

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第3期

Vol.39 No.3

**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

长三角典型站点冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 中 OC、EC 污染特征 ..... 康晖, 朱彬, 王红磊, 施双双 (961)

南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用 ..... 于超, 于兴娜, 赵天良, 张蕾, 马国煦, 王咏薇 (972)

常州夏冬季 PM<sub>2.5</sub> 中无机组分昼夜变化特征与来源解析 ..... 刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 苏亚兰, 叶招莲 (980)

天津市春季道路降尘 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 中的元素特征 ..... 王士宝, 姬亚芹, 李树立, 张伟, 张蕾 (990)

北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评价 ..... 张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 王小颖, 杨帅, 许骁鹏, 王书亭, 谷超, 王梦蕾, 任浩, 张子洋, 闫广轩, 曹治国, 王跃思 (997)

山西省武乡县城大气 PM<sub>2.5</sub> 痕量重金属的生态和健康风险分析 ..... 郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 周欢, 彭妍, 翟帅莹, 李金磊, 陈雨杉 (1004)

隧道中机动车排放颗粒物及无机元素特征 ..... 李凤华, 张衍杰, 张静, 袁远, 吴琳, 毛洪钧 (1014)

河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征 ..... 王琛, 尹沙沙, 于世杰, 卫军华, 谷幸珂, 官密秘, 张瑞芹 (1023)

城市道路行道树池裸地扬尘排放特征 ..... 李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 杨涛, 曲松, 石爱军, 黄玉虎 (1031)

DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响 ..... 楼狄明, 耿小雨, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃 (1040)

南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律 ..... 黄飘逸, 徐斌, 郭东良 (1046)

广州市流溪河水体中 6 种内分泌干扰素时空分布特征与环境风险 ..... 樊静静, 王赛, 唐金鹏, 戴玉女, 王林, 龙胜兴, 何文祥, 刘帅磊, 王佳希, 杨扬 (1053)

西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源 ..... 张清华, 孙平安, 何师意, 文化, 刘明隆, 于爽 (1065)

太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程 ..... 李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 孙伟 (1076)

海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价 ..... 曾维特, 杨永鹏, 张东强, 刘兵, 张航飞, 吴多誉, 王晓林 (1085)

天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响 ..... 许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 蓝靖, 田永, 赵宗山 (1095)

太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析 ..... 查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 杨周生, 许海, 沈睿杰, 钟春妮 (1102)

春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性 ..... 李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆 (1113)

不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素 ..... 周睿, 袁旭音, Marip Ja Bawk, 于辉辉, 章琪, 唐豆豆 (1122)

水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响 ..... 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽 (1129)

深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替 ..... 商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 康鹏亮, 王跃, 钊珍芳, 刘彤彤 (1141)

太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素 ..... 薛银刚, 刘菲, 孙萌, 江晓栋, 耿金菊, 滕加泉, 谢文理, 张皓, 陈心一 (1151)

分层型水源水库沉积物需氧量特性 ..... 苏露, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家炜, 王晓江 (1159)

污水氮浓度和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响 ..... 马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 吴金水 (1167)

水体氮营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响 ..... 周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥 (1180)

化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除 ..... 菅之舆, 常洋洋, 王立新, 梁金松, 柏耀辉 (1188)

铜铁氧体法处理模拟染料废水 ..... 韩志勇, 韩昆, 郝昊天, 于建伟, 石宝友, 庄媛, 孔岩 (1195)

草酸根对 α-FeOOH 多相 UV-Fenton 催化能力的增效实验 ..... 苗笑增, 戴慧旺, 陈建新, 蒋柏泉, 龚烟 (1202)

生物基纳米 HZO 杂化材料的研制及其除磷特性 ..... 邱慧, 秦智峰, 刘凤玲, 梁晨, 宋明霞, 许正文, 管益东 (1212)

铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中硝酸根的吸附特性 ..... 郑晓青, 韦安磊, 张一璇, 史良干, 张潇 (1220)

PAAm/HACC 半互穿网络水凝胶的制备及其对水中腐殖酸的吸附性能 ..... 刘泽瑛, 周少奇, 马福臻 (1233)

二氧化钛对地下水中砷硅的吸附及再生回用 ..... 马文静, 阎莉, 张建锋 (1241)

一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制 ..... 李文江, 于莉芳, 苗瑞, 马百文 (1248)

中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征 ..... 闫旭, 邱德志, 郭东丽, 齐星昊, 郑仕侃, 程轲, 孙剑辉, 刘建伟 (1256)

硝化耦合 CANON 的铁锰生物净化工艺启动与运行 ..... 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王艳菊, 吕赛赛, 张杰 (1264)

纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性 ..... 顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 黄勇, 尤星怡, 金润, 张文静, 董石语 (1272)

DO/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 实现短程硝化过程中生物膜特性 ..... 赵青, 卞伟, 李军, 王文啸, 孙艺齐, 梁东博, 张舒燕 (1278)

AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响 ..... 成朔, 李冬, 张杰, 李帅, 曹瑞华, 吕赛赛 (1286)

有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响 ..... 李冬, 王艳菊, 吕育锋, 曹瑞华, 李帅, 张杰 (1294)

中试一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的启动与区域特性 ..... 周正, 王凡, 林兴, 董石语, 朱强, 李祥, 黄勇 (1301)

硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响 ..... 吕亮, 尤雯, 张敏, 吴鹏, 沈耀良 (1309)

磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响 ..... 宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 袁秋红, 赵力剑, 廖黎明, 黄智 (1316)

好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分 ..... 杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 黄文力 (1325)

环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响 ..... 戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 舒小铭, 徐灿灿, 陈昌军 (1333)

CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析 ..... 邢金良, 张岩, 陈昌明, 张博康, 郭威, 马翔山 (1342)

磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响 ..... 王佩琦, 周伟丽, 何圣兵, 黄荣振 (1350)

甲烷厌氧氧化协同硝酸盐还原菌群驯化及其群落特征 ..... 薛松, 张梦竹, 李琳, 刘俊新 (1357)

城市尾水排海过程中微生物及主要致病菌扩散规律 ..... 徐爱玲, 牛成洁, 宋志文, 郎秀璐, 郭明月 (1365)

氧四环素的微生物燃料电池处理及微生物群落 ..... 严伟富, 肖勇, 王淑华, 丁蕊, 赵峰 (1379)

近 30 年余干县耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素 ..... 江叶枫, 钟珊, 李婕, 王澜珂, 郭熙 (1386)

中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性 ..... 王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 张兴 (1396)

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 ..... 解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 朱明, 王小涵 (1404)

青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价 ..... 周雯雯, 李军, 胡健, 朱兆洲 (1413)

基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤重金属源解析 ..... 卢鑫, 胡文友, 黄标, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 卞荣禧 (1421)

铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用 ..... 费琦, 阎秀兰, 李永华 (1430)

我国 3 个城市人体血清中新型溴代阻燃剂水平趋势及分布特征 ..... 王庆华, 袁浩东, 金军, 李鹏, 马玉龙, 王英 (1438)

《环境科学》征订启事(979) 《环境科学》征稿简则(996) 信息(1022, 1064, 1293)

# 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

解雪峰<sup>1,2</sup>, 濮励杰<sup>1,2\*</sup>, 王琪琪<sup>3</sup>, 朱明<sup>1,2</sup>, 王小涵<sup>1,2</sup>

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 南京大学地理与海洋科学学院, 国土资源部海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210023; 3. 江苏省地质调查研究院, 南京 210080)

**摘要:** 土壤酶几乎参与所有的土壤生物化学过程, 厘清土壤酶活性与土壤理化性质的关系能够揭示围垦后土壤质量变化状况, 为土壤生态系统的科学调控提供理论依据. 选择江苏中部如东不同围垦年限 (7、32、40、63 a) 的滩涂围垦区为研究对象, 以未围垦光滩作为对照 (0 a), 利用经典统计学分析和冗余分析研究不同围垦年限土壤酶活性变化过程, 及其与土壤理化性质之间的关系. 经典统计学分析表明不同围垦年限间土壤酶活性具有显著性差异, 淀粉酶、脱氢酶和酸性磷酸酶活性随着围垦年限的增长呈现出先上升后下降的过程, 而脲酶和碱性磷酸酶活性则随着围垦年限的增长呈现出先上升-下降-再上升的过程. 同时, 不同围垦年限的表层土壤酶活性基本上高于深层. 冗余分析表明 5 种理化性质在前两轴累积能够解释土壤酶活性的 69.8%, pH、电导率、土壤有机碳、全氮和全磷与土壤酶活性呈极显著相关关系 ( $P < 0.01$ ). 土壤理化性质对土壤酶活性影响重要性大小排序为全氮 > 有机碳 > pH > 全磷 > 电导率.

**关键词:** 土壤酶活性; 理化性质; 冗余分析; 围垦年限; 滩涂围垦区

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)03-1404-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201707223

## Response of Soil Enzyme Activities and Their Relationships with Physicochemical Properties to Different Aged Coastal Reclamation Areas, Eastern China

XIE Xue-feng<sup>1,2</sup>, PU Li-jie<sup>1,2\*</sup>, WANG Qi-qi<sup>3</sup>, ZHU Ming<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-han<sup>1,2</sup>

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Key Laboratory of the Coastal Zone Exploitation and Protection of Ministry of Land and Resources, School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210080, China)

**Abstract:** Land reclamation transforms a tidal flat from a marine ecosystem to terrestrial ecosystem, which significantly changes the soil ecosystem process, affecting the soil enzyme activities. Soil enzyme is involved in almost all soil biochemical processes. Clarifying the relationship between soil physicochemical properties and soil enzyme activities can reveal the changes of soil quality after reclamation and provide a theoretical basis for the scientific regulation of the soil ecosystem. In this study, a total of 72 soil samples were collected from a coastal reclamation area with different years of reclamation (0, 7, 32, 40, and 63 a) in Rudong County. The changes in soil physicochemical properties and enzyme activities within different reclamation years were analyzed by classical statistical analysis, and the relationship between soil enzyme activities and physicochemical properties was analyzed using a redundancy analysis. The results showed that longterm land reclamation had significant effects on soil physicochemical properties and enzyme activities. pH and electrical conductivity showed a decreasing trend after reclamation, while the content of soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus showed a trend of “rapidly accumulate-gradually consume-accumulate again” with increasing years of reclamation. Compared with the bare flat area (0 a), amylase, dehydrogenase, and acid phosphatase activity initially increased and then decreased with increasing years of reclamation, while urease and alkaline phosphatase activities were characterized by an increase-decrease-increase trend. Meanwhile, the enzyme activities within different reclamation ages were basically higher in surface soil than deep layers. Redundancy analysis revealed that the soil physicochemical properties explained 69.8% of the variation in soil enzyme activities, and an obvious relationship existed between pH, electronic conductivity, soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, and soil enzyme activities ( $P < 0.01$ ). The order of importance of soil physicochemical properties to soil enzyme activities was as follows: total nitrogen > soil organic carbon > pH > total phosphorus > electronic conductivity.

**Key words:** soil enzyme activities; physicochemical properties; redundancy analysis; reclamation ages; coastal reclamation area

随着沿海地区经济的迅速发展, 对于土地资源的需求也日益增强<sup>[1]</sup>. 滨海盐碱滩涂作为重要的后

收稿日期: 2017-07-26; 修订日期: 2017-09-02

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41230751); 国土资源部公益性行业科研专项 (201511086); 江苏省研究生科研创新计划项目 (KYCX17\_0024)

作者简介: 解雪峰 (1991 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为土地利用与环境效应, E-mail: xiexuefeng2008@126.com

\* 通信作者, E-mail: ljpu@nju.edu.cn

备土地资源, 在过去几十年中被大量围垦. 大规模的滩涂围垦活动极大地缓解了沿海区域耕地紧缺的压力<sup>[2]</sup>. 围垦活动使得滩涂从海洋生态系统向陆地生态系统转化, 显著地改变了土壤生态系统过程, 影响土壤理化性质和植物生长, 进而影响土壤酶活性的变化<sup>[3]</sup>.

土壤酶作为土壤生态系统中最活跃的有机成分之一, 几乎参与了土壤中所有的生物化学过程<sup>[4,5]</sup>, 能够反映土壤生物化学过程的强度与方向<sup>[6]</sup>. 土壤酶活性驱动土壤有机物质的合成、分解与转化、养分循环、以及无机物质的氧化与还原等过程<sup>[7]</sup>, 是土壤生态系统代谢的主要驱动力<sup>[8]</sup>, 在土壤生态系统中碳、氮、磷循环和植物养分转化过程中扮演重要角色<sup>[9]</sup>. 土壤酶活性比土壤物理指标和化学指标更为敏感, 能够灵敏地指示土壤生境的变化, 可作为评价围垦后土壤质量和土壤肥力变化的重要表征<sup>[10,11]</sup>. 土壤酶活性与土壤理化性质密切相关. 土壤酶能够活化土壤中各类元素的化合物, 进而提升土壤有效养分、改善土壤质量; 同时, 土壤理化性质提供了酶促反应的底物和环境, 直接影响着酶活性大小<sup>[12]</sup>.

当前针对土壤酶活性的时间变化研究主要集中在农田<sup>[13]</sup>、森林<sup>[14]</sup>、湿地<sup>[15]</sup>、绿洲<sup>[12]</sup>等生态系统, 较少报道滨海滩涂围垦区土壤酶活性随围垦时间序列的持续变化. 在分析方法上, 以往的研究多采用传统的统计分析如相关分析、方差分析、因子分析和多元线性回归分析, 当变量数据较多时, 线性相关等分析则受到限制<sup>[16]</sup>. 数量生态学中的冗

余分析(redundancy analysis, RDA)是一种非线性多元直接梯度排序法, 包含信息量大, 结果明确直观, 能够直观地给出多变量间的相互作用关系<sup>[17,18]</sup>, 反映滩涂围垦区土壤酶活性与土壤理化性质之间的数量关系.

本文以江苏中部如东不同围垦年限(0~63 a)滨海滩涂围垦区为研究对象, 采用经典统计分析和冗余分析, 探讨不同围垦年限土壤酶活性的变化特征及其与土壤理化性质之间的关系, 以期揭示滨海滩涂围垦区土壤生态系统的结构和功能提供基础数据, 同时为开展土壤生态系统的科学调控提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于江苏省东南部的如东县(120°42'~121°22'E, 32°12'~32°36'N), 地处长江三角洲北翼, 东面濒临黄海(图1). 研究区属北亚热带季风性湿润气候, 光照充足, 雨热同期, 年平均温度15.0℃, 年平均降水量1 028.6 mm. 研究区土壤主要由现代海洋沉积物和河流沉积物组成, 属滨海盐碱土. 如东县拥有海岸线长度106 km, 滩涂面积约693 km<sup>2</sup>, 并仍处于不断淤涨中. 作为典型的滩涂围垦区, 如东县在新中国成立后已围垦面积达到了241 km<sup>2</sup>. 围垦区土地利用类型主要包括耕地和水产养殖用地, 伴随着少部分的林地和工业用地. 本研究选择如东县4个不同围垦年限(7、32、40和63 a)的滩涂围垦区为研究区, 以光滩(0a)为对照

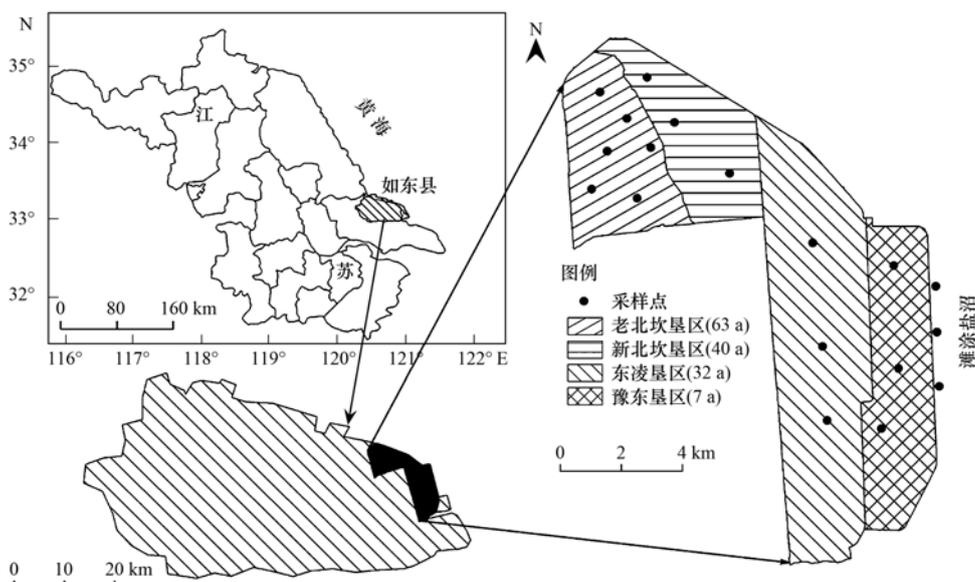


图1 研究区域及采样点分布

Fig. 1 Study area and distribution of soil sampling sites

区, 总面积约为 70.15 km<sup>2</sup>.

## 1.2 样品采集与分析

土壤样品于 2014 年 12 月分别在光滩 (0 a)、豫东垦区 (7 a)、东陵垦区 (32 a)、新北坎垦区 (40 a) 和老北坎垦区 (63 a) 选取不同土地利用类型进行采集. 依据典型性、代表性和一致性原则共选取 18 个土壤样方 (3 m × 3 m), 每个样方由 3 个样点的土壤混合而成. 采样前先移除地表未腐解的凋落物, 采用多点混合法采集 0 ~ 40 cm 深度的土壤样品, 并分为 4 层, 每层 10 cm, 共采集土壤混合样品 72 个 (图 1). 所有土壤样品被分成两部分, 一部分储存于 4℃ 的恒温箱, 用于测定土壤脲酶 (Ure)、淀粉酶 (Amy)、脱氢酶 (Deh)、酸性磷酸单酯酶 (AcP) 和碱性磷酸单酯酶活性 (AlP); 另一部分经自然风干后研磨, 并分别通过 2、0.25 和 0.149 mm 的尼龙筛, 用以测定土壤理化性质指标, 包括电导率、pH、有机碳、全氮、全磷.

土壤理化性质的测定参照土壤农化分析方法<sup>[19]</sup>, 土壤电导率使用盐度计测定水土比为 1:5 的混合溶液得到; pH 用 PHS-3C 型 pH 计测得; 有机碳含量采用高温外热重铬酸钾氧化法测定; 全氮含量采用开氏定氮法测定; 全磷采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定. 土壤酶的测定参照关松荫的测定方法<sup>[20]</sup>, 其中脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定; 淀粉酶活性采用 3, 5-二硝基水杨酸比色法测定; 脱氢酶活性采用三苯基四氮唑氯化物 (TTC) 比色法测定; 酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定 (酸性磷酸酶用 pH 值为 6.5 的缓冲液, 碱性磷酸酶用 pH 值为 11 的缓冲液).

## 1.3 数据处理

所有数据均在 SPSS 19.0 for Windows 软件中进行统计分析, 其中土壤理化性质和土壤酶活性的显著性差异采用单因素方差法 (One-way ANOVA) 进行分析, 并通过 LSD 法进行显著性多重比较, 差异显著性水平为  $\alpha = 0.05$ . 土壤理化性质和土壤酶活性的关系在 Canoco 4.5 for Windows 软件中进行分析. 首先对指标进行趋势对应分析, 发现梯度长度最大值为 1.407, 小于 3, 因此采用线性模型中的冗余分析为排序模型进行两者关系研究. 采用蒙特卡洛检验对土壤理化性质进行重要性排序<sup>[21]</sup>. 采用 Canoco 4.5 中的 *t*-value 双序图确定单一理化性质对土壤酶活性的影响. 若某个土壤酶活性指标的箭头连线完全落入线圈中, 则代表该种土壤酶活性与研究的理化性质具有显著相关性, 如果落入红色线

圈表示呈显著正相关, 蓝色线圈为显著负相关<sup>[12]</sup>.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同围垦年限土壤理化性质变化

研究区土壤理化性质的统计结果如表 1 所示. 研究区土壤 pH 在围垦后经历了短暂上升后波动下降, 围垦 32 a 后土壤 pH 显著低于围垦初期; 且随剖面深度增加, 土壤 pH 含量基本呈上升趋势. 土壤电导率随着围垦时间的增长显著下降, 至围垦 32 a 后, 土壤电导率逐渐稳定, 基本达到非盐渍化水平; 从剖面上来看, 光滩和围垦 7 a 后的土壤电导率均随剖面深度增加而降低, 而围垦 32a 以后的土壤电导率在剖面上趋于稳定. 研究区土壤养分含量偏低, 全氮、全磷和有机碳的平均含量分别在 0.23 ~ 1.26、0.66 ~ 1.19 和 1.70 ~ 10.37 g·kg<sup>-1</sup> 之间. 表层土壤的全氮、全磷和有机碳的平均含量均在围垦后 32 a 达到最高值, 为 1.26、1.19 和 10.37 g·kg<sup>-1</sup>, 分别是光滩的平均含量的 3.41、1.80 和 2.64 倍. 土壤的全氮、全磷和有机碳的平均含量随着围垦年限的增长呈现出“迅速累积-逐渐消耗-再次累积”的过程, 且基本上均随剖面深度的增加而降低.

### 2.2 不同围垦年限土壤酶活性变化

研究区不同围垦年限土壤酶活性的变化特征如图 2 所示. 相对于光滩 [4.41 mg·(kg·h)<sup>-1</sup>], 围垦后表层 (0 ~ 10 cm) 土壤脲酶平均活性迅速提升, 至围垦后 32 a 达到最高值 [41.40 mg·(kg·h)<sup>-1</sup>], 此后 8 a 间迅速下降 [8.30 mg·(kg·h)<sup>-1</sup>], 至围垦 63 a 后又迅速回升 [40.22 mg·(kg·h)<sup>-1</sup>]. 10 ~ 20 cm 深度的土壤脲酶活性随围垦时间变化的趋势与表层土壤相似, 而 20 ~ 40 cm 深度的土壤脲酶活性在围垦 40 a 后显著高于光滩和围垦初期. 除围垦后 40 a, 其余土壤脲酶活性均随剖面深度的增加而降低 [图 2(a)].

表层土壤淀粉酶活性围垦后逐渐提升, 至 40 a 达到最高值 [11.84 mg·(kg·h)<sup>-1</sup>], 显著高于光滩 [2.44 mg·(kg·h)<sup>-1</sup>]. 10 ~ 20 cm 和 20 ~ 30 cm 的淀粉酶活性均随围垦时间的增长呈现出下降-上升-下降的过程, 而 30 ~ 40 cm 深度的土壤淀粉酶活性则随围垦时间变化的趋势与表层相似 [图 2(b)].

围垦后表层土壤脱氢酶活性经历了快速上升然后逐渐下降的过程, 围垦 7 a [5.57 mg·(kg·h)<sup>-1</sup>] 和围垦 32 a [6.15 mg·(kg·h)<sup>-1</sup>] 的土壤脱氢酶活

表 1 不同围垦年限土壤理化性质变化<sup>1)</sup>

Table 1 Variations in soil physicochemical properties with different reclamation ages

围垦年限/a	深度/cm	pH	EC <sub>1:5</sub> /dS·m <sup>-1</sup>	TN/g·kg <sup>-1</sup>	TP/g·kg <sup>-1</sup>	SOC/g·kg <sup>-1</sup>
0	0~10	8.42 ± 0.09a	4.25 ± 2.29a	0.37 ± 0.19b	0.66 ± 0.05d	3.93 ± 2.31c
	10~20	8.40 ± 0.05b	3.25 ± 1.24a	0.27 ± 0.06c	0.66 ± 0.06c	2.59 ± 0.55b
	20~30	8.44 ± 0.02b	3.08 ± 1.07a	0.24 ± 0.06c	0.70 ± 0.03c	2.00 ± 0.17b
	30~40	8.49 ± 0.05ab	3.09 ± 1.24a	0.23 ± 0.04b	0.71 ± 0.01b	1.90 ± 0.26c
7	0~10	8.48 ± 0.11a	1.21 ± 0.63ab	0.56 ± 0.19b	0.92 ± 0.21bc	3.97 ± 0.68c
	10~20	8.75 ± 0.27a	0.92 ± 1.21b	0.34 ± 0.06bc	0.78 ± 0.08bc	2.40 ± 0.26b
	20~30	8.79 ± 0.36a	0.91 ± 1.21b	0.26 ± 0.02bc	0.78 ± 0.08abc	2.20 ± 0.17b
	30~40	8.77 ± 0.27a	0.84 ± 0.96b	0.36 ± 0.18ab	0.73 ± 0.05b	1.70 ± 0.17c
32	0~10	7.89 ± 0.06b	0.16 ± 0.05b	1.26 ± 0.25a	1.19 ± 0.20a	10.37 ± 1.80a
	10~20	8.25 ± 0.05b	0.16 ± 0.10b	0.48 ± 0.08b	0.83 ± 0.05b	3.27 ± 0.81b
	20~30	8.38 ± 0.11b	0.17 ± 0.12b	0.33 ± 0.02b	0.72 ± 0.06bc	2.47 ± 0.21b
	30~40	8.38 ± 0.06b	0.17 ± 0.11b	0.39 ± 0.16ab	0.81 ± 0.08ab	2.83 ± 0.68bc
40	0~10	8.27 ± 0.12a	0.53 ± 0.23ab	0.61 ± 0.05b	0.85 ± 0.08cd	4.33 ± 0.91c
	10~20	8.42 ± 0.24ab	0.45 ± 0.20b	0.47 ± 0.014b	0.78 ± 0.08bc	3.00 ± 1.08b
	20~30	8.32 ± 0.10b	0.53 ± 0.22b	0.53 ± 0.04a	0.81 ± 0.04ab	3.97 ± 0.65a
	30~40	8.21 ± 0.22b	0.59 ± 0.17b	0.59 ± 0.10a	0.85 ± 0.08a	4.67 ± 1.40a
63	0~10	8.04 ± 0.17b	0.20 ± 0.11b	1.05 ± 0.13a	1.09 ± 0.06ab	8.08 ± 0.91b
	10~20	8.29 ± 0.20b	0.18 ± 0.10b	0.80 ± 0.12a	0.97 ± 0.09a	6.25 ± 1.09a
	20~30	8.41 ± 0.20b	0.19 ± 0.11b	0.58 ± 0.06a	0.86 ± 0.06a	4.17 ± 0.68a
	30~40	8.48 ± 0.20b	0.20 ± 0.12b	0.52 ± 0.17a	0.79 ± 0.06ab	3.20 ± 0.51b

1) 同一列中不同小写字母表示同一深度不同围垦年限间存在显著差异

性显著高于未围垦区[ $1.31 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ ], 而围垦 40 a [ $3.17 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ ] 和围垦 63 a [ $2.88 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ ] 的土壤脱氢酶活性和未围垦区之间并无显著性差异. 从剖面来看, 10~20 cm 深度土壤各围垦年限间的土壤脱氢酶活性并无显著性差异, 而 20~30 cm 和 30~40 cm 深度的土壤脱氢酶活性在围垦后 40 a 显著高于未围垦区和其它年限围垦区[图 2(c)].

围垦后表层、20~30 cm 和 30~40 cm 的土壤酸性磷酸酶活性同样经历了先上升后下降的过程, 并分别在围垦 32 a [ $206.08 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ ]、围垦 40 a [ $115.15 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ ] 和围垦 40 a [ $127.37 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ ] 后达到最大值, 显著高于未围垦区和围垦初期. 10~20 cm 深度土壤各围垦年限间的土壤酸性磷酸酶活性经历了先下降后上升的过程,

并在围垦 63 a 后达到最大值, 显著高于其他年限围垦区[图 2(d)].

表层土壤碱性磷酸酶活性围垦后同样经历了上升-下降-再上升的过程, 并在围垦 32 a [ $405.38 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ ] 后达到最大值, 显著高于光滩 [ $64.50 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ ] 和围垦初期 [ $111.03 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1}$ ]. 从剖面来看, 10~20 cm 和 20~30 cm 深度的土壤碱性磷酸酶活性围垦后经历了逐渐上升的过程, 而 30~40 cm 深度的土壤碱性磷酸酶活性则呈现出先上升后下降的趋势. 除围垦后 40 a, 其余土壤碱性磷酸酶活性同样随剖面深度的增加而逐渐降低[图 2(e)].

## 2.3 土壤酶活性与理化性质关系

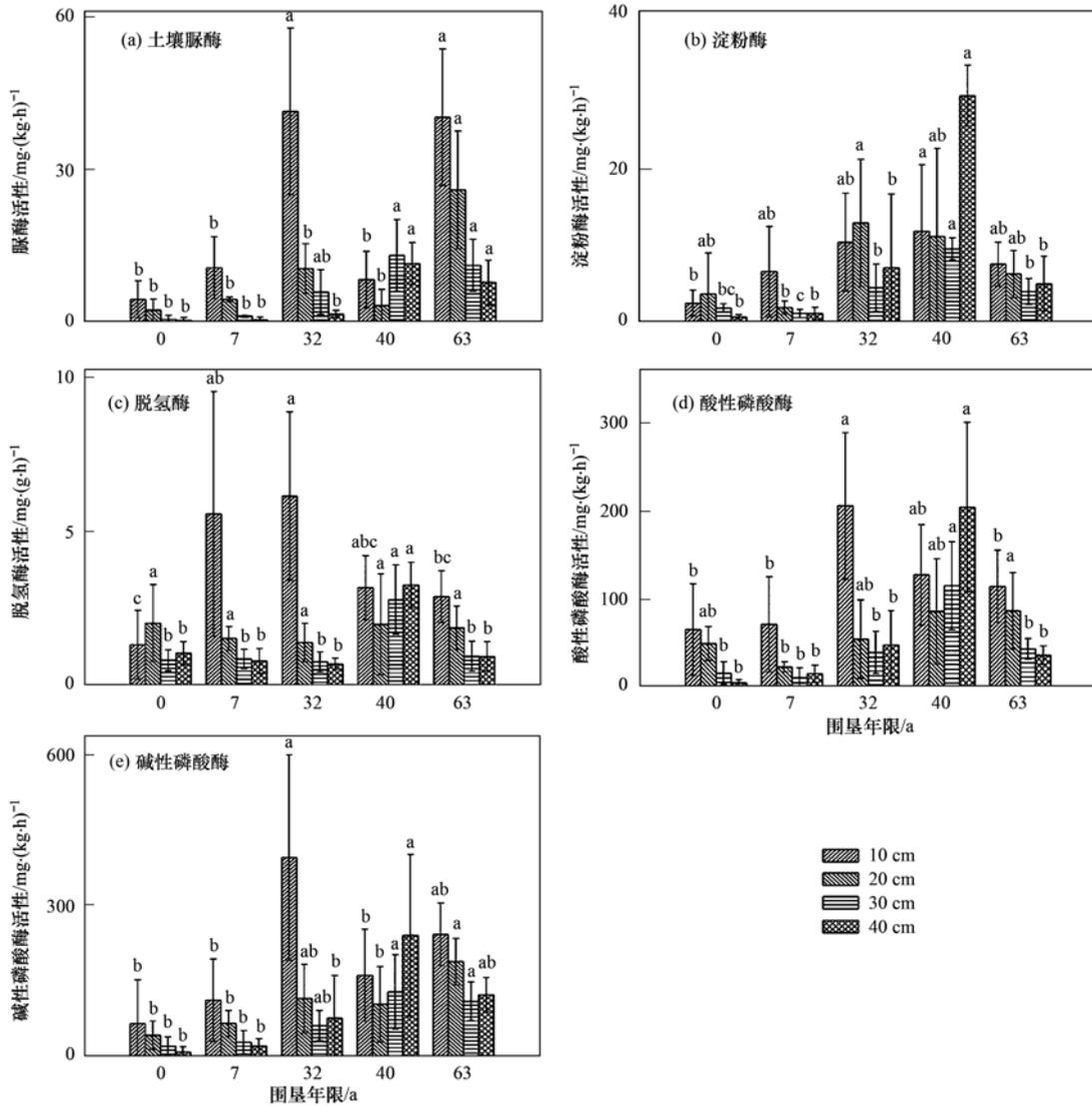
### 2.3.1 土壤酶活性与理化性质 RDA 排序

表 2 为土壤理化性质对 5 种土壤酶活性差异性

表 2 土壤酶活性 RDA 排序的特征值及累积解释量

Table 2 Eigenvalues and cumulative variances of RDA ordination of soil enzyme activities

排序轴	第 I 轴	第 II 轴	第 III 轴	第 IV 轴
土壤酶活性特征解释量	0.689	0.009	0.001	0.000
土壤酶活性特征与理化性质相关	0.857	0.406 0	0.362	0.255
土壤酶活性特征累积解释量/%	68.9	69.8	69.9	69.9
土壤酶活性特征-理化性质关系累积解释量/%	98.6	99.9	100.0	100.0
典范特征值			0.699	
总特征值			1.000	



柱状图上方不同小写字母表示不同围垦年限间土壤酶活性在  $P < 0.05$  水平差异显著  
 图2 不同围垦年限0~40 cm土壤脲酶、淀粉酶、脱氢酶、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活性变化  
 Fig. 2 Changes of soil urease, amylase, dehydrogenase, acid phosphatase, and alkaline phosphatase activity at 0-40 cm depth in different reclamation ages

解释量. 5种土壤酶活性在第I轴、第II轴的解釋量分别为68.9%和0.9%,即前两轴5种土壤理化性质累计解释土壤酶活性特征的69.8%;且对土壤酶活性与土壤理化性质关系的累计解释量达到了99.9%,表明前两轴能够反映土壤酶活性与理化性质关系的绝大部分信息,并且主要是由第I轴决定.

从土壤酶活性与理化性质的二维排序图(图3)发现,全氮、有机碳和pH的箭头连线最长,表明全氮、有机碳和pH能够较好地解释土壤酶活性的差异.其中全氮与脲酶、全磷与碱性磷酸酶的夹角很小且方向一致,呈极显著正相关关系;说明全氮对脲酶存在显著的正效应,是影响脲酶的主导因

子;而全磷主要影响磷酸酶活性.有机碳与脲酶、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶均为显著正相关性,但淀粉酶和脱氢酶的相关性较弱.pH与5种酶活性均呈显著负相关性,而电导率也与脲酶、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活性具有显著的负相关性,与脱氢酶和淀粉酶呈较弱的负相关性,说明滨海滩涂围垦区土壤盐渍化抑制了土壤酶活性的提升.

通过对土壤理化性质进行蒙特卡洛检验排序,研究土壤理化性质对酶活性影响的重要性.表3表明各理化性质对土壤酶活性影响重要性由大到小为:全氮 > 有机碳 > pH > 全磷 > 电导率.各理化性质对土壤酶活性的影响均达到极显著水平( $P < 0.01$ ),且对土壤酶活性差异性大小的解释量分别

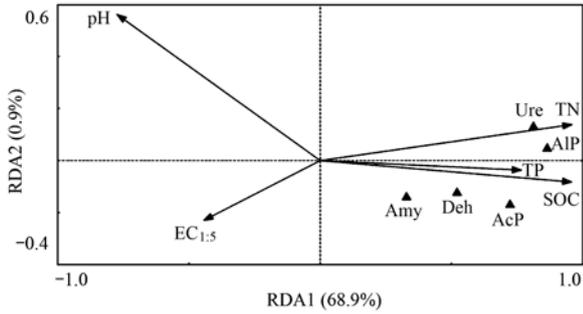


图3 土壤酶活性与理化性质的冗余度分析

Fig. 3 Biplot of the first two axes of the RDA for soil physicochemical properties of soil enzyme activities

达 63.4%、63.3%、41.6%、40.5% 和 13.6%，说明土壤养分含量是酶活性呈现差异性的关键因子，其次为土壤 pH 和盐分。

2.3.2 单一理化性质对土壤酶活性的影响

采用 Canoco 4.5 中的 *t*-value 双序图进一步分析单一理化性质对土壤酶活性的影响。对全氮进行

表3 土壤理化性质解释的重要性排序和显著性检验结果

Table 3 Importance and significance level of soil physicochemical properties

理化性质	重要性排序	理化性质所占解释量/%	F	P
TN	1	63.4	121.388	0.002
SOC	2	63.3	120.697	0.002
pH	3	41.6	49.836	0.002
TP	4	40.5	47.696	0.002
EC <sub>1:5</sub>	5	13.6	11.058	0.006

分析[图4(a)], 土壤脲酶和碱性磷酸酶完全落入红线圈内, 说明全氮与脲酶、碱性磷酸酶呈显著正相关关系。有机碳与土壤酶活性的关系见图4(b), 淀粉酶、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶完全落入红线圈中, 说明有机碳含量与淀粉酶、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活性呈显著正相关性, 同时淀粉酶和脱氢酶活性均穿过蓝线圈, 由此看出有机碳含量与淀粉酶和脱氢酶活性呈正相关性。图4(c)表示 pH 与土

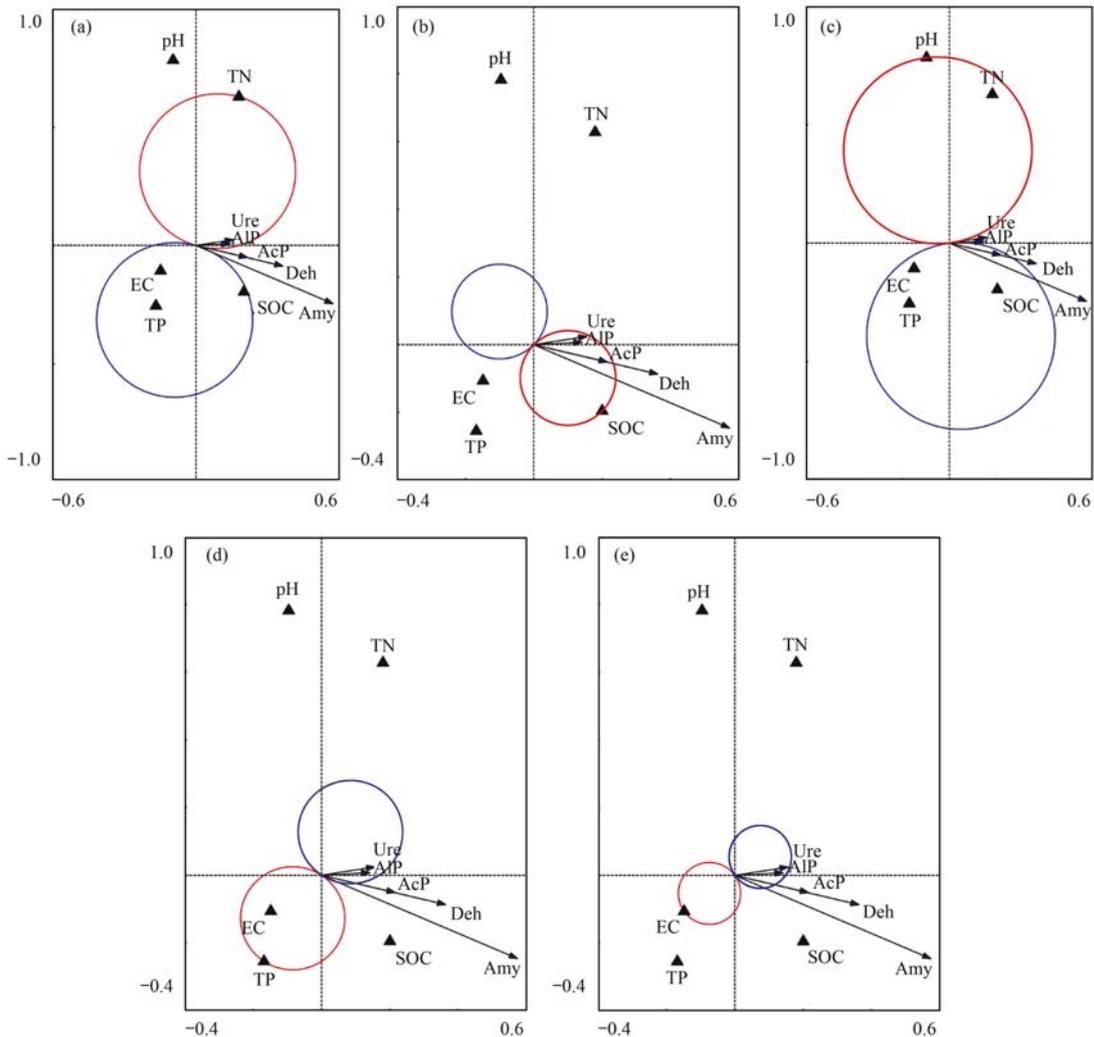


图4 单一因子对土壤酶活性特征影响的检验结果

Fig. 4 The *t*-value for a single factor influencing characteristics of soil enzyme activities

壤酶活性关系,可知 pH 与酸性磷酸酶、碱性磷酸酶、脱氢酶、淀粉酶活性呈现负相关关系.由图 4(d)看出脲酶和碱性磷酸酶均完全落入蓝线圈中,表明全磷与脲酶、碱性磷酸酶显著负相关;同时脱氢酶、淀粉酶和酸性磷酸酶均穿过蓝线圈,由此看出全磷与脱氢酶、酸性磷酸酶活性均呈负相关性.通过对土壤电导率进行分析[图 4(e)],电导率与脲酶和碱性磷酸酶活性呈显著负相关关系,与脱氢酶、淀粉酶、酸性磷酸酶活性呈负相关性.

### 3 讨论

土壤酶主要源自于土壤微生物、植物根系分泌物和动植物残体<sup>[22]</sup>.土壤理化性质诸如 pH、电导率、有机质、氮磷等养分元素能够影响植物根系的生长、土壤动物的生存环境和土壤微生物的数量和活性,进而影响土壤酶的数量和活性<sup>[23]</sup>.土壤 pH 不仅影响土壤有机大分子的分解和矿化、土壤胶体的分散和聚集、微生物的种类和活性和氧化还原反应等过程,而且也对土壤酶参与生化反应的速率有直接影响<sup>[24]</sup>.有些酶促反应对 pH 值变化很敏感,当 pH 值超过其最适宜范围时,就会对酶活性产生抑制作用<sup>[20]</sup>.在滨海盐渍化区域,过高的 pH 值成为了土壤酶活性的主要抑制因子之一,与土壤酶活性呈显著的负相关关系.毛志刚等<sup>[25]</sup>在江苏盐城滨海湿地和围垦区农田的研究表明土壤 pH 与脲酶、转化酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶均呈极显著或显著负相关关系.本研究中, pH 与酸性磷酸酶、碱性磷酸酶、脱氢酶、淀粉酶活性均呈现显著的负相关关系[图 4(c)].同样,土壤盐分也是抑制土壤酶活性的主要因子之一,盐渍化土壤中大量的可溶性盐不但使自身的物理、化学性质产生不良效应,还影响作物的生长发育和作物根系以及微生物细胞的代谢过程,刺激甚至抑制敏感的微生物种群,进而使土壤酶活性受到一定程度的抑制<sup>[26]</sup>.毛志刚等<sup>[25]</sup>、马献发等<sup>[27]</sup>在不同地区盐碱土的研究均表明土壤酶活性随着土壤盐分的增加呈递减趋势,本研究同样表明土壤电导率与 5 种土壤酶活性均呈负相关关系[图 4(e)].土壤碳、氮、磷等养分元素是土壤微生物碳、氮的主要来源,土壤酶活性与土壤养分的存在状况、形态和含量等密切相关,一般通过影响微生物的数量和类型影响酶的活性<sup>[28, 29]</sup>.土壤有机碳能够改变土壤孔隙度、通气性和土壤团粒结构,是土壤中酶促底物的主要供源,为土壤酶发挥作用提供场所与适宜的条件<sup>[12]</sup>;全

氮和全磷可以促进植物根际微生物生长,增强土壤微生物对土壤酶的合成,提高土壤酶活性<sup>[30]</sup>.一般认为在盐渍化土壤中土壤养分含量的提升能够刺激土壤微生物的活动和酶的合成<sup>[27, 31]</sup>.李凤霞等<sup>[32]</sup>发现不同类型盐渍化土壤酶活性与有机质、全氮和全磷含量均呈显著的正相关关系.本研究中土壤脲酶、磷酸酶活性与全氮、有机碳呈显著正相关,而脱氢酶和淀粉酶活性与全氮、有机碳也存在正相关关系[图 4(a)、图 4(b)].

滩涂盐沼围垦后受自然淋溶和人类活动(耕作、施肥、改良)的共同影响,土壤理化性质发生显著改变,进而改变微生物的群落特征和活性,影响土壤酶活性<sup>[33]</sup>.围垦初期阶段(0~7 a),由于土壤盐分迅速降低,盐生植被覆盖度、土壤养分含量、土壤动物和微生物逐渐增加,土壤酶活性迅速提升<sup>[34]</sup>.围垦中期阶段(7~32 a),植被的持续恢复增加了植物残体和根系分泌物,使得土壤微生物和土壤动物数量进一步增加,进而导致土壤酶多样性和丰富度的增加<sup>[35]</sup>.此外,农田管理过程中肥料的施入增加了土壤有机质含量,而有机质分解过程中碳、氮的固定同样能够提升土壤酶活性<sup>[36, 37]</sup>.在围垦后期阶段(32~63 a),土壤脱氢酶、淀粉酶和酸性磷酸酶活性逐渐降低,这可能是由于围垦后期土地利用以旱地为主,土壤含水量的下降导致酶活性降低,Brockett 等<sup>[38]</sup>和 Ren 等<sup>[39]</sup>的研究均表明合适的土壤含水量对于土壤酶活性的增强具有促进作用.脲酶和碱性磷酸酶活性在围垦后期先下降后上升,这可能跟研究区垦区的土地利用方式有关<sup>[40]</sup>.由于经济利益的驱使,围垦后 40 a 的垦区仍然分布着较大规模的水产品养殖区,养殖坑塘中土壤养分的缺乏和相对较高的盐渍化水平使得土壤脲酶和碱性磷酸酶活性较低.

### 4 结论

(1)研究区不同围垦年限间土壤理化性质存在显著差异,土壤 pH 在围垦后经历了短暂上升后波动下降;土壤电导率在围垦后迅速降低,至 32 a 后逐渐稳定;土壤养分随围垦年限的增加呈现出“迅速累积-逐渐消耗-再次累积”的过程.

(2)研究区不同围垦年限间土壤酶活性同样存在显著差异,淀粉酶、脱氢酶和酸性磷酸酶活性随着围垦年限的增加呈现出先上升后下降的过程,而脲酶和碱性磷酸酶活性则呈现出先上升-下降-再上升的过程.

(3)冗余分析表明 pH、电导率、土壤有机碳、全氮和全磷与土壤酶活性呈极显著相关关系 ( $P < 0.01$ ), 其中全氮、全磷、有机碳与脲酶和碱性磷酸酶呈显著正相关关系, 土壤电导率与脲酶和碱性磷酸酶呈显著负相关关系, pH 与酸性磷酸酶、碱性磷酸酶、脱氢酶、淀粉酶活性呈负相关关系. 土壤理化性质对土壤酶活性影响重要性大小排序为全氮 > 有机碳 > pH > 全磷 > 电导率.

#### 参考文献:

- [1] Shi Z, Wang R C, Huang, M X, *et al.* Detection of coastal saline land uses with multi-temporal Landsat images in Shangyu City, China [J]. *Environmental Management*, 2002, **30** (1): 142-150.
- [2] Tan J L, Kang Y H. Changes in soil properties under the influences of cropping and drip irrigation during the reclamation of severe salt-affected soils [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2009, **8**(10): 1228-1237.
- [3] 王琪琪, 濮励杰, 朱明, 等. 沿海滩涂围垦区土壤质量演变研究——以江苏省如东县为例 [J]. *地理科学*, 2016, **36** (2): 256-264.
- Wang Q Q, Pu L J, Zhu M, *et al.* Soil quality evolution in coastal reclamation zones: A case study of Rudong County of Jiangsu Province [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, **36** (2): 256-264.
- [4] 王文锋, 李春花, 黄绍文, 等. 不同施肥模式对设施菜田土壤酶活性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2016, **27** (3): 873-882.
- Wang W F, Li C H, Huang S W, *et al.* Effects of different fertilization patterns on soil enzyme activities in greenhouse vegetable field [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27** (3): 873-882.
- [5] Hill B H, Elonen C M, Seifert L R, *et al.* Microbial enzyme stoichiometry and nutrient limitation in US streams and rivers [J]. *Ecological Indicators*, 2012, **18**: 540-551.
- [6] Rutigliano F A, Castaldi S, D'Ascoli R, *et al.* Soil activities related to nitrogen cycle under three plant cover types in Mediterranean environment [J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, **43** (1): 40-46.
- [7] Song Y Y, Song C C, Yang G S, *et al.* Changes in labile organic carbon fractions and soil enzyme activities after marshland reclamation and restoration in the Sanjiang Plain in northeast China [J]. *Environmental Management*, 2012, **50** (3): 418-426.
- [8] 张鹏, 赵洋, 黄磊, 等. 植被重建对露天煤矿排土场土壤酶活性的影响 [J]. *生态学报*, 2016, **36** (9): 2715-2723.
- Zhang P, Zhao Y, Huang L, *et al.* Effect of revegetation on soil extracellular enzyme activity in the dumping site of an open-pit coal mine in Heidaigou [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36** (9): 2715-2723.
- [9] 罗攀, 陈浩, 肖孔操, 等. 地形、树种和土壤属性对喀斯特山区土壤胞外酶活性的影响 [J]. *环境科学*, 2017, **38** (6): 2577-2585.
- Luo P, Chen H, Xiao K C, *et al.* Effects of topography, tree species and soil properties on soil enzyme activity in karst regions [J]. *Environmental Science*, 2017, **38** (6): 2577-2585.
- [10] Zhang X Y, Dong W Y, Dai X Q, *et al.* Responses of absolute and specific soil enzyme activities to long term additions of organic and mineral fertilizer [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **536**: 59-67.
- [11] Araújo A S F, Cesarz S, Leite L F C, *et al.* Soil microbial properties and temporal stability in degraded and restored lands of Northeast Brazil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **66**: 175-181.
- [12] 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.
- [13] 荆瑞勇, 曹焜, 刘俊杰, 等. 东北农田黑土土壤酶活性与理化性质的关系研究 [J]. *水土保持研究*, 2015, **22** (4): 132-137.
- Jing R Y, Cao K, Liu J J, *et al.* Correlation between soil enzyme activity and physicochemical characteristics in agricultural black soils in Northeast China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, **22** (4): 132-137.
- [14] 杨瑞, 刘帅, 王紫泉, 等. 秦岭山脉典型林分土壤酶活性与土壤养分关系的探讨 [J]. *土壤学报*, 2016, **53** (4): 1037-1046.
- Yang R, Liu S, Wang Z Q, *et al.* Relationships between the soil enzyme activity and soil nutrients in forest soils typical of the Qinling Mountain [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, **53** (4): 1037-1046.
- [15] 包先明, 程新锋, 纪磊, 等. 不同退耕年限下菜子湖湿地土壤酶活性变化 [J]. *土壤*, 2016, **48** (4): 692-697.
- Bao X M, Chen X F, Ji L, *et al.* Characteristics of soil enzyme activities in wetlands with various restoration ages in Caizi Lake, Anhui Province [J]. *Soils*, 2016, **48** (4): 692-697.
- [16] 解雪峰, 濮励杰, 朱明, 等. 基于典范对应分析的滨海滩涂围垦区景观格局与土壤盐渍化关系 [J]. *地理研究*, 2017, **36** (3): 495-505.
- Xie X F, Pu L J, Zhu M, *et al.* Relationship between landscape patterns and soil salinity based on canonical correspondence analysis in coastal reclamation area [J]. *Geographical Research*, 2017, **36** (3): 495-505.
- [17] Ouyang W, Song K Y, Wang X L, *et al.* Non-point source pollution dynamics under long-term agricultural development and relationship with landscape dynamics [J]. *Ecological Indicators*, 2014, **45**: 579-589.
- [18] 解丽娜, 贡璐, 朱美玲, 等. 塔里木盆地南缘绿洲土壤酶活性与理化因子相关性 [J]. *环境科学研究*, 2014, **27** (11): 1306-1313.
- Xie L N, Gong L, Zhu M L, *et al.* Soil enzyme activities and their correlation with physicochemical factors in the oasis of southern margin of Tarim Basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27** (11): 1306-1313.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1983.

- [21] 庞燕, 项颂, 储昭升, 等. 洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 4005-4012.  
Pang Y, Xiang S, Chu Z S, *et al.* Relationship between agricultural land and water quality of inflow river in Erhai Lake Basin[J]. Environmental Science, 2015, **36**(11): 4005-4012.
- [22] Zhang Y L, Chen L J, Chen X H, *et al.* Response of soil enzyme activity to long-term restoration of desertified land[J]. Catena, 2015, **133**: 64-70.
- [23] Liu E K, Yan C R, Mei X R, *et al.* Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China[J]. Geoderma, 2010, **158**(3-4): 173-180.
- [24] Dick W A, Cheng L, Wang P. Soil acid and alkaline phosphatase activity as pH adjustment indicators[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, **32**(13): 1915-1919.
- [25] 毛志刚, 谷孝鸿, 刘金娥, 等. 盐城海滨湿地盐沼植被及农作物下土壤酶活性特征[J]. 生态学报, 2010, **30**(18): 5043-5049.  
Mao Z Z, Gu X H, Liu J E, *et al.* Distribution of the soil enzyme activities in different vegetation zones and farms in Yancheng coastal wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, **30**(18): 5043-5049.
- [26] Li J G, Pu L J, Han M F, *et al.* Soil salinization research in China: Advances and prospects [J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, **24**(5): 943-960.
- [27] 马献发, 周连仁, 陈然. 快速修复苏打草甸碱土植被对土壤盐分和酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2007, **44**(4): 761-763.  
Ma X F, Zhou L R, Chen R. Effect of recovering quickly vegetation ameliorative ways in meadow solonetz soil on salt content and enzyme activities[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, **44**(4): 761-763.
- [28] Burke D J, Wemtraub M N, Hewins C R, *et al.* Relationship between soil enzyme activities, nutrient cycling and soil fungal communities in a northern hardwood forest[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(4): 795-803.
- [29] Kandler E, Luxhøj J, Tschirko D, *et al.* Xylanase, invertase and protease at the soil-litter interface of a loamy sand[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, **31**(8): 1171-1179.
- [30] Lucas R W, Casper B B, Jackson J K, *et al.* Soil microbial communities and extracellular enzyme activity in the New Jersey Pinelands[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, **39**(10): 2508-2519.
- [31] Xie X F, Pu L J, Wang Q Q, *et al.* Response of soil physicochemical properties and enzyme activities to long-term reclamation of coastal saline soil, Eastern China[J]. Science of the Total Environment, 2017, **607-608**: 1419-1427
- [32] 李凤霞, 王学琴, 郭永忠, 等. 银川平原不同类型盐渍化土壤酶活性及其与土壤养分间相关分析研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, **26**(7): 121-126.  
Li F X, Wang X Q, Guo Y Z, *et al.* Study of soil enzymes activity and their correlation with soil nutrients in different types of saline-alkali soils in Yinchuan Plain of Ningxia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, **26**(7): 121-126.
- [33] Li J G, Pu L J, Zhu M, *et al.* Evolution of soil properties following reclamation in coastal areas: A review[J]. Geoderma, 2014, **226-227**: 130-139.
- [34] Yin A J, Zhang M, Gao C, *et al.* Salinity evolution of coastal soils following reclamation and intensive usage, Eastern China [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **75**: 1281.
- [35] García-Ruiza R, Ochoa V, Hinojosa M B, *et al.* Suitability of enzyme activities for the monitoring of soil quality improvement in organic agricultural systems[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, **40**(9): 2137-2145.
- [36] Ling N, Sun Y M, Ma J H, *et al.* Response of the bacterial diversity and soil enzyme activity in particle-size fractions of Mollisol after different fertilization in a long-term experiment[J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, **50**(6): 901-911.
- [37] Jian S Y, Li J W, Chen J, *et al.* Soil extracellular enzyme activities, soil carbon and nitrogen storage under nitrogen fertilization: A meta-analysis[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, **101**: 32-43.
- [38] Brockett B F T, Prescott C E, Grayston S J. Soil moisture is the major factor influencing microbial community structure and enzyme activities across seven biogeoclimatic zones in western Canada[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, **44**(1): 9-20.
- [39] Ren C J, Kang D, Wu J P, *et al.* Temporal variation in soil enzyme activities after afforestation in the Loess Plateau, China [J]. Geoderma, 2016, **282**: 103-111.
- [40] 王琪琪. 滨海滩涂围垦对土壤酶活性的影响研究——以江苏省如东县垦区为例[D]. 南京: 南京大学, 2016.

## CONTENTS

Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM <sub>2.5</sub> During the Winter in the Yangtze River Delta Region, China	KANG Hui, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(961)
Important Effect of Secondary Inorganic Salt Extinction on Visibility Impairment in the Northern Suburb of Nanjing	YU Chao, YU Xing-na, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i>	(972)
Day-Night Differences and Source Apportionment of Inorganic Components of PM <sub>2.5</sub> During Summer-Winter in Changzhou City	LIU Jia-shu, GU Yuan, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i>	(980)
Characteristics of Elements in PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> in Road Dust Fall During Spring in Tianjin	WANG Shi-bao, JI Ya-qin, LI Shu-li, <i>et al.</i>	(990)
Particle Size Distribution and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particles from Beijing and Xixiang During Summer	ZHANG Xin, ZHAO Xiao-man, MENG Xue-jie, <i>et al.</i>	(997)
Ecological and Health Risks of Trace Heavy Metals in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> Collected in Wuxiang Town, Shanxi Province	GUO Zhao-xia, GENG Hong, ZHANG Jin-hong, <i>et al.</i>	(1004)
Characteristics of Particulate and Inorganic Elements of Motor Vehicles Based on a Tunnel Environment	LI Feng-hua, ZHANG Yan-jie, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(1014)
A 2013-based Atmospheric Ammonia Emission Inventory and Its Characteristic of Spatial Distribution in Henan Province	WANG Chen, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i>	(1023)
Emission Characteristics of Wind Erosion Dust from Topsoil of Urban Roadside-Tree Pool	LI Bei-bei, QIN Jian-ping, QI Li-rong, <i>et al.</i>	(1031)
Particulate Component Emission Characteristic from a Diesel Bus with DOC and CDPF	LOU Di-ming, GENG Xiao-yu, SONG Bo, <i>et al.</i>	(1040)
Water Quality in the Henan Intake Area of the South-to-North Water Diversion Project	HUANG Piao-yi, XU Bin, GUO Dong-liang	(1046)
Spatio-Temporal Patterns and Environmental Risk of Endocrine Disrupting Chemicals in the Liuxi River	FAN Jing-jing, WANG Sai, TANG Jin-peng, <i>et al.</i>	(1053)
Fate and Origin of Major Ions in River Water in the Lhasa River Basin, Tibet	ZHANG Qing-hua, SUN Ping-an, HE Shi-yi, <i>et al.</i>	(1065)
Identification of Nitrate Sources and the Fate of Nitrate in Downstream Areas: A Case Study in the Taizi River Basin	LI Yan-li, YANG Zi-rui, YIN Xi-jie, <i>et al.</i>	(1076)
Sources, Distribution of Main Controlling Factors, and Potential Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in the Surface Sediment of Hainan Island North Bay, South China	ZENG Wei-te, YANG Yong-peng, ZHANG Dong-qiang, <i>et al.</i>	(1085)
Characteristics of Heavy Metals Pollution of Farmland and the Leaching Effect of Rainfall in Tianjin	XU Meng-meng, LIU Ai-feng, SHI Rong-guang, <i>et al.</i>	(1095)
Seasonal Difference in Water Quality Between Lake and Inflow/Outflow Rivers of Lake Taihu, China	ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i>	(1102)
Characteristics of Nitrogen Release at the Sediment-Water Interface in the Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir During the Sensitive Period in Spring	LI Xin, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i>	(1113)
Spatial Distributions of Transferable Nitrogen Forms and Influencing Factors in Sediments from Inflow Rivers in Different Lake Basins	ZHOU Rui, YUAN Xu-yin, Marip Ja Bawk, <i>et al.</i>	(1122)
Effects of Hydrological and Meteorological Conditions on Diatom Proliferation in Reservoirs	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i>	(1129)
Vertical Distribution of Fungal Community Composition and Water Quality During the Deep Reservoir Thermal Stratification	SHANG Pan-lu, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(1141)
Community Structure and Influencing Factors of Bacterioplankton in Spring in Zhushan Bay, Lake Taihu	XUE Yin-gang, LIU Fei, SUN Meng, <i>et al.</i>	(1151)
Characteristics of Sediment Oxygen Demand in a Drinking Water Reservoir	SU Lu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1159)
Effects of Wastewater Nitrogen Concentrations and NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> on Nitrogen Removal Ability and the Nitrogen Component of <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verde	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i>	(1167)
Effect of Nutrient Loadings on the Regulation of Water Nitrogen and Phosphorus by <i>Vallisneria spiralis</i> and Its Photosynthetic Fluorescence Characteristics	ZHOU Yi-wen, XU Xiao-guang, HAN Rui-ming, <i>et al.</i>	(1180)
Removal of Organic Matter from Water by Chemical Preoxidation Coupled with Biogenic Manganese Oxidation	JIAN Zhi-yu, CHANG Yang-yang, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(1188)
Treating Simulated Dye Wastewater by an <i>In Situ</i> Copper Ferrite Process	HAN Zhi-yong, HAN Kun, HAO Hao-tian, <i>et al.</i>	(1195)
Experiment to Enhance Catalytic Activity of $\alpha$ -FeOOH in Heterogeneous UV-Fenton System by Addition of Oxalate	MIAO Xiao-zeng, DAI Hui-wang, CHEN Jian-xin, <i>et al.</i>	(1202)
Fabrication of a Biomass-Based Hydrous Zirconium Oxide Nanocomposite for Advanced Phosphate Removal	QIU Hui, QIN Zhi-feng, LIU Feng-ling, <i>et al.</i>	(1212)
Characteristic of Nitrate Adsorption in Aqueous Solution by Iron and Manganese Oxide/Biochar Composites	ZHENG Xiao-qing, WEI An-lei, ZHANG Yi-xuan, <i>et al.</i>	(1220)
Preparation of PAAm/HACC Semi-Interpenetrate Network Hydrogel and Its Adsorption Properties for Humic Acid from Aqueous Solution	LIU Ze-jun, ZHOU Shao-qi, MA Fu-zhen	(1233)
Groundwater Arsenic and Silicate Adsorption on TiO <sub>2</sub> and the Regeneration of TiO <sub>2</sub>	MA Wen-jing, YAN Li, ZHANG Jian-feng	(1241)
Removal Efficiency and Mechanism of Removal by Humic Acid of the Integrated Flocc-ultrafiltration Process	LI Wen-jiang, YU Li-fang, MIAO Rui, <i>et al.</i>	(1248)
Emission Inventory of Greenhouse Gas from Urban Wastewater Treatment Plants and Its Temporal and Spatial Distribution in China	YAN Xu, QIU De-zhi, GUO Dong-li, <i>et al.</i>	(1256)
Start-up and Operation of Biofilter Coupled Nitrification and CANON for the Removal of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i>	(1264)
Analysis of CANON Process Start-up with Fiber Carrier	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i>	(1272)
Characteristics of Biofilm During the Transition Process of Complete Nitrification and Partial Nitrification	ZHAO Qing, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i>	(1278)
Effect of Intermediate-Setting Aeration on the CANON Granular Sludge Process in the AUSB Reactor	CHENG Shuo, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1286)
Effect of Organic Carbon Source on Start-up and Operation of the CANON Granular Sludge Process	LI Dong, WANG Yan-ju, LÜ Yu-feng, <i>et al.</i>	(1294)
Start-Up and Regional Characteristics of a Pilot-scale Integrated PN-ANAMMOX Reactor	ZHOU Zheng, WANG Fan, LIN Xing, <i>et al.</i>	(1301)
Effect of NO <sub>x</sub> <sup>-</sup> -N Recycling Ratio on Denitrifying Phosphorus Removal Efficiency in the ABR-MBR Combined Process	LÜ Liang, YOU Wen, ZHANG Min, <i>et al.</i>	(1309)
Effects of Magnetic Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Nanoparticles on the Characteristics of Anaerobic Granular Sludge and Its Interior Microbial Community	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, LU Yu-xiang, <i>et al.</i>	(1316)
Characterization Composition of Soluble Microbial Products in an Aerobic Granular Sludge System	YANG Dan, LIU Dong-fang, DU Li-qiong, <i>et al.</i>	(1325)
Influence of Ciprofloxacin on the Microbial Community and Antibiotics Resistance Genes in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, LIANG Yu-ting, <i>et al.</i>	(1333)
Analysis of Low C/N Wastewater Treatment and Structure by the CEM-UF Combined Membrane-Nitrification/Denitrification System	XING Jin-liang, ZHANG Yan, CHEN Chang-ming, <i>et al.</i>	(1342)
Effects of Phosphorus on the Activity and Bacterial Community in Mixotrophic Denitrification Sludge	WANG Pei-qi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing, <i>et al.</i>	(1350)
Acclimatization and Community Structure Analysis of the Microbial Consortium in Nitrate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XUE Song, ZHANG Meng-zhu, LI Lin, <i>et al.</i>	(1357)
Diffusion of Microorganism and Main Pathogenic Bacteria During Municipal Treated Wastewater Discharged into Sea	XU Ai-ling, NIU Cheng-jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i>	(1365)
Oxytetracycline Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells and the Analysis of Microbial Communities	YAN Wei-fu, XIAO Yong, WANG Shu-hua, <i>et al.</i>	(1379)
Spatial and Temporal Variability of Soil C-to-N Ratio of Yugan County and Its Influencing Factors in the Past 30 Years	JIANG Ye-feng, ZHONG Shan, LI Jie, <i>et al.</i>	(1386)
Spatial Heterogeneity of Soil Carbon and its Fractions in the Wolfberry Field of Zhongning County	WANG You-qi, ZHAO Yun-peng, BAI Yi-ru, <i>et al.</i>	(1396)
Response of Soil Enzyme Activities and Their Relationships with Physicochemical Properties to Different Aged Coastal Reclamation Areas, Eastern China	XIE Xue-feng, PU Li-jie, WANG Qi-qi, <i>et al.</i>	(1404)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils of the Central and Eastern Areas of the Qinghai-Tibetan Plateau	ZHOU Wen-wen, LI Jun, HU Jian, <i>et al.</i>	(1413)
Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Area Based on UNMIX Model	LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, <i>et al.</i>	(1421)
Stabilization Effects of Fe-Mn Binary Oxide on Arsenic and Heavy Metal Co-contaminated Soils Under Different pH Conditions	FEI Yang, YAN Xiu-lan, LI Yong-hua	(1430)
Concentration and Distribution of Novel Brominated Flame Retardants in Human Serum from Three Chinese Cities	WANG Qing-hua, YUAN Hao-dong, JIN Jun, <i>et al.</i>	(1438)