

不同改良措施下砂质土壤肥力的微形态评价^①

——以内蒙古科尔沁沙地为例

刘颖, 王数*, 张凤荣, 吕贻忠, 李珍珍, 毛率垒, 任娜欧

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 本文以内蒙古通辽市科尔沁左翼后旗巴胡塔镇乌旦塔拉村为试验区, 选取 13 个土壤微形态指标, 利用 Photoshop、土壤切片图像处理分析系统、Image-pro plus 6.0 软件对土壤微形态图像进行处理, 采用定性、定量相结合的方法对不同改良处理后的砂质土壤肥力进行评价, 在此基础上建立了砂质土壤肥力评价的微形态指标最小数据集 (MDS)。得出以下结论: 与对照组单元 1 相比, 其他各个单元的土壤结构体、粗骨颗粒等微形态特征变化不显著。单元 10(黏土、有机肥、腐殖酸施加量分别为 3.00×10^5 、 3.00×10^4 、 7.50×10^3 kg/hm²) 中土壤黏粒最多、基质比最大、有机物质频率最高; 土壤孔隙状况以及毛管孔隙发育最好的单元分别是单元 8 和单元 13(黏土、有机肥、腐殖酸施加量分别是单元 8: 1.50×10^5 、 3.00×10^4 、 1.125×10^4 kg/hm², 单元 13: 7.50×10^4 、 3.00×10^4 、 3.75×10^3 kg/hm²)。准则层指标土壤基质、土壤孔隙、有机物质、土壤结构体、粗骨颗粒的权重分别为 0.336、0.253、0.203、0.124、0.084。砂质土壤肥力评价的最小数据集包括基质比、基质类型、基质颜色、毛管孔隙占比、孔隙类型、有机物质类型、粗骨颗粒平均粒径 7 个指标, MDS 评价结果与原始评价结果呈显著的线性相关关系, 因此实际评价砂质土壤肥力时, 可以 MDS 的 7 个微形态指标代替原始的 13 个指标。

关键词: 砂质土壤肥力; 土壤微形态特征; 最小数据集; 内蒙古; 科尔沁沙地

中图分类号: S152 文献标识码: A

我国是世界上荒漠化、沙化面积最大的国家, 荒漠化发生率居于高位, 据国家林业局第四次全国荒漠化和沙化监测结果显示, 截至 2009 年底, 全国荒漠化、沙化土地面积分别占国土总面积的 27.33% 和 18.03%, 涉及全国 30 个省(市、自治区)。内蒙古科尔沁沙地, 在历史上曾是水草丰美的科尔沁大草原, 但由于在清朝的放垦开荒、战乱和建国初期“以粮为纲”大力发展农业的作用下, 科尔沁草原下的沙土层逐渐沙化, 再加上气候干旱, 使这个秀美的大草原, 演变成我国正在发展中面积最大的沙地。

砂质土壤土粒松散, 结构发育不良, 且沙层深厚, 颗粒均一, 土壤颗粒间孔隙大, 大孔隙多、小孔隙少, 导致土壤透水性强、毛细管作用弱, 保水保肥性差^[1-2]。在种植农作物时, 由于地下水上升少, 降水、灌溉水渗透多, 使得作物干旱缺水, 生长不良, 若加大灌水施肥量, 还容易使施入土壤中的养分随着水分渗漏而对水环境产生污染, 导致生态环境的恶化^[3]。

从土壤理化性质等角度对耕地土壤肥力进行评价的研究已经十分广泛。田野等^[4]为了解鞍山市千山风景区土壤肥力质量, 采用改进层次分析法对千山 7 个样点的 14 个样坑内 pH、有机质、全氮、全磷等 8 个土壤理化指标的测试结果进行综合评价; 张水清等^[5]采用网格布点法取样 322 个进行化学分析, 然后采用主成分分析法进行评价。利用微形态来研究耕地土壤肥力是应用土壤微形态的重要分支, 它能够帮助我们揭示土地肥力状况, 进行土地评价, 采用微形态的方法能够更直观地“观测”到原状土壤结构、有机物质等肥力特征的变化, 而非将土壤通过各种方式改变原始形态后进行检测。国内外仅有部分学者对其进行了研究: 潘艳华等^[6]对云南地区植烟红壤在不同施肥条件下的土壤微结构进行研究, 结果表明长期大量施用化肥的土壤, 土壤颗粒粗大, 微结构差, 而施有机肥的红壤则形成了稳定性较好的有机-腐殖质黏团, 微孔隙发达; 秦鱼生等^[7]在对紫色土进行不同施

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项(201411009)资助。

* 通讯作者(wangshu@cau.edu.cn)

作者简介: 刘颖(1991—), 女, 河北唐山人, 硕士, 主要研究土壤微形态。E-mail: 1501307484@qq.com

肥处理后观察耕层土壤的微形态,认为有机无机肥料配施能显著改良紫色土的结构;申思雨等^[8]研究不同种植方式对温室土壤微形态的影响,结果是有机种植条件下易形成适合作物生长的良好土壤结构;Golding 等^[9]则以苏格兰 Lauder, Pittenweem 和 Wigtown 3 个城市为例,从土壤微形态的角度阐释了城市垃圾可作为土壤肥料,提高耕地土壤肥力。国内外学者对土壤肥力的微形态研究多以定性研究为主,土壤肥力的微形态定量评价仍处于起步阶段。本文以内蒙古通辽市科尔沁沙地为研究区域,基于土壤微形态特征,定性、定量相结合来评价不同改良处理后的砂质土壤肥力,具有一定的现实意义。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

本研究试验区位于内蒙古通辽市科尔沁左翼后旗巴胡塔镇乌旦塔拉村(43°3'59"N, 122°17'50"E)。通辽市科尔沁左翼后旗地处中温带亚湿润边缘地区,属温带大陆性季风气候,年平均气温 5.8 °C,平均降水量为 451.1 mm。境内地势呈西南向东北再向东南逐渐降低,海拔最高点在西南部,为 308.4 m,最低

点在东南部的东西辽河交汇处,为 88.5 m。除东部系辽河冲积平原外,皆是沙丘、沙地为主要特征的地貌类型。

1.2 试验设置

本研究采用类似于植物营养学中常用的二次回归 D—最优设计(“3414”方案)进行试验方案设计,即用本研究中黏土、有机肥、腐殖酸施用量三因素代替原来方案中的 N、P、K 3 个因素,每个因素 4 个水平(0、1、2、3 水平),共设置 14 个处理,每个处理重复 3 次,共计 42 个小区,每个小区为 3 m × 4 m。其中腐殖酸施用量设有 0、 3.75×10^3 、 7.50×10^3 、 1.125×10^4 kg/hm² 4 个水平;有机肥施用量分为 0、 1.50×10^4 、 3.00×10^4 、 6.00×10^4 kg/hm² 4 个水平;黏土施用量设有 0、 7.50×10^4 、 1.50×10^5 、 3.00×10^5 kg/hm² 4 个水平。将 3 种材料与表层土壤(0~10 cm)混匀后施用于各小区。供试玉米品种为宏玉 415 号,灌溉方式为喷灌。试验布置的平面分布如图 1,其中 C₀、C₁、C₂、C₃, O₀、O₁、O₂、O₃, H₀、H₁、H₂、H₃ 分别对应黏土、有机肥、腐殖酸 3 种改良剂 4 个水平的施用量。该设计吸收了回归最优设计处理少、效率高的优点^[10]。

大田试验于 2014 年 4 月、2015 年 5 月进行。

北			
西	C ₂ O ₂ H ₁	C ₀ O ₂ H ₂	C ₂ O ₁ H ₁
	C ₂ O ₂ H ₃	C ₁ O ₁ H ₂	C ₂ O ₂ H ₀
	C ₂ O ₀ H ₂	C ₂ O ₂ H ₁	C ₂ O ₂ H ₂
	C ₃ O ₂ H ₂	C ₂ O ₀ H ₂	C ₂ O ₁ H ₂
	C ₀ O ₂ H ₂	C ₀ O ₀ H ₀	C ₁ O ₁ H ₂
	C ₂ O ₁ H ₁	C ₂ O ₂ H ₂	C ₂ O ₃ H ₂
	C ₂ O ₂ H ₂	C ₁ O ₂ H ₁	C ₂ O ₂ H ₃
	C ₁ O ₂ H ₁	C ₂ O ₂ H ₀	C ₀ O ₂ H ₂
	C ₀ O ₀ H ₀	C ₂ O ₃ H ₂	C ₃ O ₂ H ₂
	C ₂ O ₂ H ₀	C ₃ O ₂ H ₂	C ₀ O ₀ H ₀
	C ₂ O ₁ H ₂	C ₁ O ₂ H ₂	C ₂ O ₀ H ₂
	C ₂ O ₃ H ₂	C ₂ O ₁ H ₁	C ₁ O ₂ H ₂
	C ₁ O ₂ H ₂	C ₂ O ₁ H ₂	C ₁ O ₂ H ₁
	C ₁ O ₁ H ₂	C ₂ O ₂ H ₃	C ₂ O ₂ H ₁
南			

图 1 试验设置平面分布

Fig. 1 Spatial distribution of different treatment units

1.3 土壤微形态研究方法

1.3.1 原状土样的采集 选取供试剖面,在剖面的表层 0~15 cm 采集未被扰动的原状土样。土样采集时间为 2015 年 10 月,在各个试验小区中心位置自上

而下打入环刀,至环刀内填满土壤时方可取出,盖上盖子,用箭头标示方向。采集过程要保证土壤的原状特征不受扰动,将采集好的土样用胶带缠紧,在搬运过程中也要尽量减少震动。

1.3.2 土壤薄片的制备 将进行编号登记好的土壤样品在试验室进行自然风干,小心取出土样,尽量减少扰动。用小刀将环刀壁附近扰动较大的土壤削去,留下中心部分的土块。将土块按照标记方向小心放入烧杯,再将其放入烘箱,温度设置为 80 ,进行 12 h 的烘干处理。烘干后放入干燥器备用。

将烘干后的土壤样品用不饱和聚酯树脂-丙酮溶液进行充分浸渍,再将其放入烘箱中升温(最高温度为 80)固化。之后经切片、磨片、粘载等程序,制成大小为 30 mm × 60 mm ,厚度为 0.03 mm 的标准土壤薄片。薄片制作在北京大学地学实验室进行。

1.3.3 薄片观察、图像采集与处理 采用 Nikon LV100POL 型偏光显微镜观察土壤薄片,图像经 CCD 传感器传至 Nikon digital sight 显微镜数码相机,通过 USB 数据线将显微镜数码相机连接至已安装配套 NIS-Elements-F 3.0 软件的计算机,拍摄得到放大 50 倍后单偏光和正交偏光下的土壤微形态照片。利用土壤切片图像处理分析系统对图像进行处理,将土壤微结构图转化成能够直观反映土壤孔隙特征的孔隙二值图,之后利用 Image-pro plus 6.0 软件中的 count/size 工具便可统计出总孔隙面积百分比和不同类型孔隙分布情况。利用 Photoshop 软件对暗色矿物进行上色,再利用 Image-proplus 6.0 软件中 count/size 工具对粗骨颗粒直径和磨圆度等特征进行统计。有机物质频率的统计方法与粗骨颗粒特征的提取方法类似。在统计总孔隙百分比和粗骨颗粒百分比等指标时选取薄片 6 个样本点进行拍摄,6 个拍摄点呈“S”形分布,统计后取平均值作为最终结果。文中对土壤微形态特征的描述和分析参照了 Stoops^[11]术语。

2 结果与讨论

2.1 处理单元确定

根据不同的改良处理以及采样深度,划分出 14 个评价单元,见表 1。

2.2 砂质土壤肥力评价的微形态指标体系确定

按照完整性、代表性、差异性原则,本文选取反映土壤结构体特征的土壤微结构、团聚体,反映土壤基质特征的基质类型、基质颜色、基质比,指示土壤孔隙特征的孔隙类型、总孔隙百分比、毛管孔隙占比,表征粗骨颗粒特征的平均粒径、磨圆指数、面积百分比,以及反映土壤中有机物质特征的有机物质类型、有机物质频率,共计 13 个指标对不同处理后砂质土壤肥力进行评价。各个单元土壤微形态特征见表 2。

2.3 评价因子权重确定

本文对传统的层次分析法^[13-16]进行改进,目标层

表 1 不同处理单元
Table 1 Different treatment units

处理措施	采样深度(cm)	单元编号
C ₀ O ₀ H ₀	0~15	单元 1
C ₂ O ₁ H ₁	0~15	单元 2
C ₂ O ₂ H ₀	0~15	单元 3
C ₂ O ₂ H ₂	0~15	单元 4
C ₂ O ₁ H ₂	0~15	单元 5
C ₁ O ₁ H ₂	0~15	单元 6
C ₂ O ₃ H ₂	0~15	单元 7
C ₂ O ₂ H ₃	0~15	单元 8
C ₀ O ₂ H ₂	0~15	单元 9
C ₃ O ₂ H ₂	0~15	单元 10
C ₂ O ₀ H ₂	0~15	单元 11
C ₁ O ₂ H ₂	0~15	单元 12
C ₁ O ₂ H ₁	0~15	单元 13
C ₂ O ₂ H ₁	0~15	单元 14

为砂质土壤肥力,准则层包括土壤基质、土壤孔隙、有机物质、土壤结构体、粗骨颗粒 5 个因素。砂质土壤质地疏松,植物根系难以扎稳,保水能力差,易漏风跑墒,土壤养分也易随降水或灌溉水流失。因此改良后砂质土壤中的黏粒含量以及具有持水能力的土壤孔隙发育情况是各个处理改良效果的直观体现。而土壤结构体的形成以及粗骨颗粒的风化是自然、人为因素长期作用的结果,在短期内变化相对较小,因此本文设定土壤结构体、粗骨颗粒指标的重要程度不及土壤基质、孔隙等指标。目标层各个因素的判断矩阵见表 3。

通过建立判断矩阵,代入标度值后进行归一化处理,根据公式(1)计算准则层各个因素的权重向量,计算得出 $W_i=(0.336, 0.253, 0.203, 0.124, 0.084)$ 。进行一致性检验,计算得到一致性比例 $CR<0.1$ 时,说明判断矩阵一致性良好。

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^5 b_{ij}}{5} \quad (1)$$

式中: W_i 为准则层各指标权重, b_{ij} 为判断矩阵中归一化处理后的标度值。

约束层指标的权重确定方法和准则层相似,计算得出砂质土壤肥力微形态评价指标权重见表 4。

2.4 评价单元指标分值及综合得分

基质类型、基质颜色、孔隙类型、有机物质类型、土壤团聚体、土壤微结构 6 个定性指标分值依照等差数列进行赋值,定性指标按照标准化赋分法进行赋值,其中土壤总孔隙百分比在 35% 左右时,土壤结构发育最好,将总孔隙百分比 33.90% 的单元 8 赋值为 100 分;粗骨颗粒面积百分比最小的单元 3 分值赋为 100 分。

表 2 评价单元土壤微形态特征
Table 2 Soil micromorphological characteristics of evaluating units

评价单元	1	2	3	4	5	6	7
基质比	0.49	0.61	0.63	0.66	0.66	0.66	0.62
基质类型	油松基质	油松基质	油松基质	油松基质, 少数黏 结基质	油松基质	油松基质, 少数黏结 基质	油松基质
基质颜色	浅棕	浅棕	棕色	棕色	浅棕	棕色	浅棕
毛管孔隙占比(%)	4.62	16.30	8.86	16.79	16.04	18.86	16.71
总孔隙百分比(%)	53.16	42.88	49.27	39.67	42.38	39.74	40.12
孔隙类型	面状孔隙 为主	面状孔隙、树 枝状孔隙	面状孔隙、树 枝状孔隙	树枝状孔隙 为主	面状孔隙、树 枝状孔隙	树枝状孔隙, 有机物 质分解形成小孔洞	树枝状孔隙、少 数面状孔隙
有机物质频率(%)	0	0	0.37	0	0	1.21	0
有机物质类型	无	无	中度分解植 物残体	无	无	中度分解的有机物质	无
土壤团聚体	无	无	无	锥形团聚体	无	锥形团聚体	无
土壤微结构	“海绵状” 微结构	“海绵状”微 结构	“海绵状”微 结构	“海绵状”微结构, 棱角块状微结构	“海绵状”微 结构	“海绵状”微结构, 亚棱角块状微结构	“海绵状”微 结构
粗骨颗粒面积 百分比(%)	23.75	22.15	18.90	20.56	19.56	20.23	22.58
粗骨颗粒平均粒径 (μm)	47.18	50.81	47.48	43.71	47.99	42.94	49.50
粗骨颗粒磨圆指数	0.15	0.16	0.17	0.18	0.18	0.16	0.16
评价单元	8	9	10	11	12	13	14
基质比	0.69	0.62	0.70	0.65	0.63	0.65	0.64
基质类型	油松基质, 部分黏结 基质	油松基质	油松基质, 部 分黏结基质	油松 基质	油松基质、部 分黏结基质	油松基质, 部分黏结 基质	油松基质, 部分 黏结基质
基质颜色	棕色、深棕	浅棕、棕色	棕、深棕	棕色	棕色、深棕	浅棕、棕色	棕色
毛管孔隙占比(%)	22.23	15.03	15.78	16.22	16.35	27.68	13.47
总孔隙百分比(%)	33.90	41.77	36.77	39.96	40.94	42.37	41.40
孔隙类型	树枝状孔 隙、有机物 质分解形成 不规则孔隙	面状孔隙、树 枝状孔隙	树枝状孔隙, 有机物质分 解形成囊孔	树枝状孔隙, 有 机物质分解形成 小孔道	树枝状孔隙为 主	树枝状孔隙、少数面 状孔隙	树枝状孔隙、有 机物质分解形 成大孔洞
有机物质频率(%)	2.34	1.37	2.94	0.92	0.87	0.77	2.53
有机物质类型	新鲜、轻度、 中度分解的 植物残体	轻度分解植 物残根	中高度分解 植物残体, 动 物排泄物	中度分解的植物 残体	轻、中度分解 植物残体, 少 量动物排泄物	轻度分解植物残体, 呈炭化趋势的有机物 质	中度分解植物 残体, 少量动物 排泄物
土壤团聚体	锥形团聚体	无	锥形团聚体	锥形团聚体	锥形团聚体	锥形团聚体	动物活动形成 的团聚体
土壤微结构	“海绵状” 微结构, 亚 棱角块状微 结构	“海绵状”微 结构	“海绵状”微 结构, 亚棱角 块状微结构	“海绵状”微结构	“海绵状”微 结构	“海绵状”微结构, 亚棱角块状微结构	“海绵状”微结 构, 棱角块状微 结构
粗骨颗粒面积 百分比(%)	20.35	22.01	18.79	20.72	21.64	19.57	21.34
粗骨颗粒平均粒径 (μm)	42.78	48.57	43.96	43.50	47.82	46.01	48.44
粗骨颗粒 磨圆指数	0.18	0.17	0.20	0.18	0.17	0.17	0.20

注: 毛管孔隙: 指孔径为 0.03 ~ 0.1 mm 的孔隙^[12], 毛管孔隙的增加有利于作物生长发育。毛管孔隙占比指毛管孔隙面积占总孔隙面积的百分比, 该值通过 Image-pro plus 6.0 软件 count/size 工具对土壤孔隙二值图分析提取获得。总孔隙百分比: 指薄片中心孔隙面积占整个薄片总面积的百分比, 其值获取方式与“毛管孔隙占比”类似。

表 3 准则层各因素重要程度
Table 3 Importance of each factor in criterion layer

	土壤基质	土壤孔隙	有机物质	土壤结构体	粗骨颗粒
土壤基质	1	t	t^2	t^4	t^6
土壤孔隙	-	1	t	t^2	t^4
有机物质	-	-	1	t^2	t^3
土壤结构体	-	-	-	1	t
粗骨颗粒	-	-	-	-	1

注： t 、 t^2 等代表各指标的重要程度。

表 4 砂质土壤肥力微形态评价指标权重
Table 4 Weights of micromorphological evaluating indicators of sandy soil fertility

目标层	准则层	权重	约束层	权重	综合权重
砂质土壤肥力	土壤基质	0.336	基质比	0.655	0.220
			基质类型	0.218	0.073
			基质颜色	0.126	0.042
	土壤孔隙	0.253	毛管孔隙占比	0.560	0.142
			总孔隙百分比	0.270	0.068
			孔隙类型	0.171	0.043
			有机物质频率	0.750	0.152
	有机物质	0.203	有机物质类型	0.250	0.051
			土壤团聚体	0.634	0.079
	土壤结构体	0.124	土壤微结构	0.366	0.045
			粗骨颗粒面积百分比	0.638	0.054
	粗骨颗粒	0.084	粗骨颗粒平均粒径	0.258	0.022
			粗骨颗粒磨圆指数	0.104	0.009

根据多因素综合评定公式(2)，得到各评价单元微形态评价的综合得分：

$$Z_j = \sum_{i=1}^{13} F_{ij} \times W_i \quad (2)$$

式中： Z_j 为 j 单元土壤肥力的微形态评价分值； F_{ij} 为 j 单元第 i 个因子标准化后的分值； W_i 为各个因子的综合权重。各个单元指标分值及综合得分见表 5。

表 5 评价单元指标分值及综合得分
Table 5 Scores of indicators and integrated scores of evaluating units

评价单元	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
基质比	-2.96	-0.53	-0.22	0.43	0.46	0.54	-0.31	1.10	-0.33	1.26	0.34	-0.09	0.34	-0.05
基质类型	-0.95	-0.95	-0.95	0.83	-0.95	0.83	-0.95	1.27	-0.95	1.27	-0.95	0.83	0.83	0.83
基质颜色	-1.27	-1.27	0.10	0.10	-1.27	0.10	-1.27	1.47	0.10	1.47	0.10	1.47	0.10	0.10
不同类型孔隙占比	-2.11	0.03	-1.34	0.12	-0.02	0.47	0.11	1.31	-0.20	-0.06	0.02	0.04	2.12	-0.49
总孔隙百分比	-2.08	-0.34	-1.51	0.39	-0.23	0.37	0.28	2.05	-0.10	1.16	0.32	0.09	-0.42	-0.01
孔隙类型	-1.95	-0.88	-0.88	0.19	-0.88	0.73	0.19	1.26	-0.88	1.26	0.73	0.19	-0.34	1.26
有机物质频率	-0.93	-0.93	-0.57	-0.93	-0.93	0.25	-0.93	1.36	0.41	1.95	-0.03	-0.08	-0.17	1.54
有机物质类型	-1.14	-1.14	0.16	-1.14	-1.14	0.82	-1.14	1.14	-0.49	1.47	0.16	0.82	0.82	0.82
土壤团聚体	-1.08	-1.08	-1.08	0.70	-1.08	0.70	-1.08	0.70	-1.08	0.70	0.70	0.70	0.70	1.59
土壤微结构	-0.78	-0.78	-0.78	0.31	-0.78	1.41	-0.78	1.41	-0.78	1.41	-0.78	1.41	-0.78	0.31
粗骨颗粒面积百分比	-1.84	-0.91	1.47	0.16	0.92	0.41	-1.17	0.31	-0.82	1.47	0.05	-0.58	0.91	-0.38
粗骨颗粒平均粒径	-0.31	-1.53	-0.42	1.04	-0.60	1.38	-1.11	1.45	-0.80	0.94	1.13	-0.54	0.13	-0.76
粗骨颗粒磨圆指数	-3.47	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
综合得分	-1.76	-0.70	-0.57	0.12	-0.36	0.56	-0.55	1.21	-0.35	1.15	0.12	0.23	0.49	0.42
得分排名	14	13	12	8	10	3	11	1	9	2	7	6	4	5

不同的改良措施对各个土壤微形态特征的影响不同,但不同处理单元的土壤肥力评价结果是根据各个微形态因素综合评定得出的。14 个处理单元中,对照处理单元 1 的土壤肥力最低。单元 8 土壤肥力最高,单元 10 次之,两个单元土壤肥力综合得分较为相近,都远远高于其他单元的得分。其中单元 8 黏土、有机肥的施加量为第 3 水平,腐殖酸的施加量为最高水平。

选取典型处理单元进行对比分析,不施加腐殖酸时,土壤肥力得分为-0.570,不施加黏土时,土壤肥力得分-0.353,不施加有机肥时的得分为 0.119,都高于未施加任何改良剂的对照处理,对照处理土壤肥力得分仅为-1.757。缺失不同改良剂时对土壤肥力的提升作用是不同的。缺失腐殖酸时比对照处理土壤肥力得分提高了 67.56%,缺失黏土时比对照组土壤肥力得分提高了 79.91%,缺失有机肥时比对照组得分提高了 106.77%。当缺失腐殖酸时对砂质土壤肥力影响最大,黏土次之,3 种改良剂中,有机肥在短时间

内对砂质土壤肥力的影响最小。当 3 种改良剂的施加量均为 3 水平时,土壤肥力得分小于未施加有机肥的处理,说明黏土、有机肥、腐殖酸 3 种改良剂同时施用可能存在拮抗作用,因此要最大程度地提高砂质土壤肥力需要合适的改良剂配比。

2.5 砂质土壤微形态评价指标的最小数据集 (MDS)建立

本文对砂质土壤肥力进行评价时,选取的指标较多,各个指标间难免存在着一定的相关性,主成分分析法尽管能够解决因素共线性的问题,但只涉及到某一个评价指标在一个主成分上的荷载,会丢失该指标在其他特征值>1 的主成分上的信息。而通过建立最小数据集,既能实现微形态评价指标体系的简化,又能避免失去过多砂质土壤肥力信息^[17-20]。

2.5.1 各个指标相关性分析 利用 JMP 软件对各个指标进行相关性分析,判断用于评价砂质土壤肥力的 13 个微形态指标是否存在冗余问题。各个指标间相关性指数见表 6。

表 6 微形态评价指标相关性指数
Table 6 Correlation coefficients of micromorphological evaluating indicators

指标	基质比	基质类型	基质颜色	不同类型孔隙占比	总孔隙百分比	孔隙类型	有机物质频率	有机物质类型	土壤团聚体	土壤微结构	粗骨颗粒面积百分比	粗骨颗粒平均粒径	粗骨颗粒磨圆指数
基质比	1.000												
基质类型	0.564	1.000											
基质颜色	0.590	0.756	1.000										
不同类型孔隙占比	0.689	0.522	0.345	1.000									
总孔隙百分比	0.811	0.608	0.597	0.647	1.000								
孔隙类型	0.756	0.710	0.657	0.468	0.832	1.000							
有机物质频率	0.512	0.649	0.733	0.235	0.603	0.737	1.000						
有机物质类型	0.555	0.738	0.844	0.398	0.476	0.694	0.825	1.000					
土壤团聚体	0.528	0.841	0.677	0.450	0.543	0.811	0.638	0.972	1.000				
土壤微结构	0.504	0.845	0.744	0.264	0.651	0.702	0.637	0.688	0.664	1.000			
粗骨颗粒面积百分比	0.732	0.374	0.441	0.349	0.277	0.345	0.319	0.514	0.295	0.251	1.000		
粗骨颗粒平均粒径	0.510	0.580	0.569	0.342	0.535	0.561	0.401	0.507	0.603	0.567	0.468	1.000	
粗骨颗粒磨圆指数	0.851	0.274	0.366	0.608	0.598	0.562	0.268	0.329	0.311	0.225	0.529	0.089	1.000

2.5.2 主成分确定 将每个特征值>1 的主成分中因子荷载>0.5 的指标划分为一组,如果某个微形态指标同时在两个主成分中的因子荷载均>0.5,则将该指标划分到与其他参数相关性较小的另外一组。如果某一因素与该组中其他指标相关性指数均较小,说明组内的其他指标都不能代表该指标所包含的砂质土壤肥力信息,则将该指标单独划分为一组。经主成分分析得出特征值

>1 的主成分为 2 个,累积方差百分比 73.30%。

各个指标在主成分 1 上的因子荷载均>0.5,主成分 2 荷载>0.5 的因子为基质比、粗骨颗粒磨圆指数指标,两个指标与其他指标相关性较低,所以将这两个指标划分为一组。毛管孔隙占比、粗骨颗粒平均粒径指标与主成分 1 中荷载较大的其他指标相关性不显著,所以将这两个指标分别单独划为

一组。其余指标同为另外一组。各个指标的主成分 荷载及分组见表 7。

表 7 主成分荷载矩阵及指标分组和各指标 Norm 值
Table 7 Load matrix of principal components, group of indexes, Norm value of each indicator

编号	指标	主成分 1	主成分 2	分组	Norm 值
1	基质类型	0.861 73	-0.270 78	a	2.43
2	基质颜色	0.848 76	-0.249 27	a	2.39
3	总孔隙百分比	0.821 62	0.214 46	a	2.31
4	孔隙类型	0.895 80	-0.007 51	a	2.50
5	有机物质频率	0.776 23	-0.305 91	a	2.20
6	有机物质类型	0.841 57	-0.254 49	a	2.37
7	土壤团聚体	0.825 81	-0.260 27	a	2.33
8	土壤微结构	0.800 10	-0.378 30	a	2.29
9	粗骨颗粒面积百分比	0.563 56	0.380 71	a	1.65
10	基质比	0.842 95	0.509 10	b	2.44
11	粗骨颗粒磨圆指数	0.578 39	0.722 50	b	1.88
12	毛管孔隙占比	0.614 05	0.498 78	c	1.83
13	粗骨颗粒平均粒径	0.675 56	-0.182 36	d	1.90

2.5.3 计算矢量常模(Norm)值 Norm值的几何意义为该变量在由多个主成分组成的多维空间中矢量常模(Norm)的长度,长度越长,表明该变量在所有主成分中的综合载荷越大,其解释该样本综合信息的能力也越强^[17]。Norm值的计算公式如下:

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_1^k (u_{ik}^2 \times \lambda_k)} \quad (3)$$

式中: N_{ik} 表示第 i 个变量在特征值>1 的前 k 个主成分上的综合载荷, u_{ik} 是第 i 个变量在主成分 k 上的载荷, λ_k 是第 k 个主成分的特征值。计算得到各个指标的 Norm 值见表 7。

2.5.4 砂质土壤肥力的最小数据集确定 从表 7 看出, b 组中有基质比、粗骨颗粒磨圆度两个指标, 基质比指标 Norm 值较大, 因此该组中保留基质比指标。c、d 组中各只有一个微形态指标, 尽管其 Norm 值较小, 但仍然保留。a 组中根据指标 Norm 值的 Ward 法聚类分析结果, 剔除总孔隙百分比、有机物质频率、土壤团聚体、土壤微结构、粗骨颗粒面积百分比 5 个指标。

筛选后得到砂质土壤肥力微形态评价的最小数据集为基质比、基质类型、基质颜色、毛管孔隙占比、孔隙类型、有机物质类型、粗骨颗粒平均粒径 7 个指标。

2.5.5 基于最小数据集的砂质土壤肥力评价 为验证微形态评价指标最小数据集的实用性与准确性, 依据最小数据集, 利用主成分分析法对各个单元砂质土壤肥力重新测算, 并与上文中的评价结果进行对比, 测算两个评价结果的吻合程度。

根据统计学原理, 按累积贡献度>85% 的原则选取主成分。本文共提取 3 个主成分, 贡献率分别为 65.31%、12.64%、7.97%, 累积贡献率 85.92%, 包含了大部分的指标信息。

各个指标在相应主成分的特征值见表 8, 用于后续计算不同单元各个主成分的得分。

表 8 各个指标对应的主成分特征值
Table 8 Characteristic values of principal components of each indicator

指标	主成分 1	主成分 2	主成分 3
基质比	0.820 93	0.401 97	0.025 84
基质类型	0.870 43	-0.130 94	-0.092 45
基质颜色	0.857 43	-0.352 93	-0.155 56
毛管孔隙占比	0.645 83	0.681 54	-0.081 91
孔隙类型	0.866 52	0.019 45	-0.003 96
有机物质类型	0.852 47	-0.305 03	-0.267 79
粗骨颗粒平均粒径	0.714 53	-0.154 48	0.667 93

各主成分分值的计算依据下列公式:

$$PC_i = \sum_{k=1}^{n,m} A_{ik} \times Z_k \quad (4)$$

式中: PC_i 为第 i 个主成分的得分, A_{ik} 表示第 k 个指标在第 i 个主成分上的特征值, Z_k 表示评价指标标准化值, n 表示主成分个数, m 表示评价指标个数。

综合得分则用各主成分方差贡献率乘以各自得分来计算, 公式为

$$F_j = \sum_{i=1}^n S_i \times PC_{ij} \quad (5)$$

式中: F_j 表示第 j 个单元的最终得分, S_i 表示主成分

i 的方差贡献率, PC_{ij} 表示第 j 个单元在主成分 i 上的得分, n 表示主成分数量。

各个单元砂质土壤肥力原始评价结果、最小数据集评价结果见表 9。

表 9 原始评价结果和最小数据集评价结果对比
Table 9 Comparison between original evaluated results and MSD evaluated results

评价单元	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
原始评价结果	-1.76	-0.70	-0.57	0.12	-0.36	0.56	-0.55	1.21	-0.35	1.15	0.12	0.23	0.49	0.42
排名	14	13	12	8	10	3	11	1	9	2	7	6	4	5
最小数据集评价结果	-5.80	-3.29	-1.90	0.88	-2.27	2.56	-2.30	4.75	-1.91	4.06	0.80	1.40	2.04	0.97
排名	14	13	9	7	11	3	12	1	10	2	8	5	4	6

对比原始评价结果及最小数据集评价结果,发现单元 1、2、6、8、10、13 的排名相同,该 6 个评价单元的排名顺序为单元 8>单元 10>单元 6>单元 13>单元 2>单元 1。除去单元 3 两种评价结果排名差异较大外,其他单元排名的变动都在前后两个排名之内。另外两种不同评价方法下,不同单元的排名次序几乎没有差别,如单元 4、12、13 两种评价结果的排名均为单元 13>单元 12>单元 4。

两种评价结果的线性拟合方程为:原始评价结果 = 0.000 018 5 + 0.259 028 5 × 最小数据集评价结果。其中调整 R^2 为 0.965,说明该拟合效果较好。

综上所述,根据最小数据集对砂质土壤肥力进行评价时,虽然个别单元排名与原始评价结果存在差异,但整体趋势相同,评价结果具有合理性,另外两种评价结果也存在较高拟合度,因此最小数据集可以替代原始的微形态指标反映砂质土壤肥力的全部信息,在保证评价结果准确性的前提下,可以在一定程度上简化计算过程。

3 结论

1) 与对照处理单元 1 相比,其他各个单元的土壤微结构、团聚体、有机物质、粗骨颗粒等微形态特征变化不显著。土壤微结构都以“海绵状”微结构为主,仅在单元 4、6、8 等单元中出现了少部分棱角块状、亚棱角块状微结构;各个单元中的团聚体大多处于初级发育阶段,仅在单元 14 中发现了发育较好的动物活动形成的团聚体。由于粗骨颗粒平均粒径、磨圆度等特征的变化是自然、人力长期作用的结果,而本研究改良时间较短,所以各个单元粗骨颗粒特征差异不显著。14 个处理单元中,单元 10 中土壤黏粒最多、基质比最大、有机物质频率最高;土壤孔隙状况及毛管孔隙发育最好的单元分别是单元 8 和单元 13。

2) 将 13 个土壤微形态因素作为砂质土壤肥力

的评价指标,并对层次分析法进行改进,计算各个评价指标的权重,其中准则层指标土壤基质、土壤孔隙、有机物质、土壤结构体、粗骨颗粒的权重分别为 0.336, 0.253, 0.203, 0.124, 0.084。通过相同的方法计算各个准则层指标所对应的约束层指标权重,二者相乘即为约束层指标的综合权重。根据多因素综合评定法计算出的砂质土壤肥力排名如下:单元 8>单元 10>单元 6>单元 13>单元 14>单元 12>单元 11>单元 4>单元 9>单元 5>单元 7>单元 3>单元 2>单元 1。

3) 建立了砂质土壤肥力微形态评价的最小数据集,包含基质比、基质类型、基质颜色、毛管孔隙占比、孔隙类型、有机物质类型、粗骨颗粒平均粒径 7 个指标。最小数据集评价结果与原始评价结果呈显著的线性相关关系:原始评价结果 = 0.000 018 5 + 0.259 028 5 × 最小数据集评价结果,调整 R^2 为 0.965。因而实际对砂质土壤肥力进行评价时,最小数据集 7 个微形态指标可以代替原始的 13 个微形态指标反映全部的土壤肥力信息。

参考文献:

- [1] 张宾宾, 郭建斌, 蒋坤云, 等. 新型土壤改良剂 Arkadolith 对沙质土壤主要物理性质的影响[J]. 水土保持研究, 2011, 18(5): 59-62
- [2] 宋丽, 满洪喆, 王定勇, 等. 秸秆改良材料对砂质土壤钾素抗淋溶的效应[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(7): 81-86
- [3] 刘双营. 秸秆改良材料对砂质土壤氮素的调控效应研究[D]. 重庆: 西南大学, 2010: 4-6
- [4] 田野, 李海龙, 刘双, 等. 基于层次分析法的鞍山千山林区土壤肥力评价[J]. 辽宁林业科技, 2009(5): 29-31
- [5] 张水清, 黄绍敏, 郭斗斗, 等. 基于主成分分析法的土壤肥力评价[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(2): 1096-1097
- [6] 潘艳华, 张晓海, 杨春江, 等. 长期大量施用化肥及增施有机植物烟红壤微结构显微研究//施荣. 云南省烟草学会 2003 年学术年会优秀论文集[C]. 昆明: 云南科技出版社, 2005: 75-84
- [7] 秦鱼生, 涂仕华, 王正银, 等. 长期定位施肥下紫色土土壤微形态特征[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 352-356

- [8] 申思雨, 刘哲, 吕贻忠. 不同种植方式对温室土壤微形态的影响[J]. 土壤, 2016, 48(2): 355–360
- [9] Golding K A, Davidson D A, Wilson C A. Micromorphological evidence for the use of urban waste as a soil fertiliser in and near to historic Scottish towns// Gilkes R J, Prakongkep N. Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science: Soil solutions for a changing world. Symposium 4.5.1 Soil science: history, philosophy and sociology[C]. Wien, Austria: International Union of Soil Sciences (IUSS), c/o Institut für Bodenforschung, Universität für Bodenkultur, 2010: 12–15
- [10] 杨俐苹, 白由路, 王贺, 等. 测土配方施肥指标体系建立中“3414”试验方案应用探讨——以内蒙古海拉尔地区油菜“3414”试验为例[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 1018–1023
- [11] Stoops G. Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin section[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 19(5): 507–509
- [12] 吕贻忠, 李保国. 土壤学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006: 39–41
- [13] 吴春明, 阮锋. 基于层次分析法的级进模工序排样影响因素权重的计算[J]. 机电工程技术, 2012, 41(1): 13–16
- [14] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云, 等. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008(5): 148–153
- [15] 周旭, 安裕伦, 许武成, 等. 基于GIS和改进层次分析法的耕地土壤肥力模糊评价——以贵州省普安县为例[J]. 土壤通报, 2009(1): 51–55
- [16] 常建娥, 蒋太立. 层次分析法确定权重的研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2007(1): 153–156
- [17] 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
- [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
- [19] 向武, 周卫军, 于良艺, 等. 低山油茶林土壤肥力质量评价最小数据集的建立[J]. 湖南农业科学, 2013(3): 44–46
- [20] 贡璐, 张雪妮, 冉启洋, 等. 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

Fertility Evaluation of Sandy Soil Under Different Improvement Measures Based on Soil Micromorphological Characteristics —A Case Study of Horqin Sandy Land in Inner Mongolia

LIU Ying, WANG Shu^{*}, ZHANG Fengrong, LV Yizhong, LI Zhenzhen, MAO Shuailei, REN Naou
(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Combined with maize yield information, 13 indicators of soil micromorphology were selected as the evaluating indicators, soil thin section technique, Photoshop and Image-pro plus 6.0 software were used to qualitatively and quantitatively evaluate sandy soil fertility under different improvements based on a field test in Horqin of Tongliao city, Inner Mongolia, and then MDS of soil micromorphological indicators was setup to simplify the evaluation process. The results showed that characteristics of soil microstructure, soil aggregate, colour of soil matrix and skeleton grains were similar under different treatments. Clay particles in unit 10 (values of clay, organic fertilizer and humic acid were 3.00×10^5 , 3.00×10^4 , 7.50×10^3 kg/hm², respectively) were higher than other units, and also its ratios of soil matrix and frequency of organic matter were the highest. The degree of porosity development in unit 8 (values of clay, organic fertilizer and humic acid were 1.50×10^5 , 3.00×10^4 , 1.125×10^4 kg/hm², respectively) was higher than other units, but the capillary pores were better developed in unit 13 (values of clay, organic fertilizer and humic acid are 7.50×10^4 , 3.00×10^4 , 3.75×10^3 kg/hm², respectively). The weights of soil matrix, soil pore, organic matter, soil structure and skeleton grains in the rule layer were 0.33, 0.253, 0.203, 0.124 and 0.084, respectively; there were 7 indicators in the established MDS of soil micromorphology, i.e. ratio of soil matrix, type of soil matrix, colour of soil matrix, percentage of capillary pore, type of pore, type of organic matter and average diameter of skeleton grains. The MDS evaluated result was highly correlated with the original evaluated result, which indicated that the established MDS can feasibly replace original 13 indicators in evaluating sandy soil fertility.

Key words: Fertility of sandy soil; Soil micromorphological characteristics; Minimum dataset (MDS); Inner Mongolia; Horqin sandy land