利用类型不同土层差异性( $P < 0.05$ )

图 1 不同土地利用方式各有机碳组分含量

Fig. 1 Differences in soil organic contents in different land use types

的敏感性排序为：MBC > SOC > DOC > EOC。即 MBC 对土层变化的响应最为明显，宜作为土层变化对有机碳影响的良好指标；EOC 对土层变化的响应最不明显，不宜作为土层变化对有机碳影响的良好指标。

表 2 为不同土地利用方式各有机碳组分的敏感性分析。不同有机碳组分对土地利用变化的敏感性排序为：DOC > EOC > SOC > MBC。可见，DOC 的敏感指标明显大于其他有机碳组分，即 DOC 对土地利用变化的响应大于其他有机碳组分。MBC 对土地利用变化的响应最为滞后，不宜作为土地利用变化对土壤有机碳影响的良好指标。

表 1 不同土层深度土壤有机碳变化敏感性指标

| Table 1 Sensitivity of soil organic carbon in different soil layer layers |      |      |      |      |
|---------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|
| 土层深度/cm                                                                   | SOC  | DOC  | EOC  | MBC  |
| 0~20                                                                      | 1.85 | 0.84 | 0.90 | 1.27 |
| 20~40                                                                     | 1.41 | 1.2  | 0.33 | 1.32 |
| 40~60                                                                     | 1.00 | 0.42 | 0.43 | 1.25 |
| 60~80                                                                     | 1.34 | 2.23 | 0.60 | 1.49 |
| 80~100                                                                    | 1.13 | 1.76 | 0.82 | 1.87 |
| 平均值                                                                       | 1.35 | 1.29 | 0.62 | 1.44 |

2.3 不同土地利用方式土壤有机碳含量与土壤环境因子的相关性分析

2.3.1 不同土地利用方式土壤环境因子

表 3 对不同土地利用方式土壤环境因子进行统

表 2 不同土地利用方式土壤有机碳变化敏感性指标

| Table 2 Sensitivity of soil organic carbon in different land use types |      |      |      |      |
|------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|
| 土地利用方式                                                                 | SOC  | DOC  | EOC  | MBC  |
| 盐碱地                                                                    | 0.38 | 1.60 | 0.74 | 0.52 |
| 天然林                                                                    | 0.18 | 1.61 | 0.66 | 0.07 |
| 沙地                                                                     | 0.67 | 1.12 | 0.24 | 0.29 |
| 30a 棉田                                                                 | 0.88 | 1.46 | 0.79 | 0.69 |
| 平均值                                                                    | 0.52 | 1.45 | 0.61 | 0.39 |

计。其中，BD 在天然林表现最低水平，但在 4 种土地利用方式不同土层中均未表现出明显规律。EC 在盐碱地表现出最高水平，且随深度增加呈现下降趋势，而在沙地中则表现出了相反趋势。由土壤 pH 可得天然林土壤酸度较强，沙地酸度最弱，但均未随土层变化而表现出明显趋势。天然林和 30 a 棉田 SWC 较高，沙地含水量最低。由 TN 含量可得，盐碱地均值最高。

2.3.2 不同土地利用方式土壤有机碳含量和土壤环境因子的 RDA

对不同土地利用方式下土壤各有机碳组分与土壤环境因子进行 RDA，可得出土壤环境因子对土壤有机碳组分的解释(表 4)。土壤有机碳组分在第 I 轴、第 II 轴的解释量分别为 70.9% 和 10.7%，累计解释土壤有机碳组分信息量为 81.6%，对土壤有机

表 3 不同土地利用方式土壤环境因子指标

Table 3 Environmental factors in different land use types

| 土地利用类型  | 土壤深度<br>/cm | 土壤容重(BD)<br>/g·cm <sup>-3</sup> | 电导率(EC)<br>/mS·cm <sup>-1</sup> | pH   | 含水量(SWC)<br>/% | 全氮(TN)<br>/mg·kg <sup>-1</sup> |
|---------|-------------|---------------------------------|---------------------------------|------|----------------|--------------------------------|
| 盐碱地     | 0~20        | 2.03                            | 5.43                            | 8.16 | 27.79          | 123.03                         |
|         | 20~40       | 1.98                            | 6.64                            | 7.92 | 19.70          | 119.77                         |
|         | 40~60       | 2.37                            | 4.74                            | 8.60 | 19.91          | 103.72                         |
|         | 60~80       | 2.26                            | 2.40                            | 9.47 | 19.34          | 108.18                         |
|         | 80~100      | 2.50                            | 2.68                            | 9.35 | 19.21          | 107.25                         |
| 天然林     | 0~20        | 1.89                            | 1.04                            | 9.47 | 29.07          | 35.22                          |
|         | 20~40       | 1.84                            | 0.52                            | 9.51 | 28.99          | 26.85                          |
|         | 40~60       | 1.92                            | 0.30                            | 9.48 | 25.44          | 29.95                          |
|         | 60~80       | 1.84                            | 0.36                            | 9.38 | 25.37          | 5.05                           |
|         | 80~100      | 2.14                            | 0.34                            | 9.42 | 23.80          | 10.70                          |
| 沙地      | 0~20        | 2.26                            | 1.28                            | 8.78 | 9.62           | 17.33                          |
|         | 20~40       | 2.07                            | 1.09                            | 8.74 | 9.61           | 19.06                          |
|         | 40~60       | 2.20                            | 2.30                            | 8.47 | 9.00           | 18.45                          |
|         | 60~80       | 2.00                            | 3.38                            | 9.02 | 9.71           | 12.70                          |
|         | 80~100      | 2.30                            | 3.33                            | 8.96 | 10.99          | 27.80                          |
| 30 a 棉田 | 0~20        | 2.27                            | 4.18                            | 9.88 | 23.83          | 12.22                          |
|         | 20~40       | 2.25                            | 6.28                            | 9.05 | 24.58          | 13.75                          |
|         | 40~60       | 2.26                            | 2.76                            | 8.78 | 26.44          | 16.37                          |
|         | 60~80       | 2.14                            | 3.50                            | 9.01 | 28.44          | 58.23                          |
|         | 80~100      | 1.93                            | 1.21                            | 8.69 | 26.19          | 21.06                          |

表 4 土壤有机碳组分含量的解释变量冗余分析/%

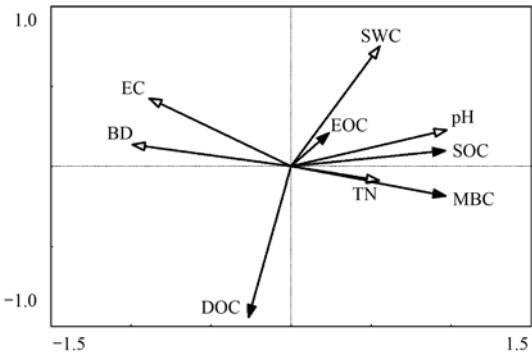
Table 4 Redundancy analysis of the soil organic carbon content/%

| 排序轴                   | 第 I 轴 | 第 II 轴 | 第 III 轴 | 第 IV 轴 |
|-----------------------|-------|--------|---------|--------|
| 有机碳各组分特征解释量           | 70.9  | 10.7   | 0.7     | 0.2    |
| 有机碳各组分特征与土壤环境因子的相关性   | 0.885 | 0.650  | 0.378   | 0.098  |
| 有机碳组分特征累计解释量          | 70.9  | 81.6   | 82.3    | 82.5   |
| 有机碳组分特征-土壤环境因子关系累计解释量 | 77.9  | 98.3   | 99.7    | 100.0  |
| 典范特征值                 | 0.525 |        |         |        |
| 总特征值                  | 1.000 |        |         |        |

碳和土壤环境因子关系的累计解释量为 98.3%。由此可知前两轴能够很好地反映有机碳组分和土壤环境因子的关系,且主要由第 I 轴决定。

图 2 为不同有机碳组分与土壤环境因子的冗余分析二维图, SOC、MBC、EOC、pH、SWC、TN 之间呈现正相关, SOC、MBC、EOC 与 BD 和 EC 为负相关。其中, SOC、MBC 与 TN、pH 的夹角较小, EOC 与 SWC 的夹角较小, 表现出了较强的正相关性。而 DOC 与 SWC 表现出负相关关系, 与其它土壤环境因子均未表现出明显的相关性。

表 5 为理化变量对有机碳含量解释的重要性排序, 其重要性排序为: BD > SWC > EC > TN > pH。BD 和 SWC 对有机碳含量的影响达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), 其中, BD 为负相关, 即对各有机碳组分含量起到限制作用, 而 SWC 的增加可对其起到促进作用。



SOC: 土壤有机碳; MBC: 微生物量碳; DOC: 可溶性有机碳; EOC: 易氧化有机碳; BD: 土壤容重; EC: 电导率; pH: 酸碱度; SWC: 含水量; TN: 全氮

图 2 不同有机碳组分与土壤环境因子的冗余分析二维图

Fig. 2 Bidimensional ordering chart of the redundancy analysis of relationships between stoichiometric characteristics of different soil organic carbon components and physicochemical factors



表 5 理化土壤变量解释的重要性排序  
Table 5 Importance sequencing and Duncan's  
test of physicochemical factors

| 指标          | 重要性<br>排序 | 土壤环境因子<br>所占解释量/% | <i>F</i> | <i>P</i> |
|-------------|-----------|-------------------|----------|----------|
| 土壤容重 (BD)   | 1         | 68                | 105.521  | 0.002    |
| 土壤含水量 (SWC) | 2         | 50                | 90.365   | 0.040    |
| 电导率 (EC)    | 3         | 16                | 7.784    | 0.108    |
| 土壤全氮 (TN)   | 4         | 16                | 7.784    | 0.302    |
| pH          | 5         | 6                 | 3.259    | 0.540    |

3 讨论

3.1 各土壤有机碳组分的分布特征及其敏感性分析

土壤有机碳主要来源于地上凋落物元素归还和地下植物根系代谢。本研究中不同土地利用方式土壤有机碳含量平均值大小依次为：天然林 > 30a 棉田 > 盐碱地 > 沙地，且天然林有机碳含量显著高于其它类型土壤有机碳 ( $P < 0.05$ )，主要是因为天然林每年的枯落物归还量大且分解缓慢，有利于碳的积累<sup>[30]</sup>。另外，胡杨根系发达，有良好的蓄水能力，可将深层水提至表层，进而提高胡杨周边生物多样性，增加因代谢而产生的植物残体量，而这些残体碳含量远高于裸露的棕漠土<sup>[31]</sup>。阿拉尔地区经济棉为大面积种植和管理，棉杆就地焚烧或粉碎，不会造成碳的大量流失<sup>[32]</sup>，因而 30 a 棉田土壤有机碳含量高于盐碱地和沙地。张瑞等<sup>[33]</sup>认为盐碱地盐生植物稀疏，且叶片多为针状或柱状，叶片体积远小于阔叶乔木，不能较好地对土壤碳进行补充。沙地鲜有植物生长，结构不稳定，含水量低，不适微生物的生长，因此其有机碳含量低下。土壤微生物的生长和繁殖需要适宜的土壤湿度和凋落物的腐变，天然林和 30 a 棉田较于盐碱地和沙地更能提供良好的生存场所，因而天然林和 30 a 棉田的 MBC 也高于盐碱地和沙地，这与 Wang 等<sup>[34]</sup>得出的结论一致。DOC 存在于腐殖质的酸性部分，近一半储于胡敏酸中<sup>[17]</sup>，因此其含量仍为天然林高于其它土地利用类型。但 30 a 棉田的 DOC 显著低于其他土地利用类型，可能是因为其作为棉花生长所需的营养物质而被消耗<sup>[35]</sup>。EOC 是指在微生物和土壤酶的作用下易于被分解的有机碳，其含量多少常被用来表示土壤有机碳的稳定性<sup>[36]</sup>，本研究中 30 a 棉田的 EOC 含量最高，沙地含量最低，说明 30 a 棉田有机碳稳定性最低，而沙地的稳定性高。

SOC 在 0 ~ 20 cm 的含量最高，且在 0 ~ 80 cm 内随深度递减，MBC 也表现出相同规律，主要是因为微生物在土壤表层活动强烈，易分解有机质，有利

于有机碳的累积，而土层越深，微生物的活动越贫乏，加之少量的根系和土壤动物残体并不能提供足量的碳，郭洋等<sup>[37]</sup>对于旱区土壤碳垂直剖面分布特征研究也得出了相似结论。Wander 等<sup>[38]</sup>认为 DOC 也主要来自于地表枯落物，因而其含量应与 SOC 含量也表现出相同规律，但本研究并未得出相似规律，而是在 40 ~ 60 cm 层含量达到最高，这可能与研究区干旱缺水，盐碱地与沙地植被稀疏有关。EOC 与 SOC、MBC 随深度变化的规律相同，管光玉等<sup>[39]</sup>认为随土层深度增加，土壤生物活性和土壤质地发生变化，因而对有机碳各组分含量产生影响。

本研究得出 MBC 对土层变化最为敏感，其次为 SOC，EOC 敏感性最弱。表明 MBC 在不同土层含量差异较大，且易受土层变化的影响，可作为土层变化对土壤有机碳影响的良好指标，其主要原因为研究区不同土层土壤营养元素、水分和盐分含量差异较大，不能全部满足微生物生长繁殖所需的生态条件，造成不同土层微生物的含量差异较大<sup>[40]</sup>。DOC 对不同土地利用方式的响应最大，MBC 对其响应最小，主要是因为 DOC 来源单一，较小的碳源改变就可以造成 DOC 大的变化<sup>[41]</sup>。

3.2 不同土地利用方式土壤有机碳含量与土壤环境因子的关系

干旱区土壤水分、盐分含量及盐渍化程度差异较大，其不同的环境因子对不同组分有机碳的分布有一定影响<sup>[7]</sup>。对其进行分析可得土壤容重对碳组分分布的影响最大，其次为 SWC、EC、TN、pH，其中 BD 和 EC 与各组分碳含量呈负相关，SWC、TN、pH 与其呈正相关。有学者认为随土壤深度的增加，BD 随之增加，而更深的土层对外界营养物质有一定的隔离作用，加之干旱区绿洲土壤贫瘠，不能为微生物的生长提供营养物质，且以腐殖质为主要来源的 DOC 含量也随之减少，这与很多研究结果相似<sup>[41]</sup>。在干旱区生态系统中，SWC 一般被认为是影响植被、土壤特性最为关键的环境因子<sup>[42]</sup>，Fang 等<sup>[43]</sup>认为低的 SWC 不利于土壤中有有机质的分解，从而降低有机碳含量，Antisari 等<sup>[44]</sup>却认为高的 SWC 与 MBC 的含量呈负相关关系，本研究得出含水量对有机碳的含量起到促进作用，造成这些差异的原因可能是不同地区土壤质地不同，干旱区土壤水分有限制因子，高的 SWC 可通过微生物的活性调节土壤微环境，有利于活性有机碳的积累和周转<sup>[42]</sup>。EC 与含盐量呈现显著相关关系，因此常被用来表示土壤含盐量的高低<sup>[45]</sup>。本研究中 EC 与 MBC 与 SOC 含

量均呈现负相关关系,说明 EC 对 MBC 与 SOC 有抑制作用,主要是因为高的含盐量使地表植物细胞内部水势低于胞外,造成失水,不利于其进行光合作用,从而减少对碳的固定. 另外,高的含盐量可通过影响微生物抑制土壤呼吸,减少土壤与外界的气体交换<sup>[46]</sup>. 土壤氮元素作为植物和微生物生存的必需营养元素,其含量的高低可直接影响植物根系对元素的吸收,进而对其生理活动产生影响.

本研究用冗余分析法对影响土壤有机碳各组分含量的土壤环境因子进行排序,是对干旱区绿洲研究的有益尝试,但单独分析各土壤环境因子对碳含量的影响尚存在缺陷,碳含量可能受不同土壤环境因子的多重影响,且环境因子之间可能存在相互制约的现象.

#### 4 结论

(1)研究区地处欧亚大陆腹地,属我国极干旱区, SOC、MBC、DOC、EOC 在不同土地利用类型表现出不同分布特征,其最高值分别为  $1.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (天然林 0~20 cm 层)、 $167.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (天然林 0~20 cm 层)、 $143.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (天然林 80~100 cm 层)、 $38.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (盐碱地 60~80 cm 层). SOC 在盐碱地、天然林、30 a 棉田随土层增加呈现下降趋势,在沙地呈现上升趋势; MBC 在天然林随深度增加而降低,在其他土地利用类型无明显趋势; DOC 在盐碱地随土层增加而降低,在天然林呈现相反趋势; EOC 在 30 a 棉田随土层增加呈现上升趋势.

(2)MBC 对土层变化的响应最明显,宜作为土层变化对有机碳影响的良好指标. DOC 对土地利用变化的响应最明显,宜作为土地利用变化对有机碳影响的良好指标.

(3)SOC、MBC、EOC 均与土壤 pH、含水量、全氮之间呈现正相关, SOC、MBC、EOC 与容重和电导率为负相关. 影响土壤有机碳分布特征的环境因子重要性排序为  $\text{BD} > \text{SWC} > \text{EC} > \text{TN} > \text{pH}$ , 其中 BD 与 SWC 对其影响达到显著水平.

#### 参考文献:

- [1] 王岩松, 李梦迪, 朱连奇. 土壤有机碳库及其影响因素的研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, **31**(32): 123-131.  
Wang Y S, Li M D, Zhu L Q. Research process of soil organic carbon storage and its influencing factors [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, **31**(32): 123-131.
- [2] 李娟, 廖洪凯, 龙健, 等. 喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响[J]. 生态学报, 2013, **33**(7): 2147-2156.
- [3] 李小平. 川南三种林地土壤有机碳及其组分研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2014.  
Li X P. Study on soil organic carbon and its fractions about three forest land in southern Sichuan province[D]. Chengdu: Sichuan Agriculture University, 2014.
- [4] 王义祥, 叶菁, 王成己, 等. 不同经营年限对柑橘果园土壤有机碳及其组分的影响[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(10): 1574-1580.  
Wang Y X, Ye J, Wang C J, et al. Effect of different cultivation years on soil organic carbon pools in citrus orchards[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(10): 1574-1580.
- [5] 张帅, 许明祥, 张亚锋, 等. 黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 661-668.  
Zhang S, Xu M X, Zhang Y F, et al. Effects of land use change on soil active organic carbon in deep soils in Hilly Loess Plateau region of northwest China[J]. Environmental Science, 2015, **36**(2): 661-668.
- [6] Zhang J, Wang M Y, Wu S C, et al. Land use affects soil organic carbon of paddy soils: empirical evidence from 6280 years BP to present [J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, **16**(3): 767-776.
- [7] Knox R G, Longo M, Swann A L S, et al. Hydrometeorological effects of historical land-conversion in an ecosystem-atmosphere model of Northern South America [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, **19**: 241-273.
- [8] Crow S E, Reeves M, Schubert O S, et al. Optimization of method to quantify soil organic matter dynamics and carbon sequestration potential in volcanic ash soils [J]. Biogeochemistry, 2015, **123**(1-2): 27-47.
- [9] 杨玉海, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河干流土地利用/覆被变化对土壤有机碳储量的影响[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(9): 2784-2790.  
Yang Y H, Chen Y N, Li W H, et al. Effects of land use/cover change on soil organic carbon storage in the main stream of Tarim River[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(9): 2784-2790.
- [10] 陈志杰, 韩士杰, 张军辉. 土地利用变化对漳江口红树林土壤有机碳组分的影响[J]. 生态学杂志, 2016, **35**(9): 2379-2385.  
Chen Z J, Han S J, Zhang J H. Effects of land use change on soil organic carbon fractions in mangrove wetland of Zhangjiangkou[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, **35**(9): 2379-2385.
- [11] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter[J]. Nature, 2015, **528**(7580): 60-68.
- [12] Franzluebbers A J, Haney R L, Honeycutt C W, et al. Climatic influences on active fractions of soil organic matter [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, **33**(7-8): 1103-1111.
- [13] 臧逸飞. 长期不同轮作施肥土壤微生物学特性研究及生物肥力评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.  
Zang Y F. Effect of long-term rotation and fertilization on soil microbial characters and biological fertility evaluation [D].

- Yangling: Northwest A&F University, 2016.
- [14] Gao J Q, Ouyang H, Lei G C, *et al.* Effects of temperature, soil moisture, soil type and their interactions on soil carbon mineralization in Zoigê alpine wetland, Qinghai-Tibet Plateau. China[J]. Chinese Geographical Science, 2011, **21**(1): 27-35.
- [15] 蒲玉琳, 叶春, 张世熔, 等. 若尔盖沙化草地不同生态恢复模式土壤活性有机碳及碳库管理指数变化[J]. 生态学报, 2017, **37**(2): 367-377.
- Pu Y L, Ye C, Zhang S R, *et al.* Effects of different ecological restoration patterns on labile organic carbon and carbon pool management index of desertification grassland soil in Zoige[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **37**(2): 367-377.
- [16] 刘宇新. 武功山退化山地草甸土壤有机碳及团聚体稳定性研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2015.
- Liu X Y. The study of soil organic carbon and soil aggregate stability meadow of degraded Mountain in Wugong Mountain [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2015.
- [17] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 缙云山不同土地利用方式土壤有机碳组分特征[J]. 生态学报, 2015, **35**(11): 3733-3742.
- Li J L, Jiang C S, Hao Q J. Distribution characteristics of soil organic carbon and its physical fractions under the different land uses in Jinyun Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(11): 3733-3742.
- [18] 杨君珑, 李小伟. 宁夏不同草地类型土壤有机碳组分特征[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(1): 55-61.
- Yang J L, Li X W. The characteristic of soil organic carbon fraction in different grassland types in Ningxia[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(1): 55-61.
- [19] 肖烨, 黄志刚, 武海涛, 等. 三江平原不同湿地类型土壤活性有机碳组分及含量差异[J]. 生态学报, 2015, **35**(23): 7625-7633.
- Xiao Y, Huang Z G, Wu H T, *et al.* Compositions and contents of active organic carbon in different wetland soils in Sanjiang Plain, Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica. 2015, **35**(23): 7625-7633.
- [20] Rittl T F, Novotny E H, Balieiro F C, *et al.* Negative priming of native soil organic carbon mineralization by oilseed biochars of contrasting quality[J]. European Journal of Soil Science, 2015, **66**(4): 714-721.
- [21] 梁尧, 韩晓增, 宋春, 等. 不同有机物料还田对东北黑土活性有机碳的影响[J]. 中国农业科学, 2011, **44**(17): 3565-3574.
- Liang Y, Han X Z, Song C, *et al.* Impacts of returning organic materials on soil labile organic carbon fractions redistribution of mollisol in northeast China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, **44**(17): 3565-3574.
- [22] 吕国红, 周广胜, 周莉, 等. 土壤溶解性有机碳测定方法与应用[J]. 气象与环境学报, 2006, **22**(2): 51-55.
- Lü G H, Zhou G S, Zhou L, *et al.* Methods of soil dissolved organic carbon measurement and their applications[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2006, **22**(2): 51-55.
- [23] 姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子[J]. 生态学报, 2012, **32**(16): 4961-4968.
- Yao X L, Fu B J, Lü Y H. Spatial patterns of soil moisture at transect scale in the Loess Plateau of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(16): 4961-4968.
- [24] 赵振亮, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 新疆典型绿洲土壤电导率和 pH 值的光谱响应特征[J]. 中国沙漠, 2013, **33**(5): 1413-1419.
- Zhao Z L, Tiyp T, Ding J L, *et al.* Characteristics of spectral responding to soil electrical conductivity and pH in the typical oasis of Xinjiang[J]. Journal of Desert Research, 2013, **33**(5): 1413-1419.
- [25] 党亚爱, 李世清, 王国栋, 等. 黄土高原典型土壤全氮和微生物氮剖面分布特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, **13**(6): 1020-1027.
- Dang Y A, Li S Q, Wang G D, *et al.* Distribution characteristics of soil total nitrogen and soil microbial biomass nitrogen for the typical types of soils on the Loess Plateau[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, **13**(6): 1020-1027.
- [26] 吴宏亮. 宁夏中部干旱区砂石覆盖对土壤水热特性及西瓜生长发育的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2013.
- [27] Dabral P P, Baithuri N, Pandey A. Soil erosion assessment in a hilly catchment of north eastern India using USLE, GIS and remote sensing[J]. Water Resources Management, 2008, **22**(12): 1783-1798.
- [28] 高润宏, 董智, 张昊, 等. 额济纳绿洲胡杨林更新及群落生物多样性动态[J]. 生态学报, 2005, **25**(5): 1019-1025.
- Gao R H, Dong Z, Zhang H, *et al.* Study on regeneration process and biodiversity characteristic of *populus euphratica* community in the Ejina Natural Reserve, Inner Mongolia of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, **25**(5): 1019-1025.
- [29] Bremer E, Janzen H H, Johnston A M. Sensitivity of total, light fraction and mineralizable organic matter to management practices in a Lethbridge soil [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1994, **74**(2): 131-138.
- [30] 史康健, 周怀平, 杨振兴, 等. 长期施肥下褐土易氧化有机碳及有机碳库的变化特征[J]. 中国生态农业学报, 2017, **25**(4): 542-552.
- Shi K J, Zhou H P, Yang Z X, *et al.* Characteristics of readily oxidizable organic carbon and soil organic carbon pool under long-term fertilization in cinnamon soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, **25**(4): 542-552.
- [31] 苏里坦, 古力米热·哈那提, 刘迁迁. 塔里木河下游胡杨林根系吸水模型[J]. 干旱区地理, 2017, **40**(1): 102-107.
- Su L T, Hanati G, Liu Q Q. Root water uptake model of *Populus euphratica* in the lower reaches of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2017, **40**(1): 102-107.
- [32] 刘冰, 刘瑞香, 靳凯. 荒漠植物红砂水势与土壤水分的关系研究[J]. 草原与草业, 2016, **28**(2): 57-62.
- Liu B, Liu R X, Jin k. Study on the the relationship between water potential and soil moisture of *Reaumuria soongorica* in desert plants[J]. Grassland and Prataculture, 2016, **28**(2): 57-62.
- [33] 张瑞, 张贵龙, 姬艳艳, 等. 不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 277-282.
- Zhang R, Zhang G L, Ji Y Y, *et al.* Effects of different fertilizer application on soil active organic carbon [J]. Environment Science, 2013, **34**(1): 277-282.
- [34] 王晓龙, 胡锋, 李辉信, 等. 红壤小流域不同土地利用方式对土壤微生物量碳氮的影响[J], 农业环境科学学报, 2006, **25**(1): 143-147.



- Wang X L, Hu F, Li H X, *et al.* Effects of different land used patterns on soil microbial biomass carbon and nitrogen in small red soil water shed[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, **25**(1): 143-147.
- [35] Worrall F, Moody C S. Modeling the rate of turnover of DOC and particulate organic carbon in a UK, peat-hosted stream: including diurnal cycling in short-residence time systems[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, **119**(10): 1934-1946.
- [36] Quan Z, Lu C Y, Shi Y, *et al.* Manure increase the leaching risk of soil extractable organic nitrogen in intensively irrigated greenhouse vegetable cropping systems[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 2015, **65**(3): 199-207.
- [37] 郭洋, 李香兰, 王秀君, 等. 干旱半干旱区农田土壤碳垂直剖面分布特征研究[J]. *土壤学报*, 2016, **53**(6): 1433-1443.
- Guo Y, Li X L, Wang X J, *et al.* Profile distribution of soil inorganic and organic carbon in farmland in arid and semi-arid areas of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, **53**(6): 1433-1443.
- [38] Wander M M, Traina S J, Stinner B R, *et al.* Organic and conventional management effects on biologically active soil organic matter pools[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, **58**(4): 1130-1139.
- [39] 管光玉, 范燕敏, 武红旗, 等. 封育对山地草甸草原土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. *草业科学*, 2014, **31**(9): 1618-1622.
- Guan G Y, Fan Y M, Wu H Q, *et al.* Effects of fencing on soil active organic carbon and carbon pool management index in mountain meadow steppe[J]. *Pratacultural Science*, 2014, **31**(9): 1618-1622.
- [40] 吴静, 陈书涛, 胡正华, 等. 不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1497-1506.
- Wu J, Chen S T, Hu Z H, *et al.* Soil microbial respiration under different soil temperature conditions and its relationship to soil dissolved organic carbon and invertase[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1497-1506.
- [41] 蒲玉琳, 叶春, 张世熔, 等. 若尔盖沙化草地不同生态恢复模式土壤活性有机碳及碳库管理指数变化[J]. *生态学报*, 2017, **37**(2): 367-377.
- Pu Y L, Ye C, Zhang S R, *et al.* Effects of different ecological restoration patterns on labile organic carbon and carbon pool management index of desertification grassland soil in zoige[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(2): 367-377.
- [42] 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]. *Environment Science*, 2016, **37**(4): 1516-1522.
- [43] Fang X M, Wang Q L, Zhou W M, *et al.* Land use effects on soil organic carbon, microbial biomass and microbial activity in Changbai Mountains of Northeast China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2014, **24**(3): 297-306.
- [44] Antisari L V, Laudicina V A, Gatti A, *et al.* Soil microbial biomass carbon and fatty acid composition of earthworm *Lumbricus rubellus* after exposure to engineered nanoparticles[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, **51**(2): 261-269.
- [45] Peng J, Wang J Q, Xiang H Y, *et al.* Comparative study on hyperspectral inversion accuracy of soil salt content and electrical conductivity[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, **34**(2): 510-514.
- [46] Thevs N, Zerbe S, Gahlert F, *et al.* Productivity of reed (*Phragmites australis* Trin. ex Steud.) in continental-arid NW China in relation to soil, groundwater, and land-use[J]. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 2007, **81**(1): 62-68.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                  |                                                                |        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------|
| Spatial-Temporal Change Evolution of PM <sub>2.5</sub> in Typical Regions of China in Recent 20 Years                                                                            | LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i>                | (3003) |
| Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM <sub>2.5</sub> Particulate in Xi'an City                                                                                     | WEI Guo-ru, SHI Xing-min                                       | (3014) |
| Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province                                                                         | JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le                                  | (3022) |
| Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM <sub>2.5</sub> During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing                                              | XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i>                   | (3033) |
| Comparison of Chemical Components Characteristics of PM <sub>2.5</sub> Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an                                                | LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i>     | (3042) |
| Characteristics and Sources of Carbon Components in PM <sub>2.5</sub> During Autumn and Winter in Panjin City                                                                    | ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i>                 | (3051) |
| Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing                                                                                   | HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun                             | (3057) |
| Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer                                                       | LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i>               | (3067) |
| Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China                                                                             | YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i>           | (3075) |
| Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO <sub>2</sub> Concentration in Hangzhou                                                                                   | PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i>         | (3082) |
| Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources                                                                      | JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i>        | (3090) |
| Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City                               | HU Xu-rui, HU Xiao-yu, WANG Can                                | (3096) |
| Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production                                                                        | GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i>               | (3102) |
| Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles                                                                                                      | HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun                               | (3110) |
| Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing                                                                                      | TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i> | (3118) |
| Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China                                                             | SHI Dong-qi, LU Xin-wei                                        | (3126) |
| pCO <sub>2</sub> in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors                                                                                    | LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue                              | (3134) |
| Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River                                                                        | KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i>                 | (3142) |
| Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems                                                                                                                 | LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i>           | (3150) |
| Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai                                      | YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i>             | (3158) |
| Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake                                                                      | LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i>           | (3168) |
| Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface                                                                                              | WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i>         | (3179) |
| Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland                                                       | XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i>           | (3187) |
| Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone                                                                       | ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i>        | (3194) |
| Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate                                                                        | LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i>             | (3203) |
| Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets                                                                                  | KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i>                   | (3212) |
| Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter                                                                  | CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i>          | (3222) |
| Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing                                                         | ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i>            | (3230) |
| Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell                                               | LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i>           | (3240) |
| COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations                                                                       | LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>            | (3247) |
| Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor                                                                  | ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i>              | (3254) |
| Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor                                          | FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i>          | (3262) |
| Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration                                                                                 | GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i>                | (3271) |
| Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing                                                                                      | HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i>                  | (3279) |
| Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion                                  | SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang                         | (3286) |
| Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process                          | ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i>            | (3297) |
| Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge                                                                                     | SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping                           | (3306) |
| Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97                                         | CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i>                    | (3314) |
| Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil                        | ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i>             | (3321) |
| Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site                                                                                                           | CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i>                 | (3329) |
| Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam                                                 | WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i>           | (3339) |
| Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi                                                                    | GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i>             | (3349) |
| Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City                                                                                                 | YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i>           | (3358) |
| Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain                                                                                   | LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i>            | (3365) |
| Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin | ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i>            | (3373) |
| Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin                              | AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i>               | (3382) |
| Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil                                                                                   | TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i>     | (3391) |
| Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings                                                                                                        | ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i>                 | (3400) |
| Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland                                 | HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i>         | (3409) |
| Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China                                                                                | ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i>                 | (3418) |
| Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors                                                | CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i>                 | (3426) |
| Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces                                                                                                          | SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian                         | (3434) |
| Effect of COD/SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues                                                                        | QIANG Hong, LI Yu-you, PEI Meng-fu                             | (3443) |
| Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application                                                                                              | HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i>           | (3452) |
| Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure                       | PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i>           | (3460) |