

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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 ₂ 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 ₂ 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 ₄ ²⁻ 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 ₃ 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^{1,2}, 贡璐^{1,2*}, 安申群^{1,2}, 李杨梅^{1,2}, 陈新^{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: 农田土壤碳库是土壤碳库的重要组成部分, 易受人类活动调节且固碳减排潜力巨大, 研究土壤有机碳、无机碳含量特征及其与环境因子的关系有助于深入理解土壤生态过程, 为全球碳收支平衡研究提供理论支持. 本文以塔里木盆地北缘绿洲为靶区, 分析土壤碳库特征, 结合冗余分析、通径分析, 探究土壤有机碳、无机碳含量及其与环境因子的相关关系. 结果表明: ①同一土层不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量存在显著差异 ($P < 0.05$), 随连作年限增加, 有机碳含量呈先增加后减少趋势, 而无机碳含量呈先减少后增加趋势; 同一连作年限棉田不同土层土壤有机碳、无机碳含量存在显著差异 ($P < 0.05$), 有机碳含量均在 0~20 cm 层达到最大值, 而无机碳含量均在 20~50 cm 层达到最大值. ②通过冗余分析得出环境因子对土壤碳库特征影响的重要性排序为: 磷酸酶活性 > pH 值 > 蔗糖酶活性 > 过氧化氢酶活性 > 全氮 > 速效磷 > 速效钾 > 土壤含水量 > 脲酶活性 > 电导率; 磷酸酶活性、pH 值、蔗糖酶活性、过氧化氢酶活性、全氮、速效磷、速效钾与土壤有机碳、无机碳含量呈极显著相关关系 ($P < 0.01$); 土壤含水量、脲酶活性与土壤有机碳、无机碳含量表现为显著相关 ($P < 0.05$). ③通径分析表明, 速效钾对有机碳含量直接作用显著, 是影响有机碳含量的主要因素, 而脲酶活性对无机碳含量直接作用显著, 是影响无机碳含量的主要因素. 干旱半干旱区土壤有机碳、无机碳含量研究是评价农田生态系统土壤碳的“源/汇”效应的基础数据, 对研究全球碳收支平衡和陆地碳循环机制具有重要意义.

关键词: 土壤碳含量; 连作棉田; 冗余分析; 通径分析; 塔里木盆地北缘

中图分类号: X144; X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3373-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201711099

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^{1,2}, GONG Lu^{1,2*}, AN Shen-qun^{1,2}, LI Yang-mei^{1,2}, CHEN Xin^{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: Studying the characteristics of soil organic carbon (SOC) and soil inorganic carbon (SIC), and their relationship with environmental factors is helpful for understanding soil ecological processes, and providing theoretical support for research on the global carbon budget. Based on the oasis in the northern margin of Tarim Basin, this study analyzed the characteristics of the soil carbon pool, and, combined with redundancy and path analyses, explored the relationship between SOC and SIC, and their environmental factors. The results showed that there was a significant difference ($P < 0.05$) in SOC and SIC contents in cotton fields with different continuous cropping years ($P < 0.05$). With an increase in continuous cropping years, the SOC content increased firstly and then decreased, while the SIC content decreased firstly and then increased ($P < 0.05$). The SOC content was the highest in the 0-20 cm layer, while the SIC content was the highest in the 20-50 cm layer. The importance of environmental factors on the characteristics of the soil carbon pool was deduced by redundancy analysis. The order of importance was phosphatase activity > pH > sucrase activity > catalase activity > total N > available P > available K > soil moisture content > urease activity > electrical conductivity (EC); phosphatase activity, pH value, invertase activity, catalase activity, total nitrogen, available phosphorus, and available potassium showed significant correlation with SOC and SIC ($P < 0.01$). Soil moisture and urease activity showed significant correlation with SOC and SIC ($P < 0.05$). The path analysis showed that available P had a direct effect on the SOC content; it was the main factor affecting it. The urease activity had a direct effect on SIC; it was the main factor affecting it. This study of soil carbon pools in arid and semiarid regions is the basis for evaluating the “source/sink” effect of soil carbon in farmland ecosystems, and is of great significance for studying the global carbon budget and land carbon cycle mechanism.

Key words: soil carbon content; continuous cropping years; redundancy analysis; path analysis; Northern Tarim Basin

收稿日期: 2017-11-11; 修订日期: 2017-12-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41461105)

作者简介: 赵晶晶(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为干旱区资源与环境, E-mail: 297289080@qq.com

* 通信作者, E-mail: gonglu721@163.com

土壤碳库是地球表层系统中最大且周转速度最慢的碳库,包括有机碳库和无机碳库^[1]. 而农田土壤碳库是土壤碳库中最为活跃的部分,且是唯一在较短时间尺度上受人类活动调节和干扰的碳库^[2]. 农业生产向人类提供了一个减少大气碳排放的潜在机制,对温室气体的减排具有重要作用,农田土壤碳库已成为应对全球气候变化研究的热点领域^[3]. 在人类活动及各环境因子间的交互作用下,土壤性质发生变化,进而影响农田土壤碳库的迁移与转化^[4,5]. 因此,研究不同连作年限土壤碳库在环境因子的影响下呈现何种分异规律具有重要意义.

目前,国内外学者对农田土壤碳库特征及其影响因素进行了深入研究,取得一定成果. 研究多集中于湿润、半湿润地区森林、草地、湿地、农田等不同生态系统土壤有机碳库特征^[6,7],对干旱、半干旱地区土壤碳库尤其是绿洲农田生态系统土壤碳库关注较少. 研究多从不同土地利用方式、不同土壤类型等角度分析了土壤有机碳库特征及其与理化因子的关系,但较少涉及不同连作年限土壤有机碳、无机碳含量及其与环境因子的关系.

干旱生态系统占陆地生态系统总面积的 47%,是全球“碳失汇”的 1/3^[8]. 塔里木盆地北缘绿洲属极端干旱区,植被覆盖率低,生物链简单,是典型的生态环境脆弱带^[9,10]. 大规模人类开发利用使区域水土资源的时空分布发生变化,耕作、灌溉、施肥等农业活动使原始荒漠土壤逐步演变为绿洲耕作土壤,绿洲面积增大,绿洲土壤碳库发生变化^[11~15]. 以棉花为主的单一种植结构加之原本脆弱的生境加大了土壤系统的负荷. 因此,在小尺度范围内研究土壤碳库与环境因子的互动关系,对揭示干旱区碳库平衡转化机制、调控区域碳平衡具有重要意义. 本研究以塔里木盆地北缘绿洲阿拉尔垦区为靶区,探讨不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量特征及其与环境因子的相关关系,以期全面了解塔里木河上游绿洲农田土壤固碳潜力,提升小尺度内的碳汇功能提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

阿拉尔垦区位于新疆天山中段南麓(40°22′~41°57′N, 80°15′~81°38′E). 东西宽约 281 km,南北长约 180 km,地势由西北向东南倾斜. 平均海拔 1 000 m,属暖温带干旱荒漠气候,年平均气温 12.4℃,年平均日照时数 2 729 h. 年平均降水量

40.1 ~ 82.5 mm,年平均蒸发量为 1 876.6 ~ 2 558.9 mm,雨量少,蒸发强. 土壤母质以棕漠土为主,是重要的棉花生产基地.

1.2 野外采样

野外土样采集于 2015 年 7 月进行,采样点集中于阿拉尔垦区农一师十二团,采样前研究区 20 d 内无降水,农田 12 d 内无灌溉. 棉花品种均为“新陆早 38 号”,灌溉(滴灌)、施肥由当地兵团统筹管理,棉花秸秆粉碎还田. 样区的耕作方式为传统耕作,栽培模式均为一膜六行,行间距均为(12 + 66 + 12 + 66 + 12) cm,理论株数为 22.5 万株·hm⁻². 在样区内选择海拔高度相同、地理位置相近、土壤性质一致的 5 种主要土壤类型,共采集 5 种类型的土壤样品,即 0 年(0 a)棉田(荒草地)、5 年(5 a)棉田、10 年(10 a)棉田、20 年(20 a)棉田和 30 年(30 a)棉田. 不同连作棉田土壤样品以空间代替时间序列法采集,每种连作年限棉田分别选取 5 个典型样方,各样方按 S 型布设 5 个样点后采集表土层(0 ~ 20 cm)、心土层(20 ~ 50 cm)、底土层(50 ~ 80 cm)土样,去除植物根系和石块后,将每层土样充分混匀并用四分法取 500 g. 野外采集的 75 份土样带回实验室后立即进行风干,待土样完全干燥后将土壤过孔径 1 mm 筛(分析测量时依测定指标过不同规格的筛),放入密封袋中保存.

1.3 实验室分析

有机碳含量测定采用重铬酸钾稀释热法^[16],具体方法:称取 0.5 g 土壤样品于 500 mL 的三角瓶中,加入 1 mol·L⁻¹ (1/6 K₂Cr₂O₇) 溶液 10 mL 于土壤样品中,转动瓶子使之混合均匀,加浓 H₂SO₄ 20 mL,将三角瓶缓缓转动 1 min,促使混合以保证试剂与土壤充分作用,并在石棉板上放置约 30 min,加水稀释至 250 mL,加 3 ~ 4 滴邻啡罗啉指示剂,用 0.5 mol·L⁻¹ FeSO₄ 标准溶液滴定至近终点时溶液颜色由绿变成暗绿色,逐渐加入 FeSO₄ 直至生成砖红色为止.

无机碳含量测定采用快速滴定法^[16],具体方法:称取 5 g 土壤样品于 100 mL 高型烧杯中,加入 20 mL 盐酸标准溶液,用玻璃棒搅拌驱除产生的 CO₂,冷却后转入 100 mL 容量瓶中,用冷水冲洗土样及烧杯 5 ~ 6 次,加水定容摇匀. 吸取 50 mL 清液于 150 mL 三角瓶中,加两滴酚酞指示剂,用氢氧化钠标准溶液滴定至近终点颜色为明显的红色.

土壤理化因子包括全氮、速效磷、速效钾、土壤含水量、pH 值、电导率. 实验方法^[16]为:全氮采

用半微量凯氏法;速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;速效钾采用醋酸铵浸提-火焰光度计法;土壤含水量采用烘干法;pH 值采用电位法;电导率采用电导法。

土壤酶因子包括过氧化氢酶活性、磷酸酶活性、蔗糖酶活性、脲酶活性。实验方法为^[37]:高锰酸钾滴定法、磷酸苯二钠比色法、3,5-二硝基水杨酸比色法、苯酚钠-次氯酸钠比色法。

1.4 数据处理与统计方法

利用 SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析,采用单因素方差分析和多重比较(LSD),分析不同连作年限土壤有机碳、无机碳含量差异(显著性水平为 $P=0.05$);运用冗余分析(Canoco 4.5),研究土壤有机碳、无机碳含量与影响因子之间的相关性;运用通径分析(SPSS 19.0)了解主要影响因子对于土壤有机碳、无机碳含量的通径影响,有助于深入理解土壤碳库与环境因子间的相互关系。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳、无机碳含量特征及差异性分析

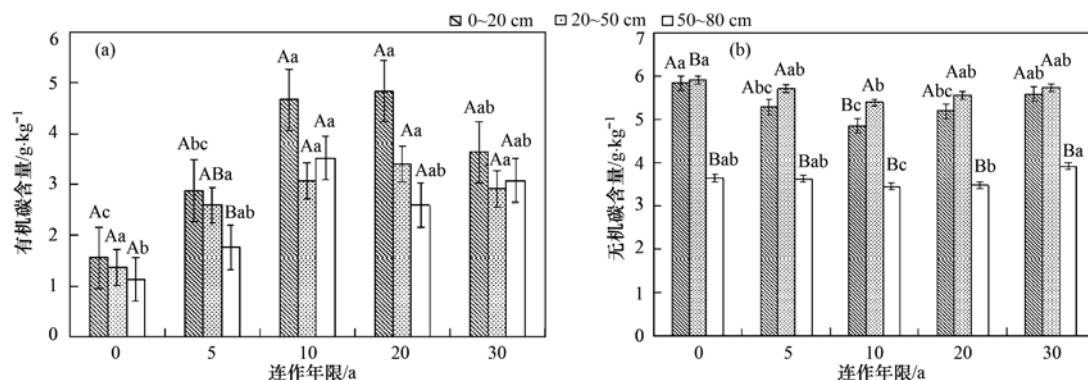
阿拉尔垦区 5 种不同连作年限土壤有机碳、无机碳含量分布特征如图 1 所示。绿洲农田土壤有机碳各年限各土层在 0~20 cm 土层均最高,分别为 1.56、2.87、4.67、4.83、3.63 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;连作 10 a、30 a 棉田在 50~80 cm 土层有机碳含量略高于 20~50 cm;其余连作年限土壤有机碳含量随土层深度递减。无机碳含量各连作年限各土层无明显差异,均为先增加后降低。可见,不同连作年限的土壤有机碳、无机碳含量在各土层的分布格局不同。

土壤有机碳、无机碳含量在同一土层各连作年限间的分布也有一定差异性。0~20 cm 土层与

~50 cm 有机碳随连作年限增加,先增加后降低,均为 20 a 最高,达 4.83 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 与 3.39 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于其他连作年限;50~80 cm 有机碳含量在 10 a 达最大值 3.58 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。而无机碳则是先逐渐降低后逐渐升高,其含量顺序为 10 a 年限<20 a 年限<5 a 年限<0 a 年限<30 a 年限。

2.2 环境因子特征及差异性分析

不同连作年限棉田土壤碳库与环境因子呈现一定的变化规律(0 a 为荒草地在此仅作参考不作具体分析)。0~20 cm 土层在连作 5~20 a,速效钾、速效磷、磷酸酶活性、蔗糖酶活性、脲酶活性先逐渐增大,后逐渐降低;不同年限连作棉田土壤含水量存在显著性差异,其中 30 a 土壤含水量最高,显著高于 5 a,其他各年限间土壤含水量无显著性差异;全氮、pH 值、电导率在各年限间不存在显著性差异;磷酸酶活性、蔗糖酶活性、脲酶活性表现为增大后降低;过氧化氢酶在各连作年限无显著差异。20~50 cm 土层中,各土壤理化因子在不同连作年限间变化较小,全氮、土壤含水量、电导率均在 5、10、20、30 a 中无显著性变化;速效钾、速效磷含量随年限变化呈先升高后降低;而 pH 值随着棉田连作年限的增加却表现为先降低后增加的趋势;土壤酶因子表现为过氧化氢酶活性、磷酸酶活性、脲酶活性无显著性差异,5 a 与 10 a 蔗糖酶活性存在显著差异。50~80 cm 土层中,20 a 中速效钾含量达最大值 238.27 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,于 30 a 达最小值;磷酸酶活性在 5 a 中最低,10 a 最高。速效磷含量在各年限中的分布先增加后减少;该土层的全氮与土壤含水量、过氧化氢酶活性、脲酶活性在不同连作年限中均保持稳定水平;pH 值与电导率值的最高值均出现在 5 a 中(表 1)。



小写字母为土壤有机碳、无机碳含量在同一土层不同连作年限间多重比较;

大写字母为有机碳、无机碳含量在同一连作年限不同土层间多重比较

图 1 土壤有机碳、无机碳含量分布特征

Fig. 1 Characteristics of soil organic carbon and soil inorganic carbon distribution

不同连作年限土壤环境因子在不同土层深度也呈现出相应的变化规律. 速效钾、土壤含水量、电导率、过氧化氢酶活性在各模式 3 层土中均无显著差异性; 速效磷含量在 5 a、10 a 表现为: 20 ~ 50 cm > 0 ~ 20 cm > 50 ~ 80 cm, 20 a 中表现为随土层深度增加呈递减趋势, 30 a 各土层速效磷含量差异不显著; 全氮含量仅在 30 a 限棉田的 0 ~ 20 cm、50 ~ 80 cm 土层呈现出显著差异性; 20 a 的 pH 值在

50 ~ 80 cm 土层显著高于 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 50 cm, 其他连作年限各土层的 pH 值无显著差异性; 磷酸酶活性在 5 a 和 20 a 土层 0 ~ 20 cm 和 50 ~ 80 cm 差异显著, 10 a 各土层差异显著, 30 a 无显著差异; 蔗糖酶活性 0 a 和 5 a 在 0 ~ 20 cm、50 ~ 80 cm 差异显著, 其他年限无显著差异; 脲酶活性在 0 a 和 5 a 各土层差异显著, 10 a 各土层差异显著, 20 a 与 30 a 差异不显著(表 1).

表 1 环境因子特征分析¹⁾

Table 1 Characteristic analysis of environmental factors

环境因子	土层深度/cm	连作年限/a				
		0	5	10	20	30
速效钾/mg·kg ⁻¹	0 ~ 20	138.34Ab	171.31Aab	214.29Aa	226.32Aa	139.48Ab
	20 ~ 50	142.08Ab	161.95Aab	221.42Aa	225.24Aa	137.24Ab
	50 ~ 80	140.38Abc	174.86Aabc	214.70Aab	238.27Aa	127.24Ac
速效磷/mg·kg ⁻¹	0 ~ 20	4.72Ab	15.95Aab	21.76ABab	33.49Aa	23.78Aab
	20 ~ 50	4.30Ab	16.61Aab	26.83Aa	21.79ABa	19.72Aa
	50 ~ 80	4.18Ab	3.46Bb	12.17Bab	8.53Bb	20.35Aa
全氮/g·kg ⁻¹	0 ~ 20	2.79Aa	0.65Ab	0.54Ab	0.77Ab	0.84Ab
	20 ~ 50	2.52Aa	0.84Ab	0.79Ab	0.72Ab	0.51ABb
	50 ~ 80	2.41Aa	0.54Ab	0.61Ab	0.69Ab	0.38Bb
土壤含水量/%	0 ~ 20	7.80Ac	18.38Ab	23.93Aab	20.65Ab	28.60Aa
	20 ~ 50	10.88Ab	19.16Aab	23.76Aa	18.99Aab	21.96Aa
	50 ~ 80	10.80Aab	26.81Aa	24.38Aab	18.72Aab	23.89Aab
pH 值	0 ~ 20	8.56Aa	8.23Ab	8.18Abc	8.07Bc	8.23Ac
	20 ~ 50	8.59Aa	8.32Ab	8.15Abc	8.05Bc	8.13Abc
	50 ~ 80	8.61Aa	8.40Aab	8.15Ab	8.23Ab	8.16Ab
电导率/mS·cm ⁻¹	0 ~ 20	1 200Aa	1 287Aa	859.20Aa	1 045.80Aa	1 199Aa
	20 ~ 50	1 206.00Aa	909.40Aa	804.80Aa	769.00Aa	879.24Aa
	50 ~ 80	1 091.60Aab	1 589.20Aa	848.80Aab	613.30Ab	1 090.59Aab
过氧化氢酶活性/mL·g ⁻¹	0 ~ 20	4.81Ac	20.90Ab	25.41Aa	22.51Aab	22.56Aab
	20 ~ 50	4.54Ab	18.56Aa	23.16Aa	20.01Aa	21.74Aa
	50 ~ 80	4.28Ab	19.55Aa	21.66Aa	22.34Aa	22.11Aa
磷酸酶活性/mL·g ⁻¹	0 ~ 20	0.10Ab	0.10Ab	0.47Aba	0.52Aa	0.10Ab
	20 ~ 50	0.09Ac	0.32ABb	0.49Aa	0.45ABab	0.40Aab
	50 ~ 80	0.09Ab	0.27Ba	0.35Ba	0.35Ba	0.41Aa
蔗糖酶活性/mL·g ⁻¹	0 ~ 20	0.67Ac	13.75Aabc	31.92Aab	45.91Aa	0.57Ac
	20 ~ 50	0.61ABc	6.26ABbc	36.22Aa	24.68Aab	17.31Aabc
	50 ~ 80	0.59Bb	4.54Bab	18.17Aa	15.84Aa	14.36Aab
脲酶活性/mL·g ⁻¹	0 ~ 20	0.15Abc	0.17Aab	0.15Abc	0.22Aa	0.15Abc
	20 ~ 50	0.14Ba	0.14Aa	0.20Ba	0.18Aa	0.23Aa
	50 ~ 80	0.14Bab	0.04Bab	0.09Aab	0.12Aab	0.20Aa

1) 小写字母为环境因子在同一土层不同连作年限间多重比较; 大写字母为环境因子在同一连作年限不同土层间多重比较

2.3 土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的关系

2.3.1 土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的冗余分析

对 10 种土壤环境因子进行 RDA 后, 可得出其对土壤碳库特征的解释量. 棉田碳库特征在第 I 轴、第 II 轴的解释量分别 75.0% 和 89.2%, 累计解

释棉田碳库特征信息量为 84.1%, 对棉田土壤碳库与环境因子关系的累计解释量已高达 100%, 由此可知前两轴能够很好地反映土壤碳库和环境因子的关系, 且主要是由第 II 轴决定.

图 2 为棉田土壤碳库和土壤影响因子二维排序. 在排序图中, 棉田碳库特征用实线实心箭头表

示,理化因子、酶因子用实线空心箭头表示;箭头的长短表示解释量的大小,箭头连线越长解释量越大,反之,则越小;箭头与排序轴的夹角表示相关性的大小,夹角越小,相关性越大.从图2中可以看出,在所有的影响因子中土壤含水量、过氧化氢酶活性、磷酸酶活性、蔗糖酶活性箭头连线最长,可知其对棉田土壤碳库特征变异起到很好的解释.有机碳含量与速效钾、速效磷、土壤含水量、过氧化氢酶活性、磷酸酶活性、蔗糖酶活性显著相关.而无机碳含量与速效磷、脲酶活性相关性最大.

经冗余分析得土壤环境因子影响程度大小排序(表2),其重要性排序依次为:磷酸酶活性>pH值>蔗糖酶活性>过氧化氢酶活性>全氮>速效磷>速效钾>土壤含水量>脲酶活性>电导率.其中,

磷酸酶活性、pH值、蔗糖酶活性、过氧化氢酶活性、全氮、速效磷、速效钾对土壤碳库的影响极显著($P < 0.01$).解释量分别为:67.6%、66.5%、61.0%、51.7%、48.4%、44.3%、35.8%,说明磷酸酶活性、pH值、蔗糖酶活性、过氧化氢酶活性、全氮、速效磷、速效钾是影响绿洲农田土壤碳库的主要影响因子.

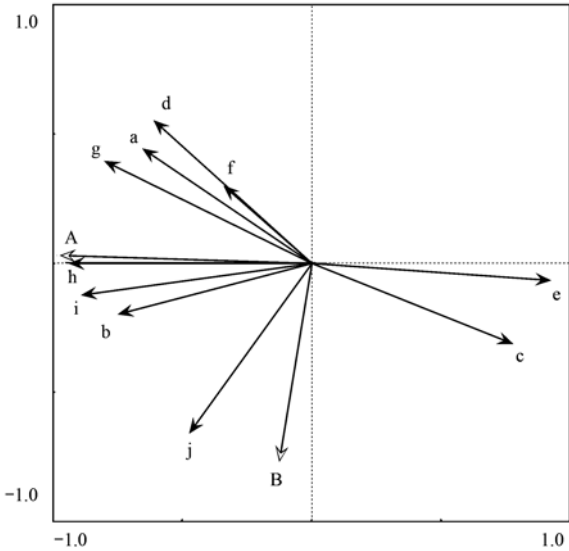
表2 环境因子解释的重要性和显著性检验结果

Table 2 Importance sequencing and Duncan's test of environmental factors				
指标	重要性排序	环境因子解释量	<i>F</i>	<i>P</i>
磷酸酶活性	1	0.676	27.066	0.002
pH值	2	0.665	26.853	0.002
蔗糖酶活性	3	0.610	20.853	0.002
过氧化氢酶活性	4	0.517	13.913	0.002
全氮	5	0.484	12.203	0.002
速效磷	6	0.443	10.332	0.002
速效钾	7	0.358	7.247	0.002
土壤含水量	8	0.325	6.252	0.18
脲酶活性	9	0.258	4.522	0.040
电导率	10	0.105	1.526	0.236

2.3.2 土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的通径分析

阿拉尔垦区有机碳含量受到多种因素的共同影响,因此采用通径分析综合研究各要素对土壤有机碳、无机碳含量的影响.直接通径系数反映各主要土壤理化因子,土壤酶活性直接影响土壤有机碳、无机碳含量作用的大小,而间接通径系数反映某一因子通过作用于其他因子对土壤有机碳、无机碳含量产生的间接影响程度^[17].

如表3所示,经冗余分析可知速效钾、速效磷、土壤含水量、过氧化氢酶活性、磷酸酶活性、蔗糖酶活性这6个环境因子显著影响有机碳含量特征.速效钾、速效磷、过氧化氢酶活性、磷酸酶活性、蔗糖酶活性为正相关,土壤含水量为负相关.速效钾对有机碳含量具有较大的直接正效应(1.15),是



A. 有机碳; B. 无机碳; a. 速效钾; b. 速效磷; c. 全氮; d. 土壤含水量; e. pH; f. 电导率; g. 过氧化氢酶活性; h. 磷酸酶活性; i. 蔗糖酶活性; j. 脲酶活性

图2 土壤有机碳、无机碳含量-环境因子相关性的RDA二维排序

Fig. 2 Two dimensional ordination diagram of redundancy analysis of soil organic carbon and soil inorganic carbon with environmental factors

表3 有机碳含量与环境因子的通径分析

Table 3 Path analysis of soil organic carbon and environmental factors									
环境因子	相关系数	直接通径系数	间接通径系数						总计
			速效钾	速效磷	土壤含水量	过氧化氢酶活性	磷酸酶活性	蔗糖酶活性	
速效钾	2.10	1.15	—	0.07	-0.16	0.06	0.31	0.67	0.95
速效磷	1.77	0.54	0.15	—	-0.20	0.06	0.48	0.89	1.23
土壤含水量	1.48	-0.38	0.49	0.29	—	0.08	0.41	0.59	1.86
过氧化氢酶活性	2.02	0.06	0.72	0.32	-0.32	—	0.50	0.74	1.96
磷酸酶活性	2.21	0.31	0.61	0.45	-0.27	0.08	—	1.03	1.90
蔗糖酶活性	2.00	0.67	0.64	0.31	-0.18	0.06	0.50	—	1.33

影响有机碳含量的重要因素.

经冗余分析可知,土壤无机碳含量与速效磷和脲酶活性两个因子显著相关. 速效磷与无机碳为负相关关系,直接通径系数为 -0.29 ,而脲酶活性与无

机碳为正相关关系,且其相关性远远大于速效磷(表4). 速效磷通过脲酶活性间接影响无机碳含量为正向影响而其直接影响为负向,脲酶活性其直接影响和通过速效磷间接影响均为正向.

表4 无机碳含量与环境因子的通径分析

Table 4 Path analysis of soil inorganic carbon and environmental factors

环境因子	相关系数	直接通径系数	间接通径系数		
			速效磷	脲酶活性	总计
速效磷	1.05	-0.29	—	1.34	1.34
脲酶活性	1.70	1.91	-0.21	—	-0.21

3 讨论

3.1 不同连作年限对土壤有机碳、无机碳含量的影响

在本研究中,不同连作年限是阿拉尔垦区土壤有机碳含量变化的一个主要的影响因素. 0 a、5 a 连作年限与 10、20、30 a 连作年限有机碳含量存在很大的差异($P < 0.05$ 水平),随着连作年限的增加有机碳含量逐渐增加达到峰值后降低. 这是由于土壤有机碳含量主要由植被的年归还量与分解速率所决定^[18],耕作初期凋落物残体分解为土壤补充了有机质,但作物在生长过程中吸收大量土壤中的养分,致使返还到土壤中的养分受到连作年限的影响减少^[19]. 同时不同年限的棉田土壤容重、凋落物总量及分解程度有一定的差异,导致同一区域不同年限土壤有机碳含量存在差异. 在土壤垂直剖面,表层有机碳含量最高,这可能是因表层土壤容重小,土壤结构性、通气性好,腐殖质较厚,微生物丰富度较高,有利于有机碳的积累,而地表以下有机碳含量处于相对稳定状态,这与文献[20,21]的研究相同.

土壤无机碳主要指存在于干旱、半干旱土壤中的碳酸盐,其含量的高低与母质的岩性有关^[22],不同的连作年限导致土壤无机碳的淋溶和淀积过程不同. 本研究中 0 a 年限(荒草地)无机碳含量最高,荒草地主要由风成沙性母质的土壤发育而来,该土壤母质在成土过程中存在明显的碳酸钙积累现象,这是由于土壤中富含 Ca^{2+} ,形成大量碳酸盐^[23~25],因此荒草地无机碳含量高于其他连作年限. 随着连作年限的延长,土壤无机碳含量在 3 个土层均为先降低后逐渐增加. 无机碳在土壤垂直剖面上的分布也具有一定的规律性. 所有连作年限土壤无机碳含量均表现为 20 ~ 50 cm 土层土壤无机碳含量最高,这与郭洋等人于干旱区研究土壤无机碳含量随着土层深度逐渐增加结果不同^[26]. 这是由于当土壤有

机碳分解转化为无机碳时,形成的次生碳酸盐将会迁移到较深的土层,因此其钙积层较深. 但土壤由于受到水分等条件的限制,阿拉尔垦区钙积层主要集中在 20 ~ 50 cm 土层^[27].

3.2 环境因子对土壤有机碳、无机碳含量的影响

土壤理化特性在局部范围内影响土壤有机碳、无机碳的含量. 土壤理化因子通过影响土壤结构与植被间接影响土壤碳库特征,而土壤有机碳、无机碳含量能够直接影响土壤养分供应能力^[28]. 阿拉尔垦区土壤碳库特征呈现无机碳含量高、有机碳含量低的特征,但由于地形特征与人为活动的影响,土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化因子间存在一定相互作用和影响机制. 本研究发现, pH 值是土壤碳库最重要的影响因子,对土壤有机碳含量影响最大的是土壤养分和土壤含水量,而速效磷则对无机碳含量为显著负效应,但负效应较小. 样区干旱缺水,盐渍化程度高,土壤整体偏弱碱性, pH 值在 8.05 ~ 8.61 之间. 土壤的 pH 值通过影响土壤养分有效性、土壤微生物活性、数量以及植物的生长发育进而间接影响土壤碳库^[29]. 有机碳在土壤中的蓄积受到土壤养分的显著影响,可利用的养分直接影响植被的生长^[30,31]. 这与祖元刚等^[1]对东北土壤有机碳含量与理化性质的相关性进行研究,发现有机碳含量与速效钾、速效磷呈极显著正相关关系一致. 干旱区土壤有机碳与土壤含水量呈负相关,主要是由于土壤含水量较低时,好氧型微生物活动频繁,促使有机碳分解速率加快,有机碳含量增加. 其次,地下水埋深间接影响土壤含水量,在一定程度上影响研究区土壤有机碳含量.

土壤酶是土壤中的生物催化剂,是生态系统物质循环与能量流动过程中最活跃的生物活性物质,参与了土壤环境中的一切生物化学过程^[32~34],其活性对土壤碳库特征有极大的影响. 桂东伟等^[35]对新疆策勒绿洲农田进行研究发现,连作年限可对农

田土壤环境产生一定积极的作用,但研究区内长期的连续耕作和不合理的管理方式严重破坏该地区土壤环境,使垦区内农田土壤酶活性随连作年限的延长呈先升高后降低的变化规律。研究表明,蔗糖酶活性是影响土壤碳库特征的重要因子,棉花对土壤营养的需求量大,其根系促进了土壤中微生物的活性,微生物通过蔗糖酶分解有机质为棉花提供生长所需养分^[36],故蔗糖酶活性对于土壤碳库具有重要的作用。本研究发现过氧化氢酶与土壤有机碳含量显著相关,可间接了解有机碳含量水平,这与关松萌研究结果相同^[37]。样区内有机碳含量与磷酸酶活性呈极显著正相关,这是因为农田土壤中微生物和植物均可产生矿化有机营养成分的磷酸酶,丰富的有机质可以提供更多碳源供微生物和植物生命活动所需,从而产生更多数量的磷酸酶。同时,磷酸酶活性的增强又能促进有机磷的分解和转化,加速有机磷向无机磷的转化,为植被提供更多可利用磷^[38,39]。脲酶是参与有机态氮素分解的重要酶之一,其作用是水解有机氮转化中的中间产物尿素,促使尿素转化成氨作为作物利用。本研究中脲酶活性对无机碳含量有一定的影响,这是由于尿素转化过程中产生了大量的二氧化碳,促进碳酸盐的生成,导致无机碳含量升高。

4 结论

(1)在不同连作年限,研究区棉田受到不同程度的干扰,导致土壤有机碳、无机碳特征存在显著差异,在土壤垂直剖面上,连作年限的转变同样也会引起有机碳和无机碳含量的变化。

(2)干旱区土壤环境因子特性在局部范围内影响土壤有机碳、无机碳的含量。

(3)对土壤有机碳、无机碳含量与环境因子相关性分析,冗余分析结果表明土壤碳含量与土壤养分、pH 值、磷酸酶活性、蔗糖酶活性密切相关,其对有机碳、无机碳含量的解释量分别为 48.4%、44.3%、66.5%、67.6%、61.0%、51.7%。通径分析表明,速效钾对有机碳含量具有较大的直接正效应,而过氧化氢酶活性则主要是通过其他环境因子间接影响有机碳含量;无机碳含量主要与脲酶活性有关,脲酶活性对无机碳含量是直接作用和间接作用均为正向。

参考文献:

[1] 祖元刚,李冉,王文杰,等. 我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性[J]. 生态学报, 2011, 31

(18): 5207-5216.

Zu Y G, Li R, Wang W J, *et al.* Soil organic and inorganic carbon contents in relation to soil physicochemical properties in northeastern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5207-5216.

[2] 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.

[3] 余健,房莉,卞正富,等. 土壤碳库构成研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 4829-4838.

Yu J, Fang L, Bian Z F, *et al.* A review of the composition of soil carbon pool[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(17): 4829-4838.

[4] 王娟英,许佳慧,吴林坤,等. 不同连作年限牛膝根际土壤理化性质及微生物多样性[J]. 生态学报, 2017, 37(17): 5621-5629.

Wang J Y, Xu J H, Wu L K, *et al.* Analysis of physicochemical properties and microbial diversity in rhizosphere soil of *Achyranthes bidentata* under different cropping years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(17): 5261-5269.

[5] 雒琼,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.

[6] 刘金娥,苏海蓉,徐杰,等. 互花米草对中国海滨湿地土壤有机碳库的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(6): 1085-1092.

Liu J E, Su H R, Xu J, *et al.* How does *Spartina alterniflora* affect the soil organic carbon pool of coastal wetlands in China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(6): 1085-1092.

[7] Zhao W, Hu Z M, Li S G, *et al.* Impact of land use conversion on soil organic carbon stocks in an agro-pastoral ecotone of Inner Mongolia[J]. *Acta Geographical Sciences*, 2017, 27(8): 999-1010.

[8] 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.

[9] 安申群,贡璐,朱美玲,等. 塔里木盆地北缘典型荒漠植物根系化学计量特征及其与土壤理化因子的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(16): 5444-5450.

An S Q, Gong L, Zhu M L, *et al.* Root stoichiometric characteristics of desert plants and their correlation with soil physicochemical factors in the northern Tarim Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(16): 5444-5450.

[10] 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**(16): 1516-1522.
- [11] 解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 等. 滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 1404-1412.
- Xie X F, Pu L J, Wang Q Q, *et al.* Response of soil enzyme activities and their relationships with physicochemical properties to coastal reclamation area, eastern China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 1404-1412.
- [12] Xie Y, Zhou C, Tu C, *et al.* Quantitative determination of ferulic acid content in *Chrysanthemum morifolium* cv. (Chuju) continuous cropping soil using near infrared spectroscopy[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2017, **45**(3): 363-368.
- [13] 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.* Profiled 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.
- [14] Zhou Y, Boutton T W, Wu X B. Soil carbon response to woody plant encroachment: importance of spatial heterogeneity and deep soil storage[J]. Journal of Ecology, 2017, **105**(6): 1738-1749.
- [15] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究[J]. 科技通报, 1999, **15**(5): 330-332.
- Pan G X. Study on carbon reservoir in soils of China[J]. Bulletin of Science and Technology, 1999, **15**(5): 330-332.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [17] 叶莹莹, 刘淑娟, 张伟, 等. 喀斯特峰丛洼地植被演替对土壤微生物生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2015, **35**(21): 6974-6982.
- Ye Y Y, Liu S J, Zhang W, *et al.* Dynamics of soil microbial biomass and soil enzyme activity along a vegetation restoration gradient in a karst peak-cluster depression area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(21): 6974-6982.
- [18] Liu C, Li Z W, Dong Y T, *et al.* Do land use change and check-dam construction affect a real estimate of soil carbon and nitrogen stocks on the Loess Plateau of China? [J]. Ecological Engineering, 2017, **101**: 220-226.
- [19] 夏品华, 喻理飞, 寇永珍, 等. 贵州高原草海湿地土壤有机碳分布特征及其与酶活性的关系[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(4): 1479-1485.
- Xia P H, Yu L F, Kou Y Z, *et al.* Distribution characteristics of soil organic carbon and its relationship with enzyme activity in the Caohai wetland of the Guizhou Plateau[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(4): 1479-1485.
- [20] 杜满义, 封焕英, 范少辉, 等. 闽西毛竹林不同施肥处理下土壤有机碳含量垂直分布与季节动态[J]. 林业科学, 2017, **53**(3): 12-20.
- Du M Y, Feng H Y, Fan S H, *et al.* Effects of fertilization on vertical distribution and seasonal dynamics of soil organic carbon in *Phyllostachys edulis* forests, western Fujian province[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2017, **53**(3): 12-20.
- [21] Wang Y Q, Shao M A, Zhang C C, *et al.* Soil organic carbon in deep profiles under Chinese continental monsoon climate and its relations with land uses[J]. Ecological Engineering, 2015, **82**: 361-367.
- [22] Pringle M J, Allen D E, Phelps D G, *et al.* The effect of pasture utilization rate on stocks of soil organic carbon and total nitrogen in a semi-arid tropical grassland[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, **195**: 83-90.
- [23] 王充, 于东升, 张海东, 等. 典型黑土区农田土壤碳库及其影响因子显著性变化特征研究[J]. 土壤学报, 2015, **51**(4): 845-852.
- Wang C, Yu D S, Zhang H D, *et al.* Soil carbon stocks and changes in significance of its impact factors in typical black soil region of northeast China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, **51**(4): 845-852.
- [24] 苏永中, 张珂, 刘婷娜, 等. 河西边缘绿洲荒漠沙地开垦后土壤性状演变及土壤碳积累研究[J]. 中国农业科学, 2017, **50**(9): 1646-1654.
- Su Y Z, Zhang K, Liu T N, *et al.* Changes in soil properties and accumulation of soil carbon after cultivation of desert sandy land in a marginal oasis in Hexi corridor region, Northwest China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, **50**(9): 1646-1654.
- [25] 刘淑丽, 林丽, 郭小伟, 等. 青海省高寒草地土壤无机碳储量空间分异特征[J]. 生态学报, 2014, **34**(20): 5953-5961.
- Liu S L, Lin L, Guo X W, *et al.* The variation feature of soil inorganic carbon storage in alpine grassland in Qinghai province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(20): 5953-5961.
- [26] 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.
- [27] Edwards K R, Picek T, Cizkova H, *et al.* Nutrient addition effects on carbon fluxes in wet grasslands with either organic or mineral soil[J]. Wetlands, 2015, **35**(1): 55-68.
- [28] Lu H B, Liu S R, Wang H, *et al.* Experimental throughfall reduction barely affects soil carbon dynamics in a warm-temperate oak forest, central China[J]. Scientific Reports, 2017, **7**: 15099.
- [29] 张濛, 濮励杰, 王小涵, 等. 长期耕种对江苏沿海围垦区滨海盐土理化性质和小麦产量的影响[J]. 生态学报, 2016, **36**(16): 5088-5097.
- Zhang M, Pu L J, Wang X H, *et al.* Effects of long-time cultivation on physicochemical properties of coastal saline soil and wheat production at reclamation areas of Jiangsu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(16): 5088-5097.
- [30] 贺美, 王立刚, 朱平, 等. 长期定位施肥下黑土碳排放特征及其碳库组分与酶活性变化[J]. 生态学报, 2017, **37**(19): 6379-6389.
- He M, Wang L G, Zhu P, *et al.* Carbon emission characteristics, carbon library components, and enzyme activity under long-term fertilization conditions of black soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(19): 6379-6389.
- [31] 黄容, 高明, 万毅林, 等. 秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(11): 4446-4456.
- Huang R, Gao M, Wan Y L, *et al.* Effects of straw in

- combination with reducing fertilization rate on soil nutrients and enzyme activity in the paddy-vegetable rotation soils [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4446-4456.
- [32] Esch E H, Lipson D, Cleland E E. Direct and indirect effects of shifting rainfall on soil microbial respiration and enzyme activity in a semi-arid system[J]. *Plant and Soil*, 2017, **411**(1-2): 333-346.
- [33] Du L T, Huang B J, Du N S, *et al.* Effects of garlic/cucumber relay intercropping on soil enzyme activities and the microbial environment in continuous cropping[J]. *HortScience*, 2017, **52**(1): 78-84.
- [34] 张旭龙, 马森, 吴振振, 等. 不同油菜品种对盐碱地根际土壤酶活性及微生物群落功能多样性的影响[J]. *生态学报*, 2017, **37**(5): 1659-1666.
- Zhang X L, Ma Miao, Wu Z Z, *et al.* Effects of *Helianthus annuus* varieties on rhizosphere soil enzyme activities and microbial community functional diversity of saline-alkali land in Xinjiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(5): 1659-1666.
- [35] 桂东伟, 雷加强, 曾凡江, 等. 绿洲农田不同深度土壤粒径分布特性及其影响因素——以策勒绿洲为例[J]. *干旱区研究*, 2011, **28**(4): 622-629.
- Gui D W, Lei J Q, Zeng F J, *et al.* Analysis on soil PSD and its affecting factors at different depths in oasis farmland—a case study in the Qira Oasis[J]. *Arid Zone Research*, 2011, **28**(4): 622-629.
- [36] Pyner A, Nyambe-Silavwe H, Williamson G. Inhibition of human and rat sucrase and maltase activities to assess antiglycemic potential: optimization of the assay using Acarbose and polyphenols[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, **65**(39): 8643-8651.
- [37] 关松荫, 张德生, 张志明. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [38] Wang R Z, Filley T R, Xu Z W, *et al.* Coupled response of soil carbon and nitrogen pools and enzyme activities to nitrogen and water addition in a semi-arid grassland of Inner Mongolia[J]. *Plant Soil*, 2014, **381**(1-2): 323-336.
- [39] 朱美玲, 贡璐, 张龙龙. 塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2678-2685.
- Zhu M L, Gong L, Zhang L L. Soil enzyme activities and their relationships to environmental factors in a typical oasis in the upper reaches of the Tarim River[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2678-2685.



CONTENTS

Spatial-Temporal Change Evolution of PM _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 ₂ 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 ₂ 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 ₄ ²⁻ 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)