

# 基于主成分-聚类分析评价长期施肥对 砂姜黑土肥力的影响\*

陈欢<sup>1,2</sup> 曹承富<sup>1,2†</sup> 张存岭<sup>3</sup> 李玮<sup>1,2</sup> 乔玉强<sup>1,2</sup> 杜世州<sup>1,2</sup> 赵竹<sup>1,2</sup>

(1 安徽省农业科学院作物研究所, 合肥 230031)

(2 安徽省农作物品质改良重点实验室, 合肥 230031)

(3 安徽省濉溪县科学技术协会, 安徽淮北 235100)

**摘要** 利用安徽濉溪杨柳定位试验(1981-)为平台,以土壤的5种酶活性(脲酶、酸性磷酸酶、中性磷酸酶、过氧化氢酶、蔗糖酶)及7种基础化学性质(pH、EC、有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾)作为评价指标进行主成分分析,最后将各主成分得分系统聚类。结果表明,通过主成分分析方法可将原12个土壤生物化学性质指标降维、提取出2个主成分,反映了原信息量的88.22%,且无原变量丢失。其中第一主成分以酸性磷酸酶、中性磷酸酶、EC、有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾贡献最大;第二主成分则以脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶、pH贡献最大。作为综合评价砂姜黑土肥力的生物指标,酸性和中性磷酸酶优于其他三种土壤酶。以两个主成分得分为新指标进行聚类得到长期不同施肥方式对砂姜黑土的培肥效果排序为MNPK, HMNPK > M > NPK > CK,即有机肥与化肥配施是砂姜黑土的最佳培肥模式,单施有机肥次之,而长期单施化肥或者不施肥则会导致土壤肥力下降。

**关键词** 主成分分析;聚类分析;砂姜黑土;土壤肥力;施肥方式

**中图分类号** S157.4<sup>+</sup>1; S158.2 **文献标识码** A

土壤质量是揭示土壤条件动态的最敏感的指标,综合反映了土壤特性<sup>[1]</sup>。土壤质量的优劣直接影响到粮食生产,与人类的生存状况息息相关,而土壤肥力又是土壤质量的本质属性,是土壤质量核心的基础。可反映土壤肥力水平的指标很多,且诸多指标之间存在一定的关系<sup>[2-3]</sup>,这必然会导致在反映土壤肥力状况的时候发生信息的重叠。由此可见,选择适当的评价方法,对于准确评价土壤肥力水平具有重要意义,但迄今为止,土壤肥力评价尚无统一标准<sup>[4]</sup>。早期,研究者们对土壤肥力的评价大多通过简单相关性分析论述单项土壤性质与土壤肥力的关系。20世纪70~80年代,统计学方法开始被引入土壤学研究领域<sup>[5-7]</sup>,随着这门交叉学科的发展,主成分分析和系统聚类分析在土壤肥力评价中已得到大量的应用<sup>[8-12]</sup>。近年来,越来越多的学者倾向于将主成分分析与聚类分析相结合作为一种新的评价方法—主成分-聚类分

析<sup>[13-14]</sup>,即先以各原始指标为变量,应用主成分分析方法,分析得出不同的主成分得分,再将各主成分得分作为评价新指标进行聚类分析<sup>[15]</sup>。这一方法不仅减少了计算量,降低了主观随意性,而且克服了聚类分析方法因原始数据量庞大、错综复杂而造成其结果偏离实际较远的缺点,大大提高了综合评价结果的准确性<sup>[16]</sup>。

砂姜黑土是安徽省主要旱地土壤类型之一,占全国总面积40%以上,“涝、旱、瘠、僵”等不良属性是致其肥力水平不高、作物产量低而不稳的主要因素。为解决砂姜黑土培肥改良关键技术问题,我们于1981年在安徽淮北濉溪杨柳设置了长期定位培肥试验,并已取得一定的研究成果<sup>[17-20]</sup>,但利用统计学方法综合评价不同施肥方式对砂姜黑土土壤肥力的影响的相关研究仍较鲜见。

本文基于安徽濉溪杨柳砂姜黑土长期定位试验,对小麦成熟期土壤的5种酶活性(脲酶、酸性磷

\* 国家科技支撑计划项目(2012BAD04B09, 2011BAD16B06, 2013BAD07B08)资助

† 通讯作者, E-mail: caocfu@126.com

作者简介: 陈欢(1984—),女,硕士研究生,主要从事土壤肥力及小麦栽培生理生化研究。E-mail: chenhuanyuan19840828@hotmail.com

收稿日期: 2013-08-19; 收到修改稿日期: 2013-11-30

酸酶、中性磷酸酶、过氧化氢酶、蔗糖酶)以及7种基础化学性质(pH、EC、有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾)进行主成分分析-聚类分析,尝试利用统计学方法评价长期不同施肥方式对淮北砂姜黑土的培肥效果,以期对砂姜黑土培肥改良技术提供可靠的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验设于安徽省农业科学院作物研究所濉溪县杨柳试验站,供试土壤为砂姜黑土,成土母质为黄土性古河沉积物。试验始于1981年,试验前耕层土壤(0~20 cm)基础理化指标如下:pH 7.6,有机质 10.22 g kg<sup>-1</sup>,全氮 0.78 g kg<sup>-1</sup>,全磷 0.47 g kg<sup>-1</sup>,碱解氮 64.1 mg kg<sup>-1</sup>,有效磷 2.5 mg kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 田间试验设计

本试验设5个处理(表1),每个处理4个重复,小区面积30 m<sup>2</sup>。小区间筑水泥永久性田埂作分离,中间有灌溉渠道通各小区。种植方式为小麦-玉

米轮作,种植品种为当年的主栽品种,每季作物收获后将地上部秸秆移除,实施根茬还田。

施肥的4个处理实行定氮,但磷、钾素不实行统一量。处理II~IV的总施氮量相等,处理IV和处理V施入的氮素采用有机与无机各半计量。所施用化肥为复合肥(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O含量均为150 g kg<sup>-1</sup>),氮素不足用尿素补齐。有机肥为豆饼肥,水分含量100~150 g kg<sup>-1</sup>,有机质300~400 g kg<sup>-1</sup>、N 60~70 g kg<sup>-1</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 10~30 g kg<sup>-1</sup>、K<sub>2</sub>O 20~30 g kg<sup>-1</sup>,有机肥施量均按当季肥料养分分析后的实际含量折算。有机肥和磷钾肥全部用作基肥,氮肥基肥追肥比例小麦为6:4(拔节期追施),玉米为3:5(大喇叭口期追肥)。

### 1.3 样品采集及测定

土壤样品于2012年6月小麦收割结束,每个小区用土钻在耕层(0~20 cm)分别按照“S”形取5个点,剔除根系和石砾。混合均匀后用四分法分出两份,一份鲜样过10目筛4℃保存供酶活性测试,另一份风干供理化性质测试。

表1 不同处理的肥料施用量

Table 1 Fertilizer application rate in different treatments

序号 Number	代号 Treatment code	处理 Treatment	施肥量 Fertilization rate
I	CK	不施肥	0
II	NPK	单施化肥	N525 kg hm <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 210 kg hm <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> , K <sub>2</sub> O 210 kg hm <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>
III	M	单施有机肥	折合 N525 kg hm <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>
IV	MNPK	有机肥与化肥配施(等氮)	处理II、III施肥量总和的50%
V	HMNPK	有机肥与化肥配施(高氮)	处理II、III施肥量总和的80%

土壤酶活性测定<sup>[21-22]</sup>:脲酶(URE)测定采用苯酚钠比色法,活性单位为NH<sub>3</sub>-N mg g<sup>-1</sup>干土(37℃,24 h);磷酸酶(酸性磷酸酶ACP,中性磷酸酶NEP)测定采用苯磷酸二钠比色法,活性单位为酚 mg g<sup>-1</sup>干土(37℃,3 h);过氧化氢酶(CAT)采用高锰酸钾滴定法,活性单位为KMnO<sub>4</sub> ml g<sup>-1</sup>干土(25℃,20 min);蔗糖酶(INV)采用Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>滴定法,活性单位为Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ml g<sup>-1</sup>干土(37℃,24 h)。

土壤理化性质测定<sup>[23]</sup>:全氮(TN)采用凯氏蒸馏法;有效磷(AP)采用碳酸氢钠浸提—比色法;速效钾(AK)采用醋酸铵浸提—火焰光度法;有机质(OM)采用重铬酸钾容量法,碱解氮(AN)采用碱解扩散法;pH采用电位法;电导率(EC)采用电导率仪

测定。

### 1.4 数据处理

原始数据经Excel2003软件整理后,采用SPSS 16.0软件的描述统计(Descriptive statistics)进行方差分析与原始数据的标准化,同时利用因子分析(Factor analysis)和聚类分析(Hierarchical cluster analysis)分别对土壤性质进行主成分分析和聚类分析。评价步骤如下:(1)评价指标的选取;(2)评价指标间相关性分析;(3)对原始评价指标进行标准化;(4)对标准化后的指标进行主成分分析,提取能反映原数据信息总量85.00%以上的主成分;(5)将所提取出的主成分作为新指标,进行聚类分析。

## 2 结 果

### 2.1 长期施肥对土壤酶活性及基础肥力的影响

选取 12 个土壤肥力因子作为主成分分析的评价指标,其中包括 5 种土壤酶活性和 7 个土壤基础肥力指标,如表 2。

不同土壤酶活性的变化规律在长期不同施肥方式下表现各异。结果表明,与长期不施肥相比,长期单施有机肥可分别显著提高砂姜黑土脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性 130.5%、11.4%、31.4%,但对磷酸酶活性无明显促进作用;长期单施化肥可有效增强土壤磷酸酶活性,同时却明显抑制了其他三种土壤酶的活性;在同等施氮水平下,有机肥与化肥配施可使各酶活性均保持较高水平,弥补了单施化肥或有机肥因施肥结构单一导致某种土壤酶活性较低的不足;高氮水平下,有机肥与化肥配施可显著提高磷酸酶活性,但对其他酶活作用规律不明显。

不同施肥方式对土壤常规肥力指标的影响也各不相同。长期定位监测结果显示,长期单施化肥可使土壤酸化,与不施肥对照相比,土壤 pH 下降了 1.32 个单位;而单施有机肥则显著地提高了土壤 pH;有机肥与化肥配施(等氮和高氮)变化不明显,

说明长期施用化肥是造成砂姜黑土酸化的主要原因。土壤 EC 与肥料施用量呈正比,因此 HMNPK 处理砂姜黑土 EC 最高。比较等氮水平的 3 个处理, M 处理土壤 EC 最高, NPK 处理最低,这说明施用有机肥更易于提高土壤 EC,即更有利于土壤可溶性盐含量的保持,进而促进作物吸收利用。土壤有机质含量大小关系为 MNPK, HMNPK, M > NPK > CK,说明有机肥的施入可明显提高砂姜黑土中有机质的含量。NPK 处理土壤有机质含量稍有提高,可能是适量化肥的施入调节了碳氮比,进而促进还田的根茬分解形成土壤有机质,但与 CK 相比差异并不明显。土壤全氮含量的变化规律与 EC 相似。土壤碱解氮含量的变化趋势与有机质一致。有效磷和速效钾含量则分别与磷肥、钾肥的施入量呈正比,因此 HMNPK 处理和 NPK 处理中有效磷和速效钾含量最高, M 处理较低。

综上所述,不同施肥方式对提高砂姜黑土肥力的贡献不同,长期单施化肥可明显提高砂姜黑土中性磷酸酶活性,单施有机肥对提高土壤脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶活性以及土壤酸碱度起促进作用, MNPK 处理可显著增加土壤有机质含量, HMNPK 处理则对酸性磷酸酶、EC、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾提高作用较明显。因此,难以判断何种施肥方式培肥土壤的作用效果更好。

表 2 长期施肥对土壤酶活性与土壤基础肥力的影响

Table 2 Effects of long-term fertilization on activity of soil enzymes and basic fertility of the soil

处理代号 Treatment code	URE (mg g <sup>-1</sup> )	ACP (mg g <sup>-1</sup> )	NEP (mg g <sup>-1</sup> )	CAT (ml g <sup>-1</sup> )	INV (ml g <sup>-1</sup> )	pH	EC (μS cm <sup>-1</sup> )	OM (g kg <sup>-1</sup> )	TN (g kg <sup>-1</sup> )	AN (mg kg <sup>-1</sup> )	AP (mg kg <sup>-1</sup> )	AK (mg kg <sup>-1</sup> )
CK	0.33d	0.67c	0.19c	1.78ab	2.21ab	7.21b	48.68e	18.16b	1.10d	80.13c	1.535e	94.01c
NPK	0.12e	1.12b	1.06a	0.97c	1.28c	5.89c	57.58d	20.57b	1.42c	100.1b	33.16b	126.1a
M	0.77a	0.71c	0.12d	1.98a	2.90a	7.79a	85.65b	25.05a	1.50ab	112.6a	9.178d	109.3b
MNPK	0.45c	1.16b	0.83b	1.72ab	2.81ab	7.21b	70.03c	26.69a	1.45bc	107.6a	24.52c	114.9b
HMNPK	0.57b	1.40a	0.97a	1.66b	2.68b	6.97b	104.00a	26.13a	1.54a	113.9a	42.84a	127.8

注:不同小写字母表示每列在  $p < 0.05$  水平上呈显著差异 ( $n = 4$ ) Note: The lowercase letters in the table indicate the data in the same column are significantly different on the level  $p < 0.05$  ( $n = 4$ )

### 2.2 肥力指标间的相关关系

相关系数矩阵对主成分分析具有参考价值,一般而言,相关系数高的变量大多会进入同一个主成分,但除相关系数外,数据结构也决定了变量在主成分中分布的地位<sup>[24]</sup>。从土壤各肥力指标的相关系数矩阵表(表 3)可看出,除少数指标间相关系数

未达显著水平,如 URE 与 ACP、AP、AK 间, ACP 与 CAT、INV 间, NEP 与 INV、EC、OM、TN、AN 间, CAT 与 EC、OM、TN、AN 间, INV 与 TN、AN、AP、AK 间, pH 与 EC、OM、TN、AN 间, AP 与 OM 间,其余指标间的相关性均达显著水平。若直接用这些指标进行综合评价,必然会造成信息的重叠,影响评价结果

的客观性。因此,为进一步了解这些指标之间的相关关系以及各指标对土壤肥力的贡献,我们利用主

成分-聚类分析方法进行砂姜黑土肥力水平的综合评价。

表 3 土壤各肥力指标的相关系数矩阵

Table 3 Correlation coefficient matrix of the soil properties

	URE	ACP	NEP	CAT	INV	pH	EC	OM	TN	AN	AP	AK
URE	1	-0.157	-0.486 *	0.753 **	0.878 **	0.826 **	0.688 **	0.545 *	0.459 *	0.544 *	-0.160	-0.123
ACP		1	0.906 **	-0.367	-0.047	-0.445 *	0.501 *	0.478 *	0.586 **	0.505 *	0.920 **	0.789 **
NEP			1	-0.663 **	-0.400	-0.737 **	0.172	0.242	0.430	0.306	0.886 **	0.790 **
CAT				1	0.834 **	0.938 **	0.320	0.287	-0.050	0.107	-0.541 *	-0.501 *
INV					1	0.871 **	0.586 **	0.609 **	0.316	0.438	-0.173	-0.210
pH						1	0.348	0.328	0.010	0.180	-0.574 **	-0.480 *
EC							1	0.698 **	0.775 **	0.807 **	0.500 *	0.522 *
OM								1	0.718 **	0.822 **	0.424	0.452 *
TN									1	0.937 **	0.645 **	0.703 **
AN										1	0.551 *	0.681 **
AP											1	0.891 **
AK												1

注: \* 代表差异显著( $p < 0.05$ ), \*\* 代表差异极显著( $p < 0.01$ ) Note: \* indicates significant difference ( $p < 0.05$ ), \*\* indicates extremely significant difference ( $p < 0.01$ )

## 2.3 提取主成分

主成分分析是一种经典的特征提取和降维方法,它将原来多个变量转化成为少数的几个不相关的综合指标,简化原始高维变量的同时还保证了原始数据信息最大限度的保留<sup>[25]</sup>。

鉴于本试验中 12 个土壤指标具有不同的量纲,同时它们的数量级差别也很大,因此需要对原始数据进行标准化处理,以排除不同量纲和数量级对评价结果的影响,确保主成分分析结果的客观性和科学性。标准化后的指标记作 ZURE、ZACP、ZNEP、ZCAT、ZINV、ZpH、ZEC、ZOM、ZTN、ZAN、ZAP、ZAK。

将标准化后的数据进行主成分分析,分析得出的特征值与贡献率如表 4 所示。特征值在某种程度上可看成是表示主成分影响力度大小的指标,若特征值  $< 1$ ,说明该主成分的解释力度还不如直接引入一个原变量的解释力度大,因此,一般可用特征值  $> 1$  作为主成分个数的提取原则。本试验可提取出 2 个主成分,其特征值分别为 5.624 和 4.963,方差贡献率分别为 46.86% 和 41.36%,累计贡献率达 88.22%  $> 85.00%$ ,也就是说这 2 个主成分涵盖了原始数据信息总量的 88.22%。因此,将这 2 个主成分作为综合变量来评价本试验的土壤肥力状况

是可行的。

原始变量与 2 个主成分的相关系数可用载荷值表征,载荷值大的变量即可认为是该主成分的主要影响因子<sup>[2]</sup>。图 1 a 为初始因子分别对应于 2 个主成分的载荷分布图,为使因子更易于识别,将初始因子载荷矩阵进行最大方差法旋转,旋转后因子分布图如图 1 b。如图 1 所示,第一主成分以 ACP、NEP、EC、OM、TN、AN、AP、AK 为主要影响因子,其中 ACP、NEP 是砂姜黑土磷循环和转化过程中关键性生物指标,EC 反映了离子总量,OM 是反映肥力的重要指标,TN 反映了土壤氮素养分的总储量,AN、AP、AK 反映了土壤供给作物速效养分能力的大小。第二主成分则以 URE、CAT、INV、pH 为主要影响因子,其中 URE、CAT、INV 表示了土壤养分及能量循环转化的酶活因子,pH 反映了土壤环境。可见,磷酸酶作为综合评价指标的生物指标,优于其他 3 种土壤酶。

用每个指标分别对应于 2 个主成分的载荷值除以主成分相对应的特征值(见表 4,  $\lambda_1 = 5.624$ ,  $\lambda_2 = 4.963$ )开平方根即可得到每个指标分别对应的 2 个主成分的特征向量(如表 5),特征向量代表了各原指标对于主成分的重要程度。

表 4 主成分分析的特征值与方差贡献率

Table 4 Eigenvalues and variance contribution rates of the principal component analysis

成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalues			初始载荷因子平方和 Sum of squared of initial loading factors		
	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Contribution rate (%)	累计贡献率 Cumulative contribution rate (%)	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Contribution rate (%)	累计贡献率 Cumulative contribution rate (%)
1	5.624	46.86	46.86	5.624	46.86	46.86
2	4.963	41.36	88.22	4.963	41.36	88.22
3	0.580	4.83	93.05			
4	0.355	2.96	96.01			
5	0.179	1.49	97.50			
6	0.127	1.06	98.55			
7	0.071	0.59	99.14			
8	0.047	0.39	99.54			
9	0.029	0.24	99.77			
10	0.017	0.14	99.91			
11	0.009	0.07	99.99			
12	0.002	0.01	100.00			

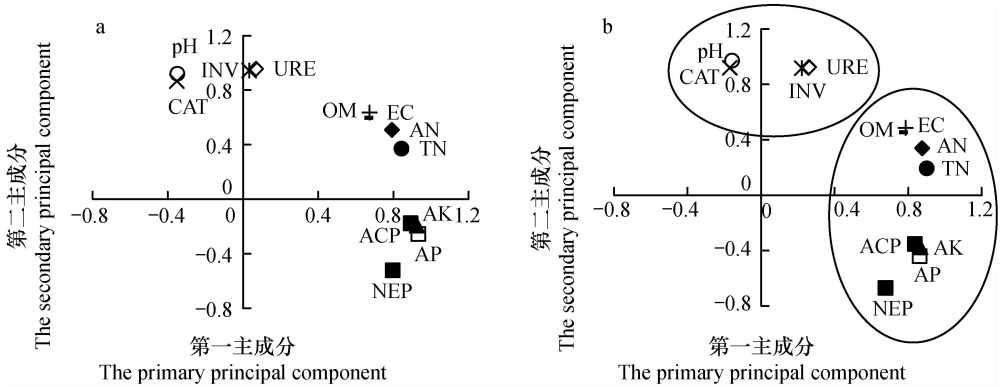


图 1 初始因子(a)及旋转后因子载荷(b)分布

Fig. 1 Loading distribution of the initial factors (a) and rotated factors (b)

主成分是 12 个标准化后指标的线性组合,权重系数分别为各指标相对应的特征向量(表 5),因此可得第一主成分和第二主成分的函数表达式为:

$$F1 = 0.029 \times ZURE + 0.376 \times ZACP + 0.337 \times ZNEP - 0.149 \times ZCAT + 0.013 \times ZINV - 0.147 \times ZpH + 0.284 \times ZEC + 0.274 \times ZOM + 0.356 \times ZTN + 0.334 \times ZAN + 0.394 \times ZAP + 0.390 \times ZAK \quad (1)$$

$$F2 = 0.430 \times ZURE - 0.080 \times ZACP - 0.234 \times ZNEP + 0.388 \times ZCAT + 0.424 \times ZINV + 0.412 \times ZpH + 0.285 \times ZEC + 0.268 \times ZOM + 0.166 \times ZTN + 0.228 \times ZAN - 0.116 \times ZAP - 0.087 \times ZAK \quad (2)$$

将经过标准化的数据代入式(1)和式(2)式中,

可得到 5 个不同施肥处理在第一主成分、第二主成分的得分(表 6)。结果显示,在第一主成分上, M 处理得分为负,排名第四,这是因为本试验中所施用的有机肥豆饼肥磷含量较低,所以土壤磷酸酶活性与有效磷含量较低,但又因其对 URE、CAT、INV、pH 的促进作用在第二主成分上得分最高。NPK 处理在 2 个主成分的得分情况与 M 处理相反,即在第一主成分排名靠前,但在第二主成分得分却最低。这说明,不同处理在第一、第二主成分的得分和排名各不相同,主要是因为各主成分的主要影响因子不同。

综合主成分得分是计算每个主成分得分与其

对应贡献率之乘积总和,即  $F = F1 \times 46.864\% + F2 \times 41.358\%$ ,结果见表 6。这种综合得分计算看似可提高信息含量、增加方差的贡献率,但通过计算  $F$ 、 $F1$ 、 $F2$  的方差发现, $F$  的方差较  $F1$ 、 $F2$  的方差还

小,也就是说明综合主成分得分所含信息量较第一、第二主成分还要小。由此可见,在本试验中,采取主成分综合得分及其排序来判断不同施肥对砂姜黑土肥力作用的强弱是不可行的。

表 5 主成分分析下各项指标的特征向量

Table 5 Eigenvalues and variance contribution of the principal component analysis

土壤指标 Soil indicators	第一主成分特征向量 (A1) Eigenvector of the primary principal component	第二主成分特征向量 (A2) Eigenvector of the secondary principal component
URE	0.029	0.430
ACP	0.376	-0.080
NEP	0.337	-0.234
CAT	-0.149	0.388
INV	0.013	0.424
pH	-0.147	0.412
EC	0.284	0.285
OM	0.274	0.268
TN	0.356	0.166
AN	0.334	0.228
AP	0.394	-0.116
AK	0.390	-0.087

表 6 不同施肥处理土壤肥力的各主成分、综合得分及排序

Table 6 Composite scores and ranking of various principal components of soil fertility of different fertilization treatments

处理代号 Treatment code	第一主成分 得分 (F1) Scores of the primary principal component	第一主成分 得分排名 Ranking of the primary principal component in score	第二主成分 得分 (F2) Scores of the secondary principal component	第二主成分 得分排名 Ranking of the secondary principal component	综合得分 Composite scores	综合得分 排名 Ranking in composite scores
CK	-3.942	5	-0.806	4	-2.181	5
NPK	1.095	2	-3.600	5	-0.976	4
M	-0.805	4	2.871	1	0.810	2
MNPK	0.768	3	0.679	3	0.641	3
HMNPK	2.883	1	0.856	2	1.705	1

2.4 不同施肥方式下土壤肥力等级的划分

以各处理的 2 个主成分分析得分代替原指标作为评价土壤肥力的新指标,以欧氏距离作为衡量各处理土壤肥力差异大小,采用最短距离法将各处理按土壤肥力水平的亲疏相似程度进行系统聚类<sup>[26]</sup>。由聚类树形图(图 2)可直观地看出各施肥方式的归类情况: MNPK, HMNPK > M > NPK > CK, 也就是各处理土壤肥力水平分为 4 个等级: 一等 (HMNPK, MNPK), 属于高肥力等级; 二等 (M), 处于较高肥力水平; 三等 (NPK), 土壤的肥力状况较低; 四等 (CK), 土壤肥力位于最低程度。

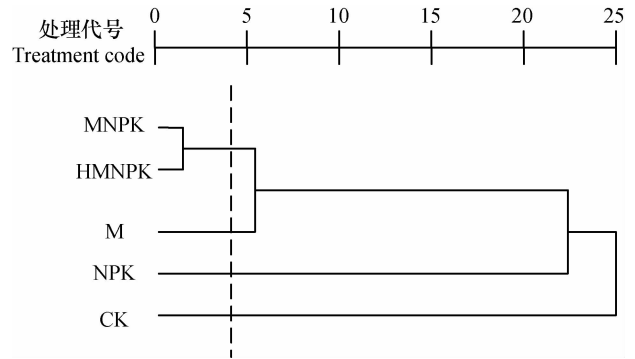


图 2 聚类树形图

Fig. 2 Arborecence of cluster analysis

### 3 讨 论

基于 31 a 的长期定位监测,可看出各肥力指标间并不是相互独立的,相反,它们之间是紧密联系的,并且存在一定的相关关系。肥力指标之间的相关性不仅反映了土壤物质与能量循环、转化过程中各养分的关系,还强调了土壤酶作为微生物活性指标在土壤生化过程中的重要作用<sup>[27-28]</sup>。本文利用主成分分析方法,将 12 个原始指标降维、提取出 2 个主成分,累计贡献率达 88.22%,且原变量整体没有丢失,因此,利用文中所选取的 5 个土壤酶活指标与 7 个土壤化学指标对淮北砂姜黑土的肥力状况进行评价是可靠的,这与 Burns<sup>[29]</sup>、孙瑞莲<sup>[30]</sup>等的结论一致。第一主成分上以 ACP、NEP、EC、OM、TN、AN、AP、AK 的载荷量较高,第二主成分上以 URE、CAT、INV、pH 为主要影响因子,前者主要代表了能显著影响土壤生产力的、较稳定的土壤养分因素,而后者则主要反映了在土壤物质、能量循环过程中起关键性作用的土壤酶。2 个主成分涵盖了土壤的化学和生物指标,使评价更具科学性、合理性<sup>[31-32]</sup>,并且 2 个主成分的方差贡献率差异不大(第一主成分 46.86%,第二主成分 41.36%),因此表征土壤养分状况的第一主成分与表征土壤酶活性的第二主成分在评价砂姜黑土肥力水平时同样重要。此外,作为综合评价的生物指标,磷酸酶优于其他三种酶,这与砂姜黑土的养分特性、有机肥种类有关,砂姜黑土养分状况的主要特点是“有机质含量低,缺磷少氮钾富足”,本试验中所采用的有机肥为豆饼肥,其磷含量略低( $P_2O_5$  10~30 g kg<sup>-1</sup>),因此,土壤磷含量以及与其循环转化过程息息相关的磷酸酶活性在整个综合评价分析中显得极为重要。

通过聚类分析将 5 个不同处理分为四等级:有机肥与化肥配施(高氮和等氮)、单施有机肥、单施化肥、不施肥。可见,施肥结构对土壤肥力水平的影响较大,同一施肥结构下施氮量对土壤肥力的影响则较小,因此可认为施肥结构是决定淮北砂姜黑土土壤肥力水平的关键因素,吴玉红等<sup>[33]</sup>、Jalali<sup>[13]</sup>也得到类似的结论。综上所述,对于淮北砂姜黑土而言,有机肥与化肥配施是最优培肥模式;单施有机肥次之;而单施化肥和不施肥均会导致土壤肥力水平的显著下降。聚类分析结果验证了有机肥与化肥配施对土壤改土培肥的积极作用<sup>[18,20]</sup>,有机肥与化肥配施既可保证土壤速效养分对作物的供应,

又可显著改善土壤质量、提高土壤肥力水平<sup>[34-36]</sup>,解决了单施有机肥而造成的当季养分供应不足,或单施化肥而造成的土壤酸化、板结等问题<sup>[37]</sup>。

### 4 结 论

通过主成分分析可将原 12 个土壤生化指标降维、提取出 2 个主成分,反映原信息总量的 88.22%,且无原变量丢失。第一主成分以 ACP、NEP、EC、OM、TN、AN、AP、AK 贡献最大,第二主成分则以 URE、CAT、INV、pH 贡献最大。作为砂姜黑土肥力综合评价指标,酸性和中性磷酸酶优于其他三种土壤酶。

将 2 个主成分得分进行聚类分析,砂姜黑土的肥力水平可分为 4 个等级:一等(MNPK, HMNPK),属于高肥力等级;二等(M),处于较高肥力水平;三等(NPK),土壤的肥力状况较低;四等(CK),土壤肥力位于最低程度。由此可见,对于砂姜黑土而言有机肥与化肥配施是最佳培肥模式。

### 参 考 文 献

- [1] 黄婷,岳西杰,葛玺祖,等. 基于主成分分析的黄土沟壑区土壤肥力质量评价——以长武县耕地土壤为例. 干旱地区农业研究,2010,28(3):141—147. Huang T, Yue X J, Ge X Z, et al. Evaluation of soil quality on gully region of Loess Plateau based on principal component analysis (In Chinese). Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(3): 141—147
- [2] 邱莉萍,刘军,王益权,等. 土壤酶活性与土壤肥力的关系研究. 植物营养与肥料学报,2004,10(3):277—280. Qiu L P, Liu J, Wang Y Q, et al. Research on relationship between soil enzyme activities and soil fertility (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(3): 277—280
- [3] 赵静,韩甜甜,谢兴斌,等. 酸化梨园土壤酶活性与土壤理化性质之间的关系. 水土保持学报,2011,25(4):115—120. Zhao J, Han T T, Xie X B, et al. Relationship between soil enzymatic activity and soil property in selected acidified pear orchards (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(4): 115—120
- [4] 郑昭佩,刘作新. 土壤质量及其评价. 应用生态学报,2003,14(1):131—134. Zheng Z P, Liu Z X. Soil quality and its evaluation (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(1): 131—134
- [5] Webster R. Quantitative and numerical methods in soil classification and survey. Oxford: Clarendon Press, 1977
- [6] 刘多森. 主组元分析在分辨土壤类型及风化—成土过程上的应用. 土壤学报,1979,16(2):172—183. Liu D S. The application of principal component analysis on the identification of soil types, weathering and soil forming process (In Chinese). Ac-

- ta *Pedologica Sinica*, 1979, 16(2): 172—183
- [7] 卜兆宏, 万洪富. 土壤分类分级中的综合数值分析法的初步研究. *土壤学报*, 1982, 19(3): 283—295. Pu Z H, Wan H F. Preliminary study on the application of analytic method of synthetic value in soil classification (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1982, 19(3): 283—295
- [8] 陈吉, 赵炳梓, 张佳宝, 等. 主成分分析方法在长期施肥土壤质量评价中的应用. *土壤*, 2010, 42(3): 415—420. Chen J, Zhao B Z, Zhang J B, et al. Application of principal component analysis in evaluation of soil quality under different long-term fertilization (In Chinese). *Soils*, 2010, 42(3): 415—420
- [9] 刘世梁, 傅伯杰, 吕一河, 等. 坡面土地利用方式与景观位置对土壤质量的影响. *生态学报*, 2003, 23(3): 414—420. Liu S L, Fu B J, Lü Y H, et al. Assessment of soil quality in relation to land use and landscape position on slope (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3): 414—420
- [10] 鲍艳, 胡振琪, 柏玉, 等. 主成分聚类分析在土地利用生态安全评价中的应用. *农业工程学报*, 2006, 22(8): 87—90. Bao Y, Hu Z Q, Bai Y, et al. Application of principal component analysis and cluster analysis to evaluating ecological safety of land use (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(8): 87—90
- [11] 陈留美, 桂林国, 吕家珑, 等. 应用主成分分析和聚类分析评价不同施肥处理条件下新垦淡灰钙土土壤肥力质量. *土壤*, 2008, 40(6): 971—975. Chen L M, Gui L G, Lü J L, et al. Evaluation on soil fertility quality of newly cultivated light sierozem under different fertilization with method of principal component and cluster analyses (In Chinese). *Soils*, 2008, 40(6): 971—975
- [12] 姚荣江, 杨劲松, 姜龙, 等. 基于聚类分析的土壤盐渍剖面特征及其空间分布研究. *土壤学报*, 2008, 45(1): 56—65. Yao R J, Yang J S, Jiang L, et al. Profile characteristics and spatial distribution of soil salinity based on hierarchical cluster analysis (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(1): 56—65
- [13] Jalali M. Multivariate statistical analysis of potassium status in agricultural soils in Hamadan, Western Iran. *Pedosphere*, 2010, 20(3): 293—303
- [14] Jin X H, Yao Y H, Liu W L. Principal component analysis and cluster analysis of soil nutrients for planting *Schisandra chinensis* (Turcz) Baill in Yanbian area. *Medicinal Plant*, 2011, 2(6): 1—4, 8
- [15] 张水清, 黄绍敏, 郭斗斗. 主成分分析在潮土土壤肥力评价中的应用. *河南农业科学*, 2011, 40(4): 82—86. Zhang S Q, Huang S M, Guo D D. Evaluation of fluvo-aquic soil fertility quality with the method of principal component analyses (In Chinese). *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2011, 40(4): 82—86
- [16] 王宏健, 易柱新. 主成分方法用于聚类分析. *经济数学*, 1996, 13(1): 93—96. Wang H J, Yi Z X. Main subject method in the clustering analysis (In Chinese). *Mathematics in Economics*, 1996, 13(1): 93—96
- [17] 曹承富, 孔令聪, 汪芝寿, 等. 砂姜黑土长期定位培肥技术研究. *土壤通报*, 2003, 34(2): 102—105. Cao C F, Kong L C, Wang Z S, et al. Effect of long-term trial on raising fertility of Shajiang Black Soil (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(2): 102—105
- [18] 孔令聪, 曹承富, 汪芝寿, 等. 长期定位施肥对砂姜黑土肥力及生产力的影响研究. *中国生态农业学报*, 2004, 12(2): 102—104. Kong L C, Cao C F, Wang Z S, et al. Effects of a long-term located fertilization on the fertility and productivity of Shajiang Black Soil (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(2): 102—104
- [19] 张存岭, 陈龙潭, 曹承富, 等. 淮北砂姜黑土地力贡献与培肥技术研究. *中国农学通报*, 2005, 21(11): 244—246. Zhang C L, Chen L T, Cao C F, et al. Study on the contribution of Shajiang Black Soil fertilizer and the appropriate technical measures of applying fertilizer (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(11): 244—246
- [20] 曹承富, 孔令聪, 张存岭, 等. 施肥对砂姜黑土基础肥力及强筋小麦产量、品质的影响. *中国生态农业学报*, 2008, 16(5): 1073—1077. Cao C F, Kong L C, Zhang C L, et al. Effect of fertilization on soil fertility, wheat yield and quality in Shajiang Black Soil (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(5): 1073—1077
- [21] 关松荫. 土壤酶及其研究方法. 北京: 农业出版社, 1986: 276—277, 294—296, 309—312, 320—322. Guan S Y. Soil enzyme and its research methods (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1986: 276—277, 294—296, 309—312, 320—322
- [22] 周礼恺. 土壤酶学. 北京: 科学出版社, 1987: 267—268, 272—273, 275—277. Zhou L K. Soil enzymology (In Chinese). Beijing: Science Press, 1987: 267—268, 272—273, 275—277
- [23] 鲍士旦. 土壤农业化学分析. 北京: 中国农业出版社, 2005: 30—34, 42—49, 56—58, 81—83, 106—108, 183—187. Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2005: 30—34, 42—49, 56—58, 81—83, 106—108, 183—187
- [24] 张虎. 主成分聚类分析法的案例教学方法. *统计与决策*, 2007, 20: 163—164. Zhang H. Cases teaching method of principal component cluster analysis (In Chinese). *Statistics and Decision*, 2007, 20: 163—164
- [25] 高惠璇. 应用多元统计分析. 北京: 北京大学出版社, 2005: 265—280. Gao H X. Applied multivariate statistical analysis (In Chinese). Beijing: Beijing University Press, 2005: 265—280
- [26] 方开泰. 实用多元统计分析. 上海: 华东师范大学出版社, 1989: 215—218. Fang K T. Practical multivariate statistical analysis (In Chinese). Shanghai: East China Normal University Press, 1989: 215—218
- [27] 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. *生态学报*, 2006, 26(3): 901—913. Liu Z F, Fu B J, Liu G H, et al. Soil quality: Concept, indicators and its assessment (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 901—913
- [28] Frankenberger W, Dick W. Relationships between enzyme activities and microbial growth and activity indices in soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, 47(5): 945—951
- [29] Burns R G. *Soil enzymes*. London: Academic Press, 1978: 251—293
- [30] 孙瑞莲, 赵秉强, 朱鲁生, 等. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用. *植物营养与肥料学报*,



- 2003, 9 (4): 406—410. Sun R L, Zhao B Q, Zhu L S, et al. Effects of long-term fertilization on soil enzyme activities and its role in adjusting-controlling soil fertility (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(4): 406—410
- [31] 郭笃发, 王秋兵. 主成分分析法对土壤养分与小麦产量关系的研究. *土壤学报*, 2005, 42(3): 523—527. Guo D F, Wang Q B. Principal component analysis of relationship between various nutrients in albiudic cambosols profile and wheat yield (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3): 523—527
- [32] Fox G A, Metla R. Soil property analysis using principal components analysis, soil line, and regression models. *Soil Science Society America Journal*, 2005, 69: 1782—1788
- [33] 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. *中国生态农业学报*, 2010, 18(2): 223—228. Wu Y H, Tian X H, Nan X X, et al. Evaluation of soil quality under conservation tillage via factor and cluster analyses (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(2): 223—228
- [34] 包耀贤, 徐明岗, 吕粉桃, 等. 长期施肥下土壤肥力变化的评价方法. *中国农业科学*, 2012, 45(20): 4197—4204. Bao Y X, Xu M G, Lü F T, et al. Evaluation method on soil fertility under long-term fertilization (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(20): 4197—4204
- [35] Bi L, Zhang B, Liu G, et al. Long-term effects of organic amendments on the rice yields for double rice cropping systems in subtropical China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 129(4): 534—541
- [36] Schjønning P, Christensen B T, Carstensen B. Physical and chemical properties of a sandy loam receiving animal manure, mineral fertilizer or no fertilizer for 90 years. *European Journal of Soil Science*, 1994, 45(3): 257—268
- [37] 索东让. 长期定位试验中化肥与有机肥结合效应研究. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(2): 71—75. Suo D R. Combined fertilization of chemical and organic fertilizers in a long-term position experiment (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Area*, 2005, 23(2): 71—75

## PRINCIPAL COMPONENT-CLUSTER ANALYSIS OF EFFECTS OF LONG-TERM FERTILIZATION ON FERTILITY OF LIME CONCRETION BLACK SOIL

Chen Huan<sup>1,2</sup> Cao Chengfu<sup>1,2†</sup> Zhang Cunling<sup>3</sup> Li Wei<sup>1,2</sup> Qiao Yuqiang<sup>1,2</sup> Du Shizhou<sup>1,2</sup> Zhao Zhu<sup>1,2</sup>

(1 *Crop Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China*)

(2 *Anhui Key Laboratory of Crops Quality Improvemen, Hefei 230031, China*)

(3 *Science and Technology Association of Suixi Country, Huaibei, Anhui 235100, China*)

**Abstract** Based on the long-term stationary field fertilization experiment in Yangliu of Anhui Province, principal component-cluster analysis was done of the data obtained with five types of soil enzymes (urease, acid phosphatase, neutral phosphatase, catalase and invertase) and seven items of soil chemical properties (pH, electric conductivity, organic matter, total nitrogen, alkalytic nitrogen, available phosphorus and readily available potassium) as evaluation indices, to valuate comprehensively effects of long-term fertilization on fertility of the lime concretion black soil at the experimental site. Results show that 2 principal components that could reflect 88.22% of the original information quantity without losing any original variables were extracted from the initial 12 indices. Within the primary group of principal components, ACP, NEP, EC, OM, TN, AN, AP and AK were the major contributors, while among the secondary group of principal components, URE, CAT, INV and pH were the major ones. As biological indicators for comprehensive evaluation of the fertility of Lime concretion black soil, acid phosphatase and neutral phosphatase were better than other three soil enzymes. Hierarchical cluster analysis of the new indices extracted based on scores of the two principal components revealed the effects of different patterns of long-term fertilization displayed an order of HMNPK, MNPK > M > NPK > CK, in other words, mixed application of organic and chemical fertilizer is the best fertilizing model, and followed by application of only organic fertilizer, as no-fertilization and application of solely chemical fertilizer could result in decline of soil fertility.

**Key words** Principal component analysis; Cluster analysis; Lime concretion black soil; Soil fertility; Application of fertilizer

(责任编辑:汪叔生)