

长期施肥下黑土肥力特征及综合评价

郝小雨^{1,2}, 周宝库¹, 马星竹¹, 高中超¹

(1. 黑龙江省农业科学院 土壤肥料与环境资源研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086; 2. 黑龙江省农业科学院 博士后科研工作站, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要:为探索黑土区耕地质量稳定提升、作物持续稳产高产的有效施肥模式, 利用始于 1979 年的定位试验, 研究了长期不同施肥措施对黑土物理性质(1 项)、化学性质(8 项)和生物肥力指标(4 项)的影响, 并运用主成分分析和聚类分析对其进行了综合评价。结果表明:长期施肥增加土壤养分含量, 有机无机肥配施降低土壤容重。长期单施化肥导致土壤酸化, 有机无机肥配施减缓土壤酸化。运用主成分分析对 13 个土壤肥力指标降维, 提取到 3 个主成分, 涵盖了原始数据信息总量的 89.6%。系统聚类得到不同施肥措施的培肥效果为 $N_2P_2M_2 > NPKM$ 、 $NPM > M_2$ 、 $M > NPK$ 、 $N_2P_2 > NP$ 、 CK , 有机肥与化肥配施为黑土最佳的培肥模式。综合评价培肥土壤、作物产量和环境效应, 推荐常量化肥和有机肥配施(MNPK)为黑土最佳培肥模式。

关键词:长期施肥; 土壤肥力; 主成分分析; 聚类分析

中图分类号: S158 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-2767(2015)11-0023-08 DOI:10.11942/j.issn1002-2767.2015.11.0023

土壤肥力体现了土壤物理、化学和生物学的综合性状, 是土壤作为自然资源和农业生产的物质基础^[1]。单项肥力指标不能全面表征土壤肥力水平, 更不能据此来拟定调节和提高土壤肥力的综合措施, 这就要求在评价土壤肥力时不能限于单项肥力因素, 而需要有评价土壤肥力的综合性指标^[2]。正确地评价土壤肥力对构建合理科学的施肥制度具有重要的科学意义, 但迄今土壤肥力评价尚无统一标准, 主要原因是由于土壤肥力水平差异较大, 不仅体现在空间尺度上, 而且在时间尺度上也有变化, 因此数量化分级指标, 在不同区域之间、不同时期之间很难比较^[3]。近年来, 研究者倾向于将主成分分析-聚类分析方法应用于土壤肥力综合评价中, 即以标准化和定量化形式表现土壤理化性状的综合指标, 应用主成分分析法将多个指标化为少数几个指标, 再根据各主成分得分作为评价新指标进行聚类分析^[4-6]。这一方法不仅减少了计算量, 降低了主观随意性, 又同时具备变量间的多重相关性和相互独立性, 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度^[5,7]。

黑土具有质地疏松、肥力高、供肥能力强的特点, 是我国重要的商品粮基地^[8]。随着黑土开垦年限的增加以及不合理的管理方式, 土壤肥力水平迅速降低, 黑土层厚度变薄, 甚至在少数地区出现了黄土母质裸露的现象, 黑土呈现退化趋势, 严重影响了黑土的生产能力^[9]。为保护黑土, 提高黑土区耕地地力, 有必要对不同施肥措施下黑土肥力状况有一个客观的认识, 并进行综合评价。本研究借助 1979 年开始的黑土长期定位试验, 监测不同施肥措施下土壤肥力特征, 并对 13 种土壤物理、化学和生物学指标进行主成分分析-聚类分析, 利用统计学方法评价不同施肥措施的培肥效果, 以探索黑土区耕地质量稳定提升、作物持续稳产高产的有效施肥模式, 为促进区域粮食可持续生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于黑龙江省哈尔滨市黑龙江省农业科学院试验基地 ($N45^{\circ}40'$, $E126^{\circ}35'$), 海拔 151 m, 属松花江二级阶地, 地处中温带, 一年一熟制, 冬季寒冷干燥, 夏季高温多雨, 平均有效积温 $2\ 700^{\circ}C$, 年均日照时数 $2\ 600\sim2\ 800\ h$, 无霜期约 135 d。试验地为旱地黑土, 成土母质为洪积黄土状粘土。长期试验于 1979 年设置, 1980 年开始按小麦-大豆-玉米顺序轮作, 每年一季。在

收稿日期: 2015-08-05

基金项目:农业部公益性行业专项资助项目(201203030, 201303126); 国家科技支撑计划资助项目(2013BAD07B01, 2013BAD11B03); 黑龙江省农业科学院引进博士人员科研启动金联合资助项目(201507-23)

第一作者简介: 郝小雨(1981-), 男, 河北省张家口市人, 博士, 助理研究员, 从事农田养分循环研究。E-mail: xiaoyu-hao1981@sina.com。

通讯作者: 周宝库(1963-), 男, 黑龙江省延寿县人, 研究员, 从事土壤肥料研究。E-mail: zhoubaoqu@aliyun.com。

耕作上采取浅翻深松、旋耕深松相结合的典型耕作制度。初始耕层(0~20 cm)土壤基本性质为:有机碳 15.5 g·kg⁻¹,全氮 1.47 g·kg⁻¹,全磷(P₂O₅)1.07 g·kg⁻¹,全钾 25.16 g·kg⁻¹,碱解氮

151 mg·kg⁻¹,有效磷 51 mg·kg⁻¹,速效钾 200 mg·kg⁻¹,pH7.2。1979-2010 年试验地作物生育期(5-9 月)平均气温和累计降雨量见图 1。

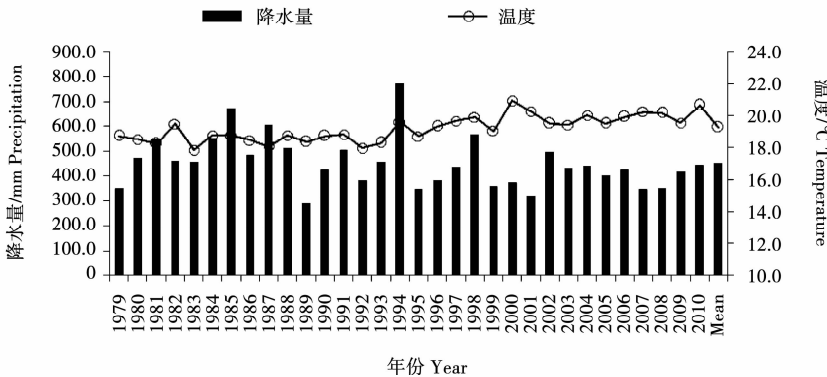


图 1 试验地作物生育期日平均气温和累计降雨量
Fig.1 Mean daily temperature and accumulated precipitation for the growth period from 1979 to 2010 at the long-term experiment site in Harbin

1.2 材料

供试作物为小麦、大豆、玉米;供试肥料为有机肥马粪、尿素(N 46%)、重过磷酸钙(P₂O₅ 46%)、磷酸二铵(N 18%, P₂O₅ 46 %)和硫酸钾(K₂O 50%)。

1.3 方法

1.3.1 试验设计 试验共设 24 个处理,本研究

选取其中的 9 个处理,试验设计和各处理施肥量详见表 1。小区面积 168 m²,无重复。有机肥为纯马粪(养分含量和含水量在施肥前测定),每轮作周期施肥 1 次,于玉米收获后秋施,按纯氮量 75 kg·hm⁻²(约马粪 18 600 kg·hm⁻²)。氮、磷、钾肥均为秋季一次性施入(玉米季氮肥 50%秋施,50%于大喇叭口期追施),撒施后覆土旋耕。

表 1 长期定位试验处理及施肥量

Table 1 The treatment and fertilizer application rate in the long-term experiment

处理 Treatments	N/(kg·hm ⁻²)			P ₂ O ₅ /(kg·hm ⁻²)			K ₂ O/ (kg·hm ⁻²)	有机肥/ (kg·hm ⁻²) Horse manure
	小麦 Wheat	大豆 Soybean	玉米 Maize	小麦 Wheat	大豆 Soybean	玉米 Maize		
CK	0	0	0	0	0	0	0	0
NP	150	75	150	75	150	75	0	0
NPK	150	75	150	75	150	75	75	0
M	0	0	0	0	0	0	0	18600
MNP	150	75	150	75	150	75	0	18600
MNPK	150	75	150	75	150	75	75	18600
N ₂ P ₂	300	150	300	150	300	150	0	0
M ₂	0	0	0	0	0	0	0	37200
M ₂ N ₂ P ₂	300	150	300	150	300	150	0	37200

CK 表示不施肥;N、P、K、M(常量)分别表示施氮肥、磷肥、钾肥、有机肥;N₂、P₂、M₂分别表示施肥量为常量的 2 倍。
CK means no fertilizer, N, P, K and M mean nitrogen, phosphorus, potassium and manure fertilizer for convention, N₂, P₂ and M₂ mean 200% fertilizer application rate of convention.

1.3.2 测定项目及方法 土壤样品于 2010 年秋季收获后采集,每个小区采集耕层土样(0~

20 cm),按“S”形取 5 个点组成一个混合样品。样品分为 2 份,一份作为鲜样 4℃ 保存用于微生

物生物量碳氮、可溶性碳氮等的测定,另一份风干用于土壤有机质、全氮等的测定。

采用常规农化分析方法测定有机质(OM)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、碱解氮(AN)、有效磷(AP)和速效钾(AK)^[10]。土壤容重(BD)的测定采用环刀法。土壤可溶性碳(DOC)、氮(DON)和微生物生物量碳(MBC)、氮(MBN)的测定参见文献[11]。

1.3.3 数据处理与分析 试验数据经 Excel 2007 软件整理后,应用 SPSS13.0 软件进行多重比较、相关性分析、因子分析、聚类分析。无重复试验的多重比较方法参见文献[12]。利用 MATLAB 7.0 软件制作三维散点图。SPSS13.0 软件数据分析过程:①描述统计模块(Descriptive statistics)进行数据的标准化。本研究中各土壤肥力指标具有不同的含义,而且数量级和量纲差异很大,为保证评价结果的客观性和科学性,需将原始数据转换成标准正态评分值(标准化处理),继而以变量的形式进行相关性和主成分分析。②Correlate-Bivariate 分析指标间相关性。③对标准化后的指标进行主成分分析(Data Reduction-Factor),提取累积贡献率>85%的主成分。根据统计学原理,当各主成分的累积方差贡献率大于85%时,即可用来反映系统的变异信息^[13]。④将提取到的主成分作为新指标,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聚类分析(Classify-Hierarchical Cluster)。

表 2 长期不同施肥措施对黑土肥力的影响

Table 2 Effect of long-term fertilization on soil fertility in black soil

处理 Treatments	OM/ (g·kg ⁻¹)	TN/ (g·kg ⁻¹)	TP/ (g·kg ⁻¹)	TK/ (g·kg ⁻¹)	AN/ (mg·kg ⁻¹)	AP/ (mg·kg ⁻¹)	AK/ (mg·kg ⁻¹)	pH	BD/ (g·cm ⁻³)	DOC/ (mg·kg ⁻¹)	DON/ (mg·kg ⁻¹)	MBC/ (mg·kg ⁻¹)	MBN/ (mg·kg ⁻¹)
CK	22.3	1.2	0.7	24.0	54.1	15.3	175.3	6.9	1.48	40.4	12.2	172.8	12.5
NP	24.5	1.4	1.4	22.3	69.1	133.1	167.0	5.9	1.45	42.6	14.5	197.7	15.2
NPK	23.5	1.3	1.4	27.5	72.2	154.3	202.9	6.0	1.53	43.4	14.6	202.3	16.4
M	25.0	1.4	1.0	27.8	77.0	29.8	201.9	7.0	1.48	79.9	20.7	254.7	32.1
MNP	27.7	1.6	1.5	25.8	75.3	178.3	195.5	6.0	1.43	84.9	22.8	272.6	39.8
MNPK	26.0	1.5	1.6	27.3	81.9	197.3	240.8	6.1	1.35	81.6	24.9	290.1	41.9
N ₂ P ₂	23.6	1.4	1.8	26.7	95.6	286.1	154.1	4.9	1.58	58.5	16.8	204.4	14.3
M ₂	25.3	1.4	1.0	26.8	202.0	53.8	222.2	7.2	1.49	91.3	22.9	270.5	37.1
M ₂ N ₂ P ₂	28.8	1.8	2.1	27.1	92.1	341.3	229.3	5.4	1.21	103.7	27.6	316.4	38.7

2.2 土壤肥力指标的相关性分析

表 3 为土壤肥力指标的相关系数矩阵,可以

2 结果与分析

2.1 长期不同施肥措施对黑土肥力指标的影响

由表 2 可知,连续施肥 31 a 后,不同施肥方式土壤容重(BD)发生了明显的变化。与不施肥处理(CK)相比,长期施用化肥及单施有机肥土壤容重变化均不明显,而有机无机肥配施处理土壤容重有所降低,其中 MNP、MNPK 和 M₂N₂P₂ 和 NP 处理土壤容重分别降低 3.4%、8.8%、18.2% 和 2.0%。

与不施肥处理(CK)相比,长期施肥可增加土壤有机质含量(OM),增加幅度在 5.4%~29.1%,其中施化肥处理土壤有机质含量稍有提高,可能是化肥的施入提高了作物产量,凋落物和根茬还田量的增加提升了土壤有机质含量。施用有机肥处理的土壤有机质含量均高于施化肥处理,说明施用有机肥是提高黑土中有机质的有效手段。土壤全量和速效态养分在长期施肥条件下表现出正效应,即施肥可以提高土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾的含量。长期单施化肥导致土壤酸化,单施有机肥土壤 pH 略有增加,有机无机肥配施可减缓土壤酸化的速度。长期施肥可明显提高可溶性碳(DOC)、氮(DON)和土壤微生物生物量碳(MBC)、氮(MBN)含量,提高幅度分别在 5.5%~156.7%、18.9%~126.2%、14.4%~83.1%和 14.4%~235.2%,其中以有机无机配施处理最为显著,说明有机肥的施入尤其是有有机无机配施能够增强土壤有机碳、氮活性,有利于提升土壤肥力和养分供应能力。

看出,OM 与 TN、DOC、DON、MBC、MBN 呈显著正相关,与 BD 呈显著负相关;TN 与 TP、

DOC、DON、MBC、MBN 呈显著正相关,与 BD 呈显著负相关;TP 与 AP 呈显著正相关,与 pH 呈显著负相关;AP 与 pH 呈显著负相关;AK 与 DOC、DON、MBC、MBN 呈显著正相关;BD 与 DON、MBC 呈显著负相关;DOC 与 DON、MBC、MBN 呈显著正相关;DON 与 MBC 呈显著正相关;MBC 与 MBN 呈显著正相关。其它土壤肥力指标间的相关性或正或负,但都不显著。上述分

析表明,黑土土壤肥力指标间存在一定相关性,但是也增加了土壤肥力质量分析的复杂性,需进一步明确指标之间的相关关系以及各指标对土壤肥力的贡献。由表 3 还可看出,相关矩阵的绝大部分相关系数都大于 0.3,原始数据之间的相关关系较强,适合进行因子分析^[14]。为了简化上述分析过程,应用因子分析和主成分分析过程(Data Reduction)进行黑土肥力水平进行综合评价。

表 3 土壤肥力指标的相关系数矩阵

Table 3 Correlation coefficient matrix of the soil properties

	OM	TN	TP	TK	AN	AP	AK	pH	BD	DOC	DON	MBC	MBN
OM	1.000	0.963**	0.610	0.294	0.165	0.534	0.603	-0.245	-0.812**	0.856**	0.895**	0.909**	0.838**
TN		1.000	0.697*	0.232	0.162	0.636	0.435	-0.379	-0.796*	0.816**	0.832**	0.831**	0.702*
TP			1.000	0.268	-0.084	0.980**	0.155	-0.892**	-0.535	0.381	0.497	0.475	0.261
TK				1.000	0.291	0.244	0.587	-0.030	-0.090	0.565	0.556	0.550	0.507
AN					1.000	-0.097	0.349	0.316	0.057	0.493	0.395	0.365	0.379
AP						1.000	0.105	-0.920**	-0.511	0.327	0.436	0.404	0.184
AK							1.000	0.249	-0.618	0.714*	0.784*	0.818**	0.826**
pH								1.000	0.237	0.028	-0.085	-0.049	0.156
BD									1.000	-0.603	-0.686*	-0.717*	-0.579
DOC										1.000	0.971**	0.960**	0.921**
DON											1.000	0.995**	0.945**
MBC												1.000	0.955**
MBN													1.000

* 表示 5%显著水平($P<0.05$), ** 表示 1%显著水平($P<0.01$).
* indicates significant difference ($P<0.05$), ** indicates extremely significant difference ($P<0.01$).

2.3 土壤肥力指标的主成分分析

将标准化后的数据进行主成分分析,提取综合指标,即特征值和特征向量。特征值在某种程度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^[5]。碎石图有助于确定最优的主成分数目,本研究中前 3 个主成分的特征值 >1 (见图 2),即前 3 个主成分对解释变量的贡献最大,因此将前 3 个主成分作为最优主成分,其特征值分别为 7.577、2.959 和 1.113(见表 4),方差贡献率分别为 58.281%、22.759% 和 8.558%,累计贡献率达到了 89.598%,且大于 85%,说明这 3 个主成分涵盖了原始数据信息总量的 89.598%,因此因子分析的适用性和可靠性较好。

原始变量与 3 个主成分的相关系数可用

载荷

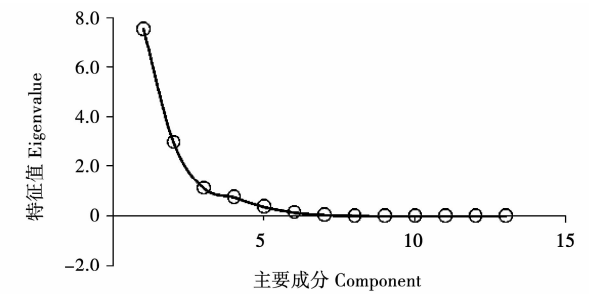


图 2 主成分分析碎石图

Fig. 2 Screen plot of principal component analysis

值表征,载荷值绝对值越大的变量,与主成分关系越近,即可认为是该主成分的主要影响因子。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,旋转后的因子载荷散点图如图 3,第一主成分以 OM、TN、AK、BD、DOC、DON、MBC 和 MBN 为主要影响因子,第二主成分以

TP、AP、pH 为主要影响因子,第三主成分以 TK、AN 为主要影响因子。

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 loadingfatcors		
	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	7.577	58.281	58.281	7.577	58.281	58.281
2	2.959	22.759	81.040	2.959	22.759	81.040
3	1.113	8.558	89.598	1.113	8.558	89.598

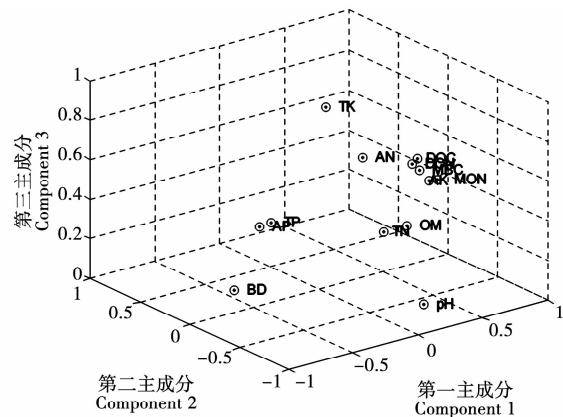


图 3 旋转后因子载荷分布

Fig. 3 Loading distribution of the rotated factors

用载荷值(见表 5)除以主成分相对应的特征值(见表 4)开平方根^[13],即 $A_i = Y_i / \sqrt{\lambda_i}$,便得到 3 个主成分中每个指标所对应的系数即特征向量 A1、A2 和 A3(见表 6)。

2.4 计算主成分得分、综合得分并排列肥力等级

主成分是原各指标的线性组合,各指标的权数为特征向量,它表示各单项指标对于主成分的重要程度并决定了该主成分的实际意义,因此可建立 3 个主成分与 14 个土壤肥力指标的线性数学模型如式(1)~(3)。

$$F1 = 0.343OM + 0.327TN + 0.230TP + 0.191TK + 0.112AN + 0.209AP + 0.272AK - 0.086pH - 0.282BD + 0.338DOC + 0.355DON + 0.355MBC + 0.321MBN \tag{1}$$

表 5 土壤肥力指标初始因子载荷矩阵

Table 5 Component matrix of soil properties

主成分 Principal component	土壤肥力指标 Soil properties												
	OM	TN	TP	TK	AN	AP	AK	pH	BD	DOC	DON	MBC	MBN
1	0.943	0.901	0.632	0.526	0.308	0.574	0.748	-0.235	-0.777	0.930	0.977	0.978	0.885
2	-0.084	-0.237	-0.739	0.233	0.529	-0.775	0.455	0.942	0.184	0.272	0.168	0.190	0.385
3	-0.245	-0.206	0.196	0.673	0.423	0.222	-0.004	-0.224	0.481	0.059	0.032	-0.019	-0.069

表 6 基于主成分分析的土壤肥力指标特征向量

Table 6 Eigenvector of the principal component analysis

特征向量	土壤肥力指标 Soil properties												
Eigenvector	OM	TN	TP	TK	AN	AP	AK	pH	BD	DOC	DON	MBC	MBN
A1	0.343	0.327	0.230	0.191	0.112	0.209	0.272	−0.086	−0.282	0.338	0.355	0.355	0.321
A2	−0.049	−0.138	−0.430	0.136	0.308	−0.450	0.265	0.547	0.107	0.158	0.098	0.111	0.224
A3	−0.232	−0.195	0.185	0.638	0.401	0.211	−0.004	−0.213	0.456	0.056	0.030	−0.018	−0.066

$$F2 = -0.049OM - 0.138TN - 0.430TP + 0.136TK + 0.308AN - 0.450AP + 0.265AK + 0.547pH + 0.107BD + 0.158DOC + 0.098DON + 0.111MBC + 0.224MBN \tag{2}$$

$$F3 = -0.232OM - 0.195TN + 0.185TP + 0.638TK + 0.401AN + 0.211AP - 0.004AK - 0.213pH + 0.456BD + 0.056DOC + 0.030DON - 0.018MBC - 0.066MBN \tag{3}$$

将标准化的数据分别带入式(1)~(3)中,可得到 9 个不同施肥处理在第一主成分、第二主成分的得分,再计算每个主成分得分与其对应贡献率之乘积的总和,即 $F = F1 \times 75.629\% + F2 \times 16.333 + F3 \times 8.038$ (见表 7)。可以看出,各施肥处理土壤肥力依次为 $M_2 N_2 P_2 > MNPK$ 、 M_2 、 $MNP > M > NPK$ 、 $N_2 P_2$ 、 $NP > CK$,即二倍量化肥配施有机肥处理土壤肥力最高,氮磷钾配施有机肥、二倍量有机肥和氮磷配施有机肥次之,单施有机肥处理为中等肥力水平,氮磷钾配施、二倍量氮磷配施和氮磷配施处理肥力中等偏下,不施肥土壤肥力水平最低。

表 7 不同施肥处理土壤肥力的各主成分、综合得分及排序

Table 7 Composite scores and ranking of various principal components of soil fertility of different fertilization treatments

处理 Treatments	F1	F2	F3	综合得分 Composite scores	排名 Ranking
CK	-4.11	0.72	-1.05	-2.32	9
NP	-2.28	-1.37	-1.41	-1.76	8
NPK	-1.86	-0.46	0.93	-1.11	6
M	-0.13	1.78	0.08	0.34	5
MNP	1.77	-0.27	-0.71	0.91	4
MNPK	2.16	0.46	0.15	1.38	2
N ₂ P ₂	-1.41	-2.40	1.85	-1.21	7
M ₂	0.94	3.08	0.77	1.31	3
M ₂ N ₂ P ₂	4.93	-1.53	-0.61	2.47	1

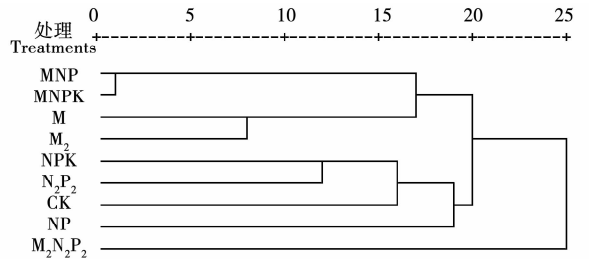


图 4 聚类树形图
Fig. 4 Arborecence of cluster analysis

2.5 土壤肥力等级的聚类分析验证

以平方欧氏距离衡量各处理肥力差异大小,采用最短距离法对各处理进行系统聚类。根据聚类树形图(见图 4),可将 9 个处理的土壤肥力水平分为 5 个等级:一等($M_2 N_2 P_2$),肥力最高;二

等($MNPK$ 、 MNP),肥力中等偏上;三等(M_2 、 M),肥力中等;四等(NPK 、 $N_2 P_2$),中等肥力偏下;五等(NP 、 CK),肥力程度最低。结果表明,聚类分析与主成分分析结论基本一致。

3 讨论

国内外长期试验证明,长期施用化肥在维持或增加土壤肥力方面都表现出一定的局限性和不可持续性,如单施化肥会对土壤物理、化学和生物多样性产生不利影响,导致农田养分不平衡和土壤退化^[15-17]。此外,单施有机肥时存在肥效慢、养分含量低、施用量大费劳力及增产效果差等缺点^[18],若结合适当比例的有机肥和化肥,则既有利于发挥有机肥养分齐全、肥效持久的优势,又能发挥出化肥肥效快、养分集中的优点,从而达到培肥地力和提高作物产量的目的^[19-20]。此外,有机无机肥配施也有利于土壤物理环境的改善,使土体疏松,孔隙分布合理,通透性好,可有效改善土壤质地和结构状况^[21]。从本研究的结果来看,有机无机肥配施可以降低土壤容重,增加土壤有机质和矿质态养分含量,并能提高土壤有机碳、氮活性,可有效减缓土壤酸化的速度。然而,不同有机无机肥配施处理之间土壤肥力水平不尽一致,如何筛选最佳的施肥模式,还需借助其它方法进一步分析。采用主成分分析法和聚类分析方法,以量化形式表现土壤理化性状的综合指标,可以大大减少单个指标所反映出的理化特性带来的差异性^[22]。本研究运用主成分分析长期不同施肥措施下土壤肥力并计算综合得分,采用最短距离法对不同施肥措施进行系统聚类,结果验证了有机肥与化肥配施为黑土最佳的培肥模式^[23-24]。其中, $M_2 N_2 P_2$ 处理均表现为肥力水平最高,这是否意味着将该种模式推荐到生产中,然而,还需结合作物的产量和环境效应来综合判断不同施肥模式的实际应用效果。图 5 为 1980-2010 年各处理小麦、大豆和玉米的平均产量, $M_2 N_2 P_2$ 与 $MNPK$ 、 MNP 处理间作物产量差异不显著($P > 0.05$),因此,从肥料成本、产量效应和环境效应方面来看,单纯的通过增加肥料施用量不是增产增效的根本途径,而且过量施肥增产效果和持续性较差,会造成养分大量残留在土壤中,增加径流、渗漏、氨挥发、 N_2O 排放等损失的风险^[25-26]。综上,基于培肥土壤、作物产量和环境效应,推荐常量化肥和有机肥配施($MNPK$)为黑土最佳培肥模式。

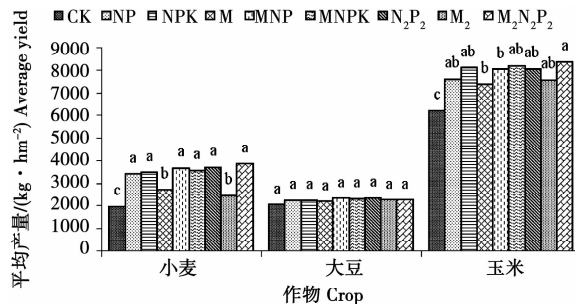


图5 长期施肥条件下作物平均产量

Fig. 5 Grain average yield under long-term fertilization

4 结论

4.1 有机无机肥配施

可降低土壤容重,较不施肥处理降低3.4%~18.2%。长期施肥可增加土壤有机质含量,增加幅度5.4%~29.1%。施用有机肥处理的土壤有机质含量均高于施化肥处理。施肥可以提高土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾的含量。长期单施化肥导致土壤酸化,单施有机肥土壤pH略有增加,有机无机肥配施可减缓土壤酸化的速度。长期施肥可明显提高可溶性碳、氮和土壤微生物生物量碳、氮含量,其中以有机无机配施处理最为显著。

4.2 运用主成分分析

对13个土壤肥力指标降维,提取到3个主成分,涵盖了原始数据信息总量的89.598%,其中第一主成分以OM、TN、AK、BD、DOC、DON、MBC和MBN为主要影响因子,第二主成分以TP、AP、pH为主要影响因子,第三主成分以TK、AN为主要影响因子。通过系统聚类,不同施肥措施的培肥效果为N₂P₂M₂>NPKM、NPM>M₂、M>NPK、N₂P₂>NP、CK,说明有机肥与化肥配施为黑土最佳的培肥模式。

4.3 综合评价

培肥土壤、作物产量和环境效应,推荐常量化肥和有机肥配施(MNPK)为黑土最佳培肥模式。

参考文献:

- [1] Mäder P, Fließbach A, Dubois D, et al. Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science*, 2002, 296: 1694-1697.
- [2] 于寒青,徐明岗,吕家珑,等.长期施肥下红壤地区土壤熟化肥力评价[J].应用生态学报,2010,21(7): 1772-1778.
- [3] 郑立臣,宇万太,马强,等.农田土壤肥力综合评价研究进展[J].生态学报,2004,23(5): 156-161.
- [4] Wander M M, Bollero G A. Soil quality assessment of tillage impacts in illinois[J]. *Soil Science Society America Journal*, 1999, 63: 961-971.

- [5] 陈欢,曹承富,张存岭,等.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[J].土壤学报,2014,51(3): 609-617.
- [6] 温延臣,李燕青,袁亮,等.长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J].农业工程学报,2015,31(7): 91-99.
- [7] 公丽艳,孟宪军,刘乃侨,等.基于主成分与聚类分析的苹果加工品质评价[J].农业工程学报,2014,30(13): 276-285.
- [8] 魏丹,杨谦,迟凤琴.东北黑土区土壤资源现状与存在问题[J].黑龙江农业科学,2006(6): 69-72.
- [9] 韩晓增,王凤仙,王凤菊,等.长期施用有机肥对黑土肥力及作物产量的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(1): 66-71.
- [10] 鲍士旦.土壤农业化学分析[M].北京:中国农业出版社,2005.
- [11] 骆坤,胡荣桂,张文菊,等.黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应[J].环境科学,2013,34(2): 676-684.
- [12] Zhang H M, Yang X Y, He X H, et al. Effect of Long-term potassium fertilization on crop yield and potassium efficiency and balance under wheat-maize rotation in China[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(2): 154-163.
- [13] 孙德山.主成分分析与因子分析关系探讨及软件实现[J].统计与决策,2008(13): 153-155.
- [14] 傅德印.因子分析统计检验体系的探讨[J].统计研究,2007,24(6): 86-90.
- [15] 周杨明,于秀波,鄯帮有.1949-2005年江西省农田养分平衡动态的宏观分析[J].江西农业大学学报,2008,30(5): 919-926.
- [16] Yaduvanshi N P S. Effect of five years of rice-wheat cropping and NPK fertilizer use with and without organic and green manures on soil properties and crop yields in a reclaimed sodic soil[J]. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 2001, 49: 714-719.
- [17] Wei D, Yang Q, Zhang J Z, et al. Bacterial community structure and diversity in a black soil as affected by long-term fertilization[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(5): 582-592.
- [18] 高菊生,黄晶,董春华,等.长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响[J].土壤学报,2014,51(2): 314-324.
- [19] Zhang W J, Xu M G, Wang B R, et al. Soil organic carbon, total nitrogen and grain yields under long-term fertilizations in the upland red soil of southern China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 84: 59-69.
- [20] 徐明岗,李冬初,李菊梅,等.化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J].中国农业科学,2008,41(10): 3133-3139.
- [21] Herencia J F, Garcia-Galavis P A, Maqueda C. Long-term effect of organic and mineral fertilization on soil physical properties under greenhouse and outdoor management practices[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(4): 443-453.
- [22] 赵月玲,林玉玲,曹丽英,等.基于主成分分析和聚类分析的土壤养分特性研究[J].华南农业大学学报,2013,34(4): 484-488.
- [23] Ding X L, Han X Z, Liang Y, et al. Changes in soil organic carbon pools after 10 years of continuous manuring combined with chemical fertilizer in a Mollisol in China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 122: 36-41.
- [24] Zha Y, Wu X P, He X H, et al. Basic soil productivity of spring maize in black soil under long-term fertilization

based on dssat model[J]. Sci. Agric. Sin., 2014, 13(3): 577-587.

[25] Liu J L, Liao W H, Zhang Z X, et al. Effect of phosphate fertilizer and manure on crop yield, soil P accumulation,

and the environmental risk assessment[J]. Agricultural Sciences in China, 2007, 6(9): 1107-1114.

[26] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.

Characteristics of Black Soil Fertility and Comprehensive Assessment Under Long-term Fertilization

HAO Xiao-yu^{1,2}, ZHOU Bao-ku¹, MA Xing-zhu¹, GAO Zhong-chao¹

(1. Institute of Soil and Fertilizer and Environment Resources, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin, Heilongjiang 150086; 2. Postdoctoral Programme of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin, Heilongjiang 150086)

Abstract: In order to explore the effective fertilization mode to improve the cultivated land quality, and crop continuous output, based on long-term experiment with various fertilizations in black soil of northeast China, soil physical property (bulk density), chemical properties (organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available nitrogen, available phosphorus, available potassium and pH), and biological properties (dissolved organic carbon, dissolved organic nitrogen, soil microbial biomass carbon and soil microbial biomass nitrogen) were analyzed. Principal component analysis (PCA) and hierarchical cluster analysis (HCA) were used to evaluate these data. The results showed that long-term fertilization could increase soil nutrient content, and compared with non-fertilization and chemical fertilizer treatments, combined application of organic manure and inorganic fertilizer reduced soil bulk density. Long-term fertilization of chemical fertilizer could make the soil acidification, and organic manure and inorganic fertilizer could slow down the soil acidification. According to principal component analysis, three principal components extracted from the initial 13 indices reflected 89.6% of the original information quantity. The effects of different patterns of long-term fertilization on soil fertility based on hierarchical cluster analysis displayed the order of $N_2P_2M_2 > NPKM$, $NPM > M_2$, $M > NPK$, $N_2P_2 > NP$, CK . Thus, combined application of organic manure and inorganic fertilizer was the best fertilizer application model in black soil. Comprehensive evaluation of soil fertility, crop yield and environmental effect showed that combined application of organic manure and inorganic fertilizer with conventional fertilization (MNPK) was recommended for enriching soil fertility in black soil.

Keywords: long-term experiment; soil fertility; principal component analysis; cluster analysis

欢迎订阅 2016 年《北方园艺》

《北方园艺》是由黑龙江省农业科学院主管、黑龙江省园艺学会和黑龙江省农业科学院联合主办的面向国内外公开发行人、以科学研究和技术普及相结合的园艺类综合性科技期刊。创刊 40 年来始终秉承“前沿、创新、实用”的办刊理念,为促进园艺科学领域学术交流,普及推广园艺科普知识做出了重要贡献。

现辟有试验研究、研究简报、设施园艺、栽培技术、园林花卉、生物技术、植物保护、贮藏保鲜加工、食用菌、中草药、土壤与肥料、新品种选育、产业论坛、专题综述、农业经纬、经验交流等栏目。

本刊连续 6 次入选全国(中文)核心期刊、获得过全国优秀农业期刊、中国农业核心期刊、中国北方优秀期刊、黑龙江省优秀科技期刊等荣誉,为美国化学文摘社(CAS)收录期刊,2 次入选“农家书屋”推荐目录。国内外公开发行。刊号:ISSN 1001-0009, CN 23-1247/S;半月刊,每月 15 日、30 日出版,大 16 开本,202 页内文。每册定价 15.00 元,全年 360.00 元。邮发代号:14-150,国外邮发代号 BM 5011。

欢迎广大科研及有关企事业单位刊登广告,广告经营许可证号:2301070000009。

地址:黑龙江省哈尔滨市南岗区学府路 368 号《北方园艺》编辑部

邮编:150086

电话:0451-86674276

信箱:bfybjb@163.com

网址:www.haasep.cn