

基于主成分—聚类分析的褐土肥力质量评价

刘志平, 张鹏飞, 周怀平*, 解文艳, 杨振兴, 马晓楠, 胡雪纯

[山西农业大学资源环境学院, 省部共建有机旱作农业国家重点实验室(筹), 山西 太原 030031]

摘 要: 以山西省寿阳县国家褐土长期定位试验基地为研究平台, 定量评价不同施肥措施对土壤肥力质量的影响, 为建立褐土区合理施肥模式和土壤肥力质量评价体系提供科学依据。通过主成分—聚类分析, 综合评价了长期不同培肥措施的土壤肥力质量差异。结果表明, 长期不同施肥处理的玉米产量与土壤全氮、全磷、碱解氮、有效磷、有机质、酶活性均表现出极显著正相关, 与 pH 呈极显著负相关。土壤肥力质量排序为: $N_3P_2M_3 > M_6 > N_4P_2M_2 > N_2P_1M_1 > N_4P_4 > N_2P_2 > N_3P_3 > N_1P_1 > CK$ 。不同培肥措施的土壤肥力可聚为 3 类: $N_3P_2M_3$ 、 M_6 、 $N_4P_2M_2$ 和 $N_2P_1M_1$ 聚为一类, 土壤肥力质量为第一等; N_2P_2 、 N_3P_3 、 N_1P_1 和 N_4P_4 聚为一类, 土壤肥力质量为第二等; CK 单独成一类, 土壤肥力质量为第三等。因此, 有机无机配施既可以保障作物的生长, 又可以稳步提升土壤肥力, 实现农业的可持续发展。

关键词: 褐土; 肥力质量; 主成分; 聚类分析

土壤肥力是指土壤供应植物生长所必需养料的能力, 是土壤物理、化学和生物学性质的综合反映^[1-2]。不同施肥模式对土壤肥力质量具有很大的影响, 合理评价土壤肥力对指导科学施肥具有重要意义^[3]。目前, 评价土壤肥力质量的方法有专家打分法^[4]、指数和法^[5]、灰度关联分析法^[6]、主成分分析法^[7]、聚类分析法^[8]、Fuzzy 综合评价法^[9]等。这些方法的优点是能够为定量评价土壤肥力发挥作用, 但由于土壤类型不同, 肥力质量迥异, 评价方法不同, 评价指标权重的确定、土壤肥力等级的划分尚无统一的标准。近年来, 越来越多的学者倾向于将主成分分析与聚类分析结合作为一种新的评价方法, 即主成分—聚类分析法, 来评价土壤肥力^[10]。主成分分析是利用“降维”的思想, 在损失很少信息的前提下, 将多个指标转化为几个综合指标。通常把转化生成的综合指标成为主成分, 其中每个主成分都是原始变量的线性组合, 且每个主成分之间互不相关, 这就使得主成分比原始数据具

有更优越的性能^[11]。聚类的原理是, 首先将一定数量的样品或指标各自看成一类, 然后根据样品(或指标)的亲疏程度, 将亲疏程度最高的两类进行合并, 然后考虑合并后的类与其他类之间的亲疏程度, 再进行合并, 重复这一过程, 直到将所有的样品(或指标)合并为一类^[11]。主成分分析与聚类分析结合可以减少人为因素的影响, 有利于更加合理地评价和划分土壤肥力等级。

山西省是我国特色农业大省, 也是重要的粮食种植区, 褐土是山西主要类型之一。在当地调查研究发现, 农民施用肥料时, 存在一定的盲目性, 有时受经济利益的驱使, 甚至认为化肥施得越多, 作物产量越高。因此, 研究不同施肥处理下的褐土肥力质量, 对山西省土壤肥力培育及合理施肥具有重要意义。土壤肥力的发展和演变是一个漫长而复杂的过程^[10], 长期定位试验有利于合理、全面地解释这一变化, 目前关于褐土长期施肥下, 土壤肥力质量的研究还比较少。本试验基于长达 28 年的定位试验, 以 9 个不同施肥处理的耕层土壤(0 ~ 20 cm)为研究对象, 采用主成分—聚类分析方法, 探讨不同施肥模式对褐土肥力质量的影响, 为山西褐土的肥力培育及合理施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本长期定位试验位于山西省晋中市寿阳县

收稿日期: 2021-11-25; 录用日期: 2022-01-23

基金项目: 山西农业大学省部共建有机旱作农业国家重点实验室自主研发项目(202001-7); 国家科技基础资源调查专项课题(2021FY005d-1); 山西省青年科技研究基金(201901D211557); 山西省农业科学院博士研究基金(YBSJJ2012)。

作者简介: 刘志平(1988-), 助理研究员, 博士, 主要研究方向为土壤微生物。E-mail: lzp.19881006@163.com。

通讯作者: 周怀平, E-mail: huaipingzhou@126.com。

宗艾镇宗艾村“国家农业环境寿阳观测实验站”(37° 58' 23" N、113° 06' 38" E)(图 1)。实验站海拔 1130 m, 地块平坦, 土壤发生分类为褐土, 成土母质为马兰黄土, 系统分类属于筒育干润锥形土^[12], 土层深厚, 地下水埋深在地表 50 m 以下。属中纬度暖温带半湿润偏旱区大陆性季风气候区, 年均气温 7.4℃, 年均降水量 500 mm, 而年均蒸发量为年均降水量的 3 倍多, 为 1600 ~ 1800 mm。该区气候特征为四季分明、季节温差大, 无霜期 130 d 左右。供试土壤剖面性状: 0 ~ 30 cm, 耕层, 灰褐色, 轻壤土, 疏松, 少量灰渣侵入, 根系多; 30 ~ 45 cm, 犁底层, 浅灰黄色, 中壤土, 紧实, 少量灰渣侵入, 根系中量。试验地初始 pH 为 8.4, 有机质为 23.8 g/kg、碱解氮为 117.69 mg/kg、有效磷为 4.84 mg/kg。

本长期定位试验从 1992 年春开始种植春玉米, 采用大田裂区方式分布。选择 9 个处理, 分别为 4 个氮磷化肥配施处理 (N₁P₁、N₂P₂、N₃P₃、N₄P₄), 3 个有机无机配施处理 (N₃P₂M₃、N₄P₂M₂、N₂P₁M₁),

1 个施用高量有机肥的处理 M₆ 和 1 个不施肥的对照 (CK)。每个处理 3 个生物学重复, 共 27 个小区, 每个小区面积为 66.7 m², 玉米品种为大丰 30, 播种密度为 66000 株/hm², 玉米播种前进行旋地和施肥, 施肥量见表 1, 方式为全部播前基施。



图 1 试验点地图

表 1 田间试验处理 (kg/hm²)

处理	化肥			有机肥			总养分		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
N ₁ P ₁	60	37.5	0	0	0	0	60	37.5	0
N ₂ P ₂	120	75	0	0	0	0	120	75	0
N ₃ P ₃	180	112.5	0	0	0	0	180	112.5	0
N ₄ P ₄	240	150	0	0	0	0	240	150	0
N ₂ P ₁ M ₁	120	37.5	0	88	31	317	208	68.5	317
N ₃ P ₂ M ₃	180	75	0	265	93	950	445	168	950
N ₄ P ₂ M ₂	240	75	0	176	62	633	416	137	633
M ₆	0	0	0	530	185	1900	530	185	1900
CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0

1.2 样品采集

2018 年 10 月玉米收获后, 于各小区采用 5 点法“S”形采样, 用土钻采集 0 ~ 20 cm 的土壤样品, 将同一小区的 5 个样混合为一个样品, 去掉明显的石砾、残枝败叶等杂物, 用自封袋装好, 带回实验室。自然风干后过筛, 进行土壤酶活性及理化性质的测定分析。

1.3 测定方法

土壤理化性质的测定方法均采用鲍士旦^[13]的《土壤农业化学分析方法》。其中, pH 采用酸度计检测, 水土比为 2.5 : 1; 碱解氮 (AN) 采用比色法

检测; 有效磷 (AP) 采用 NaHCO₃ (pH 8.5、0.05 mol/L) 浸提法测定; 有机质 (OM) 采用重铬酸钾容量法测定; 全氮 (TN) 采用凯氏定氮仪测定; 全磷 (TP) 采用钼锑抗比色法测定。

脲酶 (URE) 活性采用苯酚钠 - 次氯酸钠比色法测定, 以 24 h 后 1 g 土壤中 NH₃-N 的质量 (mg) 表示脲酶活性; 碱性磷酸酶 (ALP) 活性采用磷酸苯二钠法测定, 以 24 h 后 1 g 土壤中酚的质量 (mg) 表示脲酶活性; 蔗糖酶 (SUC) 采用 3, 5-二硝基水杨酸比色法测定, 以 24 h 后 1 g 土壤中葡萄糖的质量 (mg) 表示蔗糖酶活性, 详见参考

文献[14]。

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 进行数据整理, 采用 SPSS 15.0 进行 Pearson 相关性分析、显著性分析, 以及主成分—聚类分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤养分含量的影响

由表 2 可知, 在高量施用有机肥的 M_6 处理中, 土壤 TN、TP、AN、AP 和 OM 含量均为最高; 在单施氮磷化肥的处理中, 随着氮磷化肥施

用量的增加, TN、TP、AN、AP 呈现增加的趋势, AN 和 AP 在各处理中差异显著 ($P<0.05$); OM 在 N_2P_2 处理中的含量显著高于其他 3 个处理。在有机无机配施的 3 个处理中, 随着有机肥施用量的增加, TN、TP、AN、AP 和 OM 含量逐渐增加, 且差异显著 ($P<0.05$)。与 CK 相比, 施肥显著降低了土壤 pH, 在单施化肥的情况下, N_2P_2 处理中 pH 显著低于其他 3 个处理。在施用有机肥的情况下, 随着有机肥施用量的增加, pH 逐渐降低, 在 M_6 处理中达到最低, 且处理间达到显著差异 ($P<0.05$)。

表 2 不同施肥处理下土壤养分含量

处理	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	pH	有机质 (mg/kg)
N_1P_1	$1.02 \pm 0.02f$	$0.61 \pm 0.01f$	$64.81 \pm 0.03h$	$10.06 \pm 0.04h$	$8.49 \pm 0.04b$	$25.82 \pm 0.05f$
N_2P_2	$1.28 \pm 0.01e$	$0.80 \pm 0.02de$	$70.90 \pm 0.08g$	$22.29 \pm 0.02g$	$8.42 \pm 0.01c$	$26.17 \pm 0.02e$
N_3P_3	$1.29 \pm 0.03e$	$0.83 \pm 0.01d$	$84.84 \pm 0.03f$	$33.60 \pm 0.08e$	$8.47 \pm 0.05b$	$23.84 \pm 0.03h$
N_4P_4	$1.36 \pm 0.02d$	$1.25 \pm 0.02b$	$100.95 \pm 0.06d$	$43.99 \pm 0.03d$	$8.49 \pm 0.02b$	$24.28 \pm 0.03g$
$N_2P_1M_1$	$1.34 \pm 0.01d$	$0.83 \pm 0.01d$	$85.05 \pm 0.05e$	$24.74 \pm 0.04f$	$8.38 \pm 0.03d$	$26.62 \pm 0.01d$
$N_3P_2M_3$	$2.17 \pm 0.04b$	$1.24 \pm 0.02b$	$126.23 \pm 0.12b$	$170.51 \pm 0.09b$	$8.16 \pm 0.05f$	$40.32 \pm 0.04b$
$N_4P_2M_2$	$1.93 \pm 0.03c$	$0.95 \pm 0.02c$	$101.66 \pm 0.09c$	$86.97 \pm 0.10c$	$8.30 \pm 0.03e$	$31.96 \pm 0.03c$
M_6	$2.69 \pm 0.05a$	$1.48 \pm 0.03a$	$150.80 \pm 0.13a$	$211.24 \pm 0.12a$	$7.82 \pm 0.02g$	$49.86 \pm 0.05a$
CK	$0.83 \pm 0.01g$	$0.50 \pm 0.01g$	$32.76 \pm 0.02i$	$4.56 \pm 0.06i$	$8.65 \pm 0.03a$	$22.10 \pm 0.03i$

注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

由表 3 可知, 在单施化肥的情况下, 土壤脲酶活性随着氮肥施用量的增加呈现增加的趋势, 在 N_4P_4 处理中达到最高, 且显著高于 N_1P_1 和 N_3P_3 处

表 3 不同施肥处理对土壤酶活性的影响

处理	脲酶 [mg/NH ₃ -N (g·24h)]	蔗糖酶 [mg/glucose (g·24h)]	碱性磷酸酶 [mg/phenol (g·24h)]
N_1P_1	$2.193 \pm 0.033c$	$80.39 \pm 4.42f$	$0.740 \pm 0.011d$
N_2P_2	$2.225 \pm 0.062bc$	$82.77 \pm 9.47e$	$0.726 \pm 0.003d$
N_3P_3	$2.304 \pm 0.011b$	$69.68 \pm 6.19h$	$0.683 \pm 0.051d$
N_4P_4	$2.441 \pm 0.176a$	$71.52 \pm 1.79g$	$0.633 \pm 0.041d$
$N_2P_1M_1$	$2.435 \pm 0.079a$	$109.89 \pm 2.78b$	$0.998 \pm 0.010c$
$N_3P_2M_3$	$2.496 \pm 0.043a$	$118.20 \pm 2.56a$	$1.206 \pm 0.041b$
$N_4P_2M_2$	$2.525 \pm 0.035a$	$104.13 \pm 8.77c$	$0.998 \pm 0.032c$
M_6	$2.427 \pm 0.086a$	$103.14 \pm 8.44d$	$1.622 \pm 0.162a$
CK	$1.825 \pm 0.070d$	$67.41 \pm 2.02i$	$0.891 \pm 0.021c$

理; 蔗糖酶活性在 N_2P_2 处理中含量显著高于其他处理; 碱性磷酸酶活性随着氮磷化肥施用量的增加含量逐渐降低, 且显著低于 CK 处理。在施用有机肥的情况下, 脲酶活性在不同处理间未见显著差异, 蔗糖酶活性在 $N_3P_2M_3$ 处理中含量最高, 且不同处理间差异显著, 碱性磷酸酶活性在 M_6 处理中含量显著高于其他处理 ($P<0.05$)。

2.2 长期定位施肥土壤肥力指标及其与产量的相关性

由土壤养分指标及其与玉米产量的相关性 (表 4) 可知, 玉米产量与土壤全量养分 (TN 和 TP)、有效养分 (AN 和 AP)、有机质, 酶活性 (URE、SUC 和 ALP) 呈现显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$) 相关, 与 pH 极显著负相关 ($P<0.01$)。除了 3 种土壤酶活性与某些土壤理化指标相关性不显著外, 其他各项肥力指标之间均表现出显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$) 相关。

表 4 不同处理玉米产量与土壤肥力指标的相关性

指标	全氮	全磷	碱解氮	有效磷	pH	有机质	脲酶	蔗糖酶	碱性磷酸酶
全磷	0.867**								
碱解氮	0.946**	0.950**							
有效磷	0.970**	0.851**	0.908**						
pH	-0.964**	-0.812**	-0.910**	-0.938**					
有机质	0.956**	0.781*	0.869**	0.973**	-0.977**				
脲酶	0.685*	0.734*	0.817**	0.560	-0.602	0.506			
蔗糖酶	0.715*	0.488	0.649	0.665	-0.699*	0.696*	0.674*		
碱性磷酸酶	0.851**	0.610	0.705*	0.876**	-0.895**	0.930**	0.319	0.700*	
产量	0.857**	0.774*	0.828**	0.777*	-0.804**	0.754*	0.768*	0.837**	0.698*

注：* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关。

2.3 长期定位施肥不同处理的土壤肥力评价

2.3.1 影响土壤肥力指标的主成分分析

本研究选择了 9 个指标进行主成分分析，以综合评价长期定位施肥不同处理下的土壤肥力质量差异，筛选出效果最佳的培肥措施。提取了特征值>0.5 的 3 个主成分（表 5），它们对总方差的贡献率依次为 81.158%、10.098% 和 6.640%，3 个主成分累积可以反映总方差 97.896% 的信息，说明利用主成分分析衡量长期定位施肥不同处理的土壤肥力质量是可靠的。从碎石图（图 2）也可以看出，因子 1、2 和 3 之间连线的斜率较大，说明这 3 个因子是主要因子，这与表 5 的结论吻合。

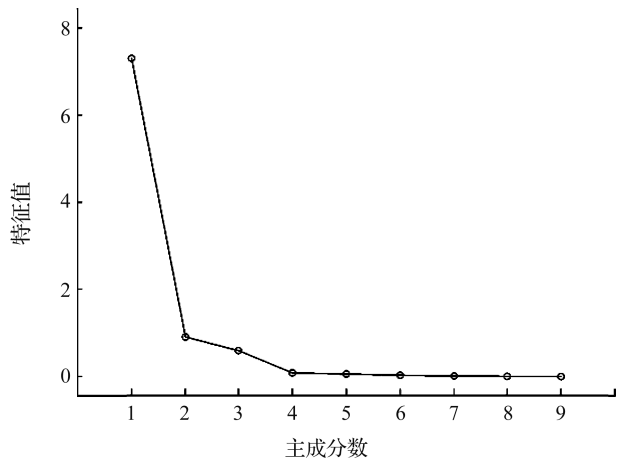


图 2 不同主成分碎石图

进一步分析各指标在 3 个主成分上的向量值，在第 1 主成分上，土壤 TN、AN、AP 和 OM 具有较大的正向量值，pH 具有较大的负向量值。氮和磷是作物生长必需的营养元素，有机质是评价土壤肥力的重要指标，因此，第 1 主成分是土壤营养元素和肥力的综合。

在第 2 主成分上，脲酶活性具有最大的正向量值；第 3 主成分上，蔗糖酶活性具有最大的正向量值，因此，第 2 和 3 主成分代表了土壤活性因子。

表 5 影响土壤肥力质量各指标的主成分分析

序号	指标	主成分 1	主成分 2	主成分 3
1	全氮	0.988	-0.027	-0.054
2	全磷	0.880	0.256	-0.348
3	碱解氮	0.960	0.225	-0.152
4	有效磷	0.965	-0.155	-0.118
5	pH	-0.970	0.142	0.037
6	有机质	0.959	-0.259	-0.036
7	脲酶	0.715	0.675	0.156
8	蔗糖酶	0.766	0.057	0.630
9	碱性磷酸酶	0.860	-0.471	0.111
特征值		7.304	0.909	0.598
贡献率（%）		81.158	10.098	6.640
累计贡献率（%）		81.158	91.256	97.896

2.3.2 依据主成分—聚类分析评价不同处理土壤肥力等级

以不同定位施肥处理的主成分得分作为评价土壤肥力的新指标（表 6），可以看出不同处理土壤肥力质量排序为： $N_3P_2M_3 > M_6 > N_4P_2M_2 > N_2P_1M_1 > N_4P_4 > N_2P_2 > N_3P_3 > N_1P_1 > CK$ 。以欧氏距离作为衡量不同处理肥力差异的指标，采用最短距离法对各施肥处理进行系统聚类。由图 3 可见，9 个处理可聚为 3 类： $N_3P_2M_3$ 、 M_6 、 $N_4P_2M_2$ 和 $N_2P_1M_1$ 聚为一类，土壤肥力质量为第一等； N_2P_2 、 N_3P_3 、 N_1P_1 和 N_4P_4 聚为一类，土壤肥力质量为第二等；CK 单独为第三类，土壤肥力质量为第三等。

表6 影响土壤肥力各指标的主成分得分及综合得分

处理	主成分 1	主成分 2	主成分 3	综合 得分	等级 排名
N ₃ P ₂ M ₃	3.12	0.08	0.48	3.68	1
M ₆	5.13	-1.07	-0.77	3.29	2
N ₄ P ₂ M ₂	1.11	0.56	0.64	2.31	3
N ₂ P ₁ M ₁	-0.20	0.44	1.31	1.55	4
N ₄ P ₄	-0.67	1.47	-1.15	-0.35	5
N ₂ P ₂	-1.42	0.02	0	-1.40	6
N ₃ P ₃	-1.49	0.50	-0.62	-1.61	7
N ₁ P ₁	-2.08	-0.22	0.25	-2.05	8
CK	-3.52	-1.78	-0.14	-5.44	9

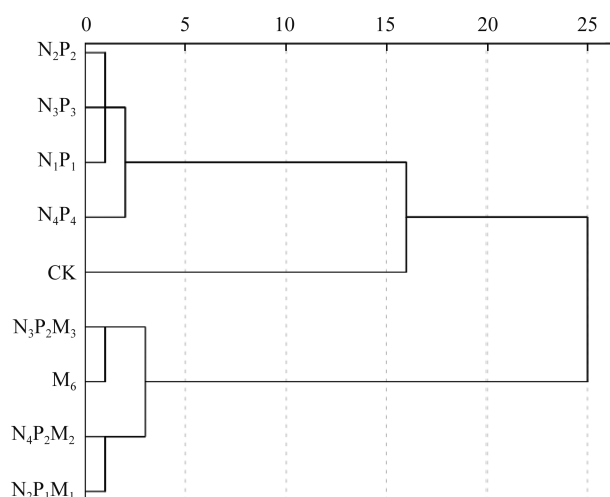


图3 不同处理褐土肥力聚类分析

3 讨论

3.1 土壤肥力评价指标分析

土壤肥力是土壤化学、物理和生物肥力的综合体现，用来评价土壤肥力的指标应具有一定的代表性，需遵循主导性、生产性和稳定性3项原则，同时尽量选择可靠、可度量 and 可重复的指标^[15-16]。氮和磷是作物生长必需的大量元素，直接影响土壤肥力和作物产量^[17]，有机质是土壤的重要组成部分，含有植物生长所需要的各种营养元素，是土壤微生物生命活动的能源^[18]，pH对土壤微生物活动有很大影响，每种微生物都有其最适宜的pH范围^[19]。因此，本研究选择了TN、AN、TP、AP、OM和pH这6项养分指标来评价土壤肥力。生物指标通常包括微生物量碳、微生物量氮、土壤呼吸量、土壤酶活性等^[20-21]。土壤酶是由微生物、动

植物活体分泌以及由动植物残体、遗骸分解释放于土壤中的一类具有催化能力的生物活性物质^[22-24]。脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶分别参与土壤氮、碳及磷循环^[25-27]。因此，本研究选择了这3种酶作为生物指标进行土壤肥力评价。

从玉米产量与土壤肥力指标的相关性可以看出，玉米产量与所选取的9项土壤化学和生物因子均呈显著或极显著相关，这与前人的研究结果一致^[8]，同时也说明了这9个因子可以作为土壤肥力质量的评价指标。除了3种土壤酶活性与某些土壤理化指标相关性不显著外，其他各项肥力指标之间均表现出显著或极显著相关，这与前人的研究结果一致，说明土壤各种养分之间相互关联^[28-31]。

用于评价土壤肥力质量的指标虽多，但需分清主次。本研究中主成分分析是利用“降维”的思想，在涵盖大部分信息的前提下，将多个指标转化为几个综合指标。本研究从9个土壤肥力指标中提取了3个主成分，它们对总方差的累积贡献率为97.896%，已经涵盖了大部分的土壤肥力信息，因此，本评价方法可信度较高。

3.2 不同施肥方式对土壤肥力提升效果的影响

本研究采用最短距离法对不同处理的肥力等级进行聚类。9个处理可聚为3类：有机无机配施及高量施用有机肥的处理聚为一类，土壤肥力质量最佳；单施化肥的处理聚为一类，土壤肥力次之；不施肥的处理单独聚为一类，土壤肥力最差。

作物生长会源源不断地从土壤中汲取养分，长期不施肥，会造成土壤养分枯竭，肥力越来越低。如果每年播种前及时施入化肥，可以为作物生长提供营养。但是随着施肥年限的延长、化肥投入量的增加，也出现了土壤肥力下降、土壤板结、养分利用率降低等负面问题^[32-33]，尤其是氮肥的过度施用，会造成氮反硝化及氮的流失，质子的积累导致了土壤pH的降低^[34]，进而影响土壤中微生物的生长及酶活性，对土壤肥力造成一定的影响。

有机无机配施模式下，化肥与有机肥释放的养分可以相互补充^[35]。化肥可以在作物生长前期释放足够的养分，有机肥中的缓效养分可以保障作物生长后期养分的供应。研究表明，适量施用有机肥可以改善土壤性状，提升土壤的肥力。彭娜等^[36]基于长期定位试验的研究表明，长期有机无机配施能够降低土壤容重，增加土壤孔隙度，促进水稳性大团聚体的形成。Rasool等^[37]基于32年

的长期定位试验发现, 厩肥的施用可以改善土壤密度、降低土壤容重、改善土壤团聚体的粒径分布, 厩肥对平均重量直径的影响表现为随土壤深度的增加而降低。此外, 有机肥中含有大量的有益微生物, 有机肥的施入改变了土壤微生物菌群结构及多样性, 改变了土壤酶活性^[38-39], 从而提高了土壤肥力。

综上所述, 有机无机配施既可以保障作物的生长, 又可以稳步提升土壤肥力, 实现农业的可持续发展。

4 结论

从9个土壤肥力指标(TN、TP、AN、AP、OM、pH、URE、SUC和ALP)中提取3个主成分进行不同施肥处理下山西省褐土的肥力质量评价, 以主成分综合得分为评价标准, 土壤肥力质量顺序为: $N_3P_2M_3 > M_6 > N_4P_2M_2 > N_2P_1M_1 > N_4P_4 > N_2P_2 > N_3P_3 > N_1P_1 > CK$ 。

将9个长期施肥处理土壤肥力进行系统聚类: 有机无机配施及高量施用有机肥的处理聚为一类, 土壤肥力质量最佳; 单施化肥的处理聚为一类, 土壤肥力次之; 不施肥的处理单独聚为一类, 土壤肥力最差。

综上, 有机无机配施既能满足作物生长对养分的需求, 又能提高土壤肥力质量, 保持土壤健康, 实现农业可持续发展, 是今后农业生产中应大力推广的施肥模式。

参考文献:

- [1] 熊毅, 李庆逵. 中国土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1987. 306-307.
- [2] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011. 219-220.
- [3] Mokarram M, Hojati M. Using ordered weight averaging (OWA) aggregation for multi-criteria soil fertility evaluation by GIS (case study: southeast Iran) [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 132: 1-13.
- [4] 王京文. GIS支持下的比例尺蔬菜地土壤肥力与环境质量评价研究-以慈溪市周巷镇蔬菜基地为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [5] Edward C J, Laura L L. A soil-quality index and its relationship to Efficiency and productivity growth measures: two decompositions [J]. American Journal of Agricultural Economics, 1999, 81 (4): 881-893.
- [6] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987. 10-25.
- [7] 曹志洪. 解译土壤质量演变规律, 确保土壤资源持续利用[J]. 世界科技研究与发展, 2001, 23 (3): 28-32.
- [8] 吴海燕, 金荣德, 范作伟, 等. 基于主成分和聚类分析的黑土肥力质量评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (2): 325-334.
- [9] 杨全合, 安永龙. 基于地统计学和GIS的通州区于家务乡土壤肥力综合评价[J]. 西南农业学报, 2019, 32 (4): 882-891.
- [10] 黄晶, 蒋先军, 曾跃辉, 等. 稻田土壤肥力评价方法及指标研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2017 (6): 1-8.
- [11] 刘大海, 李宁, 晁阳. SPSS 15.0 统计分析从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008. 298-317.
- [12] 陈志诚, 龚子同, 张甘霖, 等. 不同尺度的中国土壤系统分类参比[J]. 土壤, 2004, 36 (6): 584-595.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 270-275.
- [14] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986. 274-280.
- [15] Bhardwaj A K, Jasrotian P, Hamiltona S K, et al. Ecological management of intensively cropped agro-ecosystems improves soil quality with sustained productivity [J]. Agriculture Ecosystems Environment, 2011, 140 (3-4): 419-429.
- [16] 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. 12-19.
- [17] 张福锁. 养分综合管理理论与技术[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006. 90-92.
- [18] Schoenholtz S H, Miegroet H V, Burger J A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities [J]. Forest Ecology and Management, 2000, 138 (1-3): 335-356.
- [19] 杨瑞吉, 杨祁峰, 牛俊义. 表征土壤肥力主要指标的研究进展[J]. 甘肃农业大学学报, 2004 (1): 86-91.
- [20] 张心昱, 陈利顶. 土壤质量评价指标体系与评价方法研究进展与展望[J]. 水土保持研究, 2003, 12 (3): 30-34.
- [21] Nambiar K K M, Gupta A P, Fu Q L, et al. Biophysical, chemical and socio-economic indicators for assessing agricultural sustainability in the Chinese coastal zone [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2001, 87 (2): 209-214.
- [22] 赵秉强, BingSo, 刘恩科, 等. 长期施肥对土壤微生物量及土壤酶活性的影响[J]. 植物生态学报, 2008, 32 (1): 176-182.
- [23] Burns R, Deforest J, Marxsen J, et al. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 58: 216-234.
- [24] Zhao S, Li K, Zhou W, et al. Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China [J]. Agriculture, Ecosystem & Environment, 2016, 216: 82-88.
- [25] 彭正萍, 门明新, 薛世川, 等. 腐植酸复合肥对土壤养分转化和土壤酶活性的影响[J]. 河北农业大学学报, 2005, (4): 1-4.
- [26] 于群英. 土壤磷酸酶活性及其影响因素研究[J]. 安徽技术

- 师范学院学报, 2001 (4): 5-8.
- [27] 庞庆阳, 宣毓龙, 蔡旭, 等. 棉粕腐植酸肥对土壤团聚体、酶及养分的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35 (4): 54-60, 94.
- [28] 郭鑫年, 周涛, 纪立东, 等. 宁夏中部干旱带土壤肥力综合评价——以同心县为例 [J]. 中国农学通报, 2019, 35 (15): 66-73.
- [29] 秦川, 何丙辉, 蒋先军. 三峡库区不同土地利用方式下土壤养分含量特征研究 [J]. 草业学报, 2016, 25 (9): 10-19.
- [30] 曾宪平, 林绍霞, 何腾兵, 等. 贵州钩藤产地土壤养分含量特征 [J]. 广东农业科学, 2014, 41 (6): 89-92.
- [31] 耿荣, 王明国, 尹学红, 等. 基于主成分分析法的中宁县农田土壤肥力评价 [J]. 农业科学研究, 2021, 42 (1): 1-7.
- [32] Zhong Y, Yan W M, Shangguan Z P, et al. Impact of long-term N additions upon coupling between soil microbial community structure and activity, and nutrient-use efficiencies [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2015, 91: 161-159.
- [33] Geisseler, Daniel, Scow, et al. Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms: a review [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2014, 75: 54-63.
- [34] Zdenko R. Handbook of Soil Acidity [M]. New York: CRC Press, 2003. 25-28.
- [35] 侯力维. 有机无机肥料配施对土壤生化性质及玉米产量的影响 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- [36] 彭娜, 王开峰, 谢小立, 等. 长期有机无机肥配施对稻田土壤基本理化性状的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2009 (2): 6-10.
- [37] Rasool R, Kukal S S, Hira G S. Soil organic carbon and physical properties as affected by long-term application of FYM and inorganic fertilizers in maize-wheat system [J]. Soil & Tillage Research, 2008, 101 (1-2): 31-36.
- [38] 陆海飞, 郑金伟, 余喜初, 等. 长期无机有机肥配施对红壤性水稻土微生物群落多样性及酶活性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (3): 632-643.
- [39] 梁路, 马臣, 张然, 等. 有机无机肥配施提高旱地麦田土壤养分有效性及酶活性 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (4): 544-554.

Fertility quality evaluation of cinnamon soil based on principal component-cluster analysis

LIU Zhi-ping, ZHANG Peng-fei, ZHOU Huai-ping*, XIE Wen-yan, YANG Zhen-xing, MA Xiao-nan, HU Xue-chun
[College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, State Key Laboratory of Integrative Sustainable Dryland Agriculture (in preparation), Taiyuan Shanxi 030031]

Abstract: In order to provide scientific basis for the establishment of rational fertilization mode and soil fertility quality evaluation system in the cinnamon soil area, the effects of different fertilization measures on soil fertility quality were quantitatively evaluated based on the national cinnamon soil long-term location test in Shouyang county, Shanxi province. Principal component-cluster analysis was adopted to comprehensively evaluate the differences of soil fertility quality under different long-term fertilization. The results showed that maize yield under different long-term fertilization treatments was significantly positively correlated with soil total nitrogen, total phosphorus, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, organic matter and enzyme activity, while negatively correlated with pH. The order of soil fertility quality was: $N_3P_2M_3 > M_6 > N_4P_2M_2 > N_2P_1M_1 > N_4P_4 > N_2P_2 > N_3P_3 > N_1P_1 > CK$. The soil fertility of different fertilization measures could be divided into three grades: $N_3P_2M_3$, M_6 , $N_4P_2M_2$ and $N_2P_1M_1$ were grouped to the first class of the soil fertility quality; N_2P_2 , N_3P_3 , N_1P_1 and N_4P_4 were grouped to the second class of the soil fertility quality; CK alone belonged to the third class of the soil fertility quality. Therefore, the combination of organic and inorganic application can not only guarantee the growth of crops, but also steadily improve soil fertility, and achieve sustainable development of agriculture.

Key words: cinnamon soil; fertility quality; principal component; cluster analysis