

DOI: 10.5846/stxb201502060296

张濛, 濮励杰, 王小涵, 王琪琪, 韩明芳. 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): - .

Zhang M, Pu L J, Wang X H, Wang Q Q, Han M F. 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): - .

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

张濛¹, 濮励杰^{1,2,*}, 王小涵¹, 王琪琪¹, 韩明芳¹

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

摘要:江苏沿海地区拥有丰富的滩涂资源, 滩涂围垦长期以来为国家提供了大量土地利用后备资源, 而耕地又是其围垦后最主要的土地利用方式之一。利用实验室土壤理化分析调查江苏东台滩涂围垦区耕种 60a 内耕地土壤理化属性及对应小麦产量的变化。结果表明: (1) 在 58a 的耕种过程中, 耕地土壤整体表现出脱盐、脱碱和养分积累的的趋势, 土壤电导率($EC_{1:5}$)、 $pH_{1:2.5}$ 由耕种前的 5.29dS/m 和 8.76 下降至 0.11dS/m 和 7.93, 土壤有机质(SOM)和全氮(TN)则由 2.64g/kg 和 0.15g/kg 上升至 13.72g/kg 和 1.12g/kg; (2) 土壤碱解氮(AH-N)、有效磷(AP)和速效钾(AK)受施肥和作物生长影响强烈, 除 AK 持续流失外, AH-N 和 AP 均表现出先增长后减少的趋势; (3) 土壤碳氮比(C/N)和阳离子交换量(CEC)在耕种 15—53a 经历了剧烈波动, 反应出此期间该地区土壤的脆弱性, 除 AK 外, 各土壤理化指标均在耕种 53a 后开始影响 20cm 以下的深层土壤; (4) 随着土壤环境的改善, 小麦产量的上升经历了快速增产(0—15a)、波动中产(15—53a)和稳定高产(53a 以上)三个阶段, 在耕种 53 年后可达到该品种小麦(扬麦 16)正常产量。虽然高强度的农业开发使土壤质量和小麦产量的都有了大幅提升, 但耕种 0—40a 间所表现出的土壤环境的剧烈变化和波动, 以及化肥投入与小麦产量之间不对应所可能导致的生态系统问题却应当引起我们的重视, 为日后的农业开发提供参考依据。

关键词:滩涂围垦; 耕地; 土壤理化属性; 小麦产量; 江苏沿海

Effects of long-time cultivation on physicochemical properties of coastal saline soil and wheat production at reclamation areas of Jiangsu Province

ZHANG Meng¹, PU Lijie^{1,2,*}, WANG Xiaohan¹, WANG Qiqi¹, HAN Mingfang¹

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

Abstract: The coastal regions of the Jiangsu Province have abundant tidal flat resources. Tidal flat reclamation has supported vast land backup resources and provided land primarily for farming. Soil analyses were carried out to investigate physicochemical properties of the farmland soil and changes in wheat productions at reclaimed areas in Dongtai County over the 60-year period. The results demonstrated the following: (1) In general, during 58 years of cultivation, soil underwent desalination, dealkalization, and nutrients accumulation, soil electronic conductivity ($EC_{1:5}$) and $pH_{1:2.5}$ decreased from 5.29 dS/m and 8.76 before cultivation to 0.11 dS/m and 7.93 after that, respectively, and soil organic matter and total nitrogen increased from 2.64 g/kg and 0.15 g/kg to 13.72 g/kg and 1.12 g/kg, respectively; (2) Alkali-hydrolysable nitrogen (AH-N), available phosphorus (AP), and available potassium (AK) were strongly affected by fertilization and

基金项目: 国家自然科学基金(41230751)

收稿日期: 2015-02-06; 修订日期: 2015-06-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ljpu@nju.edu.cn

crop growth; AH-N and AP dropped after initial increase, whereas AK levels continuously decreased; (3) Soil carbon/nitrogen ratio and cation exchange capacity fluctuated sharply between 15 and 53 years of cultivation, reflecting the vulnerability of soil at this region. Studied physicochemical properties revealed that the soil at a depth of more than 20 cm was affected after 53 years of cultivation with the exception of AK; (4) With the improvement of soil environment, there were three stages in wheat production increase: high-speed increase (0—15 years), fluctuation in the production (15—53 years), and stable high production (over 53 years); wheat can reach stable production of this cultivar (Yangmai-16) after 53 years. Although heightened agricultural development greatly enhanced soil quality and wheat production, it also caused dramatic changes and fluctuations in soil environment triggering ecosystem problems; hence, the correlation between chemical fertilization and wheat production should be carefully assessed.

Key Words: tidal flat reclamation; farmland; soil physicochemical properties; wheat production; coastal region of Jiangsu Province

随着沿海地区经济的高速发展,人类对于土地的需求日益增长。作为获取土地的重要方式之一,滩涂围垦的范围和强度都在近年来快速增长^[1-2],其对缓解土地资源,尤其是耕地资源紧缺具有十分重要的意义。江苏省拥有 666km 的粉砂淤泥质海岸线,自然状态下滩涂仍可以 $13.3\text{km}^2/\text{a}$ 的速度淤涨,这为江苏省实施围垦工程提供了丰富的滩涂资源^[3-4]。合理的土壤改良措施^[5]以及长期耕种^[6]可以有效地提升滨海盐土的有机质含量,改善土壤结构,提升土壤肥力,从而增加沿海优质耕地储备量,以保障我国粮食安全和国家生态社会安全,同时以耕地占补平衡的形式填补发展过程中建设用地的巨大需求。由于近现代国外鲜有类似国内的围垦规模和形式,其研究也主要集中于垦区间百年以上大时空尺度^[6-7]或垦区内数年间小时空尺度^[8]下土壤属性的变化。出于农业开发的迫切需求,国内学者的研究在上世纪末主要集中于围垦后滨海盐土改良措施^[5,9],近年来也开始对围垦后土壤理化^[10-12]及生物属性^[13-14]的演变展开了大量研究,并从多方面对围垦后土壤质量进行了综合评价^[14-16]。研究表明,随着围垦年限的增加,脱离海水浸泡和植物生长使围垦后土壤基本遵循脱盐、脱碱以及养分积累^[17-18]和土壤颗粒细化^[11]的规律,其生物群落数量和结构都在发生剧烈变化^[19-20]。

尽管对于滩涂围垦后土壤属性和质量演变的研究已日趋成熟,但现有研究对中长期耕作时间尺度下(50a)农田生态系统的剧烈变化过程缺乏精确描绘。滩涂围垦区土壤质量演变评价的准确性与对应作物产量密切相关^[21-22],同时作为农田生态系统服务价值计算中最主要的组成部分^[23-24],其结果直接影响到对围垦开发活动经济和生态效益的衡量。在国家对于围垦区土地利用比例规定(农用地、建设用地和生态用地比例为 3:1:1)的框架下,对围垦初期土壤属性和作物产量演变的准确研究,将成为沿海生态安全评价以及政策修订的重要依据^[1]。前期的研究工作^[18,25-26]虽然在一定程度上弥补了这一领域的空白,但并未结合与之对应作物产量的研究。因此,本文基于围垦 60a 内不同围垦年限以及不同耕作年限下耕地土壤属性及小麦产量变化试验,分析了长期耕作对滨海盐土理化性质及作物产量的影响,旨在为科学判定围垦区土壤质量、滩涂围垦区耕地生产力变化以及未来滩涂围垦区农业开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文研究地点位于江苏省东台市滩涂围垦区($32^{\circ}40'00''$ — $32^{\circ}52'00''\text{N}$, $120^{\circ}45'00''$ — $120^{\circ}57'00''\text{E}$)(图 1)。东台市位于长江和黄河入海口之间,拥有丰富的泥沙沉积物来源,属于亚热带海洋性季风气候,降雨主要集中在 6—8 月,雨热同季,四季分明,年均降水量为 1051.0 mm,年均气温 14.6°C 。围垦后土地主要用于农、渔业开发,以及少量林业和工业。耕地主要种植作物有水稻、小麦、油菜、玉米和棉花,采用一年两季轮作模式。

1.2 实验设计

选取不同年代围垦的 5 个垦区,除条子泥一期垦区外,在各垦区内按照耕作起始时间不同分别设定 2 块样地,样地信息如表 1 所示,规格均为 10m×10m 长期种植冬小麦的耕地,以新围垦仍未开发的条子泥一期垦区作为对比。

1.3 样品采集

2013 年 5 月,在条子泥一期垦区以及每个样地中随机布设 5 个 1m×1m 的样方,每个样方采集 20cm 土壤表面样品,并收集小麦麦穗。同时在每个采样地以土钻采集深度为 1m 的剖面样,以 20cm 为间隔分层。所有土样带回实验室后经自然风干,过 2mm 筛后保存备用,小麦样品烘干后脱粒称重。

1.4 指标测定

土壤含盐量:电导法(1:5 土水比, Electronic Conductivity, $EC_{1:5}$);土壤 pH:pH 计法(1:2.5 土水比, $pH_{1:2.5}$);土壤有机质(Soil Organic Matter, SOM):低温外加热重铬酸钾氧化法;土壤全氮(Total Nitrogen, TN):凯氏消煮法;碱解氮(Alkali-hydrolysable Nitrogen, AH-N):碱解扩散法;速效磷(Available Phosphorus, AP):碳酸氢钠浸提钼蓝比色法;速效钾(Available Potassium, AK):1mol/L 乙酸铵浸提-火焰光度法;阳离子交换量(Cation Exchange Capacity, CEC):乙酸钠法。

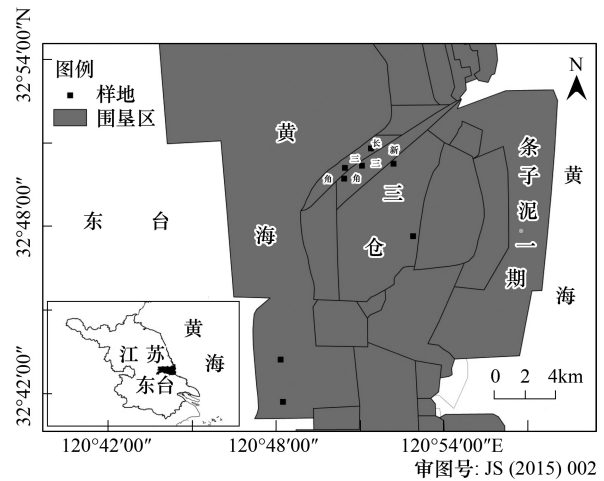


图 1 研究区域
Fig.1 Study area

表 1 采样耕地信息

Table 1 Information of sampling fields

垦区名称 Name of reclamation zones	起始围垦年限 Reclaimed year	起始耕种年限 Cultivated year	轮作方式 Crop rotation sequence
条子泥一期 Tiaozini 1st	2013	—	—
三仓 Sancang	1996	1998	水稻-小麦 Rice/Wheat
		2006	水稻-小麦 Rice/Wheat
新三角 Xinsanjiao	1982	1983	玉米-小麦 Corn/Wheat
		1990	玉米-小麦 Corn/Wheat
长三角 Changsanjiao	1972	1973	玉米-小麦 Corn/Wheat
		1978	玉米-小麦 Corn/Wheat
黄海 Huanghai	1954	1955	玉米-小麦 Corn/Wheat
		1960	玉米-小麦 Corn/Wheat

1.5 数据分析

利用 SPSS18.0 统计软件对结果进行单因素方差分析(one-way ANOVA)来比较耕作年限对各土壤理化属性以及小麦产量的影响,并利用 Duncan 法检验不同耕种年限间差异的显著性,同时以 Pearson 相关系数评价不同土壤理化属性指标与小麦产量间的相关关系。

采用表聚系数(Surface Accumulation Index, SAI)^[27]来描述各土壤理化属性剖面形态的变化,公式如下:

$$SAI = P_1 / \sum_{i=2}^i P_i \quad (i = 2, 3, 4 \cdots)$$

其中, SAI 为表聚系数, P_i 为土壤第 i 层的理化属性指标。 $SAI \leq 0.25$ 表示未聚集; $0.25 < SAI \leq 0.375$ 表示弱聚集; $0.375 < SAI \leq 0.5$ 表示中等聚集; $SAI > 0.5$ 表示强聚集。

2 结果与分析

2.1 表层土壤属性变化

2.1.1 表层土壤理化状态变化

EC_{1:5}可以综合反映土壤含盐量的大小,是沿海围垦地区重要的环境因子之一,也决定了土壤的宜耕性,并在很大程度上影响了作物产量。围垦初期,土壤含盐量极高(图2),作物无法生长。耕作7a后,土壤含盐量下降72.4%,达弱盐渍化水平;耕作15a后则可完成表土脱盐过程。土壤pH在耕种58a过程中整体呈下降趋势,由强碱性可下降至碱性水平。在最初耕种的7a间,pH并没有明显变化,仍处于8.74—8.91的高值;耕种15a后,pH值迅速下降至碱性水平,在随后38a的耕种过程中,土壤pH并没有明显下降,而是在8.04—8.33之间波动;在耕种58a后,pH可下降至7.93,达到中性水平。

SOM和TN含量总体随耕作年限的增加而呈现出上升趋势。SOM的增加分为三个阶段:耕作7a内,SOM迅速积累,由2.64g/kg上升至8.20g/kg,积累速率可以达到0.79g/kg·a;耕作10—40a,SOM处于平稳积累中,增幅仅为1.75g/kg,积累速率为0.05g/kg·a;耕作40a后至58a,SOM再次积累至13.92g/kg并达到稳定,其增幅可达0.31g/kg·a。TN的积累与SOM类似,但其起始积累阶段可持续至耕种15a以后,由0.15g/kg积累至0.92g/kg,随后至35a间发生小幅的氮素流失,流失速率为0.01g/kg·a;耕作35a以后又是氮素持续积累的过程,耕作58a可积累至1.12g/kg。

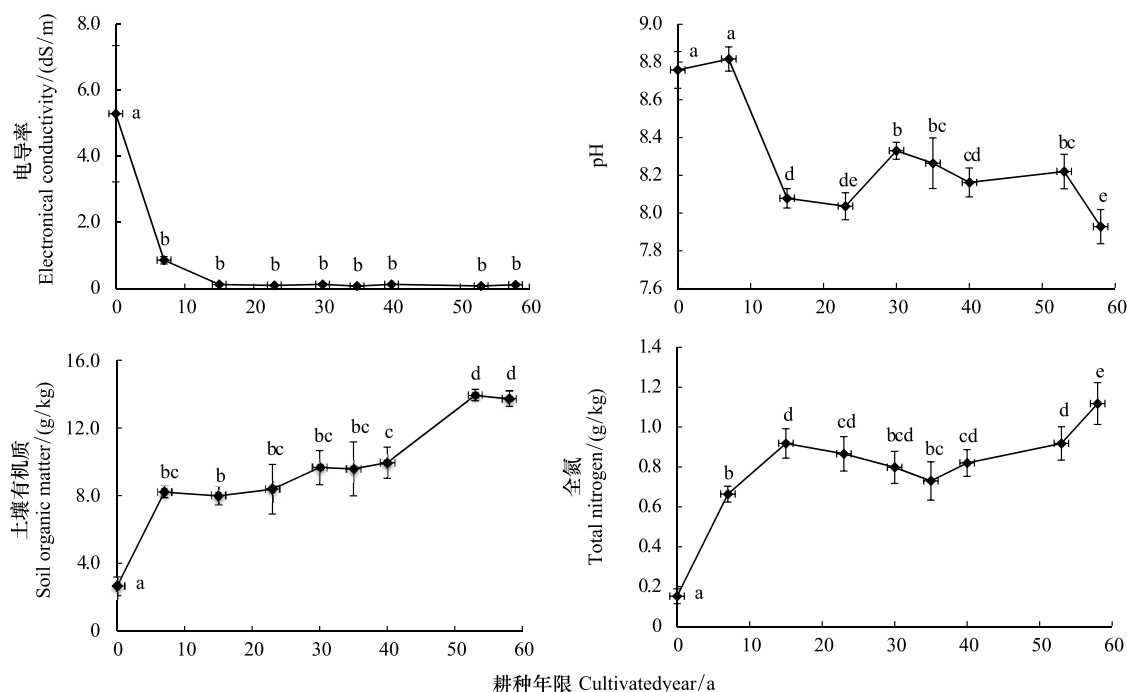


图2 耕种年限与表层土壤理化状态之间的关系

Fig.2 Relationships between cultivated year and surface soil chemical-physical states

2.1.2 表层土壤有效养分变化

由图3可见,与土壤全氮含量类似,土壤碱解氮含量也随耕作年限的增加呈现出“积累-消耗-再积累”的趋势,但积累可持续至耕种后23a,达48.39mg/kg,相较于耕种前(15.91mg/kg)提升204.15%,而35a后又下降至24.65mg/kg,仅高出耕种前54.9%。58a的耕种最终可使碱解氮含量达到48.96mg/kg。土壤有效磷含量在耕作7a间由6.38mg/kg迅速上升至45.36mg/kg,而此后则处于持续下降状态,在55a后最低仅为4.03mg/kg。土壤速效钾含量则在15a内由342.45mg/kg的高值下降至仅含66.62mg/kg,年均降幅达5.37%,此后则稳定

维持在 45.72—119.65mg/kg 的水平。

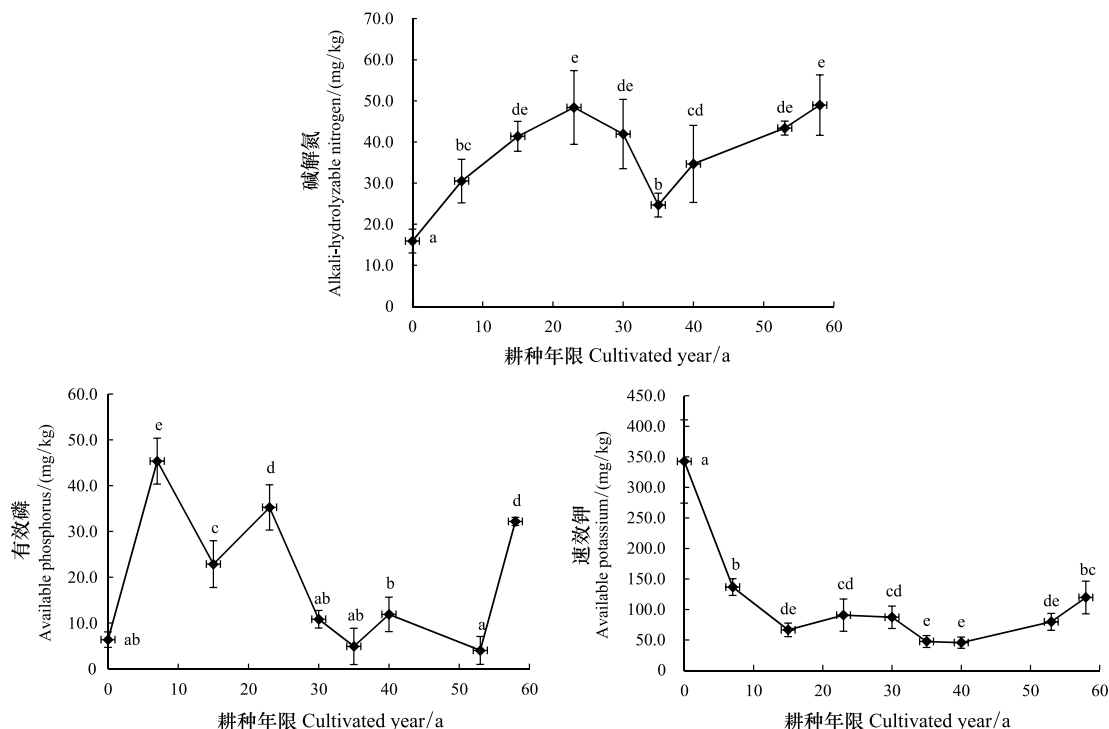


图 3 耕种年限与表层土壤有效养分之间的关系

Fig.3 Relationships between cultivated year and surface soil available nutrients

2.1.3 表层土壤环境变化

如图 4 所示,该地区的土壤碳氮比(C/N)在未耕作前可达 10.06,而在耕种后的 15a 内剧烈下降 49.8%至 5.05,此后至 35a 回升至 7.05—7.68 并达到稳定,但回升后的土壤碳氮比变化幅度较之前明显增大,由原先的 2.5%可上升至 19.2%。CEC 类似于 TN 和 AH-N 的趋势,围垦初期仅为 5.41cmol/kg,虽然在耕种 58a 间整体处于上升趋势,但在 15—35a 间由 7.70cmol/kg 持续下降至 6.15cmol/kg。

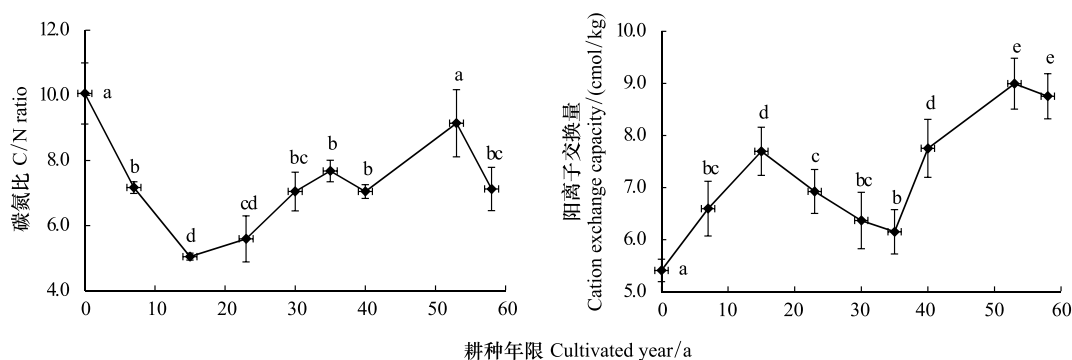


图 4 耕种年限与表层土壤环境属性之间的关系

Fig.4 Relationships between cultivated year and surface soil environment properties

2.2 土壤剖面属性变化

由图 5 可以发现,耕种初期,土壤剖面含盐量均处于较高水平,平均可达 2.28dS/m。随着耕作的进行,各层剖面盐分迅速下降,但在耕作初期,表层土壤盐分聚集程度由弱性聚集转变为中等聚集(表 2),反映了灌溉和蒸发作用对土壤盐分迁移的共同影响。而耕作 15a 后,各层土壤均完成脱盐过程,土壤盐分也不再发生表层聚集。土壤各层 pH 在 8.5—9.0 之间波动,并在耕种 40a 内并没有明显的下降趋势,在耕种 40—60a 后才

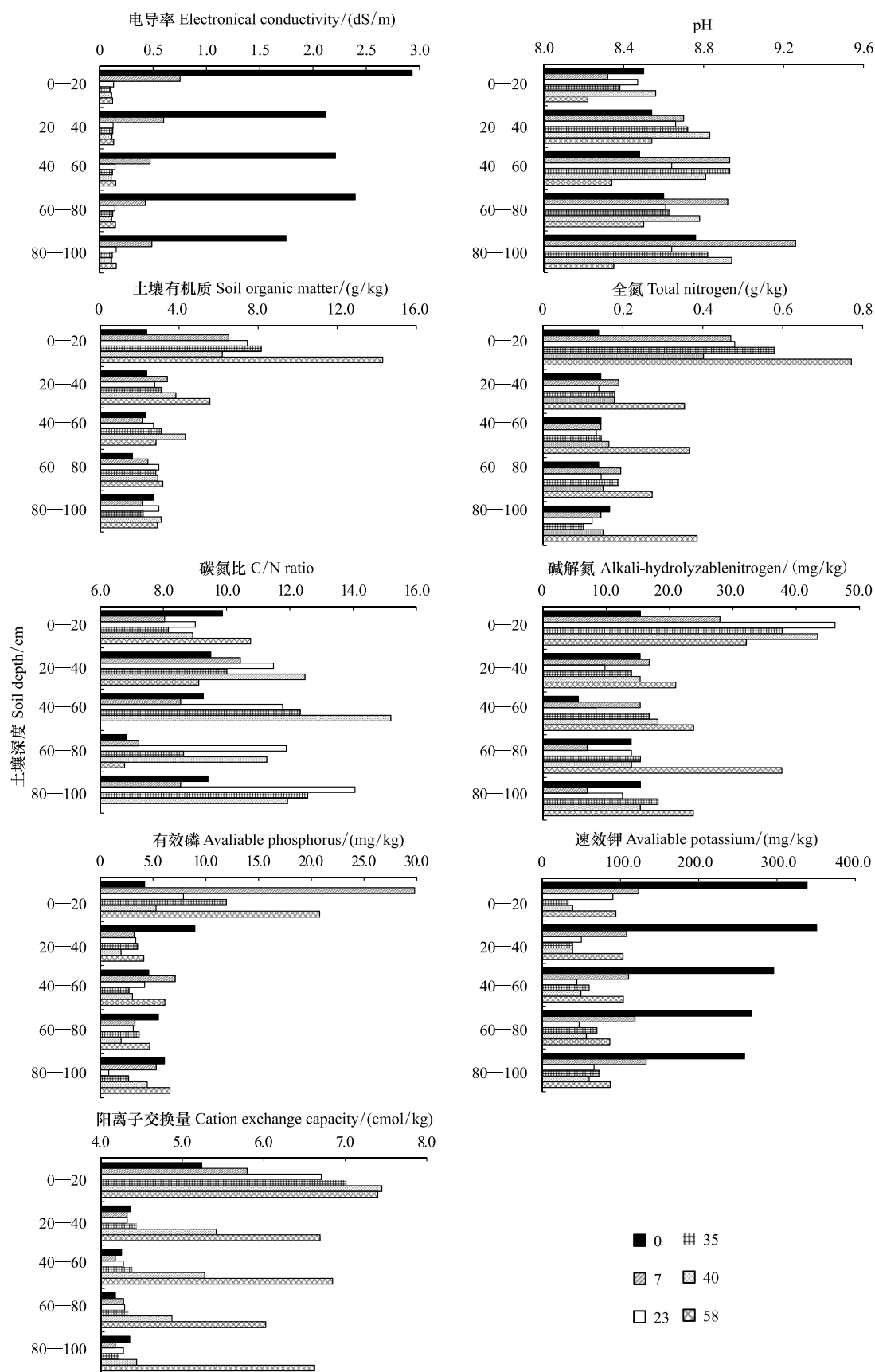


图5 不同耕种年限下0—100cm土壤属性

Fig.5 Soil properties of 0—100 cm soil in different cultivated years

有明显下降,但仍处于碱性范围。耕作过程中,pH 并没有发生表面聚集的趋势,但在耕作初期底层 pH 有所上升。

SOM 和 TN 的趋势类似,表层土壤均在耕作过程中发生明显积累。但耕种 40—60a 内,SOM 仅在 20—40cm 有所上升,而 TN 则在各层都有显著提高。随着 SOM 和 TN 在表层土壤的积累,两者的表聚系数均在耕作 5—10a 达到了强聚集水平,所不同的是,SOM 的聚集水平表现为持续升高,而 TN 的聚集水平在耕作 35a 后达到峰值(接近 1.0),随后回落至 0.6 左右。各层 C/N 波动剧烈,多数在 8.0—12.0 之间,在耕种 7a 以后,40—100cm 的中下层 C/N 有增大的趋势,最高可达 15.2。

各层土壤 AH-N、AP 在耕作前在各层面的含量比较接近,且都处于低值。AH-N 在最初开始耕作的 23a 在表面迅速积累,随后则缓慢下降,在耕作 40a 之前,AH-N 的消长主要发生在表层土壤,而 40—58a 间,则开始向深层土壤迁移,并在 60—80cm 形成较高的积累层。除表层外,AP 在各土壤层面都呈下降趋势,直到 40—60a 才有所回升;在耕种 7a 后,土壤表层 AP 含量达到最高值后大幅下降,在 40—58a 间又重新开始积累。AK 在各土壤层面都在耕种后呈下降趋势,除在 23a 后表现出中等聚集外,耕种 58a 内都没有表现出明显的表面聚集现象。CEC 水平的升高趋势主要发生在 0—20cm 的表层土壤,在耕种 35a 以后开始影响中下层土壤,至耕种 58a 后各层 CEC 平均可达 6.71cmol/kg。

表 2 不同耕种年限下土壤属性表聚系数(SAI)

Table 2 Surface accumulation index (SAI) of soil properties in different cultivated years

耕种年限/a Cultivated year	0	7	23	35	40	58
电导率 Electronic conductivity	0.35	0.38	0.23	0.21	0.25	0.20
pH	0.25	0.23	0.25	0.24	0.24	0.24
有机质 Soil organic matter	0.26	0.65	0.65	0.73	0.44	0.99
全氮 Total nitrogen	0.23	0.70	0.89	0.94	0.62	0.56
碱解氮 Alkali-hydrolysable nitrogen	0.31	0.61	1.03	0.59	0.69	0.30
有效磷 Available phosphorus	0.17	1.58	0.69	0.95	0.46	0.97
速效钾 Available potassium	0.29	0.26	0.43	0.14	0.19	0.25

2.3 小麦产量变化

如图 6 所示,小麦产量在总体随耕种年限的增加呈增长趋势。7—15a 产量增加最为迅速,由 1314kg/hm² 可增至 6638kg/hm²,年增长率可达 50.6%。耕种 15—40a 间,小麦产量缓慢提升,产量水平增长速度并不明显,甚至在 35—40a 间有小幅下降,平均产量为 6792kg/hm²。耕种 53a 后,产量可提升至 8674kg/hm²,较 15—40a 间提升 27.7%,基本与该小麦品种(杨麦 16)的理论产量接近。

2.4 小麦产量与土壤理化属性间的相关关系

在研究区域内,EC_{1:5}与 pH_{1:2.5}之间表现出极显著的正相关($r=0.59^{**}$, $n=45$),而与 SOM、TN、AH-N 和 CEC

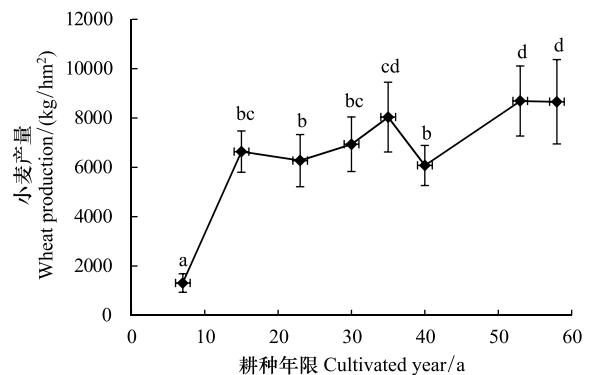


图 6 耕种年限与小麦产量之间的关系

Fig. 6 Relationship between cultivated year and wheat production

之间均呈现极显著负相关关系(表 3)。与其它土壤养分指标相反,AK 与 EC_{1:5}和 pH_{1:2.5}均呈现极显著正相关,其中与 EC_{1:5}的相关系数高达 0.94,说明该地区的 AK 主要是以土壤水中 K⁺的形式存在。C/N 与研究区土壤盐分含量和碱性水平表现出强烈极显著正相关,表明高盐高碱的土壤环境极大限制了土壤矿化速率的升高。AP 除了与 C/N 表现出极显著负相关外,仅与 AH-N 表现出显著水平正相关,而与其它土壤属性指标间并没有显著相关关系,说明滩涂围垦区的土壤有效磷素本底值低,受人类耕种行为影响很大,且很难像其它土壤养

分一样随土壤环境的改善而积累,而主要的限制因子为土壤矿化速率水平。

小麦产量与土壤盐分含量、pH 以及 AK 成极显著负相关,同时与 SOM、TN、AH-N 和 CEC 则成极显著正相关,而受 AP 和 C/N 的影响并不明显,说明土壤盐碱条件的改善和有机质、氮素的积累以及离子交换活性的提高可以显著促进滩涂围垦区小麦产量,但磷素仅能通过施肥供应,土壤本地含量极低,收施肥作用影响很大,且主要被作物吸收,很难在土壤中积累。

表 3 滩涂围垦区土壤理化属性指标与小麦产量间的相关关系

Table 3 Correlations between physical-chemical property indexes and wheat production at tidal flat reclamation areas

指标 Index	pH	电导率 Electronic conductivity	有机质 Soil organic matter	全氮 Total nitrogen	碱解氮 Alkali- hydrolysable nitrogen	有效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium	小麦产量 Wheat production	碳氮比 C/N ratio	阳离子 交换量 CEC
pH	1									
电导率 Electronic conductivity	0.59 **	1								
有机质 Soil organic matter	-0.60 **	-0.68 **	1							
全氮 Total nitrogen	-0.78 **	-0.79 **	0.80 **	1						
碱解氮 Alkali-hydrolysable nitrogen	-0.68 **	-0.59 **	0.62 **	0.76 **	1					
有效磷 Available phosphorus	-0.01	-0.20	0.05	0.28	0.34 *	1				
速效钾 Available potassium	0.57 **	0.94 **	-0.50 **	-0.71 **	-0.47 **	-0.02	1			
小麦产量 Wheat production	-0.80 **	-0.70 **	0.71 **	0.74 **	0.57 **	-0.22	-0.73 **	1		
碳氮比 C/N ratio	0.44 **	0.50 **	0.00	-0.57 **	-0.44 **	-0.44 **	0.51 **	-0.27	1	
阳离子交换量 Cation exchange capacity	-0.59 **	-0.50 **	0.75 **	0.72 **	0.70 **	0.10	-0.42 **	0.57 **	-0.13	1

** 表示 $P < 0.01$ 水平显著相关; * 表示 $P < 0.05$ 水平显著相关; $n = 45$

3 讨论

由于成土母质来源于海相沉积物,长期海水的浸泡使高土壤含盐量和高含碱量成为限制沿海地区土壤耕种最重要的两大限制性因素^[28]。相比较我国内陆盐渍化地区的土壤脱盐的过程^[27],江苏沿海滩涂围垦区具有更大的自然优势,即超过 1000mm 的年均降水量^[29],这也是保证在合理的耕种措施下耕地土壤得以在 10a 左右就迅速完成脱盐的重要原因。滨海潮盐土脱碱过程却远比脱盐过程要复杂,碱化度下降会滞后于脱盐过程,土壤溶液在脱盐过程中由 Na-Cl 型向 Ca-HCO₃型转变^[9]。该地区土壤碱性的成因存在不同见解^[30],土壤脱盐过程带走了大量盐分离子,但却对 pH 的影响较小^[31],石灰性土壤的碱性受 CO₃²⁻-HCO₃⁻-Ca²⁺平衡体系控制^[32],三者间的此消彼长使该地区土壤在脱盐过程中以及之后,土壤碱性仍可能长期处于较高水平,易于反复^[33],成为脱盐后期继续限制土壤质量提高和作物产量的因素。

秸秆还田等改良措施可以有效地促进耕地土壤有机质的积累,为该地区土壤质量整体提高奠定了基础。但自然滩涂是氮、磷养分匮乏的地区^[34],因此在围垦后短期内获得粮食收益,高强度的化肥施用就成为必然。这虽然有效提高了土壤氮素积累的速率,但同时也导致了土壤 C/N 的下降。随着土壤盐碱胁迫的弱化,土壤微生物活性也逐渐增加^[35],在氮素供应充足的条件下,土壤微生物会消耗更多有机碳以维持其活性,以至于低 C/N 会加速有机质的矿化速率^[36],可能导致土壤质量整体退化。各速效养分和 CEC 在近 60a 的耕种过程中均存在不同程度的波动,可见土壤仍处于相对脆弱的状态,受人类耕种方式和区域差异影响很大。因此在土壤改良过程中,合理调控化肥使用量,在提高有机质和氮素积累的同时,将农田土壤 C/N 控制在合理

范围也是围垦地区农田值得注意的问题之一。

在耕种初期的 10a 内,土壤环境的改善和大量氮肥的施用的确显著提高了小麦产量,但是随后 15—40a 时间内,相同的氮肥施用并没有使小麦产量相应提高。该地区施用氮肥以尿素(NH_4OH)为主,高 pH 的土壤环境也使氮肥易于变成 NH_3 挥发^[37],伴随着耕种初期较高的土壤侵蚀速率^[38],氮肥的流失量是不可忽视的,极有可能对周边水体造成严重的面源污染。相比氮肥,磷肥在 15—55a 间的施用量存在不足。在最初的 7a 间,因为作物无法正常生长使得施用的磷肥未得到充分利用,AP 在土壤中大量残留;但随着作物生长趋于正常,速效磷的需求量相应增加,在土壤流失的共通作用下,速效磷含量呈持续下降状态。在耕种 55a 以后,由于深层土壤通气质量改善,各土壤速效开始向深层迁移,这也会成为长期耕种后土壤养分流失的新途径。滨海地区土壤属性的改良往往在短期内很难取得显著性效果^[39],因此更加需要结合土壤环境和作物产量的变化,调整化肥使用量,以避免在土壤改良过程中造成新的环境问题。

4 结论

江苏沿海围垦耕地在耕种后在 58a 的耕种过程中,耕地土壤整体表现出脱盐、脱碱和养分积累的的趋势。 $\text{EC}_{1:5}$ 、 $\text{pH}_{1:2.5}$ 由耕种前的 5.29dS/m 和 8.76 下降至 0.11dS/m 和 7.93, SOM 和 TN 则由 2.64g/kg 和 0.15g/kg 上升至 13.72g/kg 和 1.12g/kg。

土壤 AH-N、AP 和 AK 受施肥和作物生长影响强烈,除 AK 持续流失外,AH-N 和 AP 均表现出先增长后减少的趋势。土壤 C/N 和 CEC 在耕种 15—53a 经历了剧烈波动,反应出此期间该地区土壤的脆弱性,除 AK 外,各土壤理化指标均在耕种 53a 后开始影响 20cm 以下的深层土壤。

随着土壤环境的改善,小麦产量的上升经历了快速增产(0—15a)、波动中产(15—53a)和稳定高产(53a 以上)三个阶段,在耕种 53a 后可达到该品种小麦正常产量。

参考文献(References):

- [1] 李加林,杨晓平,童亿勤. 潮滩围垦对海岸环境的影响研究进展. 地理科学进展, 2007, 26(2): 43-51.
- [2] 欧维新,杨桂山,李恒鹏,于兴修. 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.
- [3] 江苏省农业资源开发局. 江苏沿海垦区. 北京: 海洋出版社, 1999.
- [4] 任美镔. 江苏省海岸带和海涂资源综合调查报告. 北京: 海洋出版社, 1986.
- [5] 姚艳平,叶玫. 如东沿海滩涂土壤形成与垦区土壤改良. 土壤, 1996, 28(6): 316-318.
- [6] 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.
- [7] Fernández S, Santín C, Marquinez J, Álvarez M A. Saltmarsh soil evolution after land reclamation in Atlantic estuaries (Bay of Biscay, North coast of Spain). Geomorphology, 2010, 114(4): 497-507.
- [8] Hubbard R K, Strickland T C, Phatak S. Effects of cover crop systems on soil physical properties and carbon/nitrogen relationships in the coastal plain of southeastern USA. Soil and Tillage Research, 2013, 126: 276-283.
- [9] 陈邦本,丁克冲,陈效民,陈铭达. 如东棉花原种场滨海盐渍土盐渍性状变化的特点. 南京农业大学学报, 1989, 12(3): 52-56.
- [10] Shi Z, Li Y, Wang R C, Makeschine F. Assessment of temporal and spatial variability of soil salinity in a coastal saline field. Environmental Geology, 2005, 48(2): 171-178.
- [11] 周学峰,赵睿,李媛媛,陈小勇. 围垦后不同土地利用方式对长江口滩地土壤粒径分布的影响. 生态学报, 2009, 29(10): 5544-5551.
- [12] Cui J, Liu C, Li Z L, Wang L, Chen X F, Ye Z Z, Fang C M. 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.
- [13] 毛志刚,谷孝鸿,刘金娥,任丽娟,王国祥. 盐城海滨盐沼湿地及围垦农田的土壤质量演变. 应用生态学报, 2010, 21(8): 1986-1992.
- [14] 刘琛,丁能飞,郭彬,林义成,李华,李凝玉,傅庆林. 不同土地利用方式下围垦海涂微生物群落和土壤酶特征. 土壤通报, 2012, 43(6): 1415-1421.
- [15] 姚荣江,杨劲松,陈小兵,余世鹏,李晓明. 苏北海涂围垦区土壤质量模糊综合评价. 中国农业科学, 2009, 42(6): 2019-2027.
- [16] Meng Q F, Yang J S, Yao R J, Liu G M. Soil quality in east coastal region of China as related to different land use types. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(4): 664-676.

- [17] Iost S, Landgraf D, Makeschin F. Chemical soil properties of reclaimed marsh soil from Zhejiang Province P. R. China. *Geoderma*, 2007, 142(3/4): 245-250.
- [18] 张晶, 濮励杰, 朱明, 许艳. 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.
- [19] Wu J H, Fu C Z, Chen S S, Chen J K. Soil faunal response to land use: effect of estuarine tideland reclamation on nematode communities. *Applied Soil Ecology*, 2002, 21(2): 131-147.
- [20] 林黎, 崔军, 陈学萍, 方长明. 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.
- [21] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 朱永官. 土壤质量与土壤质量指标及其评价. *生态学报*, 2006, 26(3): 901-913.
- [22] 陈美军, 段增强, 林先贵. 中国土壤质量标准研究现状及展望. *土壤学报*, 2011, 48(5): 1059-1071.
- [23] Zhao B, Kreuter U, Li B, Ma Z J, Chen J K, Nakagoshi N. An ecosystem service value assessment of land-use change on Chongming Island, China. *Land Use Policy*, 2004, 21(2): 139-148.
- [24] 夏涛, 陈尚, 张涛, 王敏. 江苏近海生态系统服务价值评估. *生态学报*, 2014, 34(17): 5069-5076.
- [25] 李鹏, 濮励杰, 朱明, 许艳, 谢天, 张润森, 张晶, 孙与杰. 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.
- [26] Xu Y, Pu L, Zhu M, Li J G, Zhang M, Li P, Zhang J. Spatial Variation of Soil Salinity in the Coastal Reclamation Area, Eastern China. *Journal of Coastal Research*, 2013, 30(2): 411-417.
- [27] 李宝富, 熊黑钢, 张建兵, 龙桃. 不同耕种时间下土壤剖面盐分动态变化规律及其影响因素研究. *土壤学报*, 2010, 47(3): 429-438.
- [28] 牛东玲, 王启基. 盐碱地治理研究进展. *土壤通报*, 2002, 33(6): 449-455.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 赵秀芳, 杨劲松, 姚荣江. 基于典范对应分析的苏北滩涂土壤春季盐渍化特征研究. *土壤学报*, 2010, 47(3): 422-428.
- [32] Wild A, Talibudeen O, Mott C J B, Burchill S, Hayes M H B, Grennland D J, Rowell D L, Bloomfield C, Jenkinson D S, Cooke G W, Jones L H P, Jarvis S C, Graham-Bryce I G. *The Chemistry of Soil Processes*. New York: John Wiley & Sons Ltd, 1981.
- [33] 陈巍, 陈邦本, 沈其荣. 滨海盐土脱盐过程中 pH 变化及碱化问题研究. *土壤学报*, 2000, 37(4): 521-528.
- [34] 吴明, 邵学新, 胡锋, 蒋科毅. 围垦对杭州湾南岸滨海湿地土壤养分分布的影响. *土壤*, 2008, 40(5): 760-764.
- [35] 路海玲, 孟亚利, 周玲玲, 张国伟, 张雷, 周治国. 盐胁迫对棉田土壤微生物量和土壤养分的影响. *水土保持学报*, 2011, 25(1): 197-201.
- [36] Springob G, Kirchmann H. Bulk soil C to N ratio as a simple measure of net N mineralization from stabilized soil organic matter in sandy arable soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(4): 629-632.
- [37] Guo L B, R M Gifford. Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8(4): 345-360.
- [38] Elbasiouny H, Abowaly M, Abu-Alkheir A, Gad A A. Spatial variation of soil carbon and nitrogen pools by using ordinary Kriging method in an area of north Nile Delta, Egypt. *CATENA*, 2014, 113: 70-78.
- [39] 单奇华, 张建锋, 阮伟建, 唐华军, 沈立铭, 陈光才. 滨海盐碱地土壤质量指标对生态改良的响应. *生态学报*, 2011, 31(20): 6072-6079.