

长期施肥对红壤 pH、作物产量及氮、磷、钾养分吸收的影响*

蔡泽江, 孙楠, 王伯仁*, 徐明岗, 黄晶, 张会民

(农业部作物营养与施肥重点开放实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 在湖南祁阳典型红壤上进行不同施肥长期定位试验 18 年, 观测了土壤 pH、作物产量和氮、磷、钾养分吸收量的变化。结果表明, 长期施用化学氮肥(单施氮肥、氮磷配施和氮磷钾配施)红壤 pH 明显下降, 其中以单施氮肥降幅最大, 18 年降低了 1.5 个单位; pH 降低主要发生在施肥的前 8~10 年, 当 pH 下降到 4.5 时, 其下降速度趋于缓慢并相对稳定。施用有机肥(化学肥料配施有机肥和单施有机肥), 土壤 pH 保持稳定或较试验开始有所升高, 以单施有机肥处理 pH 升幅最大, 升高 1.0 个单位。不施肥和施用化学氮肥的作物产量随着施肥年限均显著降低, 其中小麦产量平均每年下降 11~104 kg/hm², 玉米产量平均每年下降 24~210 kg/hm²; 而施用有机肥的作物产量保持稳定或稳定增加, 其中化学肥料配施有机肥的玉米产量平均每年增加 101 kg/hm²。施用化学氮肥处理(除氮磷钾配施处理的玉米外)作物产量和氮、磷、钾养分吸收量与土壤 pH 均存在极显著正相关。可见, pH 降低是作物产量和氮、磷、钾养分吸收降低的主要原因之一; 而施用有机肥能改善红壤酸度, 尤其是化学肥料配施有机肥能获得持续高产, 是红壤区的最佳施肥模式。

关键词: 长期施肥; 红壤; pH; 作物产量; 养分吸收量

中图分类号: S51.06.01

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2011)01-0071-08

Effects of long-term fertilization on pH of red soil, crop yields and uptakes of nitrogen, phosphorous and potassium

CAI Ze-jiang, SUN Nan, WANG Bo-ren*, XU Ming-gang, HUANG Jing, ZHANG Hui-min

(Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization/

Institute of Agricultural Resource and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The effects of long-term (18 years) fertilization on pH of red soil, crop yields and uptakes of nitrogen, phosphorus and potassium were investigated in a wheat-maize experiment located in Qiyang, Hunan province. The results indicate that pH values of the red soil are significantly decreased under the applications of chemical nitrogen fertilizers, single application of chemical nitrogen fertilizer, mixed-application of chemical nitrogen and phosphorus fertilizers and mixed-application of chemical nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers. The greatest decrease of 1.5 units of soil pH under the single chemical nitrogen fertilizer treatment is observed after 18 years fertilization compared with its initial pH value. The soil pH values under the chemical nitrogen fertilizer treatments are decreased significantly and then become stable after 8–10 years when soil pH ≤ 4.5, while the application of manure or manure combined with chemical fertilizers could maintain or increase soil pH compared with their initial pH values of the experiment, in which the highest increase value of 1.0 unit is found in the manure treatment. Compared with the corresponding initial yields of the experiment, the yields for the no fertilizer and chemical nitrogen fertilizer treatments show decline trends of 11 to 104 kg/(ha · a) for wheat and 24 to 210 kg/(ha · a) for maize, respec-

收稿日期: 2010-02-10

接受日期: 2010-07-07

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2009-8); 国家“十一五”重点科技支撑计划项目(2006BAD05B09, 2006BAD02A14)资助。

作者简介: 蔡泽江(1982—), 男, 河北迁西人, 硕士, 主要从事长期施肥与红壤酸化方面研究。E-mail: caizejiang2006@126.com

* 通讯作者 Tel: 0746-3841027, E-mail: wangboren1@163.com

本研究在祁阳农田生态系统国家野外试验站完成。

tively. However, in the manure combined with chemical fertilizers treatment, the yield of wheat has no remarkable change, and the yield of maize is increased 101 kg/(ha · a). The yields and uptakes of nitrogen, phosphorus and potassium for wheat and maize have significant positive correlations with soil pH under the chemical nitrogen fertilizer treatments (except yield and uptake in the treatment of mixed-application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers). Soil acidification is one of the main factors limiting nutrient uptakes and crop yields. Application of manure could increase soil pH value, decrease soil acidity. Addition of manure combined with chemical fertilizers could maintain high yields of wheat and maize in the long run and is the best fertilization mode.

Key words: long-term fertilization; red soil; pH; crop yield; nutrient uptake

红壤是我国南方地区重要的土壤类型之一,遍及南方 13 个省(区)、619 个县(市),面积 113 万 km²,占全国土壤面积的 11%^[1],对我国粮食安全起着非常重要的作用。但近年来红壤酸化较为严重,根据 1998 年有关监测结果与第二次土壤普查时(pH 大多在 6.0~6.5)相比较,土壤 pH 大约下降了 0.2~0.5 个单位^[2]。土壤 pH 降低导致铝、锰等对植物的毒害及 Ca、Mg 等营养元素的缺乏,从而使作物减产^[3],严重影响甚至制约了红壤地区农业的持续发展。在自然条件下,土壤酸化是一个非常缓慢的过程,但由于人为活动的影响,比如酸沉降和不当的农田施肥措施等加速了土壤酸化过程^[4-6]。近 20 年来,对酸沉降(或酸雨)与土壤酸化的关系进行了较多的研究,而对农田施肥措施在土壤酸化中的作用关注相对较少。Zhao 等^[7]对中国南部的亚热带砂岩母质发育的土壤研究表明,施入氨基氮肥能促进土壤的硝化酸化作用。张喜林等人^[8]对黑土研究表明,连续 27 年施尿素 N 150~300 kg/(hm² · a)后耕层土壤 pH 下降了 1.5 个单位;董炳友等^[9]研究表明,在白浆土上长期施用化学肥料和秸秆还田均能加速土壤酸化;江东吉等^[10]研究看出,连续 3 年有机无机肥配合施用,土壤 pH 随着无机肥施用比例的增加而显著降低。曾清如等^[11]和石锦芹等^[12]分别通过室内培养和土柱模拟试验证明,在红壤上施入尿素能显著降低土壤 pH。可见,土壤酸化与氮肥施用密切相关。但是,现有对土壤酸化的研究大多集中在土壤酸化对土壤理化性质及元素循环的影响方面^[13-15],而关于红壤区农田土壤酸化对作物产量和氮、磷、钾养分吸收的影响研究较少,基于长期定位试验的研究则更少^[6]。为此,本试验分析了长期不同施肥对红壤 pH、作物产量和氮、磷、钾养分吸收的影响,以期对红壤肥力培育施肥模式选择和合理施用氮肥提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

红壤肥力长期试验位于湖南省祁阳县,中国农业

科学院衡阳红壤实验站内(东经 111°52'32",北纬 26°45'12"),海拔高度约为 120 m;年平均温度 18.0℃,最高温度 36.6~40.0℃,大于或等于 10.0℃的积温 5600℃,年降水量 1250 mm,年蒸发量 1470 mm,无霜期约为 300 d,年日照时数 1610~1620 h。试验地处丘岗中部,成土母质为第四纪红壤,根据中国土壤分类系统,属于硅铁质红壤,土壤中粘土矿物主要以高岭石为主。试验开始时 1990 年的土壤基本性质为:有机质 11.5 g/kg,全氮 1.07 g/kg,全磷 0.52 g/kg,全钾 1.37 g/kg,碱解氮 79.0 mg/kg,速效磷 13.9 mg/kg,速效钾 104 mg/kg,pH 值 5.7,阳离子交换量 8.99 cmol(+)/kg,交换性酸和交换性铝分别为 0.27 cmol(+)/kg 和 0.17 cmol(+)/kg。

1.2 试验设计

长期试验共设置 12 个不同施肥处理,本试验选择其中的 6 个处理,即:1)不施肥对照(CK),2)单施氮肥(N),3)氮磷配施(NP),4)氮磷钾配施(NPK),5)有机肥(M),6)化学肥料配施有机肥(NPKM)。试验采用小麦-玉米轮作的一年两熟制。肥料用量为等氮量 N 300 kg/hm²,磷、钾肥用量为 P₂O₅、K₂O 各 120 kg/hm²;其中玉米施用肥料量占总施肥量的 70%,小麦占总施肥量的 30%。在有机肥化学肥料配施处理中,有机氮量占全氮的 70%。氮肥用尿素(含 N 46%),磷肥用过磷酸钙(含 P₂O₅ 12.5%),钾肥用氯化钾(含 K₂O 60%),有机肥用猪粪。所有肥料于小麦、玉米播种时一次性基施^[16]。该长期试验为大区试验(小区面积 196 m²),试验开始于 20 年以前;受当时条件的限制只设置 2 次重复。为了减少这方面的缺陷,采样时将每个小区均匀分成 3 个亚区;其中每个亚区内 50 m² 为 1 样方测定作物产量;植株样品采集为每个亚区随机采玉米 10 株、小麦 50 株;土壤样品于每年玉米收获后采集,每个亚区按“之”字型用土钻取 0—20 cm 具有代表性的样点 5 个,混合均匀,自然风干后,磨细过 1 mm 筛备用。

1.3 样品分析方法

每隔 1 年的土样用于 pH 的测定,测定方法为电位

法,水土比 5:1。作物秸秆和子粒全氮分析用 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 消煮—凯氏定氮法测定,全磷用 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 消煮—钼锑抗比色法测定,全钾用 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 消煮—火焰光度计法测定^[17]。所有测定为 2 次重复。

试验数据采用 EXCEL2003 进行分析,处理间显著性用 SPSS 16.0 软件分析。

2 结果与分析

2.1 长期施肥对红壤 pH 的影响

不同施肥处理 18 年后,红壤 pH 的大小顺序是: $\text{N} < \text{NP} < \text{NPK} < \text{CK} < \text{NPKM} < \text{M}$ (图 1)。在施用化学氮肥(N、NP 和 NPK)处理中,土壤 pH 都有所降低,其中以 N 处理降幅最大,降低了 1.5 个单位;其次是 NP 和 NPK 处理,pH 分别下降了 1.3 和 1.2 个单位;CK 处理土壤 pH 与试验之初相比没有显著变化,且显著高于 N、NP 和 NPK 处理。可见,施用化学氮肥是导致红壤 pH 降低的主要原因之一,这与 Guo 等人^[18]的研究结果类似。与 1990 年的基础土样相比,施用有机肥(化学肥料配施有机肥和单施有机肥)处理土壤 pH 保持稳定或有所升高,以单施有机肥 pH 升高最大,达 1.0 个单位。从

土壤 pH 的变化还可看出,在施用化学氮肥的处理中,施肥的前 8~10 年红壤 pH 下降较快,而后当 $\text{pH} \leq 4.5$ 时趋于稳定。造成土壤 pH 这种变化特征可能是在红壤地区,当 pH 低于 4.5 时,作物产量显著降低,从土壤中带走的碱性物质明显减少^[19];而且当 pH 低于 4.5 时,土壤酸碱缓冲体系也发生了变化^[20]。

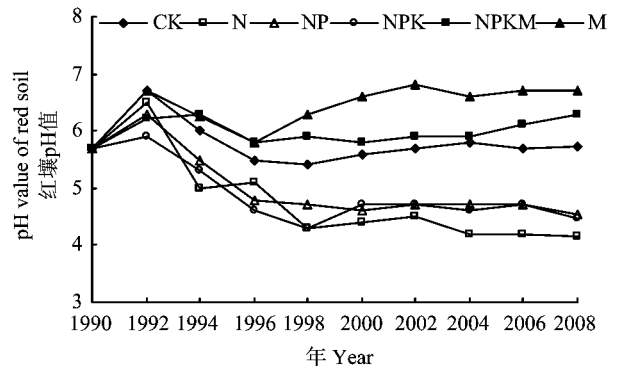


图 1 长期不同施肥下红壤 pH 值的变化

Fig. 1 Changes of pH of red soil under the long-term fertilization

2.2 长期施肥对作物产量的影响

图 2 显示,随施肥年限的延长,不施肥对照和施

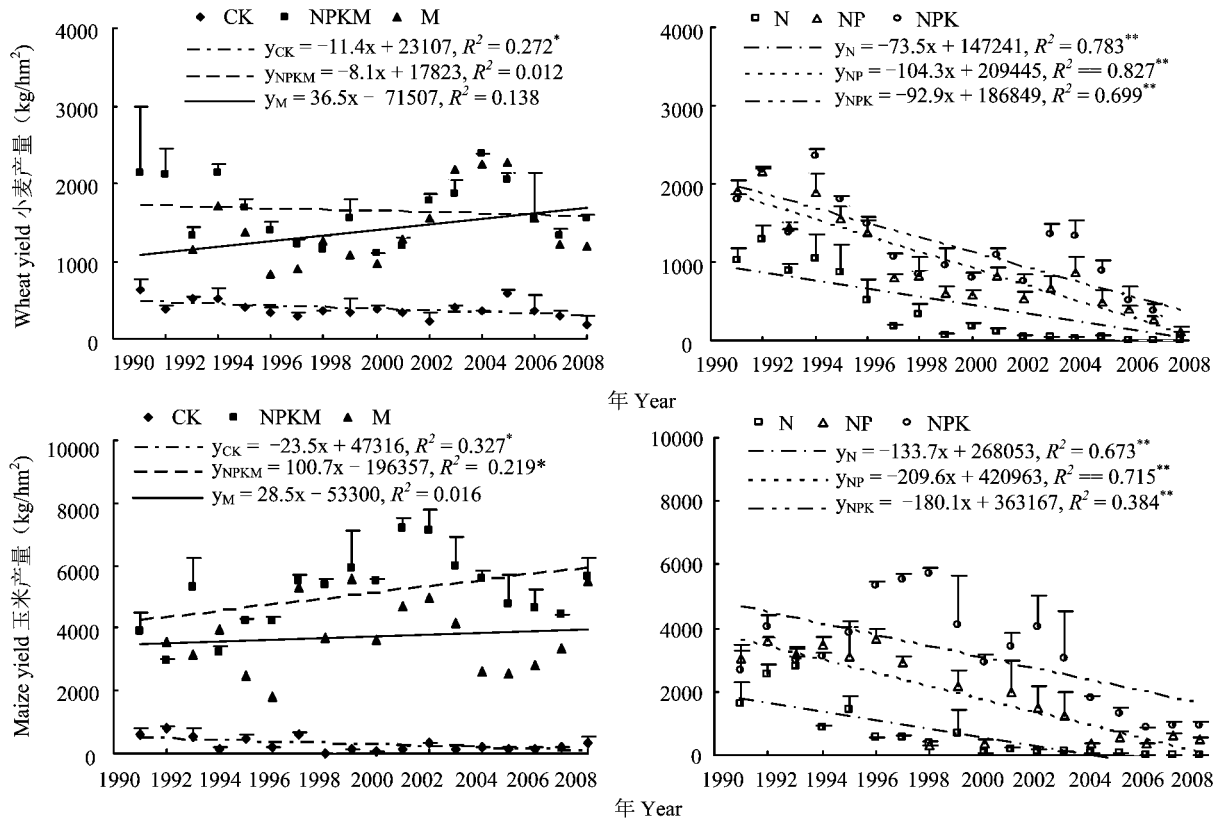


图 2 长期不同施肥下红壤小麦、玉米产量的变化

Fig. 2 Changes of the yields of wheat and maize under the long-term fertilization on red soil

[注 (Note): Y—产量 Yield(kg/hm²); x—年份 year; *— <5%; **— <1%]

用化学氮肥处理小麦产量均表现为下降趋势,差异显著,小麦产量平均年降低 $11 \sim 104 \text{ kg/hm}^2$; 施用有机肥(NPKM 和 M)处理小麦产量没有发生显著变化,其中 NPKM 处理平均产量(1639 kg/hm^2)显著高于其他处理。不施肥和施用化学氮肥处理玉米产量的变化与小麦产量相同,平均年降低 $24 \sim 210 \text{ kg/hm}^2$; M 处理玉米产量没有显著降低或升高,而 NPKM 处理则随着施肥年限的延长显著升高,平均产量达 5076 kg/hm^2 ,年增加 101 kg/hm^2 。将作物产量和红壤 pH 进行相关分析表明,N、NP、NPK 处理小麦产量与土壤 pH 均达到了极显著正相关,相关系数分别为 0.815^{**} 、 0.814^{**} 、 0.675^{**} ; N、NP 处理玉米产量与 pH 的相关系数分别

为 0.926^{**} 、 0.720^{**} ,也均达到了极显著正相关。而 CK、NPKM、M 处理小麦和玉米产量与土壤 pH 均未达到显著相关水平。可见,不合理的施用化学肥料,尤其是不合理施用化学氮肥,导致红壤 pH 降低是作物产量降低的主要原因之一。从作物产量的变化可以发现,当红壤 pH 下降到 4.2 时,小麦和玉米绝产,这与陈梅等人^[21]的研究结果一致。

2.3 长期施肥对作物地上部(秸秆和子粒)氮、磷、钾养分吸收的影响

不施肥和施用化学氮肥处理,小麦和玉米对氮、磷、钾的吸收量均随着施肥年限的延长显著降低。图 3 和图 4 看出,施用有机肥(M)处理小麦和玉米

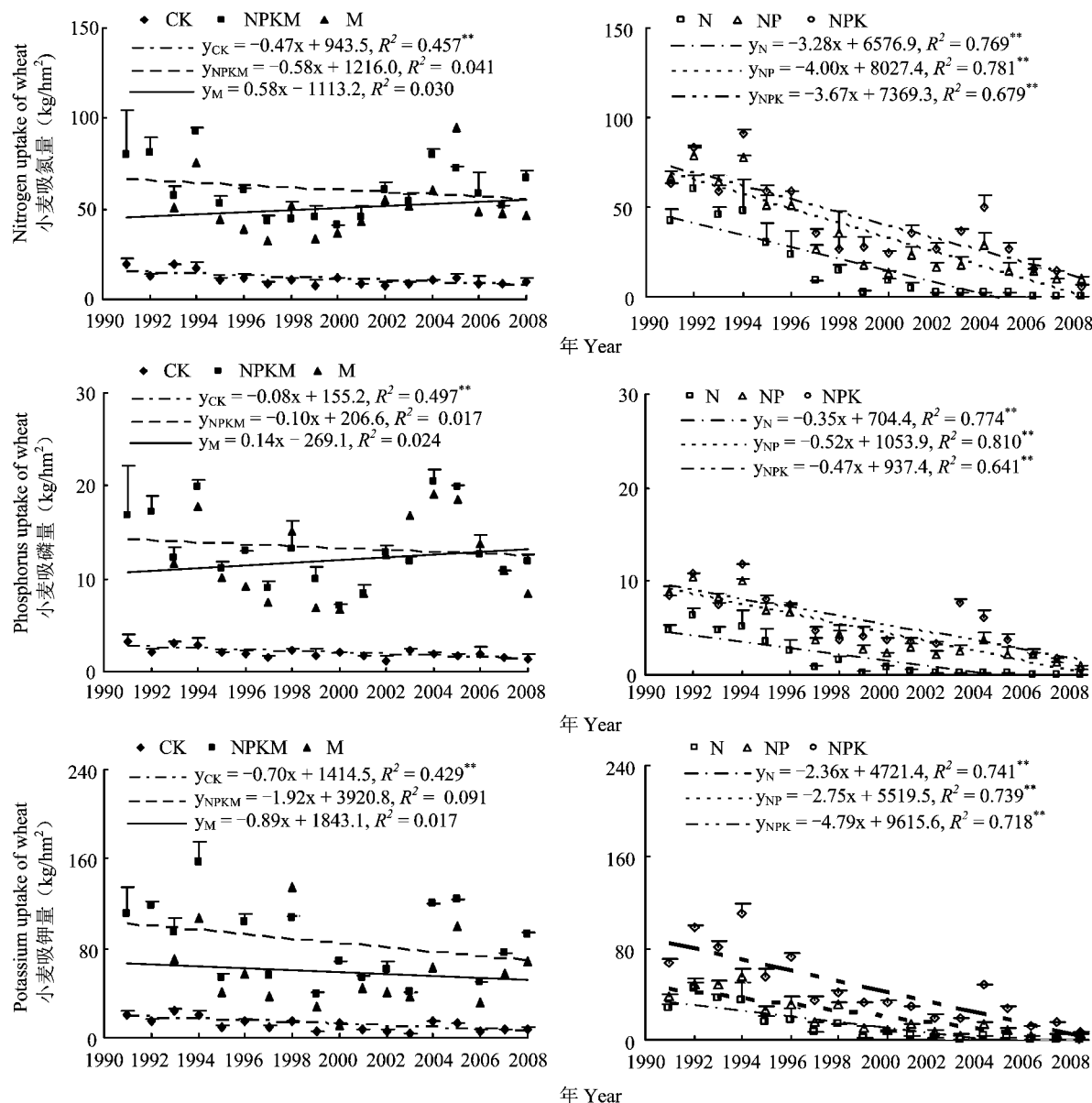


图 3 长期不同施肥下小麦地上部(秸秆和子粒)氮、磷、钾养分吸收量的变化

Fig. 3 Changes of the uptakes of N, P and K by shoot of wheat under the long-term fertilization

[注(Note): y—吸收量 Uptake(kg/hm²); x—年份 year; *— $<5\%$; **— $<1\%$]

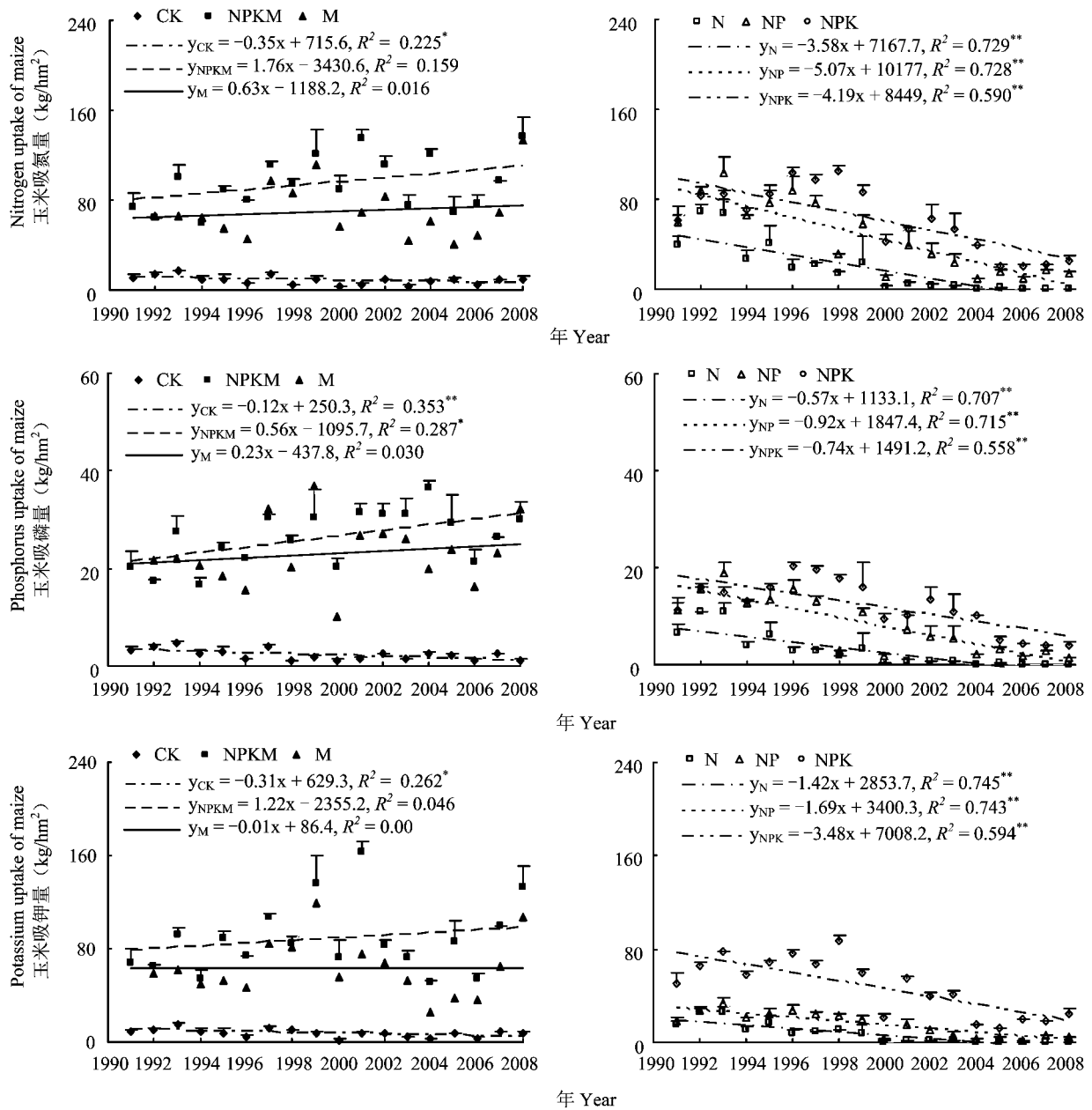


图4 长期不同施肥下玉米地上部(秸秆和子粒)氮、磷、钾养分吸收量的变化

Fig.4 Changes of the uptakes of N, P and K by shoot of maize under the long-term fertilization

[注(Note): y—吸收量 Uptake(kg/hm²); x—年份 year; *— <5%; **— <1%]

对氮、磷、钾吸收量没有显著变化, NPKM 处理玉米吸磷量随施肥年限延长显著增加, 而小麦对磷吸收无明显变化, 说明施用有机肥料作物地上部生物产量比较稳定。作物对氮、磷、钾养分的吸收量与土壤 pH 的相关分析表明(表 1), N、NP 处理小麦和玉米对氮、磷、钾养分的吸收量与 pH 呈极显著正相关; NPK 处理小麦对氮、磷、钾养分的吸收量与 pH 也呈极显著正相关; CK 处理的小麦对氮、钾的吸收量与 pH 呈显著性正相关, 而玉米对磷、钾的吸收量与 pH 分别呈极显著和显著性正相关; NPKM 和 M 处理作

物对氮、磷、钾养分吸收量与土壤 pH 没有显著相关性。说明红壤 pH 降低影响小麦和玉米氮、磷、钾养分吸收量, 从而影响了小麦和玉米的产量。

3 讨论

3.1 长期施肥对红壤 pH 的影响

当施入土壤的铵态氮肥超过作物需要量时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 硝化及硝酸根的淋洗会导致土壤酸化^[1,4,22]。本研究证明, 在红壤旱地上长期施用化学氮肥 [N 300 kg/(hm² · a)] 加剧了土壤酸化, 尤以单施化学

表 1 长期不同施肥下作物地上部(秸秆和子粒)氮、磷、钾吸收量与土壤 pH 的相关系数(r)

Table 1 The correlation coefficients between the uptakes of N, P and K by the shoots of wheat and maize and soil pH values

处理 Treatment	小麦 Wheat			玉米 Maize		
	吸氮量 N uptake	吸磷量 P uptake	吸钾量 K uptake	吸氮量 N uptake	吸磷量 P uptake	吸钾量 K uptake
CK	0.554 *	0.445	0.522 *	0.490	0.636 **	0.515 *
N	0.831 **	0.829 **	0.812 **	0.919 **	0.933 **	0.905 **
NP	0.872 **	0.864 **	0.860 **	0.771 **	0.773 **	0.709 **
NPK	0.750 **	0.686 **	0.762 **	0.293	0.259	0.395
NPKM	0.084	-0.055	0.032	-0.158	-0.326	0.000
M	0.130	-0.145	-0.134	0.126	0.000	-0.032

注(Notes): *— $<5\%$; **— $<1\%$.

氮肥土壤 pH 降幅最大;其次是氮磷肥配施和氮磷钾肥配施。当化学氮配施磷肥时,增加了作物的生物量,提高了对氮的吸收和水分的利用,相对降低了土壤 NO_3^- -N 的累积和淋洗^[23-24];不施肥处理土壤 pH 与试验之初相比没有发生显著的变化,表明该区域酸沉降对土壤酸化的贡献较小。从土壤 pH 的变化趋势看出,土壤 pH 的降低主要发生在施肥的前 8~10 年,也就是当 $\text{pH} > 4.5$ 时。根据廖柏寒和戴昭华^[20]对土壤酸碱缓冲机制的研究结果,土壤酸碱缓冲过程为 2 种机制:1)阳离子交换产生的缓冲过程,称为初级缓冲过程,在反应动力学上有较快的反应速率,且与土壤阳离子代换量相关;2)是土壤风化产生的缓冲过程,缓冲能力较强,但动力学上反应速率较慢,称为次级缓冲过程。随着施肥年限的增加,2 个过程通过土壤 pH 的变化快慢来反映。可见,在土壤 $\text{pH} > 4.5$ 时,土壤处在初级缓冲体系, pH 下降很快;当土壤 $\text{pH} \leq 4.5$ 时破坏了初级缓冲体系,继续加入大量的 H^+ 后,土壤次级缓冲体系开始发挥作用, pH 随之在较低水平上趋于稳定。而施用有机肥能改善红壤酸度一方面是归还部分碱性物质,另一方面通过络合作用降低土壤交换性铝的含量^[25]。

3.2 长期施肥对作物产量和氮、磷、钾养分吸收量的影响

研究表明,土壤 pH 的降低与作物产量和作物地上部氮、磷、钾养分吸收量的降低在时间上存在一致性,达显著正相关关系,这可能与酸化发生时作物遭受不同程度铝毒害有关。当土壤的 pH 低于 5.5 时,层状铝硅酸盐粘土矿物和铝氢氧化物矿物开始溶解,释放出羟基铝阳离子和 Al^{3+} 离子^[26],使小麦和玉米的生长受到严重的影响^[27-28]。余国泰

和秦遂初^[29]研究表明,在有充足氮、磷、钾基肥的土壤上,在交换性铝 1.83 cmol/kg 的土壤上小麦产量减少一半;而在交换性铝 6.05 cmol/kg 的土壤上几近绝收。秦瑞君和陈福兴^[30]认为,红壤旱地作物铝毒害的交换性铝临界指标为:小麦 4.0 cmol/kg、玉米 4.8 cmol/kg。徐明岗等人^[24]对本试验土壤的研究看出,截止到 2004 年 N、NPK 处理交换性铝含量分别为 5.66 和 5.16 cmol/kg,已经远超过小麦和玉米铝毒临界浓度,严重限制了小麦和玉米的生长。当土壤 $\text{pH} \leq 4.5$ 时,虽然酸化土壤已进入次级缓冲体系, pH 趋于稳定,但向土壤中加入 H^+ 仍然会有交换性铝溶出^[31],进一步加强对作物的毒害作用。因此,在施用化学氮肥处理中,作物产量随施肥年限的增加逐年降低,且当土壤 pH 4.2 时,小麦和玉米绝产;而施用有机肥对土壤铝毒有缓解作用^[21,29,32]。

参考文献:

- [1] 许中坚,刘广深,刘维屏. 人为因素诱导下的红壤酸化机制及其防治[J]. 农业环境保护,2002,21(2): 175-178.
Xu Z J, Liu G S, Liu W P. Mechanism and control of red soil acidification induced by man-made factors[J]. Agro-Environ. Protec., 2002, 21(2): 175-178.
- [2] 曾希柏. 红壤酸化及其防治[J]. 土壤通报,2000,31(3): 111-113.
Zeng X B. Acidification of red soils and control methods[J]. Chin. J. Soil Sci., 2000, 31(3): 111-113.
- [3] Ritchie G P. The chemical behavior of aluminum, hydrogen and manganese in acid soils[A]. Robson A D(ed). Soil acidity and plant growth[M]. Sydney: Academy Press, 1989. 1-60.
- [4] 许中坚,刘广深,俞佳栋. 氮循环的人为干扰与土壤酸化[J]. 地质地球化学,2002,30(2): 74-78.
Xu Z J, Liu G S, Yu J D. Soil acidification and nitrogen cycle

- disturbed by man-made factors[J]. *Geol. Geochem.*, 2002, 30 (2): 74-78.
- [5] Bowman W D, Cleveland C C, Baron J S *et al.* Negative impact of nitrogen deposition on soil buffering capacity[J]. *Nat. Geosci.*, 2008, 10: 767-770.
- [6] 徐仁扣, Coventry D R. 某些农业措施对土壤酸化的影响[J]. 农业环境保护, 2002, 21(5): 385-388.
- Xu R K, Coventry D R. Soil acidification as influenced by some agricultural practices[J]. *Agro-Environ. Prot.*, 2002, 21(5): 385-388.
- [7] Zhao W, Cai Z C, Xu Z H. Does ammonium-based N addition influence nitrification and acidification in humid subtropical soils of China? [J]. *Plant Soil*, 2007, 297: 213-221.
- [8] 张喜林, 周宝库, 孙磊, 高中超. 长期施用化肥和有机肥料对黑土酸度的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(5): 1221-1223.
- Zhang X L, Zhou B K, Sun L, Gao Z C. Black soil acidity as affected by applying fertilizer and manure[J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2008, 39(5): 1221-1223.
- [9] 董炳友, 高淑英, 吕正文. 不同施肥措施对连作大豆的产量及土壤 pH 值的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2002, 14(4): 19-21.
- Dong B Y, Gao S Y, Lü Z W. Effect of different fertilizing on soybean yield and soil pH value in continuous cropping[J]. *J. Heilongjiang Aug. First Land Reclam. Univ.*, 2002, 14(4): 19-21.
- [10] 汪吉东, 张永春, 俞美香, 等. 不同有机无机肥配合施用对土壤活性有机质含量及 pH 值的影响[J]. 江苏农业学报, 2007, 23(6): 573-578.
- Wang J D, Zhang Y C, Yu M X *et al.* Effect of combined organic and inorganic fertilizer on labile organic matter and acidity of soil [J]. *Jiangsu Agric. Sci.*, 2007, 23(6): 573-578.
- [11] 曾清如, 廖柏寒, 蒋朝辉, 等. 施用尿素引起红壤 pH 及铝活性的短期变化[J]. 应用生态学报, 2005, 16(2): 249-252.
- Zeng Q R, Liao B H, Jiang C H *et al.* Short-term changes of pH value and Al activity in acid soils after urea fertilization [J]. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2005, 16(2): 249-252.
- [12] 石锦芹, 丁瑞兴, 刘友兆, 孙玉华. 尿素和茶树落叶对土壤的酸化作用[J]. 茶叶科学, 1999, 19(1): 7-12.
- Shi J Q, Ding R X, Liu Y Z, Sun Y H. Acidification of soil by urea and fallen tea leaves[J]. *J. Tea Sci.*, 1999, 19(1): 7-12.
- [13] 刘菊秀, 周国逸. 土壤累积酸化对鼎湖山马尾松林物质元素迁移规律的影响[J]. 浙江大学学报, 2005, 31(4): 381-391.
- Liu J X, Zhou G Y. Effects of cumulative acidification of soil on element transfer in *Pinus massoniana* Lamb. forest at Dinghushan [J]. *J. Zhejiang Univ.*, 2005, 31(4): 381-391.
- [14] 刘艳, 周国逸, 褚国伟, 等. 鼎湖山针阔叶混交林土壤酸度与土壤养分的季节动态[J]. 生态环境, 2005, 14(1): 81-85.
- Liu Y, Zhou G Y, Chu G W *et al.* Seasonal dynamics of soil acidity and nutrient contents under coniferous and broad-leaved mixed forest at Dinghushan[J]. *Ecol. Environ.*, 2005, 14(1): 81-85.
- [15] 郭景恒, 张晓山, 张逸, Vogt R D. 酸性森林土壤中 Ca-H-Al 交换过程与铝的溶解机制研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 92-97.
- Guo J H, Zhang X S, Zhang Y, Vogt R D. Ca-H-Al exchanges and aluminum mobility in acidic forest soils [J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2006, 43(1): 92-97.
- [16] 王伯仁, 徐明岗, 文石林. 长期施肥对红壤磷组分及活性酸的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(3): 254-259.
- Wang B R, Xu M G, Wen S L. The effect of long term fertilizer application on phosphorus in red upland soil [J]. *Chin. Agric. Sci. Bull.*, 2007, 23(3): 254-259.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 257-270.
- Bao S D. Analysis of soil agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000. 257-270.
- [18] Guo J H, Liu X J, Zhang F S *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Sci.*, 2010, 327: 1008-1010.
- [19] Tang C X, Rengel Z. Role of plant cation/anion uptake ratio in soil acidification[A]. Zdenko Rengel *et al.* Handbook of soil acidity[M]. New York: Marcel Dekker, 2003. 57-81.
- [20] 廖柏寒, 戴昭华. 土壤对酸沉降的缓冲能力与土壤矿物的风化特征[J]. 环境科学学报, 1991, 11(4): 425-431.
- Liao B H, Dai Z H. The soil buffering capacity to acid precipitation and the weathering characteristics of soil minerals[J]. *Acta Sci. Circum.*, 1991, 11(4): 425-431.
- [21] 陈梅, 陈亚华, 沈振国, 沈其荣. 猪粪对红壤铝毒的缓解效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 173-176.
- Chen M, Chen Y H, Shen Z G, Shen Q R. Amelioration of aluminum toxicity on wheat plants grown in acid red soil by pig manure[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2002, 8(2): 173-176.
- [22] Malhi S J, Nyborg M, Harapiak J T. Effects of long-term N fertilizer-induced acidification and liming on micronutrients in soil and in bromegrass hay[J]. *Soil Till. Res.*, 1998, 48: 91-101.
- [23] 王伯仁, 徐明岗, 文石林, 等. 长期施肥红壤氮的累积与平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(增刊): 29-34.
- Wang B R, Xu M G, Wen S L *et al.* Accumulation and balance of nitrogen in upland of red soil under long-term fertilization [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2002, 8(Sup.): 29-34.
- [24] 徐明岗, 梁国庆, 张夫道, 等. 中国土壤肥力演变[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2006. 23-28.
- Xu M G, Liang G Q, Zhang F D *et al.* Soil fertility evolution in China [M]. Beijing: Chinese Agricultural Sciencetech Press, 2006, 23-28.
- [25] Wong M T F, Swift R S. Role of organic matter in alleviating soil acidity[A]. Zdenko Rengel *et al.* Handbook of soil acidity[M]. New York: Marcel Dekker, 2003. 337-358.
- [26] 李学垣. 土壤化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001. 218.
- Li X Y. Soil chemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001. 218.
- [27] 童贯和, 程滨, 胡云虎. 模拟酸雨及其酸化土壤对小麦幼苗生物量和某些生理活动的影响[J]. 作物学报, 2005, 31(9):

- 1207-1214.
- Tong G H, Cheng B, Hu Y H. Effect of simulated acid rain and its acidified soil on the biomass and some physiological activities of wheat seedlings[J]. *Acta. Agron. Sin.*, 2005, 31(9): 1207-1214.
- [28] 田茂洁, 杨艳, 周平. Al_3^+ 对玉米根芽生长影响的研究[J]. 绵阳师范学院学报, 2005, 24(2): 63-65.
- Tian M J, Yang Y, Zhou P. The effects of Al_3^+ on maize growth [J]. *J. Mianyang Norm. Univ.*, 2005, 24(2): 63-65.
- [29] 余国泰, 秦遂初. 有机肥缓解小麦铝毒效果的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 57-62.
- Yu G T, Qin S C. Effect of organic manure on soil aluminum toxicity and nutrient absorption of winter wheat [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 1998, 4(1): 57-62.
- [30] 秦瑞君, 陈福兴. 湘南红壤作物苗期铝中毒的研究[J]. 植物营养与肥料学, 1999, 5(1): 50-55.
- Qin R J, Chen F X. The aluminum toxicity of some crop seedlings in red soil of southern human[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 1999, 5(1): 50-55.
- [31] 仇荣亮, 吴菁, 吕越娜, 等. 我国南方主要酸沉降区土壤中铝的释放与缓冲作用[J]. 环境化学, 1998, 17(2): 143-147.
- Qiu R L, Wu Q, Lü Y N *et al.* Releasing and buffering of Al^{3+} under simulated acid rain in south China[J]. *Environ. Chem.*, 1998, 17(2): 143-147.
- [32] Naramabuye F X, Haynes R J. Short-term effects of three animal manures on soil pH and Al solubility[J]. *Aust. J. Soil Res.*, 2006, 44: 515-521.