

# 江苏沿海滩涂围垦耕地质量演变趋势分析

许 艳<sup>1,2,3</sup>, 濮励杰<sup>1,2</sup>, 张润森<sup>1</sup>, 朱 明<sup>1,2</sup>, 李雪盈<sup>1</sup>,  
沈洪运<sup>1</sup>, 茅天颖<sup>1</sup>, 徐辰星<sup>1</sup>

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

**摘要:** 淤涨型沿海滩涂作为中国重要湿地和耕地后备资源, 承担着生态保护、社会保障、经济发展等多重服务功能。选取江苏中部淤涨型滨海滩涂开展实证分析, 分析围垦年限为0~40年滩涂垦区耕地质量因子空间差异, 采用“时空代换”方法揭示滨海滩涂围垦后耕地质量的演变趋势, 为沿海滩涂围垦区耕地资源可持续利用提供决策参考。结果表明: 江苏中部沿海滩涂土壤总体呈现盐碱度高、养分贫瘠等特征且土壤理化性质变异程度高, 土壤质地呈现显著南北和陆海梯度特征。滩涂垦区围垦初期地形、植被状态和围垦后滨海滩涂转变为耕地路径对耕地质量演变趋势均具有重要影响。沿海滩涂转为耕地路径由垦区自然条件、开发主体、开发规模等因素共同作用, 江苏中部沿海滩涂转为耕地路径已从“盐生植被→养殖水体→耕地”转变为“盐生植被→耕地”, 该转变缩短了滩涂转为耕地的周期, 但同时也带来围垦滩涂撂荒闲置现象。围垦后沿海滩涂土壤逐步向耕地土壤转变, 耕地质量因子演变趋势可分为四种: 上升型, 如土壤全磷、有效磷、粘粒含量; 下降型, 如土壤砂粒含量; 下降—上升型, 如有机质、全氮、碱解氮和CEC; 上升—下降型, 如土壤盐分和pH。围垦初期, 滩涂土壤脱离海水环境, 土壤有机质发生矿化过程呈现下降趋势, 土壤盐分和pH受到蒸发和蒸腾作用急剧上升; 围垦中期, 受到人类耕作作物秸秆等有机物输入以及施肥的影响, 土壤有机质、养分等呈现上升趋势, 土壤盐分和pH呈现下降趋势; 围垦后期, 耕地质量因子受到耕作管理影响存在一定幅度的波动, 由于沿海滩涂垦区耕地形成时间短, 耕地质量对耕作管理等因素敏感度高。

**关键词:** 耕地后备资源; 滨海滩涂; 滩涂围垦; 土壤质量; 江苏沿海

DOI: 10.11821/dlxb201711009

## 1 引言

中国海岸带北起辽宁省鸭绿江, 南达广西壮族自治区的北仑河口, 长达18000 km, 土地资源丰富。海涂资源主要分布在大河三角洲平原海岸和华南海岸的一些港湾内, 面积高达235万hm<sup>2</sup>, 每年仍以2~3万hm<sup>2</sup>的速度淤涨<sup>[1]</sup>。随着围垦技术的提高, 滨海滩涂围垦强度和广度均达到空前规模, 滩涂围垦一方面加快了滨海湿地空间萎缩和功能退化, 另一方面增加了人类生存空间, 缓解人地矛盾<sup>[2-3]</sup>。国内外学者对海岸带滩涂自然环境演变<sup>[4-5]</sup>、盐生植被演替<sup>[6-9]</sup>、土地利用变化<sup>[3, 10-14]</sup>等方面做了大量的研究。沿海滩涂围垦后土壤理化性质的变化也逐步受到关注<sup>[15-22]</sup>。大量学者通过“时空代换”方法揭示滨海滩涂围

收稿日期: 2017-04-10; 修订日期: 2017-08-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41230751); 江苏省博士后科研资助计划(1601067B) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41230751; Postdoctoral Program of Jiangsu Province, No.1601067B]

作者简介: 许艳(1986-), 女, 江苏滨海人, 博士后, 主要从事土地利用与规划研究。E-mail: xuyanxiao@126.com

通讯作者: 濮励杰(1965-), 男, 江苏吴江人, 教授, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110001875M), 主要从事土地利用与生态环境响应研究。E-mail: ljpu@nju.edu.cn

2032-2046 页

垦耕地质量演变过程<sup>[16, 18-20, 23]</sup>, 但时间尺度较大, 多为百年和近百年<sup>[19, 24]</sup>, 对于沿海滩涂围垦后滩涂土壤质量演变关键期(0~40年)的演变过程尚且模糊。

江苏沿海滩涂面积达50万hm<sup>2</sup>, 以粉砂淤泥质海岸为主, 约占中国滩涂总面积的四分之一, 虽然已无巨量泥沙来源, 受到自身海岸侵蚀和海底泥沙影响, 江苏中部海岸线每年仍以较快速度向外海淤长<sup>[1, 4]</sup>。由于国家和江苏省对江苏沿海地区耕地后备资源战略定位等, 耕地一直是江苏海岸带主要土地利用类型之一<sup>[14]</sup>。1951-2015年江苏沿海滩涂围垦面积高达33.46万hm<sup>2</sup>, 增加农用地12.67万hm<sup>2</sup>, 2009年《江苏沿海地区发展规划》规划未来10年江苏沿海面临前所未有的高强度、大规模的围垦活动, 将新增耕地10.8万hm<sup>2</sup>。因此, 本文选取江苏中部滨海滩涂开展实证分析, 在围垦年限为0~40年的滩涂围垦区采集耕地土壤样品并开展实验分析, 试图揭示滩涂围垦后耕地质量因子演变趋势, 为淤涨型滨海滩涂围垦耕地可持续利用提供信息支持。

## 2 研究区概况

江苏海岸线长954 km, 约占全国5%, 然而江苏沿海滩涂资源却占全国的25%左右。江苏沿海经过13个县市, 介于31°33'N~35°07'N、119°21'E~121°55'E之间, 东临黄海, 受季风气候控制, 处于北亚热带向暖温带过渡地带, 兼受海洋性和大陆性气候双重影响。苏北灌溉总渠以南, 沿海全年太阳总辐射能量达110~118 k Cal/cm<sup>2</sup>, 年日照量2100~2400 h, 年平均气温为14~15℃; 年平均降水量为1000~1100 mm<sup>[25]</sup>。江苏沿海滩涂围垦区土壤类型主要以滨海盐土为主。

江苏沿海滩涂围垦历史悠久, 围垦空间上, 盐城市围垦面积最大, 南通市和连云港市较少<sup>[2]</sup>。江苏沿海滩涂围垦多为鱼鳞式的圈围为主, 滩涂围垦重心不断向东南方向转移(图1)。江苏沿海滩涂围垦区土地利用方式近代主要以垦植业和盐业为主; 20世纪50-60年代, 治水兴垦, 江苏沿海掀起创办农场和盐场热潮; 20世纪70年代, 基本是传统的“围垦—养垦—开垦”的利用方式; 80、90年代江苏沿海滩涂围垦才逐步摆脱传统的开发方式, 走上粮棉生产、盐业和水产养殖为主, 农、林、牧、渔、盐、港等综合开发的模式<sup>[26]</sup>。总体来看, 江苏沿海滩涂围垦用途主要以农业生产、水产养殖、国营盐场为主<sup>[2]</sup>。

## 3 数据处理及方法

### 3.1 数据来源

本文研究的31幅Landsat TM和OLI遥感影像数据, 主要来源于中国科学院计算机网络信息中心开发的地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。选取1986-2016年年初遥感影像进行人工判读, 将土地利用类型分为耕地(Cropland, C)、养殖水体(Aquaculture pond, A)、盐生植被(Halophyte vegetation, H)和光滩(Bareland, B)。耕地质量数据来源于野外土壤采样和实验室分析。垦区内农村道路、沟渠、河流水面、农村居民点矢量数据来源于江苏省国土资源厅2015年土地利用变更调查数据库。

### 3.2 土壤采样与实验分析

江苏沿海围垦年限为0~40年垦区的土壤类型为滨海盐土<sup>[26]</sup>, 为了研究滩涂围垦后耕地土壤质量演变过程, 本文在1979年(垦区N和O)、1981年(垦区M)、1984年(垦区L)、1986年(垦区K)、1989年(垦区G)、1990年(垦区I)、1997年(垦区H和G)、1998年(垦区F)、2001年(垦区E)、2005年(垦区D)、2006年(垦区C)、2009年

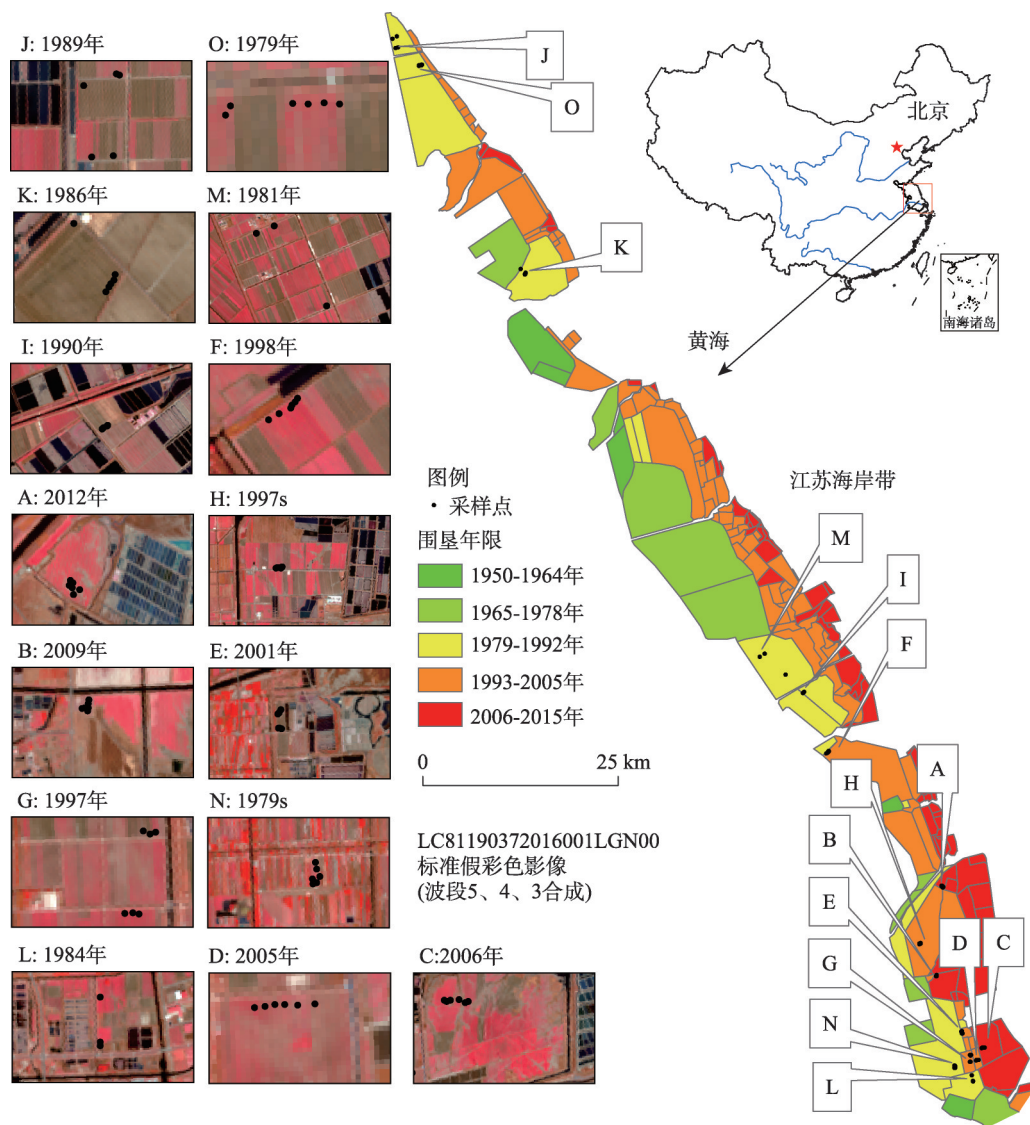


图1 研究区及采样点示意图

Fig. 1 The location of study area and the map of soil samplings

(垦区B)和2012年(垦区A)这15个垦区采集表层土壤(0~20 cm)81个(图1)。采样时间为2016年5月26-31日以及6月3-8日,时处小麦收获期。采样期间东台市小雨,大丰区多云。耕地种植作物为小麦,耕地轮作方式多为水稻—小麦,新围垦区以旱作为主。所有土壤带回实验室后经自然风干,过2 mm筛后保存备用。

本文测定了12个土壤重要的理化指标:土壤有机质(OM)、全氮(TN)、全磷(TP)、碱解氮(AN)、有效磷(AP)、阳离子交换量(CEC)、土壤含水量(W)、土壤盐分(EC)、土壤pH、土壤砂粒含量(Sand, > 0.02 mm)、粉粒含量(Silt, 0.002~0.02 mm)和粘粒含量(Clay, < 0.002 mm)。土壤有机质采用外加热硫酸—重铬酸钾氧化方法;土壤全氮采用硫酸—重铬酸钾氧化—碱化蒸馏方法;碱解氮采用氧化镁扩散—硼酸吸收;有效磷采用碳酸氢钠浸提—分光光度法;阳离子交换量采用氯化铵交换—氧化镁碱化—

蒸馏—硼酸吸收方法；土壤含水量采用烘干法；土壤盐分和土壤pH均采用1:5土水比浸提液，分别用梅特勒托—利多电导率仪和pH计测定。土壤颗粒组成采用比重计法测定<sup>[27]</sup>。

3.3 研究方法

**3.3.1 “时空代换”方法** 在物理学领域中，为了认识热现象规律，无需了解每个分子每一时刻的运动状态，而只需研究总体的宏观运动规律，用概率论的方法描述总体的平均行为。“各态遍历性”（ergodicity）的概念用于刻画粒子的空间分布状态，即假设单个粒子运动服从平稳随机过程，某一空间分布状态等同于某一时刻有大量粒子组成的总体在该空间中的分布状态。该理论后来被引入到生态学领域和地貌演化的研究中<sup>[28]</sup>。年代序列和时空代换（Space-for-time substitutions）是研究多时间尺度植物演替和土壤发生过程的重要和必要方法之一<sup>[29]</sup>。该方法适用于具有类似演变轨迹、具有不同年龄的研究区，目前也广泛应用于土壤研究领域<sup>[30-31]</sup>，揭示土壤长期演化过程。

**3.3.2 统计分析方法** 单因素方差分析（One-way ANOVA）用于完全随机设计的多个样本均数间的比较，本文运用SPSS 23软件，对不同年限垦区土壤数据进行单因素方差分析比较组间差异显著性水平。典范对应分析（CCA）是将对应分析和多元回归模型相结合，揭示多元变量及其与环境因子的关系。本研究基于R语言软件运用CCA分析滩涂围垦区耕地土壤样品、土壤理化性质和滩涂围垦年限（Reclamation duration, RD）、耕作年限（Cropland duration, CD）、光滩年限（Bare land duration, BD）、盐生植被年限（Halophyte duration, HD）、养殖年限（Aquaculture duration, AD）、至海岸线距离（Distance to sea, SD）、垦区道路面积占比（Road proportion, RP）、居民点面积占比（Village proportion, VP）、水体面积占比（Water proportion, WP）以及垦区面积（Area）的排序关系。

4 结果与分析

4.1 沿海滩涂围垦区耕地土壤理化性质基本特征

江苏中部沿海滩涂围垦区耕地土壤基本理化性质如表1所示。按照全国土壤养分标准来看，江苏中部沿海滩涂围垦区土壤养分（有机质、全氮、全磷等）平均水平一般处于第四等级，波动于第三~第六等级，土壤养分贫瘠，且土壤养分变异程度处于中等水

表1 滩涂围垦区耕地表层土壤理化性质统计值  
Tab. 1 Statistics of cropland soil physical-chemical properties at the coastal reclamation zones

	单位	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	偏度	峰度
OM	%	0.57	2.81	1.36	0.48	0.35	0.82	0.34
TN	ug/g	387.00	1636.00	822.41	277.57	0.34	0.93	0.39
TP	ug/g	625.00	1342.00	879.00	179.27	0.20	0.43	-0.63
AP	mg/kg	2.64	89.20	26.01	19.67	0.76	0.96	0.18
AN	mg/kg	16.70	111.00	55.77	22.74	0.41	0.37	-0.64
CEC	mmol/kg	28.70	151.00	65.47	21.63	0.33	1.50	3.53
盐分	us/cm	80.80	1456.00	272.49	228.15	0.84	2.36	8.42
pH	无量纲	7.75	8.96	8.25	0.25	0.03	0.64	0.39
含水量	%	7.86	46.18	32.93	4.85	0.15	-1.40	8.70
粘粒	%	5.99	25.99	10.93	3.84	0.35	1.93	4.24
粉粒	%	6.00	44.00	27.27	8.56	0.31	-0.10	-0.50
砂粒	%	37.01	85.01	61.80	11.31	0.18	-0.38	-0.36



平, 其中土壤速效磷变异程度较高。根据美国盐分实验室对盐碱土划分标准, 土壤盐分平均值属于非盐土, 然而土壤盐分波动于非盐土和强盐土之间, 土壤盐分变异程度较高。从国际制土壤质地分类来看, 江苏中部沿海滩涂土壤属于壤土和粘壤土两个类, 土壤粘粒和粉粒占比变异程度高, 土壤砂粒占比变异相对较小。江苏中部沿海滩涂围垦区土壤呈碱性, 波动于中性至碱性之间。因此, 江苏沿海中部滩涂围垦区耕地土壤呈现养分贫瘠、盐碱度高等特征, 且变异程度较大。

从中国海岸带空间分布来看, 江苏中部沿海滩涂围垦区有机质含量介于 0.57%~2.81%, 略高于渤海湾和辽河口滩涂, 与江苏如东有机质含量差异不大, 比崇明岛、杭州湾、慈溪、闽江口、珠江口滩涂有机质含量低, 主要原因是受到气候因素的影响, 气候温暖地区滩涂生物量相对较大 (表 2), 与其他学者研究一致<sup>[33]</sup>。土壤全氮的含量空间分布与有机质类似。江苏中部沿海地区滩涂土壤磷含量与江苏如东、崇明岛差异不大, 但比辽河口、渤海湾、杭州湾、珠江口相对较高, 主要原因在于磷的原生矿物主要存在粗颗粒中, 而苏北滩涂、长江口等滩涂沉积物以砂粒和粉砂为主, 粘粒含量较小。

表 2 中国沿海滩涂土壤理化性质特征比较

Tab. 2 Comparision of soil physical-chemical properties at the coastal tidal flats, China

	OM	TN	TP	粘粒	粉粒
	%	ug/g	ug/g	%	%
本研究	0.57~2.81	0.39~1.64	0.62~1.34	6~26	6~44
辽河口 <sup>[34, 35]</sup>	0.1~2.27	0.8~3.43	0.36~0.66	12.83~26.12	66.83~72.29
渤海湾 <sup>[36, 37]</sup>	0.06~1.77	0.07~0.76	0.41~0.71	0~26.0	60.1~84.7
江苏如东 <sup>[38-40]</sup>	0.06~2.11	0.08~1.84	0.46~1.39	6.2~13.3	7.5~36.6
崇明岛 <sup>[19, 41]</sup>	0.98~4.20	0.59~2.12	1.319	6.5~13.3	54.4~76.1
杭州湾 <sup>[16, 42]</sup>	0.27~6.21	0.25~1.05	0.33~0.67	5~34.2	20.4~69.4
慈溪 <sup>[40, 43]</sup>	0.36~3.04	0.28~1.63	0.57~2.37	16.4~28.0	44.6~55.4
闽江口 <sup>[33]</sup>	0.22~4.36	0.24~1.91	0.21~1.34	19	75
珠江口 <sup>[44, 45]</sup>	2.32~7.62	1.2~2.4	0.27~0.59	13.09~32.28	20.34~42.23

## 4.2 沿海滩涂转变为耕地的演变路径分析

沿海滩涂转变为耕地路径是垦区地形、植被、土壤以及区位等自然条件和滩涂围垦开发主体等人文因素共同作用的复杂过程。通过对 1986-2016 年 31 幅 Landsat TM 和 OLI 遥感影像人工判读得到江苏沿海 15 个垦区滩涂转变为耕地的演变路径, 其中 2 个垦区滩涂围垦后经历“盐生植被→养殖水体→耕地”的变化过程; 13 个垦区均经历了“盐生植被→耕地”的变化过程 (表 3), 与其他研究一致<sup>[3]</sup>, 李建国研究 1977-2014 年江苏中部沿海, 光滩/盐生植被转变为耕地占比高达 87.76%, 养殖水体转变为耕地占比仅为 12.24%<sup>[3]</sup>。

结合垦区调研情况, 初步探析江苏中部沿海滩涂转变为耕地演变路径的内在驱动机制。通过分析得到, 20 世纪 70 年代以茅草和芦苇为主要植被的滩涂围垦区, 由于土壤盐分低, 由农户进行开垦直接进行农业耕作 (垦区 N); 临近海堤且由临港工业园开垦的耕地经历“盐生植被→养殖水体→耕地”的变化过程 (垦区 O)。20 世纪 80 年代以后, 随着滩涂围垦强度加大, 围垦区不断向海推进, 垦区滩涂类型多样, 有光滩和盐生植被滩, 且盐生植被密度和种类不一, 该阶段滩涂围垦开发主体以农场为主, 沿海滩涂转变为耕地的方式主要为“盐生植被→耕地”。20 世纪 90 年代, 由市区级沿海开发集团开发的滩涂围垦区经历“盐生植被→养殖水体→耕地”的演变过程 (垦区 I); 而省级沿海开发集团开的滩涂围垦区经历“盐生植被→耕地”的演变过程 (垦区 H、G、F)。21 世纪以来, 滩涂围垦后, 农场开发一般直接开垦为耕地 (垦区 D)。沿海经济开发区在将滩涂

表3 1986-2016年滩涂围垦区耕地利用演变路径

Tab. 3 Trajectories of cropland use at the coastal reclamation zones from 1986 to 2016

垦区	年份	1986-2016年土地利用转移路径	围垦时间(年)	耕作时间(年)
O	1979s	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAACC	37	5
N	1979	CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC	37	>31
M	1981	HCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC	35	30
L	1984	BHHHHHHCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC	32	24
K	1986	HHHHHHHHHHHHHHHHHHHCCCCCCCC	30	13
J	1989	HHHHACCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC	27	26
I	1990	BVBVBVBVAAAAAAAAAAAAACCCCCC	26	10
H	1997s	HHHHHHHHHHHHHHHHHHHCCCCCCCC	19	12
G	1997	HHHHHHHHHHHHHCCCCCCCCCCCCCCC	19	18
F	1998	HHHHHHHHHHHHHHCCCCCCCCCCCCCCC	18	17
E	2001	HHHHHHHHHHHHHHHHHHHCCCCCCCC	15	15
D	2005	BVBVBVHHHHHHHHHHHHHHHCCCCCCC	11	11
C	2006	BVBVBVBVBVBVBVBVBVHHHHHHHHHCCCC	10	5
B	2009	BVBHHHHHHHHHHHVBVBVBVBVHHHHHCCCC	7	4
A	2012	HHHHHHHHHHHHHHHHHHHHHHHHHHHCCCC	4	4

开发为城镇之前，先将滩涂开垦为耕地（垦区B和垦区D），提高已围滩涂利用效益。同时，对于面积相对较小的滩涂垦区，开发主体也会将其直接开发为耕地（垦区E）。因此，江苏中部沿海滩涂垦区滩涂转为耕地演变路径受到围垦初期地形、植被等自然条件作用的同时，也受到开发主体如农户、农场、经济开发区、工业区等开发主体以及开发规模等因素共同影响。江苏中部沿海滩涂“盐生植被→耕地”的演变虽然缩短了滩涂农垦的周期，但是由于土壤盐分含量高等因素，也会带来滩涂围垦后抛荒闲置现象的出现，围垦时间远大于耕作时间，围垦闲置抛荒多年后开始耕作，如垦区L、K、H、B和C。

4.3 滩涂围垦耕地质量演变趋势分析

土地利用/覆被变化能够引起与土壤相联系的生物化学过程发生改变<sup>[23]</sup>，因此，滩涂围垦区滩涂转变为耕地的演变路径对于耕地质量演变具有重要影响。运用“时空代换”的方法，通过比较不同年限滩涂围垦区耕地质量空间差异，揭示滩涂围垦后耕地质量演变趋势。从滩涂围垦区初始状态和滩涂转变为耕地演变路径两个方面，本文将垦区分为四类，第Ⅰ类是植被稀少的混合滩或者光滩经过围垦直接转为耕地，如垦区A、B、C、D、G、H和L；第Ⅱ类是有潮沟分布的混合滩或者光滩经过围垦转为耕地，如垦区E和N；第Ⅲ类是植被稀少的混合滩或者光滩经过养殖水体，再转为耕地，如垦区I和O；第Ⅳ类是围垦初期植被浓密的混合滩经过围垦直接转为耕地，如垦区F、J、K和M。

4.3.1 土壤有机质演变趋势分析 沿海淤泥质滩涂具有重要的生态服务功能，比如碳汇等。随着滩涂围垦后，沿海淤泥质滩涂失去了湿地淹水条件，滩涂土壤固碳等生态服务功能逐步发生转变。围垦初期盐生植被浓密的垦区耕地土壤，土壤有机质含量较高，如垦区F、J、K和M（图2），其中垦区J土壤有机质含量最高（1.88%），该垦区覆盖植被为芦苇、茅草、盐蒿和互花米草混合<sup>[46]</sup>。地势低洼且有潮沟分布的垦区耕地，土壤盐分高，作物长势不好，土壤有机质含量相对较低，如垦区E和N。经过养殖水体再转为耕地的垦区耕地土壤，由于耕作时间短，土壤有机质含量偏低，如垦区I和O。围垦初期盐生植被覆盖、潮沟分布和围垦过程中开展养殖（第Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ类型垦区）对土壤有机质含量影响较大。

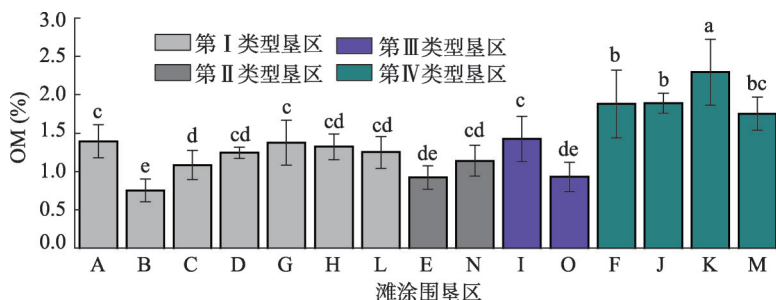


图2 不同滩涂围垦区土壤有机质差异

Fig. 2 Differences of soil organic matter at different reclamation zones

第I类型垦区滩涂转变为耕地的演变路径基本一致,从第I类型垦区(A、B、C、D、G、H和L)揭示滩涂围垦后耕地质量演变趋势。图3a显示围垦后滩涂土壤有机质含量呈现“下降→上升→波动”趋势,土壤有机质从最初的1.39%下降到0.75%,而后增加到1.37%,继而下降至1.24%。滩涂围垦后,滩涂土壤因脱离海水环境从还原状态转变为氧化状态,滩涂植被滩已累积的土壤有机碳发生矿化过程,土壤有机质围垦初期(0~7

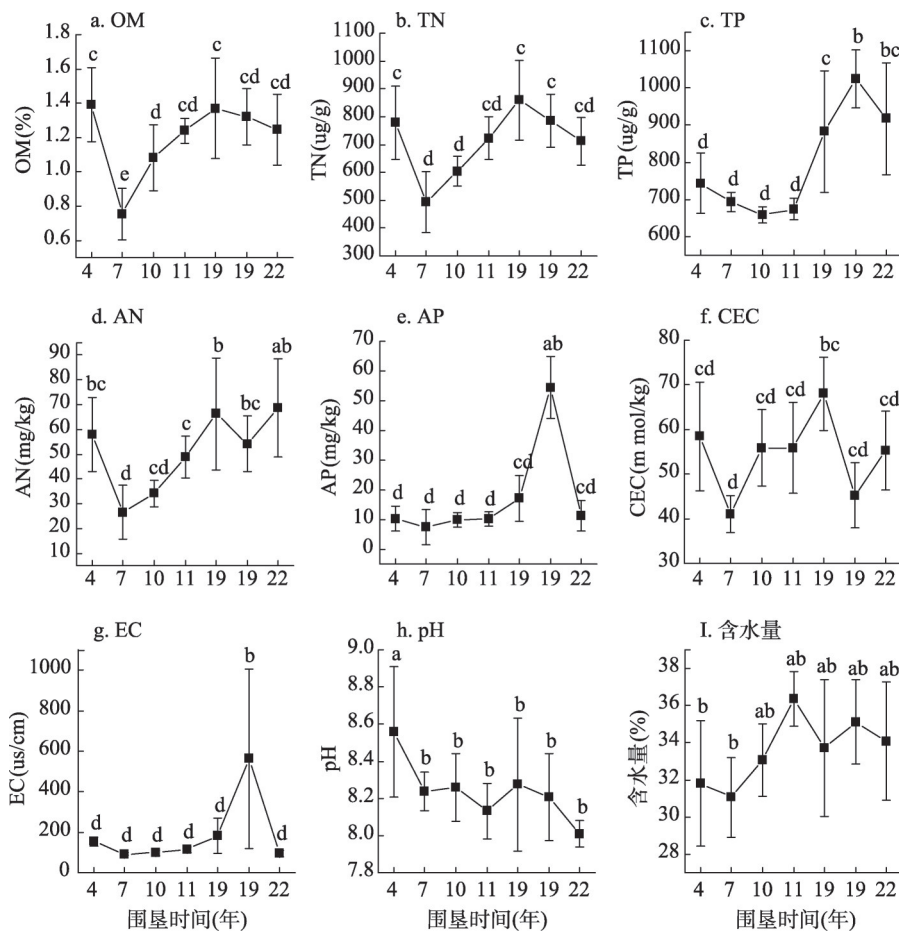


图3 滩涂围垦后土壤理化性质变化趋势

Fig. 3 Change trends of soil properties following reclamation duration

年) 呈现下降趋势; 围垦中期 (7~19年), 人类耕作将大量作物秸秆残根输入土壤, 土壤有机质含量呈现上升趋势, 由于滩涂垦区耕地土壤较为敏感, 受到耕作管理等因子影响较大, 围垦后期 (20~22年) 会出现一定幅度波动。与其他研究结果一致, 有学者认为围垦后 20 年土壤有机碳由于海洋沉积物矿化过程呈现下降趋势, 而后由于农业围垦有机物输入再呈现上升趋势<sup>[16, 19]</sup>。然而也有学者研究围垦 3 年以上表层土壤有机碳可增加 0.24%, 围垦 52 年后, 有机碳增加 1.5%<sup>[20]</sup>, 认为土壤有机质一直处于增加趋势, 其结果不同的主要原因是滩涂围垦初期土壤有机碳含量初始状态不同。

**4.3.2 土壤全氮和碱解氮演变趋势分析** 土壤全氮含量主要以有机氮为主, 主要受到土壤有机质含量的影响。土壤全氮含量最高的垦区是盐生植被覆盖密集的垦区 F、J、K 和 M。有潮沟分布的垦区全氮含量低, 如垦区 E 和 N。滩涂围垦后经过养殖水体的垦区 I 和 O 土壤全氮含量也很低 (图 4)。围垦初期盐生植被覆盖、潮沟分布和围垦过程中开展养殖 (第 II、III 和 IV 类型垦区) 对土壤全氮影响较大。从第 I 类型垦区来看, 随着围垦时间, 土壤全氮含量呈现 “下降→上升→波动” 趋势, 从初期的 778 ug/g 下降至 493 ug/g, 然后上升至 859 ug/g, 继而下降至 712 ug/g (图 3b)。滩涂围垦 10 年内, 全氮含量下降并逐步上升, 围垦 10~19 年全氮含量相对稳定, 19 年后存在下降趋势。土壤碱解氮, 包括无机态氮和易水解的有机态氮, 与土壤全氮含量密切相关。垦区 F、J、K 和 M 受到盐生植被密集覆盖影响, 土壤碱解氮含量高。有潮沟分布的垦区 E 和 N 和经历养殖的垦区 I 和 O 的土壤碱解氮含量低下。围垦初期盐生植被覆盖、潮沟分布和围垦过程中养殖对土壤

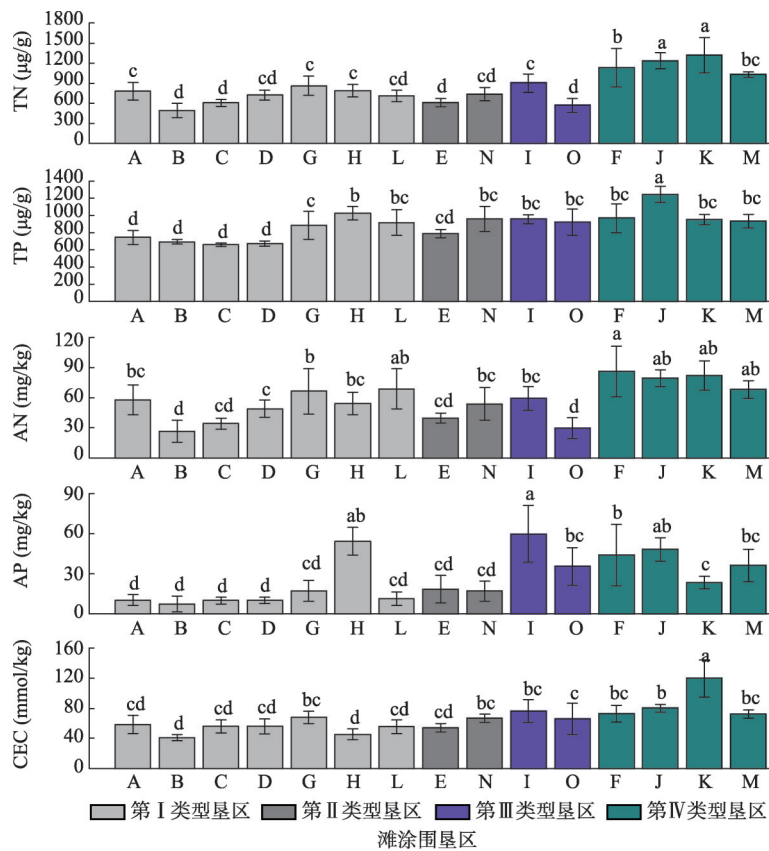


图 4 不同滩涂围垦区土壤养分差异

Fig. 4 Differences of soil fertility at different reclamation zones



碱解氮影响较大。从第Ⅰ类型垦区来看,随着围垦时间,土壤碱解氮呈现“下降→上升”趋势(图3d),从初期的57.91 mg/kg下降到26.52 mg/kg,之后上升到68.77%。滩涂围垦7年内土壤碱解氮含量下降,围垦7~32年内呈现逐步上升趋势。

**4.3.3 土壤全磷和有效磷演变趋势分析** 土壤全磷分为无机磷和有机磷,其中有机磷主要以高分子形态存在,有效性不高,无机磷以吸附态和钙、铁、铝等磷酸盐为主,存在形态受到pH影响很大<sup>[40]</sup>。土壤磷素的缺乏主要受到土壤母质的限制<sup>[47]</sup>。江苏中部沿海盐生植被滩分布的垦区全磷含量较高,与其他研究存在差异,有学者认为光滩沉积物中总磷的含量最高(1026 mg/kg),其次为芦苇滩、互花米草滩、混合滩、盐蒿滩<sup>[8]</sup>,主要原因在于磷素被植物吸收<sup>[48]</sup>,然而江苏中部沿海滩涂沉积物砂粒和粉粒含量较高,原生磷灰石磷主要存在于粗颗粒中。潮沟分布和养殖水体对滩涂垦区全磷含量影响较小。从第Ⅰ类型垦区来看,围垦初期土壤全磷含量较小,受到人类耕作施肥影响,土壤全磷含量有所上升,围垦后土壤全磷呈现“上升”趋势(图3c)。

土壤有效态磷主要为水溶性磷、吸附态磷和有机态磷,由于土壤对磷具有吸附和释放作用。盐生植被密集垦区、经历养殖的垦区以及有潮沟分布的垦区土壤有效磷含量相对较高。滩涂围垦后,土壤中 $\text{Ca}^{2+}$ 的不断流失,Ca/P比不断减小,P的有效性会相对提高,同时,人类耕作加大对磷肥施入量,土壤有效磷含量逐步提高。围垦10年内,土壤有效磷变化不显著,围垦10~32年土壤有效磷呈现增加趋势(图3e)。

**4.3.4 土壤阳离子交换量演变趋势分析** 土壤阳离子交换量是土壤肥力重要影响因素之一,直接反映土壤保蓄、供应和缓冲阳离子养分的能力<sup>[49]</sup>。土壤阳离子交换量受到土壤质地影响较大,如垦区K(图4,图5),受到盐生植被、养殖以及潮沟等影响较小。从第Ⅰ类型垦区来看,滩涂围垦后,土壤阳离子交换量呈现“下降→上升”趋势(图3f)。

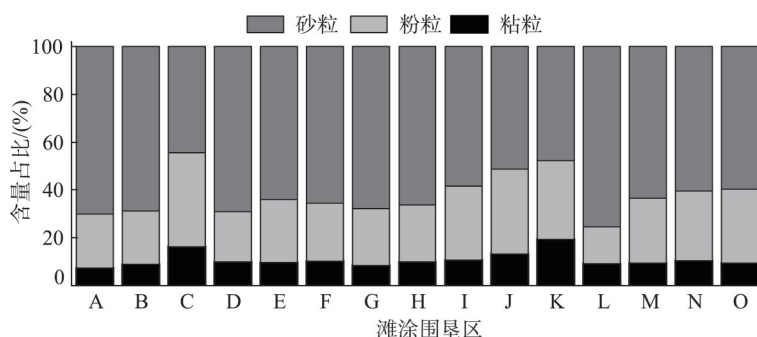


图5 不同滩涂围垦区土壤颗粒组成

Fig. 5 Differences of soil particle sizes at different reclamation zones

**4.3.5 不同围垦区土壤盐分和pH演变趋势** 土壤盐分是沿海滩涂围垦区耕地土壤重要限制性指标之一<sup>[50-52]</sup>,受到降雨和地形影响,土壤盐分的时空变异很高。从图6可以看出,受到降雨的影响,滩涂垦区土壤含水量高达32.93% (表1),除了垦区J和O外,滩涂围垦区土壤盐分差异并不显著,其演变趋势(图3g)与前人研究不同<sup>[50-52]</sup>。前人研究得到随着滩涂围垦年限,土壤表层盐分不断下降,大约在30年左右达到稳定脱盐水平<sup>[50]</sup>,土壤剖面盐分呈现“均匀型—表聚型—震荡型—底聚型—震荡型—均匀型”的过程<sup>[52]</sup>。围垦后,滩涂土壤在降雨和蒸发作用下,土壤盐分在剖面上下迁移,呈现季节性变化特征,1-6月处于积盐期,7-9月处于脱盐期<sup>[53]</sup>。研究土壤盐分随着滩涂围垦的变化趋势的最佳时间为秋季和冬季,降雨对分析滩涂围垦土壤盐分演变趋势影响很大。

土壤pH在不同垦区之间无显著性差异(图6)。盐生植被覆盖垦区、经历“盐生植被

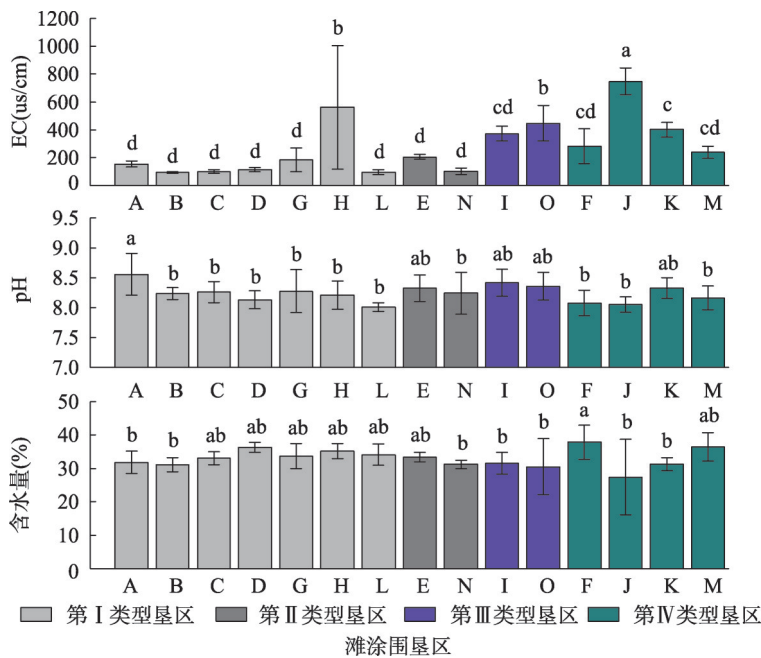


图6 不同滩涂围垦区土壤盐分、pH和含水量差异  
Fig. 6 Differences of soil water, salinity and pH at different reclamation zones

—养殖—耕地”垦区以及有潮沟分布的垦区土壤pH值较高，主要原因在于这些垦区土壤Ca<sup>2+</sup>流失相对较慢，同时人们在养殖过程中会施入石灰调节pH值。从第Ⅰ类型垦区来看，滩涂围垦后，滩涂土壤pH值呈现下降趋势，垦区A（2012年）pH值最高。垦区pH值的变化主要受到CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>—HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>—Ca<sup>2+</sup>平衡体系的影响<sup>[21, 54]</sup>，滩涂围垦后Ca<sup>2+</sup>的不断流失导致pH值不断下降。

4.3.6 沿海滩涂土壤质地梯度特征分析

土壤粘粒、粉粒和砂粒在江苏沿海中部滩涂围垦区在经纬度方向上呈现显著空间差异（图7）。土壤粘粒和粉粒占比随着纬度增加，呈现增加趋势，即纬度每增加1°，土壤粘粒和粉粒占比分别增加7.69%和12.60%，土壤粘粒占比在纬度变化比土壤粉粒较为缓慢；土壤砂粒占比随着纬度增加，呈现下降趋势，即纬度每增加1°，土壤砂粒占比下降20.29%，土壤砂粒占比在纬度方向变化比土壤粉粒和粘粒较快。土壤粘粒和粉粒占比随着经度增加，呈现下降趋势，即经度每增加1°，土壤粘粒和粉粒占比分别下降20.04%和31.00%，土壤粘粒占比在经度方向上比土壤粉粒较为缓慢；土壤砂粒占比随着经度增加，呈现增加趋势，即经度每增加1°，土壤砂粒占比增加51.05%，土壤砂粒占比在经度方向上变化比土壤粉粒和粘粒较快。

4.4 滩涂围垦区耕地质量与环境因子典范对应分析

前两个典型排序轴能够解释87%的耕地质量因子的变异（表4），第一轴主要解释有

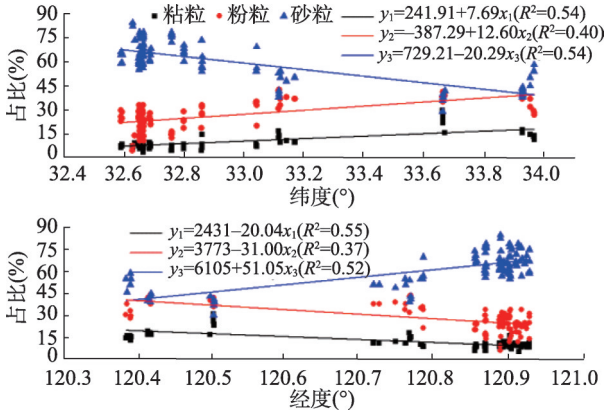


图7 经纬方向上土壤颗粒组成的变化趋势  
Fig. 7 Change trends of soil particle sizes along altitude and latitude

效磷、盐分、阳离子交换量、土壤含水量、粘粒、砂粒、粉粒和pH的变异；第二轴主要解释有机质、全氮、碱解氮和全磷的差异。从耕地质量因子、土壤样点以及耕地质量环境变量三序图（图8）中可以看出，耕地质量因子可分为三类，第一类为土壤砂粒、粉粒、粘粒、全磷、pH和含水量；第二类为有机质、全氮、碱解氮和阳离子交换量；第三类为有效磷和土壤电导率。从耕地质量因子与环境因子的关系来看，土壤有机质、全氮、碱解氮、CEC与耕作年限呈现正相关关系。土壤砂粒、粉粒、pH、全磷与围垦年限呈现负相关关系。土壤有效磷与围垦年限呈现正相关关系。土壤盐分与所选环境变量相关性不高。

5 结论

本文通过遥感影像目视解译、野外土壤采样采集和实验分析，揭示江苏中部沿海滩涂围垦耕地质量演变趋势，研究结果表明：

- （1）江苏中部沿海滩涂土壤总体呈现盐碱度高、养分贫瘠等特征且变异程度较高。从中国海岸带分布来看，江苏中部沿海滩涂土壤有机碳含量高于辽河口和渤海湾，低于杭州湾、闽江口和珠江口，但由于滩涂沉积物以砂粒和粉砂为主，土壤全磷含量高于辽河口、渤海湾、杭州湾、闽江口以及珠江口。
- （2）滨海滩涂转变为耕地路径是由垦区自然条件如围垦初期垦区地形、盐生植被状况和土壤等、开发主体（农户、农场、经济开发区和工业园区等）、开发规模等因素共同作用。江苏中部沿海滩涂围垦模式已从“盐生植被→养殖水体→耕地”转变为“盐生植被→耕地”，这种转变缩短了滩涂围垦转变为耕地资源的周期，但也会带来滩涂围垦后闲置撂荒等问题发生。
- （3）滩涂围垦后，耕地质量因子演变趋势主要分为四种类型即上升型，如土壤全磷、有效磷、粘粒含量；下降型，如土壤砂粒含量；下降—上升型，如有机质、全氮、碱解氮和CEC；上升—下降型，如土壤盐分和pH。滩涂围垦初期，滩涂土壤脱离海水环境，盐生植被所固定的有机碳发生矿化过程而流失，同时，土壤盐分和pH受到蒸腾和蒸发作用呈现快速上升趋势。围垦中期，随着人类耕作向土壤中输入作物秸秆等有机物，土壤有机碳、养分等呈现上升趋势，土壤盐分和pH不断降低。围垦后期，耕地土壤因子呈现一定幅度的波动现象，由于沿海滩涂围垦区耕地土壤形成时间短，对耕作管理敏感性高。

表4 典范对应轴特征值、累计解释率和耕地质量因子得分  
Tab. 4 Eigenvalue, cumulative proportion of components and the scores of cropland quality factors

	OM	TN	TP	AP	AN	CEC	EC
CA1	-0.10	-0.09	-0.06	0.31	-0.13	-0.11	0.57
CA2	-0.14	-0.13	0.12	0.04	-0.15	-0.07	-0.01
	pH	W	Clay	Silt	Sand	累计贡献	特征值
CA1	-0.15	-0.18	-0.11	-0.09	-0.19	0.67	0.04773
CA2	0.16	0.14	0.04	0.14	0.18	0.87	0.01362

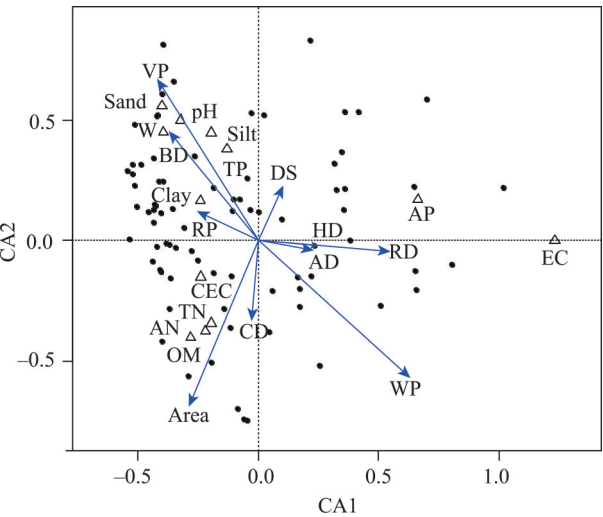


图8 耕地质量因子的CCA三序图  
Fig. 8 Canonical ordination of cropland quality factors

本文在分析江苏中部沿海滩涂土壤基本理化性质的基础上,初步研究了淤涨型沿海滩涂转变为耕地路径的内在驱动机理,探索了沿海滩涂围垦后耕地质量演变趋势及其影响因素,对加强耕地后备资源潜力区——沿海滩涂围垦后耕地资源可持续利用具有一定的支撑作用。但由于耕地质量演变过程的复杂性,以及数据受限,本文在揭示自然状态的滩涂围垦耕地质量演变趋势和人工实施不同肥料下耕地质量演变趋势的共性和差异性等方面尚显不足。对此,作者在后续研究中,将选择典型垦区加强该方面的研究,不断完善和深化滨海滩涂围垦后耕地质量演变趋势及影响机理研究。

## 参考文献(References)

- [1] Yang Baoguo, Wang Ying, Zhu Dakui. The tidal flat resource of China. *Journal of Natural Resources*, 1997, 12(4): 307-316. [杨宝国, 王颖, 朱大奎. 中国的海洋海涂资源. *自然资源学报*, 1997, 12(4): 307-316.]
- [2] Zhang Xiaoxiang, Yan Changqing, Xu Pan, et al. Historical evolution of tidal flat reclamation in the Jiangsu coastal areas. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(11): 1549-1558. [张晓祥, 严长清, 徐盼, 等. 近代以来江苏沿海滩涂围垦历史演变研究. *地理学报*, 2013, 68(11): 1549-1558.]
- [3] Li Jianguo, Pu Lijie, Xu Caiyao, et al. The changes and dynamics of coastal wetlands and reclamation areas in central Jiangsu from 1977 to 2014. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 17-28. [李建国, 濮励杰, 徐彩瑶, 等. 1977-2014年江苏中部滨海湿地演化与围垦空间演变趋势. *地理学报*, 2015, 70(1): 17-28.]
- [4] Zhang Renshun, Lu Liyun, Wang Yanhong. The mechanism and trend of coastal erosion of Jiangsu Province in China. *Geographical Research*, 2002, 21(4): 469-478. [张忍顺, 陆丽云, 王艳红. 江苏海岸侵蚀过程及其趋势. *地理研究*, 2002, 21(4): 469-478.]
- [5] Gao Yu, Zhao Bin. The effect of reclamation on mud flat development in Chongming Island, Shanghai. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(8): 475-475. [高宇, 赵斌. 人类围垦活动对上海崇明东滩滩涂发育的影响. *中国农学通报*, 2006, 22(8): 475-475.]
- [6] Yang Gui, Shi Yangfeng, Zhang Chun. The ecological response of typical mud flat to sea level change in Jiangsu coastal plain. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(3): 325-332. [杨桂山, 施雅风, 张琛. 江苏滨海滩涂湿地对潮位变化的生态响应. *地理学报*, 2002, 57(3): 325-332.]
- [7] Gao Jianhua, Ou Weixin, Yang Guishan, et al. Characteristics of tidal flat sediment at different ecologic zones, north Jiangsu Province. *Donghai Marine Science*, 2005, 23(1): 41-48. [高建华, 欧维新, 杨桂山, 等. 苏北潮滩不同生态带沉积物分布特征. *东海海洋*, 2005, 23(1): 41-48.]
- [8] Gao Jianhua, Bai Fenglong, Yang Guishan, et al. Distribution characteristics of organic carbon, nitrogen, and phosphorous in sediments from different ecologic zones of tidal flats in north Jiangsu Province. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(5): 756-765. [高建华, 白凤龙, 杨桂山, 等. 苏北潮滩湿地不同生态带碳、氮、磷分布特征. *第四纪研究*, 2007, 27(5): 756-765.]
- [9] Shen Yongming, Zeng Hua, Wang Hui, et al. Characteristic of halophyte and associated soil along aggradational muddy coasts in Jiangsu Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 1-6. [沈永明, 曾华, 王辉, 等. 江苏典型淤长岸段潮滩盐生植被及其土壤肥力特征. *生态学报*, 2005, 25(1): 1-6.]
- [10] Cai F F, Vliet J V, Verburg P H, et al. Land use change and farmer behavior in reclaimed land in the middle Jiangsu coast, China. *Ocean & Coastal Management*, 2017, 137: 107-117.
- [11] Xu C Y, Pu L J, Li J G et al. Ecological security and ecosystem services in response to land use change in the coastal area of Jiangsu, China. *Sustainability*, 2016, 8(8): 816.
- [12] Ou Weixin, Yang Guishan, Li Hengpeng, et al. Spatial-temporal variation and driving forces of landscape patterns in the coastal zone of Yangcheng, Jiangsu. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(5): 610-615. [欧维新, 杨桂山, 李恒鹏, 等. 苏北盐城海岸带景观格局时空变化及驱动力分析. *地理科学*, 2004, 24(5): 610-615.]
- [13] Xu Yan, Pu Lijie. The variation of land use pattern in tidal flat reclamation zones in Jiangsu coastal area: A case study of Rudong County of Jiangsu Province. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(4): 643-652. [许艳, 濮励杰. 江苏海岸带滩涂围垦区土地利用类型变化研究: 以江苏省如东县为例. *自然资源学报*, 2014, 29(4): 643-652.]
- [14] Xu Yan, Pu Lijie, Zhang Runsen, et al. Spatial-temporal dynamics of land use and land cover change in the coastal zone of Jiangsu Province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(5): 565-571. [许艳, 濮励杰, 张润森, 等. 近年来江苏省海岸带土地利用/覆被变化时空动态研究. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(5): 565-571.]
- [15] Ellis S, Atherton J K. Properties and development of soils on reclaimed alluvial sediments of the Humber estuary,



- eastern England. *Catena*, 2003, 52(2): 129-147.
- [16] Iost S, Landgraf D, and Makeschin F. Chemical soil properties of reclaimed marsh soil from Zhejiang Province PR China. *Geoderma*, 2007, 142(3): 245-250.
- [17] Fernández S, Santín C, Marquinez J, et al. Saltmarsh soil evolution after land reclamation in Atlantic estuaries (Bay of Biscay, North coast of Spain). *Geomorphology*, 2010, 114(4): 497-507.
- [18] Sun Y G, Li X Z, Mander Ü, et al. Effect of reclamation time and land use on soil properties in Changjiang River Estuary, China. *Chinese Geographical Science*, 2011, 21(4): 403-416.
- [19] 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. *Soil and Tillage Research*, 2012, 123: 50-60.
- [20] Jin Wenhui, Yang Jinsong, Wang Xiangping. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (5): 89-94. [金雯晖, 杨劲松, 王相平. 滩涂土壤有机碳空间分布与围垦年限相关性分析. 农业工程学报, 2013, 29 (5): 89-94.]
- [21] Zhang Meng, Pu Lijie, Wang Xiaohan, et al. Effects of long-time cultivation on physicochemical properties of coastal saline soil and wheat production at reclamation areas of Jiangsu Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16): 5088-5097. [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. 生态学报, 2016, 36(16): 5088-5097.]
- [22] Zhang Meng, Pu Lijie, Wang Xiaohan, et al. Effects of distribution intensity on spatio-temporal differentiation of soil particle size in reclamation areas of tidal flat. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(5): 845-854. [张濛, 濮励杰, 王小涵, 等. 不同干扰强度对滩涂围垦区土壤颗粒组成的时空分异特征的影响. 自然资源学报, 2016, 31(5): 845-854.]
- [23] Li Jialin, Liu Chuang, Zhang Dianfa, et al. The influence of land use change on soil quality of soil genetic layers: a case study on the coastal plain of south Hangzhou bay. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(4): 378-388. [李加林, 刘闯, 张殿发, 等. 土地利用变化对土壤发生层质量演化的影响: 以杭州湾南岸滨海平原为例. 地理学报, 2006, 61(4): 378-388.]
- [24] Wang Qiqi, Pu Lijie, Zhu Ming, et al. Soil quality evolution in coastal reclamation zones: A case study of Rudong County of Jiangsu Province. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(2): 256-264. [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. 地理科学, 2016, 36(2): 256-264.]
- [25] Wang Jian Xu Min, Liu Zhaopu, et al. Coastal Wetland in Jiangsu and Its Potential for Utilization. Beijing: China Ocean Press, 2012. [王建, 徐敏, 刘兆普, 等. 江苏省海岸滩涂及其利用潜力. 北京: 海洋出版社, 2012.]
- [26] Jiangsu Provincial Local Records Compilation Committee. Jiangsu Province Record: Nine. Soil Record. Nanjing: Jiangsu Ancient Book Press, 2001. [江苏省地方志编纂委员会. 江苏省志: 9. 土壤志. 南京: 江苏古籍出版社, 2001.]
- [27] Shen Yongming, Feng Nianhua, Zhou Qin, et al. The status and its influence of reclamation on Jiangsu coast. *Marine Sciences*, 2006, 30(10): 39-43. [沈永明, 冯年华, 周勤, 等. 江苏沿海滩涂围垦现状及其对环境的影响. 海洋科学, 2006, 30(10): 39-43.]
- [28] Lu Rukun. Methods of Soil Agrochemistry Analysis. Beijing: Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.]
- [29] Huang Xiaoli, Ding Hu, Na Jiaming, et al. Theories and methods of space-for-time substitution in geomorphology. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 94-104. [黄骁力, 丁浒, 那嘉明, 等. 地貌发育演化研究的空代时理论与方法. 地理学报, 2017, 72(1): 94-104.]
- [30] Lawrencer W, Davida W, Richardd B, et al. The use of chronosequences in studies of ecological succession and soil development. *Journal of Ecology*, 2010, 98(4): 725-736.
- [31] Kölbl A, Schad P, Jahn R, et al. Accelerated soil formation due to paddy management on marshlands (Zhejiang Province, China). *Geoderma*, 2014, 228/229(5): 67-89.
- [32] Zou P, Fu J R, Cao Z H. Chronosequence of paddy soils and phosphorus sorption-desorption properties. *Journal of Soils and Sediments*, 2011(11): 249-259.
- [33] Tong Chuan, Jia Ruixia, Wang Weiqi, et al. Spatial variation of carbon, nitrogen and phosphorous in tidal salt marsh soils of the Minjiang River estuary. *Geographical Research*, 2010, 29(7): 1203-1213. [仝川, 贾瑞霞, 王维奇, 等. 闽江口潮汐盐沼湿地土壤碳氮磷的空间变化. 地理研究, 2010, 29(7): 1203-1213.]
- [34] Luo Xianxiang, Zhang Shanshan, Guo Meng. Spatial distribution and seasonal dynamics characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorous in the Liaohe estuary wetlands. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, 40(12): 97-104. [罗先香, 张珊珊, 敦萌. 辽河口湿地碳、氮、磷空间分布及季节动态特征. 中国海洋大学学报自然科学版, 2010, 40(12): 97-104.]
- [35] Yang Junpeng. Geochemical characteristics of the sediment elements and its environmental efficiencies in the Liaohe River Estuary [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011. [杨俊鹏. 辽河口潮滩沉积物元素地球化学特征及

- 其环境效应[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.]
- [36] Yu J B, Dong H F, Li Y Z, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of soil organic carbon in newborn coastal wetlands of the Yellow River Delta estuary. *Clean-Soil Air Water*, 2014, 42(3): 311-318.
- [37] Zhao Zhimei, Zhang Lei, Zheng Binghui, et al. Spatial distribution of phosphorous and nitrogen in core sediments of Bohai bay. *Journal of Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry (Nature Science Edition)*, 2005, 33(4): 107-111. [赵志梅, 张雷, 郑丙辉, 等. 渤海湾沉积物中氮、磷的空间分布特征研究. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(4): 107-111.]
- [38] Zhang Jing, Pu Lijie, Zhu Ming, et al. Correlation between soil pH and nutrients of tidal flat reclamation with different years in Rudong County. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(2): 225-230. [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. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(2): 225-230.]
- [39] Xu Yan. The effect of tidal flat reclamation and development on grain production capacity in the Jiangsu coastal zone [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015. [许艳. 江苏沿海滩涂围垦对粮食产能的影响研究[D]. 南京: 南京大学, 2015.]
- [40] Ru Feng. Phosphorous distribution in soils and sediments from coastal areas in eastern China [D]. Nanjing: Nanjing University, 2016. [茹峰. 华东沿海典型滩涂区土壤和沉积物磷分布特征[D]. 南京: 南京大学, 2016.]
- [41] Lin Li, Cui Jun, Chen Xueping, et al. Effects of reclamation on tidal flat and land use on soil microbial community. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(4): 899-906. [林黎, 崔军, 陈学萍, 等. 滩涂围垦和土地利用对土壤微生物群落的影响. *生态学报*, 2014, 34(4): 899-906.]
- [42] Wang L, Coles N, Wu C F, et al. Effect of long-term reclamation on soil properties on a coastal plain, southeast China. *Journal of Coastal Research*, 2014, 296(4): 661-669.
- [43] Zhang Xu, Zhang Ming, Wu Pengbao, et al. Short-term variation of soil chemical properties after tidal flat reclamation in a typical coastal area. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(2): 346-352. [张徐, 张明, 吴鹏豹, 等. 典型滩涂围垦区土壤化学性质的短期变化特征. *土壤通报*, 2016, 47(2): 346-352.]
- [44] Wang S L, Lin C Y, Cao X Z. Heavy metals content and distribution in the surface sediments of the Guangzhou section of the Pearl River, Southern China. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(6): 1593-1605.
- [45] Hu Chuanyi, Pan Jianming, Liu Xiaoya. Species of phosphorous in sediments from Pearl River estuary. *Marine Environmental Science*, 2001, 20(4): 21-25. [扈传昱, 潘建明, 刘小涯. 珠江口沉积物中磷的赋存形态. *海洋环境科学*, 2001, 20(4): 21-25.]
- [46] Agriculture Resource Development Bureau of Jiangsu Province. *Coastal Reclamation Zones in Jiangsu Province*. Beijing: China Ocean Press, 1999. [江苏省农业资源开发局. *江苏沿海垦区*. 北京: 海洋出版社, 1999.]
- [47] Augusto L, Achat D L, Jonard M, et al. Soil parent material: A major driver of plant nutrient limitations in terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 2017. doi: 10.1111/gcb.13691.
- [48] Zhu Xuan, Pan Yang, Jiao Feng, et al. Analysis of the atmospheric deposition of nitrogen and phosphorous: Taking with Beili Lake as an example. *Journal of Safety and Environment*, 2015, 15(3): 313-316. [朱炫, 潘杨, 焦峰, 等. 大气氮磷沉降量分析: 以杭州北里湖为例. *安全与环境学报*, 2015, 15(3): 313-316.]
- [49] Liu Shiquan, Pu Yulin, Zhang Shirong, et al. Spatial change and affecting factors of soil carbon exchange capacity in Tibet. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(5): 1-5. [刘世全, 蒲玉琳, 张世熔, 等. 西藏土壤阳离子交换量的空间变化和影响因素研究. *水土保持学报*, 2004, 18(5): 1-5.]
- [50] Xu Y, Pu L J, Zhu M, et al. Spatial variation of soil salinity in the coastal reclamation area, eastern China. *Journal of Coastal Research*, 2014, 30(2): 411-417.
- [51] Yin A, Zhang M, Gao C, et al. Salinity evolution of coastal soils following reclamation and intensive usage, Eastern China. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(18): 1281.
- [52] Li Peng, Pu Lijie, Zhu Ming, et al. Characteristic of soil profile salt in tidal flats under different reclamation years in Jiangsu Province. *Resources Science*, 2013, 35(4): 764-772. [李鹏, 濮励杰, 朱明, 等. 江苏沿海不同时期滩涂围垦区土壤剖面盐分特征分析: 以江苏省如东县为例. *资源科学*, 2013, 35(4): 764-772.]
- [53] Xiong Liang, Yin Yunlong, Mo Haibo, et al. Dynamics of soil salt content in platform fields in Yangkou port of Jiangsu Province. *Soils*, 2012, 44(1): 95-100. [熊亮, 殷云龙, 莫海波, 等. 江苏洋口港台田土壤盐分动态变化特征研究. *土壤*, 2012, 44(1): 95-100.]
- [54] Yin Yihua, Chen Bangben. Study on the increasing of pH value of seashore saline soil during its desalting in Jiangsu Province. *Journal of Soil Science*, 1991, 22(1): 5-7. [殷仪华, 陈邦本. 江苏省滨海盐土脱盐过程pH值上升原因的探讨. *土壤通报*, 1991, 22(1): 5-7.]

## Cropland quality evolution following coastal reclamation at the prograding tidal flats of Jiangsu Province, China

XU Yan<sup>1,2,3</sup>, PU Lijie<sup>1,2</sup>, ZHANG Runsen<sup>1</sup>, ZHU Ming<sup>1,2</sup>, LI Xueying<sup>1</sup>,  
SHEN Hongyun<sup>1</sup>, MAO Tianying<sup>1</sup>, XU Chenxing<sup>1</sup>

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;  
2. The Key Laboratory of the Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Land and Resources,  
Nanjing 210023, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science  
and Technology, Suzhou 215009, Jiangsu, China)

**Abstract:** Coastal prograding tidal flats are important wetlands and reserve resources of cropland in China, which provide the services of ecological protection, society security, and economic development. Taking the reclamation zones on the prograding coast of Jiangsu as a case study, this paper analyzed soil quality at the reclamation zones with a duration of 0-40 years to indicate the evolution of cropland quality following reclamation for sustainable use of cropland, by using the method of "space for time substitution". The results show that cropland soils had high salinity but low nutrients. The variation of soil physical and chemical properties is high in the coastal reclamation zones, and the soil particle sizes had obvious gradients of North-South and Land-Sea. The factors such as topography, vegetation status, and the path of tidal flats to cropland had significant impacts on cropland quality evolution following coastal reclamation. The path of tidal flats to cropland were jointly decided by physical condition of reclamation zones, development entity, and development scale in the coastal area of Jiangsu. The cropland trajectories have changed from "halophytes→aquaculture pond→cropland" to "halophytes→cropland" in the central part of the province's coastal area. This change shortened the period of tidal flats to cropland, but led to idle tidal flats after reclamation. The soils of coastal tidal flats have gradually transferred into soils of cropland. The changing trends of soil properties were divided into four types. The first one was the type of increase, such as soil total phosphorous, available phosphorous, and clay content. The second one was the type of decrease, such as sand content. The third one was the type of increase then decrease, such as soil salinity and pH. The fourth one was the type of decrease then increase, such as soil organic matter, total nitrogen, available nitrogen, and capacity of exchange cations. At the initial period of reclamation, soil organic matter showed a declining trend because of the process of mineralization. The soil salinity and pH increased due to transpiration and evaporation. At the middle period of reclamation, soil organic matter and nutrients increased because of the fertilization and organic matter input via human cultivation. Soil salinity and pH decreased as a result of precipitation and water resource facilities. At the later period of reclamation, the factors of soil quality fluctuated under the effect of cultivation management. The quality of cropland at the reclamation zones was fragile and sensible to cultivation management, because of the relatively short history of coastal reclamation.

**Keywords:** reserve resources of cropland; coastal tidal flat; reclamation of tidal flat; soil quality; Jiangsu coast