

引用格式:吴春生,刘高焕,黄翀,等. 基于MDS和模糊逻辑的黄河三角洲土壤质量评估[J]. 资源科学, 2016, 38(7): 1275-1286.
[Wu C S, Liu G H, Huang C, et al. Soil quality assessment of the Yellow River Delta based on MDS and Fuzzy Logic Model[J].
Resources Science, 2016, 38(7): 1275-1286]. DOI: 10.18402/resci.2016.07.09

基于MDS和模糊逻辑的黄河三角洲土壤质量评估

吴春生^{1,2}, 刘高焕¹, 黄翀^{1,3}, 刘庆生¹, 管续栋^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所中国科学院生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘 要:黄河三角洲土地资源丰富,但降水与蒸发严重失衡,土壤受盐渍化及污染影响严重。为获取该地区土壤质量现状,本研究选取了多个物理和化学指标,利用最小数据集理论,构建适合于研究区土壤质量评估的指标体系,然后采用模糊逻辑模型对土壤质量现状进行评估,并结合土地利用现状分析了主要土地利用类型在不同土壤等级上的分布情况。研究结果表明:经筛选后,黄河三角洲土壤质量评价最小数据集包括pH、TN、AP、AK、有机质和土壤盐分;评估结果显示在空间上土壤质量内陆高于沿海,以中部黄河与刁口河相交处为最优;土壤质量整体上以中等等级为主,其中三级类型占比最大为31.22%,农田、园地、林地等主要分布在三级以上土壤,但有部分在低级土壤上存在,而且优质土壤上也存在较多的闲置土地,土地资源利用存在不合理性,有待进一步的优化配置。

关键词:最小数据集;土壤质量;模糊逻辑;黄河三角洲

DOI: 10.18402/resci.2016.07.09

1 引言

土壤是一种重要的陆地自然资源,其质量的优劣关系到粮食安全、人类健康以及生态环境的可持续发展^[1,2]。中国将土壤质量分成土壤肥力质量、土壤环境质量和土壤健康质量^[3],但目前的研究集中于土壤肥力质量。土壤质量评价方法如灰色系统理论^[4-6]、指数法、地统计法、人工神经网络以及隶属度函数等已得到广泛应用^[7-9],但如何合理的选择评价指标仍未有明确的方法。

土地利用方式、生态系统类型、地理区位、土壤母质等的不同使得土壤质量的限制要素存在差异,在具体的土壤质量评价中,选取合适的指标对评价结果影响较大。最小数据集(MDS)理念的引入为指标的筛选和土壤质量评价提供了便利^[10,11],一方面通过建立MDS,可以从大量预选指标中筛选出少量最合适的反映土壤质量的指标,减小了数据冗

余;另一方面在构建MDS过程中,可以获取所筛选的各指标的权重,为后期进行土壤质量评价提供基础,减小了人为主观因素的影响。国际上对MDS已有研究^[11,12],如Rahmanipour, F.通过建立MDS,完成了伊朗加兹温省土壤质量的评估^[13]。Wang利用MDS理论将预选的29个土壤指标筛选至6个来评价土壤质量状况^[14]。Volchko等应用MDS来评估生态恢复进程中绿地区域的土壤状况^[15]等等。但这些都是简单的运用主成分分析方法来削减土壤评估指标的数量。国内对于MDS的应用尚少,早期李桂林等提出将土壤特征和土地利用作为衡量标准,并将要素在各主成分上的综合载荷作为土壤指标筛选依据,优化了MDS建立过程^[16,17],张世文等运用这种理论对北京密云地区土壤指标进行了筛选^[18],但整体上这一方法未得到广泛应用^[19-21]。

目前学者对中国滨海地区的土壤质量研究案

收稿日期:2015-12-16;修订日期:2016-03-24

基金项目:国家自然科学基金(41271407, 41471335);国家科技支撑计划项目(2013BAD05B03)。

作者简介:吴春生,男,山东菏泽人,博士生,主要研究生态GIS和遥感应用。E-mail: wuchsh0118@163.com

通讯作者:刘高焕, E-mail: liugh@reis.ac.cn

例不多,指标选取的方式各异,未有统一标准。如2007年李新举等研究采取设定几种指标组合对垦利县土壤质量进行评估并比较优劣,以达到筛选指标的目的^[22]。2012年单奇华等利用质量指数法研究了浙江余姚滨海盐碱地的土壤质量动态变化规律,但对筛选土壤指标未做深入探究^[23]。2013年王恒振利用聚类方法选取指标,对垦利县耕地质量进行评估,但指标选取的主观因素太强^[24]。Yao等在滨海小实验样地内选取样点并构建土壤质量评估的最小数据集^[25],但能否适用于大范围研究区尚需进一步验证。姚荣江等在小区域内选取样点,结合GIS与模糊综合评价方法对苏北海涂围垦区进行了土壤质量评价,但作者人为指定指标组合进行精度对比,未利用更为客观的方法进行筛选^[4,5]。

本文以黄河三角洲为研究区,从土壤物理和化学等方面选取指标,将土地利用、土壤类型以及各要素的综合载荷作为指标筛选的衡量标准,构建更具综合性的MDS;然后利用筛选的指标建立模糊逻辑模型,实现研究区的土壤质量现状评价,一方面可以为当地的农业发展提供基础资料;另一方面还能够将土壤质量状况与土地利用和生态环境现状相结合,为研究区进行合理的土地资源规划和生态保护等提供依据。

2 研究区概况、数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

研究区为黄河三角洲,位于山东省东营市,37°22'N-38°04'N,118°14'E-119°05'E,总面积约5062.59km²,东部和北部与渤海相邻(图1);研究区地势平缓。西南部最高为12m,东北部最低1m左右,受黄河改道和冲积作用,微地貌发育类型多样。研究区属于温带大陆性季风气候,降雨集中于6-9月,年均蒸发量远大于降水量;土壤主要为潮土,其中盐渍土面积大,盐渍重,土壤发育很不稳定。研究区自然植被分布较广,主要是耐盐性的芦苇、柽柳、白茅和翅碱蓬等,人工植被以农作物为主。

2.2 数据来源

本文以浅层土壤为研究对象,土壤样品采集于2014年5月14日至22日,采样深度为0~20cm,以6km×6km规则格网设计采样点位,实际采样中根据



图1 研究范围与采样点分布

Figure 1 The study area and sample points

点位可操作性和代表性,适当调整位置,在设计点位附近替代采样;采样时用土钻取土,用铝盒封装,一次采样无重复,同时用GPS记录各样点的坐标。研究区内部共采集98个有效样点,为保证研究区内部评价结果的完整性,在外围增加13个点,空间分布如图1。土样经过自然风干、磨细、过2mm筛,并于风干前后分别称重,然后进行下一步的化学和物理分析。

本研究根据徐建明等对潮土类型土地质量指标选取的建议^[26],预选指标包括pH、全氮(TN)、速效磷(AP)、速效钾(AK)、土壤颗粒组成(黏粒、粉粒和砂粒)、土壤盐分和有机质。pH利用定性试纸测量;全氮测定采用半微量开氏法;速效磷测定采用0.5mol/L碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;速效钾测定采用1mol/L中性醋酸铵浸提-火焰光度法;土壤颗粒组成利用激光粒度仪探测;土壤盐分采用常规重量法,利用5:1水土比例提取可溶性盐分;有机质利用重铬酸钾稀释热法。另外还包括在野外采样时利用土壤三参速测仪测定的土壤湿度,共10个指标。其他辅助数据包括研究区高程、土地利用、土壤类型、Landsat TM遥感影像,其中土地利用数据是根据研究区2007年土地调查数据和2014年高分影像数据(<http://218.247.138.121/DSSPlatform/index.html>)综合解译获得,解译精度达到88.68%,满足研

2016年7月

究要求,研究区未利用地大部分归类为盐碱地;同时根据解译结果,获取研究区内河流分布形态。

利用2014年10月5日的Landsat TM影像获取归一化植被指数(NDVI),用于后期土壤指标的空间分析和处理。

高程信息从DEM中提取,DEM数据来自中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。

2.3 研究方法

2.3.1 最小数据集构建

MDS的核心方法为主成分分析,分四个步骤:

(1)检验各指标的统计性特征及变异性,检查指标间是否存在数据冗余,确定是否需要指标筛选。

(2)当数据冗余存在,对原数据集进行主成分分析,选取特征值 ≥ 1 的主成分并排序,将同一主成分行载荷 ≥ 0.5 的要素分为一组,若某要素在不同组内的载荷均 ≥ 0.5 ,则将该要素归并到与其他要素相关性较低的那一组中,若同组中某要素与其他要素相关性都较低(< 0.3),将其单独设为一组,依次完成各分组。

(3)计算各组中每个要素的矢量常模值(Norm),用于指标的筛选,值越大表明该指标对所有主成分的综合载荷越大,与单一的主成分分析中只利用指标在一个主成分上的载荷相比,信息的损失要明显降低。计算公式为:

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

式中 N_{ik} 为第 i 个指标在特征值 > 1 的所有主成分上的综合载荷; u_{ik} 为第 i 个指标在第 k 个主成分上的载荷; λ_k 为第 k 个主成分的特征值。

考虑到土壤质量不止决定于土壤内部要素,周围环境的影响也不可忽略,本文将土地利用类型和土壤类型加入到土壤指标的筛选中,利用多变量方差分析方法获取各指标的決定系数(R^2),作为两者对土壤要素的影响程度。

(4)将各指标的Norm值和 R^2 分别进行线性正态变换并相加求和,然后将各分组中最高分值10%范围内的指标作为待选,进一步检验同组中待选指标的相关性,若高度相关($r \geq 0.5$),则选取分值较高

的进入最终的MDS,否则全部进入。各要素的权重 w 即为所选指标相应分值占总分值的比例。

2.3.2 模糊逻辑模型

模型建立过程分为三个步骤:

(1)模糊化:即将经验值转变为语义变量,通过咨询专家或者根据相关标准与经验值确定要素适合某要求的数值范围。

(2)模糊规则推理:通过建立模糊逻辑函数,推算每个要素对于某标准的隶属度,并结合所有要素的隶属度,利用权重系数获取每个研究单元的综合隶属度。本文中利用的隶属度函数为“钟形曲线”,又称为语义输入,其公式为:

$$MF_{x_i} = \left[1 / \left(1 + \left((x_i - b) / d \right)^2 \right) \right] \quad (2)$$

式中 $0 < MF_{x_i} \leq 1$, MF_{x_i} 为第 i 个土壤要素 x 的隶属度值; d 为土壤要素 x 过渡区的宽度值,一般为隶属度值等于0.5时的土壤要素含量与隶属度等于1时土壤要素含量值的差; b 为土壤要素最优点的位置,即隶属度等于1时土壤要素含量值^[27,28]。而每个研究单元综合隶属度的计算公式为:

$$MF = \sum_{i=1}^n MF_{x_i} w_i \quad (3)$$

(3)去模糊化:根据研究目的和要求对各研究单元的隶属度进行分级。

3 研究结果与讨论分析

3.1 土壤要素统计特征

从表1中的变异系数看,土壤盐分为强变异,其他均为中等变异程度,土壤盐分最大值与最小值差别较大,根据国家盐碱土分级标准,研究区共有非盐碱土(全盐量 $\leq 0.1\%$)样本18个,轻度盐碱土(全盐量 $0.2\% \sim 0.4\%$)和中度盐碱土(全盐量 $0.4\% \sim 0.6\%$)样本均为27个,重盐碱土(全盐量 $0.4\% \sim 0.6\%$)样本22个,盐土(全盐量 $\geq 1\%$)样本18个,由此可见黄河三角洲大部分土壤属于盐渍化土壤的范畴,且盐渍化程度较高;而研究区土壤养分基本处于中下水平,有机质和全氮量极为缺乏。尤其土壤有机质在中等以上水平(有机质含量 $\geq 2\%$)样本个数仅为6个;有效磷和有效钾含量均正常。 $k-s$ 检验可知,除土壤盐分、土壤湿度和速效钾外,其他要素均服从正态分布。

表1 研究区土壤要素统计性特征

Table 1 The descriptive statistic of soil indices in study area

	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	偏度	峰度	K-S检验
有机质/%	0.08	3.01	1.00	0.54	54.17	1.17	1.74	0.16
TN/%	0.01	0.18	0.06	0.03	49.78	0.95	1.33	0.45
AK/(mg/kg)	47.98	394.70	131.80	70.94	53.83	1.69	3.02	0.01
AP/(mg/kg)	1.89	36.95	10.45	6.89	65.90	1.45	2.34	0.06
黏粒/%	0.00	15.50	6.30	3.43	54.43	0.10	-0.19	0.86
粉粒/%	9.26	88.47	36.83	16.87	45.81	0.64	0.02	0.53
砂粒/%	8.90	89.81	56.88	19.31	33.94	-0.53	-0.34	0.76
盐分/%	0.01	3.00	0.54	0.66	122.86	1.97	3.42	0.00
湿度/%	13.40	181.10	42.71	23.96	56.11	2.55	10.12	0.00
pH	7.65	8.82	8.16	0.24	2.99	0.26	-0.39	0.26

表2 研究区土壤要素相关性检验

Table 2 The correlation coefficients for soil indices in study area

	有机质	TN	AK	AP	黏粒	粉粒	砂粒	盐分	湿度	pH
有机质	1.00									
TN	0.46**	1.00								
AK	0.40**	0.39**	1.00							
AP	0.16	0.42**	0.22*	1.00						
黏粒	-0.07	0.32**	0.35**	0.20*	1.00					
粉粒	0.31**	0.60**	0.57**	0.14	0.66**	1.00				
砂粒	-0.25**	-0.58**	-0.56**	-0.16	-0.76**	-0.99**	1.00			
盐分	0.04	-0.02	0.24*	-0.12	-0.01	-0.06	0.06	1.00		
湿度	-0.14	-0.20*	0.16	-0.21*	-0.06	-0.02	0.02	0.35**	1.00	
pH	-0.09	-0.01	-0.15	0.03	0.18	0.23*	-0.23*	-0.10	-0.22*	1.00

注:**、*分别为在1%和5%水平下显著相关。

表3 研究区土壤要素主成分载荷

Table 3 The principal component loading matrix of soil indices in study area

	有机质	TN	AK	AP	黏粒	粉粒	砂粒	盐分	湿度	pH
主成分1	0.43	0.74	0.68	0.37	0.71	0.93	-0.94	-0.02	-0.11	0.17
主成分2	0.18	-0.04	0.48	-0.24	-0.11	0.00	0.02	0.70	0.73	-0.54
主成分3	0.64	0.39	0.12	0.50	-0.46	-0.22	0.27	-0.11	-0.35	-0.42

3.2 MDS建立

通过分析各土壤要素间的相关性,检验初选指标间的相关程度,表2显示,多个土壤要素之间存在显著或极显著相关关系,如土壤粉粒含量与其他5个土壤要素在0.01水平上存在极其显著相关性,若均用于土壤质量评价中,会造成较大的数据冗余,故有必要对指标进行优化筛选。

主成分分析结果显示前3个主成分特征值大于1,各要素在前3个主成分的载荷如表3,根据前述分组方法,将所有要素共分为5组:第一组包括TN、

AK、黏粒、粉粒和砂粒;第二组包括盐分和土壤湿度;第三组为pH;第四组为有机质;第五组为AP。

利用各主成分的特征值和各要素在主成分上的载荷,计算各要素的矢量常模值,同时利用SPSS对各要素进行多变量方差分析,获取不同土地利用类型和土壤类型上的决定系数。然后完成要素的筛选,如表4所示,最终确定的MDS包括:TN、AP、AK、土壤盐分、有机质和pH。

3.3 模糊逻辑模型构建

利用有限的采样点完成研究区的土壤质量评

表 4 MDS 土壤指标筛选结果

Table 4 The results of MDS

分组	土壤要素	Norm	决定系数		正态变换			分值	是否入选
			土地利用	土壤类型	Norm	土地利用	土壤类型		
1	TN	1.50	0.03	0.10	0.82	1.00	0.13	1.95	是
1	AK	1.44	0.19	0.02	0.79	0.21	0.97	1.97	是
1	黏粒	1.47	0.11	0.02	0.81	0.23	0.56	1.60	否
1	粉粒	1.80	0.00	0.03	0.98	0.25	0.02	1.25	否
1	砂粒	1.82	0.02	0.02	1.00	0.17	0.10	1.27	否
2	盐分	0.92	0.19	0.06	0.50	0.57	1.00	2.07	是
2	湿度	1.05	0.13	0.00	0.58	0.01	0.66	1.25	否
3	pH	0.91	0.06	0.05	0.50	0.47	0.31	1.29	是
4	有机质	1.15	0.11	0.01	0.63	0.06	0.57	1.26	是
5	AP	0.98	0.14	0.09	0.54	0.88	0.75	2.16	是

价,需对各要素进行空间扩展,根据各要素特点及前期学者的研究,对不同要素选取不同的空间插值方法,土壤盐分插值选用地理加权回归模型^[29-32],有机质插值选用协同克里格插值方法,而其他要素插值均采用普通克里格方法。对AK进行对数变换使其符合正态分布,从而满足克里格插值的要求。运用地统计软件GS+7.0获取各要素在克里格插值中的参数,并利用ArcGIS完成插值;各要素插值误差以均方根误差表示如表5,都具有较好的插值精度,插值结果如图2。

表 5 筛选后各土壤要素插值误差

Table 5 The interpolation errors of the selected soil indices

要素类型	盐分	有机质	TN	AP	AK	pH
均方根误差	0.30	0.01	0.03	0.35	0.24	0.09

图2中显示,各要素空间分布具有规律性,土壤盐分含量由沿海向内陆逐渐降低,河流沿岸盐分含量较其他区域低,TN和AP含量则从沿海到内陆逐渐增加,AK含量和pH值在整个研究区内较为平均,而有机质含量在研究区中部含量较高,东部和西部稍低,这与研究区高程、地下水位、植被的分布以及人类活动有较大关系;研究区内部地势高,受海水侵蚀弱,且地下水位较沿海深,盐分向地表迁移受阻力大,导致土壤盐分含量低,同时由于内陆农田较多,土壤养分含量相对高,而西南部有机质含量的降低则由于该区域土壤质地多为砂粒,不利于有机质的积累,矿化分解较快,同时该区域居住用地较多,也不利于有机质的积累存储。

根据全国第二次土壤普查分类标准和相关专家对该地区土壤质量标准的建议方案^[26],划分出适用于研究区的各指标的范围,并按照模糊逻辑函数设计出相应的参数b和d(表6)。根据各要素函数和含量大小,获取其隶属度结果(图3,见第1281页)。图中可以看出各要素的隶属度与含量具有相似的空间分布规律。

表 6 研究区各土壤要素适宜性范围

Table 6 The optimum ranges of the chosen soil indices in study area

土壤要素	适宜范围	b	d	要素趋向
TN/%	0.01~0.075	0.075	0.025	正向型
AP/(mg/kg)	5~25	25	15	正向型
AK/(mg/kg)	30~200	200	100	正向型
pH	7.5~9.0	7.5	0.75	负向型
盐分/%	0.1~0.6	0.1	0.3	负向型
有机质/%	0.6~1.5	1.5	0.5	正向型

3.4 土壤质量评价

对于研究区土壤质量,本文利用模糊集加权综合方法^[33,34]。本文采用Norm值与土壤环境影响程度值结合对各土壤要素赋权重,即以表4中进入最小数据集的各要素的分值为基础,权重即为各要素分值占总分值的比例(表7,见1282页),既体现了土壤要素本身在土壤质量中的重要性,又结合了对土壤要素有关的外部影响,研究区土壤质量隶属度分布如图4所示(见1282页)。

对土壤质量的分级,本文参考徐建明对全国潮土类型的质量分级建议方案^[26]以及与研究区相关的文献资料,将土壤质量分为6级,一级到六级土壤质

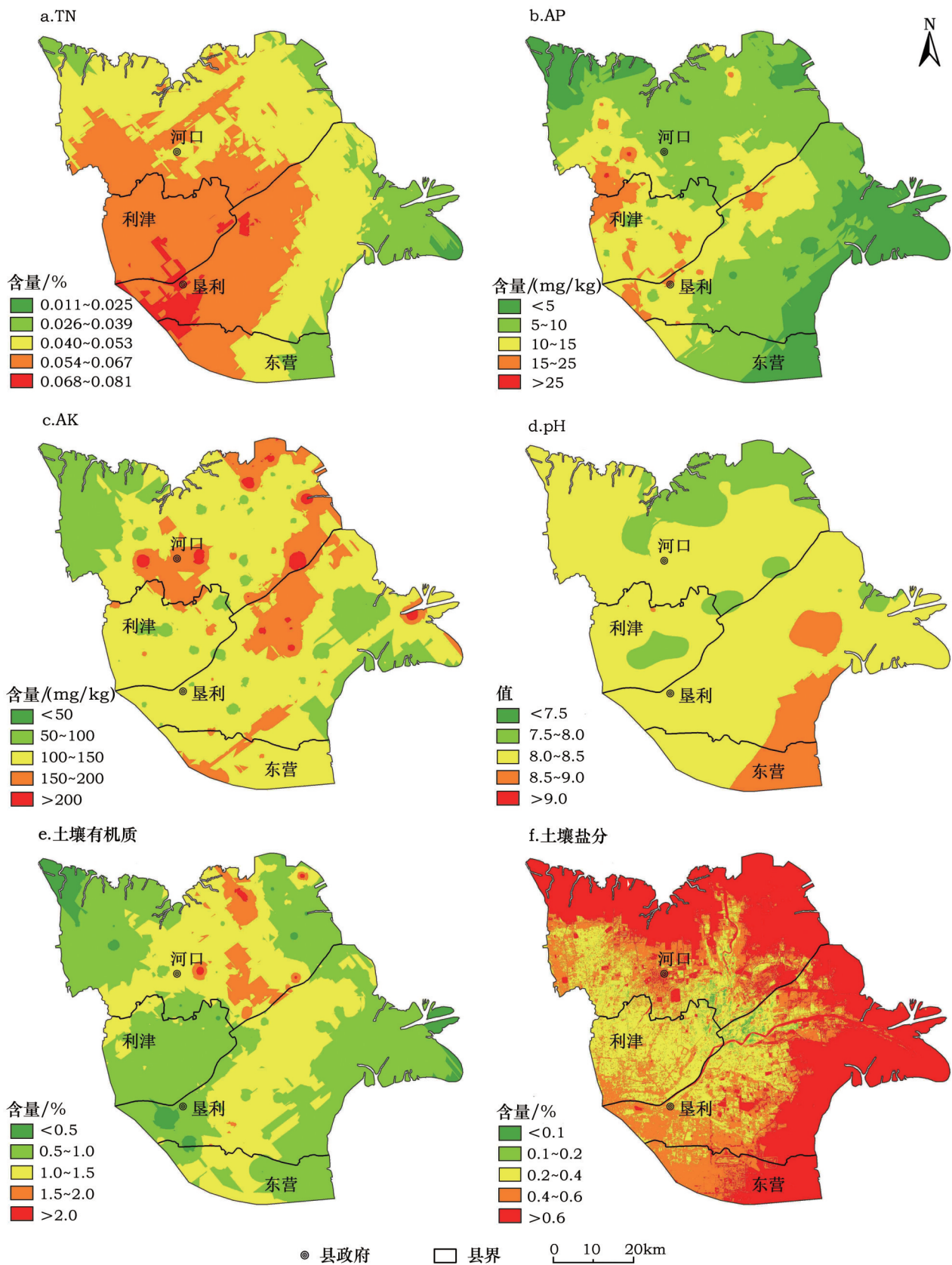


图2 2014年黄河三角洲各土壤要素插值结果

Figure 2 The interpolation results of the chosen soil indices of the Yellow River Delta in 2014

2016年7月

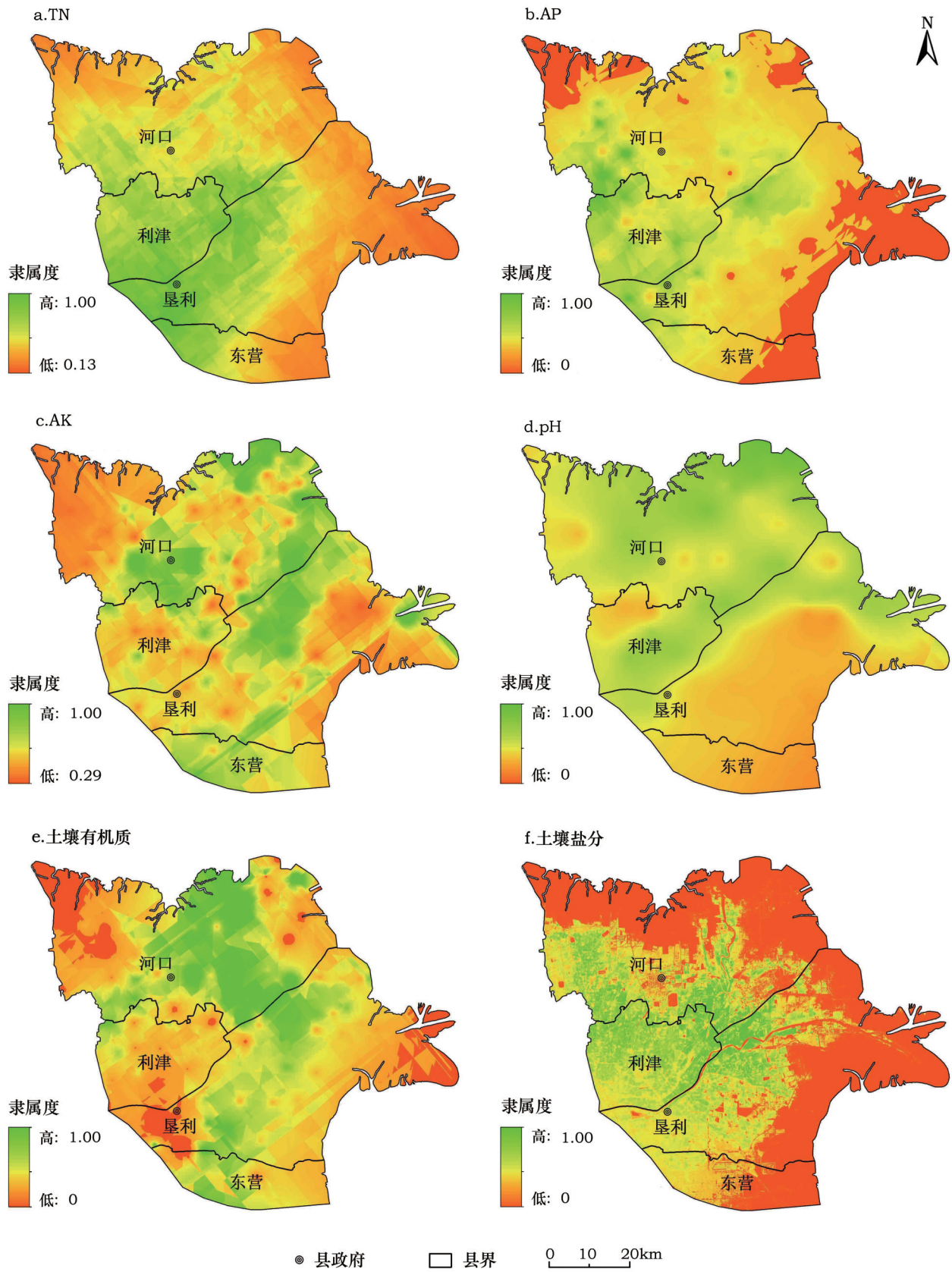


图3 研究区各土壤要素隶属度

Figure 3 The memberships of the chosen soil indices in study area

表7 土壤要素权重分配

Table 7 The weights of the chosen soil indices

要素	分值	权重
TN	1.95	0.18
AP	2.16	0.20
AK	1.97	0.18
pH	1.29	0.12
盐分	2.07	0.19
有机质	1.26	0.12

量隶属度范围分别对应为: ≥ 0.7 、 $0.6 \sim 0.7$ 、 $0.5 \sim 0.6$ 、 $0.4 \sim 0.5$ 、 $0.3 \sim 0.4$ 以及 ≤ 0.3 , 最终的等级划分结果如图4。

从图4可以看出, 土壤质量等级空间分布规律性强, 研究区中部及西部等级高, 土壤质量好, 而东部和北部则以五级和六级土壤为主, 整体上从沿海向内陆土壤质量逐渐增高, 与野外调查情况相符, 可信度高; 研究区北部1200自然保护区内植被茂盛, 有大片的乔木和灌木丛, 堤坝对海水入侵起到阻挡作用, 有效降低了盐分含量和pH值, 枯枝落叶的累积使得各土壤养分含量较其他沿海地区高, 最终导致土壤质量偏高。经统计, 研究区各土壤等级的面积比例依次为2.76%、16.18%、31.22%、19.04%、13.55%和17.25%, 三级土壤面积最大, 一级土壤面积最少, 只在刁口河与黄河交界处有少量分布; 从土地利用角度看(表8和表9), 园地的土壤质量平均值最高, 但总面积较少, 主要为二级土壤;

其次是农田, 土壤质量平均值为0.58, 主要为三级土壤, 其前三级土壤总面积占农田总面积的83.05%; 与农田相似, 草地和林地的分布也以前三级土壤为主; 近海区域如沿海滩涂受海水和人为影响, 导致严重的土壤盐渍化, 土壤质量平均值低, 以五级和六级土壤为主。

为便于分析, 将农田、草地、林地和园地在低等级土壤上的空间分布状况以及盐碱地和滩涂等在各土壤等级上的空间分布状况展示于图5, 图5所示研究区的土地资源存在较大的不合理性, 仍有大量农田分布于低质量土壤, 图5农田土壤基本

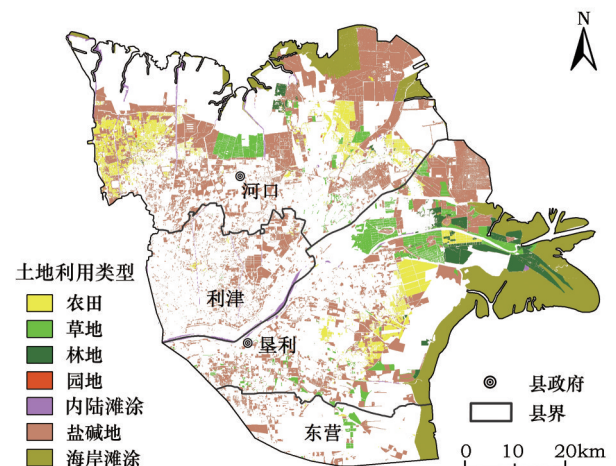
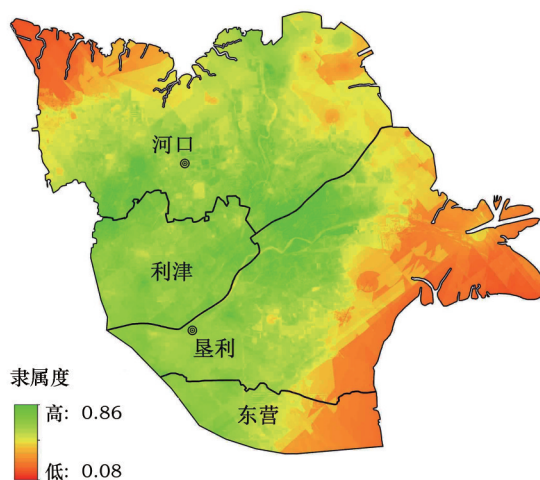


图5 黄河三角洲主要土地利用类型空间分布状况

Figure 5 The spatial distribution of main land use types in the Yellow River Delta

a. 土壤质量隶属度



b. 土壤质量分级

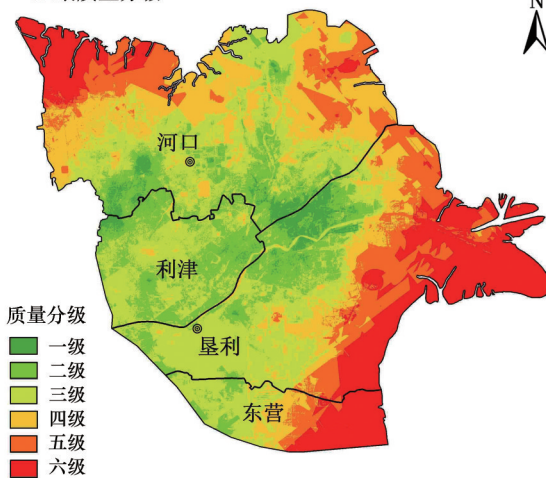


图4 2014年黄河三角洲土壤质量评价结果

Figure 4 The soil quality evaluation results of the Yellow River Delta in 2014

2016年7月

表8 主要土地利用类型土壤质量平均值

Table 8 The mean value of soil quality for different land use types

土地利用	土壤质量隶属度平均值	土地利用	土壤质量隶属度平均值
农田	0.58	盐碱地	0.49
草地	0.52	内陆滩涂	0.45
林地	0.47	沿海滩涂	0.29
园地	0.61		

全属于四级,在低级土壤上开垦农田,作物生长受限,同时由于土壤少了原有植被的覆盖,呈裸露状态,受气候如蒸发作用影响,使得地下水携带盐分向地表聚集,盐渍化加重,又进一步限制了作物生长,且在实地调查中发现这些农田区域均存在撂荒现象,在高质量土壤上的农田受此影响就较小。但在高质量土壤上仍有较多土地闲置,主要分布于更靠近内陆的垦利县和利津县内,如表9中盐碱地在前三级土壤上的面积占盐碱地总面积的48.64%,实地调查中发现多为各类规划建设临时占用的各类型土地以及一些农用地实施的休耕轮耕方式导致的临时性闲置土地,对这些土地的再利用需要根据具体的生态环境现状和生态功能特点,设计出合理的土地资源开发和优化配置方案,实现集约利用。

4 结论

本文通过建立最小数据集,完成了2014年黄河三角洲土壤质量评价指标的筛选,获取了包括pH、TN、AP、AK、有机质和土壤盐分等6项指标;同时利用模糊逻辑理论获取各指标的隶属度,对研究区进行了土壤质量评估,最终结果显示研究区土壤质量等级分布具有规律性,从沿海到内陆土壤质量逐渐

增高;三级土壤面积最大,整体上研究区土壤质量处于三级以上,其中农田、园地、草地和林地主要分布于中上水平土壤,但也有一部分处于低等级土壤,且优质土壤中仍存在较多的未利用地,故需要根据研究区实际进行合理的土地资源配置。一方面可将分布于低等级土壤上的农田和园地等非自然利用类型作调整,使其恢复自然状态,并加以人工干预如化学、生物和其他工程措施等,努力改善这部分土壤质量;另一方面是对依然闲置的土壤质量较高的土地,结合区域经济和生态环境规划,开发成农田、园地及其他种植用地,尽可能减少建设用地的占用,实现经济和生态环境的平衡发展。

与前期学者研究相比,本文对黄河三角洲所做的土壤质量评估在空间分布趋势上具有相似性,但本文结果更为详细,包括不同土地利用类型在不同土壤等级上的分布情况均有表现;但本文也存在一些不足,如在预选的土壤评价指标中缺少生物指示性要素,使得整个评价体系不完整,还需要进一步完善,另外本文下一步需要研究的是如何结合黄河三角洲生态环境和土地利用现状实现不同土壤类型上的土地资源优化配置。

参考文献(References):

- [1] 黄勇,杨忠芳. 土壤质量评价国外研究进展[J]. 地质通报, 2009, 28(1): 130-136. [Huang Y, Yang Z F. Recent research progress of overseas soil quality evaluation[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(1): 130-136.]
- [2] 汪媛媛,杨忠芳,余涛. 土壤质量评价研究进展[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(36): 22617-22622. [Wang Y Y, Yang Z F, Yu T.

表9 各土地利用类型在不同土壤级别上的面积分布状况

Table 9 The area of different land use types in each soil quality grade (km²)

土壤级别 土地类型	一级	二级	三级	四级	五级	六级	总计
农田	70.43	401.08	453.69	145.74	35.97	7.07	1 113.98
草地	19.09	21.38	53.99	42.76	19.45	10.89	167.56
林地	10.31	40.40	48.58	20.55	14.84	55.98	190.65
园地	1.48	10.80	8.03	0.99	0.01	-	21.31
盐碱地	12.99	124.07	305.27	248.92	165.59	52.57	909.41
内陆滩涂	0.23	5.89	10.08	5.20	2.49	8.93	32.83
沿海滩涂	-	3.76	50.60	45.58	55.82	367.93	523.69

- Research progress of soil quality evaluation[J]. *Journal of Anhui Agri. Sci.*, 2011, 39(36): 22617-22622.]
- [3] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 等. 土壤质量与土壤质量指标及其评价[J]. *生态学报*, 2006, 26(3): 901-913. [Liu Z F, Fu B J, Liu G H, et al. Soil quality: Concept, indicators and its assessment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 901-903.]
- [4] 杨劲松, 姚荣江. 苏北海涂围垦区土壤质量综合评价研究[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(3): 410-415. [Yang J S, Yao R J. Evaluation of soil quality in reclaimed coastal regions in North Jiangsu Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(3): 410-415.]
- [5] 姚荣江, 杨劲松, 陈小兵, 等. 苏北海涂围垦区土壤质量模糊综合评价[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(6): 2019-2027. [Yao R J, Yang J S, Chen X B, et al. Fuzzy synthetic evaluation of soil quality in coastal reclamation region of North Jiangsu Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(6): 2019-2027.]
- [6] 姚荣江, 杨劲松, 曲长风, 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.]
- [7] Hou W G, Jiang C S, Xiong Q W, et al. Evaluation of soil quality based on GIS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, 28(1): 60-64.
- [8] Sun Y L, Guo P, Liu H B, et al. Comprehensive evaluation of soil fertility based on GIS (Geographic Information System) [J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2003, 25(2): 176-179.
- [9] Zhang H, Zhang G L, Qi Z P, et al. Systematic assessment of soil quality at farm level in tropical area of china[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(2): 186-193.
- [10] Andrews S S, Karlen D L, Mitchell J P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2002, 90(1): 25-45.
- [11] Rezaei S A, Gilkes R J, Andrews S S. A minimum data set for assessing soil quality in rangelands[J]. *Geoderma*, 2006, 136(1-2): 229-234.
- [12] Rodrigues A C, Hoogmoed W, Brussaard L. Soil quality assessment in rice production systems: Establishing a minimum data set [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(2): 623-630.
- [13] Rahmanipour F, Marzaioli R, Bahrami H A, et al. Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran [J]. *Ecological Indicators*, 2014, 40(5): 19-26.
- [14] Wang Z, Chang A C, Wu L, et al. Assessing the soil quality of long-term reclaimed wastewater-irrigated cropland[J]. *Geoderma*, 2003, 114(3-4): 261-278.
- [15] Volchko Y, Norrman J, Rosen L, et al. A minimum data set for evaluating the ecological soil functions in remediation projects[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(11): 1850-1860.
- [16] 李桂林, 陈杰, 孙志英, 等. 基于土壤特征和土地利用变化的土壤质量评价最小数据集确定[J]. *生态学报*, 2007, 27(7): 2715-2724. [Li G L, Chen J, Sun Z Y, et al. Establishing a minimum dataset for soil quality assessment based on soil properties and land-use changes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2715-2724.]
- [17] 李桂林, 陈杰, 檀满枝, 等. 基于土地利用变化建立土壤质量评价最小数据集[J]. *土壤学报*, 2008, 45(1): 16-25. [Li G L, Chen J, Tan M Z, et al. Establishment of a minimum dataset for soil quality assessment based on land use change[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(1): 16-25.]
- [18] 张世文, 叶回春, 胡友彪, 等. 多时空尺度的土壤质量评价最小数据集的建立[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(17): 7487-7492. [Zhang S W, Ye H C, Hu Y B, et al. Establishment of minimum data set for soil quality assessment with multiple spatial and temporal scales[J]. *Journal of Anhui Agri. Sci.*, 2013, 41(17): 7487-7492.]
- [19] Chen Y D, Wang H Y, Zhou J M, et al. Minimum data set for assessing soil quality in farmland of northeast China[J]. *Pedosphere*, 2013, 23(5): 564-576.
- [20] 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, (3): 682-689. [Gong L, Zh 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, (3): 682-689.]
- [21] 刘金山, 胡承孝, 孙学成, 等. 基于最小数据集和模糊数学法的水旱轮作区土壤肥力质量评价[J]. *土壤通报*, 2012, (5): 1145-1150. [Liu J S, Hu C X, Sun X C, et al. Evaluation of soil fertility quality with a minimum data set and fuzzy logic in the paddy-upland rotation region of Hubei Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, (5): 1145-1150.]
- [22] 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. [Li X J, Liu N, Zhang W W, et al. Evaluation index systems of soil quality in the Yellow River Delta[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(1): 145-148.]
- [23] 单奇华, 张建锋, 唐华军, 等. 质量指数法表征不同处理模式对滨海盐碱地土壤质量的影响[J]. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1095-1103. [Shan Q H, Zhang J F, Tang H J, et al. Characterization of effects of management modes on quality of coastal salt-affected soils with quality index[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(6): 1095-1103.]
- [24] 王恒振. 基于遥感和GIS的滨海盐渍土区耕地质量评价研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013. [Wang H Z. Cultivated Land

2016年7月

- Quality Evaluation in the Coastal Saline Soil Region Based on RS and GIS[D]. Taian:Shandong Agricultural University, 2013.]
- [25] Yao R J, Yang J S, Gao P, et al. Determining minimum data set for soil quality assessment of typical salt-affected farmland in the coastal reclamation area[J]. *Soil & Tillage Research*, 2013, 128: 137-148.
- [26] 徐建明, 张甘霖, 谢正苗, 等. 土壤质量指标与评价[M]. 北京: 科学出版社, 2010. [Xu J M, Zhang G L, Xie Z M, et al. Soil Indices and Soil Assessment[M]. Beijing: Science Press, 2010.]
- [27] Baja S, Chapman D M, Dragovich D. A conceptual model for defining and assessing land management units using a fuzzy modeling approach in GIS environment[J]. *Environmental Management*, 2002, 29(5): 647-661.
- [28] Joss B N, Hall R J, Sidders D M, et al. Fuzzy-logic modeling of land suitability for hybrid poplar across the Prairie Provinces of Canada[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, 141 (1-3): 79-96.
- [29] Huang J L, Huang Y L, Pontius R G, et al. Geographically weighted regression to measure spatial variations in correlations between water pollution versus land use in a coastal watershed[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2015, 103: 14-24.
- [30] Imran M, Stein A, Zurita-Milla R. Using geographically weighted regression kriging for crop yield mapping in West Africa[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2015, 29(2): 234-257.
- [31] Kumar S, Lal R, Liu D S. A geographically weighted regression kriging approach for mapping soil organic carbon stock[J]. *Geoderma*, 2012, 189: 627-634.
- [32] Wang K, Zhang C R, Li W D. Predictive mapping of soil total nitrogen at a regional scale: A comparison between geographically weighted regression and cokriging[J]. *Applied Geography*, 2013, 42 (8): 73-85.
- [33] 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[J]. 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[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(2): 176-183.]
- [34] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区侵蚀土壤质量评价[J]. 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[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(3): 285-293.]

Soil quality assessment of the Yellow River Delta based on MDS and Fuzzy Logic Model

WU Chunsheng^{1,2}, LIU Gaohuan¹, HUANG Chong^{1,3}, LIU Qingsheng¹, GUAN Xudong^{1,2}

(1. State Key Lab. of Resources and Environment Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resource Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The Yellow River Delta has abundant land resources, however, because of long-term exposure to harsh natural conditions and improper human activity, the soil has degenerated and affected agricultural development and ecological protection. This study selected multiple physical and chemical indicators and principal component analysis to construct a minimum data set to determine indicators for soil quality assessment in the Yellow River Delta. Fuzzy Logic Model was used to finish the soil quality assessment and we analyzed the spatial distribution of main land use types across different soil quality grades. The results show that the minimum data set include six soil indices: TN, AP, AK, soil organic matter, all salt and pH. The assessment result maps for soil index values all showed spatial distribution regularities, soil salt content reduced gradually from coasts to inland, and TN and AP had the opposite characteristics. AK and pH showed an even distribution around the study area and soil organic matter content was high in the central area and reduced gradually to the edges. The soil quality value was higher in inland than coastal areas, most of the study area was of a level 3 grade according to the classifications of integrated fertility indexes for fluvo-aquic soils in China. Most farmland, forest and garden had high-class soil, but some were still distributed among level 5 or level 6 and lots of unused land had high soil levels, indicating that land resources in the study area have not been planned appropriately.

Key words: minimum data set; soil quality; Fuzzy Logic Model; Yellow River Delta