

不同有机物料对渭北旱塬耕地土壤短期培肥效应的综合评价*

王芳¹ 张金水^{1**} 高鹏程² 同延安¹

(¹ 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; ² 西北农林科技大学理学院, 陕西杨凌 712100)

摘要 通过田间试验和室内分析,研究了施用不同有机物料对渭北旱塬耕地土壤化学性质和酶活性的影响,选取有机质等 10 个能够反映土壤肥力质量特性的定量因子作为评价指标,采用因子分析对土壤肥力质量进行综合评分,然后用欧氏距离最短距离法对其进行聚类,最后利用作物产量结果进行验证.结果表明:通过土壤有机培肥,土壤肥力质量和作物产量均有显著提高,与单施化肥相比,施加秸秆堆肥和厩肥处理的小麦产量分别提高了 20.43% 和 22.38%;对土壤肥力综合进行评价,秸秆堆肥配施化肥的土壤肥力质量最高,综合得分达 56.53,厩肥配施化肥较高,高量秸秆配施化肥次之.可见,通过秸秆堆肥或厩肥配施化肥进行培肥土壤,能显著提高土壤肥力水平,从而提高作物产量;利用有机质等 10 项土壤肥力特性因子,采用因子分析对土壤肥力质量进行综合评价,能够准确反映土壤肥力水平,预测土壤生产力状况.

关键词 有机培肥 土壤肥力 因子分析 聚类分析

文章编号 1001-9332(2010)04-0930-07 **中图分类号** S158.2 **文献标识码** A

Short term effect of applying organic materials in improving soil fertility of Weibei rainfed highland. WANG Fang¹, ZHANG Jin-shui¹, GAO Peng-cheng², TONG Yan-an¹ (¹College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²College of Science, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2010, 21(4): 930-936.

Abstract: A comprehensive evaluation was made on the effects of applying different organic materials on the soil chemical properties and enzyme activities in Weibei rainfed highland, based on field experiment and laboratory analysis. A total of ten quantitative indices were selected, and factor analysis and minimum Euclidean distance method were employed to evaluate the overall soil fertility. Crop yield was used to verify the evaluation results. Applying organic materials promoted soil fertility and crop yield significantly. Compared with applying chemical fertilizer alone, its combination with straw compost and with organic manure increased the wheat yield by 20.43% and 22.38%, respectively. The soil quality under the combined application of chemical fertilizer with straw compost was the highest, with an integrated score up to 56.53, followed by the combined application of chemical fertilizer with organic manure, and of chemical fertilizer with high amount straw. Therefore, a combined application of chemical fertilizer with straw compost or organic manure could improve the soil fertility significantly, and thereby, increase the crop yield. Using the selected 10 factors and factor analysis to evaluate the quality of soil fertility could accurately reflect the soil fertility level, and predict the soil productivity in the highland.

Key words: building up fertility with organic materials; soil fertility; factor analysis; cluster analysis.

* 国家科技支撑计划项目(2006BAD05B07)资助.

** 通讯作者. E-mail: changsui@21cn.com

2009-09-01 收稿, 2010-01-31 接受.

合理进行土壤培肥,不仅是提高土壤质量的关键,也是保证土壤资源可持续利用的核心问题^[1-2]。研究表明,对耕地土壤培肥最有意义的途径,就是施用有机物料或有机肥料,即土壤有机培肥^[3]。侯光炯等^[4]认为,有机肥料依靠日变幅较小的土壤水热动态周期性变化,给微生物活动创造了良好的环境,使其能够顺利通过腐殖化阶段,形成保水、保肥力高的腐殖质,从而提高土壤肥力及作物产量和品质。渭北旱塬是传统旱作农业区,降雨偏少,土壤瘠薄,生产水平较低。近年来,随着农业生产技术的不断提高,该区耕地土壤肥力状况得到相应改善,但是土壤有机质含量仍然偏低,并且作物产量低而不稳定,属于落后的农业耕作区,所以培肥地力仍是实现该区农业可持续发展的关键措施。而充分利用有机肥源,不仅可以提高土壤肥力,而且可以降低生产成本,提高资源的利用效率。

以往人们多采用部分土壤性质或环境因素与作物产量的相关关系来表征培肥后土壤的肥力状况^[5],较难综合反映土壤肥力的高低,所以需要选择较客观、全面的方法对其进行综合评价,目前主成分分析、聚类分析、因子分析等方法已被用于土壤肥力的综合评价。为此,本研究通过不同有机物料与化肥配合施用来培肥土壤,采用因子分析法和聚类分析法^[6-7]对渭北旱塬不同有机培肥措施下土壤肥力指标进行评价,旨在阐明有机物料对提升该地土壤质量的作用,从而为寻求合理的培肥措施提供理论依据和技术支撑。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

田间试验在西北农林科技大学甘井旱农试验基地进行。该基地位于陕西省合阳县甘井村(35°19'87" N, 110°05'22" E),海拔高度约880 m,年平均降水量572 mm,年蒸发量1833 mm,年均温度9℃~10℃,全年无霜期160~200 d,≥10℃积温2800℃~4000℃。冬春干旱,四季多风。2007年9月开始田间试验。试验前0~20 cm土壤的化学性质为:有机质12.5 g·kg⁻¹,全氮0.81 g·kg⁻¹,速效磷10.7 mg·kg⁻¹,速效钾108 mg·kg⁻¹,pH 8.24。

1.2 试验设计

试验共设7个处理:1)不施肥(CK);2)施用化肥(T₁);3)化肥+低量秸秆(玉米茎叶3750 kg·hm⁻²,干质量,下同,T₂);4)化肥+中量秸秆(玉米茎叶7500 kg·hm⁻²,T₃);5)化肥+高量秸秆(玉米茎

叶15000 kg·hm⁻²,T₄);6)化肥+秸秆堆肥(7500 kg·hm⁻²,T₅);7)化肥+厩肥(15000 kg·hm⁻²,T₆)。每个处理重复3次,采用随机区组设计,小区面积为27 m²(4.5 m×6 m)。化肥施用量均为N 150 kg·hm⁻²、P₂O₅ 90 kg·hm⁻²、K₂O 60 kg·hm⁻²,化肥品种为尿素、磷酸二铵和硫酸钾。秸秆堆肥为粉碎的玉米秸秆加入少量鸡粪及EM菌剂堆制而成。厩肥为农户垫土牛圈粪。粉碎的玉米秸秆、秸秆堆肥、厩肥及化肥均于冬小麦播种前作为基肥一次性施入。供试作物为冬小麦,品种为晋麦47号。2007年9月23日播种,基本苗密度约270万株·hm⁻²,2008年6月13日收获,6月23日在各小区按照“S”形5点采样,采集0~20 cm土层土样风干备用。

1.3 测定方法

土壤有机质、全氮、全磷、全钾分别采用重铬酸钾稀释热法、凯氏定氮法、HClO₄-H₂SO₄法、NaOH熔融-火焰光度法测定;土壤速效磷、速效钾分别采用0.5 mol·L⁻¹NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法、1 mol·L⁻¹NH₄OAc浸提-火焰光度计法^[8]测定;土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶分别采用靛酚比色法、硫代硫酸钠滴定法、磷酸苯二钠比色法^[9]测定;pH采用水土比为2.5:1的电位法测定。

1.4 数据处理

数据分析采用SPSS 16.0软件的Factor Analysis和Cluster Analysis及Microsoft Excel软件进行。

其中因子分析和聚类分析的主要步骤为:1)选取土壤肥力指标变量,计算原始指标数据矩阵;2)将原始数据矩阵标准化;3)确定初始因子载荷矩阵,选取主因子,为了使因子所表达的意义更直观,运用Varimax旋转法对初始因子进行旋转,根据最终因子载荷矩阵,对各主因子进行解释;4)计算各施肥处理的因子得分值,并以因子贡献率为权重计算每个施肥处理土壤肥力质量的综合得分及排名;5)再以原始数据经标准化后的数据矩阵为聚类变量,用系统聚类法对各施肥处理下土壤肥力质量进行类型划分,并进行评价;6)最后通过各施肥处理下的作物产量进行进一步验证。

2 结果与分析

2.1 不同有机培肥措施下土壤肥力评价指标的选取

为了综合评价土壤培肥效果,需要对土壤肥力指标进行筛选。土壤质量评价指标应以能较显著影响土壤生产力的土壤养分为主^[10]。一般来说,评价

土壤质量需要土壤物理、化学和生物指标^[11]. 刘世梁等^[12]提出使用频率最高、具有稳定性的评价耕作土壤质量的因子,共有 10 项,包括:有机质、全氮、全磷、全钾、有效磷、速效钾、pH、CEC、质地、耕层厚度. 依据科学性、合理性和可比性^[13]的土壤质量评价原则,结合试验区实际情况,本文选取了能反映该区域土壤肥力状况的 10 项指标进行土壤肥力质量评价,包括:有机质(X_1)、全氮(X_2)、全磷(X_3)、全钾(X_4)、速效磷(X_5)、速效钾(X_6)、pH(X_7)、脲酶(X_8)、碱性磷酸酶(X_9)、蔗糖酶(X_{10}),各指标的测定值见表 1.

2.2 不同有机培肥措施下土壤肥力质量评价方法的选择

因子分析法是主成分分析法的扩展. 它是研究如何以最少的信息丢失,将众多原始变量浓缩成少数几个因子变量,以及如何使因子变量具有较强的可解释性的一种多元统计分析方法^[14]. 其特点是命名清晰性高,应用上侧重成因清晰性的综合评价^[15]. 因此本文采用因子分析法对不同有机培肥措施下的土壤肥力质量进行评价.

表 1 各指标测定结果
Tab. 1 Measured values of the indices

处 理 Treatment	X_1 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	X_2 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	X_3 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	X_4 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	X_5 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	X_6 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	X_7	X_8 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	X_9 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	X_{10} ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)
CK	12.95b	0.877a	0.498b	16.39ab	8.27b	108.2c	8.21a	59.3c	49.1c	587.5d
T ₁	13.59ab	0.897a	0.561a	15.86b	9.79b	107.3c	8.14c	68.3bc	49.4c	650.7cd
T ₂	13.41ab	0.885a	0.545ab	15.87b	10.54b	116.4bc	8.17bc	70.9b	55.0c	725.0bc
T ₃	13.56ab	0.882a	0.553ab	16.06b	10.66b	122.4abc	8.18abc	75.6b	85.4b	716.0bc
T ₄	13.83a	0.899a	0.546ab	16.15b	8.76b	131.5ab	8.18abc	95.7a	89.8b	856.3a
T ₅	13.45ab	0.918a	0.595a	16.09b	23.41a	137.3a	8.19ab	95.5a	106.8ab	759.7b
T ₆	13.80a	0.923a	0.544ab	16.88a	10.77b	114.2bc	8.18abc	91.0a	130.0a	702.8bc

同列数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$) Different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level.

表 2 各指标的相关系数矩阵
Tab. 2 Correlation coefficients matrix of the indices

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
X_1	1	0.12	0.38	0.03	0	0.04	-0.19	0.36	0.21	0.20
X_2		1	0.57**	0.35	0.33	0.63**	0.14	0.40	0.30	0.28
X_3			1	-0.09	0.62**	0.47*	-0.12	0.43*	0.29	0.30
X_4				1	-0.11	0.05	0.37	0.16	0.43*	-0.14
X_5					1	0.46*	0.06	0.55**	0.43*	0.24
X_6						1	0.15	0.53*	0.47*	0.61**
X_7							1	-0.06	0.10	-0.06
X_8								1	0.71**	0.67**
X_9									1	0.46*
X_{10}										1

* $P<0.05$; ** $P<0.01$.

2.2.1 土壤肥力质量的因子分析 把原始数据标准化,依据因子分析方法^[16]的原理,运用 SPSS 16.0 统计软件可计算出各指标的相关系数矩阵(表 2),各指标变量旋转后的因子载荷矩阵,各因子所对应的特征值、贡献率和累计贡献率等(表 3). 由表 3 可以看出,前四个主因子的贡献率已达 98.6%,说明前四个主因子能反映土壤全部指标信息的 98.6%,因此利用因子分析法评价土壤肥力质量是可靠的. 第一主因子(Z_1)上,脲酶、蔗糖酶、速效钾、有机质有较大正值. 土壤酶活性与土壤物理、化学和生物学性质及农业耕作措施有显著的相关性^[17],土壤有机质含量也是评价土壤肥力的重要指标^[18],因此,第一主因子可定义为酶活性因子;第二主因子(Z_2)上,全氮、全钾及碱性磷酸酶有较大正值,其中全氮、全钾可反映土壤养分的总贮量,故可定义为养分供应容量因子;第三主因子(Z_3)上,全磷、速效磷、速效钾有较大正值,其中速效磷、速效钾反映了土壤供给作物养分强度的大小,且三者间有显著的相关性,故可定义为养分供应强度因子;第四主因子(Z_4)在 pH 指标上的载荷绝对值较大,故定义为土壤环境因子.

表 3 旋转因子载荷矩阵

Tab.3 Rotated component matrix

	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
X_1	0. 605	0. 426	-0. 06	0. 664
X_2	0. 207	0. 769	0. 495	0. 271
X_3	0. 359	0. 034	0. 812	0. 447
X_4	-0. 126	0. 911	-0. 251	-0. 301
X_5	0. 155	0. 121	0. 969	-0. 142
X_6	0. 823	0. 033	0. 527	-0. 203
X_7	0. 041	0. 173	-0. 043	-0. 983
X_8	0. 748	0. 543	0. 355	0. 101
X_9	0. 43	0. 834	0. 273	-0. 007
X_{10}	0. 971	0. 062	0. 118	0. 159
特征值 Total	2. 944	2. 644	2. 404	1. 866
方差贡献率	29. 443	26. 438	24. 308	18. 664
Rate of variance (%)				
累计方差贡献率	29. 443	55. 881	79. 919	98. 583
Cumulative rate of variance (%)				

2.2.2 土壤肥力质量的得分与排名 为了更清楚直观地比较各培肥处理下土壤肥力质量状况,需要计算出各处理的因子得分. 因子得分函数 Z_i 的表达式为: $Z_i = b_i X$, 其中 b_i 是 SPSS 软件中表“Component Score Coefficient Matrix(因子得分系数矩阵)”的第 i 列向量(表 4). 把各公因子的特征值贡献率作为权重进行加权求和可得到综合评价指标值(表 5).

$$Z_{\text{total}} = \sum_{i=1}^m (v_i/P) Z_i$$

式中: v_i/P 在 SPSS 软件中表“Total Variance Explained”下“Rotation Sums of Squared Loadings(旋转

后因子对 X 的方差)”栏的“% of Variance”.

由表 5 可知,第一主因子得分最高的是 T_4 , 其次是 T_5 和 T_3 ,说明 T_4 、 T_5 和 T_3 在提高土壤脲酶、蔗糖酶、速效钾、有机质含量方面占有明显优势,表明施用中、高量秸秆和秸秆堆肥能显著提高土壤酶活性,对土壤具有较好的培肥作用,这也与近年来大量的研究结果相吻合^[19]; T_2 和 T_6 得分较低,但还是明显高于 CK 和 T_1 ,表明低量秸秆施用和厩肥对提高土壤酶活性、改善土壤肥力也有一定作用. 第二主因子得分最高的为 T_6 ,其次为 T_5 、 T_4 ,表明厩肥、秸秆堆肥及高量秸秆施用均可提高土壤全氮、全钾含量,增加土壤养分供应容量;得分较低的是 T_2 、 T_1 和 T_3 ,3 个处理甚至低于 CK,说明单施化肥及化肥与中、低量秸秆配合施用,均未能有效提高土壤全氮、全钾含量,改善土壤养分容量状况. 第三主因子得分较高的为 T_5 ,表明施用秸秆堆肥明显增加了土壤速效磷、速效钾含量,提高了土壤养分供应强度;其次是 T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_6 ,说明单施化肥、化肥与中低量秸秆及厩肥配施,均可提高土壤养分供应强度;得分最低的是 T_4 ,说明施入的高量秸秆在腐解过程中对速效养分可能产生较高的生物固定作用,短期内降低了土壤养分供应强度. 第四主因子得分较高的为 T_1 ,其次是施加各种有机物料的处理,最低的是 CK,表明单施化肥、化肥与有机物料配合施用,均可在一定程度上降低根际土壤 pH 值,改善作物生长的土壤环境.

表 4 因子得分系数矩阵

Tab.4 Component score coefficient matrix

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
Z_1	0. 201	-0. 196	-0. 086	-0. 129	-0. 185	0. 355	0. 140	0. 224	0. 023	0. 501
Z_2	0. 122	0. 318	-0. 056	0. 444	-0. 011	-0. 162	0. 029	0. 110	0. 302	-0. 146
Z_3	-0. 236	0. 207	0. 376	-0. 139	0. 539	0. 089	-0. 021	-0. 017	0. 015	-0. 208
Z_4	0. 327	0. 155	0. 195	-0. 111	-0. 121	-0. 243	-0. 573	-0. 027	-0. 031	-0. 040

表 5 不同处理各因子得分及综合得分

Tab.5 Scores and general scores of principal components under different treatments

处 理 Treatment	Z_1 得分 Score of Z_1	排 名 Order	Z_2 得分 Score of Z_2	排 名 Order	Z_3 得分 Score of Z_3	排 名 Order	Z_4 得分 Score of Z_4	排 名 Order	综合得分 Integrated score	排 名 Order
CK	-1. 180	7	-0. 261	4	-0. 690	6	-1. 668	7	-89. 353	7
T_1	-0. 990	6	-0. 565	6	0. 126	2	1. 642	1	-10. 373	5
T_2	-0. 014	4	-0. 946	7	-0. 164	3	0. 260	3	-20. 267	6
T_3	0. 321	3	-0. 445	5	-0. 205	4	-0. 062	5	-8. 381	4
T_4	1. 814	1	-0. 073	3	-0. 841	7	0. 001	4	31. 249	3
T_5	0. 365	2	0. 172	2	2. 144	1	-0. 553	6	56. 530	1
T_6	-0. 315	5	2. 118	1	-0. 371	5	0. 380	2	44. 829	2

由表 5 可知,综合得分位居前列的分别是 T_5 、 T_6 和 T_4 。其中 T_5 处理得分最高,主要分布在酶活性因子、养分供应容量因子和养分供应强度因子的得分上,即全磷、速效磷和速效钾含量较高,有机质和土壤酶活性也高于其他处理,说明施用秸秆堆肥不但有效增加了土壤养分储量,还提高了有机质含量和土壤酶活性。 T_6 处理得分高主要集中在养分供应容量因子和环境因子的得分上,即碱性磷酸酶、全氮、全钾含量高,施用厩肥有促进碱性磷酸酶活性的作用,并且提高了土壤供氮、供钾的能力。综合得分最低的是 CK、 T_2 和 T_1 。 T_2 、 T_1 处理均在酶活性因子、养分供应容量因子上得分较低,说明施用低量秸秆和单施化肥都不利于土壤养分容量的提高,在增强土壤酶活性方面也无明显优势。

2.2.3 土壤肥力质量的聚类分析 为了使评价结果更加清晰,以各处理的主因子得分作为评价其肥力的新指标,以欧氏距离作为衡量各处理肥力差异的大小,采用最短距离法对各处理进行系统聚类,结果见图 1。

由表 5 的综合得分可以看出,各处理土壤肥力质量排列顺序为 $T_5>T_6>T_4>T_3>T_1>T_2>CK$ 。从系统聚类图来看,可以把 7 个处理分为 4 类:一等 = $\{T_5\}$;二等 = $\{T_6\}$;三等 = $\{T_3, T_4\}$;四等 = $\{T_1, T_2, CK\}$ 。不同施肥处理土壤肥力质量等级中, T_5 最高, T_6 较高, T_3 、 T_4 次之,说明秸秆堆肥配施化肥的土壤肥力质量最高,厩肥配施化肥较高,中高量秸秆与化肥配施次之。 T_1 和 T_2 与 CK 处于同一等级,说明单施化肥的培肥作用不大,而秸秆用量不足也同样达不到好的培肥效果。表明在进行培肥土壤时,首先要施用一定量的化肥来满足作物生长对养分的需求,

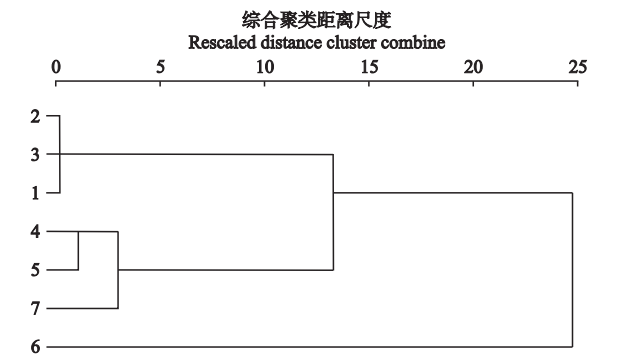


图 1 不同有机培肥措施下土壤质量评价系统聚类图
Fig.1 Hierarchical clustering diagram of soil quality assessment under different organic materials application.
1) 对照 Control (CK); 2) T_1 ; 3) T_2 ; 4) T_3 ; 5) T_4 ; 6) T_5 ; 7) T_6 . 下同 The same below.

然后要注意配合施用有机肥,用来提高土壤有机质含量,改善土壤团聚状况,增强土壤酶活性,提高土壤系统生产力,从而达到培肥土壤的目的^[20-22]。

2.3 不同有机培肥措施下土壤肥力质量评价与产量的关系

产量是土壤肥力的综合反映,不同施肥处理对土壤肥力特性的影响必然要反映到作物产量的变化上^[23]。由图 2 可知,施加不同量的玉米秸秆,对旱地冬小麦籽粒产量的影响不显著,施加秸秆堆肥后,籽粒产量显著提高,施加厩肥同样有明显的增产效果。由各施肥处理的产量和通过因子分析得到的综合得分排名(表 6)可知,产量与综合得分的排名顺序基本一致,说明通过这两种方法进行土壤肥力质量评价得到的结果是可信的。

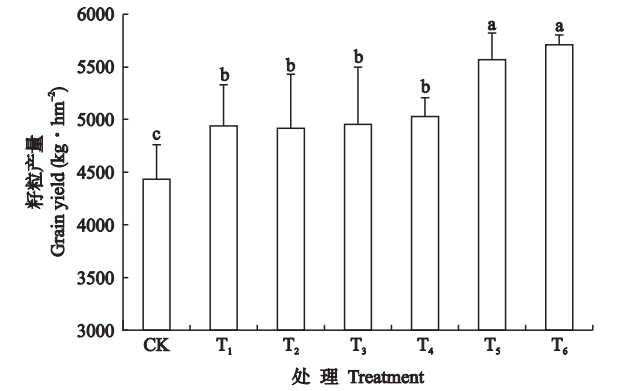


图 2 不同有机培肥措施下的小麦产量
Fig.2 Yield of wheat under different organic materials application.
图中不同字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different letters in the figure meant significant difference at 0.05 level.

表 6 不同处理产量与综合得分排名
Tab.6 Order of yield and general score of different treatments

处 理 Treatment	产 量 Yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	排 名 Order	综合得分 Integrated score	排 名 Order
CK	4432c	7	-89.35	7
T_1	4935b	5	-10.37	5
T_2	4914b	6	-20.27	6
T_3	4954b	4	-8.38	4
T_4	5027b	3	31.25	3
T_5	5570a	2	56.53	1
T_6	5710a	1	44.83	2

3 讨 论

土壤酶是土壤营养代谢的重要驱动力。它参与土壤各种生物化学反应过程,与土壤供应养分能力密切相关,在许多重要营养元素的生物化学循环中

起着重要作用^[24-26]。大量的土壤酶活性研究表明,有机物料含有许多酶,畜禽粪尿中的酶活性比土壤中的酶活性高几十至几百倍;有机物料能增强土壤酶活性,特别是与土壤养分转化有关的酶活性,进而提高土壤肥力。张辉等^[27]的研究结果表明,有机肥施入土壤后,土壤蔗糖酶、脲酶、磷酸酶活性都明显提高,促进了土壤有机质的分解转化和速效养分的释放。本研究结果显示,位居因子分析综合得分首位的是秸秆堆肥处理,且主要分布在酶活性因子、养分供应容量因子和养分供应强度因子的得分上,说明施用秸秆堆肥大大提高了土壤酶活性,同时有效增加了土壤养分的积累,从而保证了养分的充分供应,使得该处理下土壤肥力质量等级最高,这与高峻岭等^[28]关于含有玉米秸秆和高比例牛粪的有机肥有利于土壤有机质的积累,土壤速效磷含量与有机肥施磷总量呈正相关的研究结果基本一致。

周晓芬等^[29]研究了有机肥对土壤钾素供应的影响,结果表明,3种厩肥(猪厩肥、牛厩肥、鸡粪)和麦秸施用均可明显增加土壤速效钾和缓效钾含量,土壤供钾能力增强。罗安程等^[30]研究了有机肥料对水稻根际土壤中酶活性的影响,指出有机肥料的施用大大促进了根系磷酸酶及ATP酶的活性。本研究中施用厩肥的土壤质量综合评价得分也较高,且主要集中在养分供应容量因子和环境因子的得分上,施用厩肥增强了土壤碱性磷酸酶活性,提高了全氮、全钾含量,说明施用厩肥对土壤养分的补充及土壤环境有较大影响。而单施化肥和低量秸秆还田处理得分最低,且土壤肥力质量等级也最低,主要是因为这两种处理在提高养分储量和酶活性方面无明显优势,且不利于保持土壤养分平衡,说明单施化肥或少量秸秆还田在短期内对培肥土壤作用不明显。

化肥与有机肥配施,一方面通过有机肥直接补充了土壤养分,提高了土壤对作物的供肥能力,同时又通过调节土壤与化肥养分的释放强度和速率,使作物在生育阶段得到均衡的矿质养分,从而提高了作物产量。本研究中,施加秸秆堆肥后,小麦籽粒产量显著提高,施加厩肥同样有明显的增产效果,与单施化肥相比,两处理分别提高了20.43%和22.38%。郭胜利等^[31]研究了施肥对半干旱地区小麦产量的影响后指出,大量施用有机肥的冬小麦17年平均产量($2.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)较对照提高70%,而有机肥与化肥配施的产量显著($P < 0.05$)高于其他施肥处理。

虽然有机物料对提高土壤肥力及作物产量和品

质等方面具有重要作用,但应结合不同地区的气候、不同种植制度和不同土壤条件,研究其在作物-土壤生态系统中的养分转化、循环和平衡,充分发挥土壤养分资源和有机物料对提高肥料利用率的作用。

4 结 论

应用因子分析法对不同有机培肥措施下土壤肥力质量进行了客观、清晰地评价,得出各处理土壤肥力质量排序为 $T_5 > T_6 > T_4 > T_3 > T_1 > T_2 > \text{CK}$,即秸秆堆肥与化肥配施处理是该试验区最优的一种培肥模式。秸秆堆肥与化肥配施显著提高了土壤有机质和养分含量,增强了土壤脲酶和蔗糖酶活性。

系统聚类分析将7个施肥处理分为4类,得出秸秆堆肥与化肥配施处理的土壤肥力质量最高,厩肥配施化肥较高,中高量秸秆配施化肥次之,与因子分析结果基本吻合。

施用秸秆堆肥和厩肥有明显的增产效果,这与因子分析和聚类分析的结果基本一致,说明利用因子分析对不同有机培肥模式下土壤肥力质量进行评价是客观、可靠的。

参考文献

- [1] Fu J-Q (付杰奇). Study on the Effect of Organic Matter and Microorganisms on the Formation of Soil Humus. Master Thesis. Changchun: Jilin Agricultural University, 2004 (in Chinese)
- [2] Zheng Z-P (郑昭佩), Liu Z-X (刘作新). Soil quality and its evaluation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(1): 131-134 (in Chinese)
- [3] Almendros G, Dorado J. Molecular characteristics related to the biodegradability of humic acid preparations. *European Journal of Soil Science*, 1999, **50**: 227-236
- [4] Hou G-J (侯光炯), Zhang X-L (张绪林). On Achieving Good Results of Soil and Water Conservation and High-yield without Irrigation by Integrating Mulch with Condous-ridge Culture. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1990 (in Chinese)
- [5] Kan W-J (阚文杰), Wu Q-T (吴启堂). A preliminary study on the method of integrated evaluation of soil nutrient fertility. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 1994, **25**(6): 245-247 (in Chinese)
- [6] Zhang H (张 华), Zhang G-L (张甘霖). Indexes and estimate methods for soil quality. *Soils* (土壤), 2001, **33**(6): 326-330 (in Chinese)
- [7] Yao R-J (姚荣江), Yang J-S (杨劲松), Chen X-B (陈小兵). Fuzzy synthetic evaluation of soil quality in coastal reclamation region of north Jiangsu Province. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2009, **42**(6): 2019-2027 (in Chinese)

- [8] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2002 (in Chinese)
- [9] Guan S-Y (关松荫). Soil Enzyme Research Methods. Beijing: China Agriculture Press, 1986 (in Chinese)
- [10] Liu X-B (刘晓冰), Xing B-S (邢宝山). Soil quality and its assessment indicators. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture* (农业系统科学与综合研究), 2002, **18**(2): 109–111 (in Chinese)
- [11] Lu P (路 鹏), Su Y-R (苏以荣), Niu Z (牛铮), *et al.* Soil quality assessment indicators and their spatial-temporal variability. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2007, **15**(4): 190–194 (in Chinese)
- [12] Liu S-L (刘世梁), Fu B-J (傅伯杰), Liu G-H (刘国华), *et al.* Research review of quantitative evaluation soil quality in China. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报) 2006, **37**(1): 137–143 (in Chinese)
- [13] Zhou Y (周 勇), Tian Y-G (田有国), Ren Y (任意), *et al.* Research on index system and appraisal method of quantitative land assessment. *Ecology and Environment* (生态环境), 2003, **12**(1): 37–41 (in Chinese)
- [14] Wang F (王 芳). Comparison and application of principal component analysis & factor analysis. *Statistical Education* (统计教育), 2003(5): 14–17 (in Chinese)
- [15] Lin H-M (林海明), Zhang W-L (张文霖). The difference and sameness between the principal component analysis and the factor analysis and SPSS software; And consult with Liu Yu-mei, Lu Wen-dai, *et al.* *Statistical Research* (统计研究), 2005(3): 65–69 (in Chinese)
- [16] Yemefack M, Jetten VG, Rossiter DG. Developing a minimum data set for characterizing soil dynamics in shifting cultivation systems. *Soil & Tillage Research*, 2006, **86**: 84–98
- [17] Wang J-H (王俊华), Yin R (尹 睿), Zhang H-Y (张华勇), *et al.* Changes in soil enzyme activities, microbial biomass, and soil nutrition status in response to fertilization regimes in a long-term field experiment. *Ecology and Environment* (生态环境), 2007, **16**(1): 191–196 (in Chinese)
- [18] Wu Y-T (武云天), Schoenau JJ, Li F-M (李凤民), *et al.* Concepts and relative analytical techniques of soil organic matter. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(4): 717–722 (in Chinese)
- [19] Zhao L-B (赵兰波). Effect of straw application on soil fertilization. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 1996, **27**(2): 76–78 (in Chinese)
- [20] Xu M-G (徐明岗), Li D-C (李冬初), Li J-M (李菊梅), *et al.* Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and yield of rice in Hunan of China. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2008, **41**(10): 3133–3139 (in Chinese)
- [21] Xue D (薛 冬), Yao H-Y (姚槐应), He Z-L (何振立), *et al.* Relationships between red soil enzyme activity and fertilizer. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(8): 1455–1458 (in Chinese)
- [22] Kaur T, Brar BS, Dhillon NS. Soil organic matter dynamics as affected by long-term use of organic and inorganic fertilizers under maize-wheat cropping system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, **10**: 110–121
- [23] Wang S-L (王生录), Chen B-D (陈炳东). Study on the efficiency of fertility-increasing practice on dryland in eastern Gansu. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 1999(4): 171–174 (in Chinese)
- [24] Tang Y-S (唐玉姝), Ci E (慈 恩), Yan T-M (颜廷梅), *et al.* Relationship between soil fertility of paddy fields under wheat-rice cropping system in a long-term experiment in Taihu Lake region. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2008, **45**(5): 1000–1006 (in Chinese)
- [25] Li D-P (李东坡), Wu Z-J (武志杰), Chen L-J (陈利军), *et al.* Dynamics of phosphatase activity and influencing factors in black soil under long-term fertilization. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2004, **10**(5): 550–553 (in Chinese)
- [26] Dick WA. Influence of long term tillage and crop rotation combination on soil enzyme activities. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, **48**: 569–574
- [27] Zhang H (张 辉), Li W-J (李维炯), Ni Y-Z (倪永珍). Effect of biological-inorganic compound fertilizer on soil properties. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2006, **37**(2): 273–277 (in Chinese)
- [28] Gao J-L (高峻岭), Song C-Y (宋朝玉), Li X-Y (李祥云), *et al.* Effect of different combinations of organic manures on vegetables yield, quality and soil fertility. *Soil and Fertilizer Sciences in China* (中国土壤与肥料), 2008(1): 48–51 (in Chinese)
- [29] Zhou X-F (周晓芬), Zhang Y-C (张彦才), Li Q-Y (李巧云). The K supplying capability and characteristics of organic fertilizers to soil. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国农业生态学报), 2003, **11**(2): 61–63 (in Chinese)
- [30] Luo A-C (罗安程), Subedi TB, Zhang Y-S (章永松), *et al.* Effect of organic manure on the numbers of microbes and enzyme activity in rice rhizosphere. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 1999, **5**(4): 321–327 (in Chinese)
- [31] Guo S-L (郭胜利), Dang T-H (党廷辉), Hao M-D (郝明德). Effects of fertilization on wheat yield, $\text{NO}_3\text{-N}$ accumulation and soil water content in semi-arid area of China. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2005, **38**(4): 754–760 (in Chinese)

作者简介 王 芳,女,1983 年生,硕士研究生.主要从事土壤与植物营养研究. E-mail: wangfang200811@yahoo.cn

责任编辑 张凤丽