生方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2020
Vol.41 No.2
第41卷 第2期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第2期
2020年2月15日

目 次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化$PM_{2.5}$长期变化影响因素 …… 南洋, 张倩倩, 张碧辉(499)
我国PCDD/Fs网格化大气排放清单 …… 陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民(510)
成都平原$PM_{2.5}$中碳质组分时空分布特征与来源 …… 史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东(520)
南京江北新区冬季$PM_{2.5}$中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析 …… 邱晨晨, 于兴娜, 丁铖, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红(529)
南京北郊四季$PM_{2.5}$中有机胺的污染特征及来源解析 …… 李栩婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军(537)
长三角背景点夏季大气$PM_{2.5}$中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析 …… 薛国艳, 王格慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健(554)
2017年秋季长春市$PM_{2.5}$中多环芳烃的污染来源及健康风险评价 …… 张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟(564)
京津冀及周边区域$PM_{2.5}$叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析 …… 朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军(574)
河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析 …… 齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹(587)
河南省气溶胶光学特性的时空变化特征 …… 张瑞芳,于兴娜(600)
黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季$PM_{2.5}$中水溶性有机气溶胶 …… 黄雯倩,陈彦彤,李旭东,赵竹子,马帅帅,叶招莲, 盖鑫磊(609)
南京市黑碳气溶胶时间演变特征及其主要影响因素 …… 杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬(620)
连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势 …… 乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月(630)
挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较 …… 羌宁, 史天哲, 缪海超(638)
西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析 …… 丁铖, 于兴娜, 侯思宇(647)
4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的生物多样性及群落结构 …… 沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明(656)
辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析 …… 金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧(665)
国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性 …… 钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能(674)
南小河沟流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义 …… 郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思晗(682)
乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价 …… 余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云(691)
温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系 …… 朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新(702)
新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化 …… 笪文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆(713)
环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估 …… 宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春(728)
洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化 …… 刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞(734)
西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析 …… 杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李燚, 徐会宁(743)
透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响 …… 张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田(750)
微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B …… 朱红庆,杨兵,魏世强,杨静静,张进忠(756)
锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除 …… 周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏(763)
载镧磁性水热生物炭的制备及其除磷性能 …… 宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章(773)
复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能 …… 孙婷婷, 高菲, 林莉, 黎睿, 董磊(784)
磁性硅藻土负载纳米过氧化钙对水中磷酸盐吸附 …… 徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇(792)
污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应 …… 汤宁, 李如忠, 王聿庆, 何瑞亮, 刘超(801)
生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析 …… 赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红(809)
磁混凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能 …… 于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赟仪, 吴振军(815)
四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响 …… 阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品(823)
异养硝化细菌 *Pseudomonas aeruginosa* YL的脱氮过程及N_2O产生特性 … 杨垒, 崔珅, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖(831)
包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析 …… 王晓曈, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍(839)
包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用 …… 周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉(849)
厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响 …… 张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅(856)
除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺 …… 李冬, 刘博, 王文琪, 张杰(867)
桂西南地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价 …… 王佛鹏,肖乃川,周浪,庞瑞,宋波(876)
青藏高原表土重金属污染评价与来源解析 …… 杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军(886)
黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析 …… 莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德(895)
管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响 …… 宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛萐, 李秧秧(905)
生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响 …… 周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖(914)
水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制 …… 余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章(922)
接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制 …… 刘躲, 王磊, 曹湛波, 段灏(932)
基于漂浮箱法和扩散模型法测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较 … 胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双(941)
超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素 …… 陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠(952)
青菜中镉的吸收和累积对硒的响应规律 …… 余垚, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉(962)
两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制 …… 卞建林, 郭俊姮, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇(970)
可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤 …… 贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢(979)
我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析 …… 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣风, 李花粉(986)
畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群演替及其与环境因子的关系 …… 蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国(997)
4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性 …… 朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来(1005)
《环境科学》征订启事(553) 《环境科学》征稿简则(655) 信息(664, 755, 885)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第41卷第2期 2020年2月
Vol.41, No.2 Feb., 2020

黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析

莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德*

(天津理工大学环境科学与安全工程学院,天津 300384)

摘要: 土壤酶是滨海湿地群落构建和演替的关键因子,但水盐胁迫条件下土壤酶活性的驱动机制尚不明确. 以黄河三角洲盐地碱蓬、芦苇、柽柳这3种盐生植物群落为对象,研究其根际与非根际土壤中蔗糖酶、磷酸酶、过氧化氢酶和脲酶的活性特征及其分布规律,并结合土壤理化性质的变化探讨滨海湿地群落演替过程中土壤酶活性的驱动因子. 结果表明,盐地碱蓬、芦苇、柽柳群落的根际土壤酶活性和土壤肥力指标均显著高于非根际土壤($P<0.05$). 在根际土壤中,磷酸酶与过氧化氢酶活性均表现为盐地碱蓬<芦苇<柽柳,蔗糖酶与脲酶活性则分别表现为柽柳<盐地碱蓬<芦苇、盐地碱蓬<柽柳<芦苇,且不同盐生植物群落根际土壤理化性质存在显著差异($P<0.05$),说明植物类型及其根际效应均会影响土壤酶活性和土壤肥力特征,且根际效应对土壤酶活性的影响大于植被类型. 土壤蔗糖酶活性与有效钾(AK)、有效磷(AP)、铵态氮(NH_4^+-N)显著正相关($P<0.05$);脲酶活性与全氮(TN)、有机质(SOM)、AK、AP、NH_4^+-N和硝态氮(NO_3^--N)显著正相关($P<0.01$);二者均与土壤电导率(EC)显著负相关($P<0.01$). 磷酸酶和过氧化氢酶活性与土壤含水率(MC)、全碳(TC)、TN、全磷(TP)、SOM、AK和NH_4^+-N均呈显著正相关关系($P<0.05$),同时,pH、总钾(TK)、NO_3^--N还与过氧化氢酶活性显著正相关($P<0.05$). 冗余分析(RDA)结果显示,黄河三角洲土壤酶活性特征的主要影响因子从大到小依次为: TC($P<0.01$)、SOM($P<0.01$)、MC($P<0.01$)、TN($P<0.05$)、NH_4^+-N($P<0.05$)和EC($P<0.05$),表明土壤肥力、水分与盐度是黄河三角洲盐生植物群落土壤酶活性的主要影响因子.

关键词:黄河三角洲;盐生植物;根际与非根际;土壤酶活性;土壤理化性质

中图分类号: X172 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)02-0895-10 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201908051

Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta

MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, LIU Fu-de*

(School of Environmental Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: Soil enzymes play key roles in the construction and succession of coastal wetland communities, while the driving mechanism of their activities under water and salt stress conditions is still unclear. The activities and distributions of sucrase, phosphatase, catalase, and urease in the rhizosphere and non-rhizosphere soils of *Suaeda salsa*, *Phragmites australis*, and *Tamarix chinensis* communities were studied in the Yellow River Delta. Moreover, the changes in soil enzyme activities and their influencing factors during the succession of halophytic plant communities were discussed in combination with changes in the physicochemical properties of soil. The results showed significantly higher soil enzyme activities and soil fertility parameters in the rhizosphere soils of *S. salsa*, *P. australis*, and *T. chinensis* communities than those in the non-rhizosphere soils ($P<0.05$). In the rhizosphere soils, the activities of phosphatase and catalase increased in the order of *S. salsa* < *P. australis* < *T. chinensis*, while they increased in the order of *T. chinensis* < *S. salsa* < *P. australis* for sucrase activity, and *S. salsa* < *T. chinensis* < *P. australis* for urease activity. Further, significant differences were found in the physicochemical properties of rhizosphere soils between different halophyte communities ($P<0.05$), which indicated that plant types and their rhizosphere effects could affect soil enzyme activities and fertility characteristics. Furthermore, a two-way analysis of variance showed that the rhizosphere effect was greater than that of vegetation type. The soil sucrase activity was significantly positively correlated with available potassium (AK), available phosphorus (AP), and ammonium nitrogen (NH_4^+-N) ($P<0.05$). Meanwhile, urease activity was significantly positively correlated with total nitrogen (TN), organic matter (SOM), AK, AP, NH_4^+-N, and nitrate nitrogen (NO_3^--N) ($P<0.01$). Both of the two enzymes were negatively correlated with soil electrical conductivity (EC) ($P<0.01$). The phosphatase and catalase activities were found to be significantly positively correlated with soil water content (MC), total carbon (TC), TN, total phosphorus (TP), SOM, AK, and NH_4^+-N ($P<0.05$). Additionally, parameters of pH, total potassium (TK), and NO_3^--N were also significantly associated with catalase activity. Finally, the redundancy analysis (RDA) revealed that main factors affecting the overall soil enzyme activity were TC ($P<0.01$), SOM ($P<0.01$), MC ($P<0.01$), TN ($P<0.05$), NH_4^+-N ($P<0.05$), and EC ($P<0.05$). The findings suggested that soil fertility, water, and salinity are the most influential factors of soil enzyme activity in different halophytic plant communities of the Yellow River Delta.

Key words: Yellow River Delta; halophyte; rhizosphere and non-rhizosphere; soil enzyme activity; soil physicochemical properties

收稿日期: 2019-08-06; **修订日期**: 2019-09-29
基金项目: 国家自然基金项目(41303057);天津市应用基础与前沿技术研究计划项目(14JCYBJC23000)
作者简介: 莫雪(1994~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤微生物学,E-mail: MXOUe998@163.com
* 通信作者,E-mail:lfdsy@tjut.edu.cn

土壤酶是土壤组分中最活跃的有机成分之一[1]. 其与土壤微生物通过矿化有机质,固氮和吸磷的方式参与根际生物地球化学循环[2]. 土壤酶活性的强弱与土壤肥力密切相关[3],是土壤肥力、土壤质量、土壤自净能力和生态植物修复等评价的一个重要生物指标[2,4,5]. 例如,土壤中各有机、无机营养物质的转化和有效养分的矿化速度,主要取决于水解酶类和氧化还原酶类的酶促作用[3]. 目前围绕土壤酶活性的研究较多,主要集中在农林业生产[6,7]和土地利用方式[8~10]对土壤酶活性的影响等方面. 同时,土壤酶活性也被用来进行土地与环境修复的评价研究[11~14].

土壤酶活性的研究多围绕根际土展开,因为根际是植物、土壤、微生物相互关联的重要生态区域[15]. 根际效应则是指植物根系在吸收水分、养分时,以分泌的方式向周围释放出各种化合物,进而调控或影响植株和土壤微生物生长发育的过程[16]. 植物根系分泌物的主要成分有碳水化合物、氨基酸、脂肪酸、酶等其他有机化合物[16],这些物质能够影响根际土壤中养分的有效性,改变土壤的理化性质,为微生物的生长和繁殖提供必要的养分,进而刺激微生物产生各种不同的酶. 由于不同植物根际分泌物的种类和数量不同,因此产生不同的根际效应,导致不同植物群落土壤酶组成及其活性差异显著,而土壤酶及其活性的这种差异对于植被的形态建成和功能分化具有十分重要的意义. 特别是滨海盐生植物群落受水盐和养分胁迫作用明显,土壤酶及其活性可能是滨海湿地群落构建和演替的关键因子. 有研究表明植被的演变与酶活性及土壤理化性质同步响应,土壤酶活性的增加加速了有机质、有效磷和有效氮等养分的生成并反作用于酶,提升酶活性,形成植物-土壤肥力-酶活性相互影响的机制[11,17]. 例如,有机氮肥可增加氨氧化细菌和古菌中一些基因的丰度,提高了脲酶、蔗糖酶和氨单加氧酶等多种酶活性,进而显著促进了氮的矿化、氨化和硝化作用,最终作用于植物的生长[6].

黄河三角洲新生湿地土壤属盐渍化土壤[18]. 众多研究发现黄河三角洲的优势植物种群盐地碱蓬、芦苇和柽柳在土壤脱盐和修复方面有很大贡献[19~23]. 目前关于黄河三角洲盐生植物群落土壤酶活性的研究多有企及,但对其根际效应及与其他生态过程关系的关注较少. 北方滨海潮上带湿地多属于季节性淹水湿地,干旱与水淹交替发生,水盐胁迫条件下硝化、反硝化等重要生态学过程对土壤中氮素转化的主导作用及其对土壤酶活性的驱动机制尚不明确. 为此,本文以黄河三角洲盐地碱蓬、芦苇和柽柳等典型盐生植物群落为研究对象,分析其根际与非根际土壤蔗糖酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶和脲酶的活性特征及其分布规律,并结合土壤理化性质的变化,探讨滨海湿地群落演替过程中土壤酶活性的主要影响因子,以期为理解黄河三角洲盐生植被类型、土壤生态学过程和酶活性之间的相互影响机制提供理论基础和数据支撑,对黄河三角洲新生湿地的保育与修复具有重要的指导意义.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究地点(图1)位于山东省东营市黄河三角洲国家级自然保护区 (37°37′11″~37°43′19″N, 118°58′57″~119°01′01″ E). 黄河三角洲地处中纬度,受欧亚大陆和太平洋的共同影响,属于暖温带半湿润大陆性季风气候区,四季温差明显,因此冬寒夏热,四季分明是其基本气候特征. 年平均气温 11.7~12.6℃,极端最高气温 41.9℃,极端最低气温 -23.3℃;年平均日照时数为2 590~2 830 h;无霜期 211 d;年均降水量 530~630 mm, 70% 分布在夏季;平均蒸散量为 750~2 400 mm.

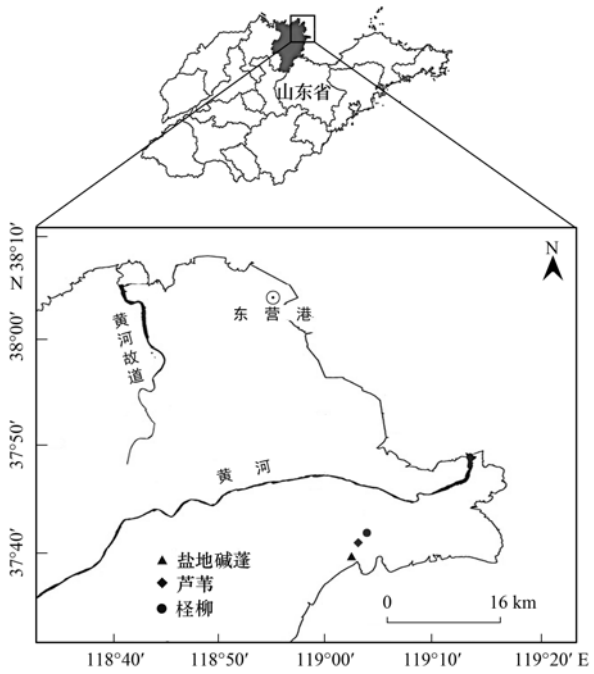


图1 研究区域及采样点分布示意

Fig. 1 Location map and sampling points of this study

黄河三角洲沿海滩涂广阔平坦,土壤多为沙质和泥质[24],属暖温带落叶阔叶林区,区内无地带性植被类型,植被的分布主要受水分、土壤含盐量、潜水水位与矿化度、地貌类型的制约以及人类活动影响,植被类型少、结构简单和组成单纯,以草甸景观为主体. 在天然植被中,以滨海盐生植被盐地碱

蓬、芦苇和柽柳等植物为主.

1.2　样品采集和处理

土壤样品采集于2018 年 7 月,在黄河三角洲潮上带区域选择盐地碱蓬、芦苇和柽柳这 3 种典型的盐生植物群落并分别设置样地(图 1),每种盐生植物群落分别随机设置 3 个平行的采样点. 盐地碱蓬和芦苇群落每个平行采样点设置面积为 50 cm × 50 cm 的样方,在每个样方中随机选择若干株植物,采集其根际与非根际土壤,采样深度范围为 0 ~ 20 cm. 柽柳群落每个平行采样点随机选择 3 株个体,采集 0 ~ 20 cm 范围内细根的根际与非根际土壤. 植物根际土壤参照 Riley[25] 的抖落法采集,非根际土壤则参照陈悦等[26] 的方法采集. 将采集后的样品分别混合均匀,去除根系、树叶、石块等杂物后,装于无菌自封袋中,其中根际与非根际土编号分别为 SR 与 SN、PR 与 PN、TR 与 TN,共获得 18 个土壤样品. 每个土壤样品的一部分储存于 -20℃进行保鲜,用于测定铵态氮(NH_4^+-N)和硝态氮(NO_3^--N);另一部分进行风干处理后用球磨机(TJ-0.4L,东方天净,中国)研磨,并过 100 目土壤筛,用于酶活性和其他理化性质的测定.

1.3　土壤酶活性测定

本研究中土壤酶活性的测定主要参考关松荫等[27] 的测定方法进行. 土壤脲酶活性(URE)采用苯酚钠比色法测定,以 1 d 后 1 g 土壤中 NH_3-N 的毫克数表示土壤脲酶活性;蔗糖酶活性(SUC)采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,以 1 d, 1 g 干土生成葡萄糖毫克数表示;过氧化氢酶活性(CAT)采用高锰酸钾滴定法测定,以每 g 干土 1 h 内消耗的 0.1 $mol \cdot L^{-1}$ $KMnO_4$ 体积数表示(以 mL 计);碱性磷酸酶活性(AKP)采用赵兰坡等[28] 的方法测定,以 1 d 后 1 g 土壤中释放出酚的质量(μg)表示碱性磷酸酶活性.

1.4　土壤理化性质测定

含水率(MC)采用烘干称量法测定;pH 值(土壤∶水 =1∶2.5)采用 pH 计(Delta320, 梅特勒-托利多,瑞士);电导率(EC)采用电导率仪(DDSJ-308,雷兹,中国)测定(土壤∶水 = 1∶5);土壤有机质(SOM)采用 1/6 重铬酸钾滴定法测定;全碳(TC)和全氮(TN)使用元素分析仪(Varro-EL Ⅲ,艾力蒙塔,德国)测定;土壤样品经过硝酸-氢氟酸消解后采用 ICP-OES(VISTA-MPX,瓦里安,美国)测定全磷(TP),同时采用火焰原子吸收分光光度计测定全钾(TK)(TAS990SUPERAFG,普析,中国);有效磷(AP)采用 $NaHCO_3$ 浸提-钼锑抗分光光度法测定;有效钾(AK)采用 NH_4OAc 浸提-火焰光度法测定;铵态氮(NH_4^+-N)采用 KCl 浸提-靛酚蓝比色法测定;硝态氮(NO_3^--N)采用双波长紫外比色法测定. 所有实验中每个样品均设置 3 组重复.

1.5　统计分析

本文所用数据是多点多次重复的算术平均值,采用 Excel 2010 对数据进行处理,用 SPSS 22.0 对数据进行显著性和相关性统计分析,并用 Origin 2018 软件制图;使用 Canoco 4.5 软件进行冗余分析(RDA)进一步探索不同盐生植物群落土壤酶整体活性特征的主要影响因子.

2　结果与分析

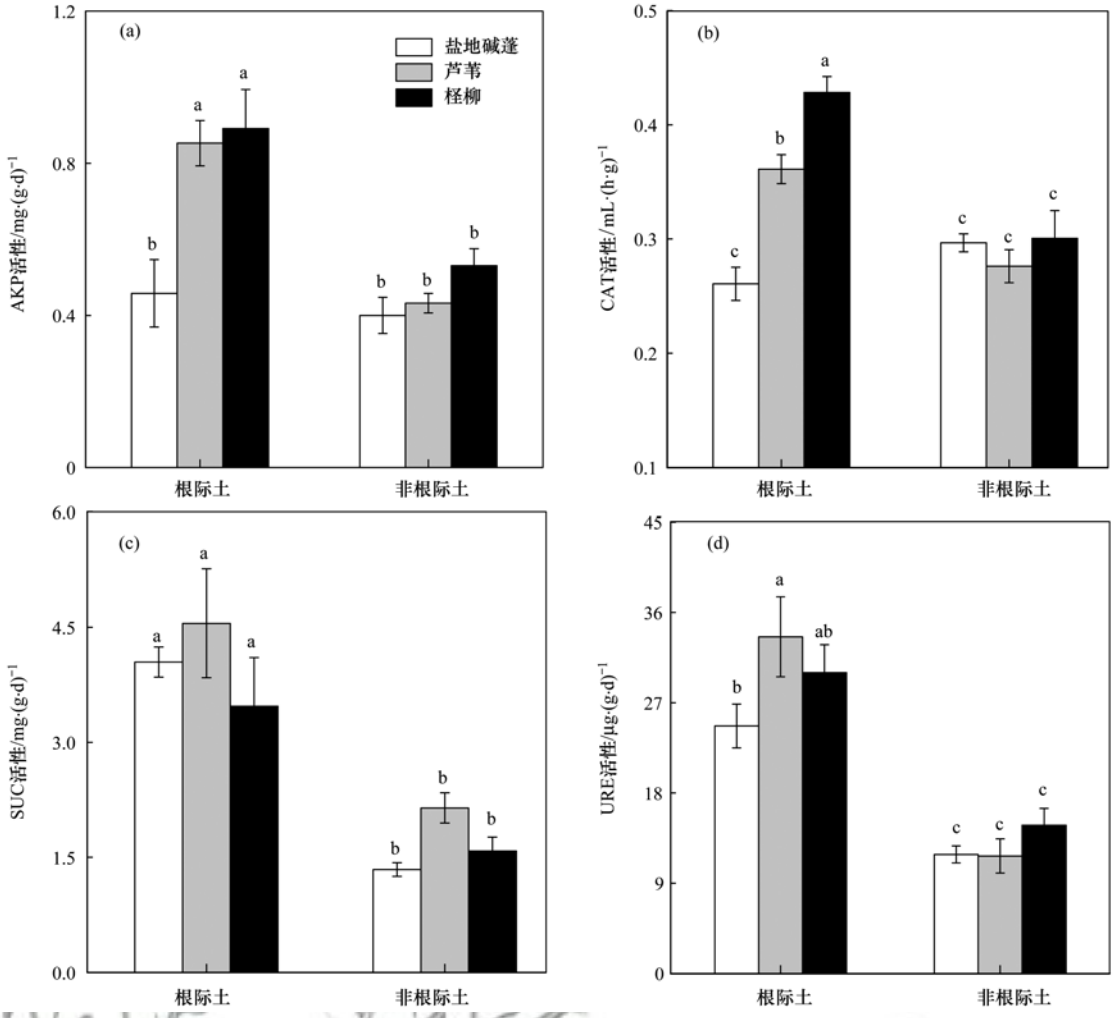
2.1　不同盐生植物群落土壤酶活性特征

本研究根际土壤中碱性磷酸酶与过氧化氢酶活性的变化趋势一致,均表现为盐地碱蓬 < 芦苇 < 柽柳,方差分析结果表明盐地碱蓬群落根际土壤碱性磷酸酶活性显著低于芦苇和柽柳群落[图 2(a),P < 0.05],而 3 种盐生植物群落根际土壤中的过氧化氢酶活性均存在显著差异[图 2(b)],P < 0.05). 根际土壤中蔗糖酶与脲酶活性的变化趋势分别为柽柳 < 盐地碱蓬 < 芦苇[图 2(c)]、盐地碱蓬 < 柽柳 < 芦苇[图 2(d)],方差分析结果表明芦苇群落根际土壤的脲酶活性显著高于盐地碱蓬群落(图 1d,P < 0.05),而 3 种群落之间根际土壤的蔗糖酶活性无显著差异[图 2(c),P > 0.05]. 不同盐生植物群落非根际土壤之间的酶活性均无显著差异(图 2,P > 0.05). 同一盐生植物群落根际与非根际土相比,除盐地碱蓬群落的过氧化氢酶活性外,其他所有群落中根际土壤的酶活性均显著高于非根际土壤(P < 0.05).

2.2　不同盐生植物群落土壤理化性质特征

如图 3 所示,同一盐生植物群落根际与非根际土相比,盐地碱蓬根际土壤中的 TC、TP、AP、NH_4^+-N和NO_3^--N均显著高于非根际土(P < 0.05). 盐生植物群落芦苇根际土壤中的 AP、AK 和NH_4^+-N 显著高于非根际土,而非根际土壤中的 pH 和 EC 显著高于根际土(P < 0.05). 在盐生植物柽柳群落中,根际土壤的 EC 显著低于非根际土壤,而其他土壤理化性质均表现为根际土壤显著高于非根际土壤(P < 0.05).

在根际土壤中, 3 种盐生植物群落的 pH 值、EC 和 TK 变化趋势分别为盐地碱蓬 < 芦苇 < 柽柳,芦苇 < 柽柳 < 盐地碱蓬和芦苇 < 盐地碱蓬 < 柽柳(图 3),且方差分析结果表明不同群落之间均存在显著差异(P < 0.05). 其他土壤理化性质,如 MC、NH_4^+-N、TN、TC 均呈现出碱蓬 < 芦苇 < 柽柳的趋



不同小写字母表示差异性显著($P<0.05$)

图2 不同盐生植物群落根际与非根际土壤酶活性特征

Fig. 2 Characteristics of soil enzyme activities of rhizosphere and non-rhizosphere soils in different halophytic plant communities

势,并且柽柳群落均显著高于盐地碱蓬和芦苇群落($P<0.05$). 而 TP 和NO_3^--N均呈现出柽柳 < 盐地碱蓬 < 芦苇的趋势,且柽柳群落的NO_3^--N显著低于盐地碱蓬和芦苇群落($P<0.05$). AK 在盐地碱蓬群落中的活性最低,且显著低于芦苇和柽柳群落($P<0.05$). AP 在盐地碱蓬群落中则显著高于柽柳,但二者与芦苇群落均无显著性差异($P>0.05$).

2.3 不同盐生植物群落土壤酶活性的影响因子

2.3.1 土壤酶活性的影响因素

双因素方差分析表明植被类型、根际效应及其交互作用均对土壤酶活性存在一定的影响(表1). 其中植被类型对碱性磷酸酶活性具有显著影响($P<0.05$),对过氧化氢酶活性具有极显著影响($P<0.01$). 根际效应对碱性磷酸酶活性影响显著($P<0.05$),对蔗糖酶、过氧化氢酶和脲酶活性均有极显著影响($P<0.01$). 而二者的交互作用(植被类型×根际效应)仅对过氧化氢酶活性影响极显著($P<0.01$).

2.3.2 土壤酶活性与土壤理化性质的相关性

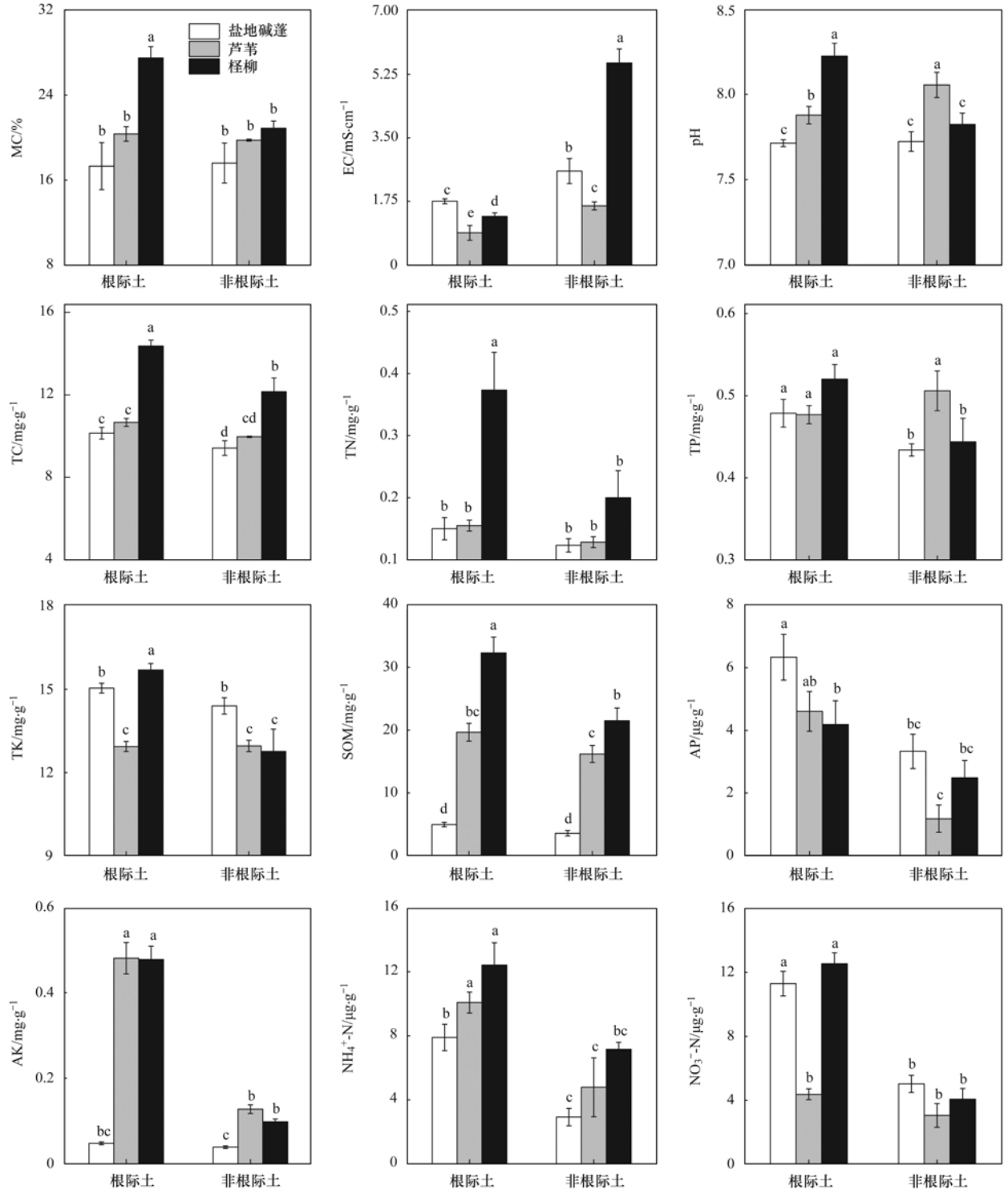
皮尔逊相关分析结果显示(表2),土壤蔗糖酶活性分别与 AK、AP 极显著正相关($P<0.01$),与NH_4^+-N显著正相关($P<0.05$),与EC极显著负相

表1 双因素方差分析结果的重要值(F)[1)]

Table 1 Important value (F) of two-way analysis of variance

影响因素	蔗糖酶活性(SUC)	碱性磷酸酶活性(AKP)	过氧化氢酶活性(CAT)	脲酶活性(URE)
植被类型	1.782	11.681 *	321.008 **	2.866
根际效应	62.433 **	16.704 *	4 173.682 **	66.184 **
植被类型×根际效应	2.561	2.680	231.307 **	6.577

1) * 表示 $P<0.05$, * * 表示 $P<0.01$



不同小写字母表示差异性显著($P<0.05$)

图 3　不同盐生植物群落根际与非根际土壤理化性质

Fig. 3　Physicochemical properties of rhizosphere and non-rhizosphere soils in different halophytic plant communities

关($P<0.01$). 碱性磷酸酶活性除与 MC 显著正相关($P<0.05$),与 TC、TN、TP、SOM、AK 和NH_4^+-N 极显著正相关($P<0.01$)外,其与 EC、pH、TK、AP 和NO_3^--N相关性不显著($P>0.05$). 过氧化氢酶活性与 TK 和NO_3^--N显著正相关($P<0.05$),与 MC、pH、TC、TN、SOM、AK 和NH_4^+-N极显著正相关($P<0.01$),但与 EC、TP 和 AP 之间无显著相关性($P>0.05$). 脲酶活性分别与 TN、SOM、AP、AK、NH_4^+-N和NO_3^--N极显著正相关($P<0.01$),与 EC 极显著负相关($P<0.01$),但其与 MC、pH、TC、TP 和 TK 之间的相关性均不显著($P>0.05$).

2.3.3　土壤酶整体活性特征的影响因子

RDA 结果显示(图 4), 3 种盐生植物群落的 4 种土壤酶活性在第Ⅰ和Ⅱ轴的解释量分别为

表 2 土壤酶活性与理化性质的皮尔逊相关系数[1)]

Table 2 Pearson's correlation coefficient of soil enzyme activities and physicochemical properties

土壤酶活性	MC	EC	pH	TC	TN	TP
蔗糖酶活性(SUC)	0.154	−0.488**	0.138	0.175	0.147	0.240
碱性磷酸酶活性(AKP)	0.521*	−0.282	0.239	0.499**	0.443**	0.481**
过氧化氢酶活性(CAT)	0.619**	−0.232	0.375**	0.718**	0.625**	0.221
脲酶活性(URE)	0.344	−0.446**	0.224	0.311	0.439**	0.272
土壤酶活性	TK	SOM	AP	AK	NH_4^+-N	NO_3^--N
蔗糖酶活性(SUC)	0.118	0.138	0.407**	0.438**	0.373*	0.248
碱性磷酸酶活性(AKP)	0.178	0.602**	0.114	0.698**	0.494**	0.285
过氧化氢酶活性(CAT)	0.273*	0.570**	0.035	0.701**	0.437**	0.330*
脲酶活性(URE)	0.201	0.411**	0.467**	0.716**	0.435**	0.402**

1) * 表示 $P<0.05$, * * 表示 $P<0.01$

88.2% 和 3.4%,即 12 种土壤理化性质前 2 个排序轴累计解释了 91.6% 的土壤酶活性变化. 该结果表明前 2 轴能够反映不同盐生植物群落土壤酶整体活性特征与理化性质的绝大部分信息,并主要由第Ⅰ轴决定. TC、SOM 和 MC 箭头连线最长,表明其是影响土壤酶活性在不同群落中分布的最大环境因子,其余影响较大的因子还包括 TN、NH_4^+-N和 EC.

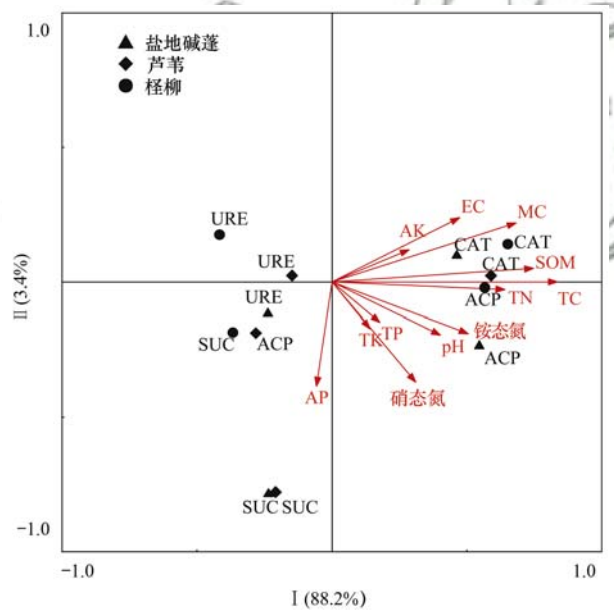


图 4 不同盐生植物群落土壤酶活性的冗余分析

Fig. 4 RDA of soil enzyme activities in different halophytic plant communities

对 12 个土壤理化性质进行蒙特卡洛检验排序,结果显示土壤理化性质对酶活性影响的重要值(F)的顺序为 TC > SOM > MC > TN > NH_4^+-N > EC > pH > NO_3^--N > AK > TP > TK > AP(表 3). 其中,TC、SOM 和 MC 达到极显著水平($P<0.01$),TN、NH_4^+-N、EC 达到显著水平($P<0.05$). 该 6 种土壤理化性质对 4 种土壤酶活性特征差异的解释量分别为 62.0%、49.6%、41.6%、36.4%、22.8% 和 20.1%,表明 TC、SOM、MC、TN、NH_4^+-N和 EC 是影响不同盐生植物群落土壤酶整体活性特征的主要驱动因子.

表 3 土壤理化性质解释土壤酶活性变化的重要性排序及显著性

Table 3 Importance ranking and significance of soil physicochemical properties for soil enzyme activities

土壤理化性质	重要性排序	解释量/%	P	F
TC	1	62.0	0.002	26.079
SOM	2	49.6	0.002	15.773
MC	3	41.6	0.004	11.404
TN	4	36.4	0.012	9.155
NH_4^+-N	5	22.8	0.040	4.733
EC	6	20.1	0.046	4.023
pH	7	14.5	0.146	2.724
NO_3^--N	8	9.2	0.208	1.613
AK	9	7.6	0.256	1.308
TP	10	3.0	0.488	0.491
TK	11	2.0	0.628	0.324
AP	12	0.9	0.782	0.143

3 讨论

3.1 土壤酶活性与土壤理化性质的分布特征

众所周知,根系分泌物直接作用于根际土壤,这会在一定程度上提高根际土壤酶活性,改善土壤结构,提高土壤肥力[16,29,30]. 本研究中各盐生植物群落根际土壤酶活性均高于非根际土,而土壤理化性质中除 EC 和 TP 外其他参数也表现为根际土壤高于非根际土壤,这与众多研究结果是一致的[15,31,32]. 根际土壤中酶活性高的原因在于根系分泌物中的碳水化合物和氨基酸等物质促进了根际土壤中 AP、NH_4^+-N和NO_3^--N等各形态养分的含量,为微生物提供营养源的同时加速了土壤酶的合成[33]. 由于植物自身可分泌酶的能力不同,且不同植物根系分泌物的种类不同,造成了根际土壤理化性质的差异,并影响了植物根际微生物群落结构[2,12,34,35],这些微生物所产生的水解酶(蔗糖酶、碱性磷酸酶、脲酶)和氧化还原酶(过氧化氢酶)等酶的数量和种类不同,导致了不同植物群落根际土壤酶活性的差异性. 而

非根际土不具备根际效应，缺乏土壤酶合成的条件，因此 3 种盐生植物群落非根际土的土壤酶活性无显著差异.

土壤 EC 与盐度有显著的相关关系，EC 越高盐度越高[36,37]. 本研究中，3 种盐生植物群落根际土壤中的 EC 显著低于非根际土，说明这 3 种盐生植物可以通过根系吸收土壤中的盐分，从而降低了根际土壤环境中的盐含量. 而 3 种盐生植物相比，柽柳群落中土壤含盐量最低，这是因为柽柳属于泌盐植物，具有发达的泌盐腺，柽柳除了在体内利用从土壤中吸收的盐分外，还通过叶片上的盐腺把过剩的盐分排出，以此调节体内离子平衡[38]，加速土壤中盐分的转移和降低. 研究还发现芦苇非根际土壤中的 TP 高于根际土壤，但其 AP 含量却低于根际土壤，说明芦苇群落的非根际土壤中以难溶难分解的含 P 化合物为主，这是由于芦苇根系对 P 素的吸收效率偏低，矿化有机 P 的速度较慢，从而使难分解的含 P 化合物不断在非根际环境中积累[37]. 另外，土壤中 AP 含量的变化与土壤 pH 有关. 据报道，土壤 pH 在 5.5 ~ 7.0 的范围内 P 的有效性最大，超过这个范围将呈下降趋势[39,40]. 本研究中 3 种盐生植物群落的土壤 pH 值均在 7.5 ~ 8.5 之间，此时，pH 越大，P 的有效性越低. 因此，根际土中具有较高 pH 的柽柳群落 AP 含量最低，而在非根际土中则以盐地碱蓬群落的 AP 含量最低.

3.2　土壤酶活性与土壤理化性质的相关性

本研究发现植被类型对土壤碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性具有显著影响，这与不同植物根系的数量及其分泌物有关. 例如，碱性磷酸酶是生物磷代谢的重要酶类，主要来自土壤中的微生物和植物根系的分泌物[41]，不同植被类型根系分泌物的差异会直接影响该酶的活性. 而过氧化氢酶是土壤降低过氧化氢毒害作用及合成腐殖质的重要氧化还原酶系，其活性与土壤微生物活动强弱及土壤呼吸强度有关[42]，因此不同植被类型及生物量会影响土壤呼吸强度，进而影响过氧化氢酶的活性. 本研究还发现取样位置对蔗糖酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶和脲酶活性均有显著影响. 例如，双因素方差分析结果显示植物根际效应对土壤酶活性的影响显著，且大于植被类型的影响，这是因为虽然植物根系分泌物中也包含酶类，但土壤酶主要来自微生物代谢，其活性大小在一定程度上反映了土壤微生物的丰度和多样性[2,6,35,43]. 根际效应的存在表明植物根际环境中微生物的数量和多样性显著高于非根际环境，而根际土壤酶的活性也显著高于非根际土.

以往研究发现根系分泌物能改善土壤的理化性质，从而提高土壤中酶的活性. 而土壤酶活性提高的同时，又反作用于土壤，加快各有机和无机营养物质的转化、矿化和降解速率，从而增加土壤中营养元素的有效成分[1,8]. 这种作用与反作用的机制反映了土壤酶活性与土理化性质之间的密切联系. 例如，蔗糖酶广泛参与土壤中碳水化合物的转化，为植物和微生物提供可利用的营养物质，其活性往往与有机质等肥力指标成正比[44~46]. 但本研究中土壤蔗糖酶活性与 SOM、TC、TN、TP 和 TK 等参数的相关性均不显著，但与土壤中有效养分（AP、AK 和 NH_4^+-N）的含量显著相关，表明土壤微生物的分解和矿化作用对该酶活性的提升贡献较大. 但有研究表明盐胁迫会抑制土壤微生物的生长，降低其分泌酶的能力，并对土壤蔗糖酶等多种酶的活性产生抑制作用[11,47]. 本研究中，蔗糖酶与 EC 之间显著的负相关关系也表明土壤盐含量对蔗糖酶活性具有抑制作用. 土壤磷酸酶可水解土壤中的有机 P 化合物，释放出无机 P，其活性的高低直接影响土壤有机 P 的分解转化及有效性[48]. 本研究中土壤碱性磷酸酶活性与 MC、TC、TN、TP、SOM、AK 和 NH_4^+-N 均呈显著正相关关系，表明土壤肥力状况是影响碱性磷酸酶活性的主要因子. 但意外的是碱性磷酸酶活性与土壤 AP 相关性不显著，这可能与黄河三角洲土壤中 P 素的矿化程度较低有关.

过氧化氢酶活性可以在一定程度上反映土壤微生物学过程的强度[42]. 本研究发现过氧化氢酶活性与 MC、pH、TC、TN、TK、SOM、AK、NH_4^+-N 和 NO_3^--N 均呈显著正相关关系，这在以往其他研究中也得到过证实[42,49]. 因此，过氧化氢酶活性常用来反映土壤氧化性污染程度和土壤肥力状况. 除此之外，脲酶能直接参与土壤中尿素的形态转化过程，促其水解生成氨、二氧化碳和水. 其中，氨是植物 N 素营养的直接来源，所以脲酶活性常被用来表征土壤中 N 素的情况[31]. 本研究发现与 N 素相关的 SOM、TN、NH_4^+-N 和 NO_3^--N 等参数均与土壤脲酶活性显著正相关，证实了该酶是盐生植物群落 N 素循环的主要驱动酶. 另外，EC 与脲酶活性显著负相关，这与以往研究中发现的脲酶活性随着盐度的增加而降低的结果是一致的[3,17]. 因此，在本研究中脲酶活性主要受 EC 和含氮化合物的影响，其可以反映黄河三角洲盐生植物群落根际与非根际土壤之间的脱盐与 N 素分布特征.

3.3　土壤酶活性整体分布特征的影响因子

本研究中，4 种土壤酶的活性分别与多个土壤理化指标显著相关，而 RDA 结果发现 TC、SOM、MC、TN、NH_4^+-N 和 EC 对土壤酶活性具有显著性影

响. 其中,TC、SOM、TN、NH_4^+-N均与土壤肥力密切相关,表明土壤肥力是黄河三角洲盐生植物群落土壤酶活性的主要促进因子. 对一般微生物而言,盐胁迫将干扰其物质吸收过程,抑制土壤微生物的生长,甚至导致微生物脱水死亡. 黄河三角洲滨海湿地内的土壤主要是盐渍土壤,土壤含盐量较高,故而 EC 对土壤酶活性表现出明显的抑制作用,这与众多研究结果是一致的[8, 31, 50]. 本研究还发现土壤 AP 对土壤酶活性的影响最小,除植被类型的因素外,还与黄河三角洲新生湿地土壤 P 素的矿化程度较低有关[37]. 而NO_3^--N对土壤酶整体活性的影响也不显著,这可能是由于采样时间正处在雨季,雨水充沛,潮上带湿地干湿交替频率较大,水淹次数和时长增加,导致土壤中硝化作用被削弱,反硝化作用逐渐占据了主导地位,这在一定程度上降低了NO_3^--N对土壤酶活性的影响力. 而NH_4^+-N由于在土壤中的移动性较小,不易随水分流失,此时土壤中的 N 素主要以NH_4^+-N的形态保留,促进了土壤NH_4^+-N对酶活性的影响作用.

4 结论

(1)黄河三角洲盐生植物群落根际效应显著,盐地碱蓬、芦苇和柽柳群落根际土壤中的酶活性和土壤肥力均高于非根际土,且不同植物群落的根际土壤中,碱性磷酸酶、过氧化氢酶和脲酶活性的变化趋势与群落的正向演替序列一致;

(2)双因素方差分析表明植物类型及其根际效应均会影响土壤酶的活性特征,二者对过氧化氢酶活性的影响最为显著,且根际效应的影响显著大于植被类型;

(3)4 种土壤酶的活性分别与多个土壤理化指标显著相关,RDA 结果表明对黄河三角洲整体土壤酶活性具有显著影响的因子从大到小依次为 TC、SOM、MC、TN、NH_4^+-N和 EC.

参考文献:

[1] 李猛, 张恩平, 张淑红, 等. 长期不同施肥设施菜地土壤酶活性与微生物碳源利用特征比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, **23**(1): 44-53.
Li M, Zhang E P, Zhang S H, *et al*. Comparison of soil enzyme activities and microbial C metabolism in installed vegetable fields under long-term different fertilization [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, **23**(1): 44-53.

[2] Jing C L, Xu Z C, Zou P, *et al*. Coastal halophytes alter properties and microbial community structure of the saline soils in the Yellow River Delta, China[J]. Applied Soil Ecology, 2019, **134**: 1-7.

[3] 李凤霞, 王学琴, 郭永忠, 等. 宁夏引黄灌区不同盐化程度土壤酶活性及微生物多样性研究[J]. 水土保持研究, 2013, **20**(1): 61-65.
Li F X, Wang X Q, Guo Y Z, *et al*. Study of microbial diversity and the soil enzyme activity in different salinized soil in Ningxia Yellow River irrigation region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, **20**(1): 61-65.

[4] 万忠梅, 吴景贵. 土壤酶活性影响因子研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, **33**(6): 87-92.
Wan Z M, Wu J G. Study progress on factors affecting soil enzyme activity[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition), 2005, **33**(6): 87-92.

[5] 刘水. 土壤酶活性影响因子综述[J]. 北京农业, 2014, (21): 249.

[6] Ouyang Y, Reeve J R, Norton J M. Soil enzyme activities and abundance of microbial functional genes involved in nitrogen transformations in an organic farming system[J]. Biology and Fertility of Soils, 2018, **54**(4): 437-450.

[7] Carrara J E, Walter C A, Hawkins J S, *et al*. Interactions among plants, bacteria, and fungi reduce extracellular enzyme activities under long-term N fertilization[J]. Global Change Biology, 2018, **24**(6): 2721-2734.

[8] 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 different aged coastal reclamation areas, Eastern China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 1404-1412.

[9] Li Y H, Chu X Z. Effect of different land use types on soil enzyme activity on the edge of Ganjiahu wetland in Xinjiang[J]. Key Engineering Materials, 2012, **500**: 238-242.

[10] 田静, 盛茂银, 汪攀, 等. 西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 4278-4286.
Tian J, Sheng M Y, Wang P, *et al*. Influence of land use change on litter and soil C, N, P stoichiometric characteristics and soil enzyme activity in Karst ecosystem, Southwest China [J]. Environmental Science, 2019, **40**(9): 4278-4286.

[11] Cao D, Shi F C, Koike T, *et al*. Halophyte plant communities affecting enzyme activity and microbes in saline soils of the Yellow River Delta in China[J]. CLEAN-Soil Air Water, 2014, **42**(10): 1433-1440.

[12] Ge Y, Zhang C B, Jiang Y P, *et al*. Soil microbial abundances and enzyme activities in different rhizospheres in an integrated vertical flow constructed wetland[J]. CLEAN-Soil Air Water, 2011, **39**(3): 206-211.

[13] 禹朴家, 范高华, 韩可欣, 等. 基于土壤微生物生物量碳和酶活性指标的土壤肥力质量评价初探[J]. 农业现代化研究, 2018, **39**(1): 163-169.
Yu P J, Fan G H, Han K X, *et al*. Soil quality assessment based on soil microbial biomass carbon and soil enzyme activities[J]. Research of Agricultural Modernization, 2018, **39**(1): 163-169.

[14] 方瑛, 马任甜, 安韶山, 等. 黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1121-1127.
Fang Y, Ma R T, An S S, *et al*. Heidaigou opencast coal mine: soil enzyme activities and soil physical and chemical properties under different vegetation restoration [J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 1121-1127.

[15] 王晓锋, 刘红, 张磊, 等. 澎溪河消落带典型植物群落根际土壤无机氮形态及氮转化酶活性[J]. 中国环境科学, 2015,

35(10)：3059-3068.
Wang X F, Liu H, Zhang L, *et al*. Inorganic nitrogen forms and related enzyme activity of rhizosphere soils under typical plants in the littoral zone of Pengxi River[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(10): 3059-3068.

[16] 杨程, 徐程扬. 根系分泌物及根际效应研究综述[A]. 见：第十届中国科协年会论文集(二)[C]. 郑州：中国科学技术协会, 河南省人民政府, 2008. 373-378.

[17] 张建锋, 邢尚军, 樊宝敏, 等. 黄河三角洲植被群落和土壤酶活性对湿地退化的响应[J]. 水土保持通报, 2009, **29**(4)：1-6.
Zhang J F, Xing S J, Fan B M, *et al*. Responses of plant community and soil enzyme activities to wetland degradation in the Yellow River Delta region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, **29**(4): 1-6.

[18] 范晓梅, 刘高焕, 唐志鹏, 等. 黄河三角洲土壤盐渍化影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(1)：139-144.
Fan X M, Liu G H, Tang Z P, *et al*. Analysis on main contributors influencing soil salinization of Yellow River Delta[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, **24**(1): 139-144.

[19] Guan B, Yu J B, Cao D, *et al*. The ecological restoration of heavily degraded saline wetland in the Yellow River Delta[J]. CLEAN-Soil Air Water, 2013, **41**(7): 690-696.

[20] Zhang J F, Jiang J M, Xing S J. Planting techniques of *Tamarix chinensis* and its effect on saline soil remediation[A]. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering[C]. Shanghai: IEEE, 2008. 4259-4262.

[21] Zhao K F. Desalinization of saline soils by *Suaeda salsa*[J]. Plant and Soil, 1991, **135**(2): 303-305.

[22] Lin Q, Ishikawa T, Akoh R, *et al*. Soil salinity reduction by river water irrigation in a reed field: a case study in Shuangtai Estuary Wetland, Northeast China[J]. Ecological Engineering, 2016, **89**: 32-39.

[23] 林学政, 沈继红, 刘克斋, 等. 种植盐地碱蓬修复滨海盐渍土效果的研究[J]. 海洋科学进展, 2005, **23**(1)：65-69.
Lin X Z, Shen J H, Liu K Z, *et al*. Study on remediation effects of *Suaeda salsa* L. planting on coastal saline soil[J]. Advances in Marine Science, 2005, **23**(1): 65-69.

[24] 李庆梅, 侯龙鱼, 刘艳, 等. 黄河三角洲盐碱地不同利用方式土壤理化性质[J]. 中国生态农业学报, 2009, **17**(6)：1132-1136.
Li Q M, Hou L Y, Liu Y, *et al*. Properties of saline-alkaline soil under different land use types in Yellow River Delta[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, **17**(6): 1132-1136.

[25] Riley D, Barber S A. Effect of ammonium and nitrate fertilization on phosphorus uptake as related to root-induced pH changes at the root-soil interface[J]. Soil Science Society of America Journal, 1971, **35**(2): 301-306.

[26] 陈悦, 吕光辉, 李岩. 独山子区优势草本植物根际与非根际土壤微生物功能多样性[J]. 生态学报, 2018, **38**(9)：3110-3117.
Chen Y, Lü G H, Li Y. Soil microbial functional diversity of rhizosphere and non-rhizosphere of three dominant herbaceous plants in the Dushanzi District[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(9): 3110-3117.

[27] 关松荫, 张德生, 张志明. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京：农业出版社, 1986.

[28] 赵兰坡, 姜岩. 土壤磷酸酶活性测定方法的探讨[J]. 土壤通报, 1986, 17(3)：138-141.

[29] 王小平, 肖肖, 唐天文, 等. 连香树人工林根系分泌物输入季节性变化及其驱动的根际微生物特性研究[J]. 植物研究, 2018, **38**(1)：47-55.
Wang X P, Xiao X, Tang T W, *et al*. Seasonal changes of the input of root exudates and its driving characteristics of rhizosphere microbe in a *Cercidiphyllum japonicum* sieb. Plantation[J]. Bulletin of Botanical Research, 2018, **38**(1): 47-55.

[30] Li L, Xing M, Lv J W, *et al*. Response of rhizosphere soil microbial to *Deyeuxia angustifolia* encroaching in two different vegetation communities in alpine tundra[J]. Scientific Reports, 2017, **7**: 43150.

[31] 弋良朋, 张辉. 滨海 4 种盐生植物根际土壤酶活性特征与主要养分的关系[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(2)：270-275.
Yi L P, Zhang H. Characteristics of soil enzymatic activitys and relationship with the main nutrient in the rhizosphere of four littoral halophytes[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, **20**(2): 270-275.

[32] 曹永昌, 杨瑞, 刘帅, 等. 秦岭典型林分夏秋两季根际与非根际土壤微生物群落结构[J]. 生态学报, 2017, **37**(5)：1667-1676.
Cao Y C, Yang R, Liu S, *et al*. Characteristics of microbial community in forest soil between rhizosphere and non-rhizosphere in summer and autumn in Qinling Mountains, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(5): 1667-1676.

[33] 李茜, 刘松涛, 张硕新, 等. 渭北黄土区核桃根际土壤酶活性动态变化研究[J]. 西南农业学报, 2014, **27**(5)：2020-2024.
Li Q, Liu S T, Zhang S X, *et al*. Dynamic change of enzyme activity in rhizosphere soil of *Juglans regia* in loess area of Northern Wei River[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2014, **27**(5): 2020-2024.

[34] 李传荣, 许景伟, 宋海燕, 等. 黄河三角洲滩地不同造林模式的土壤酶活性[J]. 植物生态学报, 2006, **30**(5)：802-809.
Li C R, Xu J W, Song H Y, *et al*. Soil enzyme activities in different plantations in lowlands of the Yellow River Delta, China[J]. Journal of Plant Ecology, 2006, **30**(5): 802-809.

[35] Li W T, Wu M, Liu M, *et al*. Responses of soil enzyme activities and microbial community composition to moisture regimes in paddy soils under long-term fertilization practices[J]. Pedosphere, 2018, **28**(2): 323-331.

[36] Rhoades J D. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids[A]. In: Sparks D L (Ed.). Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods. Madison: SSSA, ASA, 1996. 417-435.

[37] 王震宇, 温胜芳, 邢宝山, 等. 4 种水生植物根际磷素耗竭效应的比较[J]. 环境科学, 2008, **29**(9)：2475-2480.
Wang Z Y, Wen S F, Xing B S, *et al*. Phosphorus rhizosphere depletion effect of four aquatic plants[J]. Environmental Science, 2008, **29**(9): 2475-2480.

[38] 张道远, 尹林克, 潘伯荣. 柽柳泌盐腺结构、功能及分泌机制研究进展[J]. 西北植物学报, 2003, **23**(1)：190-194.
Zhang D Y, Yin L K, Pan B R. A review on the study of salt glands of *Tamarix*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, **23**(1): 190-194.

[39] 贾兴永, 李菊梅. 土壤磷有效性及其与土壤性质关系的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2011, (6)：76-82.
Jia X Y, Li J M. Study on soil phosphorus availability and its relation to the soil properties in 14 soils from different sites in China[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2011, (6): 76-82.

[40] Mullins G L, Sikora F J. Effect of soil pH on the requirement for water-soluble phosphorus in triple superphosphate fertilizers[J]. Fertilizer Research, 1994, **40**(3): 207-214.

[41] 王利娟, 韩丛丛, 牛宋芳, 等. 围封对荒漠草原不同植物群落土壤微生物及酶活性的影响[J]. 宁夏农林科技, 2017, **58**(3): 47-51.
Wang L J, Han C C, Niu S F, *et al*. Effects of enclosure on soil microbes and enzyme activities of different communities in desert steppe[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2017, **58**(3): 47-51.

[42] 王秀梅, 安毅, 秦莉, 等. 镉胁迫下土壤理化因子与过氧化氢酶活性的通径分析[J]. 中国农学通报, 2018, **34**(11): 59-65.
Wang X M, An Y, Qin L, *et al*. Path analysis of soil physicochemical factors and catalase activities under cadmium stress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, **34**(11): 59-65.

[43] Bolton Jr H, Elliott L F, Papendick R I, *et al*. Soil microbial biomass and selected soil enzyme activities: effect of fertilization and cropping practices[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1985, **17**(3): 297-302.

[44] 赵仁竹, 汤洁, 梁爽, 等. 吉林西部盐碱田土壤蔗糖酶活性和有机碳分布特征及其相关关系[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(2): 244-249.
Zhao R Z, Tang J, Liang S, *et al*. Distribution of soil organic carbon and invertase activity and its correlation in saline-alkali paddy field in West Jilin[J]. Ecology and Environment Sciences, 2015, **24**(2): 244-249.

[45] Yang W G, Zheng F L, Han Y, *et al*. Investigating spatial distribution of soil quality index and its impacts on corn yield in a cultivated catchment of the Chinese Mollisol region[J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, **80**(2): 317-327.

[46] 仙旋旋, 孔范龙, 朱梅珂, 等. 水盐梯度对滨海湿地土壤养分指标和酶活性的影响[J]. 水土保持通报, 2019, **39**(1): 65-71.
Xian X X, Kong F L, Zhu M K, *et al*. Effects of water and salt gradients on soil nutrient indices and enzyme activities in coastal wetlands[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, **39**(1): 65-71.

[47] 周德平, 吴淑杭, 褚长彬, 等. 盐胁迫对蔬菜地土壤微生物及土壤酶活的毒害效应[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(8): 1602-1607.
Zhou D P, Wu S H, Chu C B, *et al*. Eco-toxicological effects of salt stress on microorganisms and enzymes activities in vegetable soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, **30**(8): 1602-1607.

[48] 刘雅淑, 孟春凤, 刘延鹏, 等. 森林土壤磷酸酶活性变化特征及其影响因素[J]. 湖北农业科学, 2016, **55**(4): 850-854.
Liu Y S, Meng C F, Liu Y P, *et al*. Variations of phosphatase activity in forest soil and its influencing factors[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, **55**(4): 850-854.

[49] 吴雪, 贡璐, 冉启洋, 等. 阿拉尔垦区土壤理化因子与酶活性的通径分析[J]. 水土保持研究, 2013, **20**(3): 48-54.
Wu X, Gong L, Ran Q Y, *et al*. Path analysis of soil physicochemical properties and enzymatic activities in the Aler Reclamation Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, **20**(3): 48-54.

[50] 赵萌, 印春生, 厉成伟, 等. Miseq 测序分析围垦后海三棱藨草湿地土壤微生物群落多样性的季节变化[J]. 上海海洋大学学报, 2018, **27**(5): 718-727.
Zhao M, Yin C S, Li C W, *et al*. Using Miseq sequencing to analyze seasonal soil microbial community dynamics in reclaimed *Scirpus mariqueter* coastal wetlands[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2018, **27**(5): 718-727.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 41 No. 2

Feb. 15, 2020

CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded $PM_{2.5}$ of Typical Regions in China Based on GAM Model ····· NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui (499)

Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China ····· CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, *et al.* (510)

Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in $PM_{2.5}$ Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain ····· SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, *et al.* (520)

Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in $PM_{2.5}$ During Winter in Nanjing Jiangbei New Area ····· QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, *et al.* (529)

Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines ($PM_{2.5}$) in Northern Suburb of Nanjing ····· LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, *et al.* (537)

Pollution Characteristics and Source Apportionment of *n*-Alkanes and PAHs in Summertime $PM_{2.5}$ at Background Site of Yangtze River Delta ····· XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, *et al.* (554)

Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in $PM_{2.5}$ in Changchun City, Autumn of 2017 ··· ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, *et al.* (564)

Heavy Pollution Characteristics and Assessment of $PM_{2.5}$ Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018 ····· ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, *et al.* (574)

Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province ····· QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, *et al.* (587)

Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province ····· ZHANG Rui-fang, YU Xing-na (600)

Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring $PM_{2.5}$ with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS) ····· HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, *et al.* (609)

Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing ····· YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, *et al.* (620)

Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China ····· QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, *et al.* (630)

Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives ····· QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao (638)

Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City ····· DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu (647)

Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms ····· SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, *et al.* (656)

Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030 ····· JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, *et al.* (665)

VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National Ⅵ Diesel Engine ····· QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, *et al.* (674)

Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohegou Basin ····· GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, *et al.* (682)

Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River ····· YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, *et al.* (691)

Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River ····· ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, *et al.* (702)

High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China ····· DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, *et al.* (713)

Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea ····· SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, *et al.* (728)

Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai ····· LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, *et al.* (734)

Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an ····· YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, *et al.* (743)

Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure ····· ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, *et al.* (750)

Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation ····· ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, *et al.* (756)

Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite ····· ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, *et al.* (763)

Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal: Adsorption Behavior and Mechanism ····· SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, *et al.* (773)

Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar ····· SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, *et al.* (784)

Phosphate Adsorption from Water on CaO_2-loaded Magnetic Diatomite ····· XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, *et al.* (792)

Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach ····· TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, *et al.* (801)

Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed ····· ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, *et al.* (809)

Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process ····· YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, *et al.* (815)

Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge ····· RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, *et al.* (823)

Denitrification Process and N_2O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium *Pseudomonas aeruginosa* YL ····· YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, *et al.* (831)

Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria ····· WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, *et al.* (839)

Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application ····· ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, *et al.* (849)

Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration ····· ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, *et al.* (856)

Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules ····· LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, *et al.* (867)

Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi ····· WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, *et al.* (876)

Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau ····· YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, *et al.* (886)

Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta ····· MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, *et al.* (895)

Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of *Pinus tabulaeformis* Plantations on Loess Plateau ··· SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-yang, LIU Hong-fei, *et al.* (905)

Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types ····· ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, *et al.* (914)

Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil ····· YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, *et al.* (922)

Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism ····· LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, *et al.* (932)

Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds ····· HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, *et al.* (941)

Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry ····· CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, *et al.* (952)

Accumulation and Translocation of Cd in *Brassica rapa* Under the Influence of Selenium ····· YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, *et al.* (962)

Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two *Brassica napus* L. Cultivars ····· BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, *et al.* (970)

Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by *Trifolium Repens* with Biodegradable Chelate GLDA ····· HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, *et al.* (979)

Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks ····· MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, *et al.* (986)

Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors ····· CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, *et al.* (997)

Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces ····· ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, *et al.* (1005)