Chinese Journal of Applied Ecology, Nov. 2017, 28(11): 3581-3588 DOI: 10.13287/j.1001-9332.201711.026

长期氮磷钾肥配施对贵州黄壤玉米产量和土壤养分可持续性的影响

刘彦伶[1,2] 李 渝[1,2] 张雅蓉[1,2] 黄兴成[1,2] 张文安[1,2] 蒋太明[2,3*]

([1]贵州省农业科学院土壤肥料研究所, 贵阳 550006; [2]农业部贵州耕地保育与农业环境科学观测实验站, 贵阳 550006; [3]贵州省农业科学院, 贵阳 550006)

摘 要 为明确长期氮磷钾肥配施下贵州典型黄壤玉米产量、氮磷钾肥增产效应及土壤养分的演变特征,利用国家贵阳黄壤肥力与肥效长期定位试验,研究氮磷钾平衡施肥(NPK)与缺素施肥(N、NK、NP、PK)对玉米相对产量、氮磷钾肥增产贡献率及土壤氮磷钾素养分可持续性指数等的影响.结果表明: 氮磷钾平衡施肥有显著增产效果,玉米相对产量均值为:NPK>NP>NK>PK>CK;氮、磷、钾肥增产贡献率和农学利用率均为氮肥>磷肥>钾肥,施肥依存度为氮、磷、钾肥配施>氮肥>磷肥>钾肥,但缺磷处理(NK)玉米相对产量以每年1.4%的速度极显著下降,磷肥贡献率和依存度则以每年2.3%和1.4%的速度极显著上升,最终磷肥对玉米生产的影响逐渐与氮肥持平;缺磷处理土壤pH值和有机质含量均最低,而缺氮处理则较高;施用化学磷肥可提高黄壤磷素可持续性指数,但氮肥和钾肥对黄壤氮素和钾素可持续性指数无显著影响.综上,平衡施肥是贵州典型黄壤地区玉米高产的重要保障,其中磷肥与氮肥同等重要,但长期单施化肥尤其是缺磷处理不利于黄壤养分的可持续利用.

关键词 黄壤; 长期氮磷钾肥配施; 相对产量; 土壤养分可持续性指数

Effect of long-term application of NPK fertilizer on maize yield and yellow soil nutrients sustainability in Guizhou, China.

LIU Yan-ling[1,2], LI Yu[1,2], ZHANG Ya-rong[1,2], HUANG Xing-cheng[1,2], ZHANG Wen-an[1,2], JIANG Tai-ming[2,3*] ([1]*Institute of Soil and Fertilizer, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang* 550006, *China*; [2]*Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation and Agriculture Environment (Guizhou), Ministry of Agriculture, Guiyang* 550006, *China*; [3]*Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang* 550006, *China*).

Abstract: A long-term fertilization field experiment was conducted to investigate the effect of nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) fertilizer on maize relative yield, yield-increasing effect and the changes of nutrients in yellow soil in Guizhou Province. Five fertilizer combinations were evaluated, including balanced fertilization (NPK) and nutrient deficiency treatments (N, NK, NP, and PK). The maize relative yield, contribution efficiency of N, P, K fertilizer application, sustainability index of soil N, P, K nutrients, and other indicators were measured. The results revealed that the balanced fertilization (NPK) significantly increased maize yield, and the average yield under each treatment ranked as: NPK>NP>NK>PK>CK. The contribution efficiency and agronomic efficiency of N, P, K fertilizer application was N>P>K. The fertilization dependence was ranked as: combined application of N, P and K>N>P>K. But in the lack of P treatment (NK), the maize relative yield significantly decreased at a speed of 1.4% per year, with the contribution efficiency and fertilization dependence of applied P significantly increasing at a speed of 2.3% per year and 1.4% per year, respectively. Over time, the effect of P fertilizer on maize yield gradually

本文由国家自然科学基金项目(41461069)、贵州省科技计划项目([2017]2852)、贵州省农业科学院科技创新专项([2017]06)、贵州省科技厅省院联合基金项目([2015]7079)和贵州省农业科学院自主创新专项(2014007)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41461069), the Science and Technology Project of Guizhou Province ([2017]2852), the Science and Technology Innovation Project of Guizhou Provincial Academy of Agricultural Sciences ([2017]06), the Union Fund of Guizhou ([2015]7079), and Independent Innovation Project of Guizhou Provincial Academy of Agricultural Sciences (2014007).

2016-12-02 Received, 2017-07-31 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jtm532@163.com

became equal to that of N fertilizer. The pH and soil organic matter content were the lowest in the P-lack treatment (NK), while they were higher in the N-lack treatment (PK). The application of chemical P significantly improved the sustainability index of soil P, but the application of chemical N and K did not significantly change the sustainability index of soil N and K nutrients compared to the N- and K-lack treatments, respectively. In summary, the use of balanced fertilizer application is critical for achieving high maize yield in typical yellow soil regions in Guizhou Province. P and N fertilizers are equally important for improving maize yield, and long-term application of unbalanced chemical fertilizer, especially the lack of P, would not benefit the sustainable use of nutrients in yellow soil.

Key words: yellow soil; long-term application of NPK fertilizer; relative yield; sustainability index of soil nutrients.

20 世纪 80 年代后期以来,土壤(土地)退化、土壤质量保育和可持续利用问题已成为全球性的重大研究课题之一[1-2].施肥是影响土壤质量演变和可持续利用最主要的农业措施之一,根据作物需要合理施肥可在防止土壤(土地)退化、保持土壤质量及可持续利用的基础上保证作物持续稳定高产[3-6].作物产量是土壤实际生产力的外在表现,在一定程度上能够确切反映土壤生产力水平,土壤基础地力和施肥是影响作物产量的两个主要因素,可分别通过土壤养分贡献率和肥料贡献率等指标进行评估[7].氮、磷、钾是农作物必需的三大营养元素,其合理配施可提高农作物产量、改善土壤养分,不合理施用则会引起土壤养分耗竭、土壤肥力下降、施肥效益降低,还会导致环境质量恶化,影响农业生产持续稳定发展[8-9].土壤养分可持续性指数是在保证作物一定生产力水平和环境质量条件下,土壤能够持续、稳定地供给作物所需要的养分指数范围,可作为衡量土壤养分供应能力和生产力的一个重要指标[10].长期定位试验是土壤质量演变研究的重要方法和手段,能够对土壤质量的变化和发展趋势、肥料效应以及地力变化等方面进行系统研究[11-12].近年来,我国开展了大量长期施肥下红壤[13-16]、黑土[17-19]、潮土[20]、塿土[21-22]、紫色土[23]等土壤养分演变的研究,但关于长期单施化肥对土壤养分的影响研究结果不尽一致.黄壤是我国重要的土壤资源,以贵州省分布最广,其面积分别占贵州省国土面积和土壤面积的 41.9% 和 46.4%,是贵州省主要的农业土壤类型,在农业生产中发挥着重要的作用.关于长期单施化肥对黄壤氮磷钾肥产量效应和土壤肥力的系统研究较少,已有的相关研究主要集中在通过合理施肥措施提高肥效及作物产量等方面[24-26].因此,本研究利用国家黄壤肥力与肥效长期定位试验基地,系统研究长期单施化肥对贵州典型黄壤玉米产量、氮磷钾肥增产贡献率、施肥依存度、氮磷钾肥农学利用率及土壤养分可持续性的影响,以期为提高黄壤生产力、促进黄壤地区农业持续高产高效提供理论指导.

1 研究地区与研究方法

1.1 试验地概况

黄壤肥力与肥效长期定位试验点位于贵州省贵阳市花溪区贵州省农业科学院院内(26°11′ N, 106°07′ E),地处黔中黄壤丘陵区,平均海拔 1071 m,年平均气温 15.3 ℃,年平均日照时数 1354 h左右,相对湿度 75.5%,全年无霜期 270 d 左右,年降雨量 1100~1200 mm.土壤类型为黄壤,成土母质为三叠系灰岩与砂页岩风化物,1994 年基础土壤养分如下:pH 6.87,有机质 36.2 g · kg^{-1},全氮 1.96 g · kg^{-1},全磷 0.96 g · kg^{-1},全钾 10.5 g · kg^{-1}.长期定位试验始于 1995 年,共设置 12 个处理,本研究选取其中 6 个处理作为研究对象:1)不施肥处理(CK);2)单施氮肥处理(N);3)缺磷处理(NK);4)缺钾处理(NP);5)缺氮处理(PK);6)平衡施肥处理(NPK,全肥处理).采用大区对比试验,每个处理面积340 m^2,无重复.

试验用氮肥为尿素(含 N 46%),磷肥为过磷酸钙(含 P_2O_5 16%),钾肥为氯化钾(含 K_2O 60%).化肥用量为每年施 N 330 kg · hm^{-2}、P_2O_5 165 kg · hm^{-2}、K_2O 165 kg · hm^{-2}.磷钾肥于玉米播种前作基肥一次性施入,氮肥一部分基施,一部分作追肥于玉米拔节期和大喇叭口期施入.1995—2015 年各处理年均肥料投入量见表 1.种植制度为一年一季玉米,种植玉米品种为:交 3 单交(1995—1998 年)、黔单 10 号(1999—2000 年、2002—2003 年)、农大 108(2001 年)、黔玉 2 号(2004—2005 年)、黔单 16 号(2006—2012 年)、金玉 818(2013—2014 年)、中农大 239(2015 年).

表 1　试验处理与施肥量

Table 1　Treatments and application rates of fertilizer (kg · hm^{-2})

处理 Treatment	总量 Total amount		
	N	P_2O_5	K_2O
CK	0	0	0
N	330	0	0
NK	330	0	165
NP	330	165	0
PK	0	165	165
NPK	330	165	165

1.2　样品采集与分析

试验自 1995 年以来长期对玉米产量、施肥水平和土壤养分状况等进行定点调查、动态监测记载与分析测试等.对作物产量的测定是通过对处理区的每季作物分别进行籽粒和秸秆产量的测定与记载.土壤样品的采集(0~20 cm)在每年度玉米收获后,采集方法按照随机(每一个采样点是任意决定的,按照梅花形布点采样)、等量(每一点采集土壤量一致)和多点混合(将监测田块内采集的 15 个点的土样混合以提高代表性)的原则进行.为使每年土壤养分数据分析具有统计学意义,自 2011 年开始,土壤样品采集将大区分为上、中、下三段,每段采用梅花形布点采样法单独采集土壤样品,当作 3 个重复.由于历史原因,1997—2005 年 9 年的土壤样品未保存,本研究分析了 1995—2015 年共 21 年的玉米产量,以及 1995、1996、2006—2015 年共 12 年的土壤 pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾含量,分析方法详见文献[27].

1.3　计算公式

相对产量及其他指标计算公式[7,28]:

相对产量(Y_r,%)= 每年各处理产量/NPK 处理产量×100%;增产率(IR,%)=(施肥处理产量-不施肥处理产量)/不施肥处理产量×100%;氮(磷、钾)肥增产贡献率(CE,%)=[NPK 处理产量-PK(NK、NP)处理产量]/NPK 处理产量×100%;施肥依存度(FD,%)= 100%-各处理相对产量,其中,全肥区的施肥依存度=100%-空白区相对产量,例如:氮(磷、钾)肥依存度(%)= 100%-PK(NK、NP)处理相对产量;氮(磷、钾)土壤养分贡献率(Cs,%)= PK(NK、NP)处理产量/NPK 处理产量×100%;氮(磷、钾)肥农学利用率(AE,kg · kg^{-1})=[NPK 处理玉米籽粒产量-PK(NK、NP)处理玉米产量]/[氮(磷、钾)肥用量];养分可持续性指数(SI)= 养分有效度×养分累积率×100[10],其中,养分有效度=土壤有效养分/土壤全量养分;养分累积=施肥处理土壤全量养分-对照处理土壤全量养分;养分累积率=养分累积/施肥处理土壤全量养分.

1.4　数据处理

数据的统计与分析采用 Excel 2010、SigmaPlot 10.0 和 Statistic 5.5 软件进行,不同处理多个年份间平均值进行方差分析比较时,各年份数值作为重复数据使用,处理间差异性采用邓肯新复极差法(Duncan)检验,显著性水平设置为α=0.05.

2　结果与分析

2.1　长期氮磷钾配施对玉米产量的影响

考虑到品种、气候等对作物产量的影响,本研究采用相对产量来表征玉米产量的年际变化(图 1).连续施肥 21 年后,CK 处理玉米相对产量年际波动虽较大,但始终处于较低水平,平均值最低为 48.2%,而 NPK 处理玉米相对产量变化较稳定且均值最高.各缺素施肥处理玉米相对产量平均值大小为 NP(88.6%)>NK(84.7%)、N(84.7%)>PK(60.1%),缺素施肥对玉米相对产量的影响整体表现为:缺氮>缺磷>缺钾.各缺素施肥处理对玉米相对

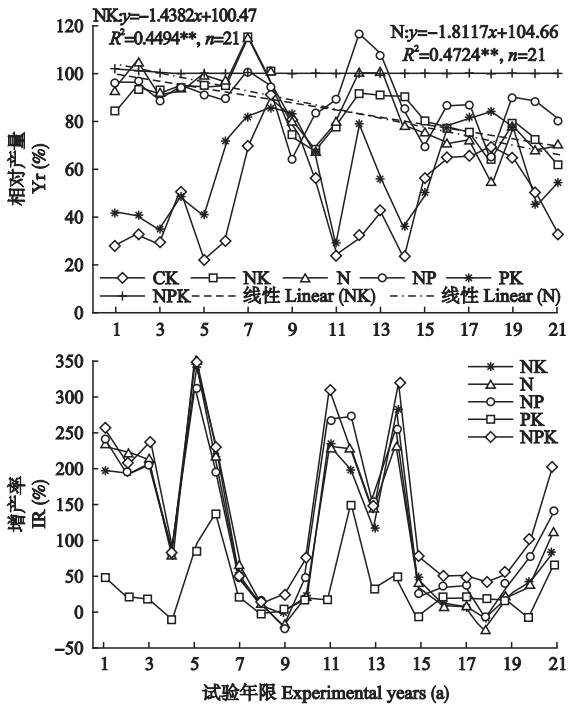


图 1　不同施肥处理玉米相对产量和增产率

Fig.1　Maize relative yield (Y_r) and yield increasing rate (IR) under different fertilization treatments.

* P<0.05; * * P<0.01.下同 The same below.

产量的影响年际变化趋势不尽一致,N 和 NK 处理在波动中随种植年限呈现极显著下降趋势,年减少量分别为 1.8%和 1.4%,NP 和 PK 处理则在波动中分别呈现微弱下降和上升趋势,但未达显著水平.近 6 年(2010—2015 年)各缺素施肥处理玉米平均相对产量大小为 NP(82.7%)> NK(71.1%)、PK(70.0%)、N(68.7%),除 NP 与 N 处理间差异达显著水平外,其他各处理间差异不显著.

根据本试验互作效应分析,氮、磷、钾肥互作效应最高,21 年平均增产率为 149.7%(图 1),其次为氮磷肥互作,21 年平均增产率为 124.7%,氮钾肥互作效应与氮效应较低,21 年平均增产率分别为 114.0%和 117.0%,磷钾肥互作效应最差,21 年平均增产率仅为 35.0%.氮磷钾互作效应在试验前 9 年与氮钾互作效应、氮效应无明显差异,但随施肥年限增加差距不断增大.受气候、品种等原因影响,不同处理实际产量年际间波动较大,进而导致增产贡献率波动也较大,随试验年限增加无明显变化规律.

2.2 氮、磷、钾肥增产贡献率和肥料依存度

肥料增产贡献率可反映施肥对增加作物产量的贡献率,氮、磷、钾肥均有不同程度的增产作用,氮肥增产贡献率为 17.4%~253.9%,21 年平均值为 86.8%,年际波动较大,但呈持平状态;磷肥增产贡献率为-12.7%~70.3%,21 年平均值为 21.6%,随时间呈极显著上升趋势(图 2),年增长率为 2.3%;钾肥增产贡献率为-13.7%~57.4%,21 年平均值为 15.3%.氮、磷、钾肥增产贡献率整体表现为氮肥>磷肥>钾肥,随着磷肥增产贡献率不断增加,近 6 年(2010—2015 年)磷肥增产贡献率(43.6%)与氮肥增产贡献率(50.4%)相当.

施肥依存度可反映作物对肥料的依赖性,贵州黄壤玉米施肥依存度分析结果表明(图 2),玉米对氮肥的依赖性最强,21 年平均值为 39.9%;其次为磷肥,21 年平均值为 15.3%,但磷肥依存度每年以 1.4%的速率极显著上升,近 6 年磷肥依存度(28.9%)与氮肥依存度(30.0%)相当;而对钾肥的依赖性始终较弱,21 年平均值为 11.4%;对氮磷钾肥配施的依赖性始终最强,21 年平均值为 51.8%.施肥依存度越高,则说明土壤养分对产量的贡献越低,表现为土壤氮贡献率(60.1%)<土壤磷贡献率(84.7%)<土壤钾贡献率(88.6%).

2.3 氮、磷、钾肥农学利用率

农学利用率指单位施肥量所增加的作物籽粒产量,可准确评价肥料的增产效率,氮、磷、钾肥农学利用率年际变化趋势与氮、磷、钾肥增产贡献率趋势基本一致(图 3).氮、磷、钾肥农学利用率分别为 2.5~17.0、-4.7~15.5、-5.3~14.7 kg·kg^{-1},21 年平均值分别为 7.8、6.4、4.7 kg·kg^{-1}.但磷肥农学利用率以每年 0.6 kg·kg^{-1}的速度极显著上升,近 6 年磷肥农学利用率为 12.3 kg·kg^{-1},而氮、钾肥农学利用率年际波动较大,且无明显变化规律.

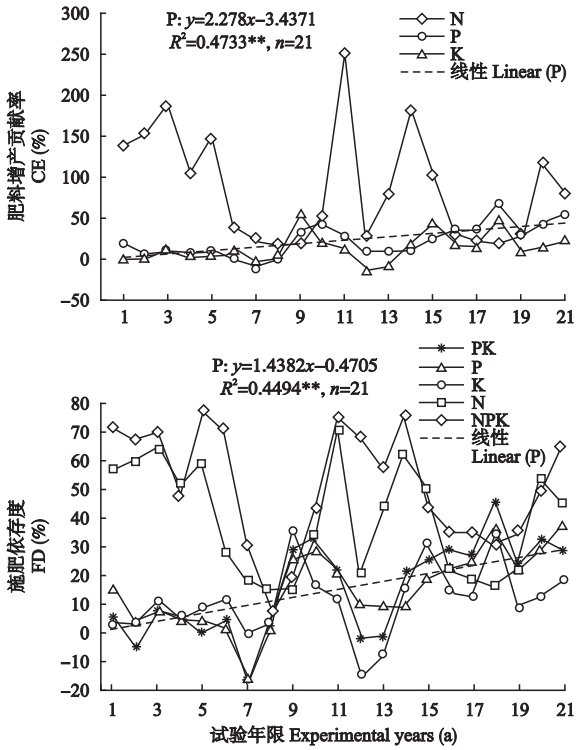


图 2 氮、磷、钾肥增产贡献率和肥料依存度年际变化

Fig.2 Interannual change of contributing efficiency (CE) and fertilization dependence (FD) of N, P, K fertilizer application.

2.4 长期氮磷钾配施对土壤 pH 值和有机质的影响

不同施肥处理对土壤pH值和有机质影响显著

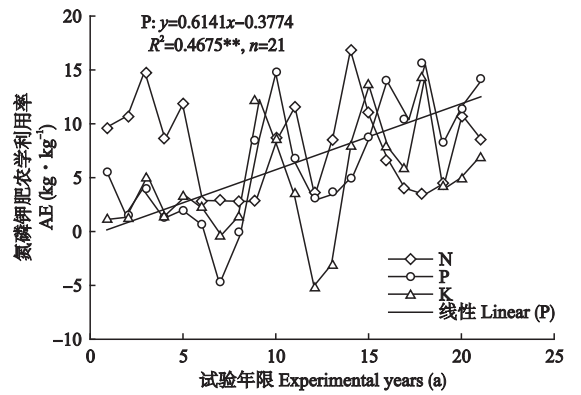


图 3 氮、磷、钾肥农学利用率年际变化

Fig.3 Interannual change of agronomic efficiency (AE) of N, P, K fertilizer application.

表 2　不同施肥处理土壤 pH 值和有机质随时间变化趋势及参数(0~20 cm)

Table 2　Trend and parameters of soil pH value and organic matter under different fertilization treatments ($n=12$)

处理 Treatment	pH				有机质 Organic matter (g·kg^{-1})			
	均值 Average	斜率 Slope	R^2	变化趋势 Trend	均值 Average	斜率 Slope	R^2	变化趋势 Trend
CK	7.02a	−0.016	0.1702	持平 Unchanged	36.4bc	0.433	0.5545**	上升 Increased
N	6.52c	−0.044	0.8495**	下降 Decreased	37.2abc	0.212	0.1489	持平 Unchanged
NK	6.45c	−0.046	0.6408**	下降 Decreased	33.4d	−0.029	0.0203	持平 Unchanged
NP	6.55c	−0.045	0.6699**	下降 Decreased	38.1ab	0.256	0.3575*	上升 Increased
PK	6.92ab	−0.026	0.7603**	下降 Decreased	39.7a	0.345	0.4052*	上升 Increased
NPK	6.71bc	−0.035	0.6802**	下降 Decreased	34.5cd	0.127	0.1030	持平 Unchanged

同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$) Different letters in the same column meant significant difference among treatments at 0.05 level. *$P<0.05$; **$P<0.01$.下同 The same below.

(表 2).各处理土壤 pH 值大小顺序为 CK>PK>NPK>NP>N>NK,除 PK 处理外,各施肥处理 pH 值均显著低于 CK 处理.除 CK 处理土壤 pH 值随时间变化趋势持平外,各施肥处理土壤 pH 值均随种植年限增加呈极显著下降趋势,酸化速率为 NK>N>NP>NPK>PK.不同施肥处理土壤有机质含量大小顺序为 PK>NP>N>CK>NPK>NK,但除 PK 与 CK、NPK、NK 之间、NP 与 NPK、NK 之间差异显著外,其他处理之间差异均不显著.CK、NP、PK 处理土壤有机质随种植年限增加呈显著上升趋势,N、NK、NPK 处理均呈持平状态.

2.5　长期氮磷钾配施对土壤氮、磷、钾可持续性指数的影响

不同施肥处理对土壤氮、钾养分可持续性指数影响不显著,对磷素可持续性指数影响显著(表 3).土壤氮素可持续性指数波动较大,年际间无明显变化规律,平均值为−0.06~0.28,以 N 处理最高,PK 处理最低,但除 N 和 PK 处理间差异显著外,其他各处理差异不显著,说明施氮处理相对 PK 处理可一定程度提高土壤氮素可持续性指数.施用化学磷肥可显著提高土壤磷素可持续性指数,且随种植年限增加呈不断增加趋势,各处理土壤磷素可持续性指数大小顺序为 PK、NP>NPK>N、NK,处理间差异达显著水平,施磷处理是不施磷处理的 5.0~47.5 倍.土壤钾素可持续性指数波动较小,各处理间差异不显著,均值为−0.17~0.00,说明施用化学钾肥并不能提高土壤钾素可持续性指数.

2.6　玉米相对产量与土壤养分的相关性

土壤肥力的高低在一定程度上决定了土壤生产力的高低,黄壤长期定位试验所有处理多年玉米相对产量与土壤 pH 值、有机质、氮素可持续性指数及磷素可持续性指数均呈显著正相关(表 4),其中与土壤氮素可持续性指数相关系数最大,其次为磷素可持续性指数,再次为土壤有机质,最小的是 pH 值,与钾素可持续性指数相关性不显著.土壤氮素和磷素养分可持续性指数也与 pH 值、有机质、全氮、全磷、有效磷、速效钾等指标呈显著正相关,可较好地反映土壤氮、磷养分状况.

表 3　不同施肥处理对土壤氮、磷、钾可持续性指数(SI)的影响

Table 3　Effects of different fertilization treatments on sustainability index (SI) of soil N, P and K

项目 Item	处理 Treatment	年份 Year			平均 Average
		1995—1996	2006—2009	2010—2015	
SI_N	N	1.71	−0.01a	0.01a	0.28a
	NK	−0.45	0.20a	−0.02a	−0.02ab
	NP	0.53	−0.19a	0.04a	0.04ab
	PK	−0.14	−0.80a	−0.09a	−0.34b
	NPK	0.57	−0.11a	−0.23a	−0.06ab
SI_P	N	0.09	0.10cd	0.10c	0.10c
	NK	0.12	0.02d	−0.02c	0.02c
	NP	0.45	0.64ab	0.97a	0.77a
	PK	0.38	0.81a	1.06a	0.86a
	NPK	0.31	0.43bc	0.57b	0.48b
SI_K	N	−0.59	−0.16a	−0.04a	−0.17a
	NK	0.09	−0.12a	0.04a	0.00a
	NP	−0.25	−0.22a	−0.04a	−0.14a
	PK	−0.16	−0.27a	−0.08a	−0.16a
	NPK	−0.14	−0.16a	−0.05a	−0.10a

SI_N、SI_P、SI_K分别表示土壤氮、磷、钾可持续性指数 SI_N, SI_P, SI_K indicated sustainability index (SI) of soil N, P and K, respectively. 下同 The same below.

3　讨　　论

氮、磷、钾肥不均衡施用致使农业生态系统养分不均衡,土壤生产功能下降,氮、磷、钾均可成为作物高产的限制因子[29].贵州黄壤氮、磷、钾肥配施可提高玉米相对产量,而缺素施肥则相反.氮、磷、钾肥互作效应最高,磷钾肥互作效应最小,肥料增产贡献率、肥料依存度、农学利用率等多年平均值均为氮肥>磷肥>钾肥.但缺磷处理玉米相对产量随种植年限以每

表 4 玉米相对产量与土壤养分的相关系数
Table 4 Correlation coefficients between maize relative yield and soil nutrients

	pH	有机质 Organic matter	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K	碱解氮 Alkaline N	有效磷 Olsen-P	速效钾 Available K	相对产量 Y_r
SI_N	0.462**	0.559**	0.731**	0.360**	−0.004	0.014	0.431**	0.540**	0.444**
SI_P	0.213*	0.686**	0.356**	0.882**	−0.071	−0.129	0.962**	0.379**	0.332**
SI_K	−0.057	0.091	0.021	0.125	0.471**	−0.147	0.156	0.127	−0.080
相对产量 Y_r	0.197*	0.246**	0.416**	0.342**	0.031	0.100	0.388**	0.369**	1

Y_r: Relative yield.

年 1.4%的速度极显著下降,氮钾肥互作效应随种植年限不断减小,且磷肥贡献率、磷肥依存度、磷肥农学利用率随种植年限分别以每年 2.3%、1.4%、0.6 $kg \cdot kg^{-1}$的速度极显著上升,而缺氮和缺钾处理则随种植年限无明显变化规律.说明贵州黄壤氮磷钾平衡配施是玉米高产的重要保障,其中氮和磷是玉米产量的主要限制因素,缺氮影响在试验开始即可显现,而缺磷影响则需积累到一定时间才显现,本研究中,缺磷处理在连续试验 9 年后玉米相对产量开始大幅下降,近 6 年(2010—2015)已与缺氮处理相当,因此农业生产中应高度重视磷肥的施用,而紫色土[30]、红壤[31]和黑土[32]上氮肥增产贡献率始终高于磷肥增产贡献率,原因可能是不同土壤磷含量及对土壤缺磷的敏感程度不同所致.不同处理年际间产量波动较大,在一定程度上影响了不同处理施肥效应的年际规律.除 PK 处理有较明显的年际变化趋势外,其他处理趋势不明显,可能是由于气候、病虫害或品种更换等原因造成的,由于历史资料对相关记录较少,无法明确具体原因,在以后研究中应尽量统一作物品种,作好田间记录,尤其是特大气象灾害或病虫害等发生情况,以便分析之用.

酸、瘦、有效磷低是黄壤生产利用中的主要障碍因子[33].本研究各处理 pH 值大小为 CK>PK>NPK>NP>N>NK,且除 CK 处理外,各施肥处理土壤 pH 值均随种植年限呈显著下降趋势,酸化速率为 NK>N>NP>NPK>PK,说明长期单施化肥尤其是施用化学氮肥可加剧土壤酸化,这与蔡泽江等[14]在红壤上的研究结果一致,其原因之一可能是供试黄壤氮素养分含量较丰富且长期大量施用氮肥,导致氮素硝化和淋溶作用强烈而加速土壤酸化.土壤有机质以 PK 处理最高,NK 处理最低,而 NPK 处理则与 NK 处理无显著差异,不同施肥处理间有机质变化的差异可能与各处理根茬残留及有机质消耗有关[34],与宋永林等[35]在褐潮土上 NPK 处理有机质高于其他处理的结果不一致.黄壤氮、磷、钾素可持续性指数研究结果也表明,与不施肥处理相比,施用化学氮肥和钾肥并不能提高土壤氮素和钾素可持续性指数,而施化学磷肥则可提高土壤磷素可持续性指数,这与沈宏等[10]、高洪军等[32]的研究结果一致,原因可能是由于氮、磷、钾在土壤中转化差异造成的,土壤氮素和钾素转化较快,而磷素在土壤中移动性较小,施入土壤中的磷大量积累在土壤中,从而导致土壤磷素可持续性指数随时间呈显著上升趋势,而各处理间氮、磷、钾素可持续性指数的差异除与土壤养分的转化有关外,还与不同处理植株氮、磷、钾吸收量有关.

玉米相对产量与黄壤氮素和磷素养分、有机质及 pH 值等呈显著正相关,缺磷处理(NK)土壤 pH、有机质、磷素可持续性指数均最低.王俊华等[36]研究结果表明,缺磷(NK 处理)在促进土壤微生物繁育和保育微生物代谢活性以及促进作物生长和保证养分吸收等方面的不利影响最为突出,因此长期缺磷可使黄壤生产力不断降低.而长期缺氮处理(PK)相比其他施氮处理有较高的 pH、有机质、磷素可持续性指数,且氮素可持续性指数也未显著降低,因而缺氮处理作物产量随施肥年限增加未有下降趋势.氮、磷、钾肥平衡配施相对缺素施肥处理虽有较高产量,但除土壤磷素养分外,其他土壤养分与 CK 处理相比均有所下降,说明贵州黄壤长期单施化肥不利于提高土壤养分.综上,贵州黄壤缺氮和长期缺磷对玉米产量的影响均较大,长期缺磷对土壤养分的不利影响最突出,而缺氮影响则最小,平衡施肥处理可获得较高的玉米产量,但土壤养分相比不施肥处理和其他缺素施肥处理则未有明显改善,土壤 pH 值和有机质甚至低于不施肥处理,可见,长期单施化肥不利于贵州黄壤土壤养分的可持续利用.罗龙皂等[37]、李渝等[38]、张雅蓉等[39]研究均显示,增施有机肥可提高贵州黄壤玉米产量及土壤有机碳、氮、磷等养分含量;高洪军等[40]在黑土上的研究也表明,合理的有机无机配施更有利于土壤养分可持续发展.因此,从农业生态系统可持续发展的角度考虑,贵州黄壤区农业生产中应重视化肥与有机肥的合理配施.

参考文献

[1] Li X-W（李新旺），Chen Y-H（陈亚恒），Wang S-T（王树涛），*et al*. Soil nutrients productivity and its sustainability in fluvo-aquic soil under long-term fertilization. *Acta Pedologica Sinica*（土壤学报），2010，**47**（3）：555-562（in Chinese）

[2] Zhang W-L（张维理），Xu A-G（徐爱国），Zhang R-L（张认连），*et al*. Shortage of innovative technology for arable land fertility management endangered food security and environmental safety in China. *Scientia Agricultura Sinica*（中国农业科学），2015，**48**（12）：2374-2378（in Chinese）

[3] Li Z-F（李忠芳），Zhang S-Q（张水清），Li H（李慧），*et al*. Trends of basic soil productivity in paddy soil under long-term fertilization in China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*（植物营养与肥料学报），2015，**21**（6）：1394-1402（in Chinese）

[4] Steiner C，Teixeira WG，Lehmann J，*et al*. Long term effects of manure，charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil*，2007，**291**：275-290

[5] Su YZ，Wang F，Suo DR，*et al*. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil-carbon sequestration and soil fertility under the wheat-wheat-maize cropping system in northwest China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*，2006，**75**：285-295

[6] Kobayashi R，Yamada A，Hirooka H. Changes in the cycling of nitrogen，phosphorus，and potassium in a dairy farming system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*，2010，**87**：295-306

[7] Liang T（梁　涛），Chen J-X（陈轩敬），Zhao Y-N（赵亚南），*et al*. Response of rice yield to inherent soil productivity of paddies and fertilization in Sichuan Basin. *Scientia Agricultura Sinica*（中国农业科学），2015，**48**（23）：4759-4768（in Chinese）

[8] Li Y-Y（李玉影），Liu S-Q（刘双全），Ji J-H（姬景红），*et al*. Effect of balanced fertilization on yield，nutrient balance coefficient and fertilizer use efficiency of corn. *Journal of Maize Sciences*（玉米科学），2013，**21**（3）：120-124（in Chinese）

[9] Villamil MB，Amioti NM，Peinemann N. Soil degradation related to overgrazing in the semi-arid southern Caldanal area of Argntina. *Soil Science*，2001，**166**：441-452

[10] Shen H（沈　宏），Cao Z-H（曹志宏）. Study on sustainability indices of soil nutrients under different agroecosystems. *Rural Eco-Environment*（农村生态环境），1998，**14**（3）：35-39（in Chinese）

[11] Shen S-M（沈善敏）. Scientific value of long-term soil fertility test. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*（植物营养与肥料学报），1995，**1**（1）：1-9（in Chinese）

[12] Zhang S-X（张淑香），Zhang W-J（张文菊），Shen R-F（沈仁芳），*et al*. Variation of soil quality in typical farmlands in China under long-term fertilization and research expedition. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*（植物营养与肥料学报），2015，**21**（6）：1389-1393（in Chinese）

[13] Huang S，Peng X，Huang Q，*et al*. Soil aggregation and organic carbon fractions affected by long-term fertilization in a red soil of subtropical China. *Geoderma*，2010，**154**：364-369

[14] Cai Z-J（蔡泽江），Sun N（孙　楠），Wang B-R（王伯仁），*et al*. Effects of long-term fertilization on pH of red soil，crop yields and uptakes of nitrogen，phosphorus and potassium. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*（植物营养与肥料学报），2011，**17**（1）：71-78（in Chinese）

[15] Wang B-R（王伯仁），Xu M-G（徐明岗），Wen S-L（文石林），*et al*. Effect of long-term fertilizer application on crop yield and fertilizer use efficiency in red soil. *Chinese Agricultural Science Bulletin*（中国农学通报），2008，**24**（10）：322-326（in Chinese）

[16] Shao X-H（邵兴华），Xu J-R（徐金仁），Zhang J-Z（张建忠），*et al*. Effects of long-term fertilizer on soil fertility and soil enzyme activities in upland red soils. *Ecology and Environmental Sciences*（生态环境学报），2011，**20**（2）：266-269（in Chinese）

[17] Zha Y，Wu XP，He XH，*et al*. Basic soil productivity of spring maize in black soil under long-term fertilization based on DSSAT model. *Journal of Integrative Agriculture*，2014，**13**：577-587

[18] Hao X-Y（郝小雨），Zhou B-K（周宝库），Ma X-Z（马星竹），*et al*. Characteristics of crop yield and nutrient balance under different long-term fertilization practices in black soil. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*（农业工程学报），2015，**31**（16）：178-185（in Chinese）

[19] Hao X-Y（郝小雨），Zhou B-K（周宝库），Ma X-Z（马星竹），*et al*. Characteristics of black soil fertility and comprehensive assessment under long-term fertilization. *Heilongjiang Agricultural Sciences*（黑龙江农业科学），2015（11）：23-30（in Chinese）

[20] Ma C-B（马常宝），Lu C-A（卢昌艾），Ren Y（任意），*et al*. Effect of soil fertility and long-term fertilizer application on the yields of wheat and maize in fluvo-aquic soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*（植物营养与肥料学报），2012，**18**（4）：796-802（in Chinese）

[21] Yang X-Y（杨学云），Sun B-H（孙本华），Gu Q-Z（古巧珍），*et al*. The effects of long-term fertilization on soil phosphorus status in manural loessial soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*（植物营养与肥料学报），2009，**15**（4）：837-842（in Chinese）

[22] Liang B，Yang X，He X，*et al*. Effects of 17-year fertilization on soil microbial biomass C and N and soluble organic C and N in loessial soil during maize growth. *Biology & Fertility of Soils*，2011，**47**：121-128

[23] Li X-P（李学平），Shi X-J（石孝均）. Effect of long-term imbalanced fertilization on purple soil fertility. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*（植物营养与肥料学报），2007，**13**（1）：27-32（in Chinese）

[24] Jiang T-M (蒋太明), Huang Q-N (黄全能). Fertilization response to N, P, K and green manure for maize in yellow soil upland. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences* (西南农业学报), 2000, **13**(1): 65-70 (in Chinese)
[25] Zhang W-A (张文安), Gou J-L (苟久兰), Li J (李剑), *et al*. Effects of long-term different farming and fertilizer methods on maize yield and fertilizer efficiency in the upland field with yellow soil. *Guizhou Agricultural Sciences* (贵州农业科学), 2008, **36**(2): 105-107 (in Chinese)
[26] Zhang B-X (张邦喜), Qin S (秦 松), Fan C-W (范成五), *et al*. Effect of optimized fertilization on yield of summer maize and fertilizer efficiency in yellow soil on sloping land. *Guizhou Agricultural Sciences* (贵州农业科学), 2014, **42**(7): 81-83 (in Chinese)
[27] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
[28] Huang C-J (黄长江), Che X-L (车晓莉). Effects of combined applications of nitrogen phosphorus and potassium fertilizers on Chinese cabbage. *Soil and Fertilizer Sciences* (中国土壤与肥料), 2013(4): 71-76 (in Chinese)
[29] Li X-Y (李秀英), Li Y-T (李燕婷), Zhao B-Q (赵秉强), *et al*. The dynamics of crop yields under different fertilization systems in drab fluvo-aquic soil. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2006, **32**(5): 683-689 (in Chinese)
[30] Chen X-J (陈轩敬), Zhao Y-N (赵亚南), Chai G-Q (柴冠群), *et al*. Integrated soil fertility and yield response to long-term different fertilization in purple soil. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2016, **32**(suppl.1): 139-144 (in Chinese)
[31] Yan X (颜 雄), Peng X-H (彭新华), Zhang Y-Z (张杨珠), *et al*. Effects of long-term fertilizations on maize biomass and its nutrient in red soil. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2013, **27**(2): 120-125 (in Chinese)
[32] Gao H-J (高洪军), Peng C (彭 畅), Zhang X-Z (张秀芝), *et al*. Effects of long-term fertilization on maize yield, active organic matter and pH value of black soil. *Journal of Maize Sciences* (玉米科学), 2014, **22**(3): 126-131 (in Chinese)
[33] Cao W-Z (曹文藻). Yellow Soil Improvement. Guiyang: Guizhou People's Press, 1981 (in Chinese)
[34] Xie J-F (谢军飞), Xu R (许 蕊). Meta-analysis of the effect of long-term chemical fertilization on soil organic carbon content. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2014, **45**(2): 427-431 (in Chinese)
[35] Song Y-L (宋永林), Tang H-J (唐华俊), Li X-P (李小平). The effects of long-term fertilization on crop yield and aqui-cinnamon soil organic matter. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica* (华北农学报), 2007, **22**(suppl.): 100-105 (in Chinese)
[36] Wang J-H (王俊华), Hu J-L (胡君利), Lin X-G (林先贵), *et al*. Effects of long-term balanced fertilization on microbial activity and nutrient uptake of maize in a fluvo-aquic soil. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2011, **48**(4): 766-772 (in Chinese)
[37] Luo L-Z (罗龙皂), Li Y (李 渝), Zhang W-A (张文安), *et al*. Variation characteristics of maize yield and fertilizer utilization rate on an upland yellow soil under long term fertilization. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(10): 2793-2798 (in Chinese)
[38] Li Y (李 渝), Liu Y-L (刘彦伶), Zhang Y-R (张雅蓉), *et al*. Effect of long-term fertilization on ecological stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in southwest yellow soil. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2016, **27**(7): 2321-2328 (in Chinese)
[39] Zhang Y-R (张雅蓉), Li Y (李 渝), Liu Y-L (刘彦伶), *et al*. Effects of long-term fertilization on soil organic carbon balance and maize yield in yellow soil. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2016, **53**(5): 1275-1285 (in Chinese)
[40] Gao H-J (高洪军), Peng C (彭 畅), Li Q (李强), *et al*. Influence of long-term fertilization on nutrient supplying capacity of black soil and soil productivity. *Journal of Maize Sciences* (玉米科学), 2010, **18**(6): 107-110 (in Chinese)

作者简介 刘彦伶,女,1989 年生,硕士,助理研究员.主要从事土壤养分和植物营养研究. E-mail: lyl890615@163.com

责任编辑 张凤丽

刘彦伶, 李渝, 张雅蓉, 等. 长期氮磷钾肥配施对贵州黄壤玉米产量和土壤养分可持续性的影响. 应用生态学报, 2017, **28**(11): 3581-3588
Liu Y-L, Li Y, Zhang Y-R, *et al*. Effect of long-term application of NPK fertilizer on maize yield and yellow soil nutrients sustainability in Guizhou, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(11): 3581-3588 (in Chinese)