

苏北海涂围垦区土壤质量模糊综合评价

姚荣江¹, 杨劲松¹, 陈小兵², 余世鹏¹, 李晓明¹

(¹中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; ²中国科学院烟台海岸带可持续发展研究所, 山东烟台 264003)

摘要:【目的】系统掌握苏北海涂围垦区的土壤质量现状及其空间分布特征, 获取实现土壤培肥抑盐与质量提升的调控措施。【方法】采用模糊综合评价与 GIS 相结合的方法, 对土壤质量进行模糊综合评价与分级, 获取区域土壤质量综合评价分级图。【结果】研究区土壤质量状况总体较低, 土壤有机质和氮素亏缺较为严重, 尤其是碱解氮; 除容重为弱变异强度外, 其余各评价指标均呈中等变异强度; 有机质是重要的土壤质量评价因子, 土壤盐分和地下水矿化度是土壤质量的主要限制因子。研究区不同部位土壤质量状况具有明显差异性, 其空间分布规律与有机质较为相似, 与土壤盐分相反, 总体上棉花种植区的土壤质量状况要优于水稻种植区; 研究区土壤质量中等的区域面积最大, 其次是低质量区, 高质量区面积最小。【结论】土壤质量分级图可用于研究区中低产地改造、盐碱地综合治理和合理施肥, 土壤质量较低区域应完善田间排灌设施, 质量中等区域宜加强农业生物改良。

关键词: 苏北; 围垦区; 土壤质量; 模糊综合评价

Fuzzy Synthetic Evaluation of Soil Quality in Coastal Reclamation Region of North Jiangsu Province

YAO Rong-jiang¹, YANG Jing-song¹, CHEN Xiao-bing², YU Shi-peng¹, LI Xiao-ming¹

(¹Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008; ²Yantai Institute of Coastal Zone Research for Sustainable Development, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong)

Abstract: 【Objective】 This study was to systematically comprehend soil quality status and its spatial pattern in coastal saline reclamation region of north Jiangsu Province, and acquire management measures to improve soil fertility and quality and restrain soil salinity. 【Method】 With the application of fuzzy synthetic evaluation method and GIS technology, fuzzy synthetic evaluation and classification of regional soil quality was conducted, and spatial patterns of synthetic evaluation results of regional soil quality was obtained to provide a theoretical reference to scientific amelioration and field management of moderate-and-low-yield farmlands. 【Result】 The results indicated that soil quality status across the study area was generally low, soil organic matter (SOM) and N nutrient was in severe deficiency, and it is particularly the case for available N. Soil bulk density showed week variation and other evaluation indices all exhibited moderate variation. SOM was the most important evaluation factor of soil quality, while soil salinity and groundwater mineralization were limiting factors of soil quality. Soil quality status differed significantly at different parts of the study area, and the spatial pattern of soil quality was similar to that of SOM, while it was opposite to that of salinity. Soil quality in the cotton-growing field was superior to that in the rice-growing field generally. The area of moderate soil quality was the most in the study area, followed by that of low soil quality, and the area of high soil quality was the least. 【Conclusion】 The soil quality map can be used for the improvement of moderate-and-low-yield farmlands, comprehensive treatment and rational fertilization of saline-alkali soil in our study area. The field irrigation and drainage installations should be improved in the area of low soil quality, while agro-biological treatments should be employed in the area of moderate soil quality.

Key words: north Jiangsu Province; reclamation region; soil quality; fuzzy synthetic evaluation

收稿日期: 2008-07-17; 接受日期: 2008-12-16

基金项目: 国家“863”计划重点项目课题(2007AA091702、2006AA10A301)、国家科技支撑计划(2006BAD05B02)、中国科学院南京土壤研究所创新领域前沿项目(0752010022)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-406-3)

作者简介: 姚荣江(1980—), 男, 江苏靖江人, 助理研究员, 博士, 研究方向为盐渍化防控与盐渍土资源利用。Tel: 025-86881109; E-mail: rjyao@issas.ac.cn。通信作者杨劲松(1959—), 男, 江苏人, 研究员, 博士, 博士生导师, 研究方向领域为土壤和水资源利用与管理。Tel: 025-86881222, E-mail: jsyang@issas.ac.cn

0 引言

【研究意义】苏北地区海涂资源十分丰富, 拥有占全国 1/4 以上的滩涂面积, 是非常重要的后备土地资源^[1-2]。苏北海涂土壤资源的围垦开发利用历史悠久, 已取得了巨大社会效益和经济效益。目前看来, 土壤质量偏低依然是制约苏北海涂开发利用的主要障碍因子。因此, 开展土壤质量调查与评估研究对高效利用滩涂资源、提高土壤生产力具有重要意义。【前人研究进展】20 世纪 70 年代初, 土壤质量逐步成为国际土壤学研究热点, 国内外已在土壤质量评价指标体系和评价方法方面开展了大量的研究工作^[3-7]。由于土壤质量受土壤侵蚀、生物多样性、耕作方式与种植制度以及施肥与农药等因素的影响, 其评价指标的选定是土壤质量评价的核心工作, 直接关系到评价结果的客观性^[8-9]。目前, 土壤质量指标主要包括物理、化学、生物和环境 4 大类 20 多个指标。在评价方法上, 经常使用的有评分法、分等定级法^[10]、综合指数法^[11-12]、灰色关联法^[13]、模糊评判法^[14]和聚类分析法^[15]。同时, 随着近年来地理信息系统 (GIS) 技术和地统计学理论的发展, 各种克立格方法、多变量指示克立格法 (MVIK)、土壤质量动力学法等已被国内外诸多学者用于土壤质量时空动态研究中, 且土壤质量评价正逐渐向自动化方向发展^[16-18]。【本研究切入点】针对海涂围垦区土壤生产力亟待提高的现状, 本研究以苏北海涂围垦区为研究区域, 以与作物生长密切相关的理化性质为评价指标, 将 GIS 与模糊数学方法相结合, 阐明了土壤质量评价过程与方法, 并对区域土壤质量状况进行综合评价与分级。【拟解决的关键问题】旨在系统掌握该围垦区土壤质量现状及其空间分布特征, 获取实现合理作物布局、土壤培肥抑盐以及质量提升的优化调控措施, 为海涂区中、低产地的改造、障碍土壤的科学管理与合理施肥提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域为江苏省大丰市金海农场, 地理位置为 32°59'30"~33°0'31"N、120°49'40"~120°51'4"E, 总面积 167 hm², 东距黄海约 4 km, 西临大丰麋鹿国家级自然保护区, 于 1999 年进行围垦。该区地处北亚热带季风气候区, 具有明显的过渡性海洋性和季风性, 四季分明, 降水量主要集中在 6~8 月份。由于当地缺乏

蓄水工程, 雨季水量丰富但不能调蓄, 非雨季淡水资源紧缺, 农田灌溉一般采用当地微咸水。研究区域东部的种植制度主要为水稻-小麦轮作, 西部则是棉花-大麦的一年两熟制, 当季主要种植棉花和水稻。从图 1 显示的研究区域来看, 受种植模式的影响, 研究区东部水稻种植区的排渠密度 (平均间距约 50 m) 明显大于西部棉花种植区 (平均间距约 100 m)。土壤肥力低下与盐渍化是制约该区域农业生产发展的重要障碍因子。

1.2 样品采集与分析

在研究区范围内布设采样点, 采样点位置与数量的确定综合考虑当地土质、植被类型、种植制度等因素, 共选取 60 个代表性样点, 其中水稻地 25 个, 棉花地 29 个, 盐蒿、杂草地 6 个, 各采样点空间位置如图 1 所示。每个样点均对 0~20 cm 耕作层进行采样, 为保证样品的代表性, 各样点均在中心点和相邻的 3 个角采集土样, 并混合组成待测样品, 共计采集 60 个混合土样。待样品采集完成后, 在中心点位置对每个样点进行剖面挖掘, 由于滨海滩涂区地下水埋深较浅, 每个剖面都挖到地下水流出, 待水位稳定后测量地下水埋深并采集地下水样品, 同时进行表土层容重测量的环刀采样。考虑到表层 0~5 cm 土壤较易受外界扰动, 本研究以 5~10 cm 深度土壤容重作为表土层容重。各采样点的相对坐标采用差分 GPS 定位技术确定, 样品采集于 2007 年 10 月下旬进行, 水稻已收割完毕, 正处于棉铃吐絮期的晚期 (拔秆期)。

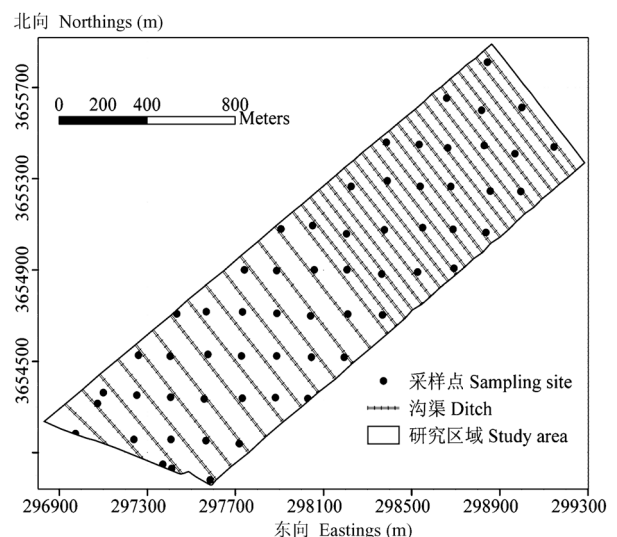


图 1 采样点位置空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution plot of sampling sites

室内分析测试项目包括有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾、土壤盐分和地下水矿化度。土壤有机质测定采用重铬酸钾稀释热法; 全氮测定采用半微量凯氏法; 碱解氮测定采用碱解扩散法; 速效磷测定采用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法; 速效钾测定采用 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 中性醋酸铵浸提—火焰光度法。土壤盐分和地下水矿化度测定采用常规分析法^[19]。

2 结果与分析

2.1 评价指标统计特征分析

从表 1 列出的各土壤质量指标的统计特征值来看, 研究区域不同部位土壤质量状况差异较大。从平均值来看, 有机质、全氮和碱解氮分别为 $10.90 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.60 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $43.91 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效磷和速效钾分别为 $13.72 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $191.69 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 按全国第二次土壤

普查的土壤养分分级标准^[20], 研究区有机质含量总体适量, 全氮和碱解氮贫乏, 速效磷和速效钾较丰富。此外, 土壤含盐量均值为 $2.22 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 已达到中度盐化土标准。土壤容重均值亦较大(肥沃的耕层土壤容重一般在 $1.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 左右), 达 $1.37 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 说明该区域土壤呈现一定的紧实趋势。地下水矿化度和埋深的均值分别为 $9.18 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 1.24 m , 矿化度较高且埋深较浅, 这也是滨海滩涂区较为显著的地下水特征。各指标的变异系数为 $5.83\% \sim 58.21\%$, 其中容重变异系数最小, 地下水矿化度变异系数最大, 其余各指标均呈中等变异强度。总体上, 研究区域土壤质量状况不容乐观, 就肥力而言, 研究区土壤有机质和氮素亏缺较为严重, 尤其是碱解氮, 因而应加强土壤培肥以提高有机质含量, 并针对作物需要及时补充氮素养分。

表 1 土壤质量评价指标的统计特征值 ($n=60$)

Table 1 Statistical feature values of soil quality evaluation indices ($n=60$)

土壤指标 Soil indices	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	中位值 Median	标准差 St. d.	变异系数 CV(%)	合理取样数 Rational samples	
							$P_L=95\%$	$P_L=90\%$
SOM ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	4.44	19.46	10.90	10.56	3.34	30.67	39	28
TN ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	0.34	1.09	0.60	0.59	0.18	30.18	38	27
AN ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	21.28	88.41	43.91	42.57	12.89	29.36	36	26
AP ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	8.10	22.96	13.72	13.07	3.17	23.14	23	17
AK ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	115.49	300.06	191.69	188.35	44.65	23.29	24	17
S_t ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	0.65	6.86	2.22	2.06	1.17	52.82	110	78
BD ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.17	1.56	1.37	1.36	0.08	5.83	4	3
GM ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	1.57	29.90	9.18	7.44	5.34	58.21	131	94
GD (m)	0.50	1.65	1.24	1.30	0.24	19.33	17	12

SOM 表土壤有机质, TN 表示全氮, AN 表示碱解氮, AP 表示速效磷, AK 表示速效钾, S_t 表示全盐含量, BD 表示容重, GM 表示地下水矿化度, GD 表示地下水埋深。下同

SOM means soil organic matter, TN means total nitrogen, AN means available nitrogen, AP means available phosphorus, AK means available potassium, S_t means total salt content, BD means bulk density, GM means groundwater mineralization, GD means groundwater depth. The same as below

在实际田间取样中, 若取样数目太少不足以反映真实的变异状况, 取样数目太多, 势必浪费大量的人力和物力, 因此确定合理的取样数目是十分必要的。在精度水平为 90% 的情况下, 采用 Cochran 纯随机采样理论公式^[21]分别计算了两个置信水平下各评价指标的合理取样数目(表 1)。在置信水平为 $P_L=95\%$ 的情况下, 取样数目最多的地下水矿化度为 131 个, 其次是土壤盐分为 110 个, 其余指标的取样数目为 4~39 个; 在置信水平为 $P_L=90\%$ 的情况下, 取样数目最多的地下水矿化度为 94 个, 其次是土壤盐分为 78 个,

其余指标的取样数目范围为 3~28 个。由表 1 可知, 土壤盐分和地下水矿化度并不满足当前条件下的合理取样数量要求, 但已达到 80% 置信水平 10% 相对误差条件下的合理取样数(分别为 48 和 57); 其余各指标均已满足合理取样数的要求, 可以适当减少部分取样点。

各评价指标间 Pearson 相关系数列于表 2。有机质与全氮、碱解氮、速效磷的相关系数分别为 0.529、0.411 和 0.312, 均达到 5% 的显著水平 ($n=60$, $r_{0.05}=0.250$), 其中与全氮、碱解氮的相关系数达到

1%的极显著水平 ($n=60$, $r_{0.01}=0.325$)；此外, 有机质与土壤盐分、容重均呈显著负相关性, 且与地下水矿化度的负相关性达到极显著水平, 这表明有机质是重要的土壤质量评价因子。土壤盐分和地下水矿化度均与有机质呈显著负相关性, 与速效钾呈极显著相关

性, 说明土壤盐分与地下水矿化度是土壤质量的主要限制因子。土壤盐分与地下水矿化度相关性亦极显著, 事实上, 滨海滩涂地区的浅地下水埋深与高地下水矿化度导致地下水中可溶性盐分与土壤盐分存在着关联性, 因此可以认为地下水矿化度主要通过影响土壤盐

表 2 各评价指标间的 Pearson 相关系数矩阵 ($n=60$)

Table 2 Pearson correlation matrix of soil evaluation indices ($n=60$)

土壤指标 Soil indices	SOM (g·kg ⁻¹)	TN (g·kg ⁻¹)	AN (mg·kg ⁻¹)	AP (mg·kg ⁻¹)	AK (mg·kg ⁻¹)	S _t (g·kg ⁻¹)	BD (g·cm ⁻³)	GM (g·L ⁻¹)	GD (m)
SOM (g·kg ⁻¹)	1								
TN (g·kg ⁻¹)	0.529**	1							
AN (mg·kg ⁻¹)	0.411**	0.091	1						
AP (mg·kg ⁻¹)	0.312*	0.150	0.193	1					
AK (mg·kg ⁻¹)	-0.167	-0.204	0.053	0.137	1				
S _t (g·kg ⁻¹)	-0.281*	-0.340**	-0.093	0.036	0.707**	1			
BD (g·cm ⁻³)	-0.255*	-0.020	-0.153	-0.185	0.079	-0.006	1		
GM (g·L ⁻¹)	-0.500**	-0.224	-0.128	-0.044	0.536**	0.706**	0.063	1	
GD (m)	-0.171	-0.277*	0.061	0.010	-0.110	-0.118	-0.014	-0.074	1

*显著性水平 $P<0.05$, **显著性水平 $P<0.01$

* means significance at the 5% level, ** means significance at the 1% level

分进而影响土壤质量。

2.2 评价过程与方法

2.2.1 隶属函数的确定 土壤质量评价因素的等级指标采用模糊线性隶属函数来确定。首先建立各评价指标的隶属函数, 计算其隶属度值 $f(x)$, 以此来表示各项土壤指标的状态值。根据前人研究经验, 综合考虑作物效应和滨海滩涂地区实际情况, 本研究采用 2 种方法确定各指标的隶属函数。

(1) 戒上型隶属函数, 即在一定范围内, 评价指标的增长与作物生长成正相关, 而低于或超过这个范围, 指标变化对土壤的生产力影响很小。属于这种类型的评价指标包括有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾和地下水埋深。其隶属函数的解析式为:

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & x < a_1 \\ 0.9(x - a_1) / (a_2 - a_1) + 0.1 & a_1 \leq x < a_2 \\ 1.0 & x \geq a_2 \end{cases}$$

(2) 戒下型隶属函数, 属于这类函数的评价指标包括土壤含盐量、容重和地下水矿化度。事实上, 该类指标对作物生长均有一个最佳范围, 在此范围之外, 偏离程度越大, 对作物的影响越不利, 这类指标实际与作物生长呈抛物线关系, 往往需要先确定最佳适宜

区间, 并对该区间以外的按差值比例递减。由于滨海滩涂区域土壤盐分和地下水矿化度较高、土壤结构性较差, 一般已超过最佳阈值, 因而采用戒下型隶属函数, 其函数为:

$$f(x) = \begin{cases} 1.0 & x < a_1 \\ 0.9(a_2 - x) / (a_2 - a_1) + 0.1 & a_1 \leq x < a_2 \\ 0.1 & x \geq a_2 \end{cases}$$

若根据上述隶属函数确定隶属度值, 须先确定各评价指标的转折点 a_1 、 a_2 。结合已有相关文献和滨海滩涂地区种植制度、作物生长的实际情况^[22-23], 分别确定这 2 种隶属函数中转折点的相应取值, 其中养分指标参考全国第二次土壤普查的分级标准, 结果列于表 3。

2.2.2 权重的确定 评价指标在土壤质量水平总体构成中的作用大小或者重要性, 须根据各个指标对土壤质量实际贡献率的大小来确定权重, 以保证评价精度和评价结果的准确性。在以往的研究中, 确定评价指标权重时常采用相关分析法、主成分分析法和熵值法, 本研究采用主成分分析法确定权重。主成分分析法把人的主观判断用数量方式表达和处理, 实现了定性分析和定量分析相结合, 解决了评价模型中确定权

表 3 隶属函数曲线中各评价指标转折点的取值

Table 3 Values of turning point of each evaluation index in membership functions

转折点 Turning point	SOM (g·kg ⁻¹)	TN (g·kg ⁻¹)	AN (mg·kg ⁻¹)	AP (mg·kg ⁻¹)	AK (mg·kg ⁻¹)	S _t (g·kg ⁻¹)	BD (g·cm ⁻³)	GM (g·L ⁻¹)	GD (m)
a ₁	8	0.65	50	4	40	1.5	1.25	3	0.8
a ₂	35	1.75	135	30	175	4	1.45	8	1.5

重的问题。它要求首先求出各个评价指标主成分的特征值和贡献率, 然后计算相应的载荷矩阵, 并求出各项指标的公因子方差, 方差的大小表示该项指标对总

体变异的贡献, 由此可以得出各项指标的权重, 结果如表 4 所示。

2.2.3 综合指标值的计算 土壤质量等级是根据各

表 4 各评价指标主成分分析结果及其权重

Table 4 Principal components analysis results and weighing values of soil evaluation indices

主成分 Principal component	评价指标 Evaluation index	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution (%)	累计贡献率 Cumulative contribution (%)	公因子方差 Extraction	权重 Weighing value
1	SOM	2.810	31.224	31.224	0.790	0.136
2	TN	1.726	19.183	50.408	0.687	0.119
3	AN	1.256	13.951	64.358	0.484	0.084
4	AP	0.896	9.956	74.315	0.463	0.080
5	AK	0.800	8.893	83.207	0.742	0.128
6	S _t	0.584	6.485	89.692	0.839	0.145
7	BD	0.483	5.363	95.055	0.340	0.059
8	GM	0.292	3.244	98.299	0.731	0.126
9	GD	0.153	1.701	100.000	0.716	0.124

指标综合评价来确定的。综合指标值 (*IFI*) 的计算采用指数和法, 即根据各指标的隶属度值和权重, 计算土壤质量的综合指标值, 其计算公式为:

$$IFI = \sum_{i=1}^n f_i \times w_i$$

式中: n 表示所有参评指标个数; f_i 和 w_i 分别表示第 i 种参评指标的隶属度值和权重。评价综合指标值构成了总的土壤质量水平得分值, 它综合反映了该单元的土壤质量状况, 是进行土壤质量等级划分的依据。综合考虑滨海滩涂地区土壤质量现状以及田间作物生长状况, 并参考相关文献[24-26]所反映的分等定级方法提出该地区土壤质量分级参考标准: $IFI \geq 0.6$ 、 $0.4 \leq IFI < 0.6$ 和 $IFI < 0.4$ 分别为高、中、低三级土壤。

2.3 土壤质量综合评价

为对研究区域的土壤质量状况进行综合评价, 本研究应用反距离权重法 (IDW, 邻 12 点数据) 对各土壤质量评价指标进行空间插值, 形成各评价指标的空间分布图, 结果如图 2 所示。

参照综合评价的方法与步骤, 结合表 3 列出的隶

属函数转折点取值, 首先计算出各评价指标隶属度值的空间分布; 然后根据表 4 中各评价指标权重计算出土壤质量的综合指标值 *IFI*。以上分析均是利用 ArcGIS 空间分析工具完成的, 得到的研究区土壤质量综合指标值及其分级如图 3 所示。总的看来, 研究区域不同部位土壤质量状况具有明显差异性, 综合指标值 *IFI* 介于 0.26~0.67 之间, 土壤质量总体较差。从空间上看, 土壤质量状况表现出与有机质较为相似的空间规律 (图 2-a), 即有机质含量越高, *IFI* 值越高 (图 3); 而与土壤盐分的空间分布则相反 (图 2-f), 盐分越高的部位土壤质量越差, 这进一步证明有机质是土壤质量评价的重要指标 (图 3), 盐分是土壤质量的主要障碍因子。此外, 研究区西部 (前茬作物为棉花) 土壤质量状况要优于东部 (前茬作物为水稻), 其原因一方面在于东部离海较近, 土壤盐分、地下水矿化度较高导致质量较差; 另一方面可能在于水稻种植区采用大水漫灌, 尽管漫灌可淋洗土壤盐分, 但这也导致地下水位抬升, 再加上淹灌条件下土壤易沉实板结, 孔隙度降低, 容重增大, 这些都在一定程度上

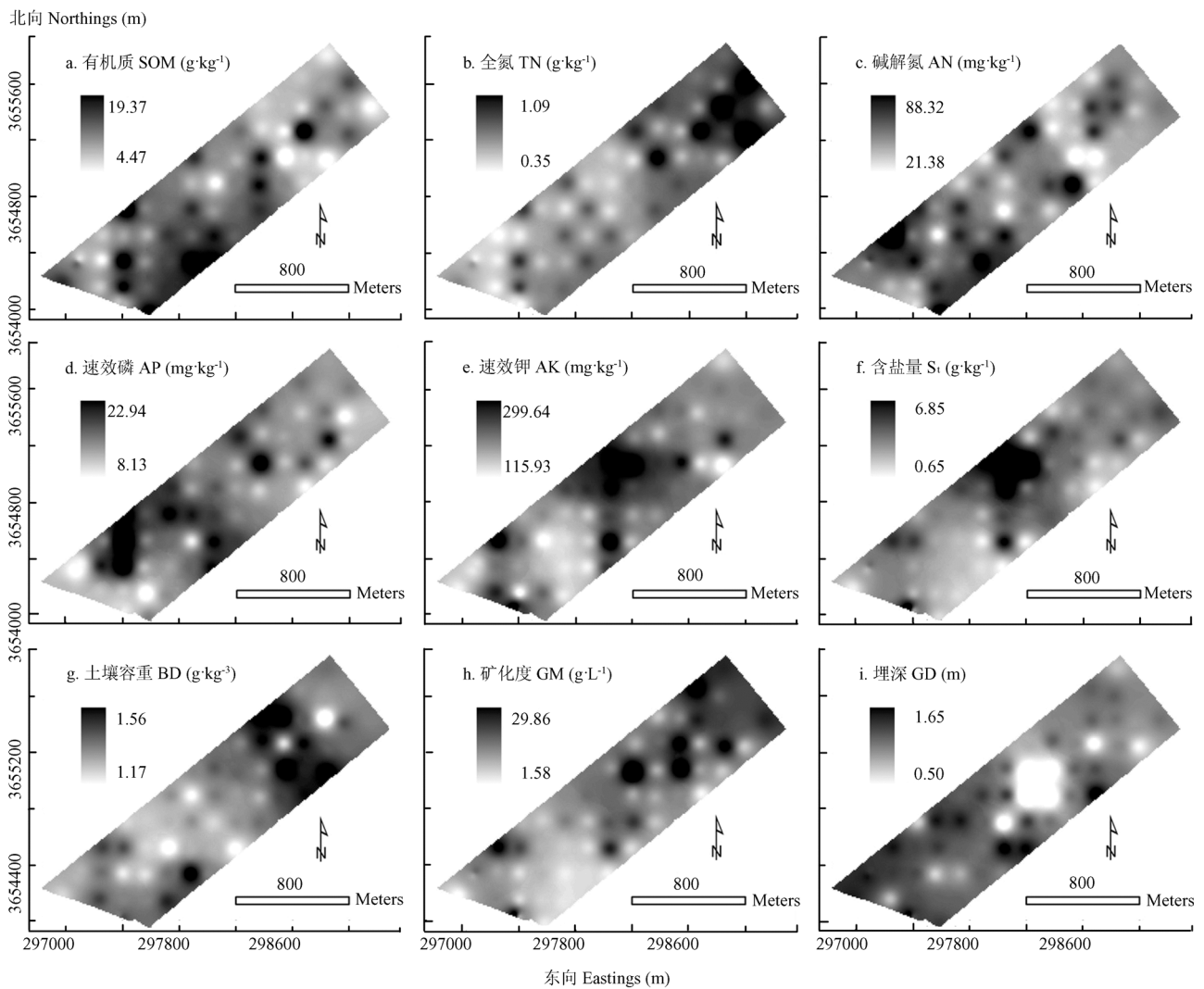


图 2 研究区各土壤质量评价指标空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of each evaluation index of soil quality across the study area

使土壤质量恶化，这可以从图 3 中明显看出。从局部看来，研究区域中间部位土壤质量最差，事实上，田间调查表明，该部位呈现地下水位浅、土壤盐分高和肥力低的特征，植被覆盖度较低；西南部位土壤质量稍好，这是由于该部位土壤肥力相对较高（有机质含量均值 $14.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），且地势较高，地下水位均值 1.45 m ，在地下水埋深普遍较浅的滨海滩涂更有利于作物生长。分级结果表明，研究区土壤质量中级的区域分布面积最大，占总面积比例为 78.4% ，是改良治理的重点区域，其次是质量较低的区域，占 19.9% ，而质量较高的区域仅占 1.7% 。据图 3 可全面掌握围垦区的土壤质量状况，并为该区中低产地的改造、障碍土壤的科学改良和管理提供参考依据，如土壤质量较

低的中部区域应完善田间排灌设施，促进土壤的淋盐、排盐以降低盐渍化风险；对质量中等的区域宜采用农业生物改良措施，通过改善理化性质以提高土壤生产力。

3 讨论

以与作物生长密切相关的土壤理化性质为评价指标，本文采用模糊数学方法对苏北海涂围垦区土壤质量状况进行综合评价，不仅利用了土壤质量评价中的模糊性特点，又考虑了评价因素指标值、权重和评价因素间交互作用对土壤质量的共同影响^[27]。本研究选择在 10 月下旬进行的原因是多方面的。首先，获取该时段的质量分级图可为土壤改良提供参考，如在研究

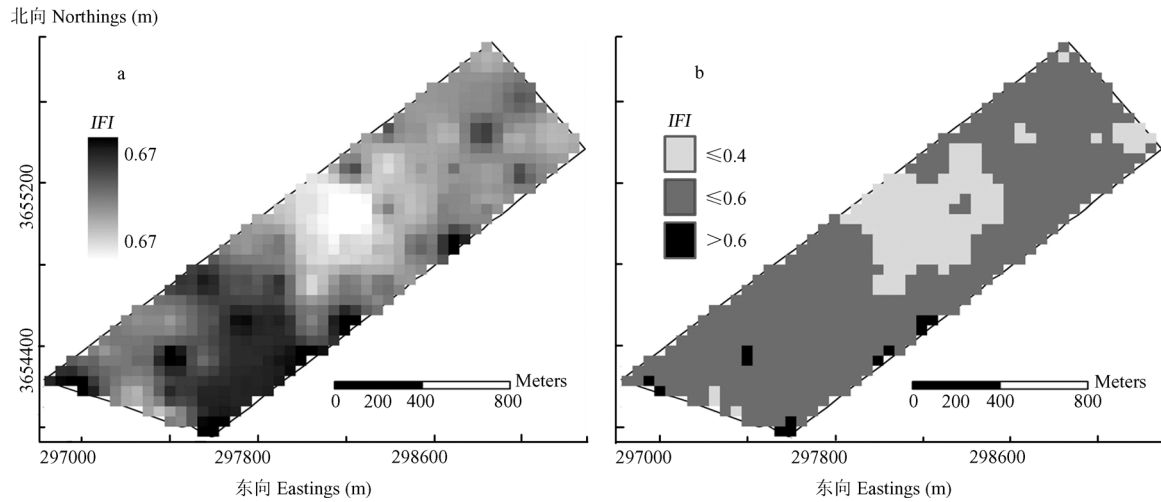


图3 研究区土壤质量综合评价及其分级

Fig. 3 Synthetic assessment and classification of soil quality across the study area

区局部应加强田间排水或适当采用农业生物改良措施；其次，可为后茬作物的合理布局提供依据，如在中、高质量区种植粮食作物，在低质量区适当种植耐盐经济植物；再次，由于该时段田间冬小麦已播种，因此获取的质量分级图有利于小麦苗期的田间管理和后期的施肥。必须指出的是，评价指标的选定是质量评价的核心，直接关系到评价结果的客观性，目前的研究中往往采用的指标过多，且指标的获取难度较大，实用性较差，影响了土壤质量评价结果在实践中的应用推广。此外，目前有关滨海滩涂地区土壤质量评价方面的研究尚少，还没有建立适合该地区的土壤质量评价指标体系，相关工作将在进一步的研究中深入。但有报道表明，在滨海盐渍区，在其它评价指标数据有限或获取困难的前提下，土壤质量可以用土壤有机质和盐分含量指标评价^[28]。本研究的评价指标体系并没有涉及土壤生物与环境指标，一方面是由于海涂围垦区生态系统较为脆弱，土壤生物量总体较低，另一方面在于该区土地围垦年限较短，目前土壤环境问题还不是重要的质量制约因素。本研究获取的区域土壤质量综合评价与分级图对于中、低产地的科学管理和合理施肥具有重要意义，由于滨海滩涂区域多为砂质土壤，保肥供肥性能较差，再加上该区的水文地质条件导致水盐运动活跃，土壤盐渍化风险较高，因而该区肥料施用应以有机肥为主，同时应加强该区域的排水出路以降低地下水位，并针对表土层紧实特点进行耕翻以疏松耕作层和切断毛细管，不仅能改善土壤肥力还能达到抑盐、控盐的目的；对于作物生长季内速效

肥料的施用，由于其极易淋洗流失，应按照少量多次的方法，针对作物需要及时补充。

4 结论

4.1 研究区有机质含量总体适量，全氮和碱解氮贫乏，速效磷和速效钾较丰富；除容重为弱变异强度外，其余各指标均呈中等变异强度；除土壤盐分和地下水埋深外，其余各评价指标均满足 95%置信水平、10%精度水平的合理取样数量要求。

4.2 有机质与全氮、碱解氮、速效磷均具有显著的正相关性，与土壤盐分、容重、地下水矿化度均呈显著负相关性，表明有机质是重要的土壤质量评价因子。土壤盐分和地下水矿化度均与有机质显著负相关，说明土壤盐分与地下水矿化度是土壤质量的主要限制因子，且地下水矿化度主要通过土壤盐分影响土壤质量。

4.3 研究区不同部位土壤质量状况具有明显差异性，表现出与有机质较为相似的空间规律，与土壤盐分的空间规律相反；研究区西部棉花种植区的土壤质量状况要优于东部水稻种植区，而中间部位土壤质量最差；研究区土壤质量中级的区域分布面积最大，是改良治理的重点区域，其次是低质量的区域，高质量的区域面积最小；土壤质量综合评价与分级图该区中低产地的改造、障碍土壤的科学改良和管理提供了参考依据。

References

- [1] 王资生, 阮成江, 郑怀平. 盐城滩涂资源特征及可持续利用对策.

- 海洋通报, 2001, 20(4): 64-69.
- Wang Z S, Ruan C J, Zheng H P. Features of tidal-flat resource of Yancheng and measures of sustainable utilization. *Marine Science Bulletin*, 2001, 20(4): 64-69. (in Chinese)
- [2] 陈洪全. 苏北沿海港口开发与可持续发展研究. 海洋科学, 2000, 24(1): 52-54.
- Chen H Q. Harbour exploit and sustainable development of Jiangsu coast. *Marine Sciences*, 2000, 24(1): 52-54. (in Chinese)
- [3] 赵其国, 孙 波, 张桃林. 土壤质量与持续环境 I: 土壤质量的定义及评价方法. 土壤, 1997, (3): 113-120.
- Zhao Q G, Sun B, Zhang T L. Soil quality and sustainable environment I: Definition and assessment methods of soil quality. *Soils*, 1997, (3): 113-120. (in Chinese)
- [4] 曹志洪. 解译土壤质量演变规律, 确保土壤资源持续利用. 世界科技研究与发展, 2001, 23(3): 28-32.
- Cao Z H. Study on the principles of soil quality changing to promote sustainable use of soil resources. *World Sci-Tech Research and Development*, 2001, 23(3): 28-32. (in Chinese)
- [5] Andrews S S, Flora C B, Mitchell J P, Karlen D L. Growers' perceptions and acceptance of soil quality indices. *Geoderma*, 2003, 114: 187-213.
- [6] Douglas L K, Craig A D, Susan S A. Soil quality: why and how? *Geoderma*, 2003, 114: 145-156.
- [7] Corwin D L, Kaffka S R, Hopmans J W, Mori Y. Assessment and field-scale mapping of soil quality properties of a saline-sodic soil. *Geoderma*, 2003, 114: 231-259.
- [8] 路 鹏, 苏以荣, 牛 铮, 吴金水. 土壤质量评价指标及其时空变异. 中国生态农业学报, 2007, 15(4): 190-194.
- Lu P, Su Y R, Niu Z, Wu J S. Soil quality assessment indicators and their spatial-temporal variability. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15 (4): 190-194. (in Chinese)
- [9] 张心昱, 陈利顶. 土壤质量评价指标体系与评价方法研究进展与展望. 水土保持研究, 2006, 13(3): 30-34.
- Zhang X Y, Chen L D. The progress and prospect of soil quality indicators and evaluation methods. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13 (3): 30-34. (in Chinese)
- [10] 王效举, 龚子同. 红壤丘陵小区域不同利用方式下土壤变化的评价和预测. 土壤学报, 1998, 35(1): 135-139.
- Wang X J, Gong Z T. Assessment and prediction of soil changes under different land use patterns at a small area level in red soil hilly region. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(1): 135-139. (in Chinese)
- [11] 王效举, 龚子同. 亚热带小区域水平上土壤质量时空变化的定量评价. 土壤与环境, 1996, 5(4): 229-231.
- Wang X J, Gong Z T. Quantitative evaluation of soil quality changes in time and space at a small area level in subtropical China. *Soil and Environmental Sciences*, 1996, 5(4): 229-231. (in Chinese)
- [12] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区侵蚀土壤质量评价. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(3): 285-293.
- Xu M X, Liu G B, Zhao Y G. Quality assessment of erosion soil on hilly Loess Plateau. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2005, 11(3): 285-293. (in Chinese)
- [13] 李月芬, 汤 洁, 李艳梅. 用主成分分析和灰色关联度分析评价草原土壤质量. 世界地质, 2004, 23(2): 169-174.
- Li Y F, Tang J, Li Y M. Evaluation on grassland soil quality with analysis of principal component and gray relative. *Global Geology*, 2004, 23(2): 169-174. (in Chinese)
- [14] 胡月明, 万洪富, 吴志峰, 吴谷丰, 李华兴. 基于 GIS 的土壤质量模糊变权评价. 土壤学报, 2001, 38(3): 266-274.
- Hu Y M, Wan H F, Wu Z F, Wu G F, Li H X. GIS-based soil quality evaluation with fuzzy variable weight. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(3): 266-274. (in Chinese)
- [15] 孙 波, 赵其国. 红壤退化中的土壤质量评价指标及评价方法. 地理科学进展, 1999, 18(2): 118-128.
- Sun B, Zhao Q G. Evaluation indexes and methods of soil quality concerning red soil degradation. *Progress in Geography*, 1999, 18 (2): 118-128. (in Chinese)
- [16] 张 贞, 魏朝富, 高 明, 邵景安, 秦建成. 土壤质量评价方法进展. 土壤通报, 2006, 37(5): 999-1006.
- Zhang Z, Wei C F, Gao M, Shao J A, Qin J C. Assessment methods for soil quality: a review. *Chinese Journal of Soil Sciences*, 2006, 37(5): 999-1006. (in Chinese)
- [17] 王博文, 陈立新. 土壤质量评价方法述评. 中国水土保持科学, 2006, 4(2): 120-126.
- Wang B W, Chen L X. Review on methods of soil quality evaluation. *Science of Soil and Water Conservation*, 2006, 4(2): 120-126. (in Chinese)
- [18] 孔艳玲, 郭 鹏, 刘洪斌, 武 伟. 基于 GIS 的土壤肥力综合评价. 西南农业大学学报, 2003, 25(2): 176-179.
- Kong Y L, Guo P, Liu H B, Wu W. Comprehensive evaluation of soil fertility based on GIS (Geographic Information System). *Journal of Southwest Agricultural University*, 2003, 25(2): 176-179. (in Chinese)
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- Lu R K. *Analytical Methods of Soil and Agricultural Chemistry*. Beijing: Chinese Agriculture and Technology Press, 1999. (in Chinese)

- [20] 全国土壤普查办公室. 中国土壤. 北京: 中国农业出版社, 1998.
The National Soil Survey Office. *Soils of China*. Beijing: China Agricultural Press, 1998. (in Chinese)
- [21] Cochran W G. *Sampling Techniques (3rd ed.)*. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1977.
- [22] 欧维新, 杨桂山, 于兴修, 李恒鹏. 盐城海岸带土地利用变化的生态环境效应研究. 资源科学, 2004, 26(3): 76-83.
Ou W X, Yang G S, Yu X X, Li H P. Effect of coastal land use changes on eco-environment in the coastal zone of Yancheng. *Resources Science*, 2004, 26(3): 76-83. (in Chinese)
- [23] 邹志国, 潘昌保, 夏杰. 江苏沿海垦区主要农作物耐盐性试验研究. 土壤通报, 1999, 30(1): 23-25.
Zou Z G, Pan C B, Xia J. Study on salt tolerance of major crops in Jiangsu coastal reclamation area. *Chinese Journal of Soil Science*, 1999, 30(1): 23-25. (in Chinese)
- [24] 张凤荣, 安萍莉, 王军艳, 张军连, 刘黎明, 陈焕伟. 耕地分等中的土壤质量指标体系与分等方法. 资源科学, 2002, 24(2): 71-75.
Zhang F R, An P L, Wang J Y, Zhang J L, Liu L M, Chen H W. Soil quality criteria and methodologies of farmland grading. *Resources Science*, 2002, 24 (2): 71-75. (in Chinese)
- [25] 汪景宽, 李双异, 张旭东, 魏丹, 迟风琴. 20年来东北典型黑土地区土壤肥力质量变化. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 19-24.
Wang J K, Li S Y, Zhang X D, Wei D, Chi F Q. Spatial and temporal variability of soil quality in typical black soil area in Northeast China in 20 years. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15 (1): 19-24. (in Chinese)
- [26] 吕苏丹, 汪光宇, 邬亚浪, 史舟, 王珂. 东阳万亩园区土壤养分综合评价研究. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2002, 28(3): 272-276.
Lü S D, Wang G Y, Wu Y L, Shi Z, Wang K. Integrated evaluation of soil nutrients in modern agricultural demonstration garden of Dongyang county. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Science)*, 2002, 28(3): 272-276. (in Chinese)
- [27] 王建国, 杨林章, 单艳红. 模糊数学在土壤质量评价中的应用研究. 土壤学报, 2001, 38(2): 176-183.
Wang J G, Yang L Z, Shan Y H. Application of fuzzy mathematics to soil quality evaluation. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(2): 176-183. (in Chinese)
- [28] 李新举, 刘宁, 张雯雯, 王霖琳, 马小友. 黄河三角洲土壤质量自动化评价及指标体系研究. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 145-148.
Li X J, Liu N, Zhang W W, Wang L L, Ma X Y. Evaluation index systems of soil quality in the Yellow River Delta. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(1): 145-148. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)