

# 基于主成分和聚类分析的黑土肥力质量评价

吴海燕, 金荣德, 范作伟, 彭畅, 高洪军, 张秀芝, 李强, 朱平\*

(吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 吉林长春 130033)

**摘要:**【目的】以吉林省农业科学院(公主岭)国家黑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, 为建立东北黑土区合理施肥模式和土壤肥力质量定量评价体系提供科学依据。【方法】通过主成分和聚类分析, 综合评价了长期不同培肥措施的土壤肥力质量差异。以欧氏距离作为衡量不同处理肥力差异的大小, 采用最短距离法对各定位施肥处理进行系统聚类。【结果】长期不同施肥处理的玉米产量与土壤酶活性、土壤全量养分、速效养分、有机质、微生物碳和微生物量氮都表现出显著或极显著正相关, 与土壤pH值表现出负相关趋势。玉米产量与土壤硝态氮、铵态氮没有明显的相关性。土壤生物肥力与化学肥力呈极显著的正相关关系。土壤肥力质量排序为 1.5 (NPK + M1) > NPK + M2 > NPK + M1 > NPK + M1 (R) > NPK + S > NPK > CK, 其中 R 表示轮作。不同培肥措施的土壤肥力质量可聚为 4 类, 1.5 (NPK + M1) 和 CK 单独聚为一类, 分别为土壤肥力质量最好(一等)和最差(四等); NPK + M2、NPK + M1、NPK + M1 (R) 三个处理聚为一类, 土壤肥力质量为二等; NPK + S 和 NPK 聚为一类, 土壤肥力质量为三等。【结论】长期有机肥与化肥配施土壤肥力质量明显优于秸秆还田和单施化肥处理, 秸秆还田的土壤肥力质量优于化肥单施。因此, 应提倡长期有机无机肥配施以提高土壤肥力质量, 实现农田的可持续利用。

**关键词:** 主成分分析; 聚类分析; 长期定位施肥; 土壤生物肥力; 土壤化学肥力

## Assessment of fertility quality of black soil based on principal component and cluster analysis

WU Hai-yan, JIN Rong-de, FAN Zuo-wei, PENG Chang, GAO Hong-jun, ZHANG Xiu-zhi, LI Qiang, ZHU Ping\*  
(Institute of Agricultural Environment and Resources Research, Jilin Academy of Agriculture Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** 【Objectives】Based on long-term experiment on black soil fertility and fertilizer efficiency (Gongzhuling), a field experiment was conducted to assess the effects of different fertilization measures on the qualities of soil fertility, so as to provide scientific references for establishing the optimal fertilization pattern in the northeast black soil region of China. 【Methods】By means of principal component and cluster analysis, differences of soil fertility quality were assessed under long-term fertilization comprehensively, soil fertility difference on different fertilization was developed using Euclidean distance method and single linkage cluster. 【Results】Maize yields were positively and significantly correlated with soil enzyme activity, the contents of total N, P and K, available N, P and K, soil organic matter, soil microbial carbon and nitrogen ( $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$ ), negatively correlated with soil pH, not significantly correlated with soil nitrate N and ammonium N. The soil fertility qualities were in order of 1.5 (NPK + M1) > NPK + M2 > NPK + M1 > NPK + M1(R) > NPK + S > NPK > CK, whereas R was rotation of corn with soybean. The soil fertility quality was clustered into four classes, the fertility quality in 1.5 (NPK + M1) and CK were respectively clustered into the best (first-class) and the worst (fourth-class) one, and those in treatments of NPK + M2, NPK + M1, NPK + M1 (R) were clustered into the second-class, those in NPK + S and NPK treatments were clustered into the third-class. 【Conclusions】The soil fertility qualities are in descended order of chemical fertilizers combined with manures, NPK fertilizer combined

收稿日期: 2017-06-21 接受日期: 2017-11-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD080010X, 2016YFD0300803)资助。

联系方式: 吴海燕 E-mail: wuhaiyan1968@163.com; \* 通信作者 朱平 E-mail: Zhuping1962@sohu.com

with straw returning, single NPK fertilizers and CK. Therefore, mixed application of chemical fertilizers with organic fertilizers should be promoted for the improvement of soil fertility quality and the everlasting use of farmland.

**Key words:** principal component analysis; cluster analysis; long-term fertilization; soil biological fertility; soil chemical fertility

农业的可持续发展依赖于土壤的持续利用,而土壤的持续利用依赖于土壤肥力的持续稳定和不断提高。土壤肥力是指土壤为植物生长不断地供应和协调养分、水分、空气和热量的能力,表征土壤肥力的指标主要包括土壤有机质、土壤生物活性、土壤酶活性、土壤团粒结构、土壤容重、透性、抗蚀性、土壤阳离子交换量、大量元素、微量元素及pH值等<sup>[1-2]</sup>。

客观评价土壤肥力质量是准确了解土壤属性、充分利用土壤资源的保障<sup>[3-6]</sup>。影响土壤肥力质量的土壤属性很多,刘世梁等<sup>[7]</sup>认为土壤有机质、全氮、全磷、全钾、有效磷、速效钾、pH、CEC、质地、耕层厚度等指标能够稳定地评价耕作土壤肥力,而将土壤酶活性、微生物量碳、微生物量氮等生物因子作为土壤肥力的评价指标近年来也受到重视。土壤物理属性、化学属性和生物学属性共同构成了土壤肥力质量的评价指标体系<sup>[8]</sup>。关于土壤肥力质量的评价方法,聚类分析、主成分分析是近年来在土壤肥力质量定量评价中应用最广泛的数理统计方法,能够客观、准确地筛选土壤属性的变异性<sup>[9-10]</sup>。因此,本文选择能反映土壤肥力质量特性的定量因子,利用主成分分析和聚类分析的方法,对长期定位施肥不同处理土壤肥力质量差异进行评价,以期为现代农业生产中土壤地力保护与培育提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

供试土样采自吉林省农业科学院公主岭国家黑土长期定位试验监测基地,试验地位于吉林省公主岭市(43°30'N, 124°48'E)。供试土壤为黑土,成土母质为第四纪黄土状沉积物;试验地为波状起伏的台地平原,地势平坦辽阔。试验区年平均气温4.6℃~5.6℃,年最高气温34℃,最低-35℃,无霜期110~140 d,有效积温1600~3000℃,年降水量450~600 mm,年蒸发量1200~1600 mm,年日照时数2500~2700 h<sup>[11]</sup>。土壤培肥试验始于1980年。

### 1.2 供试作物及品种

供试作物为玉米,种植的玉米品种:1980—1989年为吉单101,1990—1993年为丹育13,1994—1996年为吉单222,1997—2005年为吉单209,2006—2016年为郑单958。于每年的4月末5月初播种,9月末10月初收获,统一田间管理,在10月中旬后进行土壤取样并分析测定。

### 1.3 试验处理

试验处理及施肥量见表1。

### 1.4 样品采集与测定

1.4.1 样品采集 2014年分别在玉米苗期(5月28日)、拔节期(6月23日)、开花期(7月26日)、灌浆期(8月15日)和收获后(10月9日)采集土壤样本。取样方法为每个处理采集0—20 cm耕层土样,取5点混合,分装2份,1份置于4℃冰箱保存,用于测定土壤含水量和微生物量碳、氮等生物指标;另一份捡除石砾和植物残根等杂物,风干后过1 mm筛备用,样品用于测定土壤酶活性及土壤养分。土壤养分按常规分析方法测定。

1.4.2 土壤酶活性的测定<sup>[12]</sup> 土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法,以每克土消耗0.1 mol/L高锰酸钾体积数(mL)表示;脲酶活性用靛酚蓝比色法,以37℃恒温培养24 h后每克土中NH<sub>3</sub>-N的质量(mg)表示;磷酸酶活性用磷酸苯二钠比色法,以每克土酚的毫克数表示;蔗糖酶用硫代硫酸钠滴定法,以72 h后每克土消耗的0.1 mol/L硫代硫酸钠体积数(mL)表示。

### 1.5 数据分析

采用Excel 2003及SPSS 21.0软件进行数据处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 长期定位施肥处理的土壤肥力指标

表2表明,不同定位施肥处理的土壤有机质、全氮、全磷、全钾,速效氮、磷、钾,铵态氮、硝态氮等养分指标的变化规律基本相同,即有机无机肥配施效果最好,秸秆配施化肥次之,化肥单施优

表 1 田间试验处理  
Table 1 Treatments in field experiment

编号 Number	处理 Treatment	代号 Code	备注 Contents
1	对照 Control	CK	不施肥, 种植作物 Fallow land (No fertilizer input, crop planted)
2	化肥 Chemical fertilizer	NPK	每年施 Annual applying N 165 kg/hm <sup>2</sup> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 82.5 kg/hm <sup>2</sup> , K <sub>2</sub> O 82.5 kg/hm <sup>2</sup>
3	有机肥 + 化肥 Organic manure + Chemical fertilizer	NPK + M2	N、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 、K <sub>2</sub> O 施用量同处理 2, 猪粪 30 t/hm <sup>2</sup> N, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and K <sub>2</sub> O input is the same as treatment 2, additional pig manure 30 t/hm <sup>2</sup> per year
4	化肥 + 秸秆 Chemical fertilizer + Straw	NPK + S	N 112 kg/hm <sup>2</sup> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 、K <sub>2</sub> O 施用量同处理 2; 粉碎玉米秸秆 7500 kg/hm <sup>2</sup> (折有机 N 53 kg/hm <sup>2</sup> ) Same amount of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and K <sub>2</sub> O as treatment 2, applying N 112 kg/hm <sup>2</sup> , returning smashed maize straw 7500 kg/hm <sup>2</sup> (equal to organic N 53 kg/hm <sup>2</sup> )
5	有机肥 + 化肥 Organic manure + Chemical fertilizer	NPK + M1	N 50 kg/hm <sup>2</sup> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 、K <sub>2</sub> O 施用量同处理 2, 猪粪 23 t/hm <sup>2</sup> (折有机 N 115 kg/hm <sup>2</sup> ) Same amount of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> and K <sub>2</sub> O as treatment 2, applying N 50 kg/hm <sup>2</sup> , pig manure 23 t/hm <sup>2</sup> per year (organic N equal to 53 kg/hm <sup>2</sup> )
6	有机肥 + 化肥 + 轮作 Organic manure + Chemical fertilizer + Rotation	NPK + M1 (R)	施肥量同 NPK + M1, 种植方式为 2 年玉米与 1 年大豆轮作 Same fertilizer input with NPK + M1, rotation of 2-year's maize with one year's soybean
7	有机肥 + 化肥 Organic manure + Chemical fertilizer	1.5(NPK + M1)	N 75 kg/hm <sup>2</sup> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 123.7 kg/hm <sup>2</sup> , K <sub>2</sub> O 123.7 kg/hm <sup>2</sup> , 猪粪 34.5 t/hm <sup>2</sup> (合有机 N 172.5 kg/hm <sup>2</sup> ) Applying N 75 kg/hm <sup>2</sup> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 123.7 kg/hm <sup>2</sup> , K <sub>2</sub> O 123.7 kg/hm <sup>2</sup> , pig manure 34.5 t/hm <sup>2</sup> per year (organic N equal to 172.5 kg/hm <sup>2</sup> )

表 2 长期定位施肥处理土壤矿质养分含量  
Table 2 Mineral nutrient contents in soils under different treatments

处理 Treatment	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (g/kg)	全钾 Total K <sub>2</sub> O (g/kg)	有效磷 Olsen-P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	水解性氮 Hydrolysable N (mg/kg)	铵态氮 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg/kg)	硝态氮 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg/kg)
CK	1.40 d	0.55 e	21.86 c	9.50 d	97.78 d	124.63 d	3.92 ab	14.82 d
NPK	1.53 cd	0.64 d	21.86 c	63.24 c	113.03 d	127.72 d	3.67 ab	16.59 cd
NPK + M2	2.32 a	1.35 a	22.79 ab	174.32 ab	210.61 ab	183.04 b	4.57 a	35.82 a
NPK + S	1.62 c	0.84 c	22.34 b	71.11 c	152.63 c	143.90 c	2.18 b	15.28 cd
NPK + M1	2.08 b	1.22 b	22.48 b	167.78 ab	186.13 b	186.36 b	4.18 a	20.32 bc
NPK + M1 (R)	2.08 b	1.16 b	22.73 ab	147.34 b	191.89 b	180.43 b	3.81 ab	24.58 b
1.5 (NPK + M1)	2.35 a	1.31 a	23.10 a	191.80 a	225.48 a	207.41 a	3.83 ab	23.79 b

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significantly different among treatments at the 5% level.

于空白对照。

表 3 表明, 不同定位施肥处理的土壤主要酶活性 (脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶、蔗糖酶), 微生物量碳、微生物量氮等生物学指标与化学指标表现出相对一致的变化规律, 说明不同培肥措施对土壤生态环境的影响与对土壤养分状况的影响是一致的。

土壤微生物量碳氮比 (MBC/MBN) 可表征微生物群落的结构特征。陈安强等<sup>[13]</sup>研究认为, 土壤

MBC/MBN 为 3~5 的土壤微生物群落以细菌为主, 5~7 的土壤微生物群落以放线菌为主, 4.5~15 的土壤微生物群落以真菌为主。本研究的 MBC/MBN 变化范围在 2.37~3.79 之间, 说明供试土壤的微生物群落以细菌为主, 属于细菌型土壤。不同处理之间, 有机无机肥配施处理的 MBC/MBN 最低, CK 处理的 MBC/MBN 最高。主要由于土壤微生物分解有机质适宜的碳氮比在 25:1, 而试验施用的有机物料

表 3 长期定位施肥不同处理土壤生化指标含量

Table 3 Biochemical index values of soils under different treatments

处理 Treatment	脲酶 Urease (mg/g)	过氧化氢酶 Catalase (mL/g)	磷酸酶 Phosphatase (mg/g)	蔗糖酶 Sucrase (mL/g)	微生物量碳 MBC (mg/kg)	微生物量氮 MBN (mg/kg)	MBC/MBN	有机质 Organic matter (g/kg)	pH
CK	7.38 e	1.89 a	1.05 d	5.64 d	193.78 e	61.55 f	3.79 a	18.89 c	7.97 a
NPK	11.45 de	2.07 a	1.28 cd	6.21 d	251.35 d	78.23 ef	3.36 ab	20.41 bc	6.74 c
NPK + M2	30.54 ab	2.36 a	1.74 a	10.59 a	456.65 a	170.51 ab	2.87 bc	36.24 a	7.51 b
NPK + S	13.97 cd	2.11 a	1.40 bc	8.77 c	312.86 c	100.49 de	3.38 ab	25.05 b	7.88 a
NPK + M1	25.23 b	2.32 a	1.66 ab	10.19 ab	406.10 ab	140.65 bc	3.14 abc	34.69 a	7.34 b
NPK + M1 (R)	17.76 c	2.23 a	1.60 ab	9.27 bc	371.27 b	122.15 cd	3.21 abc	33.19 a	7.40 b
1.5 (NPK + M1)	33.40 a	2.44 a	1.84 a	11.03 a	457.21 a	182.07 a	2.67 c	37.94 a	7.26 b

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significantly different among treatments at the 5% level.

碳氮比都很高, 微生物分解需要更多的化肥氮或来自土壤的矿质氮, 微生物活性高, 所以 MBC/MBN 较低, 这与前人的研究结果一致<sup>[14-15]</sup>。

## 2.2 长期定位施肥处理土壤肥力指标及其与产量的相关性

对玉米整个生育期不同处理土壤肥力指标及其与玉米产量的相关性分析结果 (表 4) 表明, 玉米产量与土壤酶活性 (脲酶、过氧化氢酶、磷酸酶、蔗糖酶), 土壤全量养分 (全氮、全磷、全钾), 速效养分 (水解性氮、有效磷、速效钾), 有机质, 微生物量碳和微生物量氮都表现出显著或极显著的正相关, 与土壤 pH 值表现出负相关趋势。玉米产量与土壤硝态氮、铵态氮没有表现出显著的相关性。土壤生物肥力指标 (酶活性、微生物量碳氮) 与化学肥力指标 (土壤养分、有机质) 之间都表现出极显著的正相关关系 (表 4)。

## 2.3 长期定位施肥不同处理的土壤肥力质量评价

### 2.3.1 影响土壤肥力质量指标的主成分分析

影响土壤肥力的因素很多, 且诸因素间存在一定的交互关系, 致使反映土壤肥力状况的许多指标信息发生交织和重叠。主成分分析是将多个指标转化为少数几个互相无关的综合指标的一种统计分析方法。应用主成分分析方法可在复杂的土壤肥力指标体系中筛选出若干个彼此不相关的综合性指标, 且能反映出原来全部指标所提供的大部分信息<sup>[16]</sup>。本研究选取了影响土壤肥力的化学和生物学指标共 16 项数据进行主成分分析, 以综合评价长期定位施肥不同处理的土壤肥力质量差异, 筛选出效果最佳的培肥措施 (表 5)。

依据提取主成分个数的累积贡献率  $\geq 85\%$  的原则, 本研究提取了 3 个主成分。第 1 主成分对总方差的贡献率为 77.4%, 第 2 主成分对总方差的贡献率是 12.2%, 第 3 主成分对总方差的贡献率是 7.6%。3 个主成分的方差累积贡献率能够反映土壤肥力各指标总方差 97.2% 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。

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, 土壤酶活性、微生物量碳、微生物量氮、土壤全氮、全磷、有效磷、速效钾、硝态氮、土壤有机质等指标有较大的向量值。土壤酶活性、微生物量碳、微生物量氮是反映土壤环境的生物学指标, 是土壤养分转化和循环的动力。土壤全量养分表示土壤养分总储量, 反映土壤养分的供应容量。土壤速效养分反映了土壤养分的供应强度。土壤有机质是反映土壤综合肥力水平的一个重要指标。因此, 第 1 主成分实质上是土壤生境、土壤养分供应容量和供应强度、土壤生化反应强度的综合概括, 可称为土壤保肥、供肥因子和土壤活性因子。

在第 2 主成分上土壤铵态氮有较大的负向量值, 第 3 主成分上土壤 pH 有较大的正向量值。

### 2.3.2 依据主成分和聚类分析评价不同定位施肥处理土壤肥力等级

以不同定位施肥处理的主成分得分作为评价土壤肥力质量的新指标 (表 6), 可以看出不同定位施肥处理土壤肥力质量排序为: 1.5 (NPK + M1) > NPK + M2 > NPK + M1 > NPK + M1 (R) > NPK + S > NPK > CK。以欧氏距离作为衡量不同处理肥力差异的大小, 采用最短距离法对各定位施肥处理进行系统聚类 (图 1)。如果将 7 个处理聚为 4 类, 那么土壤

表 4 玉米产量与不同施肥处理土壤肥力指标的相关性  
Table 4 Correlation of corn yield with soil fertility index under different fertilization treatments

指标 Index	脲酶 Urease	过氧化氢酶 Catalase	磷酸酶 Phosphatase	蔗糖酶 Sucrase	水解氮 Hydrolysable N	全氮 Total N	全磷 Total P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	全钾 Total K <sub>2</sub> O	有机质 OM	有效磷 Olsen-P	速效钾 Available-K	pH	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	MBC	MBN	
过氧化氢酶 Catalase	0.969**																
磷酸酶 Phosphatase	0.956**	0.993**															
蔗糖酶 Sucrase	0.933**	0.951**	0.971**														
水解氮 Hydrolysable N	0.932**	0.953**	0.965**	0.942**													
全氮 Total N	0.965**	0.965**	0.974**	0.938**	0.976**												
全磷 Total P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.940**	0.950**	0.970**	0.967**	0.952**	0.973**											
全钾 Total K <sub>2</sub> O	0.891**	0.912**	0.948**	0.950**	0.952**	0.956**	0.941**										
有机质 OM	0.952**	0.965**	0.981**	0.968**	0.988**	0.988**	0.987**	0.961**									
速效磷 Olsen-P	0.948**	0.984**	0.988**	0.946**	0.967**	0.977**	0.978**	0.919**	0.984**								
速效钾 Available-K	0.943**	0.964**	0.984**	0.972**	0.976**	0.981**	0.964**	0.987**	0.985**	0.963**							
pH	-0.250	-0.371	-0.302	-0.089	-0.206	-0.244	-0.164	-0.070	-0.185	-0.344	-0.174						
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.472	0.371	0.335	0.231	0.409	0.489	0.438	0.256	0.422	0.448	0.312	-0.304					
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.824*	0.762*	0.776*	0.733	0.726	0.854*	0.840*	0.782*	0.795*	0.789*	0.788*	-0.163	0.620				
MBC	0.975**	0.984**	0.992**	0.980**	0.955**	0.978**	0.982**	0.948**	0.983**	0.979**	0.982**	-0.224	0.367	0.820*			
MBN	0.988**	0.971**	0.967**	0.944**	0.954**	0.976**	0.936**	0.938**	0.962**	0.946**	0.974**	-0.224	0.394	0.806*	0.977*		
产量 Yield	0.779*	0.900**	0.905**	0.822*	0.803*	0.824*	0.830*	0.800*	0.826*	0.894**	0.844*	-0.567	0.185	0.645	0.860*	0.795*	

注 (Note): MBC—微生物量碳 Microbial biomass C; MBN—微生物量氮 Microbial biomass N; \*— $P < 0.05$ ; \*\*— $P < 0.01$ .

表 5 影响土壤肥力质量各指标的主成分分析  
Table 5 Principal components influencing each index of soil fertility quality

序号 Number	指标 Index	主成分 1 Component 1	主成分 2 Component 2	主成分 3 Component 3
1	脲酶 Urease	0.265	-0.040	0.028
2	过氧化氢酶 Catalase	0.268	-0.039	-0.184
3	磷酸酶 Phosphatase	0.270	0.029	-0.149
4	蔗糖酶 Invertase	0.262	0.209	-0.062
5	Hydrolysable N	0.265	0.047	-0.028
6	全氮 Total N	0.271	-0.031	0.054
7	全磷 Total P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.268	0.041	0.080
8	有机质 OM	0.270	0.050	0.023
9	有效磷 Olsen-P	0.269	-0.065	-0.090
10	有效钾 Available K	0.269	0.118	-0.050
11	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.119	-0.626	0.586
12	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.228	-0.166	0.388
13	MBC	0.271	0.050	-0.041
14	MBN	0.267	0.030	-0.020
15	pH	-0.067	0.681	0.650
16	全钾 Total K <sub>2</sub> O	0.260	0.202	0.010
特征值 Eigen value		7.7405	1.2331	0.7553
贡献率 Contribution rate (%)		77.405	12.231	7.553
累积贡献率 Cumulative contribution (%)		77.405	89.636	97.189

表 6 影响土壤肥力各指标的主成分得分及综合得分  
Table 6 Score and overall score of principal components influencing each index of soil fertility

处理 Treatment	主成分 1 Component 1	主成分 2 Component 2	主成分 3 Component 3	综合得分 Overall score	等级 Grade
1.5 (NPK + M1)	6.04	-0.42	4.65	4.98	1
NPK + M2	4.35	-0.70	3.42	3.54	2
NPK + M1	2.21	-0.29	1.71	1.80	3
NPK + M1 (R)	1.26	-0.14	1.04	1.04	4
NPK + S	-2.26	2.16	-2.17	-1.65	5
NPK	-3.95	-1.20	-3.53	-3.47	6
CK	-5.79	0.59	-5.12	-4.79	7

肥力质量可以分为 4 等, 1.5 (NPK + M1) 和 CK 处理单独聚为一类, 分别为土壤肥力质量最好 (一等) 和最差 (四等); NPK + M2、NPK + M1、NPK + M1 (R) 三个处理聚为一类, 土壤肥力质量为二等; NPK + S 和 NPK 处理聚为一类, 土壤肥力质量为三等。如果将 7 个处理聚为 3 类, 则 1.5 (NPK + M1)、NPK +

M2、NPK + M1、NPK + M1 (R) 四个处理聚为 1 类, 土壤肥力质量为一等; NPK + S、NPK 处理聚为 1 类, 土壤肥力质量为二等; CK 处理单独聚为一类, 土壤肥力质量最差 (三等)。聚类分析结果表明, 化肥与有机肥配合施用, 无论是玉米-大豆轮作还是玉米长期连作, 都能明显提高土壤肥力质量。



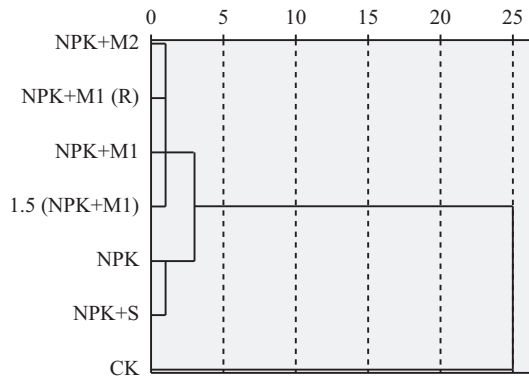


图 1 各处理土壤肥力聚类分析

Fig. 1 Hierarchical cluster analysis of soil fertility of different treatments

秸秆还田配施化肥的培肥效果优于单施化肥, 但没有有机肥化肥配合施用的培肥效果明显。化肥无论是单施还是配合施用有机肥或秸秆还田, 土壤肥力质量明显高于长期不施肥的对照处理。

### 3 讨论

#### 3.1 土壤肥力评价指标分析

关于土壤肥力质量的评价指标, 按土壤性质和功能可以分为化学指标、物理指标和生物学指标<sup>[14-15]</sup>。Schoenholtz 等<sup>[17]</sup>认为化学指标包括土壤有机碳和营养指标两类。土壤有机质是土壤中各种营养元素特别是氮、磷的重要来源, 由于它具有胶体特性, 能吸附较多的阳离子, 因而使土壤具有保肥性、保水性、耕性、缓冲性和良好的通气性。而且, 土壤有机质是土壤微生物必不可少的碳源和能量来源。所以土壤有机质状况是土壤肥力高低的重要化学指标之一。营养指标主要有全氮、铵态氮、硝态氮、全磷、可溶性磷、全钾、速效钾、可交换性钾、钙、镁、硫, CEC、pH 值、EC 等。全氮在一定程度上代表土壤的供氮潜能, 它的消长取决于土壤中氮素的累积和消耗的相对强弱。土壤铵态氮、硝态氮、有效磷、速效钾反映了土壤速效养分状况, 是土壤供肥能力的指标。土壤阳离子交换量 (CEC) 和 pH 值是反映土壤肥力状况的指示性指标, 土壤 pH 是影响 CEC 的重要因素, 不同土壤的 CEC 和 pH 明显地影响土壤有机质、酶和微生物活性等<sup>[1]</sup>。本研究测定了不同定位施肥处理的土壤有机质、全氮、全磷、全钾, 速效氮、磷、钾, 铵态氮、硝态氮等化学指标的差异, 结果表明, 有机无机肥配施效果最好, 秸秆配施化肥次之, 化肥单施

优于空白对照。而李娟等<sup>[15]</sup>研究认为, 连续有机无机肥料配合施用对土壤化学性质也有很大的影响, 主要表现是 NPK 化肥配施猪厩肥的土壤有机质、总氮、总磷等均高于化肥与秸秆配施、化肥单施以及空白对照, 与本研究结果基本一致。

物理指标包括土壤质地、土层厚度、土壤容重、饱和导水率、土壤孔隙度、粘粒含量、土壤团聚体数量、团聚体稳定性和土壤耕性等指标。研究表明, 团聚体结构良好的土壤, 也具有良好的孔隙性、持水性和通透性, 能很好地协调植物对水、肥、气、热的需求, 以保证作物高产<sup>[18]</sup>。土壤微团聚体及其适宜组合是土壤肥力的物质基础<sup>[19]</sup>。土壤团聚体和水稳性团聚体的状况是影响土壤肥力的又一个重要因素, 其在一定程度上影响土壤通气性与抗蚀性<sup>[20]</sup>, 大团聚体比微团聚体含有更多的碳和氮, 其所含的有机质更不稳定, 更富生物体物质和特殊有机质<sup>[21-23]</sup>。土壤容重对土壤物理性质如质地、团聚体、土壤结构、通气状况、持水性和坚实度等影响显著<sup>[1]</sup>。本研究没有测定物理指标, 这有待于进一步研究完善。

土壤生物学指标包括微生物量碳、微生物量氮、潜在可矿化氮、土壤呼吸量、生物量碳/土壤总有机碳、呼吸量/生物量、土壤酶活性、土壤微生物群落组成和多样性、土壤动物等指标<sup>[24-25]</sup>。土壤微生物量与土壤有机质、全氮、有效氮之间呈显著的正相关, 说明土壤微生物活动与土壤有机质和氮素营养有关<sup>[25-26]</sup>, 而土壤微生物量与作物产量也表现出正相关关系, 可以作为土壤肥力的生物指标<sup>[27-28]</sup>。土壤酶是植物、土壤中动物、微生物活动的产物, 是土壤生物化学反应的重要指标之一, 土壤中许多重要的物理、化学和微生物活性都与土壤酶有着密切的相关性<sup>[29]</sup>, 是土壤肥力重要的活性指标。在土壤中主要研究的酶有脲酶、磷酸酶、硝酸还原酶、转化酶、纤维素酶、脱氢酶等。有关脲酶与土壤其他理化性质的相关性研究结果不一致。Sakorn 等<sup>[30]</sup>认为脲酶活性与各种土壤理化性质均不显著相关, 而 Zantua 等<sup>[31]</sup>则认为土壤脲酶与土壤有机质、全氮、全磷等性质均呈显著或极显著相关。土壤磷酸酶与土壤中磷素转化密切相关。Knowles 等<sup>[32]</sup>认为, 在嫌气条件下硝酸还原酶是反硝化过程中一种重要的酶, 催化硝酸盐还原为亚硝酸。转化酶能催化蔗糖水解为葡萄糖。Lenhard<sup>[33]</sup>发现, 脱氢酶活性与氧的消耗以及细菌群的活性密切相关, 但 Spailing<sup>[34]</sup>发现脱氢酶活性与生物量以及其他生物活性没有相关性。本研究测定了土壤主要酶活性 (脲酶、磷酸酶、过氧化

氢酶、蔗糖酶)、微生物量碳、微生物量氮及其与化学指标、玉米产量的相关性,结果表明不同定位施肥处理的生物学指标与化学指标表现出相对一致的变化规律,生物学指标与化学指标以及产量都表现出显著或极显著的相关性。

### 3.2 土壤肥力质量评价方法分析

土壤肥力是土壤各方面性质的综合表现,科学合理地评价土壤肥力可以为平衡施肥、合理利用土地资源、调整作物布局提供数据支持<sup>[35]</sup>。

评价土壤肥力质量的方法有灰色关联法、模糊评判法、聚类分析法等<sup>[36]</sup>。灰色系统理论 (grey system theory) 最早由华中工业大学邓聚龙教授提出,灰色关联法是系统态势的量化比较分析,主要是根据关联序比较评价对象的优劣<sup>[37]</sup>。模糊综合评价法 (fuzzy comprehensive evaluation method) 是一种基于模糊数学的综合评标方法,主要是根据模糊数学的隶属度理论把定性评价转化为定量评价,即用模糊数学对受到多种因素制约的事物或对象做出一个总体的评价。此方法具有结果清晰、系统性强的特点,能较好地解决模糊的、难以量化的问题,适合各种非确定性问题的解决<sup>[38]</sup>。近年来,聚类分析、因子分析、主成分分析常用来进行土壤肥力的综合评价<sup>[38]</sup>。主成分分析方法可以对多个因素进行降维分析,抽取主成分,并赋予不同主成分不同的得分,被广泛用于多项指标体系的综合评价。土壤主成分分析常用于肥力质量的综合评价<sup>[40-41]</sup>。主成分分析,又称主分量分析,是指将原始的多个变量通过线性组合,提炼出较少几个彼此独立的新变量的一种实现降维多元统计分析方法,能够很好地处理变量间的多重相关性,使彼此之间具有相互独立性<sup>[42]</sup>,能够客观评价不同培肥处理的肥力质量差异。本研究采取主成分和聚类分析综合评价了长期定位施肥的土壤肥力质量差异。以欧氏距离作为衡量不同处理肥力差异的大小,采用最短距离法对各定位施肥处理进行系统聚类。结果表明,可以将不同施肥处理的土壤肥力等级聚为 4 类: 1.5 (NPK + M1) 和 CK 单独聚为一类,分别为土壤肥力质量最好(一等)和最差(四等); NPK + M2、NPK + M1、NPK + M1 (R) 三个处理聚为一类,土壤肥力质量为二等; NPK + S 和 NPK 聚为一类,土壤肥力质量为三等。而依据提取主成分个数的方差累积贡献率  $\geq 85\%$  的原则,本研究对 16 项肥力指标提取了 3 个主成分。第 1 主成分对总方差的贡献率为 77.4%,第 2 主成分对总方差的贡献率是

12.2%,第 3 主成分对总方差的贡献率是 7.6%。3 个主成分的方差累积贡献率能够反映土壤肥力各指标总方差 97.2% 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。

## 4 结论

长期定位施肥不同处理的玉米产量与土壤酶活性(脲酶、过氧化氢酶、磷酸酶、蔗糖酶)、土壤全量养分(全氮、全磷、全钾)、速效养分(水解性氮、有效磷、速效钾)、有机质、微生物量碳和微生物量氮都表现出显著或极显著的正相关,与土壤 pH 值表现出负相关趋势。玉米产量与土壤硝态氮、铵态氮没有表现出明显的相关性。土壤生物肥力(酶活性、微生物量碳氮)与化学肥力(土壤养分、有机质)之间都表现出极显著的正相关关系。

在评价不同定位施肥处理的 16 个土壤化学和生物学指标中,土壤有机质、土壤主要酶活性、土壤微生物量和土壤全氮、全磷、全钾、速效氮、有效磷、速效钾等对土壤肥力质量贡献较大,土壤铵态氮次之,土壤 pH 值对土壤肥力质量评价贡献最小。

以不同定位施肥处理的主成分得分为评价标准,土壤肥力质量排序为: 1.5 (NPK + M1) > NPK + M2 > NPK + M1 > NPK + M1 (R) > NPK + S > NPK > CK。即有机肥配合化肥长期施用对于提高土壤肥力质量、改善土壤环境具有重要作用,长期秸秆还田的土壤质量也优于化肥单施,长期不施肥对土壤养分耗竭很大,不利于土壤肥力的稳定与保护。

### 参 考 文 献:

- [1] 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.  
Yang R J, Yang Q F, Niu J Y. Research progress on soil fertility major indexes[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2004, (1): 86-91.
- [2] 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[J]. 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 methods of principal component and cluster analyses[J]. Soils, 2008, 40(6): 971-975.
- [3] 张庆利, 潘贤章, 王洪杰, 等. 中等尺度上土壤肥力质量的空间分布研究及定量评价[J]. 土壤通报, 2003, 34(6): 493-497.  
Zhang Q L, Pan X Z, Wang H J, et al. Study on spatial distribution of soil quality and quantitative evaluation of soil fertility quality under middle spatial scale[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2003, 34(6): 493-497.



- [4] 马强, 宇万太, 赵少华, 等. 黑土农田土壤肥力质量综合评价[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1916–1920.  
Ma Q, Yu W T, Zhao S H, *et al.* Comprehensive evaluation of cultivated black soil fertility[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(10): 1916–1920.
- [5] Andrews S S, Karlen D L, Cambardella C A. The soil management assessment framework. A quantitative soil quality evaluation method[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68: 1945–1962.
- [6] Idowu O J, van Es H M, Abawi G S, *et al.* Farmer-oriented assessment of soil quality using field, laboratory, and VNIR spectroscopy methods[J]. Plant and Soil, 2008, 307(1/2): 243–253.
- [7] 刘世梁, 傅伯杰, 刘国华, 等. 我国土壤质量及其评价研究的进展[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 137–143.  
Liu S L, Fu B J, Liu G H, *et al.* Research review of quantitative evaluation of soil quality in China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(1): 137–143.
- [8] 吴玉红, 田霄鸿, 同延安, 等. 基于主成分分析的土壤肥力综合指数评价[J]. 生态学杂志, 2010, 29(1): 173–180.  
Wu Y H, Tian X H, Tong Y A, *et al.* Assessment of integrated soil fertility index based on principal components analysis[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(1): 173–180.
- [9] 王恒旭, 胡永华, 王文成, 等. 主成分分析在杞县大蒜种植区土壤质量评价中的应用[J]. 中国农学通报, 2006, 22(8): 297–301.  
Wang H X, Hu Y H, Wang W Q, *et al.* Application of principal component analysis method to quality evaluation of soil planted garlic in Qixian[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(8): 297–301.
- [10] Yemefack M, Jetten V G, Rossiter D G. Developing a minimum data set for characterizing soil dynamics in shifting cultivation systems[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 86(1): 84–98.
- [11] 宋日, 吴春胜, 牟金明, 等. 玉米生育期内土壤微生物量碳和酶活性的动态变化研究[J]. 吉林农业大学学报, 2001, 23(2): 13–16.  
Song R, Wu C S, Mo J M, *et al.* Dynamic changes of soil microbial biomass carbon and soil enzyme activities during growth of corn[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2001, 23(2): 13–16.
- [12] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.  
Guan S Y. Soil enzymes and research methods [M]. Beijing: Agriculture Publishing House, 1986.
- [13] 陈安强, 付斌, 鲁耀, 等. 有机物料输入稻田提高土壤微生物碳氮及可溶性有机碳氮[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 160–167.  
Chen A Q, Fu B, Lu Y, *et al.* Exogenous organic materials applied to paddy field improving soil microbial biomass C, N and dissolved organic C, N[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(21): 160–167.
- [14] 汤宏, 沈健林, 张杨珠, 等. 秸秆还田与水分管理对稻田土壤微生物量碳、氮及溶解性有机碳、氮的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 240–246.  
Tang H, Shen J L, Zhang Y Z, *et al.* Effect of rice straw incorporation and water management on soil microbial biomass carbon, nitrogen and dissolved organic carbon in a rice paddy field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(1): 240–246.
- [15] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 144–152.  
Li J, Zhao B Q, Li X Y, *et al.* Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on soil microbiological properties and soil fertility[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(1): 144–152.
- [16] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区土壤质量评价指标研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1843–1848.  
Xu M X, Liu G B, Zhao Y G. Assessment indicators of soil quality in hilly Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(10): 1843–1848.
- [17] 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: 335–356.
- [18] 史吉平, 张夫道, 林葆. 长期定位施肥对土壤腐殖质理化性质的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 35(2): 174–180.  
Shi J P, Zhang F D, Lin B. Effects of long-term located fertilization on the physic-chemical property of soil humus[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(2): 174–180.
- [19] 陈恩凤, 关连珠, 汪景宽, 等. 土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价[J]. 土壤学报, 2001, 38(1): 49–53.  
Chen E F, Guan L Z, Wang J K, *et al.* Compositional proportion of soil characteristic micro aggregates and soil fertility evaluation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(1): 49–53.
- [20] 吴承桢, 洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究[J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 162–167.  
Wu C Z, Hong W. Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns[J]. Acta Pedologica Sinica, 1999, 36(2): 162–167.
- [21] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3): 627–633.
- [22] Puget P, Angers D A, Chenu C. Nature of carbohydrates associated with water stable aggregates of two cultivated soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(1): 55–63.
- [23] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic matter across a grassland cultivation sequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56: 776–783.
- [24] 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.  
Zhang X Y, Chen L D. The progress and prospect of soil quality indicators and evaluation methods[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 12(3): 30–34.
- [25] 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 and Environment, 2001, 87: 209–214.
- [26] 张成娥, 陈小丽, 郑粉莉. 子午岭林区不同环境土壤微生物量与肥力关系研究[J]. 生态学报, 1998, 18(2): 218–222.  
Zhang C E, Chen X L, Zheng F L. Study on relationship between soil microbial biomass and fertility in different environments of Ziwuling Forrest area[J]. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18(2): 218–222.
- [27] Insam H, Mitchell C C, Dormaar J F. Relationship of soil microbial

- biomass and activity with fertilization practice and crop yield of three Ultisols[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, 23: 459–464.
- [28] He Z L, Yao H Y, Chen G C. Relationship of crop yield to microbial biomass in highly-weathered soils of China[A]. Ando T, *et al.* Plant nutrition for sustainable food production and environment [M]. Tokyo, Japan: Kluwer Academic Publishers, 1997. 751–752.
- [29] 王书锦, 胡江春, 张宪武. 新世纪中国土壤微生物学的展望[J]. *微生物学杂志*, 2002, 22(1): 36–39.  
Wang S J, Hu J C, Zhang X W. Prospect of Chinese soil microbiology in the new century[J]. *Journal of Microbiology*, 2002, 22(1): 36–39.
- [30] Sakorn P P. Urease activity and fertility status of some lowland rice soils in the central plain[J]. *Thai Journal of Agricultural Science*, 1987, 20(3): 173–186.
- [31] Zantua M I, Bremner J M. Preservation of soil samples for assay of urease activity[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1975, 7: 297–299.
- [32] Knowles R. Denitrification[J]. *Microbiological Reviews*, 1982, 46(1): 43–70.
- [33] Lenhard G. A standardized procedure for the determination of dehydrogenase activity in samples from anaerobic treatment systems[J]. *Water Research*, 1968, 2(2): 161–167.
- [34] Sparling G P. Ratio of microbial biomass C to soil organic C as a sensitive indicator of changes in soil organic matter[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1992, 30(2): 195–207.
- [35] 王小艳, 冯跃华, 李云, 等. 基于主成分和聚类分析的村域稻田土壤肥力评价[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(33): 46–50.  
Wang X Y, Feng Y H, Li Y, *et al.* Evaluation on rice soil fertility based on principal component analysis and cluster analysis at village-scale[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(33): 46–50.
- [36] 刘少春, 张跃彬, 郭家文, 等. 基于养分丰缺分级的蔗田土壤肥力主成分综合分析[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(3): 611–617.  
Liu S C, Zhang Y B, Guo J W, *et al.* Comprehensive analysis of main components of soil fertility of sugarcane field based on soil nutrient grades[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(3): 611–617.
- [37] 李月芬, 汤洁, 林年丰, 杨有德. 灰色关联度法在草原土壤质量评价中的应用[J]. *吉林农业大学学报*, 2003, 25(5): 551–556.  
Li Y F, Tang J, Lin N F, Yang Y D. Application of grey system theory in evaluating grassland soil quality[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2003, 25(5): 551–556.
- [38] 欧阳纯烈, 何云晓. 基于模糊综合评判法的四川绵阳土壤肥力质量评价[J]. *贵州农业科学*, 2013, 41(9): 101–103.  
Ouyang C L, He Y X. Evaluation of soil fertility by a fuzzy comprehensive method in Mianyang, Sichuan[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2013, 41(9): 101–103.
- [39] 吕晓男, 陆允甫, 王人潮. 土壤肥力综合评价初步研究[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 1999, 25(4): 378–382.  
Lü X N, Lu Y F, Wang R C. Preliminary studies on the integrated evaluation of soil nutrient fertility[J]. *Journal of Zhejiang University (Agricultural & Life Science Edition)*, 1999, 25(4): 378–382.
- [40] 许仙菊, 马洪波, 陈杰, 等. 基于养分丰缺诊断和主成分分析相结合的桑园土壤肥力评价[J]. *土壤*, 2013, 45(3): 470–476.  
Xu X J, Ma H B, Chen J, *et al.* Assessment of soil fertility of mulberry orchards based on combined soil nutrient grades and main component analysis[J]. *Soils*, 2013, 45(3): 470–476.
- [41] 陈吉, 赵柄梓, 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[J]. *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[J]. *Soils*, 2010, 42(3): 415–420.
- [42] 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[J]. *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[J]. *Journal of Henan Agricultural Science*, 2011, 40(4): 82–86.