ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第8期

Vol.39 No.8

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 39 卷 第 8 期
2018 年 8 月 15 日

目 次

我国城市 $PM_{2.5}$ 污染的健康风险及经济损失评价 …… 李惠娟,周德群,魏永杰(3467)
冬季电力行业对长江中游城市群空气质量影响 …… 孙晓伟, 郭秀锐, 程水源(3476)
基于区域传输矩阵和 $PM_{2.5}$ 达标约束的大气容量计算方法 …… 李敏辉, 廖程浩, 杨柳林, 曾武涛, 唐喜斌(3485)
利用 SPAMS 研究天津市夏季环境空气中细颗粒物化学组成特征 …… 温杰,史旭荣,田瑛泽,徐娇,史国良,冯银厂(3492)
重庆市北碚城区气溶胶中有机碳和元素碳的污染特征 …… 彭小乐, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 陈建博, 江长胜(3502)
杭甬地区大气中含碳气溶胶特征及来源分析 …… 徐宏辉, 徐婧莎, 何俊, 浦静姣, 齐冰, 杜荣光(3511)
城市生活垃圾露天焚烧 $PM_{2.5}$ 及其组分排放特征 …… 王艳, 郝炜伟, 程轲, 支国瑞, 易鹏, 樊静, 张洋(3518)
民用燃煤排放分级颗粒物中碳组分排放因子 …… 杨国威, 孔少飞, 郑淑睿, 吴剑, 郑明明, 郑煌, 严沁, 刘海彪, 王伟, 吴方琪, 程溢(3524)
大连地区夏季非甲烷烃(NMHC)特征及其来源解析 …… 纪德钰(3535)
“十三五”挥发性有机物总量控制情景分析 …… 张嘉妮, 陈小方, 梁小明, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启(3544)
浙江省包装印刷行业挥发性有机物排放特征及排放系数 …… 王家德, 吕建璋, 李文娟, 顾震宇, 缪孝平(3552)
有机溶剂使用企业挥发性恶臭有机物排放特征及特征物质识别 …… 翟增秀, 孟洁, 王亘, 翟友存, 曹阳, 邹克华(3557)
基于 MODIS_C006 的乌鲁木齐 10 年气溶胶光学厚度变化特征 …… 胡俊, 亢燕铭, 陈勇航, 刘鑫, 李霞, 刘琼(3563)
基于路网车流量的北京城市副中心机动车污染控制情景 …… 樊守彬, 郭津津, 李雪峰(3571)
北京典型跑步区域空气污染特征及跑步者呼吸暴露 …… 陶双成, 高硕晗, 熊新竹, 姚嘉林, 邓顺熙(3580)
丹江口水库调水前后表层沉积物营养盐和重金属时空变化 …… 李冰,王亚,郑钊,许信,辛英督,黄进,郭诗君,毕升阁,胡兰群,陈兆进,李玉英(3591)
太湖北部湖区春、冬季节天然有机质的荧光特征及环境意义 …… 吕伟伟, 姚昕, 张保华(3601)
太湖重点区域水环境中邻苯二甲酸酯的污染水平及生态风险评价 … 朱冰清, 高占啟, 胡冠九, 王骏飞, 于南洋, 韦斯(3614)
台风强降雨输入水源水库悬浮泥沙的氮磷吸附特性 …… 姚玲爱, 赵学敏, 马千里, 梁荣昌, 夏北成, 卓琼芳(3622)
珠江三角洲高砷地下水赋存环境特征及成因分析 …… 张昌延, 何江涛, 张小文, 倪泽华(3631)
有机污染物对杭州湾海域浮游细菌群落的影响 …… 宣丽霞, 戴文芳, 郁维娜, 周素明, 欧昌荣, 熊金波(3640)
澜沧江流域浮游细菌群落结构特征及驱动因子分析 …… 程豹, 望雪, 徐雅倩, 杨正健, 刘德富, 马骏(3649)
碧流河水库细菌群落结构特征及其关键驱动因子 …… 王欢, 赵文, 谢在刚, 魏杰, 姜洋(3660)
浑河底泥反硝化厌氧甲烷氧化菌群落多样性的时空分布特征及其与环境因子关系分析 …… 张亚迪, 宋永会, 彭剑峰, 张剑桥, 张盼月, 刘瑞霞, 石国强(3670)
人类活动对河流沉积物中反硝化厌氧甲烷氧化菌群落特征的影响 …… 刘洋, 陈永娟, 王晓燕, 许康利(3677)
外源氮输入对不同土地利用排水沟底泥反硝化和 N_2O 排放影响 …… 佘冬立, 陈心逸, 高雪梅, 张文娟, 夏永秋(3689)
雨水管道沉积物沉淀特性及主要污染物含量分布 …… 尚宇, 周毅, 廖安意, 方正(3696)
水体中Cr(Ⅵ)对不同混凝剂混凝过程的影响 …… 高倩, 张大为, 徐慧, 徐建坤, 张崇淼, 王东升(3704)
$Co_3O_4/BiVO_4$ 复合阳极活化过一硫酸盐强化光电催化降解双酚 A …… 李蒋, 王雁, 张秀芳, 赵旭(3713)
海藻酸钙/生物炭复合材料的制备及其对Pb(Ⅱ)的吸附性能和机制 …… 于长江, 董心雨, 王苗, 林强(3719)
磁性生物炭对水中 CIP 和 OFL 的吸附行为和机制 …… 赵华轩, 郎印海(3729)
污水中新精神活性物质的分析方法优化及验证 …… 陈培培, 杜鹏, 周子雷, 徐泽琼, 高婷婷, 李喜青(3736)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺对 PVDF 中空纤维膜污染进程的缓解 …… 关羽琪, 王凯伦, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马艳林, 栾桂荣, 郭瑾(3744)
阴离子交换树脂生物再生去除硝酸盐氮 …… 叶婷, 张光, 王珂, 双陈冬, 李爱民(3753)
普鲁士蓝@酵母菌催化剂的合成及其 Fenton 性能 …… 陈思, 白波, 王洪伦, 索有瑞(3759)
PN/A 双菌层系统的构建及其脱氮性能 …… 许静怡, 杜俊, 杨一烽, 吕锋, 夏四清(3767)
苯酚对 EBPR 系统除磷性能的抑制作用 …… 马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 李光银, 孙洪伟(3775)
反硝化-短程硝化-厌氧氨氧化工艺处理晚期垃圾渗滤液的脱氮除碳性能 …… 王凡, 陆明羽, 殷记强, 李祥, 黄勇(3782)
好/厌氧条件下反硝化细菌脱氮特性与功能基因 … 康鹏亮, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 商潘路, 钊珍芳, 王跃, 谭欣林(3789)
苯并[a]芘厌氧降解的苯酚共基质协同作用与污泥微生物特性 …… 吴海珍, 胡肖怡, 王鸣, 韦景悦, 范一文, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环(3797)
污泥超高温堆肥过程中 DOM 结构的光谱分析 …… 刘晓明, 余震, 周普雄, 罗海林, 王跃强, 廖汉鹏, 周顺桂(3807)
生物炭对华北农田土壤 N_2O 通量及相关功能基因丰度的影响 …… 刘杏认, 赵光昕, 张晴雯, 田秀平(3816)
设施菜田土壤 N_2O 产生对 O_2 的响应 …… 陈吉吉, 宋贺, 曹文超, 王乙然, 王敬国(3826)
利用 μ-XRF 和 XANES 研究铅锌矿区土壤铅形态及其生物有效性 …… 孙晓艳, 柳检, 罗立强(3835)
南京市铅锌矿采矿场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征 …… 李俊凯, 张丹, 周培, 刘群录(3845)
Fe-Al 改性硅藻土的制备及其对土壤 Cd 污染固定化效果 …… 杨雨中, 朱健, 肖媛媛, 谭蓉, 王平, 陈润华, 徐海音, 杨雄(3854)
基于稳定碳同位素技术的干旱区绿洲土壤有机碳向无机碳的转移 …… 李杨梅, 贡璐, 安申群, 孙力, 陈新(3867)
生境过滤驱动庞泉沟华北落叶松林土壤真菌群落的构建过程 …… 赵鹏宇, 李毳, 柴宝峰(3876)
转 *cry1Ab* 和 *epsps* 基因玉米 C0030.3.5 对土壤固氮细菌丰度和群落结构的影响 …… 王蕊, 朱珂, 李刚, 刘惠芬, 王晶, 修伟明, 赵建宁, 杨殿林(3885)
脱硫石膏对稻田 CH_4 释放及其功能微生物种群的影响 …… 胡翔宇, 向秋洁, 木志坚(3894)
长期施肥对不同深度稻田土壤碳氮水解酶活性的影响特征 …… 杜林森, 唐美铃, 祝贞科, 魏亮, 魏晓梦, 周萍, 葛体达, 王久荣, 邹冬生, 吴金水(3901)
黄河口滨岸潮滩湿地泥沙沉积及外源镉 Cd 输入对碱蓬物质量分配及抗氧化酶活性的影响 …… 宋红丽, 王立志, 郁万妮, 吴希媛(3910)
黄河下游开封段引黄灌区小麦中重金属污染特征及健康风险评价 …… 康国华, 张鹏岩, 李颜颜, 杨丹, 庞博, 何坚坚, 闫宇航(3917)
氧化石墨烯对邻苯二甲酸二丁酯藻毒性的影响 …… 涂海峰, 刘成, 王宇擎, 储祺, 侯晓冬, 李锋民(3927)
有机物对厌氧氨氧化微生物燃料电池脱氮产电性能的影响 …… 祖波, 马兰, 刘波, 卢培利, 许君(3937)
中国氢燃料电池车燃料生命周期的化石能源消耗和 CO_2 排放 …… 林婷, 吴烨, 何晓旖, 张少君, 郝吉明(3946)
气溶胶水相反应生成二次有机气溶胶研究进展 …… 叶招莲, 瞿珍秀, 马帅帅, 盖鑫磊(3954)
《环境科学》征订启事(3543) 《环境科学》征稿简则(3570) 信息(3600, 3728, 3844)

基于稳定碳同位素技术的干旱区绿洲土壤有机碳向无机碳的转移

李杨梅[1,2], 贡璐[1,2*], 安申群[1,2], 孙力[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: 应用稳定碳同位素技术测定土壤无机碳稳定碳同位素组成(soil inorganic carbon $\delta^{13}C$, SIC $\delta^{13}C$), 并对干旱区绿洲土壤无机碳进行区分, 结合土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)与 SIC 含量关系进一步探讨 SOC 向 SIC 转移的碳量. 结果表明, 4 种类型土壤 SIC $\delta^{13}C$值差异性极显著($P<0.01$), 风沙土 SIC $\delta^{13}C$值最高且为正, 均值为(0.32 ± 0.04)‰, 随土层深度增加而增加, 说明风沙土原生性碳酸盐占绝对优势; 灌漠土、棕漠土和盐碱土 SIC 的$\delta^{13}C$均值分别别(−0.30 ± 0.24)‰、(−1.96 ± 0.66)‰和(−1.24 ± 0.49)‰, 随土层变化均呈先降低后逐渐增大的趋势, 说明灌漠土原生性碳酸盐占优势, 棕漠土和盐碱土发生性碳酸盐相对前者占优势. 风沙土、灌漠土、棕漠土和盐碱土的发生性碳酸盐占 SIC 比例均值分别为 1.33%、4.72%、15.01%、35.71%, 均小于 50%, 说明干旱区绿洲土壤发生性碳酸盐比例总体水平较低. 风沙土、灌漠土、棕漠土和盐碱土在土壤发生性碳酸盐形成或重结晶过程中固定土壤 CO_2 的量分别为 0.30、2.44、4.96、12.40 $g\cdot kg^{-1}$, 其中固定来自大气 CO_2 量平均为 0.18、0.79、1.45、8.67 $g\cdot kg^{-1}$, 来自 SOC 氧化分解转化为 CO_2 的量分别为 0.06、0.83、1.62、1.86 $g\cdot kg^{-1}$, 说明盐碱土、棕漠土 SOC 的贡献相对较高, 灌漠土、风沙土较低; 对土壤固定 CO_2 量的来源比较发现, 风沙土、盐碱土固定土壤 CO_2 的量来自大气 CO_2 量较高, SOC 的贡献较低, 而灌漠土、棕漠土固定来自 SOC 氧化分解 CO_2 的量较高, 大气贡献较低. 研究区整体 SOC 向 SIC 的碳转移量介于 0.03 ~ 2.38 $g\cdot kg^{-1}$之间, 平均每千克土壤固定 1.09 g 的 CO_2, 说明干旱区绿洲土壤发生性碳酸盐所占比例较低, SOC 的贡献较少.

关键词: 干旱区绿洲; 稳定碳同位素; 土壤有机碳; 土壤无机碳; 发生性碳酸盐(PC)
中图分类号: X144 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2018)08-3867-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201711211

Transfer of Soil Organic Carbon to Inorganic Carbon in Arid Oasis Based on Stable Carbon Isotope Technique

LI Yang-mei[1,2], GONG Lu[1,2*], AN Shen-qun[1,2], SUN Li[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, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: The northern margin oasis of the Tarim Basin in the central arid region of Asia was selected as the study area. The study analyzed the $\delta^{13}C$ values of the SIC(soil inorganic carbon) and distinguished the pedogenic carbonate in soil from the total SIC using the stable carbon isotope techniques and models. Based on the relationship between soil organic carbon and inorganic carbon contents in soil, the transfer of SOC to SIC was discussed. The results showed that the $\delta^{13}C$ values of the SIC of 4 types of arid oasis soil were significantly different ($P<0.01$), the $\delta^{13}C$ values of the SIC of aeolian sandy soil was (0.32 ± 0.04)‰, which increased with increase in depth. This indicates that the lithogenic carbonates of the sandy soil are advantageous. The $\delta^{13}C$ values of the SIC of irrigated desert soil, brown desert soil, and saline soil were (−0.30 ± 0.24)‰, (−1.96 ± 0.66)‰ and (−1.24 ± 0.49)‰, respectively, and decreased with increase in depth. This indicates that the lithogenic carbonates dominated the irrigated desert soil, and the pedogenic carbonates dominated brown desert and saline soils. In the aeolian sandy, irrigated desert, brown desert, and saline soils, pedogenic carbonate accounted for 1.33%, 4.72%, 15.01%, and 35.71% of SIC, respectively, which were less than 50%. This shows that the level of soil pedogenic carbonates was low in arid oasis. During pedogenic carbonate formation or recrystallization, the aeolian sandy, irrigated desert, brown desert, and saline soils fixed 0.30, 2.44, 4.96, and 12.40 $g\cdot kg^{-1}$ of soil CO_2, respectively, the average amount of CO_2 fixed from the atmosphere was 0.18, 0.79, 1.45, and 8.67 $g\cdot kg^{-1}$, respectively. Furthermore, the transfer of SOC to SIC was 0.06, 0.83, 1.62, and 1.86 $g\cdot kg^{-1}$, respectively. The total transfer of SOC to SIC was between 0.03 and 2.38 $g\cdot kg^{-1}$, with an average of 1.09 $g\cdot kg^{-1}$ of CO_2. This shows that the proportion of soil pedogenic carbonates and the contribution of SOC were not high in the arid oasis area.

Key words: arid oasis; stable carbon isotope; soil organic carbon; soil inorganic carbon; pedogenic carbonate(PC)

收稿日期: 2017-11-22; **修订日期**: 2018-01-12
基金项目: 国家自然科学基金项目(41461105); 新疆维吾尔自治区科技厅优秀青年科技人才培养项目(qn2015yx002); 新疆维吾尔自治区教育厅研究生科研创新项目(XJGRI2016023)
作者简介: 李杨梅(1992 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为干旱区资源与环境, E-mail: liyangmei199203@163.com
* 通信作者, E-mail: gonglu721@163.com

土壤作为陆地生态系统中最大的碳库载体，其碳储量约是大气碳库的 3.3 倍和生物碳库的 4.5 倍[1]. 土壤有机碳库和土壤无机碳库作为土壤碳库的重要组成部分[2]，SOC 的封存、分解与释放以及 SIC 的积累、淋失对全球碳循环与气候变化具有重要影响[3,4]. 目前国内外学者对土壤碳循环研究多集中于有机碳库，包括 SOC 含量特征及其储量、SOC 周转、来源及影响因素等方向[4~6]，而忽略了 SIC 在碳循环的作用. SIC 主要是指土壤碳酸盐，分为原生性碳酸盐(lithogenic carbonates，LC)和发生性碳酸盐(pedogenic carbonates，PC)[7]. 其中 PC 是土壤风化成土过程中形成的碳酸盐[8]，是土壤碳库的重要组成部分之一，与 LC 的溶解/沉积平衡、SOC 分解 CO_2 的再转化关系密切[8]，对全球固碳起着重要作用. 关于 SIC 的研究多集中于碳酸盐含量的剖面特征、碳储量、空间分布等方向[4,9,10]，对 PC 的研究则多集中于岩溶、草原和农田生态系统[11~13]，而对于干旱区绿洲小尺度上 PC 及土壤碳转移的研究十分少见.

干旱区绿洲由于其特殊的地理位置和气候条件含有大量的 SIC[14]，且在高温多雨的夏季土壤有机质的分解和碳积累有其特殊性[12]. 在干旱区土壤内部的碳以间接转移为主，即通过土壤 CO_2 发生转移[7]. SOC 分解、植物根系和微生物呼吸释放的 CO_2，在土壤中通过反应“$SOC \rightarrow CO_2(g) \rightarrow CO_2(aq) \rightarrow HCO_3^-(aq) \rightarrow CaCO_3(s)$”形成 PC[13]，将土壤有机质释放的碳固存在 SIC 中. 因此 PC 形成过程中可以对大气 CO_2 和 SOC 分解释放的 CO_2 进行固存[15]，获得碳转移量，对全球干旱区碳循环具有重要影响. 然而干旱区绿洲土壤 PC 的比例是多少，土壤的碳转移量是多少均尚不清楚.

本文以塔里木盆地北缘绿洲 4 种类型土壤为对象，探讨 SIC $\delta^{13}C$值的深度变化，并应用稳定碳同位素技术对 LC 和 PC 进行区分，获得 PC 形成过程中对土壤 CO_2 的固定，结合 SOC 和 SIC 的相关关系，定量研究 SOC 向 SIC 的转移量. 对于维系脆弱生态系统稳定性，缓解气候变化，全面评价干旱地区土壤碳库动态对全球碳循环的贡献具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

阿拉尔垦区(80°30′~81°58′E、40°22′~40°57′N)地处塔里木盆地北缘、天山中段南麓，平均海拔为1 012 m. 属暖温带大陆性干旱荒漠气候，全年干旱少雨，年降水量为 17.4~42.8 mm，且年内各月份分配不均；蒸发强烈，年蒸发量达1 125~1 600 mm，蒸发量远大于降水量. 热量与光照十分丰富，年均光辐射量达6 000~6 200 $MJ\cdot m^{-2}$，全年平均日照时数为2 556.3~2 991.8 h，日照率为 58%~69%，适宜好光、喜热、耐旱植被生长. 作为典型的荒漠-绿洲型生态系统，土壤形成比较简单，粉砂壤土为主要土壤质地类型，按照我国土壤发生类型分类，研究区主要有 4 种土壤类型，分别为灌漠土(又称为绿洲土，20 a 棉田)、棕漠土(主要植被类型为盐穗木，分布于农田与沙漠交错地带)、风沙土(主要植被覆盖极低，分布于塔克拉玛干沙漠边缘)和盐碱土(表层覆有碱斑，分布于农田与沙漠交错地带)[16].

1.2 样地选择与取样

于 2016 年 8 月在研究区设置样方. 样方面积均为 5 m×5 m，选择灌漠土、棕漠土、风沙土和盐碱土 4 种类型土壤为研究对象. 在各类型土壤样方内按“S”形布样点 5 个，每个样点按剖面 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 层次采集土样样品，并将 5 个样点同一层次的土壤进行混合，重复 3 次. 将采取的土样去除石块及植物根系，充分混匀后按四分法取 1 kg 土样入袋，封装好带回实验室，自然风干后研磨过筛(0.149 mm)，以供实验分析使用.

利用气井法收集 4 种类型土壤气体[17]：将 L 型 PVC 管对应上述土壤剖面分别进行埋设，水平于地面的部分为土壤气体采集管，垂直于地面部分为导气管，升至地面，顶端连接自动气体采样器，经 24 h 后，为避免气体污染，抽取土壤气体排放 3 次后进行气体收集，共收集 72 个气体样品于样品袋中，带回实验室分析. 注意：首先检测样品袋气密性，将样品袋充满气体密封，保证在无抽取条件下，能保持原状态 24 h 以上；其次在采集土壤气体之前，将 500 mL 样品袋接入自动气体采样器，抽真空 2 h 后清除袋中多余气体.

1.3 测定方法

SOC 含量的测定采用浓硫酸-重铬酸钾外加热法[18]；SIC 含量的测定采用气量法[10]. SIC、母质碳酸盐的$\delta^{13}C$值采用磷酸法测定[19]：取 0.03 g 样品倒入放有小磁棒的玻璃瓶中，抽真空后，注入 20 mL 100%浓磷酸，加热至50℃并用磁力搅拌法使样品与磷酸充分反应，在真空线上利用冷阱分离 CO_2，收集纯化的 CO_2，进入 DELTA-V 型同位素比

率质谱仪测量$\delta^{13}C$值，精度 < 0.15‰，土壤样品测试在新疆生态与地理研究所公共技术服务中心完成. 土壤 CO_2 气体测定[20]是样品袋连接 PreCon 气体预浓缩系统冷阱分离 CO_2，收集纯化的 CO_2 后直接进入 DELTA-V 型同位素比率质谱仪测定$\delta^{13}C$值，精度 < 0.2‰，气体样品送往清华大学地球系统科学研究中心稳定同位素生态学实验室完成.

碳稳定性同位素比率的表示方法[19]：$\delta^{13}C$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^{13}C天然丰度变异程度的指标，$\delta^{13}C$值的误差在 ±0.2‰. 其计算公式为：

$$\delta^{13}C = \left[\frac{(^{13}C/^{12}C)\ 样品}{(^{13}C/^{12}C)\ 标准} - 1\right] \times 1\,000‰$$

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$\delta^{13}C$ = 0.011 24.

1.4　SOC 向 SIC 转移量的计算

首先运用 SIC $\delta^{13}C$值对 LC 和 PC 进行区分，步骤如下.

PC $\delta^{13}C$值主要取决于土壤 CO_2[21]，在开放的土壤体系中存在与温度有关的碳同位素分馏，从土壤 CO_2(g)到 $CaCO_3$(s)的碳同位素分馏与温度之间的关系符合下面的方程式[21]：

$$1\,000\ \ln\alpha = -3.63 + 1.194 \times 10^6/T^2 \quad (1)$$

式中，α为 CO_2(g)到 $CaCO_3$(s)之间的同位素分馏因子，T为开氏温度，可通过当地生长季平均温度求取. 采样时当地平均温度为 30℃，计算最终形成 PC $\delta^{13}C$值比土壤 CO_2 $\delta^{13}C$值富集 9.36‰. 由土壤 CO_2 $\delta^{13}C$值和 α，根据以下公式计算出 PC 的$\delta^{13}C$值：

$$\delta^{13}C_{PC} = \delta^{13}C_{CO_2} + \alpha \quad (2)$$

其次运用同位素质量平衡方程式(3)获得 PC 占 SIC 的比例[11]：

$$PC(\%) = \frac{[\delta^{13}C_{SIC} - \delta^{13}C_{pm}]}{[\delta^{13}C_{PC} - \delta^{13}C_{pm}]} \times 100 \quad (3)$$

式中，PC(%)是某一土层发生性碳酸盐占土壤无机碳的比例；$\delta^{13}C_{SIC}$是某一土层无机碳的$\delta^{13}C$测定值；$\delta^{13}C_{PC}$是发生性碳酸盐的$\delta^{13}C$值；$\delta^{13}C_{pm}$是母质的$\delta^{13}C$测定值，风沙土母质为风积物，其$\delta^{13}C$测定值为 0.30‰；灌漠土母质为冲积物，其$\delta^{13}C$测定值为 0.20‰；棕漠土和盐碱土母质为冲积物，质地为砂质壤土，其母质$\delta^{13}C$测定值均为 −0.363‰.

最后根据土壤 CO_2(g)到 $CaCO_3$(s)的化学计量平衡关系和 PC 累积量，由公式(4)求得土壤 PC 形成或重结晶过程中固定土壤 CO_2 的量[7]：

$$Y = 1/2 \times m_{PC} \times N_{CO_2}/M_{PC} \quad (4)$$

式中，Y为固定的土壤 CO_2 含量(g·kg^{-1})；1/2 为 HCO_3^- 相中的碳一半来自于土壤 CO_2；m_{PC}为发生性碳酸盐含量(g·kg^{-1})；M_{PC}为发生性碳酸盐的摩尔质量(100 g·mol^{-1})，N_{CO_2}为 CO_2 的摩尔质量(44 g·mol^{-1}).

土壤 CO_2 $\delta^{13}C$值主要由土壤呼吸和大气混入的 CO_2 共同决定[22]. 因此依据发生性碳酸盐碳同位素丰度法和公式(5)[7]，计算土壤气体中来自土壤呼吸和大气的 CO_2 比例.

$$\delta^{13}C_{CO_2} = \delta^{13}C_{SOC} \times a\% + \delta^{13}C_{air} \times b\% \quad (5)$$

式中，$\delta^{13}C_{CO_2}$为土壤 CO_2 $\delta^{13}C$值，$\delta^{13}C_{SOC}$为没有大气混入时氧化分解、植物根系呼吸、微生物呼吸释放的纯的 CO_2 值(通常取值为 −23.3‰)；$\delta^{13}C_{air}$为现代大气 CO_2 的$\delta^{13}C$值(通常取值为 −8‰)；$a\%$为土壤呼吸 CO_2(SOC 氧化分解、植物根系和微生物呼吸释放)占总土壤 CO_2 的比例；$b\%$表示来自大气 CO_2 的比例.

1.5　数据分析

运用 SPSS 19.0 统计分析软件，对不同土壤类型各数值进行单因素方差分析(one-way ANOVA)，运用方差同质性(homogeneity of variance)检验方法检验方差是否齐性，当方差齐性时，多重比较使用 LSD 法，反之，使用 T2 Tamhane's test.

2　结果与分析

2.1　SOC 和 SIC 含量的垂直分布特征

图 1 为 SOC 和 SIC 含量随土层的深度变化特征. 4 种类型土壤整体 SOC 含量大小顺序为灌漠土 > 棕漠土 > 盐碱土 > 风沙土，平均值分别为(4.32 ± 1.37)、(3.86 ± 1.30)、(3.70 ± 0.32)、(2.31 ± 0.34) g·kg^{-1}，其中风沙土、灌漠土和棕漠土 SOC 含量表现出一致的变化规律，即随深度增加而降低；风沙土和灌漠土均在 0 ~ 20 cm 为最大值，分别是 2.88 g·kg^{-1}和 5.43 g·kg^{-1}，棕漠土在 20 ~ 40 cm 为最大值(5.14 g·kg^{-1})；而盐碱土 SOC 含量在 3.46 ~ 4.26 g·kg^{-1}之间，随土层变化不大.

4 种类型土壤整体 SIC 含量大小顺序为灌漠土 > 盐碱土 > 棕漠土 > 风沙土，均值分别为(223.73 ± 22.17)、(151.51 ± 18.04)、(149.30 ± 8.06)、(99.67 ± 3.16) g·kg^{-1}，且 4 种土壤类型 SIC 含量随土层变化均表现不一性. 灌漠土随

深度增加整体表现为降低趋势，40 ~ 60 cm 为最大值(239.96 g·kg^{-1})；盐碱土则是一直增加的趋势；棕漠土呈先降低后增加趋势，0 ~ 20 cm 出现最大值(157.97 g·kg^{-1})；风沙土随土层随呈先增加后降低变化，但变化幅度较小，在 102.71 ~ 94.81 g·kg^{-1}之间.

对研究区 SOC 和 SIC 含量进行 Pearson 相关分析表明，仅灌漠土 SOC 与 SIC 之间显著正相关(R = 0.905，P < 0.05)，风沙土和棕漠土 SOC 与 SIC 也为正相关关系，R 值分别为 0.10、0.36，但关系不显著(P > 0.05)，盐碱土 SOC 与 SIC 之间为负相关关系(R = −0.27，P > 0.05).

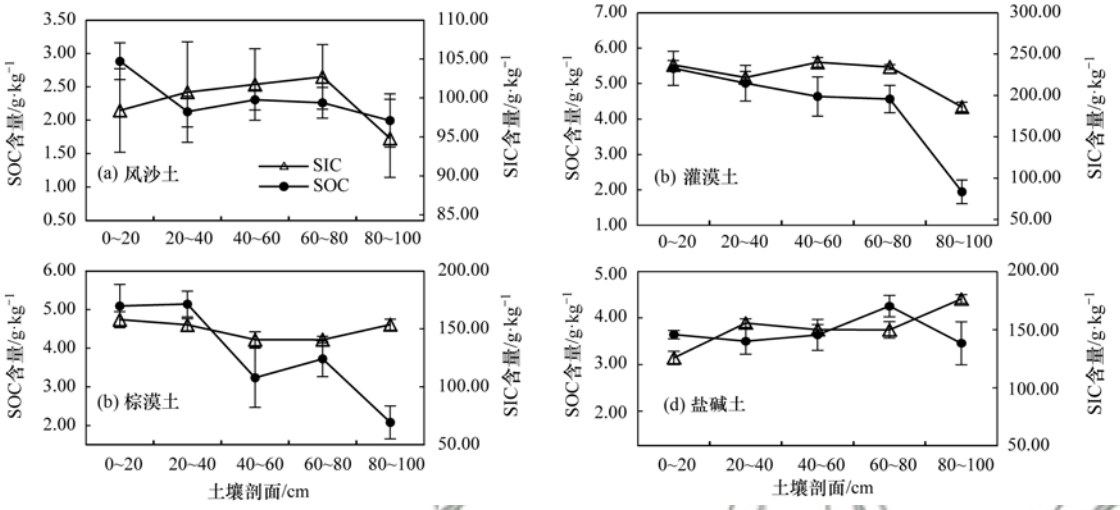


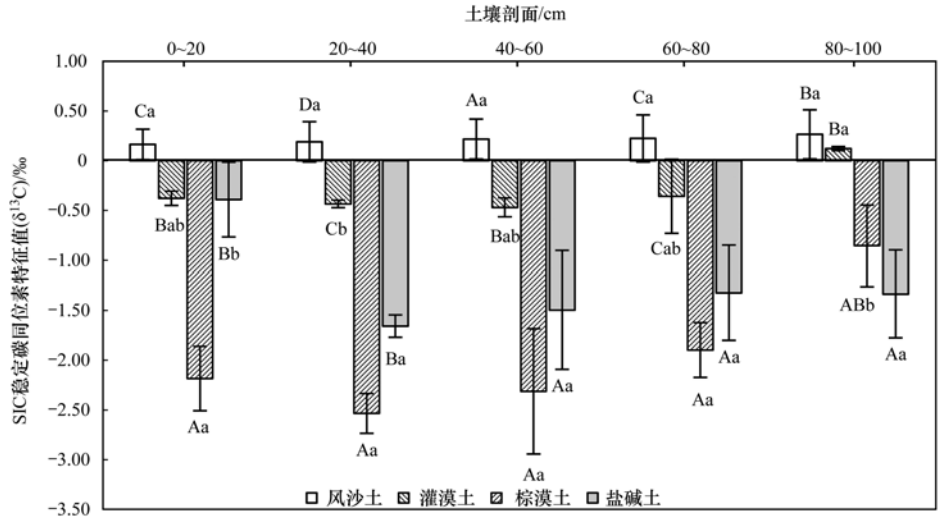
图 1 不同土壤类型 SOC 和 SIC 含量的垂直分布特征

Fig. 1 Vertical distribution characteristics of SOC and SIC contents in different types of soil

2.2 干旱区绿洲 SIC δ^{13}C值的剖面分布特征

研究区 4 种土壤剖面整体 SIC δ^{13}C 平均值为(−0.82 ± 0.97)‰，对 4 种类型 SIC δ^{13}C值进行单因素方差分析(图 2)，发现各土壤间δ^{13}C值差异性极显著(df = 3，F = 25.328，P < 0.01)，风沙土、灌漠土、棕漠土和盐碱土 4 种土壤剖面 SIC δ^{13}C平均值分别为(0.32 ± 0.04)‰、(−0.30 ± 0.24)‰、(−1.96 ± 0.66)‰和(−1.24 ± 0.49)‰，其中风沙土和灌漠土差异不大，棕漠土、盐碱土与各土壤间均有显著差异(P < 0.05).

4 种土壤类型的 SIC δ^{13}C值在 0 ~ 100 cm 土层内的变化规律如图 2 所示：风沙土 SIC δ^{13}C值随土层深度的增加而增加，在 80 ~ 100 cm 达到最大值且偏正，为 0.265‰；灌漠土、棕漠土和盐碱土则随土



大写字母为不同土壤同一土层间的多重比较(P < 0.05)；小写字母为同一土壤不同土层间的多重比较(P < 0.05)

图 2 不同土壤类型 SIC 稳定碳同位素特征值(δ^{13}C)的分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of SIC stable carbon isotope (δ^{13}C) in different types of soil

层深度增加，其 SIC $\delta^{13}C$ 值均先降低，而后逐渐增大，其中灌漠土在 40 ~ 60 cm 达最小值为 -0.469‰，棕漠土和盐碱土均在 20 ~ 40 cm 处最小，分别为 -2.53‰、-1.66‰.

2.3　基于稳定碳同位素技术的 SOC 向 SIC 的转移

2.3.1　土壤 PC 占 SIC 的比例及含量

有研究表明在 0 ~ 40 cm 土层存在大气 CO_2 的混入，土壤-大气界面间不停地进行气体交换，使得该层土壤 CO_2 气体的同位素值出现偏差，从而估算的 $\delta^{13}C_{PC}$ 值有误差[7,11]. 因此研究区对 40 cm 以下的土层进行研究，根据土壤 CO_2 $\delta^{13}C$ 值、公式(1)和(2)，从而估算出 PC 的 $\delta^{13}C$ 值见表 1，在 40 ~ 100 cm 剖面内，风沙土 $\delta^{13}C_{PC}$ 值为 -4.41‰、-4.45‰和 -5.14‰，随土层增加而逐渐降低；灌漠土 $\delta^{13}C_{PC}$ 值为 -8.74‰、-9.21‰、-10.31‰，随土层增加而逐渐降低；棕漠土 $\delta^{13}C_{PC}$ 值为 -8.64‰、-9.82‰、-9.77‰，随土层变化整体呈减少趋势；盐碱土 $\delta^{13}C_{PC}$ 值为 -3.06‰、-3.29‰、-3.38‰，随土层增加而逐渐降低.

同位素质量平衡方程式(3)可得 4 种土壤类型不同土层中 PC 占 SIC 的比例如表 1 所示，风沙土、灌漠土、棕漠土和盐碱土的 PC 比例随土层的增加均逐渐减少，在 40 ~ 60 cm 土层分别最大占 1.76%、7.48%、23.54% 和 42.05%. 结合 SIC 含量(图 1)可得 PC 含量如表 1 所示，风沙土、灌漠土、棕漠土和盐碱土的 PC 均值分别为 1.34、11.08、21.82 和 56.36 $g \cdot kg^{-1}$. 风沙土、灌漠土和棕漠土 PC 含量随土层变化呈逐渐减少趋势，最大值含量分别为 1.78、17.96 和 33.13 $g \cdot kg^{-1}$，80 ~ 100 cm 为最小值分别为 0.61、1.39 和 8.01 $g \cdot kg^{-1}$；盐碱土 PC 含量变化不大，但随土层整体呈降低趋势，60 ~ 80 cm 为最小值(49.15 $g \cdot kg^{-1}$).

表 1　土壤 PC 的稳定同位素组成及其所占比例、含量

Table 1　Stable isotopic composition ($\delta^{13}C$), the proportion, and content of pedogenic carbonates in soil

项目	土层/cm	风沙土	灌漠土	棕漠土	盐碱土
$\delta^{13}C_{CO_2}$/‰	40 ~ 60	-13.77 ± 0.63	-18.10 ± 0.20	-18.00 ± 0.59	-12.42 ± 1.64
	60 ~ 80	-13.81 ± 0.61	-18.57 ± 0.28	-19.18 ± 0.47	-12.65 ± 1.42
	80 ~ 100	-14.50 ± 0.70	-19.18 ± 0.52	-19.13 ± 0.25	-12.74 ± 1.48
$\delta^{13}C_{PC}$/‰	40 ~ 60	-4.41 ± 0.63	-8.74 ± 0.20	-8.64 ± 0.59	-3.06 ± 1.64
	60 ~ 80	-4.45 ± 0.61	-9.21 ± 0.28	-9.82 ± 0.47	-3.29 ± 1.42
	80 ~ 100	-5.14 ± 0.70	-10.31 ± 0.52	-9.77 ± 0.25	-3.38 ± 1.48
PC/%	40 ~ 60	1.76 ± 0.26	7.48 ± 0.17	23.54 ± 1.65	42.05 ± 13.34
	60 ~ 80	1.59 ± 0.21	5.93 ± 0.18	16.23 ± 0.83	32.81 ± 5.23
	80 ~ 100	0.64 ± 0.09	0.75 ± 0.04	5.21 ± 0.14	32.26 ± 8.26
PC/$g \cdot kg^{-1}$	40 ~ 60	1.78 ± 0.26	17.96 ± 0.40	33.13 ± 2.33	63.06 ± 21.73
	60 ~ 80	1.64 ± 0.22	13.88 ± 0.42	22.82 ± 1.17	49.15 ± 7.48
	80 ~ 100	0.61 ± 0.08	1.39 ± 0.07	8.01 ± 0.21	56.88 ± 14.57
	平均值	1.34 ± 0.64	11.08 ± 8.63	21.32 ± 12.63	56.36 ± 6.97

2.3.2　PC 形成或重结晶过程中 SOC 向 SIC 的碳转移量

由公式(4)可知风沙土、灌漠土、棕漠土和盐碱土平均每 kg 土壤中大约有 0.01 mol($1/2 \times 1.34/M_{PC}$)、0.06 mol($1/2 \times 11.08/M_{PC}$)、0.11 mol($1/2 \times 21.83/M_{PC}$)和 0.28 mol($1/2 \times 56.36/M_{PC}$)的碳酸盐来自于固定的土壤 CO_2，所以 4 种类型土壤不同土层每千克土壤固定的土壤 CO_2 见表 2，风沙土、灌漠土、棕漠土和盐碱土平均每 kg 土壤分别大约固定了 0.30、2.44、4.69、12.40 g 的土壤 CO_2. 风沙土、灌漠土、棕漠土随土层增加固定的土壤 CO_2 逐渐减少，40 ~ 60 cm 最多，分别为 0.39、3.95、7.29 $g \cdot kg^{-1}$，80 ~ 100 cm 固定最少，分别为 0.13、0.31、1.76 $g \cdot kg^{-1}$；盐碱土随土层增加固定的土壤 CO_2 在 10.81 ~ 13.87 $g \cdot kg^{-1}$ 间，变化不大，随土层整体降低趋势.

由公式(5)计算出风沙土、灌漠土、棕漠土和盐碱土在 40 ~ 100 cm 土层 a 的平均分别所占比例为 39.40%、70.46%、70.40% 和 30.08%，从而获得总土壤气体中来自土壤呼吸和大气的 CO_2 的量结果如表 3 所示，风沙土、灌漠土、棕漠土和盐碱土每 kg 固定来自土壤呼吸的 CO_2 量分别为 0.11、1.65、3.24 和 3.72 g，固定来自大气的 CO_2 量分别为 0.18、0.79、1.45 和 8.67 g. 有学者表明微生物、根系呼吸占土壤呼吸的 50% 左右[23,24]，所以 SOC 氧化分解占到土壤呼吸释放 CO_2 的 1/2，因此

表 2 PC 形成或重结晶过程中固定的土壤 CO_2 含量/$g \cdot kg^{-1}$

Table 2 CO_2 sequestration in the formation and turnover of pedogenic carbonates in soil/$g \cdot kg^{-1}$

土层/cm	风沙土	灌漠土	棕漠土	盐碱土
40 ~ 60	0.39 ± 0.06	3.95 ± 0.09	7.29 ± 0.51	13.87 ± 4.04
60 ~ 80	0.36 ± 0.05	3.05 ± 0.09	5.02 ± 0.26	10.81 ± 1.72
80 ~ 100	0.13 ± 0.02	0.31 ± 0.01	1.76 ± 0.05	12.51 ± 3.21
平均值	0.30 ± 0.14	2.44 ± 1.90	4.69 ± 2.78	12.40 ± 1.53

表 3 土壤 SIC 固定 CO_2 的来源及其碳转移量/$g \cdot kg^{-1}$

Table 3 Sources and carbon transfer of CO_2 immobilized on soil carbonates/$g \cdot kg^{-1}$

项目	土层/cm	风沙土	灌漠土	棕漠土	盐碱土
土壤呼吸	40 ~ 60	0.15 ± 0.02	2.61 ± 0.06	4.76 ± 0.33	4.22 ± 1.34
	60 ~ 80	0.14 ± 0.02	2.11 ± 0.06	3.67 ± 0.19	3.35 ± 0.53
	80 ~ 100	0.06 ± 0.01	0.23 ± 0.01	1.28 ± 0.03	3.61 ± 0.93
	平均值	0.11 ± 0.05	1.65 ± 1.25	3.24 ± 1.78	3.72 ± 0.42
大气	40 ~ 60	0.24 ± 0.04	1.34 ± 0.03	2.52 ± 0.18	9.66 ± 3.06
	60 ~ 80	0.22 ± 0.03	0.94 ± 0.03	1.35 ± 0.07	7.47 ± 1.19
	80 ~ 100	0.08 ± 0.01	0.07 ± 0.00	0.48 ± 0.01	8.90 ± 2.28
	平均值	0.18 ± 0.09	0.79 ± 0.65	1.45 ± 1.03	8.67 ± 1.11
SOC 氧化分解	40 ~ 60	0.07 ± 0.01	1.30 ± 0.03	2.38 ± 0.17	2.11 ± 0.31
	60 ~ 80	0.07 ± 0.01	1.06 ± 0.03	1.83 ± 0.09	1.67 ± 0.67
	80 ~ 100	0.03 ± 0.00	0.12 ± 0.01	0.64 ± 0.02	1.81 ± 0.46
	平均值	0.06 ± 0.02	0.83 ± 0.63	1.62 ± 0.89	1.86 ± 0.22

风沙土、灌漠土、棕漠土和盐碱土平均分别每千克土壤中固定来自 SOC 氧化分解转化的 0.06、0.83、1.62 和 1.86 g CO_2，风沙土、灌漠土、棕漠土随土层增加而降低，盐碱土则介于 1.67 ~ 2.11 $g \cdot kg^{-1}$ 之间，随土层变化整体降低. 研究区整体土壤 SOC 向 SIC 的碳转移量介于 0.03 ~ 2.38 $g \cdot kg^{-1}$ 之间，平均每 kg 土壤固定 1.09 g 的 CO_2.

3 讨论

3.1 干旱区绿洲土壤 LC 和 PC 的区分

研究区土壤 SIC 中 LC 占比总体较高，PC 形成量较低，其含量总体平均为 22.52 $g \cdot kg^{-1}$，仅占 SIC 含量的 14.43%. 当 SIC 来源中 LC 占优势，SIC $\delta^{13}C$值偏正；当 SIC 来源中 PC 占优势，SIC $\delta^{13}C$值偏负[25]. 研究区 4 种土壤类型 SIC $\delta^{13}C$值差异性极显著($P < 0.01$). 风沙土由于地表植被覆盖率低[9]，SOC 累积量减少，成土过程缓慢，LC 较多地残存于深层土壤中[25]，其 SIC $\delta^{13}C$值最大且为正，即 SIC 中 LC 占优势，因此 PC 比例及含量最低. 灌漠土通过翻耕等人为活动，土壤与大气的接触面积增加[26]，大气 CO_2 输入量增加，土壤 PC 在形成过程中固存的 CO_2 含有部分的大气 CO_2，导致 SIC $\delta^{13}C$值偏正，LC 占优势；另外灌漠土经人为灌溉带动 SIC 的传输与聚积[27]，将土壤盐分淋溶至中层土壤，SIC 在中层富集，下层 SIC 含量逐渐减少，其 PC 比例及含量较低. 棕漠土、盐碱土植被多为灌木，植被根系较深，根部呼吸释放 CO_2 浓度增加[28]，二者 SIC $\delta^{13}C$值偏负，土壤 PC 相对占优势；但由于棕漠土通过植被向上运输 Ca^{2+} 到地表[28]，SIC 在表层富集，土壤下层 SIC 含量减少，PC 比例及含量仍较低；而盐碱土本身盐分较高其土壤富含碳酸盐，加之 Ca^{2+}、Mg^{2+} 的淋溶过程易发生从而使其 SIC 在底层富集[29]，PC 比例及含量最高.

本研究对不同类型土壤剖面下的 PC 比例及含量进行定量分析发现，风沙土、灌漠土、棕漠土、盐碱土 PC 比例及含量逐层降低. 40 ~ 60 cm 土壤，上层土壤水溶液向下淋溶的过程中，由于土壤水分的蒸发、散失，重碳酸钙溶液又重新沉积形成碳酸钙晶体[11]，使 PC 比例及含量在该层中最大. 60 ~ 80 cm 土层，土壤中有机质含量、植物根系和微生物数量减少、各种生化作用减弱，生物因素对 SIC 碳稳定同位素的影响逐渐降低[7]；同时 80 ~ 100 cm 土壤结构紧实，各土壤的 SIC 基本继承了土壤母质碳酸盐的特征[30]，SIC $\delta^{13}C$值逐渐偏正，LC 所占比重在下层土壤逐渐增加，PC 比例及含量逐渐降低.

3.2 干旱区绿洲 SOC 向 SIC 的转移量

研究区土壤 SOC 向 SIC 的总体平均转移量为 1.09 $g \cdot kg^{-1}$，仅占总固定 CO_2 量的 21.99%，整体

SOC 的贡献较低，大气贡献相对较高. 干旱区土壤通过 SOC →CO_2 →SIC 微循环系统[12]，4 种类型土壤的碳转移量也不尽相同. 风沙土固定的 CO_2 量最低，其中固定大气 CO_2 的量较高，固定来自 SOC 氧化分解释放的 CO_2 量极低，碳转移量接近于 0 $g\cdot kg^{-1}$. 主要是由于风沙土的矿质部分几乎由细砂颗粒组成导致其剖面层次分化不明显[25]，成土过程缓慢，土壤中 SOC、SIC 含量均最低，且呈正相关关系，一定程度上抑制了 LC 的溶解，土壤 SIC 中 PC 形成量极低；另外土壤孔隙度较大，渗透性加强，大气气体混入增加[7]，风沙土 PC 形成或重结晶过程中来自大气 CO_2 的比例较高，因此 SOC 的贡献极低. 灌漠土固定 CO_2 量较少，大气 CO_2 的量较低，来自 SOC 氧化分解释放的 CO_2 量较低但高于大气，碳转移量介于 0.12 ~ 1.30 $g\cdot kg^{-1}$之间. 主要是因为施肥灌溉等人为活动使生物量增加，促进了 SOC、SIC 在中层富集[27]，下层 SOC 矿化速率降低，生成的 CO_2 减少，土壤 CO_2 与土壤水作用形成碳酸溶液减少，从而 LC 的溶解度降低[31]，下层土壤 PC 形成量不高，SOC 的贡献相对较低；另外耕作对下层土壤影响较小[27]，大气混入不大，土壤中固定来自大气 CO_2 的量较低，因此灌漠土 SOC 的贡献又高于大气. 棕漠土固定 CO_2 量较高，固定少量的大气 CO_2，SOC 氧化分解释放的 CO_2 量较高，碳转移量平均为 1.62 $g\cdot kg^{-1}$. 棕漠土 SOC 与 SIC 含量呈正相关关系，随土层变化含量降低，由于研究区棕漠土优势植被为盐穗木，其灌丛对碳有富集和保护作用[28]，SOC 分解、微生物和根系呼吸作用较强，从而棕漠土 PC 形成或重结晶过程中固定的 CO_2 来自 SOC 氧化分解的量较多，因此 SOC 的贡献相对较高. 盐碱土固定 CO_2 量最高，来自大气 CO_2 的量极高，SOC 氧化分解释放的 CO_2 量较高但低于大气，碳转移量在 1.67 ~ 2.11 $g\cdot kg^{-1}$之间. 可能是由于土壤中盐碱成分抑制植物生长[29]，使得 SOC 含量逐渐减少，另外碱积层的存在使得 SIC 含量增加[32]，SOC 与 SIC 之间呈负相关关系，与其他学者结果一致，SOC 的分解对 LC 的降解有一定驱动作用[7]；加之盐碱土 PC 比例及含量为最高，使其 SOC 向 SIC 的转移量最高，SOC 的贡献相对最高；但由于研究区盐碱土表层碱斑破裂，大气的混入作用可能加强，导致 PC 形成过程中固定的大气 CO_2 更多，是土壤呼吸的 2.33 倍，因此盐碱土 SOC 的贡献又低于大气.

4　结论

(1)研究区 4 种土壤类型 SIC $\delta^{13}C$值差异性极显著($P < 0.01$)，PC 占 SIC 比例介于 1.33% ~ 35.71%之间，说明干旱区绿洲土壤 LC 比例高，PC 比例较低.

(2)研究区 4 种类型土壤 PC 形成过程中固定的土壤 CO_2 量在 0.30 ~ 12.40 $g\cdot kg^{-1}$之间，风沙土、灌漠土、棕漠土和盐碱土固定大气 CO_2 的量平均为 0.18、0.79、1.45、8.67 $g\cdot kg^{-1}$，固定土壤呼吸释放 CO_2 的量平均为 0.11、1.65、3.24、3.72 $g\cdot kg^{-1}$，说明风沙土、盐碱土固定 CO_2 的主要贡献来自大气 CO_2，灌漠土、棕漠土土壤呼吸释放 CO_2 为主要贡献.

(3)研究区土壤 SOC 向 SIC 平均转移量为 1.09 $g\cdot kg^{-1}$，说明干旱区绿洲 SOC 的贡献相对较少. 在土壤呼吸中，风沙土、灌漠土、棕漠土和盐碱土 SOC 氧化分解转移量分别为 0.06、0.83、1.62、1.86 $g\cdot kg^{-1}$，盐碱土、棕漠土 SOC 的贡献相对较高，风沙土、灌漠土较低.

(4)本文利用稳定碳同位素技术，实现了对干旱区绿洲土壤碳转移的定量研究，初步探明干旱区绿洲土壤 PC 所占比例及含量、土壤固定 CO_2 的来源及其比例含量，为以后更全面准确分析干旱、半干旱区土壤碳循环提供理论依据.

参考文献：

[1] Ahirwal J, Maiti S K, Singh A K. Changes in ecosystem carbon pool and soil CO_2 flux following post-mine reclamation in dry tropical environment, India [J]. Science of the Total Environment, 2017, **583**: 153-162.

[2] 韩可欣, 禹朴家, 韩东亮, 等. 开垦年限对松嫩碱化草地土壤碳库的影响[J]. 土壤通报, 2017, **48**(1): 127-133.
Han K X, Yu P J, Han D L, *et al*. Effect of cultivation chronosequence on the dynamics of soil carbon pool in Songnen alkaline grassland[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, **48**(1): 127-133.

[3] Basher L, Betts H, Lynn I, *et al*. A preliminary assessment of the impact of landslide, earthflow, and gully erosion on soil carbon stocks in New Zealand[J]. Geomorphology, 2018, **307**: 93-106.

[4] Sreenivas K, Dadhwal V K, Kumar S, *et al*. Digital mapping of soil organic and inorganic carbon status in India[J]. Geoderma, 2016, **269**: 160-173.

[5] 刘哲, 韩霁昌, 孙增慧, 等. 外源新碳对红壤团聚体及有机碳分布和稳定性的影响[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(6): 2351-2359.
Liu Z, Han J C, Sun Z H, *et al*. Effects of fresh carbon on distribution and stability of aggregates and organic carbon in red soil[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(6): 2351-

2359.

[6] 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.

[7] 张林, 孙向阳, 曹吉鑫, 等. 荒漠草原碳酸盐岩土壤有机碳向无机碳酸盐的转移[J]. 干旱区地理, 2010, **33**(5): 732-739.
Zhang L, Sun X Y, Cao J X, *et al*. Transfer of soil organic carbon to soil inorganic carbon in carbonate rock soil of desert grassland[J]. Arid Land Geography, 2010, **33**(5): 732-739.

[8] Zamanian K, Pustovoytov K, Kuzyakov Y. Pedogenic carbonates: forms and formation processes[J]. Earth-Science Reviews, 2016, **157**: 1-17.

[9] 王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 等. 中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 1396-1403.
Wang Y Q, Zhao Y P, Bai Y R, *et al*. Spatial heterogeneity of soil carbon and its fractions in the Wolfberry field of Zhongning County[J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 1396-1403.

[10] 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.

[11] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 等. 半干旱岩溶区土壤次生碳酸盐比例及对岩溶碳汇计算的影响[J]. 中国岩溶, 2016, **35**(2): 164-172.
Huang Q B, Qin X Q, Liu P Y, *et al*. Proportion of pedogenic carbonates and the impact on carbon sink calculation in karst area with semiarid environment[J]. Carsologica Sinica, 2016, **35**(2): 164-172.

[12] 丁虎, 郎赟超, 刘丛强. 土壤碳淋溶流失研究进展[J]. 地球与环境, 2016, **44**(1): 139-146.
Ding H, Lang Y C, Liu C Q. Advances in study on leaching loss of carbon from soil[J]. Earth and Environment, 2016, **44**(1): 139-146.

[13] Nyachoti S, Jin L X, Tweedie C E, *et al*. Insight into factors controlling formation rates of pedogenic carbonates: a combined geochemical and isotopic approach in Dryland soils of the US Southwest[J]. Chemical Geology, 2017, doi: 10.1016/j.chemgeo.2017.10.014

[14] 邓彩云, 王玉刚, 牛子儒, 等. 开垦年限对干旱区土壤理化性质及剖面无机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(1): 254-259.
Deng C Y, Wang Y G, Niu Z R, *et al*. Effect of land reclamation age on soil physicochemical properties and inorganic carbon in aarid areas [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, **31**(1): 254-259.

[15] Hasinger O, Spangenberg J E, Millière L, *et al*. Carbon dioxide in scree slope deposits: a pathway from atmosphere to pedogenic carbonate[J]. Geoderma, 2015, **247-248**: 129-139.

[16] 李红林, 贡璐, 朱美玲, 等. 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征[J]. 土壤学报, 2015, **52**(6): 1345-1355.
Li H L, Gong L, Zhu M L, *et al*. Stoichiometric characteristics of soil in an oasis on northern edge of Tarim Basin, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, **52**(6): 1345-1355.

[17] 蒲晓婷, 林伟盛, 杨玉盛, 等. 杉木幼林土壤垂直剖面 CO_2 通量对土壤增温的响应[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(1): 288-297.
Pu X T, Lin W S, Yang Y S, *et al*. Vertical profile of soil CO_2 flux in a young Chinese fir plantation in response to soil warming [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(1): 288-297.

[18] 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.

[19] Wijesekara H, Bolan N S, Thangavel R, *et al*. The impact of biosolids application on organic carbon and carbon dioxide fluxes in soil[J]. Chemosphere, 2017, **189**: 565-573.

[20] Bucha M, Jędrysek M O, Kufka D, *et al*. Methanogenic fermentation of lignite with carbon-bearing additives, inferred from stable carbon and hydrogen isotopes [J]. International Journal of Coal Geology, 2018, **186**: 65-79.

[21] Bughio M A, Wang P L, Meng F Q, *et al*. Neoformation of pedogenic carbonates by irrigation and fertilization and their contribution to carbon sequestration in soil [J]. Geoderma, 2016, **262**: 12-19.

[22] 孔范龙, 郗敏, 吴健敏, 等. 土壤无机 CO_2 通量(R_{io})研究进展[J]. 生态科学, 2017, **36**(3): 186-192.
Kong F L, Xi M, Wu J M, *et al*. Research review of the soil inorganic CO_2 flux (R_{io}) [J]. Ecological Science, 2017, **36**(3): 186-192.

[23] Ren C J, Wang T, Xu Y D, *et al*. Differential soil microbial community responses to the linkage of soil organic carbon fractions with respiration across land-use changes [J]. Forest Ecology and Management, 2018, **409**: 170-178.

[24] Paudel I, Bar-Tal A, Rotbart N, *et al*. Water quality changes seasonal variations in root respiration, xylem CO_2, and sap pH in citrus orchards [J]. Agricultural Water Management, 2018, **197**: 147-157.

[25] 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.

[26] 赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 等. 旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1598-1604.
Zhao R Y, Liang Z B, Wang Z B, *et al*. Difference of karst carbon sink under different land use and land cover areas in dry season [J]. Environmental Science, 2015, **36**(5): 1598-1604.

[27] 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.

[28] 涂锦娜, 熊友才, 张霞, 等. 玛河流域扇缘带盐穗木土壤速效养分的“肥岛”特征[J]. 生态学报, 2011, **31**(9): 2461-2470.
Tu J N, Xiong Y C, Zhang X, *et al*. “Fertile Island” features of soil available nutrients around *Halostachys caspica* shrub in the alluvial fan area of Manas river watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, **31**(9): 2461-2470.

[29] 雒琼, 王玉刚, 邓彩云, 等. 干旱区土壤剖面无机碳分布及其与盐碱性的关系[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(5): 240-246.
Luo Q, Wang Y G, Deng C Y, *et al*. Distribution of inorganic carbon in soil profile and its relationship with soil saline-alkali property in arid area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, **31**(5): 240-246.

[30] 崔丽峰, 刘丛强, 涂成龙, 等. 黄土地区不同覆被下土壤无机碳分布及同位素组成特征[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(5): 1187-1194.
Cui L F, Liu C Q, Tu C L, *et al*. Soil inorganic carbon and its isotopic composition under different vegetation types in Loess Plateau of Northwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, **32**(5): 1187-1194.

[31] 牛百成, 赵成义, 冯广龙, 等. 秸秆还田对绿洲棉田土壤 CO_2 时空分布的影响[J]. 干旱区研究, 2017, **34**(4): 789-797.
Niu B C, Zhao C Y, Feng G L, *et al*. Effects of cotton straw return to field on spatiotemporal distribution of soil CO_2 in oasis [J]. Arid Zone Research, 2017, **34**(4): 789-797.

[32] 张芳, 张伟杰, 丁彦彦, 等. 艾比湖滨岸盐碱土中碳酸盐的XRD衍射特征与微观形态分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, **37**(12): 3893-3899.
Zhang F, Zhang W J, Ding Y Y, *et al*. XRD diffraction characteristics and microscopic morphology of carbonates in saline-alkaline soil from the shore of the Ai Bi Lake [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, **37**(12): 3893-3899.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 39 No. 8

Aug. 15, 2018

CONTENTS

An Assessment of $PM_{2.5}$-Related Health Risks and Associated Economic Losses in Chinese Cities ····· LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (3467)
Impact of the Electric Power Industry on Air Quality in Winter of Urban Agglomerations Along the Middle Reaches of the Yangtze River ··· SUN Xiao-wei, GUO Xiu-rui, CHENG Shui-yuan (3476)
Capacity Simulation Method Based on Regional Transfer Matrix and $PM_{2.5}$ Concentration Target Constraint ····· LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, YANG Liu-lin, *et al.* (3485)
Analysis of Chemical Composition of the Fine Particulate Matter in Summer in Tianjin City via a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS) ····· WEN Jie, SHI Xu-rong, TIAN Ying-ze, *et al.* (3492)
Pollution Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing ····· PENG Xiao-le, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, *et al.* (3502)
Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Carbonaceous Aerosols in the Cities of Hangzhou and Ningbo ····· XU Hong-hui, XU Jing-sha, HE Jun, *et al.* (3511)
Emission Characteristics and Chemical Components of $PM_{2.5}$ from Open Burning of Municipal Solid Waste ····· WANG Yan, HAO Wei-wei, CHENG Ke, *et al.* (3518)
Size-resolved Emission Factors of Carbonaceous Particles from Domestic Coal Combustion in China ····· YANG Guo-wei, KONG Shao-fei, ZHENG Shu-rui, *et al.* (3524)
Characteristics and Source Analysis of Non-methane Hydrocarbons(NMHC) in Dalian ····· JI De-yu (3535)
Scenario Analyses of the Volatile Organic Compound Emission Allowance and Allocation in the 13th Five-Year Period ····· ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, LIANG Xiao-ming, *et al.* (3544)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Packaging and Printing Industry in Zhejiang Province ····· WANG Jia-de, LÜ Jian-zhang, LI Wen-juan, *et al.* (3552)
Emission Characteristics and Characteristic Substance Identification of Volatile Odorous Organic Compounds in Industries Using Organic Solvents ····· ZHAI Zeng-xiu, MENG Jie, WANG Gen, *et al.* (3557)
Analysis of Aerosol Optical Depth Variation Characteristics for 10 years in Urumqi Based on MODIS_C006 ····· HU Jun, KANG Yan-ming, CHEN Yong-hang, *et al.* (3563)
Motor Vehicle Pollution Control Scenarios of Beijing Subsidiary Administrative Center Based on Road Traffic Flow ····· FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (3571)
Air Pollution Characteristics and Jogger Inhalation Exposure in Typical Running Area of Beijing ····· TAO Shuang-cheng, GAO Shuo-han, XIONG Xin-zhu, *et al.* (3580)
Temporal and Spatial Changes in Sediment Nutrients and Heavy Metals of the Danjiangkou Reservoir Before and After Water Division of the Mid-route Project ····· LI Bing, WANG Ya, ZHENG Zhao, *et al.* (3591)
Fluorescence Characteristics and Environmental Significance of Organic Matter in the Northern Part of Lake Taihu in Spring and Winter ····· LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua (3601)
Contamination Levels and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Aquatic Environment of Key Areas of Taihu Lake ····· ZHU Bing-qing, GAO Zhan-qi, HU Guan-jiu, *et al.* (3614)
Nitrogen and Phosphorous Adsorption Characteristics of Suspended Solids Input into a Drinking Water Reservoir via Typhoon Heavy Rainfall ····· YAO Ling-ai, ZHAO Xue-min, MA Qian-li, *et al.* (3622)
Geochemical Characteristics and Genesis Analyses of High-arsenic Groundwater in the Pearl River Delta ····· ZHANG Chang-yan, HE Jiang-tao, ZHANG Xiao-wen, *et al.* (3631)
Effects of Organic Pollutants on the Bacterioplankton Community in Hangzhou Bay ····· XUAN Li-xia, DAI Wen-fang, YU Wei-na, *et al.* (3640)
Bacterioplankton Community Structure in the Lancang River Basin and the Analysis of Its Driving Environmental Factors ····· CHENG Bao, WANG Xue, XU Ya-qian, *et al.* (3649)
Bacterial Community Structure Characteristics in the Biliuhe Reservoir and Its Key Driving Factors ····· WANG Huan, ZHAO Wen, XIE Zai-gang, *et al.* (3660)
Analysis of the Temporal and Spatial Distribution of the Diversity of the Denitrifying Anaerobic Methane-Oxidizing Bacterial Community in the Sediments of the Hunhe River and Its Relationship with Environmental Factors ····· ZHANG Ya-di, SONG Yong-hui, PENG Jian-feng, *et al.* (3670)
Influences of Anthropogenic Activities on the Community Structure of N-DAMO Bacteria in the North Canal ····· LIU Yang, CHEN Yong-juan, WANG Xiao-yan, *et al.* (3677)
Impact of Exogenous Nitrogen Import on Sediment Denitrification and N_2O Emissions in Ditches Under Different Land Uses ····· SHE Dong-li, CHEN Xin-yi, GAO Xue-mei, *et al.* (3689)
Sedimentation Characteristics and Pollutant Content Distribution of Storm Drainage Sediments ····· SHANG Yu, ZHOU Yi, LIAO An-yi, *et al.* (3696)
Effect of Cr(Ⅵ) on Coagulation Process of Different Coagulants ····· GAO Qian, ZHANG Da-wei, XU Hui, *et al.* (3704)
Enhancement of Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A with Peroxymonosulfate Activated by a $Co_3O_4/BiVO_4$ Composite Photoanode ····· LI Jiang, WANG Yan, ZHANG Xiu-fang, *et al.* (3713)
Preparation and Characterization of a Calcium Alginate/Biochar Microsphere and Its Adsorption Characteristics and Mechanisms for Pb(Ⅱ) ····· YU Chang-jiang, DONG Xin-yu, WANG Miao, *et al.* (3719)
Behaviors and Mechanisms of CIP and OFL Adsorption by Magnetic Biochar ····· ZHAO Hua-xuan, LANG Yin-hai (3729)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect New Psychoactive Substances in Wastewater ····· CHEN Pei-pei, DU Peng, ZHOU Zi-lei, *et al.* (3736)
Effect of Hybrid Process of Pre-ozonation and CNT Modification on Hollow Fiber Membrane Fouling Control ····· GUAN Yu-qi, WANG Kai-lun, ZHU Xue-dong, *et al.* (3744)
Bioregeneration of Anion Exchange Resin Used in Nitrate Removal ····· YE Ting, ZHANG Guang, WANG Ke, *et al.* (3753)
Preparation of Prussian Blue@Yeast Catalyst and Its Heterogeneous Fenton Performance ····· CHEN Si, BAI Bo, WANG Hong-lun, *et al.* (3759)
Nitrogen Removal of Double-bacteria-layer System via PN/A Process ····· XU Jing-yi, DU Jun, YANG Yi-feng, *et al.* (3767)
Inhibitory Effect of Phenol on Phosphorus Removal Performance of an EBPR System ····· MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, *et al.* (3775)
Treatment of Old Landfill Leachate via a Denitrification-Partial Nitritation-ANAMMOX Process ····· WANG Fan, LU Ming-yu, YIN Ji-qiang, *et al.* (3782)
Denitrification Characteristics and Functional Genes of Denitrifying Bacteria Under Aerobic or Anaerobic Conditions ····· KANG Peng-liang, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, *et al.* (3789)
Characteristic of Benzo[a]pyrene Anaerobic Degradation by Phenol Co-substrate and Microbial Communities from Two Types of Sludge ····· WU Hai-zhen, HU Xiao-yi, WANG Ming, *et al.* (3797)
Spectroscopic Characterization of DOM During Hyperthermophilic Composting of Sewage Sludge ····· LIU Xiao-ming, YU Zhen, ZHOU Pu-xiong, *et al.* (3807)
Effects of Biochar on Nitrous Oxide Fluxes and the Abundance of Related Functional Genes from Agriculture Soil in the North China Plain ····· LIU Xing-ren, ZHAO Guang-xin, ZHANG Qing-wen, *et al.* (3816)
Nitrous Oxide Production in Response to Oxygen in a Solar Greenhouse Vegetable Soil ····· CHEN Ji-ji, SONG He, CAO Wen-chao, *et al.* (3826)
Comprehensive Study of Lead Speciation and Its Bioavailability in Soils From a Lead/Zinc Mining Area by Micro X-Ray Fluorescence and X-Ray Absorption Near-Edge Structure ····· SUN Xiao-yan, LIU Jian, LUO Li-qiang (3835)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Soil and Its Bioaccumulation by Dominant Plants in a Lead-Zinc Mining Area, Nanjing ····· LI Jun-kai, ZHANG Dan, ZHOU Pei, *et al.* (3845)
Preparation of Iron-Aluminum Modified Diatomite and Its Immobilization in Cadmium-Polluted Soil ····· YANG Yu-zhong, ZHU Jian, XIAO Yuan-yuan, *et al.* (3854)
Transfer of Soil Organic Carbon to Inorganic Carbon in Arid Oasis Based on Stable Carbon Isotope Technique ····· LI Yang-mei, GONG Lu, AN Shen-qun, *et al.* (3867)
Environmental Filters Drive the Assembly of the Soil Fungal Community in the *Larix principis-rupprechtii* Forests of the Guandi Mountains ····· ZHAO Peng-yu, LI Cui, CHAI Bao-feng (3876)
Effects of Transgenic Maize with *cry1Ab* and *Epsps* Genes C0030.3.5 on the Abundance and Community Structure of Soil Nitrogen-fixing Bacteria ····· WANG Rui, ZHU Ke, LI Gang, *et al.* (3885)
Effects of Gypsum on CH_4 Emission and Functional Microbial Communities in Paddy Soil ····· HU Xiang-yu, XIANG Qiu-jie, MU Zhi-jian (3894)
Effects of Long-term Fertilization on Enzyme Activities in Profile of Paddy Soil Profiles ····· DU Lin-sen, TANG Mei-ling, ZHU Zhen-ke, *et al.* (3901)
Effects of Sediment Burial and Exogenous Cd Input on Biomass Allocation and Antioxidative Enzyme Activities of *Suaeda salsa* in the Coastal Wetland of the Yellow River Delta ····· SONG Hong-li, WANG Li-zhi, YU Wan-ni, *et al.* (3910)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wheat Grains Cultivated in Kaifeng Irrigation Area of the Yellow River ····· KANG Guo-hua, ZHANG Peng-yan, LI Yan-yan, *et al.* (3917)
Effect of Graphene Oxide on Algal Toxicity of Dibutyl Phthalate ····· TU Hai-feng, LIU Cheng, WANG Yu-qing, *et al.* (3927)
Effects of Organic Substrates on ANAMMOX-MFC Denitrification Electrogenesis Performance ····· ZU Bo, MA Lan, LIU Bo, *et al.* (3937)
Well-to-Wheels Fossil Energy Consumption and CO_2 Emissions of Hydrogen Fuel Cell Vehicles in China ····· LIN Ting, WU Ye, HE Xiao-yi, *et al.* (3946)
Secondary Organic Aerosols from Aqueous Reaction of Aerosol Water ····· YE Zhao-lian, QU Zhen-xiu, MA Shuai-shuai, *et al.* (3954)