

百方知库  
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



2019

Vol.40 No.12  
第40卷 第12期

目次(卷终)

研究报告

京津冀秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 污染概况和预报结果评估 ..... 朱媛媛,高愈霄,刘冰,王晓彦,朱莉莉,许荣,汪巍,丁俊男,李健军,段小丽(5191)

2016~2017年采暖期华北平原东部 PM<sub>2.5</sub> 组分特征及来源解析 ..... 张逸琴,王杰,高健,徐仲均,车飞,马彤,杨艳,刘素,闫璐璐(5202)

霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析 ..... 王振彬,刘安康,卢文,杨晓旻,王红磊,陈魁,夏丽(5213)

上海郊区家庭妇女 PM<sub>2.5</sub> 重金属组分暴露水平、来源与健康风险 ..... 罗燃燃,戴海夏,张蕴晖,乔利平,马英歌,周敏,夏斌,朱清扬,赵迎亚,黄成(5224)

固定污染源可凝结颗粒物测量方法 ..... 蒋靖坤,邓建国,王刚,张莹,李妍菁,段雷,郝吉明(5234)

家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 ..... 张嘉妮,曾春玲,刘锐源,姚懿娟,柯云婷,范丽雅,叶代启(5240)

抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟 ..... 竹涛,吕怡蓉,边文璟,牛文凤,袁前程,段二红,于洋,林军(5250)

新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响 ..... 李琦路,吴锦涛,张颖,孙玉静,乔泓钦,张子伟,裴梦园,张孟琼,任明浩(5258)

成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 ..... 方淑红,朱和祥,叶芝祥,印红玲,孙静(5265)

祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析 ..... 张百娟,李宗省,王昱,李永格,吕越敏,袁瑞丰,桂娟(5272)

长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估 ..... 封梦娟,张芹,宋宁慧,卜元卿,杨正标,刘艳华,郭瑞昕,陈建秋,张圣虎(5286)

夏秋季混凝剂对复合锰氧化膜去除地表水中氨氮和锰的影响 ..... 程丽杰,黄廷林,程亚,张莎莎,阮昭意,卢磊(5294)

浙江省 H 市供水系统消毒副产物及其健康风险评价 ..... 刘俊萍,于建全,李青松,马晓雁,杨玉龙,贾佳(5302)

三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 ..... 陈昭宇,李思悦(5309)

川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性 ..... 刘堰杨,孙辉,刘琛,王小沁(5318)

三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 ..... 曹瑞霞,刘京,邓开开,先宇,王伟,方芳,欧阳文娟,郭劲松(5330)

九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应 ..... 黄亚玲,唐莉,黄金良,肖才荣(5340)

不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响 ..... 方娜,刘玲玲,游清徽,田娜,吴燕平,阳文静(5348)

太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义 ..... 耿雪,文帅龙,孙培荣,徐楚天,李大鹏,黄勇(5358)

太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价 ..... 方家琪,祁闯,张新厚,韩睿明,黄和笑,王卓森,王国祥(5367)

降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 ..... 李晓虹,雷秋良,周脚根,张亦涛,李影,胡万里,武淑霞,翟丽梅,王洪媛,刘宏斌(5375)

外源 Ca<sup>2+</sup> 和 K<sup>+</sup> 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 ..... 吴丹,孙萍,陈广琳,陈友媛,彭昌盛(5384)

泽泻(*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响 ..... 王团团,李贝贝,王赛,华佩,陈军,应光国(5394)

复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性 ..... 刘冰,郑煜铭,李清飞,赵承美,魏巍,张凯(5401)

铅、镉和铜改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 ..... 刘婷,赵钰颖,林建伟,詹艳慧,秦琴(5411)

生物炭结构性质对氨氮的吸附特性影响 ..... 陈梅,王芳,张德俐,易维明(5421)

溶解氧对悬浮与附着生长系统短程硝化反应的影响机制 ..... 王嗣禹,刘灵婕,王芬,季民(5430)

间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响 ..... 李冬,刘志成,徐贵达,李帅,张杰(5438)

共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征 ..... 王茹,刘梦瑜,刘冰茵,赵治国,袁林江(5446)

阶梯曝气对城市污水好氧颗粒污泥系统的影响 ..... 李冬,魏子清,劳会妹,李帅,张杰(5456)

酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能 ..... 俞心怡,向金豪,刘英,龚天翼,张彬辉,吕文洲(5465)

基于 GEE 的 1998~2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 ..... 娄佩卿,付波霖,林星辰,闭璐,马瑞雪,唐廷元(5473)

基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价 ..... 解雪峰,濮励杰,朱明,吴涛,许艳(5484)

淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 排放通量的影响 ..... 李敬,黄佳芳,罗敏,刘育秀,谭季,朱爱菊,王声钰,仝川(5493)

养殖塘 CH<sub>4</sub> 排放特征及其影响因素 ..... 王娇,肖薇,张秀芳,张弥,张文庆,刘强,陈争,董保华,李旭辉(5503)

施肥对高粱地土壤呼吸及其温度敏感性的影响 ..... 严俊霞,张媛,焦晓燕(5515)

高硒高镉区土地安全区划方法 ..... 王锐,侯宛苓,李雨潼,余涛,陈娟(5524)

不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 ..... 陈树兰,许晨阳,耿增超,王强,祝乐,龚园,拓卫卫(5531)

水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 ..... 吴秋梅,刘刚,王慧峰,胡文友,黄标(5540)

狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响 ..... 黄健,朱旭炎,陆金,孙雨,赵兴青(5550)

林地转型耕地对东北丘陵区白浆土 *cbbL* 细菌群落丰度和结构的影响 ..... 王蕊,吴宪,李刚,修伟明,王丽丽,张贵龙(5561)

**粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑**

粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考 ..... 常春英,董敏刚,邓一荣,肖荣波,刘丽丽(5570)

粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 ..... 张宁,张盛,杨海超,张建通(5581)

城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响:以粤港澳大湾区为例 ..... 马仕君,周传斌,杨光,赵志岚,刘懿颀(5593)

粤港澳大湾区丘陵区带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析 ..... 侯文隽,龚星,詹泽波,刘锋,黄子航,杨立宏,林晓琛(5604)

粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律 ..... 邓一荣,陆海建,董敏刚,程洲,庄长伟,肖荣波,钟音,彭平安(5615)

针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 ..... 刘千钧,李想,周阳媚,唐杰鹏,林亲铁,姚琨(5623)

广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价 ..... 陈洁宜,刘广波,崔金立,肖唐付(5629)

Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 ..... 林挺,罗飞,朱艳,杨坤,郝秀平(5640)

《环境科学》第 40 卷(2019 年)总目录 ..... (5649)

《环境科学》征订启事(5233) 《环境科学》征稿简则(5285) 信息(5357, 5420, 5429)

# 基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价

解雪峰<sup>1</sup>, 濮励杰<sup>2,3\*</sup>, 朱明<sup>2,3</sup>, 吴涛<sup>1</sup>, 许艳<sup>3,4</sup>

(1. 浙江师范大学地理与环境科学学院, 金华 321004; 2. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 3. 自然资源部海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210023; 4. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009)

**摘要:** 评估围垦后土壤质量的变化过程可以为土壤抑盐、培肥等调控措施提供科学指导。以不同围垦年限(5、30、38 和 61 a)滩涂围垦区和光滩为研究对象, 基于最小数据集方法筛选了与土壤质量密切相关的土壤黏粒比例、土壤盐分(SSC)、土壤有机质(SOM)、全钾(TK)和土壤容重(BD)这 5 个指标, 结合 TOPSIS 模型构建土壤质量指数对滨海滩涂围垦后土壤质量演变过程进行评价。结果表明, 滩涂围垦后土壤粒径逐渐细化, 土壤含水量和土壤容重逐渐降低, 土壤脱盐脱碱活动持续进行并伴随着养分和速效养分含量的逐渐累积。研究区土壤质量指数在 24.06 ~ 63.08 之间, 并呈现出: 光滩(20.04 ± 11.48) < 围垦 5 a(29.33 ± 10.65) < 围垦 30 a(51.52 ± 8.76) ≈ 围垦 38 a(49.98 ± 10.75) < 围垦 61 a(58.37 ± 3.15), 土壤质量大致经历了“初期稳定-迅速提升-相对稳定”这 3 个阶段。土壤质量因子障碍程度的排序为黏粒比例 > SSC > SOM > TK > BD, 较低的黏粒含量和较高的盐分是围垦区土壤提升的主要障碍因子。

**关键词:** 土壤质量; 最小数据集; TOPSIS 模型; 障碍因子; 滩涂围垦区

中图分类号: X825 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)12-5484-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201905129

## Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model

XIE Xue-feng<sup>1</sup>, PU Li-jie<sup>2,3\*</sup>, ZHU Ming<sup>2,3</sup>, WU Tao<sup>1</sup>, XU Yan<sup>3,4</sup>

(1. College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China; 2. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3. Key Laboratory of the Coastal Zone Exploitation and Protection of Ministry of Natural Resources, Nanjing 210023, China; 4. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

**Abstract:** Investigating the change of soil quality during reclamation can provide scientific guidance for desalinization, fertilization, etc. Soil samples were collected from natural tidal flat areas (0 years) and coastal tidal flat reclamation areas with different reclamation years (5, 30, 38, and 61 years) to assess the changes in soil quality after 60 years of reclamation. Soil quality was evaluated using a soil quality index (SQI), which was calculated by the selected minimum data set (MDS) and TOPSIS method. The ratio of clay content (CLAY), soil salt content (SSC), soil organic carbon (SOC), total potassium (TK), and bulk density (BD) were selected as soil quality indicators involving soil physical and chemical properties based on the MDS. The results showed that soil particle size tended to refine gradually with the continuous decrease of sand content and increase of silt and clay content. Simultaneously, soil water content (SWC) and soil BD decreased gradually during the reclamation period. Additionally, SSC, pH and sodium adsorption ratio (SAR) decreased significantly with increase in reclamation years, whereas the nutrients and available nutrients were accumulated gradually, such as soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), available nitrogen (AN), and available phosphorus (AP). However, C/N, TK and available potassium (AK) showed a decrease with increasing reclamation years, and the cation exchange capacity (CEC) showed a trend of first decrease and then increase. Finally, SQI values varied from 24.06 in the bare flat soils to 63.08 in the soils after 63 years of reclamation, and showed that bare flat (20.04 ± 11.48) < reclamation for 5 years (29.33 ± 10.65) < reclamation for 30 years (51.52 ± 8.76) ≈ reclamation for 38 years (49.98 ± 10.75) < reclamation for 61 years (58.37 ± 3.15), which has gone through approximately three stages of “initial stability-rapid improvement-relative stability.” Soil CLAY content had the highest obstacle degree towards SQI among the selected MDS indicators, followed by SSC, SOM, TK, and SWC, and thereby the lower clay content and higher salt content were the main obstacle factors for promotion of soil quality in reclamation areas.

**Key words:** soil quality; minimum data set; TOPSIS model; obstacle factor; tidal flat reclamation area

收稿日期: 2019-05-17; 修订日期: 2019-07-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41230751, 41701609); 自然资源部公益性行业科研专项(201511086); 浙江省自然科学基金项目(LY19D010007); 自然资源部海岸带开发与保护重点实验室开放基金项目(2017CZEPK09); 浙江师范大学科研启动项目(ZZ323205020518001987)

作者简介: 解雪峰(1991~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为土地利用及其环境效应, E-mail: xiexuefeng@zjnu.cn

\* 通信作者, E-mail: ljpu@nju.edu.cn

全球人口增长和城市化进程所带来的耕地减少使得粮食压力日益突出, 粮食安全问题受到广泛关注<sup>[1]</sup>. 加之, 部分土地资源被滥占滥用、低效利用和严重污染, 土地资源数量和质量不断降低, 土地资源短缺已成为制约区域经济发展与粮食安全保障的重要障碍<sup>[2,3]</sup>. 我国东部沿岸发育近  $2 \times 10^4 \text{ km}^2$  的滨海盐碱滩涂湿地, 被认为是重要的后备土地资源<sup>[4~6]</sup>. 近年来, 滨海滩涂被大量围垦用于补充耕地资源, 促进沿海经济发展. 然而, 滨海滩涂在形成过程中受海水浸渍的影响, 盐碱化危害严重, 严重抑制了滩涂土壤质量和作物产量, 使得土地的生产效率和粮食单产偏低<sup>[7,8]</sup>. 因此, 滨海滩涂围垦后土壤质量的演变过程备受关注<sup>[9,10]</sup>.

土壤质量是土壤多种功能的综合体现, 直接关系到作物生长及产量<sup>[11,12]</sup>. 受土壤属性空间变异性的影响, 选择具有代表性的评价指标对于评估土壤质量至关重要<sup>[13]</sup>. 最小数据集(MDS)方法因其可以通过较少的参数来反映土壤质量状况在土壤质量评价指标体系构建中得到了广泛应用<sup>[14,15]</sup>. 在土壤质量评价方法上, 多数研究在构建最小数据集的基础上采用加权求和的方式评估土壤质量, 其方法较为简单且客观性不强<sup>[15,16]</sup>. 逼近理想点排序法(TOPSIS)是一种逼近理想解的多属性排序法, 它根据计算样本靠近/偏离正、负理想解的相对距离来评价样本的优劣<sup>[13]</sup>. TOPSIS 法对样本容量无特殊要求, 且不受参考序列选择的干扰, 广泛应用于水质和资源承载力评价等领域中, 但目前土壤质量评估中应用不多<sup>[13,17]</sup>. 本文以江苏中部典型滩涂围垦区为研究区, 通过最小数据集和逼近理想点排序法

相结合评估滨海滩涂围垦区土壤质量变化过程, 以期为滩涂资源的管理和可持续利用提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于江苏省南通市如东县, 地处长江三角洲北翼( $120^{\circ}42' \sim 121^{\circ}22' \text{ E}$ ,  $32^{\circ}12' \sim 32^{\circ}36' \text{ N}$ ). 该区为北亚热带季风性湿润气候, 雨热充足, 年平均降雨量和年平均温度分别为  $1\ 028.6 \text{ mm}$  和  $15.0^{\circ}\text{C}$ . 如东县拥有滨海滩涂面积约  $693 \text{ km}^2$ , 其中建国后已有  $241 \text{ km}^2$  被围垦. 研究区土壤由现代海相和河流沉积形成, 属粉沙淤泥质滨海盐渍土. 研究区高程在  $-1 \sim 6 \text{ m}$  之间, 大致呈海陆梯度递增, 土地利用方式和耕作历史较为复杂, 大致经历了荒滩→海水养殖→淡水养殖/耕地→耕地的演替模式, 根据围垦年限主要分为 3 个阶段: 围垦早期阶段( $0 \sim 10 \text{ a}$ ), 围垦土地主要用于海水养殖或抛荒, 主要植被类型为护花米草、碱蓬、盐蒿、田菁等盐生植物; 围垦中期阶段( $10 \sim 30 \text{ a}$ ), 海水养殖鱼塘逐渐转变为淡水养殖鱼塘和耕地, 部分耐盐品种的棉花、玉米等农作物开始种植; 围垦后期阶段( $> 30 \text{ a}$ ), 土地利用类型基本以耕地为主, 作物种类逐渐增多, 如油菜、蚕豆、小麦、水稻和玉米等.

### 1.2 样品采集与分析

本土壤样品于 2012 年 9 月在江苏省如东县老北坎垦区(1951 年围垦, 61 a)、新北坎垦区(1974 年围垦, 38 a)、东凌垦区(1982 年围垦, 30 a)和豫东垦区(2007 年围垦, 5 a)选取典型土地利用方式分别选取 14、14、12 和 9 个样点, 同时在垦区外围

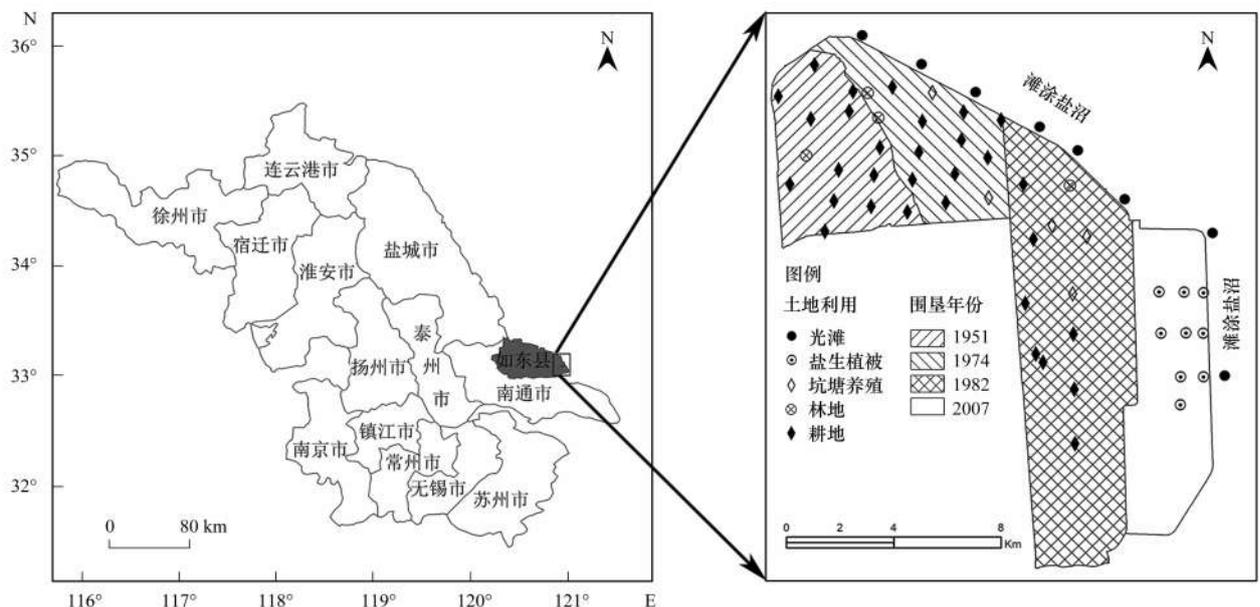


图 1 研究区域及采样点示意

Fig. 1 Study area and soil sampling site

自然滩涂湿地选取 8 个样点作为对照(未围垦, 0 a). 样点选择依据典型性、代表性和一致性原则, 采用 GPS 精确定位, 共选取 57 个样点, 每个样点 3 次重复, 取样深度为 0~20 cm, 共取得土壤样品 171 个. 各样点的海拔高程差异不大, 大致呈陆海梯度递减, 坡度、坡向基本一致, 样点的土地利用信息如图 1 所示. 土壤样品采集主要分为两个部分, 一部分用环刀采集, 置于铝盒内用于测定土壤含水量和容重; 另外一部分用土钻采集装入聚乙烯密封袋密封, 自然风干后除去植物根系、贝壳等杂质, 分别研磨过 2、0.25 和 0.149 mm 尼龙筛用于测定理化性质.

土壤样品理化性质的测定包括土壤含水量、土壤容重、土壤粒径、土壤有机质、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾、阳离子交换量、pH 和土壤含盐量, 分析方法主要参考文献[18]. 其中, 土壤含水量和土壤容重分别采用烘干法和环刀法测定; 土壤粒径采用 Malvern 2000 激光粒度仪测定, 采用美国制进行分级; 土壤有机质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; 碱解氮采用碱解蒸馏法测定; 全磷和速效磷采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定; 全钾和速效钾采用火焰光度计法测定; 阳离子交换量采用乙酸铵交换法测定. pH 通过制备 1:2.5 土水质量比溶液, 用 PHS-3C 型 pH 计测定; 土壤含盐量通过制备 1:5 土水质量比溶液静置过滤后采用滴定法测定; 土壤钠吸附比(sodium adsorption ratio, SAR)的计算公式为:

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{1}{2}(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})}} \quad (1)$$

### 1.3 土壤质量最小数据集构建

采用主成分分析和 Norm 值构建土壤质量的最小数据集评估滨海围垦土地的土壤质量. 首先, 通过单因素方差分析对土壤属性指标进行差异性检验, 对存在差异性的指标进行主成分分析. 通过计算各土壤属性指标在所有特征值  $\geq 1$  的主成分(PC)上的载荷, 将在同一 PC 上载荷  $\geq 0.5$  的土壤指标分为一组, 若某土壤参数同时在两个 PC 上的载荷高于 0.5, 则该参数应归并到与其他参数相关性较低的那一组[15]. 然后, 分别计算各组指标的 Norm 值, 选取每组中 Norm 值最高的 10% 范围内的指标, 当某一主成分中的高因子载荷指标只有一个时, 则该指标进入最小数据集; 当一个主成分高因子载荷指标不只一个时, 对其分别做相关性分析, 若指标之间高度相关( $r > 0.5$ ), 则确定总分值最高的指

标进入 MDS, 若相关性低时( $r < 0.5$ ), 各高因子载荷指标均被选入最小数据集, 从而确定最终的最小数据集[16]. Norm 值的计算公式如下:

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (u_{ik}^2 \lambda_k)} \quad (2)$$

式中,  $N_{ik}$  为第  $i$  个变量在特征值  $> 1$  的前  $k$  个主成分上的综合载荷;  $u_{ik}$  为第  $i$  个变量在第  $k$  个主成分上的载荷,  $\lambda_k$  为第  $k$  个主成分的特征值.

### 1.4 土壤质量评价方法

TOPSIS 是一种逼近理想解的多属性排序法, 通过计算样本靠近/偏离正、负理想解的相对距离来评价样本的优劣[13]. 其计算步骤如下.

(1) 指标标准化 通过建立评价指标的隶属函数, 对评价指标进行标准化. 根据土壤理化指标与土壤生产功能之间的关系, 将隶属函数分为以下 3 种[19,20].

戒上型:

$$f(x) = \begin{cases} 0.1, & x \leq x_1 \\ 0.9 \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} + 0.1, & x_1 < x < x_2 \\ 1, & x \geq x_2 \end{cases} \quad (3)$$

戒下型:

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \leq x_1 \\ 1 - 0.9 \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, & x_1 < x < x_2 \\ 0.1, & x \geq x_2 \end{cases} \quad (4)$$

适中型:

$$f(x) = \begin{cases} 0.1, & x \leq x_1, x \geq x_2 \\ 0.9 \frac{x - x_1}{r_1 - x_1} + 0.1, & x_1 < x < r_1 \\ 1, & r_1 \leq x \leq r_2 \\ 1 - 0.9 \frac{x - r_2}{x_2 - r_2}, & r_2 < x < x_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $x$  为评价指标的实测值,  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $r_1$  和  $r_2$  为评价指标的转折点, 即临界值. 根据已有文献和研究区种植制度与作物生长的实际情况, 确定隶属函数中转折点的取值(表 1), 其中 SSC 参考滨海盐渍土分级标准[21], 黏粒比例参考研究区作物生长实际情况和文献[10], 土壤 SOM、TK 和 BD 指标参考全国第二次土壤普查的分级标准[10,22].

(2) 确定最优与最劣样本 根据标准化矩阵  $Z$  所有样本实际数据, 由各指标的最优值与最劣值, 确定最优样本  $Z^+$  与最劣样本  $Z^-$ . 具体计算公式如下.

最优样本:

$$Z^+ = \alpha_{i1}^+, \alpha_{i2}^+, \dots, \alpha_{in}^+ \quad (6)$$

最劣样本:

$$Z^- = \alpha_{i1}^-, \alpha_{i2}^-, \dots, \alpha_{in}^- \quad (7)$$

式中,  $\alpha^+$  和  $\alpha^-$  分别为正、负理想解.

(3) 计算各土壤样本与最优及最劣样本的加权欧氏距离  $D^+$  与  $D^-$ , 其中:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j (a_{ij}^+ - a_{ij})^2} \quad (8)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j (a_{ij}^- - a_{ij})^2} \quad (9)$$

式中,  $D^+$  与  $D^-$  分别表示第  $i$  个评价对象与最优方案及最劣方案的距离,  $a_{ij}$  表示第  $i$  个评价对象在第  $j$  个评价指标标准化值,  $\omega_j$  表示第  $j$  个指标的权重. 指标权重由主成分分析的公因子方差获得, 各指标公因子方差占公因子方差和的比例即为指标的权重.

(4) 土壤质量综合评价指数

$$SQI_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \times 100 \quad (10)$$

式中,  $SQI_i$  表示第  $i$  个样本的土壤质量综合指数, 即每个土壤样本与最优样本的接近程度.

### 1.5 土壤质量障碍因子评估

评估滩涂围垦过程中土壤质量的障碍因子有利于针对性地提出改良方案, 对促进围垦区土壤质量的提升和作物生长具有重要意义. 本研究基于 TOPSIS 模型中“与最优方案的距离  $D^+$ ”来表征土壤指标的障碍度,  $D^+$  值越大则土壤指标的障碍度越高<sup>[13]</sup>.

### 1.6 数据处理与分析

研究区土壤理化性质随围垦时间变化的显著性差异采用单因素方差分析 (One-way ANOVA). 所有数据均在 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 19.0 for Windows 软件中进行统计分析, 并用 Sigmaplot 12.0 进行绘图.

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤理化性质变化特征

不同围垦年限土壤物理性质存在显著差异 (表 2). 土壤含水量 (SWC) 的平均范围在 20.08% ~ 25.39% 之间, 围垦后 38 a 的土壤含水量并无显著性差异, 此后显著下降, 至围垦 61 a 后降至 20.08% 左右. 土壤容重 (BD) 在围垦后随围垦年限波动下降, 至围垦 30 a 以后降至  $1.23 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 显著低于未围垦光滩 ( $1.43 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) 和围垦初期 (5 a); 此后土壤容重逐渐稳定, 在围垦 60a 后大约维持在  $1.30 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . 围垦区土壤颗粒以粉粒为主, 砂粒次之, 黏粒最低. 不同围垦年限的土壤粒径分布不同, 其中

砂粒含量随围垦时间的增长显著减少, 而粉粒和黏粒含量则随围垦时间的增长显著增加. 与未围垦光滩相比, 围垦 61 a 后土壤的砂粒含量比例下降了 65.12%, 而粉粒和黏粒含量比例分别增加了 48.15% 和 66.67%.

土壤化学性质同样随围垦年限的增加发生显著变化 (表 2). 围垦后土壤 pH 在围垦初期 (5 a) 短暂上升而后逐渐下降; 而围垦后土壤含盐量 (SSC) 则逐渐下降, 至围垦 30 a 以后基本完成脱盐过程并逐渐稳定, 至围垦 61 a 后降为非盐土. 土壤钠吸附比 (SAR) 随围垦时间的变化趋势与土壤含盐量类似, 未围垦光滩与围垦 5 a 的土壤钠吸附比均显著地高于围垦 30 a 以后的土壤. 表层土壤的有机质 (SOM)、全氮 (TN) 和全磷 (TP) 含量的平均范围分别在 2.25 ~ 4.19、0.20 ~ 0.58 和 0.56 ~ 0.70  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, 并在围垦周期内呈现出持续上升的过程. 土壤全钾 (TK) 含量在围垦后 38 a 并无显著性差异, 此后显著下降, 至围垦后 61 a 降至 11.54  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 碳氮比 (C/N) 随围垦年限的增加逐渐下降, 至围垦 61 a 后下降了 34.04%. 土壤碱解氮 (AN) 含量在围垦后前 30 a 间并无显著性差异, 而后迅速上升, 至围垦后 61 a 增加了 77.53%. 土壤速效磷 (AP) 的含量在整个围垦周期内并无显著性差异, 而速效钾 (AK) 含量随围垦年限的增加持续下降. 土壤阳离子交换量 (CEC) 在围垦后先缓慢下降, 而后迅速上升. 与光滩相比, 土壤阳离子交换量在围垦后前 30 a 间下降了 21.12%; 而后在围垦后 30 ~ 61 a 间迅速上升, 至围垦后 61 a 达到最高值 ( $10.38 \text{ coml}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 上升了 71.57%.

### 2.2 不同围垦年限土壤质量变化过程

根据单因素方差分析, 除 AK 外不同围垦年限的土壤性质均差异显著, 对其进行主成分分析后表明, 前 5 个主成分的特征值均大于 1, 累积贡献率达到了 77.68%; 对于每个保留的主成分, 选择绝对值在最大因子负荷 10% 以内的指标进行最小数据集筛选 (表 3). 土壤 SOM 在 PC-1 中具有最高的 Norm 值 (1.78), TN 在最高因子负荷的 10% 范围内, 但由于土壤 TN 和 SOM 之间存在显著相关性 ( $P < 0.01$ ), 因此 SOM 进入最小数据集 (表 3). 对于 PC-2, 黏粒比例具有最高的 Norm 值 (1.62), 砂粒比例和粉粒比例在最高因子负荷的 10% 以内, 同样由于砂粒比例、粉粒比例和黏粒比例之间存在显著相关性, 因此在最小数据集中保留黏粒比例. 在 PC-3 中, SSC 拥有最高的 Norm 值 (1.61), SAR 在最高因子负荷的 10% 范围内, 但由于 SSC 和 SAR 之间存在

表 1 土壤质量最小数据集指标权重及隶属函数转折点取值

Table 1 Community and weight of soil quality indicators in the MDS

属性指标	公因子方差	权重	转折点 $x_1$	转折点 $x_2$	转折点 $r_1$	转折点 $r_2$	隶属函数
SOM	0.887	0.216	3	40	—	—	戒上型
TK	0.747	0.182	6	30	—	—	戒上型
SSC	0.925	0.226	0.5	6	—	—	戒下型
BD	0.690	0.168	0.9	1.55	1.1	1.25	适中型
黏粒比例	0.852	0.208	0.02	0.35	0.20	0.25	适中型

表 2 不同围垦年限土壤理化性质变化<sup>1)</sup>

Table 2 Changes of soil physicochemical properties under different reclamation ages

土壤属性	围垦年限/a				
	光滩(0)	5	30	38	61
土壤含水量(SWC)/%	25.39 ± 2.93a	22.40 ± 1.93ab	23.48 ± 3.22a	23.58 ± 4.90a	20.08 ± 1.98b
容重(BD)/g·cm <sup>-3</sup>	1.46 ± 0.14a	1.34 ± 0.12b	1.23 ± 0.06c	1.32 ± 0.09b	1.27 ± 0.11bc
砂粒比例(sand ratio)/%	0.43 ± 0.14a	0.41 ± 0.10a	0.28 ± 0.06b	0.30 ± 0.09b	0.15 ± 0.04c
粉粒比例(silt ratio)/%	0.54 ± 0.13c	0.56 ± 0.09c	0.68 ± 0.05b	0.66 ± 0.09b	0.80 ± 0.04a
黏粒比例(clay ratio)/%	0.03 ± 0.02c	0.03 ± 0.01c	0.04 ± 0.01ab	0.04 ± 0.01ab	0.05 ± 0.01a
pH	8.62 ± 0.26a	8.71 ± 0.15a	8.55 ± 0.15a	8.28 ± 0.33b	8.28 ± 0.17b
土壤含盐量(SSC)/g·kg <sup>-1</sup>	11.97 ± 3.52a	11.29 ± 5.99a	2.73 ± 2.24b	1.67 ± 1.80b	0.56 ± 0.39b
钠吸附比(SAR)/mmol·L <sup>-0.5</sup>	41.93 ± 18.09a	42.92 ± 12.28a	19.82 ± 13.67b	12.32 ± 12.67bc	3.28 ± 4.21c
有机质(SOM)/g·kg <sup>-1</sup>	3.89 ± 0.72c	4.12 ± 1.21bc	6.07 ± 1.44ab	7.36 ± 3.66a	7.26 ± 2.01a
全氮(TN)/g·kg <sup>-1</sup>	0.20 ± 0.03c	0.24 ± 0.04c	0.39 ± 0.09b	0.43 ± 0.18b	0.58 ± 0.21a
全磷(TP)/g·kg <sup>-1</sup>	0.56 ± 0.02b	0.59 ± 0.04b	0.63 ± 0.08ab	0.68 ± 0.15a	0.70 ± 0.13a
全钾(TK)/g·kg <sup>-1</sup>	13.40 ± 1.32a	12.54 ± 1.36ab	13.59 ± 2.30a	12.67 ± 0.49a	11.54 ± 0.75b
碳氮比 C/N	11.28 ± 2.18a	9.91 ± 2.03ab	9.16 ± 1.19b	9.60 ± 1.86b	7.44 ± 1.57c
碱解氮(AN)/g·kg <sup>-1</sup>	12.95 ± 2.45b	15.99 ± 4.78b	15.86 ± 4.94b	23.64 ± 6.37a	22.99 ± 7.80a
速效磷(AP)/g·kg <sup>-1</sup>	7.47 ± 4.01a	8.02 ± 5.52a	8.68 ± 9.20a	11.83 ± 9.85a	8.48 ± 3.47a
速效钾(AK)/g·kg <sup>-1</sup>	366.16 ± 72.21a	343.08 ± 96.06a	170.67 ± 78.89b	111.64 ± 61.43c	48.62 ± 10.53d
阳离子交换量(CEC)/cmol·kg <sup>-1</sup>	7.67 ± 2.15bc	7.11 ± 1.13bc	6.05 ± 1.40c	8.46 ± 2.26b	10.38 ± 2.37a

1) 同一行中不同小写字母表示不同围垦年限间存在显著差异

表 3 主成分载荷矩阵及 Norm 值计算结果<sup>1)</sup>

Table 3 Principal component loading matrix and calculated Norm values

土壤指标	主成分载荷矩阵					分组	Norm 值
	PC-1	PC-2	PC-3	PC-4	PC-5		
SWC	-0.013	0.414	-0.005	0.626	0.143	4	1.08
BD	-0.128	0.125	0.191	0.033	<b>0.788</b>	5	0.99
砂粒比例	-0.293	0.884	0.254	0.115	0.013	2	1.71
粉粒比例	0.319	-0.860	-0.261	-0.115	-0.013	2	1.70
黏粒比例	-0.083	<b>-0.895</b>	-0.193	-0.080	-0.001	2	1.62
pH	-0.699	0.221	0.194	0.040	-0.067	1	1.42
SSC	-0.299	0.205	<b>0.879</b>	0.074	0.125	3	1.61
SAR	-0.253	0.244	0.856	0.126	-0.015	3	1.55
SOM	<b>0.930</b>	-0.014	-0.118	0.078	-0.049	1	1.78
TN	0.819	-0.228	-0.211	-0.229	-0.265	1	1.69
TP	0.746	-0.056	-0.176	0.006	0.050	1	1.43
TK	-0.156	-0.023	0.170	<b>0.816</b>	-0.164	4	1.14
C/N	0.010	0.507	0.362	0.441	0.388	2	1.28
AN	0.689	0.014	-0.192	-0.358	-0.072	1	1.43
AK	-0.322	0.351	0.778	0.180	0.105	3	1.57
CEC	0.096	-0.310	-0.254	-0.443	0.574	5	1.11
特征值	3.557	3.193	2.704	1.716	1.259		
贡献率/%	22.229	19.954	16.902	10.727	7.870		
累积贡献率/%	22.229	42.183	59.085	69.811	77.681		

1) 黑体数值为最终保留下来的最小数据集指标

显著相关性( $P < 0.01$ ), 因此 SSC 进入最小数据集(表 4). 在 PC-4 和 PC-5 中都只含有 1 个参数, 因

此 TK 和 BD 进入最终的最小数据集中. 综上所述, 研究区土壤质量评价的最小数据集指标为 SOM、黏

粒比例、SSC、TK 和 BD.

通过 TOPSIS 方法, 采用公式 (3) ~ (10) 计算研究区土壤质量指数, 最小数据集的指标权重通过公因子方差求得, 如表 1 所示. 研究区土壤质量指数在 4.72 ~ 63.69 之间, 并呈现出光滩 (20.04 ± 11.48) < 围垦 5 a (29.33 ± 10.65) < 围垦 30 a (51.52 ± 8.76) ≈ 围垦 38 a (49.98 ± 10.75) < 围垦 61 a (58.37 ± 3.15). 此外, 研究区土壤质量指数与围垦年限呈显著正相关关系 ( $R^2 = 0.63$ ), 表明随着围垦年限的增加, 土壤质

量逐渐改善, 整个围垦周期土壤质量提升了约 191.27% (图 2). 从各指标对土壤质量的障碍程度来看 (表 5), 研究区土壤质量指标障碍程度的排序为黏粒比例 > SSC > SOM > TK > BD, 但不同围垦年限间的障碍因子不尽相同. 综合来看, 未围垦光滩和围垦初期的黏粒比例和 SSC 对土壤质量的障碍程度占主导地位, 随着围垦时间的推移, SSC、SOM 和 BD 的障碍程度逐渐下降, 而 TK 的障碍程度逐渐上升, CALY 的障碍程度虽有下降但仍然居于主导地位.

表 4 高因子载荷指标相关性<sup>1)</sup>

Table 4 Correlation coefficients for highly weighted variables

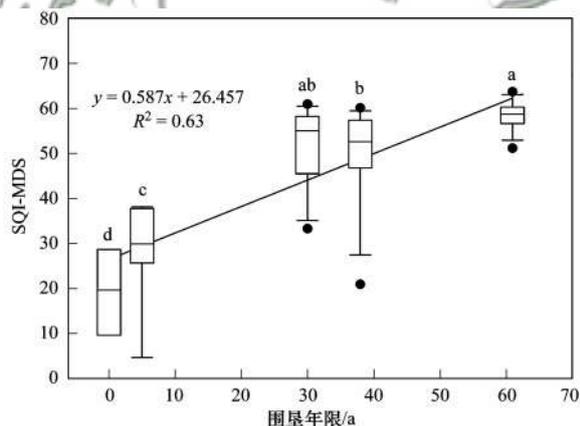
属性指标	PC-1		属性指标	PC-2			属性指标	PC-3	
	SOM	TN		砂粒比例	粉粒比例	黏粒比例		SSC	SAR
SOM	1		砂粒比例	1			SSC	1	
TN	0.829 **	1	粉粒比例	-0.997 **	1		SAR	0.858 **	
			黏粒比例	-0.779 **	0.747 **	1			

1) \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$

表 5 不同围垦年限土壤最小数据集指标对土壤质量的障碍度

Table 5 Obstacle degree of soil MDS indicators to soil quality under different reclamation ages

围垦年限/a	SSC	SOM	TK	BD	黏粒比例
光滩(0)	0.430	0.131	0.100	0.234	0.369
5	0.413	0.129	0.114	0.126	0.376
30	0.166	0.109	0.096	0.018	0.345
38	0.094	0.094	0.111	0.101	0.365
61	0.012	0.097	0.128	0.071	0.322
整体	0.187	0.109	0.111	0.098	0.353



不同小写字母表示不同围垦年限间土壤质量在  $P < 0.05$  水平差异显著

图 2 不同围垦年限土壤质量指数变化过程

Fig. 2 Changes in soil quality index under different reclamation ages

### 3 讨论

#### 3.1 滩涂围垦对土壤理化性质的影响

滩涂围垦后土壤理化性质在围垦年限和土地利用方式的综合作用下发生显著改变. 围垦后土壤含水量在后期(30 a 以后)显著下降, 这可能与研究区

的土地利用方式、地下水位和海拔高程有关. 一方面, 研究区围垦年限较久的地区以小麦、玉米等旱地作物为主, 土壤含水量较低, 而新围垦区则以海水养殖或盐生植被为主, 土壤含水量较高; 另一方面, 海堤的修建切断了海水补给来源, 同时随着围垦年限的增加, 较老的滩涂围垦区的海拔高程逐渐增加导致地下水位下降, 使得土壤含水量相应较低<sup>[23,24]</sup>. 滩涂围垦后伴随着农业的耕作、有机肥的施入以及植物根系的生长都增加了土壤孔隙, 使得土壤容重在围垦前 30 a 显著下降<sup>[25]</sup>. 围垦后土壤粒径呈现出逐渐细化的趋势, 整个围垦周期内土壤的砂粒含量下降了 65.12%, 而粉粒含量和黏粒含量分别增加了 48.15% 和 66.67%, 这可能与碱性环境下  $\text{SiO}_2$  的自然分解以及人为的耕作、施肥等活动有关<sup>[26]</sup>. 研究区丰富的降水有利于土壤的脱盐脱碱进程, 同时, 海堤的修建切断了海水补给, 导致地下水位下降, 从而使得围垦后土壤盐分、pH 和钠吸附比逐渐下降 (表 1)<sup>[1]</sup>. 此外, 持续的田间管理和改良措施诸如翻耕、灌溉、秸秆覆盖、有机肥施用等活动均有效地降低了土壤盐分、pH 和钠吸附比<sup>[27,28]</sup>. 研究区围垦周期内表层土壤养分和土壤速

效养分的持续上升可能是因为秸秆腐烂分解以及长时间施肥等田间管理使得土壤中形成有机质层<sup>[29]</sup>,相关学者在江苏中部东台滩涂围垦区和杭州湾南岸滩涂围垦区也观测到同样的现象<sup>[8,30]</sup>.受海洋环境的影响,研究区的钾素丰富程度较高,围垦后大规模开垦利用使得土壤全钾和速效钾含量迅速下降<sup>[31]</sup>.围垦后前 30 a,研究区土壤 pH 迅速下降,但土壤质地逐渐细化,养分也逐渐提升,使得阳离子交换量并无显著性变化;在围垦 30 a 以后,土壤 pH 逐渐稳定,而土壤粉粒、黏粒含量和有机质含量持续增加,使得阳离子交换量迅速上升;研究表明土壤阳离子交换量受 pH、土壤质地和土壤有机质的综合影响.一般来说土壤 pH 越低,阳离子交换量越低;土壤质地越细,阳离子交换量越高;有机质含量越高,阳离子交换量越高<sup>[32]</sup>.

### 3.2 滩涂围垦对土壤质量的影响

滩涂围垦主要通过土壤的自然熟化和人类活动(耕作、灌溉、施肥等)影响土壤结构、土壤盐分和土壤养分等因子改善土壤质量<sup>[33,34]</sup>.光滩的土壤质量与围垦土壤相比处于较低水平,这主要是由于光滩长期受到海水周期性浸泡,导致土壤盐度和土壤容重较高,土壤养分含量较低<sup>[22]</sup>.滩涂围垦后土壤质量的演变过程大致经历了 3 个阶段:①初期稳定阶段(0~10 a),土壤逐渐脱离海水环境,但受限于高盐高碱环境,土壤容重较大,N、P 和 SOM 等土壤养分含量较低,围垦土地以抛荒为主,土壤质量处于较低水平且变化不大<sup>[10,26]</sup>;②迅速提升阶段(10~30 a),随着土壤脱盐脱碱过程的持续进行,土地利用强度逐渐增加,田间耕作和施肥活动使得土壤物理性质改善,土壤养分和土壤微生物活性迅速增加,土壤质量显著上升<sup>[23]</sup>;③相对稳定阶段(30~61 a),经过 30 年的围垦后,土地利用类型基本以耕地为主,大多数土壤性质逐渐稳定,土壤质量在此期间相对稳定,土地利用方式成为影响土壤质量的主要因素(表 3)<sup>[9,10]</sup>.

土壤质量是土壤物理、化学和生物学性质之间彼此联系、相互作用的综合反映<sup>[30]</sup>.本研究所选取的指标(黏粒含量、SSC、SOM、TK 和 BD)具有代表性,能够较好地指示围垦区土壤质量的演变过程,为滩涂围垦区的土壤质量评价提供了指标借鉴<sup>[13,33]</sup>.土壤黏粒含量和土壤容重作为土壤物理性质的重要指标,影响土壤的通透性和保蓄性、养分的转化速率和存在状态以及植物根系的生长力和生理活动<sup>[23]</sup>.研究区土壤随围垦期的增长土壤颗粒逐渐细化,但黏粒含量仍然较低,土壤保肥能力较差,是土壤质量提升的主要障碍因子,因此增加土壤黏粒

含量成为提升研究区土壤质量的重要措施之一<sup>[10]</sup>.土壤盐分是抑制滨海地区土壤质量和作物产量的重要因素,研究区围垦周期内土壤盐分的持续下降提升了土壤的保水保肥能力,降低了盐分对于植物生长的胁迫,从而增加了土壤中养分的累积<sup>[9]</sup>.土壤有机质是表征土壤质量的又一重要属性因子,广泛应用于土壤质量评估中,土壤有机质能够促进土壤结构形成,改善土壤物理性质,是土壤养分的主要来源,促进了作物的生长发育<sup>[34]</sup>.研究区滩涂围垦后土壤有机质含量持续上升,成为土壤质量提升的关键因素.土壤中的钾是植物所需钾的主要来源,在植物生长和代谢过程中具有重要作用<sup>[35]</sup>.值得注意的是研究区土壤全钾和速效钾含量均随围垦时间增加持续下降,一定程度上抑制了围垦后期土壤质量的继续提升,因此在后期耕作中需要注重钾肥的补充.

## 4 结论

(1)滩涂围垦后土壤理化性质随围垦年限增加改善明显,围垦 61 a 间土壤容重、土壤含水量逐渐下降,黏粒含量显著增加,土壤脱盐脱碱活动持续进行,至围垦 61 a 后基本降为非盐渍土;同时,土壤养分和速效养分含量显著增加.

(2)滩涂围垦后土壤质量演变大致经历了“初期稳定-迅速提升-相对稳定”这 3 个阶段,并呈现出土壤质量指数:光滩(20.04 ± 11.48) < 围垦 5 a(29.33 ± 10.65) < 围垦 30 a(51.52 ± 8.76) ≈ 围垦 38 a(49.98 ± 10.75) < 围垦 61 a(58.37 ± 3.15).

(3)较高的土壤含盐量和较低的土壤黏粒含量是制约围垦初期土壤质量提升的关键,随着围垦时间的增加,土壤中的钾素逐渐流失,成为后期土壤质量提升的制约因素.

### 参考文献:

- [1] Zhang J Z, He C X, Chen L, *et al.* Improving food security in China by taking advantage of marginal and degraded lands[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **171**: 1020-1030.
  - [2] Liu C, Xu J M, Ding N F, *et al.* The effect of long-term reclamation on enzyme activities and microbial community structure of saline soil at Shangyu, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **69**(1): 151-159.
  - [3] 张明, 陈国光, 高超, 等. 华东多目标区域地球化学调查区土壤常量元素地球化学特征[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, **44**(3): 995-1002.
  - [4] 杨桂山. 中国海岸环境变化及其区域响应[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- Yang G S. Coastal environmental change and its regional

- responses in China [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Meng Q F, Yang J S, Yao R J, *et al.* Soil quality in east coastal region of China as related to different land use types[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, **13**(4): 664-676.
- [8] 张濛, 濮励杰, 王小涵, 等. 长期耕种对江苏沿海围垦区滨海盐土理化性质和小麦产量的影响[J]. 生态学报, 2016, **36**(16): 5088-5097.
- Zhang M, Pu L J, Wang X H, *et al.* Effects of long-time cultivation on physicochemical properties of coastal saline soil and wheat production at reclamation areas of Jiangsu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(16): 5088-5097.
- [9] 许艳, 濮励杰, 张润森, 等. 江苏沿海滩涂围垦耕地质量演变趋势分析[J]. 地理学报, 2017, **72**(11): 2032-2046.
- Xu Y, Pu L J, Zhang R S, *et al.* Cropland quality evolution following coastal reclamation at the prograding tidal flats of Jiangsu Province, China[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, **72**(11): 2032-2046.
- [10] 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.
- [11] 赵庆良, 张金娜, 刘志刚, 等. 再生回用水灌溉对作物品质及土壤质量的影响[J]. 环境科学, 2007, **28**(2): 411-416.
- Zhao Q L, Zhang J N, Liu Z G, *et al.* Effect of reclaimed water used for irrigation on the quality of crops and soil [J]. Environmental Science, 2007, **28**(2): 411-416.
- [12] 桂东伟, 雷加强, 曾凡江, 等. 绿洲边缘不同土地利用方式下的土壤质量变化及分析[J]. 环境科学, 2010, **31**(9): 2248-2253.
- Gui W D, Lei J Q, Zeng F J, *et al.* Changes and analysis of soil quality under different land use types in oasis rim [J]. Environmental Science, 2010, **31**(9): 2248-2253.
- [13] 孙蓓婷, 高超, 张燕. 基于加权 TOPSIS 法综合评价典型滩涂围垦区土壤质量演变[J]. 中国生态农业学报, 2018, **26**(2): 284-293.
- Sun B T, Gao C, Zhang Y. Soil quality evaluation in typical coastal reclamation zones based on weighted Topsis method[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, **26**(2): 284-293.
- [14] 贡璐, 张雪妮, 冉启洋. 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价[J]. 土壤学报, 2015, **52**(3): 682-689.
- Gong L, Zhang X N, Ran Q Y. Quality assessment of oasis soil in the upper reaches of Tarim River based on minimum data set [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, **52**(3): 682-689.
- [15] 邓绍欢, 曾令涛, 关强, 等. 基于最小数据集的南方地区冷浸田土壤质量评价[J]. 土壤学报, 2016, **53**(5): 1326-1333.
- Deng S H, Zeng L T, Guan Q, *et al.* Minimum dataset-based soil quality assessment of waterlogged paddy field in South China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, **53**(5): 1326-1333.
- [16] Gong L, Ran Q Y, He G X, *et al.* A soil quality assessment under different land use types in Keriya river basin, Southern Xinjiang, China[J]. Soil and Tillage Research, 2015, **146**: 223-229.
- [17] 苟露峰, 汪艳涛, 金炜博. 基于熵权 TOPSIS 模型的青岛市海洋资源环境承载力评价研究[J]. 海洋环境科学, 2018, **37**(4): 586-594.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd ed.) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [19] Guo L L, Sun Z G, Ouyang Z, *et al.* A comparison of soil quality evaluation methods for Fluvisol along the lower Yellow River[J]. Catena, 2017, **152**: 135-143.
- [20] Nabiollahi K, Taghizadeh-Mehrjardi R, Kerry R, *et al.* Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province, Iran [J]. Ecological Indicators, 2017, **83**: 482-494.
- [21] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [22] 姚荣江, 杨劲松, 曲长凤, 等. 海涂围垦区土壤质量综合评价的指标体系研究[J]. 土壤, 2013, **45**(1): 159-165.
- Yao R J, Yang J S, Qu C F, *et al.* Study on synthetic evaluation index systems of soil quality in coastal reclamation region [J]. Soils, 2013, **45**(1): 159-165.
- [23] 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.
- [24] 朱庭芸. 滨海盐碱地水稻灌区地下水位的控制——盘锦灌区土壤次生盐化防治的途径[J]. 水利水电技术, 1963, **4**(2): 16-21.
- [25] 刘哲, 孙增慧, 吕贻忠. 长期不同施肥方式对华北地区温室和农田土壤团聚体形成特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, **25**(8): 1119-1128.
- Liu Z, Sun Z H, Lü Y Z. Effect of long-term fertilization on soil aggregate formation in greenhouse and farmland conditions in the North China Plain [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, **25**(8): 1119-1128.
- [26] 张欢. 华东沿海滩涂围垦区土壤有机碳动态及其模型预测 [D]. 南京: 南京大学, 2017.
- Zhang H. Dynamics and predication of soil organic carbon in coastal reclaimed lands, eastern China [D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.
- [27] Cui J, Liu C, Li Z L, *et al.* Long-term changes in topsoil chemical properties under centuries of cultivation after reclamation of coastal wetlands in the Yangtze Estuary, China [J]. Soil and Tillage Research, 2012, **123**: 50-60.
- [28] 张建兵, 杨劲松, 姚荣江, 等. 有机肥与覆盖方式对滩涂围垦农田水盐与作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2013, **29**(15): 116-125.
- Zhang J B, Yang J S, Yao R J, *et al.* Dynamics of soil water, salt and crop growth under farmyard manure and mulching in coastal tidal flat soil of northern Jiangsu Province [J].

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, **29**(15): 116-125.
- [29] 吴明, 邵学新, 胡锋, 等. 围垦对杭州湾南岸滨海湿地土壤养分分布的影响[J]. 土壤, 2008, **40**(5): 760-764.  
Wu M, Shao X X, Hu F, *et al.* Effects of reclamation on soil nutrients distribution of coastal wetland in south Hangzhou Bay [J]. Soils, 2008, **40**(5): 760-764.
- [30] Iost S, Landgraf D, Makeschin F. Chemical soil properties of reclaimed marsh soil from Zhejiang Province P. R. China [J]. Geoderma, 2007, **142**(3-4): 245-250.
- [31] 张晶, 濮励杰, 朱明, 等. 如东县不同年限滩涂围垦区土壤 pH 与养分相关性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, **23**(2): 225-230.  
Zhang J, Pu L J, Zhu M, *et al.* Correlation between soil pH and nutrients of tidal-flat reclamation with different years in Rudong County [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, **23**(2): 225-230.
- [32] 王军, 顿耀龙, 郭义强, 等. 松嫩平原西部土地整理对盐渍化土壤的改良效果[J]. 农业工程学报, 2014, **30**(18): 266-275.  
Wang J, Dun Y L, Guo Y Q, *et al.* Effects of land consolidation on improvement of salinity soil in Western Songnen Plain [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, **30**(18): 266-275.
- [33] 王建庆, 冯秀丽, 李加林, 等. 滨海围垦平原区土壤质量时空演变及其影响因素分析——以浙江省慈溪市为例[J]. 水土保持通报, 2013, **33**(5): 219-224.  
Wang J Q, Feng X L, Li J L, *et al.* Temporal and spatial variation and its impact factors of soil quality in coastal reclamation plains district——A case study of Cixi City, Zhejiang Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, **33**(5): 219-224.
- [34] 毛志刚, 谷孝鸿, 刘金娥, 等. 盐城海滨盐沼湿地及围垦农田的土壤质量演变[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(8): 1986-1992.  
Mao Z G, Gu X H, Liu J E, *et al.* Evolution of soil quality in salt marshes and reclaimed farmlands in Yancheng coastal wetland [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, **21**(8): 1986-1992.
- [35] 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.

环境

科学

## CONTENTS

Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of PM <sub>2.5</sub> in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter .....	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, LIU Bing, <i>et al.</i> (5191)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> During the Heating Period of 2016-2017 in the Eastern Part of the North China Plain .....	ZHANG Yi-qin, WANG Jie, GAO Jian, <i>et al.</i> (5202)
Change in Characteristics of Pollution Gas and Water-soluble Ions at Different Development Stages of Haze .....	WANG Zhen-bin, LIU An-kang, LU Wen, <i>et al.</i> (5213)
Exposure Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metal Components of PM <sub>2.5</sub> in Housewives in Rural Shanghai .....	LUO Ran-ran, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (5224)
Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source .....	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, WANG Gang, <i>et al.</i> (5234)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment .....	ZHANG Jia-mi, ZENG Chun-ling, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (5240)
VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises .....	ZHU Tao, LÜ Yi-rong, BIAN Wen-jing, <i>et al.</i> (5250)
Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang .....	LI Qi-lu, WU Jin-tao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5258)
Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengde .....	FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (5265)
Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains .....	ZHANG Bai-juan, LI Zong-xing, WANG Yu, <i>et al.</i> (5272)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Source Water of the Nanjing Reach of the Yangtze River .....	FENG Meng-juan, ZHANG Qin, SONG Ning-hui, <i>et al.</i> (5286)
Effects of Different Coagulants on Co-manganese Oxides Filter Media for Removing Ammonium and Manganese from Surface Water in Summer and Autumn .....	CHENG Li-jie, HUNAG Ting-lin, CHENG Ya, <i>et al.</i> (5294)
Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province .....	LIU Jun-ping, YU Jian-quan, LI Qing-song, <i>et al.</i> (5302)
Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter in Rivers of the Three Gorges Reservoir Area Under the Background of Urbanization .....	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (5309)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Natural Rivers of Western Sichuan Plateau .....	LIU Yan-yang, SUN Hui, LIU Chen, <i>et al.</i> (5318)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area .....	CAO Rui-xia, LIU Jing, DENG Kai-kai, <i>et al.</i> (5330)
Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed .....	HUANG Ya-ling, TANG Li, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (5340)
Effects of Land Use Types at Different Spatial Scales on Water Quality in Poyang Lake Wetland .....	FANG Na, LIU Ling-ling, YOU Qing-hui, <i>et al.</i> (5348)
Environmental Significance of Phosphorus Fractions of Phytoplankton-and Macrophyte-Dominated Zones in Taihu Lake .....	GENG Xue, WEN Shuai-long, SUN Pei-rong, <i>et al.</i> (5358)
Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake .....	FANG Jia-qi, QI Chuang, ZHANG Xin-hou, <i>et al.</i> (5367)
Effect of Rainfall Intensity on the Content of Nitrogen and Phosphorus Components in Plateau Areas: A Case Study of the Fengyu River Watershed .....	LI Xiao-hong, LEI Qiu-liang, ZHOU Jiao-gen, <i>et al.</i> (5375)
Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of <i>Suaeda salsa</i> in the Estuary Area .....	WU Dan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i> (5384)
Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant <i>Alisma orientale</i> .....	WANG Tuan-tuan, LI Bei-bei, WANG Sai, <i>et al.</i> (5394)
Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability .....	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, LI Qing-fei, <i>et al.</i> (5401)
Comparison of the Control of Sedimentary Phosphorus Release Using Zirconium-, Lanthanum-, and Lanthanum/Zirconium-Modified Zeolites as Sediment Amendments .....	LIU Ting, ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5411)
Effect of Biochar Structure on Adsorption Characteristics of Ammonia Nitrogen .....	CHEN Mei, WANG Fang, ZHANG De-li, <i>et al.</i> (5421)
Effect of Dissolved Oxygen on Partial Nitrification of Suspended and Attached Growth Systems .....	WANG Si-yu, LIU Ling-jie, WANG Fen, <i>et al.</i> (5430)
Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process .....	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (5438)
Operational Performance and Microbiological Characteristics of an Iron-Salt Denitrification Reactor in Co-substrate Mode .....	WANG Ru, LIU Meng-yu, LIU Bing-yin, <i>et al.</i> (5446)
Effect of Step Aeration on a Municipal Sewage Aerobic Granular Sludge System .....	LI Dong, WEI Zi-qing, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (5456)
Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances .....	YU Xin-yi, XIANG Jin-hao, LIU Ying, <i>et al.</i> (5465)
Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018 .....	LOU Pei-qing, FU Bo-lin, LIN Xing-chen, <i>et al.</i> (5473)
Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model .....	XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, <i>et al.</i> (5484)
Effect of Increasing Tidewater Inundation on Porewater Geochemistries and CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Effluxes in the Tidal Freshwater Marshes of the Minjiang River Estuary, Southeast China .....	LI Jing, HUANG Jia-fang, LUO Min, <i>et al.</i> (5493)
Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds .....	WANG Jiao, XIAO Wei, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (5503)
Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field .....	YAN Jun-xia, ZHANG Yuan, JIAO Xiao-yan (5515)
Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas .....	WANG Rui, HOU Wan-ling, LI Yu-tong, <i>et al.</i> (5524)
Remediation Effects of Different Composite Materials on Cadmium-Contaminated Farmland Soil .....	CHEN Shu-lan, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (5531)
Hydrocalumite Passivation Effect and Mechanism on Heavy Metals in Different Cd-Contaminated Farmland Soils .....	WU Qiu-mei, LIU Gang, WANG Hui-feng, <i>et al.</i> (5540)
Effects of Different Land Use Types on Microbial Community Diversity in the Shizishan Mining Area .....	HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, <i>et al.</i> (5550)
Effects of Conversion of Forest to Arable Land on the Abundance and Structure of the <i>cblL</i> -Harboring Bacterial Community in Albic Soil of the Hilly Region of Northeast China .....	WANG Rui, WU Xian, LI Gang, <i>et al.</i> (5561)
Thoughts on and Construction of a Risk Management and Control System for Contaminated Sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	CHANG Chun-ying, DONG Min-gang, DENG Yi-rong, <i>et al.</i> (5570)
Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	ZHANG Ning, ZHANG Sheng, YANG Hai-chao, <i>et al.</i> (5581)
Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	MA Shi-jun, ZHOU Chuan-bin, YANG Guang, <i>et al.</i> (5593)
Heavy Metal Contamination and Migration in Correspondence of an Electroplating Site on the Hilly Lands of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China .....	HOU Wen-juan, GONG Xing, ZHAN Ze-bo, <i>et al.</i> (5604)
Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	DENG Yi-rong, LU Hai-jian, DONG Min-gang, <i>et al.</i> (5615)
Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil .....	LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, <i>et al.</i> (5623)
Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China .....	CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, <i>et al.</i> (5629)
Calculation of the Soil Risk Control Value through a Hydrus-1D Model for Groundwater Protection .....	LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, <i>et al.</i> (5640)
INDEX HUANJING KEXUE CONTENTS 2019, Vol. 40 .....	(5659)