

不同秸秆还田方式对土壤质量改良效应的综合评价

余 坤¹, 李国建¹, 李百凤¹, 褚晓升², 冯 浩^{2,3}

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065; 2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100;

3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 2011—2016 年采取田间定位试验方法, 对比研究了秸秆不还田对照 (CK), 长秸秆 (50 mm) 覆盖还田 (LM), 长秸秆 (50 mm) 翻压还田 (LP), 粉末秸秆 (1 mm) 翻压还田 (SP), 长秸秆 (50 mm) 氨化翻压还田 (ALP) 和粉末秸秆 (1 mm) 氨化翻压还田 (ASP) 6 种不同秸秆还田方式对土壤质量和冬小麦产量的影响。选择土壤体积质量 (X_1)、饱和导水率 (X_2)、饱和含水量 (X_3)、 >0.25 mm 水稳性团聚体含量 (X_4)、水稳性团聚体平均重量直径 (X_5)、水稳性团聚体几何平均直径 (X_6)、水稳性团聚体分形维数 (X_7)、总有机碳 (X_8)、全氮 (X_9)、可溶性有机碳 (X_{10})、可溶性有机氮 (X_{11})、微生物量碳 (X_{12})、微生物量氮 (X_{13})、土壤呼吸速率 (X_{14})、蔗糖酶 (X_{15})、脲酶 (X_{16})、过氧化氢酶 (X_{17})、碱性磷酸酶 (X_{18}) 等 18 个反映土壤质量的物理、化学及生物学指标作为评价指标, 采用因子分析方法对不同秸秆还田方式下的土壤质量进行综合评价, 并对其进行聚类分析, 最后利用冬小麦产量结果进行验证。结果表明: 应用因子分析法可将 18 个土壤指标归纳为 2 个主因子对土壤质量进行表征, 可解释的累计方差为 88.583%, 各处理土壤质量排列顺序为 $ASP > ALP > SP > LP > LM > CK$, 即氨化秸秆还田在土壤质量改良方面优于其它处理。聚类分析结果表明, 系统聚类图将 6 个秸秆还田处理分为 4 类, 分析结果与因子综合得分评价结果较为一致。从不同秸秆还田处理冬小麦产量变化来看, 秸秆还田较不还田对照能显著提高冬小麦产量, 氨化秸秆还田增产效果优于传统秸秆还田, 其中 ASP 处理 5 个冬小麦生长季平均产量 ($7\ 668\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 最高, 这也与土壤质量综合得分的变化趋势比较吻合。在本研究试验条件下, 粉末秸秆氨化翻压还田 (ASP) 改良土壤质量效果最好, 为最佳秸秆还田方式。

关键词: 秸秆还田; 秸秆处理方式; 土壤质量; 冬小麦产量; 因子分析; 聚类分析

中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A

Comprehensive evaluation of soil quality under different straw incorporation approaches

YU Kun¹, LI Guojian¹, LI Baifeng¹, CHU Xiaosheng², FENG Hao^{2,3}

(1. Northwest Engineering Corporation Limited of Power China, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. Chinese National Academy of Water-Saving Agriculture in Arid Region, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: This study aimed to select an efficient straw incorporation method to accelerate the decomposition rate of crop straw and promote the growth of winter wheat in semi-arid region of Shaanxi China. To achieve this goal, a field experiment used summer maize straw was carried out during 2011–2016. There were six treatments including control treatment with no straw returning (CK), long straw returning by covering soil (LM), long straw plowed into soil (LP), powdered straw plowed into soil (SP), long-ammoniated straw plowed into soil (ALP), and powdered-ammoniated straw plowed into soil (ASP). We investigated the effect of different straw returning approaches on soil physical, chemical, and biological properties, winter wheat yield, and then used factor analysis

收稿日期: 2019-08-01

修回日期: 2020-02-26

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2013AA102904)

作者简介: 余坤 (1988–), 男, 河南信阳人, 工程师, 主要从事农业水土资源利用与保护研究。E-mail: yukun88@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 李百凤 (1979–), 女, 陕西西安人, 高级工程师, 主要从事环境保护和水土保持设计工作。E-mail: 49698211@qq.com

and cluster analysis to evaluate the soil quality under different treatments. A total of 18 soil indexes including soil bulk density (X_1), soil saturated hydraulic conductivity (X_2), soil saturated water content (X_3), content of aggregate > 0.25 mm by wet sieving (X_4), mean weight diameter (X_5), geometric mean diameter (X_6), the fractal dimension of soil aggregates (X_7), total organic carbon (X_8), total nitrogen (X_9), dissolved organic carbon (X_{10}), dissolved organic nitrogen (X_{11}), microbial biomass carbon (X_{12}), microbial biomass nitrogen (X_{13}), soil respiration rate (X_{14}), sucrase (X_{15}), urease (X_{16}), catalase (X_{17}), and alkaline and phosphatase (X_{18}) were selected. Factor analysis and minimum Euclidean distance method were employed to evaluate the overall soil fertility. Two principal factors that can be used to characterize the cumulative was 88.58%, and the order of soil quality was as follows: ASP>ALP>SP>LP>LM>CK, that is, the ammoniated straw incorporation worked better than conventional straw on improving soil quality. Cluster analysis classified 6 treatments into 4 main groups on the basis of the measured parameters, which was mostly consistent with the result of factor analysis. Compared with the control treatment, the yield of winter wheat could be significantly increased by straw incorporation, and the treatment of ammoniated straw was better than conventional straw in increasing the winter wheat yield. Among the different treatments, the 5-year mean winter wheat yield ($7\ 668\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) with ASP was the highest, which was also consistent with the change trend of comprehensive score of soil quality. Under the condition of this study, the ASP treatment was the best way for straw returning to improve soil quality.

Keywords: straw incorporation; different straw utilization modes; soil quality; winter wheat yield; factor analysis; cluster analysis;

土壤质量主要包括 3 个方面含义:一是土壤提供植物养分和产生生物物质的土壤肥力质量;二是容纳、吸收、净化污染物的土壤环境质量;三是维护保障人类和动植物健康的土壤健康质量^[1]。土壤质量是一个复杂的功能实体,不能够直接测定,但可以通过建立合适的土壤质量指标体系对其进行定性和定量的评价。土壤质量指标是从土壤生产潜力和环境管理的角度检测和评价土壤健康状况的性质、功能或条件的指标^[2]。土壤质量评价指标体系大致可分为描述性指标(定性指标)和分析性指标(定量指标)两大类。其中,分析性指标主要是指选择土壤的各种属性,进行定量分析,获取分析数据,然后确定数据指标的阈值和最适值。根据分析性指标的性质,土壤质量的评价指标主要包括土壤物理、化学和生物学指标 3 个方面^[3]。近年来,统计学方法在相关领域广泛应用,越来越多的研究学者采用多变量分析方法,将土壤物理、化学和生物学指标集成综合指标以较为客观、全面地评价土壤质量的优劣。目前,因子分析和聚类分析等方法已被应用于土壤质量的综合评价中。

秸秆还田有利于改土保墒、提高土壤肥力,是中国提倡的保护性耕作措施之一^[4]。但是目前秸秆还田方式以秸秆覆盖和秸秆翻压还田为主。在秸秆资源利用方面存在较多问题,如作物秸秆碳氮比较高(禾本科作物秸秆 C/N 高达 60~80:1),施入土壤后分解较缓慢,易发生与作物争氮和诱发病

虫害等现象^[5-6]。鉴于此,本研究拟对秸秆进行氨化、粉碎处理后还田,以降低秸秆碳氮比、提高土壤中秸秆分布均匀性,通过不同秸秆还田方式来改良土壤;采用侧重于成因清晰性评价和命名清晰性高的因子分析法和聚类分析法^[7-8],对不同秸秆还田方式下土壤质量指标进行综合评价,旨在阐明还田秸秆自身特性对提升土壤质量的作用机理,从而为寻求合理的土壤改良措施提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2011 年 10 月—2016 年 6 月在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院试验站进行。该站位于 $108^{\circ}24'E, 34^{\circ}20'N$, 海拔 521 m, 地理位置属暖温带季风半湿润气候区。土壤质地为中壤土, 1 m 土层的平均田间持水率为 23%~25%, 凋萎含水率为 8.5%(以上均为质量含水率), 平均干体积质量为 $1.44\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。土壤有机质、全氮含量分别为 11.17、0.95 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷、速效钾含量分别为 13.67、183.20 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验前将玉米秸秆粉碎至粉末状(直径小于 1 mm)和长秸秆(长约 50 mm)两个水平,粉末状秸秆过 1 mm 筛备用。秸秆氨化处理方法^[9]:以水溶液形式加入秸秆干质量 1.33% 的氮素(调整秸秆 C/N 值为 25/1)、4% 的氢氧化钙,溶液总质量为秸秆干

质量的30%,以喷洒方式与秸秆混合均匀后装入密闭塑料箱,并放置在35℃恒温人工气候室培养6 d备用。

试验共设6个处理,分别为秸秆不还田对照(CK),长秸秆(50 mm)覆盖还田(LM),长秸秆(50 mm)翻压还田(LP),粉末秸秆(1 mm)翻压还田(SP),长秸秆(50 mm)氮化翻压还田(ALP)和粉末秸秆(1 mm)氮化翻压还田(ASP),采用随机区组排列,各处理重复3次,小区面积为20 m²(4 m×5 m),试验区周围布置2 m宽的相同作物保护带。供试冬小麦品种为“小偃22”,采用人工条播种植方式,播种量187.4 kg·hm⁻²,播种深度5 cm,行距25 cm。连续5个生长季秸秆还田量均为4 500 kg·hm⁻²。基肥施用量为225 kg·hm⁻²纯氮(尿素,N含量46%)、112.5 kg·hm⁻²纯磷(磷酸二铵,P₂O₅含量48%),每次播种前用旋耕机将基肥与不同处理秸秆一次性翻入土壤耕层0~15 cm内(LM处理秸秆在播种后覆盖于地表),生育期内不追肥。其它田间管理与当地农民种植习惯一致。

1.3 样品采集及测定

土壤样品于2016年6月冬小麦收获后,每个小区用环刀(体积为100 cm³),以“△”形布置3个采样点,在0~20 cm土层采集原状土样,密封带回实验室,测定土壤体积质量、饱和导水率和饱和含水量。同时,用土钻在耕层(0~20 cm)以“△”形布置3个采样点采集土样,剔除杂物,混合均匀后用四分法分出2份,一份鲜样过2 mm筛并于4℃条件下保存,用于土壤微生物量碳、氮、可溶性有机碳、氮、土壤酶活性的测定,另一份风干用于理化性质测试。

土壤体积质量、土壤孔隙度和土壤饱和含水量采用环刀法测定^[10];土壤饱和导水率采用定水头法测定^[11];土壤团聚体粒级分布和稳定性参考Limon-Ortega等^[12]方法测定;土壤有机碳用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定^[10];土壤全氮采用凯氏定氮法(KJELTE2300全自动定氮仪,瑞典)测定^[10]。

土壤微生物量碳、氮和可溶性碳、氮采用氯仿熏蒸0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄浸提法测定^[13-14];土壤蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶分别采用磷酸苯二钠比色法、靛酚比色法、硫代硫酸钠滴定法和高锰酸钾滴定法测定^[15]。

土壤呼吸采用动态闭合法测定^[16]:在2016年6月冬小麦成熟后,利用美国LICOR公司生产的Li-6400便携式光合作用测定系统和Li-6400-09土壤呼吸室进行各处理小区土壤呼吸测定。为减少测定误差,土壤叶室环刀提前2 h插入土壤2 cm深度处。

各处理按“△”形分布重复测定3个样点,每个处理的土壤呼吸速率是仪器2次循环测量的平均值。测定时间一般在上午09:00—11:00,相关研究表明该时段测得的土壤呼吸速率可以代表当日的平均值^[17]。

作物产量的测定:在成熟期,选取各处理均匀一致有代表性的1 m²样方区域的小麦进行测产,重复3次,折合成每公顷产量,kg·hm⁻²。

1.4 数据处理与统计分析

1.4.1 数据处理 水稳性团聚体指由性质稳定的胶体胶结团聚而形成的在水中浸泡、冲洗而不易分散的>0.25 mm的土壤团粒,其对土壤肥力有重要影响。>0.25 mm水稳性团聚体含量计算公式为^[10]:

$$R_{0.25} = \sum_{i=1}^n m_i \quad (1)$$

式中, $R_{0.25}$ 为>0.25 mm水稳定性团聚体质量分数(%); m_i 为对应粒级团聚体质量分数(%)。

团聚体平均重量直径(mean weight diameter, MWD)、几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)参数是评价土壤团聚体分布状况和稳定性特征的重要指标。MWD和GMD都是基于不同粒径的团聚体的质量得到的,计算公式如下^[18]:

$$MWD = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (2)$$

$$GMD = \text{Exp} \left[\left(\sum_{i=1}^n y_i \ln \bar{x}_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n y_i \right) \right] \quad (3)$$

式中, x_i 为任一级别范围内团聚体的平均直径(mm); y_i 为对应于 x_i 的团聚体质量分数(%)。

土壤团聚体分形维数 D_d 是土壤团聚体结构定量化反映,其计算采用杨培岭等^[19]推导的公式:

$$D_d = 3 - \frac{\lg(w_i/w_0)}{\lg(\bar{d}_i/\bar{d}_{\max})} \quad (4)$$

式中, D_d 为土壤团聚体分形维数,通过数据拟合得到; $\bar{d}_i$ 为某一级别土粒直径(mm); w_i 为直径小于 $\bar{d}_i$ 的累积质量(g); w_0 为总质量(g); $\bar{d}_i$ 为两相邻粒级 $\bar{d}_i$ 与 $\bar{d}_{i+1}$ 间土粒平均直径(mm); $\bar{d}_{\max}$ 为最大粒级土粒平均直径(mm)。

1.4.2 统计分析 试验数据采用Excel 2003、SPSS 16.0统计软件进行方差分析与原始数据的标准化,选择Duncan新复极差法用于显著性检验($P < 0.05$)。同时利用因子分析法和聚类分析法分别对土壤性质进行分析。

1.5 土壤质量评价指标与评价方法

1.5.1 土壤质量评价指标 为了更加客观地评价不同秸秆还田方式对土壤质量的改良效果,首先需

要筛选出合适的土壤质量指标。根据代表性、灵敏性和合理性的土壤质量评价原则^[20],同时结合本试验实际情况,共选取了 7 个土壤物理指标:土壤体积质量(X_1)、饱和导水率(X_2)、饱和含水量(X_3)、> 0.25 mm 水稳性团聚体含量(X_4)、水稳性团聚体平均重量直径(X_5)、水稳性团聚体几何平均直径(X_6)、水稳性团聚体分形维数(X_7);4 个土壤养分

指标:总有机碳(X_8)、全氮(X_9)、可溶性有机碳(X_{10})、可溶性有机氮(X_{11});7 个土壤微生物-酶活性指标:微生物量碳(X_{12})、微生物量氮(X_{13})、土壤呼吸速率(X_{14})、蔗糖酶(X_{15})、脲酶(X_{16})、过氧化氢酶(X_{17})、碱性磷酸酶(X_{18}),用总计 18 个指标对土壤质量进行综合分析评价,选取对土壤性质影响较大的因子。具体测定值见表 1。

表 1 土壤质量各指标平均值
Table 1 Mean values of soil quality indices

处理 Treatment	X_1 /(g·cm ⁻³)	X_2 /(mm·min ⁻¹)	X_3 /(kg·kg ⁻¹)	X_4 /%	X_5 /mm	X_6 /mm	X_7	X_8 /(g·kg ⁻¹)	X_9 /(g·kg ⁻¹)
CK	1.37±0.02	2.35±0.21	33.53±0.39	61.15±2.13	1.71±0.12	0.60±0.04	2.815±0.008	10.03±0.29	1.09±0.00
LM	1.34±0.03	3.50±0.15	35.04±1.03	66.46±0.98	1.89±0.43	0.66±0.17	2.786±0.013	11.08±0.32	1.16±0.01
LP	1.31±0.01	4.22±0.32	37.04±0.39	68.01±1.69	1.91±0.16	0.72±0.07	2.772±0.012	11.43±0.12	1.18±0.03
SP	1.27±0.03	4.75±0.03	38.15±0.62	68.97±0.42	2.12±0.14	0.79±0.06	2.769±0.004	11.12±0.11	1.18±0.02
ALP	1.27±0.02	6.07±0.44	39.26±0.68	71.74±0.89	2.20±0.21	0.82±0.06	2.755±0.009	10.92±0.29	1.20±0.03
ASP	1.25±0.03	6.25±0.40	39.85±0.82	72.54±0.53	2.16±0.16	0.82±0.03	2.748±0.005	10.72±0.16	1.21±0.01

处理 Treatment	X_{10} /(mg·kg ⁻¹)	X_{11} /(mg·kg ⁻¹)	X_{12} /(mg·kg ⁻¹)	X_{13} /(mg·kg ⁻¹)	X_{14} /(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	X_{15} /(mg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	X_{16} /(mg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	X_{17} /(ml·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	X_{18} /(mg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)
CK	208.95±6.41	48.62±1.16	328.38±4.09	62.82±0.60	3.33±0.10	0.94±0.01	2.40±0.02	0.98±0.01	2.36±0.04
LM	278.11±5.96	64.55±0.93	381.55±3.70	65.18±0.96	3.81±0.07	1.01±1.01	2.48±0.03	1.04±0.00	2.43±0.03
LP	239.37±2.17	60.55±1.02	386.95±3.58	67.20±1.28	4.19±0.09	1.02±0.00	2.54±0.02	1.05±0.00	2.46±0.02
SP	244.78±3.91	64.28±1.45	388.78±3.99	68.13±0.87	4.31±0.03	1.02±0.00	2.55±0.02	1.06±0.00	2.51±0.01
ALP	264.50±3.87	66.01±1.12	399.00±1.79	69.68±0.12	4.47±0.06	1.03±0.00	2.58±0.03	1.06±0.00	2.52±0.02
ASP	269.51±6.49	67.54±2.61	398.90±2.90	70.68±1.50	4.52±0.05	1.03±0.00	2.58±0.03	1.07±0.00	2.56±0.03

1.5.2 评价方法 以往基于不同秸秆还田方式进行土壤质量评价的研究多集中在对各指标分别比较,由于不同处理土壤物理、化学和生物学等各单个指标大小趋势未必一致,仅根据各指标数值大小难以对土壤质量的优劣做出准确评价。因子分析法作为评价土壤质量的一种有效方法,不仅能够避免信息重叠,而且对因子变量具有较强的解释性^[21],因此本研究采用侧重成因清晰性评价的因子分析法和聚类分析法,对不同秸秆还田方式下土壤质量进行综合评价,通过计算各主因子的得分计算出不同处理土壤质量的综合得分,并按照其得分的高低进行排序,从而能够综合量化土壤质量等级,并对影响土壤质量的因子进行解释。

因子分析是主成分分析的发展和延伸,通过对载荷阵作方差最大旋转,以将相关性比较密切的因子相对集中,便于对因子做出合理解释。具体来说,它主要是研究如何以较少的几个因子反映出原始资料的大部分信息,将众多原始的高维变量进行最佳综合与简化降维,避免确定各指标权重时的主

观随意性,以及如何较为清晰地解释各因子变量对土壤质量的作用与贡献,并最终达到对描述土壤质量的物理、化学和生物学指标进行综合的一种统计分析方法^[22]。本研究中所选取的土壤质量评价指标之间的相关系数绝对值绝大部分大于 0.3,同时原有变量通过了 KMO 检验(KMO 值为 0.60)和 Bartlett 球形度检验($P=0.00$),均满足因子分析的前提条件。因此,本文可采用因子分析法对不同秸秆还田方式下土壤质量改良效果进行评价。

为了更清楚直观地比较不同秸秆还田方式下的土壤质量状况,需要计算各处理的因子得分 F_i ,即

$$F_i = \sum A_i X$$

(5)

式中, A_i 是因子得分系数的第 i 列向量; X 为土壤评价指标。

将标准化数据带入以上计算公式,即可得到不同处理分别在各主因子上的得分,然后再根据以下计算式即可得到各处理的综合得分 F :

$$F = \sum b_i F_i = b_1 F_1 + b_2 F_2 + \cdots b_i F_i$$

(6)

式中, b 为各主因子对土壤变异的方差贡献率。

2 结果与分析

2.1 土壤质量指标标准化处理及相关矩阵

由于本试验中选取的 18 个土壤质量指标具有不同的量纲,且其数量级差别较大,为确保分析结果的客观性和科学性,需要对该 18 个土壤质量指标进行标准化处理(表 2),并进行敏感性分析。

由土壤质量指标敏感性分析结果(表 3)可知,土壤饱和导水率的变异系数最大,达到 31.63%,说明不同秸秆还田方式对土壤饱和导水率的影响最大。此外,土壤饱和含水率、水稳性大团聚体含量、水稳性团聚体平均重量直径和几何平均直径变异系数也较大,其变异系数分别达到 6.50%、5.75%、9.11%和 11.99%,表明不同秸秆还田方式对土壤结构的影响明显,在本研究中可作为秸秆还田影响土

壤质量的物理结构指标。对于土壤不同类型碳、氮指标来说,土壤有机碳、全氮、微生物量碳、氮、土壤可溶性有机碳、氮含量和土壤呼吸速率的变异系数均较大,分别达到了 4.46%、3.87%、6.58%、9.63%、10.69%和 13.31%,说明秸秆还田对土壤碳、氮库的影响明显,尤其是土壤呼吸速率、微生物量碳和可溶性有机碳含量,变异系数高于土壤有机碳。这可能是因为秸秆还田作为一种有机物料,施入土壤后能增加土壤有机碳含量,同时还田的秸秆为土壤微生物提供了大量的碳源,能促进微生物的生长和繁殖,进而加快土壤碳的矿化速率,同时可溶性有机碳、氮既是土壤微生物和直接能源物质,又是微生物死亡后的消纳汇,它们处于不断动态转化过程中。由此可知,土壤总有机碳对秸秆还田的响应不及土壤活性有机碳敏感。

表 2 各指标标准化数据
Table 2 Standardized data of each index

处理 Treatment	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
CK	1.495	-1.516	-1.479	-1.785	-1.565	-1.559	1.769	-1.769	-1.813	-1.736	-2.009	-2.084	-1.561	-0.509	-2.083	-1.775	-2.100	-1.642
LM	0.796	-0.713	-0.990	-0.428	-0.593	-0.834	0.520	0.412	-0.230	1.128	0.396	0.038	-0.734	-0.793	-0.057	-0.611	-0.009	-0.655
LP	0.096	-0.215	0.064	-0.035	-0.483	-0.177	-0.090	1.134	0.183	-0.476	-0.207	0.254	-0.029	-0.092	0.297	0.306	0.250	-0.114
SP	-0.670	0.161	0.437	0.210	0.689	0.665	-0.235	0.490	0.176	-0.252	0.356	0.327	0.297	0.132	0.459	0.454	0.519	0.498
ALP	-0.683	1.077	0.898	0.918	1.078	0.990	-0.845	0.070	0.662	0.564	0.616	0.735	0.839	0.368	0.692	0.801	0.605	0.709
ASP	-1.033	1.206	1.071	1.121	0.873	0.915	-1.121	-0.337	1.023	0.772	0.848	0.731	1.189	0.895	0.692	0.826	0.735	1.203

2.2 土壤质量的因子分析

根据因子分析方法的原理,运用 SPSS 16.0 统计软件计算出各指标的相关系数矩阵(表 4),分析得到各指标变量旋转后的成分矩阵及其得分系数矩阵,以及各因子所对应的特征值、贡献率和累计贡献率(表 5)。

根据统计学原理,当各主因子的累计方差贡献率≥85%时即可用来反映系统的变异信息。另外,主因子的特征值在一定程度上可以解释各因子对土壤质量的影响力度。本研究提取了 2 个主因子,第一主因子对总方差的贡献率是 50.462%,第二主因子对于总方差的贡献率是 38.121%,二者之和达到 88.583%(表 5),即前两个主因子基本上保留了原有指标的信息,说明利用因子分析不同秸秆还田方式下土壤质量的改良效果真实可靠。由表 5 可以看出,第一主因子(Z₁)主要有土壤体积质量、饱和导水率、饱和含水量、>0.25 mm 水稳性团聚体含量、团聚体平均重量直径、团聚体几何平均直径和团聚体分形维数等,它们与 Z₁的相关系数均超过 0.8,且主要是与土壤物理性质有关,可定义为土壤物理结构因子;第二主因子主要有土壤不同形态碳、氮含量以及土壤酶活性,代表了土壤中的微生物活性及土壤肥力状况,可定义为土壤生物肥力因子。

2.3 不同处理土壤质量的得分与排名

为了更清楚直观地比较不同秸秆还田方式下土壤质量状况,通过公因子得分系数矩阵(表 5)计算出各处理的因子得分和综合得分(表 6)。

由表 6 可知,第一主因子得分最高的是 ASP 处理,其次是 ALP 处理,说明 ASP 和 ALP 处理在降低土壤体积质量,提高土壤饱和导水率、饱和含水量和水稳性大团聚体含量及其稳定性方面占有明显优势,表明氨化和粉末秸秆还田能显著改善土壤物理性状,对土壤结构具有较好的改良作用;SP 和 LP 处理得分较低,但仍明显高于 LM 和 CK,说明秸秆翻压还田对改善土壤物理特性也有一定作用,而 LM 处理得分低于 CK,说明秸秆覆盖对改善土壤物理特性效果不明显。第二主因子得分最高的是 LM 处理,其次为 LP、SP、ALP 和 ASP 处理,最低为 CK 处理,说明秸秆还田处理较不还田对照均可显著提高土壤中各种形态碳、氮含量,提高土壤微生物活性,ASP 处理第二因子得分较低,这可能是由于 ASP 处理秸秆分解速率较快,其土壤有机碳含量低于传统秸秆还田处理。各处理的综合得分大小顺序依次为 ASP>ALP>SP>LP>LM>CK,说明秸秆还田处理较不还田对照能明显提高土壤综合性质,氨化秸秆还田对土壤综合性质的提升效果最佳。

表 3 不同处理条件下土壤质量指标的敏感性分析

Table 3 Sensitivity analysis of soil quality indicators under different treatments

因子 Factor	X_1 $/(g \cdot cm^{-3})$	X_2 $/(mm \cdot min^{-1})$	X_3 $/(kg \cdot kg^{-1})$	X_4 $/\%$	X_5 $/mm$	X_6 $/mm$	X_7	X_8 $/ (g \cdot kg^{-1})$	X_9 $/ (g \cdot kg^{-1})$	X_{10} $/ (mg \cdot kg^{-1})$	X_{11} $/ (mg \cdot kg^{-1})$	X_{12} $/ (mg \cdot kg^{-1})$	X_{13} $/ (mg \cdot kg^{-1})$	X_{14} $/ (\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$	X_{15} $/ (mg \cdot g^{-1} \cdot h^{-1})$	X_{16} $/ (mg \cdot g^{-1} \cdot h^{-1})$	X_{17} $/ (mg \cdot g^{-1} \cdot h^{-1})$	X_{18} $/ (mg \cdot g^{-1} \cdot h^{-1})$
极小值 Minimum value	1.22	2.13	33.22	60.97	1.68	0.59	2.74	9.66	1.08	202.00	47.78	325.45	62.40	3.20	0.94	2.39	0.98	2.32
极大值 Maximum value	1.40	6.71	40.28	73.40	2.24	0.87	2.82	11.52	1.24	284.17	70.22	401.80	71.60	5.13	1.04	2.62	1.07	2.58
均值 Mean value	1.30	4.52	37.10	68.14	2.00	0.74	2.77	10.88	1.17	250.87	61.92	380.59	67.28	4.04	1.01	2.52	1.04	2.47
标准差 Standard deviation	0.05	1.43	2.41	3.92	0.18	0.09	0.02	0.48	0.05	24.15	6.62	25.05	2.86	0.54	0.33	0.67	0.31	0.71
变异系数/% Variation coefficient	3.81	31.63	6.50	5.75	9.11	11.99	0.83	4.46	3.87	9.63	10.69	6.58	4.25	13.31	3.26	2.67	2.96	2.87

注:各指标样本数为 18 个。 Note: The sample size of each index is 18.

表 4 各指标的相关系数矩阵

Table 4 Correlation coefficient of the soil properties

因子 Factor	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_1	1.00																	
X_2	-0.89**	1.00																
X_3	-0.95**	0.95**	1.00															
X_4	-0.90**	0.94**	0.92**	1.00														
X_5	-0.87**	0.92**	0.91**	0.91**	1.00													
X_6	-0.92**	0.92**	0.95**	0.94**	0.97**	1.00												
X_7	-0.92**	-0.93**	-0.93**	-0.99**	-0.89**	-0.94**	1.00											
X_8	-0.36	0.33	0.36	0.50*	0.37	0.43	-0.52*	1.00										
X_9	-0.77**	0.87**	0.85**	0.90**	0.83**	0.83**	-0.89**	0.57*	1.00									
X_{10}	-0.47*	0.60**	0.47*	0.69**	0.61**	0.52*	-0.65**	0.44	0.69**	1.00								
X_{11}	-0.74**	0.81**	0.75**	0.89**	0.82**	0.79**	-0.86**	0.60**	0.85**	0.89**	1.00							
X_{12}	-0.82**	0.85**	0.83**	0.93**	0.84**	0.85**	-0.92**	0.69**	0.90**	0.79**	0.95**	1.00						
X_{13}	-0.90**	0.93**	0.92**	0.92**	0.89**	0.90**	-0.92**	0.37	0.86**	0.55*	0.75**	0.86**	1.00					
X_{14}	-0.42	0.50*	0.48*	0.44	0.44	0.43	-0.43	0.56*	0.90**	0.11	0.22	0.35	0.64**	1.00				
X_{15}	-0.83**	0.85**	0.84**	0.93**	0.85**	0.86**	-0.93**	0.71**	0.90**	0.74**	0.93**	0.99**	0.87**	0.40	1.00			
X_{16}	-0.84**	0.89**	0.90**	0.90**	0.86**	0.88**	-0.90**	0.59*	0.82**	0.57*	0.83**	0.90**	0.87**	0.45	0.92**	1.00		
X_{17}	-0.83**	0.84**	0.84**	0.93**	0.85**	0.86**	-0.92**	0.71**	0.91**	0.76**	0.94**	0.99**	0.86**	0.37	0.99**	0.91**	1.00	
X_{18}	-0.90**	0.95**	0.93**	0.94**	0.88**	0.90**	-0.93**	0.41	0.89**	0.58*	0.84**	0.87**	0.93**	0.51*	0.89**	0.92**	0.88**	1

注: * 表示显著相关($P<0.05$); * * 表示极显著相关($P<0.01$)。
Note: * mean significant correlation at 0.05 levels; * * mean extremely significant correlation at 0.01 levels.

2.4 土壤质量的聚类分析

为了使评价结果更加清晰,将各处理的主因子得分作为评价其肥力的新指标,以欧氏距离衡量各处理对土壤质量改良差异大小,采用最短距离法对各处理进行系统聚类,具体水平分类如图 1 所示。

从系统聚类图(图 1)来看,可以把 6 个处理分为 4 类:改良效果优(ALP, ASP);改良效果中等偏上(LP, SP);改良效果中等偏下(LM);改良效果最差(CK)。

表 5 因子旋转后成分矩阵及得分系数矩阵				
Table 5 Component matrix and score coefficient matrix after factor rotation				
因子 Factor	因子旋转后成分矩阵 Component matrix after factor rotation		因子得分系数矩阵 Factorscore coefficient matrix	
	Z1	Z2	A1	A2
X_1	-0.831	-0.422	-0.137	0.065
X_2	0.858	0.449	0.137	-0.061
X_3	0.877	0.409	0.155	-0.083
X_4	0.767	0.611	0.063	0.031
X_5	0.802	0.491	0.108	-0.028
X_6	0.824	0.482	0.117	-0.038
X_7	-0.770	-0.601	-0.067	-0.026
X_8	0.014	0.842	-0.236	0.341
X_9	0.662	0.650	0.019	0.077
X_{10}	0.239	0.800	-0.155	0.260
X_{11}	0.486	0.834	-0.088	0.203
X_{12}	0.587	0.796	-0.046	0.158
X_{13}	0.404	0.887	0.159	-0.088
X_{14}	0.752	-0.175	0.283	-0.287
X_{15}	0.613	0.771	-0.030	0.141
X_{16}	0.726	0.596	0.055	0.036
X_{17}	0.599	0.786	-0.039	0.151
X_{18}	0.832	0.495	0.116	-0.035
特征值 Eigenvalue eigenvalue	9.083	6.862		
方差贡献率/% Variance contribution	50.462	38.121		
累计方差贡献率/% Cumulative variance contribution	50.462	88.583		

表 6 不同处理各因子得分及综合得分						
Table 6 Scores and general scores of principal components under different treatments						
处理 Treatment	Z ₁ 得分 Z ₁ score	排名 Ranking	Z ₂ 得分 Z ₂ score	排名 Ranking	综合得分 Integrated score	排名 Ranking
CK	-0.836	5	-1.951	6	-2.787	6
LM	-1.345	6	0.985	1	-0.360	5
LP	-0.331	4	0.434	2	0.103	4
SP	0.376	3	0.195	4	0.572	3
ALP	0.867	2	0.274	3	1.141	2
ASP	1.269	1	0.062	5	1.331	1

不同秸秆还田方式下的土壤质量等级相比较而言,ALP 和 ASP 处理最高,LP 和 SP 较高,LM 次之,CK 最差。说明秸秆还田处理较不还田对照能明显改善土壤质量,其中氨化秸秆翻压还田效果最佳,未氨化秸秆翻压还田次之,秸秆覆盖效果最差。这一结果表明,通过对秸秆进行氨化处理后还田能显著改善土壤结构和团聚体状况,增强土壤微生物和酶活性,从而达到改良土壤质量的目的,而粉碎措施对提高秸秆还田改良土壤质量的效果不明显。

2.5 土壤质量评价结果与农田生产力的关系

土壤质量的优劣可以通过农田生产力水平来反映,具体表现为作物产量的高低^[23],因此作物产量也常被作为检验评价结果客观性及准确性的依据。不同处理连续 5 a 冬小麦产量变化如图 2 所示。

由图 2 可知,各秸秆还田处理较 CK 能显著提高冬小麦籽粒产量。其中,秸秆翻压还田提高冬小麦产量效果优于秸秆覆盖,氨化秸秆还田提高冬小麦产量效果优于传统秸秆还田,其中 ASP 处理冬小麦 5 a 平均产量最高,为 7 668 kg · hm⁻²。不同处理

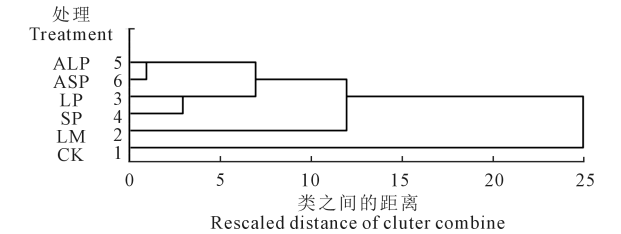
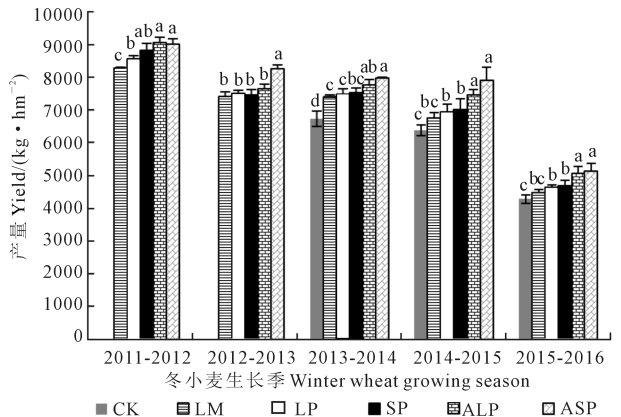


图 1 各处理土壤质量评价聚类图

Fig.1 Cluster graph of soil quality assessment in different treatments



注:不同字母表示同一年生长季不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters indicate significant differences among treatments in the same growing season ($P<0.05$).

图 2 连续 5 个生长季各处理冬小麦产量变化

Fig.2 Winter wheat yield under different treatments in five growing seasons

冬小麦多年平均产量与土壤质量综合得分的变化趋势比较吻合,说明通过这两种方法进行土壤质量评价所得到的结果是可靠的。

3 讨 论

3.1 土壤评价指标体系的建立

土壤质量是土壤物理、化学和生物学特性的综合反映,其评价结果可直观表征出土壤质量的总体状况^[24]。由于评价目的和侧重评价的尺度不同,评价指标和评价方法的选择亦有所差异^[25]。以往基于不同秸秆还田方式进行土壤质量评价的研究多集中在对各指标分开比较,由于不同处理土壤物理、化学和生物学等各单个指标大小趋势未必一致,仅根据各指标数值大小难以对土壤质量的优劣做出准确评价。因子分析法作为评价土壤质量的一种有效方法,不仅能够避免信息重叠,而且对因子变量具有较强的解释性^[21],因此本研究采用命名清晰性高、应用上侧重成因清晰性评价的因子分析法和聚类分析法,对不同秸秆还田方式下土壤质量进行综合评价,通过计算各主因子的得分计算出不同处理土壤质量的综合得分,并按照得分的高低排序,从而能够综合量化土壤质量等级,并对影响土壤质量的因子进行解释。

3.2 不同秸秆还田方式土壤质量的综合评价

本研究基于土壤各指标间的相关性计算出所选取的土壤物理、化学和生物学性质等 18 个土壤质量指标的因子载荷以及各因子对应的特征值、贡献率和累计贡献率(表 5),得到本试验中影响土壤质量的 2 个主因子:土壤物理结构因子和土壤生物肥力因子,其方差贡献率分别为 50.462%和 38.121%,说明这两个因子能把土壤全部指标提供信息的 88.583%反映出来,因此本研究利用因子分析法对不同秸秆还田方式下土壤质量进行评价是可靠的。

土壤物理性质的优劣直接或间接决定作物的生长和土壤生态系统的功能,土地利用方式以及管理措施均能对土壤的物理性质产生影响,从而影响到土壤环境及生态功能。本研究结果表明,因子分析综合得分排名前 3 名的是 ASP、ALP 和 SP 处理,且主要分布在土壤物理结构因子得分上,CK 处理综合得分最低。说明秸秆还田处理较不还田对照能提高土壤质量,且粉碎和氨化秸秆还田处理改善土壤质量效果优于传统秸秆还田,这主要是由于粉碎和氨化秸秆还田能明显降低土壤容重,提高土壤饱和和导水率和饱和含水率,增加土壤大团聚体含量及其稳定性,氨化和粉碎措施结合后效果更加显著,

这与王珍等^[26]和 Guillou 等^[27]关于粉末秸秆和 C/N 比较低的秸秆施入土壤后能显著改善土壤持水和入渗能力,提高土壤团聚体稳定性的研究结果一致。

秸秆作为一种外源有机物料,施入土壤后能明显提高土壤有机碳水平,而土壤有机碳被认为是表征土壤质量和土壤可持续性的最重要指标,对土壤物理、化学及生物学性质均会产生重要影响^[28-29]。Bossuyt 等^[30]和 Guillou 等^[27]研究发现,C/N 比较低的秸秆施入土壤后分解速率较快,能够提高土壤微生物的活性,进而促进土壤碳的矿化分解。本研究中,各秸秆还田处理土壤生物肥力因子得分均高于 CK 处理,说明秸秆还田较不还田对照能提升土壤生物活性和土壤肥力。有趣的是,虽然 SP、ALP 和 ASP 处理土壤微生物量碳、微生物量氮、土壤酶活性以及土壤呼吸速率均高于 LM 和 LP,但 SP、ALP 和 ASP 处理在土壤生物肥力因子的得分排名较低,这可能是与传统秸秆还田相比(LM 和 LP 处理),粉碎和氨化处理秸秆还田后分解速率较快,土壤微生物和土壤酶活性较高,促进了土壤中有有机碳的矿化分解,导致土壤有机碳含量较低造成的。由此可知,土壤有机碳对土壤生物肥力的影响较大,粉碎和氨化秸秆还田虽然可以提高土壤生物活性,但其促进有机碳分解的问题也需要进一步研究。此外,尽管 ALP 和 ASP 处理土壤生物肥力因子得分较低,但综合排名为前 2 名,这主要与 ALP 和 ASP 处理土壤物理结构因子得分较高,且土壤物理结构因子对土壤质量评价的方差贡献率(50.462%)高于土壤生物肥力因子(38.121%)有关。

3.3 土壤质量综合评价结果与农田生产力水平的一致性分析

作物产量是农田生产力水平的综合体现,不同秸秆还田方式对土壤质量的影响必然反映到作物产量的变化上。本研究结果表明,连续 5 a 还田后各处理土壤质量综合评价排名和冬小麦产量排名均为 ASP>ALP>SP>LP>LM>CK,说明秸秆还田较不还田对照能改善农田土壤质量,提高冬小麦产量,其中氨化秸秆还田效果优于传统秸秆还田。由聚类分析结果表明,氨化秸秆还田改善土壤质量效果最佳,其次为未氨化秸秆翻压还田处理,秸秆覆盖处理效果较差,而秸秆不还田处理效果最差,这与因子分析评价结果基本一致。由此可知,本研究采用因子分析获得的土壤质量综合评价得分(*F* 值)不仅能量化土壤质量等级,且能在一定程度上表征农田生产力水平,其对不同秸秆还田方式下土壤质量综合评价的结果是合理、可靠的。

4 结 论

(1)通过对不同秸秆还田方式下的 18 个土壤质量指标进行因子分析,提取出的 2 个主因子反映了原信息总量的 88.583%。第一主因子主要有土壤体积质量、饱和导水率、饱和含水量、>0.25 mm 水稳性团聚体含量、团聚体平均重量直径、团聚体几何平均直径和团聚体分形维数等,代表了土壤物理结构状况;第二主因子主要有土壤不同形态碳、氮含量以及土壤酶活性,代表了土壤中的微生物活性及土壤肥力状况。2 个主因子涵盖了土壤的物理、化学和生物学指标,使评价更具科学性。

(2)不同处理土壤质量得分结果表明,氨化秸秆还田在土壤质量改良方面优于其它处理。土壤肥力指标相关性分析表明,氨化秸秆还田主要是通过降低土壤容重、提高土壤饱和导水率和饱和含水量、提高水稳性大团聚体含量及其稳定性等土壤结构因子,进而改善土壤质量。

(3)聚类分析结果表明氨化秸秆还田土壤质量最高,传统秸秆翻压还田较高,秸秆覆盖次之,不还田对照最差,与因子分析结果一致,多年产量变化趋势也与其吻合,其中 ASP 处理的冬小麦 5 a 平均产量最高,为 $7\,668\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

综上,秸秆经粉碎、氨化处理后还田在改良土壤质量效果方面优于传统秸秆还田,粉碎并氨化秸秆较传统秸秆还田方式在提高冬小麦产量方面具有明显的促进作用,是本试验最佳的秸秆还田方式。研究结果可为干旱、半干旱地区改善秸秆还田措施、提高旱地农业生产潜力提供指导。

参 考 文 献:

[1] 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.

[2] 郑昭佩,刘作新. 土壤质量及其评价[J]. 应用生态学报, 2003, 14 (1): 131-134.

[3] 路鹏,苏以荣,牛铮,等. 土壤质量评价指标及其时空变异[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15 (4): 190-194.

[4] 刘世平,聂新涛,张洪程,等. 稻麦两熟条件下不同土壤耕作方式与秸秆还田效用分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 48-51.

[5] 李少昆,王克如,冯聚凯,等. 玉米秸秆还田与不同耕作方式下影响小麦出苗的因素[J]. 作物学报, 2006, 32(3): 463-465.

[6] Yu K, Dong Q G, Chen H X, et al. Incorporation of pre-treated straw improves soil aggregate stability and increases crop productivity [J]. Soil Fertility & Crop Nutrition, 2017, 109(5): 2253-2265.

[7] 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.

[8] 生物炭与氮肥配施对枣园土壤培肥效应的综合评价[J]. 农业工程学报, 2018, 34 (1): 134-140.

[9] 毛华明,朱仁俊,冯仰廉. 饲喂复合化学处理大麦秸秆颗粒对泌乳牛生产性能的影响[J]. 云南农业大学学报, 1999, 14(2): 167-170.

[10] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983: 62-126.

[11] 郑纪勇,邵明安,张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和导水率空间变异特征[J]. 水土保持学报, 2004, 18 (3): 53-56.

[12] Limon-Ortega A, Govaerts B, Deckers J, et al. Soil aggregate and microbial biomass in a permanent bed wheat-maize planting system after 12 years [J]. Field Crops Research, 2006, 97(2/3): 302-309.

[13] Jenkinson D S, Brookes P C, Powlson D S. Measuring soil microbial biomass [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2004, 36(1): 5-7.

[14] 李娟,赵秉强,李秀英,等. 长期不同施肥制度下几种土壤微生物学特征变化[J]. 植物生态学报, 2008, 32 (4): 891-899.

[15] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.

[16] 朱艳,蔡焕杰,宋利兵,等. 加气灌溉下气候因子和土壤参数对土壤呼吸的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47 (12): 223-232.

[17] Jia B R, Zhou G S, Wang Y H, et al. Effects of temperature and soil water content on soil respiration of grazed and ungrazed *Leymus chinensis* steppes, Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Environments, 2006, 67 (1): 60-76.

[18] 邵婉丽,高灯州,潘婷,等. 水稻秸秆还田对福州平原稻田土壤水稳性团聚体分布及稳定性影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(5): 1833-1840.

[19] 杨培岭,罗远培,石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899.

[20] 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.

[21] 王芳. 有机肥培措施对土壤肥力及作物生长的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014.

[22] 王芳. 主成分分析与因子分析的异同比较及应用[J]. 统计教育, 2003, (5): 14-17.

[23] 梁淑敏,谢瑞芝,李朝苏,等. 成都平原不同耕作模式的农田效应研究 II. 土壤综合质量评价[J]. 中国农业科学, 2011, 44 (4): 738-744.

[24] 刘广明,吕真真,杨劲松,等. 基于主成分分析及 GIS 的环渤海区域土壤质量评价[J]. 排灌机械学报, 2015, 33(1): 67-72.

[25] 贡璐,张海峰,吕光辉,等. 塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量评价[J]. 生态学报, 2011, 31 (14): 4136-4143.

[26] 王珍. 秸秆不同还田方式对土壤水分特性及土壤结构的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2010.

[27] Le Guillou C, Angers D, Leterme P, et al. Differential and successive effects of residue quality and soil mineral N on water-stable aggregation during crop residue decomposition [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43 (9): 1955-1960.

[28] Malhi S S, Nyborg M, Solberg E D, et al. Long-term straw management and N fertilizer rate effects on quantity and quality of organic C and N and some chemical properties in two contrasting soils in Western Canada [J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, 47 (7): 785-800.

[29] Reeves D W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems [J]. Soil & Tillage Research, 1997, 43 (1-2): 131-167.

[30] Bossuyt H, Deneef K, Six J, et al. Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability [J]. Applied Soil Ecology, 2001, 16 (3): 195-208.