

苏北海涂围垦区耕层土壤养分分级及其模糊综合评价

姚荣江¹, 杨劲松^{1*}, 陈小兵², 邹平¹, 赵秀芳¹

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 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: 针对制约滩涂土壤资源开发利用的障碍因素, 以苏北滨海滩涂围垦区为研究区域, 应用模糊综合评价方法对耕层土壤养分进行了分级与定量评价, 获取了区域土壤肥力状况分布。结果表明, 研究区域土壤磷素和钾素相对富余, 有机质和氮素含量偏低, 氮素亏缺较为严重, 尤其是碱解氮。模糊综合评价表明研究区土壤养分分布在 、 、 级, 主要集中在 、 级, 并没有 级和 级土壤; 尽管总体上处于 级水平, 但可认为其养分仍处于极贫乏状态。研究区不同部位土壤养分分级存在明显差异性, 养分分级较低的部位作物生长状况较差, 土壤盐渍化程度较高。研究结果为海涂围垦区中、低产地土壤培肥和农田精确施肥提供一定的参考依据。

关键词: 海涂; 耕层; 土壤养分; 分级; 模糊综合评价

中图分类号: S158.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6257(2009)04-0016-05

苏北地区海涂资源十分丰富, 在江苏省近千公里的海岸线上, 苏北沿海拥有占全国 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, 已取得了巨大的社会效益。目前来看, 土壤质量偏低依然是制约苏北海涂土壤开发利用的一个主要障碍因子, 因此, 开展土壤质量调查与评价对实现该区土壤资源的高效可持续利用及现代化管理具有重要意义。

土壤养分是土壤质量评价的重要指标之一, 亦是土壤肥力的核心部分。全面客观地评价土壤实际养分水平是科学施肥的依据, 也是农技推广和精确农业实施的基础。在土壤养分的评价方面, 有定性描述和定量化描述两种, 以往的土壤养分评价侧重定性评价和单因素评价, 而传统的定量化描述亦存在着较大的主观随意性^[3]。随着黑箱方法、模糊数学方法和多元统计分析方法等现代研究方法的广泛

应用, 土壤养分评价逐渐侧重定量评价和多因素的综合评价, 如 BP 神经网络、主成分分析法、灰色关联分析法和模糊综合评判法具有较好的应用效果^[4-9]。综合定量化研究在较大程度上避免了评价者主观因素的影响, 已成为土壤养分评价的一个趋势。本文以苏北海涂围垦区为研究区域, 运用模糊综合评价方法对土壤养分进行定量评价, 旨在全面了解该区土壤肥力状况, 为围垦区中、低产地土壤培肥及精确施肥提供一定的参考依据。

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, 地理位置介于 N32°59'30" ~ 33°0'31"、E120°49'40" ~ 120°51'4", 总面积约 180 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, 年均降水量 1058.4 mm, 主要集中在 6 ~ 8 月份的雨季。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。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。研究区域东部的种植制度主要为“水稻 - 油菜”的一年两熟制, 西部则是“棉花 - 大麦”的一年两熟制。受种植模式影响, 研究区东部和西部的排渠密度存在一定差异, 表现为东部水稻种植

收稿日期: 2008-11-05

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 (200752010022); 中国科学院知识创新工程重大项目 (KSCX1-YW-09) 和中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-406-3) 资助。

作者简介: 姚荣江 (1980-), 男, 江苏靖江人, 博士, 助理研究员, 主要从事盐渍化防控与盐渍土资源利用研究。通讯作者为杨劲松。

区域的排渠密度 (平均间距约 50 m) 明显大于棉花种植区域 (平均间距约 100 m)。

1.2 样品采集与分析

在研究区范围内布设采样点, 采样点的位置、数量综合考虑当地土质、植被类型、种植制度等因素确定, 共选取 60 个代表性样点。每个样点均对 0~20 cm 耕层进行采样, 为保证样品的代表性, 每个样点均在中心点和相邻的 3 个角采集土样, 并经混合组成待测样品, 共计采集 60 个混合土样, 其中水稻地 25 个, 棉花地 29 个, 杂草地 6 个。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, 正处于棉铃吐絮期的晚期 (拔秆期)。测定项目包括有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾。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开氏法; 碱解氮测定采用碱解扩散法; 速效磷测定采用 0.5 mol·L⁻¹ 碳酸氢钠浸提 - 钼锑抗比色法; 速效钾测定采用 1 mol·L⁻¹ 中性醋酸铵浸提 - 火焰光度法^[10]。本文采用的土壤养分评价标准为全国第二次土壤普查的分级标准^[11], 具体如表 1 所示。

表 1 土壤养分分级标准

养分指标	养分等级				
	极贫乏	贫乏	适量	较丰富	丰富
有机质 (g·kg ⁻¹)	<6	6~10	10~20	20~30	>30
全氮 (g·kg ⁻¹)	<0.5	0.5~0.75	0.75~1.0	1.0~1.5	>1.5
碱解氮 (mg·kg ⁻¹)	<30	30~60	60~90	90~120	>120
速效磷 (mg·kg ⁻¹)	<3	3~5	5~10	10~20	>20
速效钾 (mg·kg ⁻¹)	<30	30~50	50~100	100~150	>150

2 结果与分析

2.1 描述性统计分析

表 2 列出了各土壤养分指标的统计特征值及其分级。可以看出, 研究区域不同部位土壤养分含量差异较大, 如有机质的变化范围在 4.44~19.46 g·kg⁻¹ 之间, 极差达 15.02 g·kg⁻¹; 各养分指标的变异系数介于 23.14%~30.67%, 总体呈中等变异强度, 其中有机质变异强度最大, 速效磷变异强度最小; 从平均值来看, 有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾含量分别为 10.90 g·kg⁻¹, 0.60 g·kg⁻¹, 43.91 mg·kg⁻¹, 13.72 mg·kg⁻¹ 和 191.69 mg·kg⁻¹, 有机质、全氮和碱解氮总体上偏低; 按土壤养分分级标准, 研究区域有机质含量总体适量, 全氮和碱解氮总体较为贫乏, 速效磷和速效钾均相对丰富。由进一步分级结果可知, 研究区域土壤养分状况不容乐观, 仅有 56.67% 的土壤有机质含量 10 g·kg⁻¹, 而偏低范围 (6~10 g·kg⁻¹) 的占 40.0%; 全氮和碱解氮亏缺最为严重, 土壤全氮 <0.75 g·kg⁻¹ 的占 81.67%, 仅有 18.33% 的全氮 0.75 g·kg⁻¹, 尤其是碱解氮, 占 91.66% 的土样呈较为贫乏 (<60 mg·kg⁻¹), 适量的 (60~90 mg·kg⁻¹) 仅占 8.34%; 速效磷和速效钾含量呈较为丰富, 速效磷 10 mg·kg⁻¹ 占 90%, 仅有 10% 介于 5~10 mg·kg⁻¹; 所有样点的速效钾含量均 100 mg·kg⁻¹, 其中 150 mg·kg⁻¹ 达到 80%。总体来看, 研究区域土壤磷素和钾素相对富余, 有机质和氮素含量偏低, 氮素亏缺较为严重, 尤其是碱解氮, 考虑到滨海滩涂区域多为砂质土壤, 养分易流失, 保肥供肥性能较差, 因而应加强土壤培肥以提高有机质含量, 并按照少量多次的方法, 针对作物需要及时补充土壤氮素养分。

表 2 耕层土壤养分的统计特征值及其分级

养分指标	最小值	最大值	平均值	变异系数 (%)	养分分级 (%)				
					极贫乏	贫乏	适量	较丰富	丰富
有机质 (g·kg ⁻¹)	4.44	19.46	10.90	30.67	3.33	40.00	56.67	—	—
全氮 (g·kg ⁻¹)	0.34	1.09	0.60	30.18	31.67	50.00	13.33	5.00	—
碱解氮 (mg·kg ⁻¹)	21.28	88.41	43.91	29.36	13.33	78.33	8.34	—	—
速效磷 (mg·kg ⁻¹)	8.10	22.96	13.72	23.14	—	—	10.00	85.00	5.00
速效钾 (mg·kg ⁻¹)	115.49	300.06	191.69	23.29	—	—	—	20.00	80.00

从表 3 列出的各土壤养分指标间的相关系数来看, 各养分间表现出一定相关性, 如有机质与全氮、碱解氮、速效磷含量间的相关系数分别为

0.529、0.411 和 0.312, 其中与速效磷达到 0.05 的显著水平 ($R_{0.05} = 0.25$), 与全氮和碱解氮的相关性达到了 0.01 的极显著水平 ($R_{0.01} = 0.325$, $n =$

60), 这充分说明有机质是土壤养分的储藏形式和重要来源。其余各养分指标间相关性不显著, 因而, 本研究采用有机质、全氮、碱解氮、速效磷和

速效钾作为土壤养分评价指标是可行的, 若要了解研究区域土壤供肥能力, 须进一步对土壤养分指标进行定量分级与评价。

表 3 各土壤养分指标的相关系数矩阵

养分指标	有机质 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
有机质 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1				
全氮 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.529**	1			
碱解氮 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.411**	0.091	1		
速效磷 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.312*	0.150	0.193	1	
速效钾 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	-0.167	-0.204	0.053	0.137	1

注: *和 ** 分别表示显著性水平在 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ (双尾检验)。

2.2 模糊综合评价计算过程

本文采用全国第二次土壤普查土壤养分的分级标准 (表 1) 作为评价标准。评价因素权重的确定方法有多种, 在以往的研究中, 普遍采用人为打分确定, 如层次分析法、德尔菲法等。为了避免人为主观因素影响, 本研究采用指标之间相关系数确定权重系数。首先计算单项评价指标之间的相关系数, 然后求某评价指标之间相关系数的平均值 (r'),

表 4 土壤养分指标平均相关系数及其权重

	土壤养分指标				
	有机质	全氮	碱解氮	速效磷	速效钾
r'	0.355	0.244	0.187	0.198	0.140
A	0.316	0.217	0.166	0.176	0.125

并以该平均值占所有评价指标相关系数平均值总和 (r') 的比 (r'/r'), 作为该单项评价指标的权重 A, 计算结果见表 4。

确定好评价因素信息后, 建立模糊综合评价矩阵。评价矩阵的建立主要是确定矩阵中的参评因素及其隶属度 $r(x)$ 。 $r(x)$ 的建立是通过建立隶属函数来确定的。由于评价因素指标值间缺乏可比性, 因此须利用隶属函数进行归一化处理。根据前人研究经验, 结合滨海滩涂地区实际情况, 本研究采用戒上型隶属函数确定各养分指标的隶属度, 属于这类函数的评价因素包括土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、速效钾和地下水埋深。其隶属函数的解析式为:

$$r(x) = \begin{cases} 0 & x < a_i \\ (a_{i+1} - x) / (a_{i+1} - a_i), (x - a_i) / (a_{i+1} - a_i) & a_i \leq x \leq a_{i+1} \\ 1 & x > a_{i+1} \end{cases}$$

式中: a_i, a_{i+1} 分别表示因子的 i 级和 $i+1$ 级标准值; $(a_{i+1} - x) / (a_{i+1} - a_i), (x - a_i) / (a_{i+1} - a_i)$ 分别表示当 $a_i \leq x \leq a_{i+1}$ 时, x 对 a_i, a_{i+1} 的隶属度。

此解析式可算出任一采样点各养分因子对各分级标准的隶属度, 从而建立起模糊关系矩阵。模糊综合评价的具体原理和详细计算过程可参考相关文献^[12-15]。

2.3 土壤养分的模糊综合评价

按照以上方法与过程, 计算得出所有样点的土壤养分模糊综合指数 FCI。与表 1 土壤养分分级标准相对应, 本文将土壤养分模糊综合评价分级也划分为 5 级^[16]: 级, 极缺乏, FCI 值 < 50 ; 级, 缺乏, $50 < \text{FCI} < 65$; 级, 适量, $65 < \text{FCI} < 80$; 级, 高量, $80 < \text{FCI} < 95$; 级, 过量, FCI 值

95。依据该分级标准对所有样点养分状况进行模糊综合评价, 结果如图 1 所示。可以看出, 研究区域 60 个采样点土壤养分水平分布在、级, 其中 FCI 值 < 50 的样点数为 25 个, 占 41.67%, 土壤养分极缺乏; $50 < \text{FCI} < 65$ 的样点有 34 个, 即土壤养分缺乏的占 56.67%; $65 < \text{FCI} < 80$ 的样点数为 1 个, 即土壤养分适量的仅占 1.67%; 采样点土壤养分水平主要集中在、级, 全区没有级和级土壤。总体看来, 所有样点 FCI 值介于 23.741 ~ 65.880 之间, 均值为 51.629, 总体处于级水平; 进一步分析 FCI 值的频数分布可知, 其偏度值达 -0.776, 呈明显左偏分布, 表明其在低值区具有较高的频数分布, 该结果说明研究区域土壤肥力较低, 尽管模糊综合评价结果表明其属于级, 但可认为其养分状况仍处于极贫乏状态。

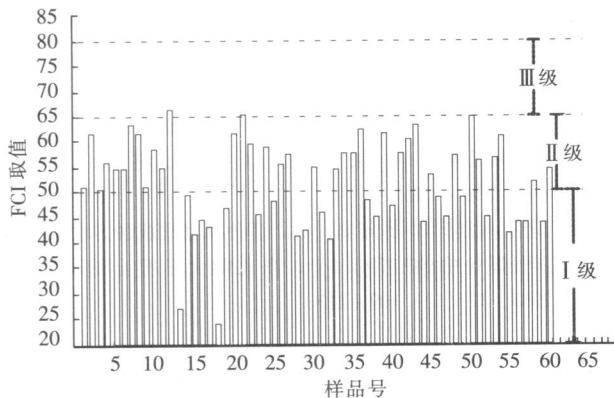


图 1 各采样点土壤养分的模糊综合评价

图 2 显示了研究区土壤养分模糊综合评价结果的等值线图。可以看出，研究区域不同部位土壤养分分级存在明显的差异性。对于东部的水稻种植地，土壤养分极贫乏区域分布于中部，且土壤养分综合评价最低值亦出现在该部位，而养分贫乏区位于东部和南部，养分极贫乏和贫乏区域面积大致相当；对于西部的棉花地，土壤养分极贫乏区域分布于西部和北部，养分贫乏区主要位于南部，养分极贫乏区面积要远大于贫乏区域。事实上，通过对研究区土壤养分状况的实地调查，FCI 值 < 45 的部位作物生长状况较差，植被覆盖度较低，耕层土壤盐渍化程度较高。考虑到传统施肥方式忽略了土壤养分在不同地块的差异性，一般是凭经验平均施肥，会造成部分地块施肥不足和部分地块施肥过量。因而，根据图 2 提供的土壤养分综合评价分级图可掌握围垦区范围内的养分状况，并为精确施肥提供一定的科学依据。

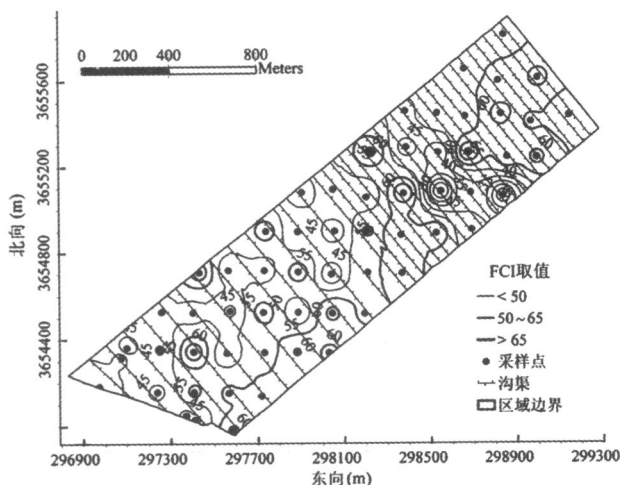


图 2 研究区域土壤养分模糊综合评价分级的等值线图

3 结论

3.1 研究区不同部位土壤养分含量差异较大，其中有机质含量总体适量，全氮和碱解氮较为贫乏，速效磷和速效钾相对丰富。由分级结果可知，有机质含量偏低的占 40.0%，土壤全氮 < 0.75 g · kg⁻¹ 的占 81.67%，占 91.66% 的土样碱解氮呈较为贫乏，速效磷 10 mg · kg⁻¹ 占 90%，所有样点的速效钾含量均 100 mg · kg⁻¹；总体上，研究区土壤磷素和钾素相对富余，有机质和氮素含量偏低，氮素亏缺较为严重，尤其是碱解氮，因而应加强土壤培肥并及时补充土壤氮素养分。

3.2 模糊综合评价结果显示，研究区所有采样点土壤养分水平分布在 I、II、III 级，并主要集中在 II、III 级，全区没有 I 级和 III 级土壤，其总体上处于 II 级水平。研究区域土壤肥力较低，尽管模糊综合评价结果表明其属于 II 级，但可认为其养分状况仍处于极贫乏状态。

3.3 研究区不同部位土壤养分分级存在明显差异性。水稻种植地土壤养分极贫乏和贫乏区域面积大致相当，棉花地养分极贫乏区面积要远大于贫乏区域。实地调查结果表明，FCI 值 < 45 的部位作物生长状况较差，土壤盐渍化程度较高。土壤养分综合评价分级图可为精确施肥提供一定的参考依据。

参考文献：

- [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 [J]. 海洋通报, 2001, 20 (4): 64 - 69.
- [2] 陈洪全. 苏北沿海港口开发与可持续发展研究 [J]. 海洋科学, 2000, 24 (1): 52 - 54.
- [3] 王伟, 唐明华, 刘洪斌. 土壤养分的模糊综合评价 [J]. 西南农业大学学报, 2000, 22 (3): 270 - 272.
- [4] 杨国栋, 王肖娟. 基于人工神经网络的土壤养分肥力等级评价方法 [J]. 土壤通报, 2005, 36 (1): 30 - 33.
- [5] 彭佩钦, 张满堂. 盘塘红壤丘岗区水稻土肥力分级的研究 [J]. 热带亚热带土壤科学, 1994, 3 (3): 169 - 174.
- [6] 马姜明, 李昆. 元谋干热河谷人工林的土壤养分效应及其评价 [J]. 林业科学研究, 2006, 19 (4): 467 - 471.
- [7] 刘康兰, 袁浩. 模糊综合评判在环境质量评价中的应用 [J]. 环境工程, 2000, 18 (1): 13 - 15.
- [8] 付延玲, 骆祖江, 王增辉. 用聚类分析和模糊综合评判评价地质环境质量 [J]. 煤田地质与勘探, 1999, 27 (6): 47 - 50.
- [9] 李月芬, 汤洁, 林年丰, 等. 灰色关联度法在草原土壤质量评价中的应用 [J]. 吉林农业大学学报, 2003, 25 (5): 551 - 556.

- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [11] 全国土壤普查办公室. 中国土壤 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [12] 李萍. 藏东南耕作棕壤养分模糊综合评价 [J]. 土壤, 2003, 35 (5): 435 - 437.
- [13] 李新举, 刘宁, 张雯雯, 等. 黄河三角洲土壤质量自动化评价及指标体系研究 [J]. 中国生态农业学报, 2007, 15 (1): 145 - 148.
- [14] 吕苏丹, 汪光宇, 邬亚浪, 等. 东阳万亩园区土壤养分综合评价研究 [J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2002, 28 (3): 272 - 276.
- [15] 边维勇, 马力, 杨晓波, 等. 基于模糊综合评判方法的辽河流域土壤养分分级与特征 [J]. 岩矿测试, 2007, 26 (4): 336 - 338.
- [16] 汤洁, 赵凤琴, 林年丰, 等. 多种模型集成的方法在土壤养分评价中的应用 [J]. 东北师大学报自然科学版, 2005, 37 (1): 109 - 113.

Classification and fuzzy synthetic evaluation of soil nutrient at plough horizon in coastal region of north Jiangsu province

YAO Rong-jiang¹, YANG Jin-song^{1*}, CHEN Xiao-bing², ZOU Ping¹, ZHAO Xiu-fang¹ (1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Jiangsu Nanjing 210008; 2. Yantai Institute of Coastal Zone Research for Sustainable Development, Chinese Academy of Sciences, Shandong Yantai 264003)

Abstract: Aiming at soil obstacles restraining the exploitation and utilization of coastal soil resources, classification and quantitative assessment of soil nutrient at plough horizon was performed by using fuzzy synthetic evaluation method, which was conducted in coastal region of north Jiangsu province. The distribution of regional soil nutrient status was further obtained. The results indicated that available P and K was relatively abundant, the content of organic matter (OM) and N nutrient was relatively low, and N nutrient was in severe deficiency, especially alkali dispelled nitrogen. Fuzzy synthetic evaluation results showed soil nutrient status across the study area was classified into rank , and , and mainly into rank and . There existed no soil samples of rank and . Soil nutrient status across the study area was actually in extreme deficiency, although it was classified into rank generally. Soil nutrient classifications differed significantly at different positions of the study area. The crop growth was in poor status and soil was highly salinized at positions of low nutrient classification. The research results could serve as a theoretical reference to the soil fertility improvement and precision fertilization of moderate and low-yield farmlands in coastal region.

Key words: coastal region; plough horizon; soil nutrient; classification; fuzzy synthetic evaluation