

# 长期施肥对红壤旱地玉米生物量及养分吸收的影响

颜雄<sup>1,2</sup>, 彭新华<sup>2,4</sup>, 张杨珠<sup>1</sup>, 周虎<sup>2,4</sup>, 余喜初<sup>3</sup>, 王雪芬<sup>5</sup>, 谢平<sup>1</sup>

(1. 湖南农业大学 资源与环境学院, 长沙 410128; 2. 中国科学院 南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 3. 江西省红壤研究所, 江西 进贤 331717; 4. 国家红壤改良工程技术研究中心, 南昌 330200; 5. 南京农业大学 资源与环境科学学院土壤生态实验室, 南京 210095)

**摘要:** 基于江西进贤旱地长期施肥定位试验田, 研究不同施肥模式下玉米不同器官的生物量、养分吸收与分配及其与土壤养分的关系。结果表明: (1) 长期施用化肥导致土壤 pH 值下降, 不合理施肥使土壤养分含量有不同程度的下降, 有机无机肥配施能有效缓解土壤酸化, 显著提高土壤有机碳和有效养分含量。 (2) 与对照相比, N 处理降低了玉米籽粒、穗轴、秸秆和根茬的生物量, 而均衡施肥(NPK、2NPK)及有机肥处理(NPKOM、OM)使玉米籽粒增产 1.1~2.9 倍, 并提高了其他器官的生物量。土壤酸碱度、有机质及 N、P 养分对玉米籽粒的产量影响显著, 土壤 K 养分对玉米生物量影响相对较小。 (3) 玉米对 N 的吸收主要集中在籽粒和秸秆, 分别占总吸 N 量的 41.8%~61.3% 和 30.3%~48.4%, P 在籽粒中的吸收量高达 61.8%~73.9%, K 的吸收主要集中在秸秆, 占总吸 K 量的 51.4%~67.9%。有机无机肥配施模式则显著促进了作物各器官对养分的吸收和提高作物产量。作物养分的收获指数为 P>N>K。

**关键词:** 长期施肥; 玉米生物量; 养分吸收; 红壤

中图分类号: S158.3 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2013)02-0120-06

## Effects of Long-term Fertilizations on Maize Biomass and its Nutrient Uptake in Red Soil

YAN Xiong<sup>1,2</sup>, PENG Xin-hua<sup>2,4</sup>, ZHANG Yang-zhu<sup>1</sup>,  
ZHOU Hu<sup>2,4</sup>, YU Xi-chu<sup>3</sup>, WANG Xue-fen<sup>5</sup>, XIE Ping<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128;  
2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008; 3. Jiangxi Institute of Red Soil, Jinxian, Jiangxi 331717; 4. National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 330200; 5. Soil Ecology Laboratory, College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095)

**Abstract:** In order to study the effects of different fertilizations on maize biomass, its nutrient uptake, and their relationship with soil nutrients, a long-term fertilization experiment was established in 1986 in red soil, Jinxian, Jiangxi province. The results were obtained as following: (1) Long-term application of chemical fertilizer decreased soil pH, whereas the chemical fertilizers combined with organic manure relieved soil acidification and increased SOC and available nutrient contents significantly. (2) Compared with CK treatment, application of N fertilizer alone reduced the amount of maize kernel, cob, straw and root, and balanced fertilization(NPK, 2NPK) and organic fertilizer increased them by 1.1~2.9 times. The maize biomass was positively correlated with the soil pH, SOC, N and P significantly. (3) The distribution of N in maize was mainly in kernel and straw, accounting for 41.8%~61.3% and 30.3%~48.4% of total N in crop, respectively. P content was the highest in kernel(61.8%~73.9% of total P in crop), and K content was the highest in straw(accounting for 51.4%~67.9%). It was concluded that the combination of chemical and organic fertilizers promoted nutrient uptake as well as maize yield. The order of harvest index was P > N > K.

**Key words:** long-term fertilization; maize biomass; nutrient uptake; red soil

红壤旱地是我国热带和亚热带地区的地带性土壤,是我国重要的粮食、经济作物基地<sup>[1]</sup>。在自然条件下,

收稿日期: 2012-11-22

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD14B17, 2011BAD41B01); 湖南农业大学青年科学基金项目(12QN23)

作者简介: 颜雄(1981—), 男, 湖南邵阳人, 博士生, 讲师, 主要从事土壤资源利用等研究。E-mail: yanxiong@issas.ac.cn

通讯作者: 张杨珠(1956—), 男, 湖南安仁人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤肥力研究。E-mail: zhangyangzhu2006@163.com

强烈的风化和淋溶作用使红壤自然肥力低下<sup>[2]</sup>,同时由于人为活动如不合理的农田施肥措施等导致土壤酸化加速、养分含量下降和物理性状变差等<sup>[3-4]</sup>。长期施肥对于作物产量的影响也有大量的报道<sup>[5-6]</sup>,认为 N、P、K 肥能提供作物所生长必需的养分,且均衡施肥能提高系统生产力。因此,在防止红壤退化的同时,又能提高土壤生产力,保证作物的高产稳产,是实现我国南方红壤区农业可持续发展关键所在。本研究基于长期定位施肥试验田,研究了不同施肥模式下土壤基本肥力性质的变化及其对玉米地上部和地下部的生物量和籽粒产量的影响,并确定不同施肥对作物养分吸收及其在不同器官分配的影响,旨在为红壤旱地的可持续利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

长期定位试验位于江西省进贤县江西省红壤研究所内(116°20'E,28°15'N),该区为岗地地形,平均海拔 26 m,亚热带季风气候,多年平均气温为 17.7 °C,其中,1 月平均气温 5.5 °C,7 月平均气温 29.9 °C,年平均降雨量为 1 727 mm。土壤母质为第四纪红粘土,分类上属于老成土,质地为粉砂质粘壤土。试验前土壤基本性质为 pH 6.0(H<sub>2</sub>O,1:2.5),有机碳含量 9.39 g/kg。全 N、全 P、全 K 含量分别为 0.98,1.42,15.83 g/kg。碱解 N、速效 P、速效 K 含量分别为 60.3,12.9,102 mg/kg。

### 1.2 试验设计

定位试验开始于 1986 年,种植制度为早玉米—晚玉米—冬闲制。试验共设 10 个施肥处理:(1)不施肥(CK);(2)施用氮肥(N);(3)施用磷肥(P);(4)施用钾肥(K);(5)施用氮、磷肥(NP);(6)施用氮、钾肥(NK);(7)施用氮、磷、钾肥(NPK);(8)施用 2 倍的氮、磷、钾肥(2NPK);(9)施用氮、磷、钾肥同时施新鲜猪粪(NPKOM);(10)施新鲜猪粪(OM)。肥料种类是尿素、钙镁磷肥、氯化钾和新鲜猪粪,其中磷肥、钾肥和猪粪作为基肥,氮肥用量的 2/3 为基肥,1/3 为追肥。肥料分两季施用,每季施用量如表 1 所示。小区随机排列,3 次重复,小区面积 22.22 m<sup>2</sup>。

### 1.3 样品测定与数据分析

在 2012 年早玉米收获前 5 d,在每小区随机采取籽粒、穗轴、秸秆和玉米根茬(采取土深 30 cm 的玉米根茬)样品各 3 份,65 °C 烘干后测定各部分生物量。植株各部分的养分含量经 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>—H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮后,全 N 用微量凯氏定氮法测定,全 P 用钼锑抗比色法测定,全 K 用火焰光度计法测定<sup>[7]</sup>。

每个小区中随机选取 5 点,采集 0—20 cm 的表层土混匀,风干过筛后测定基本理化性质,其中土壤 pH 用 pH 计测定;土壤有机 C(SOC)用 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>—H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 氧化法测定;土壤全 N 用半微量凯氏法测定;土壤全 P 用氢氧化钠碱熔—钼锑抗比色法测定;土壤全 K 用 NaOH 熔融—火焰光度计法测定;碱解 N 用碱解扩散法测定;速效 P 用 NaHCO<sub>3</sub> 法测定;速效 K 用 1 mol/L 的 NH<sub>4</sub>OAc 浸提—火焰光度计法测定<sup>[7]</sup>。

数据采用 SPSS 13.0 软件分析,不同处理间差异显著性检验采用 LSD 法( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同施肥模式对土壤养分含量的影响

从表 2 可以看出,长期不同施肥处理下红壤旱地土壤基本性状的变化。与试验开始前相比,所有处理的土壤 pH 值均有下降,土壤酸化程度明显,因为当铵态氮肥的施入量超过作物需要量时,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 硝化及硝酸根的淋洗会导致土壤酸化<sup>[8]</sup>。但 CK 处理和施用化肥的处理相比,单施有机肥和有机无机肥配施的处理 pH 值较高,证明施用有机肥能缓解土壤酸化,而施用 N 肥处理(N、NP、NK、NPK、2NPK)都比 CK 的 pH 低 0.08~0.34 个 pH 单位,因此,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<sup>[9]</sup>的研究结果相符。平衡施用化肥处理(NPK、2NPK)和施有机肥处理(NPKOM、OM)的土壤有机碳含量相比于试验开始前(9.39 g/kg)提高了 3.9%~28.9%,这是因为土壤有机质增加主要来自直接输入有机肥或增加根茬的返田量<sup>[10]</sup>。

施用有机肥处理(NPKOM、OM)分别使土壤的全 N 含量提高了 16.3%和 19.4%,CK、N 和 NPK 处理的全 N 含量变化不大。同时,有机肥也提高了土壤全 P 的含量,但其他施肥处理都有下降的趋势。长期不同施肥导致了全 K 含量都有所降低,同蔡泽江等<sup>[11]</sup>研究结果一致。与土壤全量养分不同,土壤速效养分在 CK 和

表 1 供试土壤长期施肥试验

处理	每季的肥料投入量			猪粪 kg/hm <sup>2</sup>
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	
CK	—	—	—	—
N	60	—	—	—
P	—	30	—	—
K	—	—	60	—
NP	60	30	—	—
NK	60	—	60	—
NPK	60	30	60	—
2NPK	120	60	120	—
NPKOM	60	30	60	1500
OM	—	—	—	1500

注:“—”表示肥料投入量为 0。

N 处理中的值都比试验开始前降低,说明不施肥和单施氮肥将导致所有土壤速效养分含量下降。施有机肥处理(NPKOM、OM)对土壤碱解 N 和速效 P 提高最为显著,碱解 N 含量分别提高了 50.9%和 37.3%,速效 P 含量分别提高了 8.9 倍和 6.9 倍,对于速效 K,单施 K 肥处理的含量比施用有机肥处理的还高,达到 308.3 mg/kg。究其原因,对于生物量较高的 NPKOM 和 OM 处理,因为其吸钾量大,所消耗的土壤速效 K 多,不能及时补充土壤速效 K 库的损耗;而 K 处理生物产量低,所需要的速效 K 少,则剩余在土壤的含量相对较高,从而增加了土壤速效 K 库。

总体看来,施用有机肥处理(NPKOM、OM)中除全 K 和速效 K 含量外,土壤有机碳和各养分含量都显著高于其他施用化肥的处理,尤其是 NPKOM 处理,显著促进了作物对化肥中的养分吸收,王伯仁等<sup>[12]</sup>的报道也证实了这一点。施有机肥处理既能满足作物需求,又能提高土壤肥力,缓解酸化。因此,在长期不同施肥中,不同施肥模式导致土壤养分含量变化,其中以 NPKOM 处理即有机-无机肥配施模式最有利于土壤可持续发展。

表 2 不同施肥处理耕层土壤养分含量变化

处理	pH	有机碳/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全 N/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全 P/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全 K/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	碱解 N/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效 P/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效 K/ (mg · kg <sup>-1</sup> )
CK	3.98de	7.98f	1.03abcd	0.56de	12.98b	56.0f	10.1d	91.7ef
N	3.64g	8.82def	1.06abc	0.51e	12.99b	59.5ef	6.9d	82.5f
P	4.21c	8.54ef	0.85d	0.68cd	13.46a	57.2f	14.7cd	128.3de
K	4.04d	8.57ef	0.88cd	0.69cd	13.46a	60.7def	17.9cd	308.3a
NP	3.89f	8.93cdef	0.91cd	0.69cd	12.85b	60.7def	18.0cd	78.3f
NK	3.68g	9.56cde	0.95bcd	0.64d	13.21ab	65.3de	13.6d	100.0c
NPK	3.90ef	9.87bc	1.04abcd	0.68cd	13.53a	66.5cd	17.4cd	206.7c
2NPK	3.70g	9.76bcd	0.97abcd	0.78c	13.58a	72.3c	26.3c	337.5a
NPKOM	4.83b	12.10a	1.17a	1.59a	13.56a	91.0a	127.2a	262.5b
OM	5.07a	10.72b	1.14ab	1.36b	13.53a	82.8b	101.9b	140.8d

注:同列数据后不同字母表示不同施肥处理之间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

## 2.2 不同施肥对玉米籽粒、穗轴、秸秆和根茬生物量的影响

如表 3 所示,不仅玉米的籽粒产量受到不同施肥模式的影响,而且玉米的穗轴、秸秆和根茬的生物量也受其影响。从整体来看,单施氮肥处理的所有生物量都低于其他处理,其中籽粒产量与不施肥处理相比降低了 77.8%,说明单施氮肥处理导致了作物的减产,这和土壤过于酸化有关,与于天一<sup>[13]</sup>的研究结果相符。与对照(CK)相比,均衡施肥处理(NPK、2NPK)及有机肥处理(NPKOM、OM)可显著提高玉米各器官生物量。籽粒产量结果表明,与 CK 处理相比,一元施肥处理(N、P、K)并不能提高玉米产量,反而有所降低,二元施肥处理(NP、NK)的籽粒产量分别提高了 72.5%和 40.4%,NP 处理增产效果高于 NK 处理增产效果,说明红壤地区土壤缺磷是限制作物产量进一步提高的主要因子之一,提高 P 肥的利用率能使作物增产。均衡施肥和有机肥处理则将产量提高了 1.1~2.9 倍。穗轴的生物量变化与籽粒变化基本一致,与 CK 处理相比,以 OM 处理的生物量最高,提高了约 205%。各处理秸秆生物量中,除 N 处理低于 CK 外,其他各处理都有提高,其排列顺序为:NPKOM、OM、2NPK>NPK>NP、NK、K、P>N。根茬生物量的变化除 N 处理外,其他均高于 CK 处理,且以 NPK 处理的最高,达到了 613 kg/hm<sup>2</sup>,而 NP 处理也高于 OM、2NPK 和 NPKOM 处理,证明施用化肥对根茬生物量变化的影响较大。从整体看来,均衡施肥及有机-无机配施显著增加了作物的生物量,提高了系统生产力,与 Manna<sup>[14-15]</sup>等的研究一致。

结合表 3,将玉米各器官生物量与总生物量进行了相关性研究。结果表明,玉米籽粒产量和地上部(穗轴、秸秆)、地下部生物量(根茬)均呈显著正相关,籽粒与总生物量的相关系数达到了 0.94,各处理占到了总生物量的 29.0%~48.9%,其比例变化的趋势是随着施肥的均衡性增加和有机肥的配施而上升,尤其为施有机肥处理(NPKOM、OM)均接近总生物量的 50%;与籽粒的变化相反,施有机肥处理(NPKOM、OM)的地上部和地下部含量占总生物量的比例是各处理最低的,这说明,施有机肥处理(NPKOM、OM)在增加作物总体和各器官生物量的同时,还提高了籽粒产量的比例;穗轴和秸秆与总生物量的相关性较高,相关系数都达到了 0.93,根茬占总生物量比例为 3.7%~7.5%,而穗轴与秸秆之和占总生物量的比例高达 47.3%~65.1%。

而从玉米生物量与土壤基本理化性质的相关性分析,除速效 K 含量外,其他指标均与籽粒产量达到显著性相关,其中与 pH、SOC、全 P、碱解 N 和速效 P 为极显著相关,说明土壤酸碱度,有机质及 N、P 养分对玉米籽

粒的产量影响显著。而 SOC 和碱解 N 对玉米各器官的生物量影响均达到了极显著水平,体现了有机质和氮素在土壤肥力中的重要作用,也反映了氮肥在化肥施用中的基础地位<sup>[5]</sup>。全 P 和速效 P 对地上部的影响也是极显著的。相比而言,土壤 K 养分对玉米生物量影响较小,也说明在玉米增产方面,磷肥效果要好于钾肥。

表 3 不同施肥处理对玉米籽粒、穗轴、秸秆和根茬生物量的影响

处理	籽粒		穗轴		秸秆		根茬		总生物量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )
	生物量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	占总生物 量比例/%							
CK	1803cd	35.5	557c	11.0	2482de	48.8	239cd	4.7	5082e
N	400d	29.0	118d	8.6	756e	54.8	104d	7.5	1380f
P	1816cd	35.2	492c	9.5	2543de	49.2	315c	6.1	5168e
K	1442cd	29.0	439c	8.8	2805cd	56.3	294c	5.9	4981e
NP	3111bc	34.3	820b	9.0	4541abc	50.1	596a	6.6	9070cd
NK	2532bc	36.4	585c	8.4	3426bcd	49.3	403bc	5.8	6948de
NPK	3858b	38.0	870b	8.6	4823ab	47.4	613a	6.0	10166cd
2NPK	4014b	35.7	977ab	8.7	5695a	50.7	554ab	4.9	11241bc
NPKOM	7178a	48.0	1025ab	6.9	6194a	41.4	561ab	3.8	14959a
OM	7052a	48.9	1140a	7.9	5689a	39.4	540ab	3.7	14422ab

### 2.3 不同施肥对玉米各器官养分含量的影响

不同施肥模式影响籽粒养分含量的变化如图 1 所示。从玉米各器官的养分含量来看,籽粒的 N、P 含量相比穗轴、秸秆和根茬较高,分别为 8.57~13.63 g/kg 和 1.81~4.18 g/kg。N 含量在穗轴、秸秆和根茬的含量差异不大,均在 3.58~9.01 g/kg 之间,P 含量在这 3 个器官中的变化范围为 0.37~3.67 g/kg,籽粒中的 K 含量在各器官中最低,根茬中的 K 含量为最高,其次为秸秆和穗轴。说明 N、P 养分最易在籽粒中富集,而 K 养分主要富集在根茬和秸秆中。

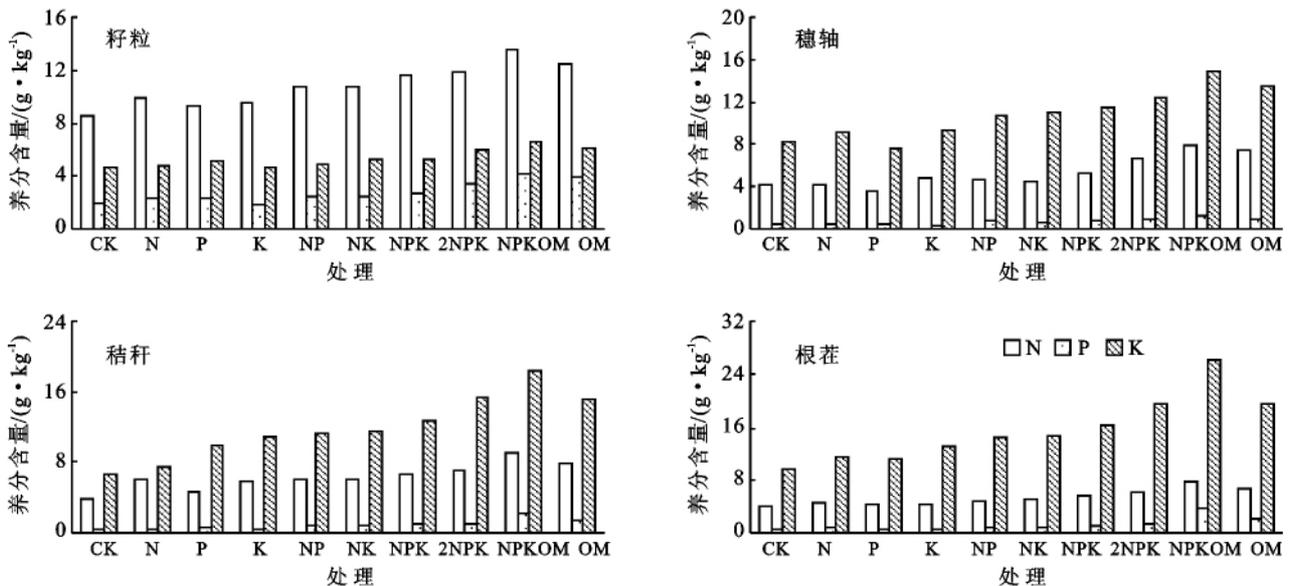


图 1 不同施肥对玉米籽粒、穗轴、秸秆和根茬养分含量的影响

从各施肥处理来看,一元施肥处理(N、P、K)中,单施 N 肥处理,玉米籽粒、穗轴、秸秆和根茬中 N 养分含量相对于 CK、P、K 处理均较高,因此,施用氮肥能促进作物对 N 的吸收。P 含量的变化与 N 含量基本相同。单施 K 处理中,各器官中仅有籽粒中的 K 含量低于 CK、N、P 处理,说明施用化肥能促进作物对同种养分的吸收。二元施肥处理(NP、NK)的 NP 处理的 N、P 含量一般都略高于 NK 处理,NK 处理中 K 含量均高于 NP 处理。与一元施肥处理中的 P 处理、K 处理相比,二元施肥处理(NP 与 NK)中的 P、K 含量均有升高,说明施用 N 肥能促进作物对 P、K 的吸收。均衡施肥处理(NPK、2NPK)中,施肥越均衡,N、P、K 含量越高,施用有机肥处理(NPKOM、OM)的 N、P、K 养分含量最高,相对于 CK 处理提高了 0.4~5.4 倍,这是因为有机肥本身也含有丰富的养分,当有机肥施入土壤后,能较大程度提高各器官中的养分含量。

#### 2.4 不同施肥对玉米籽粒、穗轴、秸秆和根茬的养分吸收与分配的影响

长期不同施肥模式对玉米各器官 N、P、K 的吸收量和比例如表 4 所示。可以发现:(1)籽粒的吸 N 量占总 N 吸收量的 41.8%~61.3%,秸秆的吸 N 比例为 30.3%~48.4%,因此,玉米吸收 N 主要集中在籽粒和秸秆当中。与均衡施肥处理(NPK、2NPK)相比,施用有机肥处理(NPKOM、OM)对 N 的吸收量显著提高,二元施肥处理 NP 处理的吸收量大于 NK 处理,说明施用 P 肥能促进养分吸收量的增加,于天一<sup>[13,16]</sup>等对此也有类似报道。而单施氮肥处理吸收量最低。在籽粒、秸秆与根茬中,一元施肥处理(P、K)与 CK 的吸收量差异不显著,在穗轴中,一元施肥处理(N、P、K)均比 CK 的吸收量低。说明施用有机肥能显著促进 N 的吸收,配施也能促进 N 的吸收,而一元施肥和不施肥则对 N 的吸收降低。(2)籽粒对 P 的吸收比例达到了 61.8%~73.9%,玉米对 P 的吸收主要集中在籽粒当中。与 NPK 处理相比,二元施肥处理(NP、NK)的差异不显著。与 CK 相比,根茬的一元施肥处理(N、P、K)和二元施肥处理(NP、NK)差异不显著,说明只有均衡施肥和施用有机肥能显著促进根茬对 P 的吸收。从总吸收量来看,施用有机肥处理(NPKOM、OM)相比 CK 对 P 的吸收分别提高了 8.4 倍和 6.5 倍。(3)与 P 不同,秸秆吸收 K 的比例为 51.4%~67.9%,玉米对 K 的吸收主要集中在秸秆中,且除籽粒外,穗轴、秸秆与根茬对 K 的吸收都高于其对 N、P 的吸收。从总吸收量来看,不同处理的 K 吸收量基本都高于 N 和 P 的吸收量。

表 4 不同施肥对玉米各器官养分吸收量分布的影响

养分	处理	籽粒		穗轴		秸秆		根茬		总吸收量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )
		吸收量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	占总吸收 量比例/%							
N	CK	15.27cd	54.6	2.33de	8.3	9.40fg	33.6	0.97de	3.5	27.97de
	N	4.02d	41.9	0.54f	5.7	4.55g	47.4	0.48e	5.0	9.58e
	P	17.19cd	52.8	1.74ef	5.3	12.29efg	37.7	1.34de	4.1	32.57de
	K	14.06cd	41.8	2.08e	6.2	16.29efg	48.4	1.23de	3.6	33.65de
	NP	34.22bc	50.5	3.74cd	5.5	27.02cde	39.8	2.83bc	4.2	67.81bc
	NK	26.64bc	51.6	2.63de	5.1	20.35def	39.4	1.98cd	3.8	51.6cd
	NPK	45.33b	52.8	4.54c	5.3	32.55bcd	37.9	3.46ab	4.0	85.88b
	2NPK	48.03b	49.0	6.46b	6.6	40.24bc	41.1	3.29abc	3.3	98.01b
	NPKOM	97.74a	58.6	8.09a	4.9	56.70a	34.0	4.32a	2.6	166.85a
	OM	87.63a	61.3	8.47a	5.9	43.37ab	30.3	3.58ab	2.5	143.05a
P	CK	3.45cd	70.4	0.23fg	4.6	1.09ef	22.2	0.14d	2.8	4.90ef
	N	0.94d	64.9	0.05g	3.3	0.39f	26.7	0.07d	5.0	1.45f
	P	4.17cd	68.2	0.24fg	4.0	1.51ef	24.8	0.18d	3.1	6.10ef
	K	2.60d	61.8	0.16fg	3.8	1.29ef	30.5	0.17d	4.0	4.21f
	NP	7.63bcd	62.9	0.57de	4.7	3.45cd	28.4	0.49cd	4.0	12.15de
	NK	6.12cd	66.9	0.33ef	3.6	2.41de	26.3	0.29cd	3.2	9.15def
	NPK	10.44bc	64.4	0.74cd	4.5	4.38c	27.0	0.66bc	4.1	16.21cd
	2NPK	13.79b	67.0	0.90bc	4.4	5.19c	25.2	0.7bc	3.4	20.58c
	NPKOM	30.21a	65.3	1.20a	2.6	12.77a	27.6	2.09a	4.5	46.27a
	OM	27.34a	73.9	1.15ab	3.1	7.52b	20.3	0.97b	2.6	36.98b
K	CK	8.54de	27.0	4.54ef	14.3	16.3de	51.4	2.32de	7.3	31.71fg
	N	1.83e	19.6	1.07g	11.5	5.16e	55.3	1.27e	13.6	9.33g
	P	9.30cde	22.6	3.67f	8.9	24.73cde	60.1	3.46de	8.4	41.17fg
	K	6.73de	14.8	4.17ef	9.2	30.83cde	67.9	3.68de	8.1	45.41efg
	NP	14.88bcd	17.7	8.47cd	10.1	52.1bcd	61.9	8.77bc	10.4	84.21de
	NK	13.21bcde	20.3	6.38de	9.8	39.56cde	60.7	5.97cd	9.2	65.13def
	NPK	20.27bc	19.8	9.74bc	9.5	62.39bc	60.8	10.13b	9.9	102.53cd
	2NPK	24.17b	17.8	12.02b	8.9	88.39ab	65.3	10.82b	8.0	135.39bc
	NPKOM	47.28a	24.4	15.41a	7.9	116.53a	60.1	14.63a	7.5	193.84a
	OM	41.92a	26.9	15.41a	9.9	88.14ab	56.5	10.43b	6.7	155.90ab

#### 2.5 不同施肥对玉米养分收获指数的影响

养分收获指数(经济利用指数)指籽粒中的养分含量与地上部养分吸收量的比值,反映植株所吸收的养分向籽粒中转移的状况。CK 处理的 N、P、K 收获指数分别为 54.5%,71.2%和 28.1%,一元施肥处理(N、P、

K)、二元施肥处理(NP、NK)的收获指数与 CK 处理相比都有所降低,均衡施肥处理(NPK、2NPK)的收获指数基本持平,NPKOM 处理中 N 的收获指数为 60.7%,相比 CK 处理仅仅提高了 11.5%,而 OM 处理的收获指数是最高的,N、P、K 的收获指数分别为 63.4%、76.3%和 30.4%,分别提高了 16.4%、7.2%和 8.1%,说明长期施用化肥降低了作物的养分收获指数,而通过施有机肥能提高作物的养分收获指数。在同一施肥条件下,钾素收获指数明显低于氮素和磷素,高低顺序为 P 收获指数>N 收获指数>K 收获指数。

### 3 结论

(1)长期施用化肥导致土壤酸化,但施用有机肥能有效缓解酸化。长期不恰当施肥使土壤养分含量有不同程度的下降,而以有机无机肥配施模式最适合土壤养分库的补充和作物的生长。

(2)单施氮肥降低了玉米各器官的生物量,均衡施肥及有机-无机肥配施增加了作物的生物量,显著提高了籽粒产量。土壤养分含量显著影响玉米籽粒、穗轴、秸秆和根茬的生物量。

(3)玉米对 N 的吸收主要集中在籽粒和秸秆,P 集中在籽粒,对 K 的吸收集中在秸秆。作物对 K 的总吸收量高于 N、P。在同一施肥条件下,作物养分的收获指数为 P>N>K。

参考文献:

- [1] 徐明岗,梁国庆,张夫道,等.中国土壤肥力演变[M].北京:中国农业出版社,2006.
- [2] 曹景勤.第四纪红色粘土区氮磷肥交互作用对黑麦草产量和养分累积的影响[J].土壤通报,1995,26(3):311-313.
- [3] Bowman W D, Cleveland C C, Halada L, et al. Negative impact of nitrogen deposition on soil buffering capacity[J]. Nature Geoscience, 2008, 10: 767-770.
- [4] 章明奎,徐建民.亚热带低丘区退化红壤肥力质量恢复性能的研究[J].水土保持学报,2002,16(1):67-71.
- [5] 董旭,娄翼来.长期定位施肥对土壤养分和玉米产量的影响[J].现代农业科学,2008,15(1):9-11.
- [6] 吴杏红,张国建,郭云周,等.平衡施肥对山地红壤玉米产量及相关性状的影响[J].湖南农业科学,2011(11):47-50.
- [7] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [8] Malhi S S, 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 Tillage Research, 1998, 48: 91-101.
- [9] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327: 1008-1010.
- [10] Hutchinson J J, Campbell C A, Desjardins R L. Some perspectives on carbon sequestration in agriculture[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 142: 288-302.
- [11] 蔡泽江,孙楠,王伯仁,等.长期施肥对红壤 pH、作物产量及氮、磷、钾养分吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(1):71-78.
- [12] 王伯仁,徐明岗,文石林.长期不同施肥对旱地红壤性质和作物生长的影响[J].水土保持学报,2005,19(1):97-100,144.
- [13] 于天一,李玉义,逢焕成,等.长期不施磷肥对旱地红壤养分比例与玉米产量的影响[J].中国土壤与肥料,2010(2):25-28.
- [14] Manna M C, Swarup A, Wanjari R H, et al. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India[J]. Field Crops Research, 2005, 93: 264-280.
- [15] 张杨珠,吴岳轩,刘学军,等.新辟红壤性稻田不同施肥模式的效应[J].湖南农学院学报,1994,2(2):106-113.
- [16] 段英华,徐明岗,王伯仁,等.红壤长期不同施肥对玉米氮肥回收率的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(5):1108-1113.

上接第 119 页

- [13] 乔嘉,朱金城,赵姣,等.基于 Logistic 模型的玉米干物质积累过程对产量影响研究[J].中国农业大学学报,2011,16(5):32-38.
- [14] 战秀梅,韩晓日,王帅,等.不同施肥对春玉米源库特征及其关系的影响[J].土壤通报,2008,39(4):887-891.
- [15] 陈喜凤,杨粉团,姜晓莉,等.深松对玉米早衰的调控作用[J].中国农学通报,2011,27(12):82-86.
- [16] 梁熠,齐华,王敬亚,等.宽窄行栽培对玉米生长发育及产量的影响[J].玉米科学,2009,17(4):97-100.
- [17] 邵蕾,张民,王丽霞.不同控释肥类型及施肥方式对肥料利用率和氮素平衡影响[J].水土保持学报,2006,20(6):115-119.
- [18] 宋日,吴春胜,牟金明,等.深松土对玉米根系生长发育的影响[J].吉林农业大学学报,2000,22(4):73-75,80.
- [19] 赵亚丽,杨春收,王群,等.磷肥施用深度对夏玉米产量和养分吸收的影响[J].中国农业科学,2010,43(23):4805-4813.
- [20] 杨吉顺,高辉远,刘鹏,等.种植密度和行距配置对超高产夏玉米群体光合特性的影响[J].作物学报,2010,36(7):1226-1233.