

# 长期不同施肥下小麦离子吸收对土壤酸化贡献能力的比较<sup>①</sup>

宋文峰<sup>1,3</sup>, 王超<sup>1</sup>, 陈荣府<sup>1</sup>, 文石林<sup>2</sup>, 王伯仁<sup>2</sup>, 沈仁芳<sup>1\*</sup>

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国农业科学院衡阳红壤实验站, 祁阳农田生态系统国家野外试验站, 湖南祁阳 426182; 3 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 农业生产中长期不合理施肥导致土壤严重酸化, 除了硝化作用和硝酸盐淋溶, 作物对阳离子吸收是另一个重要的土壤酸化来源。本研究基于湖南祁阳红壤实验站农田 25 年长期定位试验研究了长期不同施肥下小麦阴阳离子吸收对土壤酸化贡献能力的变化。结果表明: 长期施用化学氮肥显著降低土壤 pH, 影响小麦生物量, 而施用有机肥可缓解土壤酸化, 提高小麦生物量; 单位面积土壤中小麦吸收阴阳离子对酸化的潜在贡献能力, 即小麦产生的总质子量的大小顺序为: 有机肥处理(M)>氮磷钾配施有机肥处理(NPKM)>磷钾肥处理(PK)>氮磷钾肥处理(NPK)>不施肥处理(CK)>氮磷肥处理(NP)>氮钾肥处理(NK)。相关性分析显示, 小麦产生的总质子量与土壤 pH、有效磷含量和地上部总生物量均呈显著正相关, 而土壤 pH 和有效磷含量均与小麦地上部生物量呈显著正相关。因此, 长期施肥的农田土壤中, 随着酸化程度的加深, 作物通过阴阳离子吸收对土壤酸化的贡献能力减弱, 主要原因在于低土壤 pH 和有效磷含量限制了作物的生长, 降低了作物的生物量。

**关键词:** 土壤酸化; 长期施肥; 植物酸化能力; 离子吸收

**中图分类号:** S154.4 **文献标识码:** A

土壤酸化是导致土壤质量退化的重要生物地球化学过程, 普遍存在于土壤形成和发育过程中。近几十年来, 人为活动加速土壤酸化的问题变得越来越突出。Guo 等<sup>[1]</sup>对我国农田土壤酸化研究表明, 从 20 世纪 80 年代到 21 世纪初, 我国南方酸性红壤和黄壤酸化程度日益加深, 其中粮食和经济作物区的 pH 分别降低了 0.23 和 0.30 个单位。目前, 土壤酸化已经成为我国热带和亚热带地区限制农业生产和影响环境质量的主要因素之一。

在农业生产中, 为了追求高产而不合理地大量施用化学肥料, 加上一些不合理的农业管理措施, 导致作物对肥料的利用率普遍较低, 并加快了土壤酸化过程。农田土壤加速酸化的主要因素包括铵态氮的硝化作用、硝酸盐淋溶以及作物对阴阳离子的不平衡吸收, 这些因素对土壤加速酸化的贡献能力存在差异<sup>[2]</sup>。初步调查发现, 我国四大耕作系统(双季稻、水稻-小麦、小麦-玉米和温室大棚蔬菜)中, 施肥导致的氮循环每年释放到土壤中的  $H^+$  为 20 ~ 221  $kmol/hm^2$ , 作物对盐基阳离子吸收向土壤中释放的  $H^+$  为 15 ~

20  $kmol/hm^2$ 。目前, 大多数研究集中在硝化作用对土壤酸化的贡献方面, 发现在土壤酸化过程中氨氧化古菌发挥主导作用<sup>[3]</sup>。然而, 在土壤酸化过程中, 作物吸收盐基阳离子酸化土壤能力的变化趋势尚不清楚。

大量研究表明, 土壤酸化严重抑制作物对养分的吸收并导致农作物减产<sup>[4]</sup>, 因此, 不合理的施肥措施主要通过肥料本身及其导致的土壤酸化程度影响作物对阴阳离子吸收。另一方面, 土壤酸化过程中, 作物阴阳离子吸收的改变直接影响土壤的酸化进程。可见, 农田土壤酸化和作物阴阳离子的吸收是相互依赖、相互制约的, 阐明两者的关系对于深刻理解作物对施肥的响应和对土壤酸化的贡献具有十分重要的意义。本文从作物阴阳离子吸收的角度出发, 研究湖南祁阳红壤站长期肥料定位试验中不同施肥处理间小麦阴阳离子吸收的差异, 探索小麦离子吸收酸化土壤能力与小麦生物量和土壤理化性质之间的关系, 为评价不同施肥对农田酸化及农田未来酸化趋势预测提供科学依据。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2014CB441000)和中国科学院战略性先导科技专项(XDB15030300)资助。

\* 通讯作者(rfshen@issas.ac.cn)

作者简介: 宋文峰(1990—), 女, 山东日照人, 硕士研究生, 研究方向为土壤酸化的植物生态响应。E-mail: wfsong@issas.ac.cn

## 1 材料与方 法

### 1.1 样地概况

本研究样地位于湖南省祁阳县的中国农业科学院国家红壤肥力与肥料效益长期试验基地内(111°52'32"E, 26°45'12"N)。试验地位于丘岗中部, 开始于 1990 年, 土壤为第四纪红土母质发育的耕性红壤, 1990 年土壤基本性质为 pH 5.7, 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, 有效磷 13.9 mg/kg。

选取田间长期定位试验 7 个典型处理, 分别为: 不施肥(CK)、化学氮磷肥(NP)、化学氮钾肥(NK)、化学磷钾肥(PK)、化学氮磷钾肥(NPK)、单施有机肥(M)和化学氮磷钾配施有机肥(NPKM)。每个处理的试验地面积为 196 m<sup>2</sup>, 各处理均为小麦-玉米轮作, 一年两熟。每年施肥量为 N 300 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 120 kg/hm<sup>2</sup> 和 K<sub>2</sub>O 120 kg/hm<sup>2</sup>; 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%。氮肥使用尿素(含 N 460 g/kg), 磷肥使用过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 125 g/kg), 钾肥使用氯化钾(含 K<sub>2</sub>O 600 g/kg)。施用有机肥(猪粪, 平均含 N 含量为 16.7 g/kg)处理只考虑其中的氮。NPKM 处理中有机氮: 无机氮为 7: 3。

### 1.2 试验方法

**1.2.1 土壤和植物样品采集** 于 2015 年 5 月 11 日至 12 日小麦成熟期进行采样。每个样地中随机选取 3 个 60 cm × 80 cm 的小区, 对小区中的小麦总株数进行计数, 并在小区中随机采集具有代表性的 3 株小麦植株地上部, 用以估算该试验样地中小麦地上部总生物量。在每个小区中利用五点法采取表层 0~20 cm 土壤样品混合作为一个重复土壤样品。

**1.2.2 植株离子和土壤理化性质测定** 将采集的小麦地上部立即带回实验室, 用蒸馏水冲洗 3 次, 105℃杀青 30 min, 65℃烘干至恒重, 称干重。磨碎后的植株样品用于测定主要阴阳离子含量。植株钙

(Ca)、镁(Mg)、钠(Na)、钾(K)和硫(S)含量采用硝酸-高氯酸消煮-ICP 测定; 磷(P)含量采用硫酸-双氧水消煮-钼锑抗比色法测定<sup>[5]</sup>; 氯(Cl)含量采用热水浸提-离子色谱法测定<sup>[6]</sup>。

去除植物根系后的土壤样品经风干, 磨碎, 过 2 mm 筛后, 测定土壤基本理化性质。土壤 pH 采用电位法, 按照土水比 1: 2.5 测定; 土壤碱解氮含量采用碱解扩散法进行测定<sup>[7]</sup>; 土壤有效磷含量采用盐酸-氟化铵浸提-钼锑抗比色法测定<sup>[8]</sup>; 土壤速效钾含量采用乙酸铵提取-火焰光度计法测定<sup>[5]</sup>。

**1.2.3 数据处理与分析** 单位质量植株产生的净质子量计算公式为  $H^+ = (Ca + Mg + K + Na) - (Cl + P + S)$ <sup>[9]</sup>。式中: P 和 S 分别按照一价和二价阴离子进行计算。单位面积土壤上植株产生的总质子量为  $\Sigma H^+ = m \times H^+$  ( $m$  为收获植物干重)。

数据采用 Excel 2007、Sigmaplot 13.0 和 SPSS 20 进行整理、绘图及分析。检测数据是否符合正态分布和方差是否齐性后, 进行单因素方差分析, 处理间多重比较采用 Duncan 多重比较检验, 显著性水平  $P = 0.05$ , 相关性分析采用 Pearson 相关系数。

## 2 结果与分析

### 2.1 长期不同施肥处理下土壤基本理化性质

由表 1 可见, 连续 25 年(1990—2015 年)的不同施肥处理显著影响土壤 pH 和养分含量。与不施肥处理 CK 相比, 施入化学氮肥(NP、NK 和 NPK 处理)显著降低土壤 pH, 引起土壤严重酸化, 这与以往的研究结果一致<sup>[10-12]</sup>。只施磷钾肥的 PK 处理土壤 pH 略低于对照组。而长期施有机肥(M)以及氮磷钾配施有机肥处理(NPKM)显著提高土壤 pH, 土壤 pH 分别升高了 0.94 和 0.52 个单位。有机肥在缓解土壤酸化中的作用已有大量研究报道<sup>[13-14]</sup>。此外, 土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量在不同施肥处理间表现出明显差别(表 1)。在化学肥料处理中, 施入氮肥显著提

表 1 长期不同施肥处理下土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soils under long-term different fertilization treatments

处理	pH	碱解氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
CK	5.47 ± 0.06 b	74.6 ± 0 d	2.0 ± 0.2 c	57.2 ± 1.6 e
NP	4.01 ± 0.05 d	107.0 ± 11.4 b	101.7 ± 30.1 b	56.3 ± 5.6 e
NK	3.82 ± 0.02 e	107.0 ± 11.4 b	1.9 ± 0.2 c	214.6 ± 10.0 c
PK	5.16 ± 0.14 c	84.6 ± 4.3 c	84.3 ± 12.6 b	260.9 ± 8.5 b
NPK	4.11 ± 0.06 d	114.4 ± 8.6 b	116.5 ± 5.3 b	148.9 ± 1.6 d
M	6.41 ± 0.40 a	184.1 ± 11.4 a	417.8 ± 1.1 a	221.1 ± 32.0 c
NPKM	5.99 ± 0.08 a	156.7 ± 7.5 a	600.8 ± 44.4 a	353.6 ± 28.2 a

注: 表中同列不同小写字母表示处理间差异在  $P < 0.05$  水平显著。下同。

高土壤碱解氮含量,施入磷肥显著提高土壤有效磷含量,施入钾肥显著提高土壤速效钾含量。除了 M 处理中的速效钾含量略低于 PK 处理外, M 和 NPKM 处理中土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量均显著高于不施有机肥的处理(CK、NP、NK、PK 和 NPK)。

## 2.2 长期不同施肥处理下小麦生长情况

作物正常生长需要适合的土壤条件,长期不同施肥处理影响土壤 pH 和养分含量,进而影响作物的生长和养分吸收能力。表 2 显示,与 CK 处理相比,施入化学氮肥(NP、NK 和 NPK 处理)降低单位面积中小

麦的棵数,而有机肥处理(M 和 NPKM)和 PK 处理提高单位面积中小麦的棵数。相比 CK 处理,除了 NK 处理降低小麦单株地上部干重外,其他处理均提高小麦单株地上部干重。对于单位面积中的小麦地上部总生物量,NP 和 NK 处理显著低于 CK 处理,而 NPK 处理高于 CK 处理,说明尽管 NPK 处理土壤酸化严重,但同时具有平衡的氮肥、磷肥和钾肥供应,有利于作物的生长。施入有机肥处理(M 和 NPKM)和 PK 处理显著提高单位面积上的小麦生物量,特别是 M 和 NPKM 处理,小麦生物量分别提高了 3.04 倍和 2.14 倍。

表 2 长期不同施肥处理下的小麦生长情况  
Table 2 Growth properties of wheats under long-term different fertilization treatments

处理	小区面积(m <sup>2</sup> )	株数/小区	小麦单株地上部干重(g/株)	地上部总生物量(kg/hm <sup>2</sup> )
CK	0.48	104 ± 12 c	1.85 ± 0.22 b	4 011 ± 472 e
NP	0.48	53 ± 5 d	2.28 ± 0.17 b	2 522 ± 183 e
NK	0.48	55 ± 18 d	0.16 ± 0.02 c	186 ± 25 f
PK	0.48	138 ± 5 b	3.42 ± 0.48 a	9 842 ± 1392 c
NPK	0.48	97 ± 20 c	3.21 ± 1.04 a	6 496 ± 2 114 d
M	0.48	205 ± 28 a	3.80 ± 0.18 a	16 232 ± 759 a
NPKM	0.48	194 ± 19 a	3.12 ± 0.32 a	12 610 ± 1 315 b

## 2.3 小麦地上部阴阳离子含量和总质子产生量

作物体内养分含量不仅直接反映其生长状况,而且其阴阳离子平衡关系直接影响土壤的酸化过程。如果作物从土壤中带走的阳离子多于阴离子,产生净质子,则会加速土壤酸化。长期不同施肥处理下小麦体内主要阳离子(钙、镁、钠和钾)和阴离子(氯、磷和硫)含量与单位质量小麦净质子产生量如表 3 所示,与 CK 相比,除了 NP 和 PK 处理对小麦体内总阳离子含量无显著影响外,其他处理均不同程度地提高小麦

地上部总阳离子含量。与阳离子不同,施入有机肥和无机肥均显著提高小麦地上部总阴离子含量。所有处理中,单位质量小麦净质子产生量(H<sup>+</sup>)均为正值,说明无论是否施肥,小麦吸收离子均引起土壤酸化,尽管处理间贡献能力存在差别。单位质量小麦净质子产生量表现出不同的趋势(表 3),NP、PK 和 NPK 处理中单位质量小麦净质子产生量均低于 CK,NK 与 CK 处理无显著差别,而有机肥处理(M 和 NPKM)提高了单位质量小麦净质子产生量。

表 3 单位质量小麦地上部阴阳离子含量和净质子产生量  
Table 3 Ion contents in shoot and net proton production of wheat with unit mass

处理	阳离子 (cmol/kg)				Σ 阳离子 (cmol/kg)	阴离子 (cmol/kg)			Σ 阴离子 (cmol/kg)	H <sup>+</sup> (cmol/kg)
	钙	钾	镁	钠		硫	磷	氯		
CK	3.70 ± 0.64	19.81 ± 0.45	3.05 ± 0.14	1.21 ± 0.33	34.52 ± 1.66 c	3.63 ± 0.08	2.50 ± 0.34	3.96 ± 0.41	13.72 ± 0.55 e	20.80 ± 1.12 ab
NP	5.19 ± 0.51	14.82 ± 2.01	2.14 ± 0.27	0.62 ± 0.09	30.10 ± 2.04 c	6.38 ± 1.07	3.88 ± 0.38	3.67 ± 0.65	20.31 ± 3.36 d	9.79 ± 1.40 c
NK	3.76 ± 0.68	31.95 ± 5.87	1.63 ± 0.51	0.74 ± 0.09	43.47 ± 5.47 b	5.88 ± 0.76	1.92 ± 0.20	9.27 ± 0.20	22.95 ± 1.08 cd	20.52 ± 4.80 ab
PK	2.93 ± 0.13	24.36 ± 2.93	2.14 ± 0.26	0.42 ± 0.08	34.92 ± 3.63 c	3.53 ± 0.21	5.47 ± 0.38	11.17 ± 1.19	23.70 ± 3.13 cd	11.22 ± 0.70 c
NPK	3.63 ± 0.49	31.32 ± 2.61	1.53 ± 0.34	0.46 ± 0.04	42.10 ± 1.63 b	5.96 ± 1.16	4.18 ± 0.59	10.70 ± 1.64	26.80 ± 2.17 bc	15.30 ± 1.38 bc
M	4.60 ± 0.96	36.70 ± 4.70	4.08 ± 0.32	0.48 ± 0.08	54.54 ± 6.11 a	4.87 ± 0.34	10.14 ± 1.08	10.47 ± 0.38	30.35 ± 1.51 b	24.19 ± 6.29 a
NPKM	4.77 ± 0.28	41.76 ± 3.28	3.78 ± 0.19	0.59 ± 0.04	59.45 ± 3.63 a	5.40 ± 0.53	8.41 ± 1.03	15.94 ± 1.28	35.15 ± 4.40 a	24.30 ± 4.12 a

结合单位面积土壤中小麦的地上部总生物量,本文计算了单位面积土壤中小麦产生的总质子量。如图 1 所示,不同施肥处理下小麦总质子产生量大小顺序为 M>NPKM>PK>NPK>CK>NP>NK,说明长期施入

有机肥处理(M 和 NPKM)中小麦通过阴阳离子吸收对土壤的酸化能力最大,其次为 PK 和 NPK 处理,而长期施入 NP 和 NK 处理中小麦对土壤酸化能力最弱,明显低于不施肥对照。

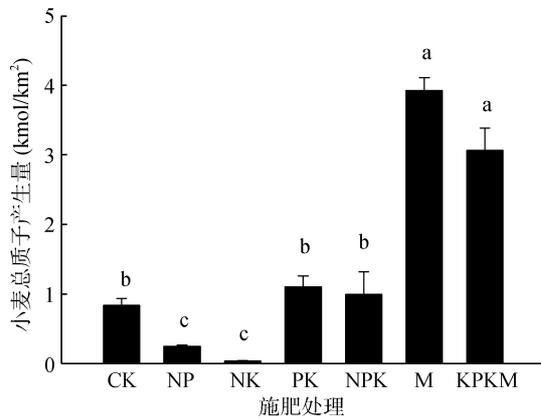


图 1 单位面积土壤中小麦总质子产生量

Fig. 1 Total proton production of wheat per unit area

表 4 单位土壤面积上小麦总质子产生量与土壤理化因子和小麦生物量之间的相关性

Table 4 Correlations between total proton yield and soil physico-chemical factors and wheat biomass

	碱解氮	有效磷	速效钾	H <sup>+</sup>	地上部生物量	ΣH <sup>+</sup>
pH	0.551	0.703	0.439	0.617	0.858*	0.884**
碱解氮		0.856*	0.518	0.595	0.733	0.860*
有效磷			0.683	0.564	0.806*	0.885**
速效钾				0.424	0.604	0.570
H <sup>+</sup>					0.418	0.643
地上部生物量						0.948**

注：\*表示在  $P < 0.05$  水平显著相关，\*\*表示在  $P < 0.01$  水平显著相关。

### 3 讨论

长期施肥的农田土壤中,化学氮肥输入是加速农田土壤酸化的主要因子,与氮循环过程中产生的大量酸有关,如硝化作用、硝态氮的淋失等,其质子产生强度远大于大气酸沉降和植物质子的释放量。Barak 等<sup>[12]</sup>的研究发现施氮肥引起的酸化是酸沉降的 25 倍,我国四大耕作系统中施肥导致的氮循环对土壤质子的贡献也远高于植物质子的释放。本研究中,相比化学氮肥处理(NP、NK 和 NPK),PK 处理具有较高的小麦总质子产生量,但是土壤酸化程度较低,可以暗示农田土壤中植物的酸化贡献远低于氮循环。尽管如此,作物对土壤酸化的贡献是不可忽视的重要致酸因子,例如,本研究样地尺度较小,可以认为酸沉降对土壤酸化的贡献是相同的,而 25 年连续施磷钾肥(PK 处理)的土壤 pH 比不施肥对照低 0.31 个单位,这应该归因于植物离子吸收对土壤酸化的贡献。尽管不同施肥方式下小麦产生的总质子量差异较大,但均为正值,说明农田土壤中作物具有酸化土壤的能力。因此,了解农田土壤酸化过程中植物对酸化的贡献能力对深入分析土壤酸化因子以及预测土壤酸化趋势具有重要意义。

### 2.4 小麦总质子产生量与土壤理化因子和生物量之间的相关性

如表 4 所示,单位质量小麦产生的质子量(H<sup>+</sup>)与土壤基本理化因子均未表现出显著相关性。单位面积土壤中小麦地上部总质子产生量(ΣH<sup>+</sup>)与地上部生物量、土壤 pH 和土壤有效磷含量分别呈极显著相关( $P < 0.01$ ),其中与地上部生物量的显著性系数最高,与土壤碱解氮含量呈显著相关( $P < 0.05$ );小麦地上部生物量与土壤 pH 和土壤有效磷含量分别呈显著相关( $P < 0.05$ )。这些结果说明,单位面积土壤上小麦地上部总生物量直接影响其总质子的产生量,而影响总生物量的最主要因素为土壤 pH 和有效磷含量。

对于本研究样地,长期施入化学氮肥的土壤 pH 逐年降低<sup>[15]</sup>,土壤酸化已经非常严重,但是小麦产生的总质子量却较低,说明在这些由氮循环主导的酸化明显的农田土壤中,植物离子吸收对土壤酸化的贡献能力较低。在单独施入化学氮肥的土壤中,作为重要酸化因子植物离子吸收依赖于氮循环,较强的氮循环可加速土壤酸化,结果导致植物对酸化的贡献能力降低。而有机肥处理却并非如此,有机肥施入导致小麦较高的质子产生量,此外,以往研究发现,本研究中的有机肥样地具有较高的硝化能力<sup>[16]</sup>,因此,理论上这些有机肥样地应该表现出较低的土壤 pH。然而,有机肥中有机氮和碱性物质的输入缓解了土壤酸化过程<sup>[17-18]</sup>,显著提高土壤 pH。孟红旗等<sup>[19]</sup>对本研究中施入的猪粪采用元素分析法检测发现,猪粪碱度约为 130.1 cmol/kg。M 和 NPKM 处理中猪粪的施加量分别为 17.96 t/hm<sup>2</sup>和 12.57 t/hm<sup>2</sup>,计算可得相应的猪粪产生的碱度分别为 23.36 kmol/hm<sup>2</sup>和 16.35 kmol/hm<sup>2</sup>,而小麦酸化产生的总质子量分别为 3.93 kmol/hm<sup>2</sup>和 3.06 kmol/hm<sup>2</sup>,远低于猪粪产生的碱度。因此,即使有机肥处理中较高的小麦质子产生量能最大程度上导致土壤酸化,但是有机肥的碱化作用完全缓解了这个酸化过程。

农田土壤中长期施肥引起的土壤 pH、养分含量和养分有效性变化直接影响作物的生物量和阴阳离子吸收,进而影响单位面积土壤中作物的总质子产生量。对于导致各施肥处理间小麦质子产生量差异的因素分析发现,单位质量的小麦产生的质子量与土壤 pH 和养分含量并未呈显著相关,这可能与植物本身调节机制有关。尽管遭受土壤 pH 和养分胁迫的影响,植物还是尽可能地保持相对稳定的阴阳离子平衡,维持基本的生理功能。而单位面积土壤中小麦总质子产生量由小麦的生物量决定。因此,作物阴阳离子吸收对土壤酸化贡献的潜在能力可通过作物的生物量直接判定。本研究结果显示,小麦的生物量与土壤 pH 和有效磷含量呈正相关关系。研究表明随着土壤 pH 的下降,土壤矿物中的铝离子被释放出来,对生物体产生严重的毒害作用。目前,铝毒害已被认为是酸性土壤中生物生长的主要限制因子之一<sup>[20]</sup>。此外,由于酸性土壤中的金属阳离子(例如  $Al^{3+}$ 、 $Fe^{3+}$ )对磷的固定作用,以及磷有机复合体的形成<sup>[21]</sup>,再加上磷离子以扩散而非集流的方式在土壤中流通,大大降低了酸性土壤中磷的有效性。因此,农田土壤酸化过程中,土壤 pH 和有效磷含量的降低抑制作物的生长,进而降低作物离子吸收对酸化的贡献能力。

施钾和有机肥处理下,土壤速效钾和小麦体内钾含量显著增加,且体内钾含量对阳离子总量的贡献最大,但是小麦总质子产生量与土壤速效钾含量没有显著性相关关系。推测主要是小麦对氯离子的吸收所致。氯是植物必需的微量元素之一,且植物可大量奢侈地吸收氯离子<sup>[22]</sup>。长期施入钾肥(氯化钾)和有机肥(猪粪)中都伴随大量氯离子的施入,从而提高土壤中的氯离子含量,因此,小麦吸收钾离子的同时也吸收了大量的氯离子(表 3)。作为重要的阴离子,小麦体内氯离子含量的增加很大程度上抵消了小麦吸收钾离子的作用。

#### 4 结论

长期不同施肥的农田土壤中,化学氮肥的输入降低土壤 pH 和小麦质子产生量,即降低了植物对土壤酸化的贡献能力,主要原因在于较低的 pH 和有效磷含量严重降低了作物的生长量。因此,随着土壤酸化加剧,植物作为酸化因子的作用越来越低。虽然施入有机肥可以提高植物对酸化的潜在贡献能力,但是由于有机肥本身的碱化作用,完全缓解了土壤酸化过程。

#### 参考文献：

- [1] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008–1010
- [2] Lilienfein J, Wilcke W, Vilela L, et al. Effect of no-tillage and conventional tillage systems on the chemical composition of soil solid phase and soil solution of Brazilian savanna oxisols[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2000, 163(4): 411–419
- [3] Chu H Y, Fujii T, Morimoto S, et al. Community structure of ammonia-oxidizing bacteria under long-term application of mineral fertilizer and organic manure in a sandy loam soil[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, 73(2): 485–491
- [4] 栾书荣, 汪晓丽, 洪岚. 土壤中掺入不同植物材料对其 pH 的影响[J]. *扬州大学学报: 农业与生命科学版*, 2005, 26(3): 62–65
- [5] 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, 1999: 146–322
- [6] 陈桂鸾, 黄一帆. 离子色谱法测定植物中的氯离子试验[J]. *现代农业科技*, 2010(3): 16–18
- [7] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983
- [8] Bray R H, Kurt L T. Determination of total, organic and available forms of P in soils[J]. *Soil Science*, 1945, 59: 39–45
- [9] Curtin D, Wen G. Plant cation-anion balance as affected by the ionic composition of the growing medium[J]. *Plant and Soil*, 2004, 267(1/2): 109–115
- [10] 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
- [11] 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): 74–77
- [12] Barak P, Jobe B O, Krueger A R, et al. Effects of long-term soil acidification due to nitrogen fertilizer inputs in Wisconsin[J]. *Plant and Soil*, 1997, 197: 61–69
- [13] Yan F, Schubert S. Soil pH changes after application of plant shoot materials of faba bean and wheat[J]. *Plant and Soil*, 2000, 220(2): 279–287
- [14] Wong M T F, Gibbs P, Nortcliff S, et al. Measurement of the acid neutralizing capacity of agroforestry tree prunings added to tropical soils [J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2000, 134: 269–276
- [15] Cai Z J, Wang B R, Xu M G, et al. Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of southern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15: 260–270
- [16] Cai Z J, Wang B R, Xu M G, et al. Nitrification and acidification from urea application in red soil (Ferralic Cambisol) after different long-term fertilization treatments[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14: 1526–1536
- [17] Natscher L, Schwertmann U. Proton buffering in organic horizons of acid forest soils[J]. *Geoderma*, 1991, 48(1/2): 93–106

- [18] Hue N V. Correcting soil acidity of a highly weathered Ultisol with chicken manure and sewage-sludge[J]. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 1992, 23(3/4): 241–264
- [19] 孟红旗, 吕家珑, 徐明岗, 等. 有机肥的碱度及其减缓土壤酸化的机制. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(5): 1153–1160
- [20] Kochian L V, Hoekenga O A, Pineros M A. How do crop tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorus efficiency[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, 55: 459–493
- [21] Raghothama K G, Karthikeyan A S. Phosphate acquisition [J]. *Plant and Soil*, 2005, 274(1–2): 37–49
- [22] 宁运旺, 张永春, 吴金桂, 等. 土壤-植物系统中的氯及施用含氯肥料的几个问题[J]. *土壤通报*, 2001, 32(5): 222–224

## Comparison of Contribution of Wheat Ionic Uptake to Soil Acidification Under Long-term Different Fertilization

SONG Wenfeng<sup>1,3</sup>, WANG Chao<sup>1</sup>, CHEN Rongfu<sup>1</sup>, WEN Shilin<sup>2</sup>, WANG Boren<sup>2</sup>, SHEN Renfang<sup>1\*</sup>

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2 *Red Soil Experimental Station, Chinese Academy of Agricultural Science, National Observation and Research Station of Farmland Ecosystem in Qiyang, Qiyang, Hunan 426182, China*; 3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** The long-term unreasonable fertilization leads to serious soil acidification in agricultural production. In addition to nitrification and nitrate leaching, the uptake of cations by plants is also an important source of soil acidity. In this study, the effects of long-term different fertilization on the absorption of anion and cation in wheat were studied at the long-term location experiment field of the Red Soil Experimental Station in Qiyang, Hunan Province, which has a history of 25 years. The results showed that long-term application of chemical nitrogen fertilizer significantly decreased soil pH and affected the biomass of wheat. On the contrary, organic fertilizer could alleviate the acidification process of soil and increase the biomass of wheat. The order of the total amounts of proton produced by wheat in the unit soil area which is considered as potential acidification ability of plant was M>NPKM>PK>NPK>CK>NP>NK. There was a significant positive correlation between total amount of proton and total biomass of wheat. In addition, soil pH and available phosphorus content were the main factors affecting wheat shoot biomass. Therefore, in the long-term fertilization of farmland soil, the contribution of crops to soil acidification decreased along with the acidification process, and the main reason was that soil pH and effective phosphorus reduction limited the crop biomass.

**Key words:** Soil acidification; Long-term fertilization; Acidification ability of plant; Ion uptake