

基于最小数据集的东北风沙土农田 耕层土壤质量评价指标

乔云发¹, 钟鑫¹, 苗淑杰¹, 李琪¹, 陆欣春²

(1. 南京信息工程大学 应用气象学院, 南京 210044; 2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 哈尔滨 150081)

摘要: 2015年10月—2017年10月玉米收获期, 在位于东北风沙土区的黑龙江省杜尔伯特蒙古自治县境内, 调查采集了53个样点耕层土壤, 测定了21项土壤理化性状指标和玉米产量。采用聚类分析法建立了东北风沙土农田耕层质量诊断最小数据集(MDS), 利用全量数据集(TDS)、土壤质量指数(SQI-TDS)、玉米产量、最小数据集土壤质量指数(SQI-MDS)对风沙土耕层特征进行了分析评价。SQI-TDS、玉米产量与SQI-MDS呈极显著正相关(r^2 分别为0.451 5, 0.557 9), 这表明MDS适合替代TDS对风沙土农田耕层土壤质量进行评价。调查区域东北风沙土平均土壤质量指数为0.46, 基于MDS, 根据土壤质量评价指数土壤地力划分为5级, 野外调查53个点中34.0%样点土壤属于地力Ⅳ级, 52.8%样点土壤属于地力Ⅲ级, 11.2%样点土壤属于地力Ⅱ级, 研究区域没有Ⅰ级和Ⅴ级地力分布。调查区域平均玉米产量7.6 Mg/hm², 根据玉米产量土壤地力划分5级, 野外调查53个点中1.9%样点属于地力Ⅴ级, 35.8%样点土壤地力属于Ⅳ级, 41.5%样点土壤地力属于Ⅲ级, 18.9%样点土壤地力属于Ⅱ级, 1.9%样点土壤地力属于Ⅰ级。利用最小数据集SQI-MDS能够较准确地定量描述风沙土农田耕层质量, 为东北风沙土农田耕层土壤质量诊断、合理耕层评价提供理论依据。

关键词: 东北风沙土; 土壤质量; 合理耕层; 最小数据集

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)04-0132-07

Evaluation Indicators of Soil Quality in Plough Layer of Aeolian Sandy Land in Northeast China Based on Minimum Data Set

QIAO Yunfa¹, ZHONG Xin¹, MIAO Shujie¹, LI Qi¹, LU Xinchun²

(1. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Sciences & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China)

Abstract: In maize harvest periods in Octobers of years from 2015 to 2017, soil samples of plough layer in aeolian sandy land were collected from 53 sites located in Durbert Mongolian Autonomous County, Heilongjiang Province, northeast China. 21 chemical and physical indicators and maize yields were determined. The minimum data set (MDS) was constructed by cluster analysis, and soil quality characteristics of plough layer were evaluated with total data set (TDS), SQI-TDS, maize yield and SQI-MDS. The results showed that coefficients of determination (r^2) between SQI-MDS and SQI-TDS, maize yield were 0.451 5 and 0.557 9, respectively, indicating that MDS could substitute TDS to evaluate the quality of plough layer soil of aeolian sandy land. Soil fertility was divided into five grades based on MDS with mean value of 0.46, 34.0% of 53 sampling site belonged to grade Ⅳ, 52.8% of them was grade Ⅲ, and 11.2% was grade Ⅱ, no sites fell into in grade Ⅰ and grade Ⅴ. Based on maize yield with mean value of 7.6 Mg/hm², soil fertility was also be divided into five grades, the sites belonging to grade Ⅰ, grade Ⅱ, grade Ⅲ, grade Ⅳ and grade Ⅴ were 1.9%, 18.9%, 41.5%, 35.8% and 1.9% of 53 sampling sites, respectively. All these indicated that SQI-MDS could accurately describe the quality of plough layer in aeolian sandy land, and provide a theoretical basis for soil quality diagnosis and reasonable tillage evaluation of farmland in northeast China.

Keywords: northeast aeolian sandy soil; soil quality; reasonable plough layer; minimum data set

东北风沙土区农田是东北三省西部与内蒙接壤地区分布最为广泛的耕地土壤类型^[1]。土壤以沙砾为主、黏粒含量少、保水保肥能力差、土壤贫瘠、有机质缺乏、易干旱。农业生产过程中小型农机具占据主导地位,长期以旋代耕造成土壤紧实、耕层变浅、犁底层增厚、通透性变差等诸多耕层结构问题,是该区域风沙土农田耕层质量下降的突出问题^[2]。近年来人们越来越关注耕层土壤质量问题,因为对土壤质量的深入了解是土壤可持续管理的基础。耕层土壤质量是土壤的健康、肥力和环境的综合体现,能够比较全面地反映土壤生产力^[3]。准确提取适宜评价指标是耕层土壤质量评价的重要环节,而在评价指标筛选中,除了利用原始变量作为评价指标外,Larson 和 Pierce 提出采用土壤参数最小数据集(MDS)来评价指标间的相互关系^[3-4]。最小数据集是从大量土壤质量评价参数中筛选出相对独立、影响土壤质量的敏感性指标,建立可以反映土壤质量最少的指标参数的集合,在土壤质量评价及监测工作中得到了广泛的应用^[5]。

土壤质量评价研究已在国内外普遍开展,一些评价方法如灰色系统理论、模糊数学、主成分分析、人工神经网络以及隶属度函数等已得到广泛应用,但评价过程中参数的选择仍较为模糊,尤其是涉及评价因子最小数据集的确定^[6-9]。土壤最小数据集评价指标的建立是土壤质量评价的基础和重要环节^[9]。最小数据集建构有多种方法,常用的方法有聚类分析、主成分分析、相关性分析、Norm 值提取指标^[10]。不同最小数据集建构方法确定的评价指标差异较大,因此选取合适最小数据集建构方法进行评价指标体系的研究,使评价指标科学化、合理化显得尤为重要^[11]。近年来,关于土壤质量评价的研究已成为热点。国内外学者分别对亚热带的农业试验田、酸性稻田、水旱轮作农田、冷浸田、绿洲、黄土高原、人工林等建立了最小数据集^[5,9-17],而关于东北风沙土农田耕层土壤质量评价指标筛选和最小数据集的研究少见报道。本研究以黑龙江省西部风沙土区农田耕层土壤为靶区,基于耕层土壤理化指标,通过聚类分析建立最小数据集,探讨应用最小数据集衡量风沙土农田耕层土壤结构特征的可行性和适用性,研究结果可为我国东北风沙土区农田合理耕层构建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于黑龙江省杜尔伯特蒙古族自治县,地处温带半干旱草原地带,地理坐标为东经 123°45′—124°42′,北纬 45°53′—47°81′,南北长 103 km,东西宽

60 km,土壤以风沙土为主,四季分明,年均降水量 400 mm,降水主要集中在 7—9 月。

1.2 样品采集与分析

1.2.1 样品采集 试验于 2015 年 10 月—2017 年 10 月,在黑龙江省杜尔伯特蒙古族自治县(以下简称杜蒙县),采用“S”形多点混合采样,进行耕层土壤结构指标和玉米产量的测量,共取 53 个样点(图 1),采集 0—20 cm 耕层土壤样品,去除植物根系和石块,风干后用于理化性质测定。



图1 杜蒙县域内样点分布

1.2.2 土壤理化性质测定 共测定土壤理化性状指标 21 项,其中 pH 值、碱解氮、速效磷、速效钾、全氮、速效磷、速效钾、有机质、土壤容重、阳离子交换量(CEC)、土壤机械组成、平均重量直径(MWD)、土壤含水量、田间持水量和土壤孔隙度参照《土壤农业化学分析方法》进行各项指标的分析测定^[18];耕层和犁底层厚度采用钢卷尺测量、土壤渗透速率采用环刀法、耕层硬度采用硬度计田间原位测定,对每个所测指标进行 3 次平行测定,结果取其平均值;玉米产量测量采用多点采样测量平均。

1.3 土壤质量最小数据集建立

研究选用的 21 项评价指标,综合考虑土壤基础肥力和物理性质。在 SPSS 22 中运用 Pearson 距离对评价指标进行 R 型聚类分析。根据相关分析,每组中相关性显著的指标可相互代替,选择易度量、重现性好的指标,剔除冗余指标,选择具有代表性且相互独立的指标进入最小数据集^[3,16]。

1.4 耕层土壤质量指数

耕层土壤质量指数是对耕层土壤结构评价指标的集成,耕层土壤指数越大,则土壤耕层结构越趋于合理,土壤生产力越高。计算耕层土壤质量指数对土壤生产力进行评价,可为土壤生产力状况和合理耕层构建提供依据。基于不同最小数据集,由主成分分析获得各指标权重,计算土壤耕层指数,计算

公式如下^[5]：
$$SQI=\sum A_i \cdot X'_i \tag{1}$$

式中： A_i 是各个评价指标权重； X'_i 是各个评价指标隶属度值。

由于评价指标对作物的作用方式不同,评价指标得分隶属函数类型不同,隶属度函数一般分为升型和降型(表 1)。

表 1 耕层土壤质量评价指标隶属函数

隶属函数类型	计算公式	评价指标
升型隶属函数	$X'(x)=\begin{cases} 0.1 & x\leq x_1 \\ 0.9(x-x_1)/(x_2-x_1)+0.1 & x_1<x<x_2 \\ 1.0 & x\geq x_2 \end{cases}$	耕层厚度、pH 值、碱解氮、速效磷、速效钾、全氮、全钾、全磷、有机质、阳离子交换量、黏粒、平均重量直径、含水量、田间持水量、孔隙度、渗透速率
	x_2, x_1 为指标阈值上下限; x 为指标实测值	
降型隶属函数	$X'(x)=\begin{cases} 0.1 & x\geq x_2 \\ 0.9(x-x_1)/(x_2-x_1)+0.1 & x_1<x<x_2 \\ 1.0 & x\leq x_1 \end{cases}$	粗沙粒、细沙、容重、硬度、犁底层厚度
	x_2, x_1 为指标阈值上下限; x 为指标实测值	

2 结果与分析

2.1 东北风沙土耕层土壤属性描述性统计分析

耕层土壤质量一般采用土壤理化学指标反映,耕层土壤属性特征差异明显(表 2)。本研究选取 21 项耕层结构因子作为评价指标,犁底层厚度、耕层厚度、pH 值、田间持水量、土壤孔隙的变异系数 12.98%~15.36%,变异程度较低,接近不敏感水平(CV<10%),符合农业

生产耕层浅、犁底层厚、蓄水能力差、通透性低的现状。碱解氮、全氮、有机质、细沙、硬度、渗透速率为中敏感度指标(CV 为 31.91%~41.91%),是耕层土壤质量调控与恢复的主要目标。全磷、容重和粗沙粒的变异系数 CV<10%,属于相对稳定指标,是维护耕层土壤结构稳定的主要因素。玉米产量为 4.23~11.76 t/hm²,变异系数为 24.21%,可见风沙土农田生产力空间变异性较大。K-S 检验结果表明,各项指标均服从正态分布($p<0.05$)。

表 2 东北风沙土农田耕层质量评价土壤参数统计特征

土壤参数	代码	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%	偏度	峰度	K-S 检验
犁底层厚度/cm	X_1	5.0	13.0	10.8	1.65	15.36	-0.63	1.53	0.177
耕层厚度/cm	X_2	15.0	23.4	18.8	2.44	12.98	0.49	-0.89	0.173
pH 值	X_3	5.42	8.65	7.43	1.01	13.58	-0.43	-1.35	0.216
碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	X_4	21.55	110.44	62.94	21.16	33.62	0.09	-0.17	0.077
速效磷/(mg·kg ⁻¹)	X_5	5.59	24.52	13.84	3.86	27.90	0.44	0.74	0.089
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	X_6	84.70	170.70	109.60	23.28	21.25	0.97	0.07	0.181
全氮/(g·kg ⁻¹)	X_7	0.41	2.36	1.00	0.40	39.68	1.28	2.64	0.136
全钾/(g·kg ⁻¹)	X_8	23.58	28.37	25.87	1.05	4.08	0.00	0.81	0.170
全磷/(g·kg ⁻¹)	X_9	0.28	0.61	0.41	0.08	20.05	0.58	-0.09	0.109
有机质/(g·kg ⁻¹)	X_{10}	5.30	19.76	10.93	3.68	33.65	0.43	-0.37	0.071
阳离子交换量/(cmol·kg ⁻¹)	X_{11}	6.31	14.19	10.12	2.15	21.20	0.31	-1.25	0.192
粗沙粒/%	X_{12}	71.90	83.24	78.42	2.51	3.20	-0.48	0.18	0.082
细沙粒/%	X_{13}	0.93	11.03	5.62	2.20	39.12	-0.20	0.07	0.089
黏粒/%	X_{14}	10.07	23.25	15.96	3.64	22.82	0.51	-0.60	0.133
平均重量直径/mm	X_{15}	0.31	0.83	0.55	0.14	24.97	0.05	-0.76	0.065
容重/(g·cm ⁻³)	X_{16}	1.06	1.37	1.23	0.07	5.87	-0.34	-0.54	0.093
硬度/(kg·cm ⁻²)	X_{17}	32.97	124.68	64.35	20.54	31.91	0.75	0.21	0.096
含水量/%	X_{18}	7.29	18.69	10.89	3.05	27.96	1.22	0.88	0.190
田间持水量/%	X_{19}	18.64	29.79	22.23	2.93	13.18	0.91	0.08	0.126
孔隙度/%	X_{20}	31.39	52.47	40.75	5.40	13.26	0.38	-0.36	0.135
渗透速率/(mm·min ⁻¹)	X_{21}	0.91	6.97	3.31	1.39	41.91	1.01	1.19	0.201
玉米产量/(t·hm ⁻²)	Y	4.23	11.76	7.56	1.83	24.21	0.14	-0.57	0.073

2.2 风沙土农田耕层最小数据集(MDS)建立

运用 SPSS 22 中的聚类分析法中 R 型聚类,对全量数据集 21 项评价指标进行分类。图 2 表明,在聚合水平 10,评价指标划分为 6 类,第 1 类为碱解氮、速效钾、全氮、全钾、有机质、阳离子交换量、黏粒、含水量、田间持水量和土壤孔隙度表征土壤基础地力。由表 3 可见,土壤有机质与碱解氮(0.763**)、全氮(0.594**)、速效钾(0.696**)、全磷(0.530**)、阳离子交换量(0.457*)、含水量(0.720**)、田间持水量(0.618**)、土壤孔隙度(0.520**)均为高度相关,提高有机质含量,可以改善土耕层土壤保水保肥能力,选择有机质进入最小数据集。风沙土黏粒含量与 21 项评价指标中 14 项指标高度相关(表 3),一般风沙土黏粒含量直接影响耕层土壤保水保肥能力评价,是反映风沙土质量的重要指标,则黏粒含量进入 MDS。第 2 类为耕层厚度和平均重量直径,表征耕层土壤基本结构性状,耕层厚度与平均重量直径呈极显著相关(0.366**),耕层厚度是土壤生产力的基本限制条件,前人研究表明土壤质量评价指标中耕层厚度累积使用频率达 50%^[3],是反映土壤质量的重要指标,则耕层厚度进入 MDS。第 3 类为速效磷和硬度,速效磷含量的变化可以反映土壤质量的变化,硬度是反映土壤耕性的重要指标,因此速效磷和硬度两者都进入最小数据集 MDS。犁底层厚度、pH 值和渗透速率为第 4 类,表征犁底层特性和土壤酸碱度,土壤渗透速率与犁底层厚度存在相关性(0.268*),犁底层厚度可以表征渗透速率部

分信息,犁底层厚度也是合理耕层评价重要指标,选择犁底层厚度进入 MDS,pH 值是衡量土壤酸碱度的主要指标,在土壤质量评价使用率达 90%^[3],因此选择 pH 值进入 MDS;第 5 类为土壤细沙和耕层土壤容重,容重和细沙含量存在高度相关性(0.606**),土壤容重能反映土壤孔隙特征和耕作特性,选择土壤容重进入 MDS。第 6 类为全钾和粗沙,表征土壤钾素和颗粒组成特征,粗沙含量高是风沙土一个固有特性,变异性仅为 3.20%,属于不敏感指标,选全钾进入 MDS。最终确定有机质、黏粒、耕层厚度、速效磷、硬度、犁底层厚度、pH 值、容重和全钾 9 项指标进入 MDS。

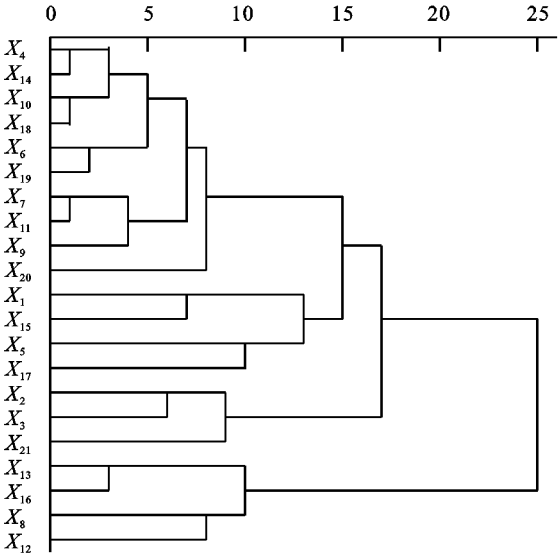


图 2 东北风沙土农田耕层质量评价聚类分析树

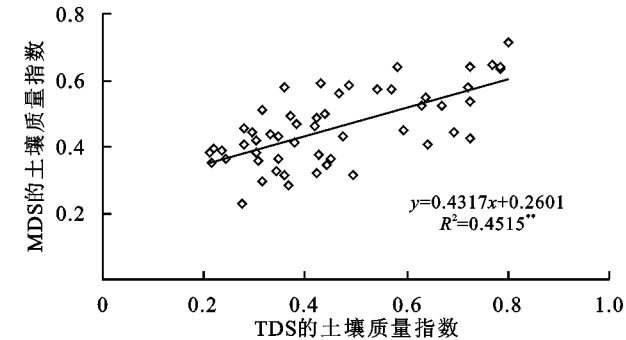
表 3 东北风沙土农田耕层评价指标 Person 相关系数矩阵

评价指标	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀	X ₂₁
X ₁	1																				
X ₂	0.263	1																			
X ₃	0.314 *	0.422 **	1																		
X ₄	0.093	0.109	0.148	1																	
X ₅	0.018	0.234	0.056	0.049	1																
X ₆	-0.008	0.018	0.104	0.542 **	0.1	1															
X ₇	-0.044	0.093	0.176	0.641 **	0.119	0.500 **	1														
X ₈	-0.373 **	-0.02	-0.334	-0.261	-0.014	-0.238	-0.206	1													
X ₉	0.021	0.009	0.274 *	0.510 **	0.170	0.442 **	0.542 **	-0.494 **	1												
X ₁₀	0.090	0.107	0.159	0.763 **	0.072	0.696 **	0.594 **	-0.437 **	0.330 **	1											
X ₁₁	-0.006	-0.016	0.184	0.562 **	0.141	0.351 *	0.730 **	-0.217	0.663 **	0.457 **	1										
X ₁₂	-0.087	-0.168	-0.292 **	-0.684 **	-0.034	-0.321 *	-0.560 **	0.284 *	-0.546 **	-0.491 **	-0.321 **	1									
X ₁₃	0.032	-0.068	-0.200	-0.516 **	-0.216	-0.471 **	-0.537 **	0.278 *	-0.442 **	-0.534 **	-0.587 **	0.192	1								
X ₁₄	0.041	0.169	0.222 *	0.783 **	0.154	0.506 **	0.710 **	-0.364 **	0.643 **	0.661 **	0.714 **	-0.305 **	-0.737 **	1							
X ₁₅	0.366 **	-0.133	0.092	0.180	0.091	-0.060	0.211	-0.271	0.021	0.066	0.076	0.047	-0.364 **	0.187	1						
X ₁₆	-0.014	-0.214	-0.324 *	-0.507 **	-0.113	-0.460 **	-0.515 **	0.369 **	-0.518 **	-0.587 **	-0.412 **	0.428 **	0.606 **	-0.661 **	-0.157	1					
X ₁₇	0.090	0.015	0.044	-0.007	0.204	0.029	0.016	0.035	-0.054	-0.087	-0.047	0.282 *	-0.079	-0.147	0.157	0.154	1				
X ₁₈	0.171	0.123	0.464 **	0.594 **	0.041	0.659 **	0.530 **	-0.600 **	0.537 **	0.720 **	0.410 **	-0.448 **	-0.585 **	0.662 **	0.182	-0.647 **	0.108	1			
X ₁₉	0.101	0.004	-0.101	0.599 **	0.168	0.676 **	0.591 **	-0.161	0.398 **	0.618 **	0.458 **	-0.260	-0.547 **	0.509 **	0.248	-0.350 *	0.150	0.525 **	1		
X ₂₀	0.076	0.095	0.278 *	0.443 **	-0.065	0.368 **	0.430 **	-0.489 **	0.356 **	0.520 **	0.348 *	-0.402 **	-0.461 **	0.556 **	0.177	-0.663 **	-0.067	0.700 **	0.325 *	1	
X ₂₁	0.188	0.318 *	0.268 *	-0.06	-0.264	0.064	-0.076	-0.354 **	0.205	0.258	-0.035	-0.013	0.079	-0.038	-0.240	-0.063	-0.151	0.222	-0.165	0.177	

注: * 为相关关系显著($p<0.05$); ** 为相关关系极显著($p<0.01$)。

2.3 土壤质量指数

分别对全量数据集指标以及最小数据集指标做主成分分析,获得各个指标的公因子方差,提取评价指标的公因子方差,得到全量数据集指标权重分别为耕层厚度 0.015,犁底层厚度 0.002,pH 值 0.017,碱解氮 0.086,速效磷 0.043,速效钾 0.065,全氮 0.090,全磷 0.067,全钾 0.021,有机质 0.114,阳离子交换量 0.034,沙粒 0.057,细沙 0.062,黏粒 0.099,平均重量直径 0.018,容重 0.054,硬度 0.005,含水量 0.068,持水量 0.077,孔隙度 0.006 和渗透速率 0.001;得到 MDS 指标权重分别为有机质 0.138,黏粒 0.182,耕层厚度 0.053,速效磷 0.109,硬度 0.138,犁底层厚度 0.042,pH 值 0.053,容重



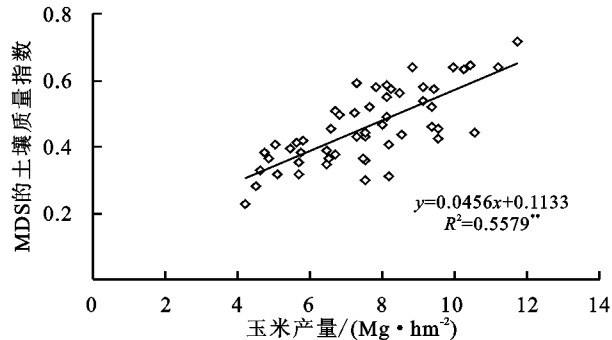
注: ** 表示相关性极显著。

图 3 全量数据集土壤质量指数、玉米产量与最小数据集土壤质量指数的相关性

2.4 风沙土耕地耕层土地力分析

基于风沙土耕地耕层土壤质量 MDS 诊断结果,以基于聚类分析得出的最小数据集指标:耕层厚度、犁底层厚度、pH 值、速效磷、有机质、全钾、黏粒、容重和硬度作为合理耕层诊断指标。土壤质量指数(SQI-MDS)取值范围为 0~1,其值越高,表明各诊断指标对作物生长贡献率越大,作物产量越高^[3]。根据耕层土壤质量指数,把土地力划分为 5 级(表 4)。野外调查 53 个点中 34.0%样点土壤质量指数 0.2~0.4,地力Ⅳ级,52.8%样点土壤质量指数 0.4~0.6,土壤地力Ⅲ级,11.2%样点土壤质量指数 0.6~0.8,土壤地力Ⅱ级,调查风沙土区域没有Ⅰ级和Ⅴ级地力耕层分布。调查区域风沙土的平均土

壤质量指数为 0.46,总体上东北风沙土属于地力Ⅲ级。根据玉米产量差异,把土地力划分为 5 级(表 4),野外调查 53 个点中 1 个样点玉米产量为 4.2 Mg/hm²,地力Ⅴ级,19 个样点玉米产量 4.4~6.8 Mg/hm² 土壤地力属于Ⅳ级,22 个样点玉米产量 6.8~9.3 Mg/hm² 土壤地力属于Ⅲ级,10 个样点玉米产量 9.3~11.7 Mg/hm² 土壤地力属于Ⅱ级,1 个样点玉米产量 11.8 Mg/hm² 土壤地力属于Ⅰ级。调查区域风沙土的平均玉米产量 7.6 Mg/hm²,总体上东北风沙土属于地力Ⅲ级。由表 4 推测风沙土合理耕层具备较厚的耕层,适当的犁底层、pH 值、黏粒、容重,较小的硬度,较高的速效磷、全钾和有机质含量。



指标	土壤地力等级划分				
	I	II	III	IV	V
土壤质量指数	0.8~1.0	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2
玉米产量/(Mg·hm ⁻²)	≥11.7	9.3~11.7	6.8~9.3	4.4~6.8	≤4.4
犁底层厚度/cm	21~23	20~21	18~20	17~18	≤17
耕层厚度/cm	5~9	9~10	10~11	11~12	≥12
pH 值	8.01~8.45	7.86~8.01	7.27~7.86	6.68~7.27	6.09~6.68
速效磷/(mg·kg ⁻¹)	≥17.1	15.2~17.1	13.3~15.2	11.4~13.3	≤9.5
全钾/(g·kg ⁻¹)	≥26.0	25.5~26.0	25.0~25.5	24.5~25.0	≤24.0
有机质/(g·kg ⁻¹)	≥19.8	14.7~19.8	9.5~14.7	4.3~9.5	≤0.8
黏粒/%	24.8~29.9	19.7~24.8	14.6~19.7	9.4~14.6	≤4.3
容重/(g·cm ⁻³)	0.97~1.07	1.07~1.16	1.16~1.25	1.25~1.35	≥1.35
硬度/(kg·cm ⁻²)	36.1~46.5	46.5~57.0	57.0~67.4	67.4~77.8	≥88.3

3 讨论

在一定土壤—作物—气候条件下,土壤质量的高低是衡量土壤肥力、土壤环境及作物生产可持续性的重要指标^[21]。国内外已在土壤质量评价指标方面开展了大量的研究工作。但目前并没有统一的土壤质量评价标准和评价方法,因为不同的评价者目的不一样,侧重的土壤功能也不一样,决定了评价指标的差异^[22]。基于国内外通过建立 MDS 对耕地土壤质量评价的研究成果^[3],本研究选用 21 项耕层理化性质作为耕层土壤质量评价指标,对东北风沙土农田耕层全量数据集和最小数据集评价指标进行了对比分析,全量数据集评价指标中包括国内外土壤质量评价使用频率最高的土壤容重、黏粒、pH 值、全氮、团聚体平均重量直径、粉粒、砂粒、有机质、孔隙度和有效磷前 10 项指标^[3];最小数据集 9 项评价指标中的土壤容重、黏粒、pH 值、有机质和有效磷 5 项指标进入最小数据集评价指标使用频率前 10 位,表明本研究中全量数据集和最小数据集评价指标体系均与前人研究结果相似,有较好代表性。根据土壤质量指数评价与根据土壤生产力评价土壤质量结果相一致,研究区域东北风沙土属于地力Ⅲ级,土壤质量指数评价适宜于风沙土耕层土壤质量评价。

根据 MDS 数据集筛选出的 9 项评价指标,结合农业生产实际情况,土壤有机质、耕层厚度、速效磷、硬度、犁底层厚度和容重 6 个指标通过耕作和施肥易于改善^[2,6,12];而土壤黏粒含量和 pH 值是土壤难于改善的特有属性,一般通过常规耕作和施肥是难于改良的,所以在农业生产过程中应多注意施用黏粒含量高的有机肥和酸性肥料。MDS 数据集中土壤容重、黏粒、pH 值、有机质和有效磷这 5 项指标属于土壤质量评价指标最小数据集使用频率最高的前 10 位评价指标^[3],结合 MDS 中各项指标权重,土壤容重、黏粒、有机质和有效磷 4 项指标可以解释风沙土质量评价结果的 61.2%,土壤容重可以反映土壤的基本物理性状,黏粒是评价土壤质量的重要指标,有机质是土壤质量评价中必备指标,另外土壤有机质与土壤质量全量评价指标中 13 项指标显著相关(表 3),磷是植物生长三大必需营养元素之一,风沙土又是缺磷土壤(表 2),有效磷是植物可以直接吸收利用态磷,所以可以将土壤容重、黏粒、有机质和有效磷 4 项指标作为风沙土质量评价最直接指标。

合理耕层结构是衡量风沙土生产力的关键因素,是一系列土壤理化性质和力学性质的综合反映^[23]。本研究通过聚类分析筛选出的最小数据集指标,初步

确定风沙土耕层地力分级阈值。耕层厚度及有效耕作土壤是影响耕层水分、养分库容量的关键,耕层越厚,有效耕作土壤越多,储存水分和养分能力越强,产量越高^[24]。土壤贯穿阻力越小,土壤稳定性越弱,容重越小,有利于水分渗透,降雨形成的地表径流越弱,养分损失越小,耕层结构越合理^[1-3,11]。风沙土主要是沙粒组成,黏粒含量少,团聚化能力弱,造成保水保肥能力差,适当增加黏粒含量,增加耕层土壤保水保肥能力^[1-2]。风沙土沙粒含量高,通透性强,田间持水量平均为 22.23%,小于其他类型土壤,耕层大孔隙水容易淋溶,有适当厚度犁底层可以阻碍耕层水的淋溶,增加耕层保水保肥能力^[2,17,19]。风沙土是有机质含量低的农田土壤类型之一,土壤有机质与土壤 13 项评价指标具有较好的相关性,特别是作为生长所需要的氮磷钾养分(表 2),基于最小数据集 MDS 建立时,有机质代替 8 项指标进入最小数据集,这说明风沙土农田养分很容易受施入有机质的影响,所以对于养分缺乏的风沙土Ⅲ—Ⅴ级产田,采用有机肥与氮磷钾化肥配合施用的肥料管理措施,土壤养分的供应能力就可以得到有效改善,从而提升耕层土壤质量^[21]。pH 值对作物生长影响较大,适宜的 pH 值是风沙土耕层合理性重要评价指标^[3,19]。结果表明风沙土合理耕层结构特点,耕层厚度偏后,犁底层厚度、pH 值、黏粒含量和容重适当,土壤速效磷、有机质和全钾含量较高。本研究结果可以客观、清晰、准确地分析东北风沙土区域土壤质量的空间分布,在有限有机肥资源条件下,针对不同质量田块采取相应耕作培肥措施,提高土壤质量,有利于指导农业生产。总体上看,合理耕层构建采取适当深翻/深松增加耕层厚度,降低土壤容重和贯穿阻力,施用有机肥培肥土壤有机质和全氮含量,改善耕层物理性状,增加耕层储水能力,促进作物增产。

4 结论

(1) 本研究所选择的 21 项风沙土耕层土壤质量评价指标特征差异明显,覆盖评价指标中使用频率最高的前 10 个指标,全量数据集有较好代表性。全量数据集土壤质量指数、玉米产量与最小数据集土壤质量指数均呈极显著正相关关系,这说明选择最小数据集能够替代全量数据集对风沙土耕地耕层土壤质量进行评价。最小数据集由耕层深度、犁底层厚度、pH 值、速效磷、有机质、全钾、黏粒、容重和硬度 9 项评价指标组成。

(2) 根据土壤质量评价指标划分土壤地力,野外调查 53 个点中 34.0%样点土壤质量指数 0.2~0.4,地力Ⅳ级,52.8%样点土壤质量指数 0.4~0.6,土壤地力Ⅲ

级,11.2%样点土壤质量指数 0.6~0.8,土壤地力Ⅱ级,调查风沙土区域没有Ⅰ级和Ⅴ级地力耕层分布。研究区域东北风沙土土壤质量指数 0.22~0.72,平均土壤质量指数为 0.46,总体上东北风沙土属于地力Ⅲ级。

(3) 根据玉米产量划分土壤地力,野外调查 53 个点中 1.9%样点属于地力Ⅴ级,35.8%样点土壤地力属于Ⅳ级,41.5%样点土壤地力属于Ⅲ级,18.9%样点土壤地力属于Ⅱ级,1.9%样点土壤地力属于Ⅰ级。调查区域风沙土的平均玉米产量 7.6 Mg/hm²,总体上东北风沙土属于地力Ⅲ级。

(4) 调查区域风沙土合理耕层具备较厚的耕层,适当的犁底层、pH 值、黏粒、容重,较小的硬度,较高的速效磷、全钾和有机质含量。不同生产力风沙土的质量水平与农业生产管理水平有密切关系。通过深耕施有机肥和化肥,风沙土中低产田养分状况可以在比较短的时间内迅速改善,使土壤质量得到提高。由于土壤质量指标本身的复杂性,特别是土壤理化性质和生物化学性质共同对土壤质量的影响有待于进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 石元亮,孙毅,许林书,等. 东北沙土与生态建设[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [2] 乔云发,苗淑杰,陆欣春,等. 耕作方式和有机肥对风沙土区玉米产量的影响[J]. 安徽农业科学,2018,46(4):124-127.
- [3] 金慧芳,史东梅,陈正发,等. 基于聚类及 PCA 分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J]. 农业工程学报,2018,34(7):155-164.
- [4] 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.
- [5] 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,2015,52(3):682-689.
- [6] Gil-sotres F, Trasar-cepeda C, Leiros M C, et al. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2005,37(5):877-887.
- [7] Velasquez E, Lavelle P, Barrio E, et al. Evaluating soil quality in tropical agroecosystems of Colombia using NIRS[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2005,37(5):889-898.
- [8] Duraisamy V, Surendar K S. Soil quality index as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan Plateau India [J]. Geoderma, 2016,282(11):70-79.
- [9] 王飞,李清华,林诚,等. 福建冷浸田土壤质量评价因子的最小数据集[J]. 应用生态学报,2015,26(5):1461-1468.
- [10] 邓绍欢,曾令涛,关强,等. 基于最小数据集的南方地区冷浸田土壤质量评价[J]. 土壤学报,2016,53(5):1326-1333.
- [11] 吴玉红,田霄鸿,南雄雄,等. 基于因子和聚类分析的保护性耕作土壤质量评价研究[J]. 中国生态农业学报,2010,18(2):223-228.
- [12] Govaerts B, Sayre K D, Deckers J. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico[J]. Soil and Tillage Research, 2006,87(2):163-174.
- [13] D'House T, Coughnon M, De vlieghe A, et al. The positive relationship between soil quality and crop production: A case study on the effect of farm compost application[J]. Applied Soil Ecology, 2014,75:189-198.
- [14] Liu Z J, Zhou W, Shen J B, et al. Soil quality assessment of acid sulfate paddy soils with different productivities in Guangdong Province, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014,13(1):177-186.
- [15] 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,2012,43(5):1145-1150.
- [16] 徐尚起,张明园,孙国峰,等. 应用耕作指数评价耕作措施对双季稻田土壤质量的影响[J]. 中国农业科学,2011,44(19):3999-4006.
- [17] Tripathi R P, Sharma P, Singh S. Tilt index: an approach to optimize tillage in rice-wheat system[J]. Soil and Tillage Research, 2005,80(1/2):125-137.
- [18] 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,2000.
- [19] 徐建明,张甘霖,谢正苗. 土壤质量指标与评价[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [20] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles[J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3):282-290.
- [21] 谢坚,郑圣先,杨曾平,等. 湖南双季稻种植区不同生产力水稻土质量综合评价[J]. 中国农业科学,2010,43(23):4840-4851.
- [22] 张子龙,王文全,缪作清,等. 主成分分析在三七连作土壤质量综合评价中的应用[J]. 生态学杂志,2013,32(6):1636-1644.
- [23] 丁文斌,蒋光毅,史东梅,等. 紫色土坡耕地土壤属性差异对耕层土壤质量的影响[J]. 生态学报,2017,37(19):1-14.
- [24] 史东梅,蒋光毅,蒋平,等. 土壤侵蚀因素对紫色丘陵区坡耕地耕层质量影响[J]. 农业工程学报,2017,33(13):270-279.