

长期施肥下黄壤旱地玉米产量及肥料利用率的变化特征^{*}

罗龙皂^{1,2} 李 渝^{1,2} 张文安^{1,2} 肖厚军^{1,2} 蒋太明^{2,3,*}

(¹贵州省农业资源与环境研究所, 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 选取贵州黄壤长期定位监测点中对照(CK, 不施肥)、单施全量有机肥(M, 30555 kg·hm⁻²)、有机肥与化肥配施(NPKM, 年施 N 165 kg·hm⁻²、P₂O₅ 82.5 kg·hm⁻²、K₂O 82.5 kg·hm⁻²、有机肥 30555 kg·hm⁻²)和氮磷钾化肥配施(NPK, 年施 N 165 kg·hm⁻²、P₂O₅ 82.5 kg·hm⁻²、K₂O 82.5 kg·hm⁻²)4 个处理的 16 年试验数据进行分析, 研究了黄壤区长期不同施肥下作物产量及肥料效益的变化趋势, 为评价和建立长期施肥模式、促进粮食持续生产提供依据。结果表明: 长期施肥条件下玉米产量年际间变化较大, 总体呈上升趋势。其中 NPKM 处理增产效果最好, 可增产 4075.71 kg·hm⁻², 增产率高达 139.3%。长期施肥可提高玉米肥料利用率, 其中 M 处理对玉米氮肥和磷肥利用率的提升作用最显著, 分别达 35.4% 和 18.8%; 而 NPK 处理在提高玉米钾肥利用率方面作用明显, 提高了 20%, 远高于 M 处理的 8.7% 和 NPKM 处理的 9.2%。可见, 长期均衡施肥, 尤其是有机肥与化肥配施对提高作物产量和肥料效益具有积极作用。

关键词 长期施肥 黄壤旱地 玉米 肥料利用率

文章编号 1001-9332(2013)10-2793-06 **中图分类号** S158.3 **文献标识码** A

Variation characteristics of maize yield and fertilizer utilization rate on an upland yellow soil under long term fertilization. LUO Long-zao^{1,2}, LI Yu^{1,2}, ZHANG Wen-an^{1,2}, XIAO Hou-jun^{1,2}, JIANG Tai-ming^{2,3} (¹Guizhou Institute of Agricultural Resources and Environment, Guiyang 550006, China; ²Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation and Agriculture Environment (Guizhou), Ministry of Agriculture, Guiyang 550006, China; ³Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(10): 2793–2798.

Abstract: An analysis was made on the 16-year experimental data from the long term fertilization experiment of maize on a yellow soil in Guizhou of Southwest China. Four treatments, *i. e.*, no fertilization (CK), chemical fertilization (165 kg N·hm⁻², 82.5 kg P₂O₅·hm⁻², and 82.5 kg K₂O·hm⁻², NPK), organic manure (30555 kg·hm⁻², M), and combined application of chemical fertilizers and organic manure (NPKM), were selected to analyze the variation trends of maize yield and fertilizer use efficiency on yellow soil under effects of different long term fertilization modes, aimed to provide references for evaluating and establishing long term fertilization mode and promote the sustainable development of crop production. Overall, the maize yield under long term fertilization had an increasing trend, with a large annual variation. Treatment NPKM had the best yield-increasing effect, with the maize yield increased by 4075.71 kg·hm⁻² and the increment being up to 139.2%. Long term fertilization increased the fertilizer utilization efficiency of maize. In treatment M, the nitrogen and phosphorus utilization rates were increased significantly by 35.4% and 18.8%, respectively. Treatment NPK had obvious effect in improving potassium utilization rate, with an increment of 20% and being far higher than that in treatments M (8.7%) and NPKM

* 公益性行业(农业)科研专项(201203030)和贵州省科技计划项目(黔科合 NY 字[2012]3082 号, 黔科合院所创能[2011]4002 号)资助。

** 通讯作者。E-mail: jtm532@163.com

2013-02-20 收稿, 2013-08-02 接受。

(9.2%)。The results showed that long term fertilization, especially the combined application of chemical fertilizers and organic manure, was of great importance in increasing crop yield and fertilizer use efficiency.

Key words: long term fertilization; upland yellow soil; maize; fertilizer utilization rate.

长期定位试验是土壤学研究的重要手段,它对揭示土壤养分平衡和土壤质量变化规律、指导农业生产合理施肥、保护生态环境和农业可持续发展等,均具有十分重要的理论意义和实践价值. 通过长期定位试验,可以探讨土壤质量的发生和演变规律,了解施肥对土壤质量、作物产量以及环境变化等的影响,揭示作物类型、气候、耕作管理方式与土壤质量变化的相互关系^[1]. 目前全国有 70 个长期试验基地,10 个主要土壤类型^[2-3]. 近年来,有关长期施肥对各种土壤类型作物产量及肥效的影响研究在各地大量开展,如棕壤^[4-5]、潮土^[6-9]、红壤^[10-13]和黑土^[14-16]等. 这些研究表明,长期均衡施肥和施用有机肥对提高玉米产量和肥料效益具有积极的作用^[6-16]. 而单施化肥对玉米产量和肥料效益的影响存在不一致性^[4-16],这种差异主要存在于不同区域、不同土壤类型上. 可见,利用长期定位试验在某一区域、某种土壤类型上开展作物产量和肥料效益试验,提出适合当地的培肥技术模式,可为制定区域农业发展战略提供科学依据.

黄壤是亚热带主要的地带性土壤类型^[17],全国 25.3% 的黄壤集中分布在贵州,其面积分别占贵州国土面积和土壤面积的 41.9% 和 46.4%,是贵州主要的农业土壤类型^[18],在贵州农业生产中发挥着重要的作用. 然而有关黄壤区长期施肥试验的报道极少. 为此,自 1995 年开始,我们在贵州省农业科学院黄壤试验站开展长期肥料试验,以研究黄壤区长期不同施肥下作物产量及肥料效益的变化趋势,为评价和建立长期施肥模式、促进区域粮食持续生产提供依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 试验地概况

黄壤长期试验点位于贵州省贵阳市经济开发区贵州省农业科学院(26°11' N,106°07' E)内,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,相对湿度 75.5%,全年无霜期 270 d,年降雨量 1100 ~ 1200 mm. 试验地为旱地黄壤,成土母质为三叠系灰岩与砂页岩残积物. 试验开始时耕层土壤(0 ~ 20 cm)基本性质

为:有机质 15.15 g · kg⁻¹,全氮 0.85 g · kg⁻¹,全磷 0.71 g · kg⁻¹,全钾 13.29 g · kg⁻¹,碱解氮 67.9 mg · kg⁻¹,有效磷 15.9 mg · kg⁻¹,速效钾 109.2 mg · kg⁻¹,pH 值 5.39.

1.2 试验设计

长期试验从 1995 年开始,共设 12 个处理,本研究选取其中的 4 个处理;1) 不施肥(CK);2) 化肥氮磷钾配施(NPK,年施用 N 165 kg · hm⁻²、P₂O₅ 82.5 kg · hm⁻²、K₂O 82.5 kg · hm⁻²);3) NPK 配施有机肥(NPKM,年施用 N 165 kg · hm⁻²、P₂O₅ 82.5 kg · hm⁻²、K₂O 82.5 kg · hm⁻²、有机肥 30555 kg · hm⁻²);4) 单施有机肥(M,30555 kg · hm⁻²). 采用大区对比试验,不设重复,无灌溉设施. 有机肥料为新鲜农家肥,平均含 N 2.7 g · kg⁻¹、P₂O₅ 1.3 g · kg⁻¹、K₂O 6 g · kg⁻¹. 肥料全部在玉米季施用,播种前施磷钾肥或有机肥作基肥,在玉米生长期中追施 2 次氮肥(尿素),其中苗期施 69.04 kg · hm⁻²、喇叭口期施 95.96 kg · hm⁻²,冬季不施肥. 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—2010 年).

1.3 测定项目和方法

在玉米成熟时进行考种,测定株高、穗长、穗粗、穗行数、穗粒数和百粒重. 玉米成熟期剔除边行植株,在每个小区中间人工收获两行,收获后的玉米秸秆和风干籽粒均在 70 ℃ 条件下烘干 48 h,称量,计算玉米茎、叶生物产量和籽粒产量,籽粒水分控制在 12.0% 以下. 玉米收获时,每个小区各采集 5 株植株和 5 个玉米棒样品. 玉米植株和籽粒全氮、磷、钾均采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,氮采用凯氏法测定,磷采用钒钼黄比色法测定,钾采用火焰光度法测定.

1.4 数据处理

试验数据在 Excel 2010 软件上整理及作图,处理间玉米产量和肥料利用率的差异分析采用无重复双因素方差分析法,显著性水平设为 0.05,表格中数据均为平均值±标准差. 肥料利用率计算公式:氮(磷、钾)肥利用率=[施氮(磷、钾)区作物地上部分氮(磷、钾)吸收量-不施氮(磷、钾)区作物地上部分

氮(磷、钾)吸收量]/施氮(磷、钾)区肥料养分氮(磷、钾)投入量×100%; 养分吸收量=籽粒产量×籽粒养分含量+茎叶生物量×茎叶养分含量。

2 结果与分析

2.1 长期施肥对玉米产量的影响

长期施肥情况下玉米产量年际间变化较大, 总体呈上升趋势(图 1)。对照处理的(CK)玉米产量最低, 其次为单施有机肥处理(M)。在试验开始的第一年, M 处理产量明显低于氮磷钾配施处理(NPK)和化肥有机肥配施处理(NPKM), 但随着试验年数的增加, M、NPK 和 NPKM 处理玉米产量的差距逐渐缩小。

除 NPK 和 NPKM 处理的玉米产量差异不显著外, 其余处理的玉米产量存在显著性差异(表 1)。从 16 年的平均产量来看(表 1), 全量有机肥与 NPKM 处理的增产效果最好, 增产达 4075.7 kg·hm⁻², 增产率为 139.3%。其次为 NPK 处理, 增产 3432.7 kg·hm⁻², 增产率为 117.4%。M 处理的增产幅度最小, 仅增产 2321.1 kg·hm⁻², 增产率为 79.5%。

表 1 长期不同施肥模式对玉米产量的影响
Table 1 Effects of different long-term fertilization modes on maize yield

处理 Treat- ment	产量 Yield (kg·hm ⁻²)	增产 Increment (kg·hm ⁻²)	增产率 Increment rate (%)	变异系数 CV (%)
NPKM	7000.7±1615.2c	4075.7	139.3	23.1
NPK	6357.7±1594.8c	3432.7	117.4	25.1
M	5249.1±1612.2a	2324.1	79.5	30.7
CK	2925.0±1594.7b	0	0	54.5

CK: 对照 Control; M: 有机肥 Manure 30555 kg·hm⁻²; NPKM: N 165 kg·hm⁻², P₂O₅ 82.5 kg·hm⁻², K₂O 82.5 kg·hm⁻², M 30555 kg·hm⁻²; NPK: N 165 kg·hm⁻², P₂O₅ 82.5 kg·hm⁻², K₂O 82.5 kg·hm⁻²。同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)) Different small letters in the same column meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The ame below.

表 2 各施肥处理下玉米经济性状
Table 2 Maize economic characters under different fertilization treatments

指标 Indicator	CK	NPK		NPKM		M	
		数值 Value	增幅 Increment rate (%)	数值 Value	增幅 Increment rate (%)	数值 Value	增幅 Increment rate (%)
株高 Height (cm)	171.2±29.2	224.3±27.2	31.0	229.8±30.5	34.2	216.5±29.1	26.5
穗长 Ear length (cm)	13.2±3.4	18.0±1.3	36.4	18.1±1.7	37.1	17.0±2.0	28.8
穗行数 Number of kernel rows	12.4±2.0	13.9±2.3	12.1	14.4±2.3	16.1	14.0±2.0	12.9
穗粗 Ear width (cm)	4.0±0.5	4.8±0.4	20.0	4.8±0.3	20.0	4.7±0.4	17.5
百粒重 100-seed mass (g)	25.7±4.7	34.4±4.4	33.9	34.0±4.1	32.3	32.9±5.0	28.0
穗粒数 Ear kernel number	269±94.9	430±67.6	59.9	454±75.1	68.8	426±74.1	58.4

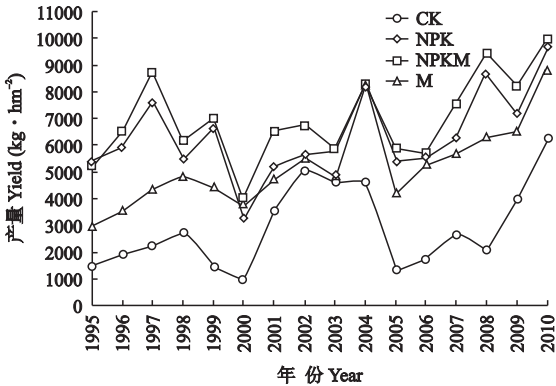


图 1 长期施肥下玉米产量的变化
Fig. 1 Change of maize yield under long-term fertilization.
CK: 对照 Control; M: 有机肥 Manure 30555 kg·hm⁻²; NPKM: N 165 kg·hm⁻², P₂O₅ 82.5 kg·hm⁻², K₂O 82.5 kg·hm⁻², M 30555 kg·hm⁻²; NPK: N 165 kg·hm⁻², P₂O₅ 82.5 kg·hm⁻², K₂O 82.5 kg·hm⁻²。下同 The same below.

2.2 长期施肥对玉米经济性状的影响

对黄壤旱地长期施肥下玉米经济性状进行统计分析(1995—2010 年)(表 2), 发现变幅最大的是穗粒数, 变幅最小的是穗行数, 株高、穗长、百粒重等指标的变幅比较接近, 均在 30% 左右。与对照相比, 各种施肥方式均能提高玉米经济性状。其中, NPKM 处理对提高玉米株高、穗长、穗行数和穗粒数的作用明显。在增加穗粗方面, NPK 和 NPKM 处理作用一致。NPK 处理对提高百粒重的作用大于 M 和 NPKM 处理。

2.3 长期施肥对作物肥料利用率的影响

2.3.1 氮肥利用率 不同施肥方式下作物氮肥利用率年际间变化较大(图 2)。2000 年以前, NPK 处理的氮肥利用率最高, 其次为 NPKM 处理。2000—2004 年间, M 处理的氮肥利用率高于其他处理, 而 NPK 处理的氮肥利用率最低。2005—2008 年间, 3 种施肥处理的氮肥利用率比较接近。从 2009 年开始, 各处理间氮肥利用率差异逐渐增大。

表 3 各处理肥料利用率
Table 3 Fertilizer utilization rate in different treatments

肥料类型 Fertilizer type		肥料利用率 Fertilizer utilization rate	M	NPK	NPKM
氮肥 N fertilizer	利用率 Utilization rate (%)		22.1±10.1a	23.6±8.3a	20.6±6.6a
	变异系数 CV (%)		45.7	35.2	32.2
	累积距平值 Cumulative anomaly (%)		0.07	0.05	0.05
磷肥 P fertilizer	利用率 Utilization rate (%)		10.9±5.2a	4.8±2.3b	11.9±3.6a
	变异系数 CV (%)		47.6	48.1	30.0
	累积距平值 Cumulative anomaly (%)		0.02	0.07	0.01
钾肥 K fertilizer	利用率 Utilization rate (%)		5.3±2.8a	8.2±3.1b	16.6±7.7a
	变异系数 CV (%)		53.2	37.8	46.4
	累积距平值 Cumulative anomaly (%)		-0.03	0.01	0.01

同行不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different small letters in the same row meant significant difference at 0.05 level.

总体上,M 处理的氮肥利用率呈现逐年增加的趋势,施肥 16 年后,氮肥利用率提高 35.4%. NPKM 处理的氮肥利用率也提高了 19.2%. 而 NPK 处理的氮肥利用率波动较大,施肥 16 年后略高于试验前水平.

2.3.2 磷肥利用率 长期施肥可以提高作物磷肥利用率(图 2). 1995—1999 年间,NPKM 处理的磷肥利

用率明显高于 M 和 NPK 处理. 随着施肥年限的增加,施有机肥处理较不施有机肥处理的优势越来越明显,尤其是 M 处理的肥料利用率与 NPKM 处理相当,有些年份甚至超过 NPKM 处理. 施肥 16 年后,M 处理的磷肥利用率提高 18.8%,NPKM 处理提高 10.6%,NPK 处理提高 5.2%.

2.3.3 钾肥利用率 长期施肥情况下作物钾肥利用率呈增加趋势(图 2). 3 种施肥处理的钾肥利用率表现为:NPK 处理>NPKM 处理>M 处理. 施肥 16 年后,NPK 处理的钾肥利用率提高了 20%;NPKM 处理提高了 8.7%;M 处理提高了 9.2%.

2.3.4 长期施肥下肥料利用率稳定性 结合肥料利用率的变异系数和累积距平值(表 3)可以发现,3 种处理中 NPKM 处理的氮肥、磷肥利用率稳定性更好,而 NPK 处理的钾肥利用率稳定性最好.

3 讨 论

本试验玉米产量年际间变化较大,可能与品种更换有关. 1995—2005 年更换了 4 个玉米品种,玉米产量均波动较大. 长期施用有机肥、化肥可提高黄壤玉米产量. 这与多位学者在棕壤^[4]、褐潮土^[8]、红壤^[19-20]、潮土^[21] 的长期试验结果相近. 而李忠芳等^[22]通过对全国范围内的长期试验分析发现,氮磷钾配施(NPK)处理会造成玉米产量随种植时间呈极显著下降趋势. 氮磷钾化肥与有机肥配施(NPKM)处理不仅可以持续高产,而且可获得比 NPK 化肥处理更高的产量,本研究黄壤 NPKM 处理结果与众多学者的研究结果一致^[19,21,23-24],但黄壤 NPK 处理玉米产量下降趋势较缓. 单施有机肥(M)处理前几年玉米产量明显低于其他处理,随着施肥年限的增加,玉米产量与其他施肥处理接近,这与有机肥平缓持久不断累积的肥效有关. 从 2008 年开

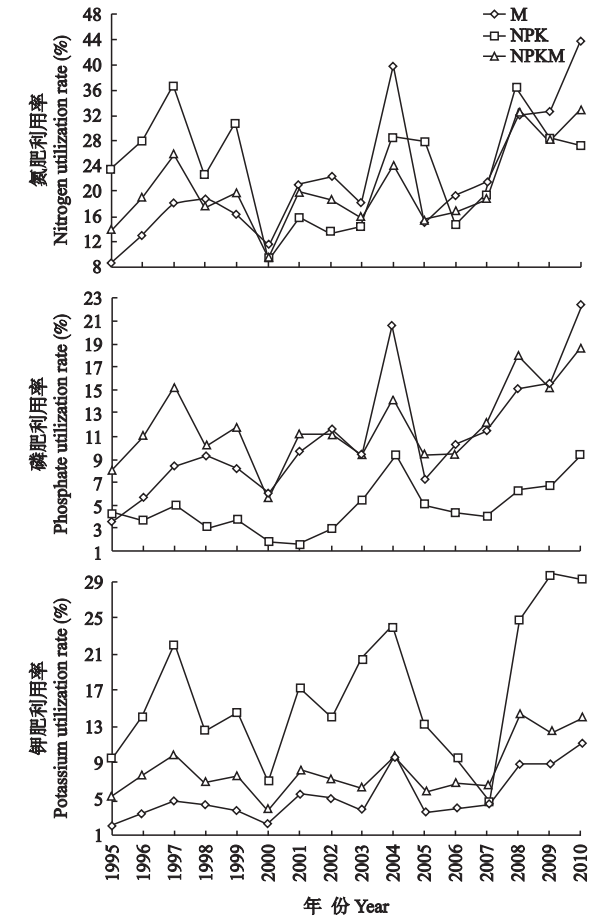


图 2 长期施肥对作物肥料利用率的影响
Fig. 2 Effects of long-term fertilization on crop fertilizer utilization rate.

始,对照(CK)处理的玉米产量呈明显增加趋势,这可能与气候因素有关。从稳产性来看,NPKM 处理的稳产性最高(变异系数为 23.1%),其次为 NPK 处理(变异系数为 25.1%),CK 的稳产性最差(变异系数高达 54.5%),NPKM 处理具有较高稳产性的结果对指导玉米生产有重要意义。

不论是单施有机肥还是将其与化肥混施均可提高氮肥的利用率。在其他类型土壤,如潮土^[25]、红壤^[12]上也有相同的研究结果。黄壤 NPK 处理玉米对氮肥的利用率波动较大,施肥 16 年后略高于试验前的水平,这与潮土中玉米对氮肥利用率的变化情况相似^[25]。而红壤虽然 NPK 处理的氮肥利用率也存在一定的波动,但呈逐年下降趋势^[12]。可见,NPK 在不同土壤类型上对氮肥利用率的影响不同。M 或 NPKM 对提高磷肥利用率的作用大于 NPK,而 NPK 玉米钾肥利用率显著高于 M 和 NPKM。就不同施肥措施对肥料利用率的影响来看,NPKM 处理的氮肥、磷肥利用率较高、稳定性更好,而 NPK 处理的钾肥利用率最高,稳定性最好。

参考文献

- [1] Lin B (林葆), Lin J-X (林继雄), Li J-K (李家康). The changes of crop yield and soil fertility with long-term fertilizer application. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 1994 (1): 6-18 (in Chinese)
- [2] Sun B (孙波), Zhu Z-L (朱兆良), Niu D (牛栋). Long-term experimental research on long-term ecological processes in agro-ecosystems: A review. *Soils* (土壤), 2007, **39**(6): 849-854 (in Chinese)
- [3] Wu L-Z (吴乐知), Cai Z-C (蔡祖聪). Estimation of the change of topsoil organic carbon of croplands in China based on long-term experimental data. *Ecology and Environment* (生态环境), 2007, **16**(6): 1768-1774 (in Chinese)
- [4] Dong X (董旭), Lou Y-L (娄翼来). Effect of long-term fertilization on soil nutrients and corn yield. *Modern Agricultural Sciences* (现代农业科学), 2008, **15**(1): 9-11 (in Chinese)
- [5] Wang F-Y (王锋有), Dong X (董旭). Effect of long-term located fertilization on cultivated soil characteristics and corn yield. *Agricultural Science & Technology and Equipment* (农业科技与装备), 2008(2): 19-21 (in Chinese)
- [6] Huang S-M (黄绍敏), Bao D-J (宝德俊), Huangfu X-R (皇甫湘荣), et al. Effect of long-term fertilization on fertilizer utilization efficiency on maize in fluvo-aquic soil. *Journal of Maize Science* (玉米科学), 2006, **14**(4): 129-133 (in Chinese)
- [7] Cai Z-C (蔡祖聪), Qin S-W (钦绳武). Crop yield, N use efficiency and environmental impact of a long-term fertilization experiment in fluvo-aquic soil in North China. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2006, **43**(6): 885-891 (in Chinese)
- [8] Liu E-K (刘恩科), Zhao B-Q (赵秉强), Hu C-H (胡昌浩), et al. Effects of long-term nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer applications on maize yield and soil fertility. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2007, **13**(5): 789-794 (in Chinese)
- [9] Li X-W (李新旺), Men M-X (门明新), Wang S-T (王树涛), et al. The effects of long-term fertilization on crop yields and farmland nutrient equilibrium. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2009, **18**(1): 9-16 (in Chinese)
- [10] Sun H (孙好). Effect of Long-term Fertilization on the Red Soil Fertility and Crops. Master Thesis. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2009 (in Chinese)
- [11] Yu T-Y (于天一), Li Y-Y (李玉义), Feng H-C (逢焕成), et al. Effects of long-term no phosphorus fertilization to upland red soil nutrients ratio and maize yield. *Soil and Fertilizer Sciences in China* (中国土壤与肥料), 2010(2): 25-28 (in Chinese)
- [12] Duan Y-H (段英华), Xu M-G (徐明岗), Wang B-R (王伯仁). Effects of long-term different fertilization on nitrogen recovery efficiency of maize in red soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2010, **16**(5): 1108-1113 (in Chinese)
- [13] 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, phosphorous and potassium. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2011, **17**(1): 71-78 (in Chinese)
- [14] Zhu P (朱平), Peng C (彭畅), Gao H-J (高洪军), et al. The effects of long-term fertilization on corn yields and soil fertility. *Journal of Maize Sciences* (玉米科学), 2009, **17**(6): 105-108 (in Chinese)
- [15] Li L (李玲). Effect of Different Fertilization Methods and Climatic Factors on Crop Yield and Soil Fertility. Master Thesis. Harbin: Northeast Agricultural University, 2010 (in Chinese)
- [16] Zhou B-K (周宝库). Changes of Black Soil Fertility under Long-term Fertilization. Master Thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011 (in Chinese)
- [17] Xiong Y (熊毅), Li Q-K (李庆远). Soil in China. 2nd Ed. Beijing: Science Press, 1987 (in Chinese)
- [18] The Soil Census Office of Guizhou Province (贵州省土壤普查办公室). Soil in Guizhou Province. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1994 (in Chinese)
- [19] 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)

[20]

Kong H-M (孔宏敏), He Y-Q (何圆球), Wu D-F (吴大付), *et al.* Effect of long-term fertilization on crop yield and soil fertility of upland red soil. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15** (5): 782–786 (in Chinese)

[21]

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. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2012, **18**(4): 796–802 (in Chinese)

[22]

Li Z-F (李忠芳), Xu M-G (徐明岗), Zhang H-M (张会民), *et al.* Grain yield trends of different food crops under long-term fertilization in China. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2009, **42** (7): 2407–2414 (in Chinese)

[23]

Yu T-Y (于天一), Feng H-C (逢焕成), Li Y-Y (李玉义), *et al.* Effects of long-term fertilization on photosynthetic characteristics and yield of spring maize in upland red soil. *Journal of China Agricultural University* (中国农业大学学报), 2013, **18**(2): 17–21 (in Chinese)

[24]

Bao Y-X (包耀贤), Huang Q-H (黄庆海), Xu M-G (徐明岗), *et al.* Assessment and effects of integrated soil fertility in red paddy soil under different long-term fertilization. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2013, **19**(1): 78–85 (in Chinese)

[25]

Huang S-M (黄绍敏). Studies on Fertility Evolution and Sustainable Utilization of Fluvo-aquic Soil under Different Long-term Fertilization Patterns. PhD Thesis. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2006 (in Chinese)

作者简介

罗龙皂,男,1985 年生,硕士,研究实习员. 主要从事土壤环境质量研究. E-mail: luolongzao@sina.com

责任编辑

张凤丽