

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.02.021

吴聪敏, 陈漂, 韩小明, 等. 三元复合肥料的酸度特征及其对土壤酸化的影响. 土壤, 2022, 54(2): 365–370.

三元复合肥料的酸度特征及其对土壤酸化的影响^①

吴聪敏^{1,2}, 陈漂^{2,3}, 韩小明⁴, 王如海², 李九玉^{2*}, 俞元春^{1*}, 徐仁扣²

(1 南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037; 2 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;

3 河南农业大学资源环境学院, 郑州 450002; 4 江苏省扬州市江都区丁沟镇农业农村局, 江苏扬州 225236)

摘要: 针对目前农田土壤酸化严重, 而酸性复合肥在农业生产中广泛施用, 其本身的酸度特征及其对土壤酸化的促进作用程度不清的问题, 本研究对目前市面上 12 种国内外生产的氮磷钾三元复合肥料进行了调查, 发现 11 种复合肥料呈酸性, 其中 pH 为 4.0~5.0 的肥料达 58% 以上, 含酸量可高达 1.95 mol/kg, 这些酸性肥料施入土壤中 1 d 内可显著降低土壤 pH 和提高土壤交换性酸的含量, 因此酸性复合肥本身的酸性可显著促进土壤酸化。酸性复合肥料施入红壤培养时, 在培养的第 5 天时肥料本身输入质子与氮转化产生质子的比值可高达 204.6%, 培养到 60 d 时最大比值仅为 4.4%, 表明施用强酸性复合肥直接的质子输入量对土壤酸化的相对贡献在施肥初期较大, 后期主要是氮的硝化产酸起作用, 但长期大量施用酸性复合肥对土壤酸化的贡献也不容忽视。

关键词: 复合肥; 土壤酸化; 质子贡献; 氮转化

中图分类号: S511 **文献标志码:** A

Acidity Characteristics of Ternary Compound Fertilizers and Its Effect on Soil Acidification

WU Congmin^{1,2}, CHEN Piao^{2,3}, HAN Xiaoming⁴, WANG Ruhai², LI Jiuyu^{2*}, YU Yuanchun^{1*}, XU Renkou²

(1 College of Biology and Environment, Nanjing Forest University, Nanjing 210037, China; 2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3 College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 4 Agriculture and Rural Affairs Bureau of Dinggou Town, Jiangdu District, Yangzhou, Jiangsu 225236, China)

Abstract: Currently, severe soil acidification occurs widely in cropland. Extensive application of acidic compound fertilizers in agricultural production may contribute to soil acidification, while its acidity characteristics and effect on soil acidification is unclear. In this study, 12 compound fertilizers with ternary nitrogen, phosphorus, and potassium elements were chosen from domestic and foreign companies due to their mass application in China. Results indicated that 11 compound fertilizers were acid, the fertilizers with pH between 4.0 and 5.0 accounted for more than 58%, and their acid content was up to 1.95 mol/kg. When these acid fertilizers directly applied to the soil, they could significantly reduce soil pH and increase the content of exchangeable acidity in one day. Therefore, application of acid compound fertilizer could significantly promote soil acidification due to their high acid content. When these compound fertilizers were applied to red soil for incubation, the ratio of protons from fertilizer direct input to nitrogen conversion could reach up to 204.6% on the 5th day of incubation, while the maximum ratio was only 4.4% on the 60th day of incubation. Results suggested the relative contribution of direct proton input to hydrogen ions by applying strong acid compound fertilizer was greater at the early stage of fertilizer application, while proton production from nitrification played a major role in the later stage. However, the contribution of long-term and mass application of acid compound fertilizer to soil acidification should not be ignored.

Key words: Compound fertilizer; Soil acidification; Proton contribution; Nitrogen transformation

在当前高投入高产出的农业生产中, 土壤酸化已成为制约全球农业发展的主要因素之一^[1]。土壤酸化

是指在自然和人为条件下土壤 pH 不断下降、土壤交换性酸不断增加的过程, 自然酸化伴随着土壤发生和

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41877102, U19A2046)资助。

* 通讯作者(jyli@issas.ac.cn; ycyu@njfu.edu.cn)

作者简介: 吴聪敏(1996—), 女, 河南焦作人, 硕士研究生, 主要从事土壤酸化研究。E-mail: 474732653@qq.com

发育过程, 主要由碳酸和有机酸离解产生氢离子驱动, 而酸沉降和不当的农艺措施等则加剧了土壤酸化进程^[2]。土壤酸化是我国农业土壤退化面临的一个主要问题, 1980—2000 年, 我国主要农作物产地的 pH 平均下降了 0.5 个单位^[3], 长期过量施用化肥, 特别是氮肥是加速土壤酸化进程的重要原因之一^[4]。土壤酸化造成诸多环境风险, 导致土壤养分不均衡、作物生长不良、农产品生产力下降等, 严重威胁土壤生态系统的功能^[5], 需引起足够重视。

化肥种类多且其组成随着农业精细化施肥要求不断变化, 近年来为了能起到平衡肥料的作用, 化肥生产从单一肥料过渡到以复合肥料为主。复合肥料广义上是指氮、磷、钾 3 种养分中, 至少含有其中 2 种养分的肥料。按制造方法可以将其划分为 3 类: 用化学合成方法制得的化成复合肥料、用机械造粒等方法制得的配成复混肥、临时掺混而成的掺混复混肥。复合肥料具有可以为作物提供多种营养元素、提高肥料利用率、提高产量、改善产品品质、经济效益高等^[6]特点, 在市场中具有很好的应用价值。目前化肥复合化率高, 欧洲、北美地区等发达国家 50% 的氮肥, 80%~90% 的磷、钾肥均被加工成复合肥料后使用^[7]。据统计, 1997—2016 年, 我国氮磷钾复合肥料施用量由 7 981 kt 增至 22 071 kt, 年均增长 704.5 kt^[8]。研究发现氮磷钾肥的长期投入可以明显提高土壤的综合肥力和基础地力^[9]。但也有研究表明, 施用氮磷钾化肥会导致土壤酸化^[10]。孙绳军等^[11]也发现施用常规复合肥料(N-P₂O₅-K₂O: 15-15-15)会加剧苹果园土壤酸

化, 导致表层土壤 pH 在 160 d 内从初始的 5.22 下降到了 4.89, 降低了 0.33 个单位。

尽管目前有关肥料造成土壤酸化的作用已有许多报道, 但是研究大多局限于不同肥料类型^[12]、不同土地利用方式^[3]等条件下肥料元素转化对农田土壤酸化的影响^[13], 很少基于肥料本身的酸度特征来分析其对土壤酸化的影响。因此, 本研究通过调研, 选择国内外代表性大企业生产的复合肥料为供试肥料, 结合性质分析, 系统地量化了肥料本身酸度对土壤酸化的贡献及其与氮转化产酸量的相对比较, 深入探究不同类型的复合肥料施入后驱动土壤 pH 变化的主要因素, 为合理选择肥料、防治土壤酸化、保护生态环境可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 复合肥的选择

本试验主要选择了目前在我国农业生产中广泛应用的一些国内外大型企业的氮磷钾三元复合肥料, 包括 5 种进口复合肥料和 7 种国产复合肥料(表 1)。

1.2 试验土壤

试验选用自然风干后过 60 目筛的江西红砂岩发育的旱地土壤作为供试土壤, 其基本理化性质为: pH 为 5.32, 土壤缓冲容量为 16.83 mmol/kg, 土壤全碳和全氮分别为 10.0 g/kg 和 1.3 g/kg。

1.3 试验方法

1.3.1 肥料性质的分析 肥料的 pH 使用电极电位测定^[14], 取 5.0 g 过 60 目筛的样品, 加入 25 ml 去离

表 1 供试肥料的理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of tested fertilizers

肥料	公司	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O 比例(%)	pH	含酸或碱量 ^① (mol/kg)	质子贡献量 ^② (kmol/hm ²)	铵硝比	有机氮 (g/kg)	备注	
进口肥料	日本复合肥料	Arysta lifescience (Chisso-Asahi)	14-13-13	4.02	1.45	1.76	1.21	759	-
	挪威复合肥料 1	雅苒国际有限公司	15-15-15	4.32	1.17	1.36	1.06	0	硫酸钾型
	挪威复合肥料 2	雅苒国际有限公司	21-6-13	4.43	0.47	0.45	0.95	0	硫酸钾型
	俄罗斯复合肥料	阿康公司	16-16-16	4.66	1.06	1.35	1.05	154	-
	法国复合肥料	北欧化工有限公司	15-15-15	5.21	0.43	0.35	0.75	0	硫酸钾型
国产肥料	中东复合肥料	江苏中东化肥股份有限公司	20-20-20	4.07	1.95	1.97	0.49	543	水溶性肥
	鲁西复合肥料	鲁西集团有限责任公司	12-18-15	4.36	1.74	3.26	178.2	90	硫酸钾型
	天脊复合肥料	山西天脊煤化工集团有限公司	20-20-20	4.41	0.70	0.63	0.95	182	硝酸磷钾型
	洋丰复合肥料	湖北洋丰股份有限公司	14-16-15	5.69	1.04	1.81	408.9	42	硫酸钾型
	苏中复合肥料	南通苏中新型肥料技术研究所	10-7-8	5.99	0.69	0.83	169.4	0	-
	史丹复合肥料	史丹利农业集团股份有限公司	17-17-17	6.16	0.56	0.69	142.6	768	硫酸钾型
	贵州复合肥料	贵州肥业有限公司	16-15-15	7.38	-1.24	-	434.6	0	碱性肥

注: ①正值表示含酸量, 负值表示含碱量; ②复合肥料质子贡献量以常规 N 200 kg/hm² 施用量和酸性肥料滴定至 pH 7.0 时单位肥料含酸量计算结果表示。

子水,振荡平衡 30 min 后测定 pH。肥料的含酸量或含碱量采用电位滴定法测定,称取样品 1.00 g 于 100 ml 塑料滴定杯中,加入 50 ml 去离子水,使用已标定好浓度的 0.1 mol/L NaOH 或 0.05 mol/L HCl,运用自动电位滴定仪进行电位滴定,同时将未加入样品的 50 ml 去离子水处理作为空白进行滴定,酸性样品滴定至 pH 7.0,碱性样品滴定至 pH 6.5。滴定过程中连续均匀通入 N_2 ,避免 CO_2 的干扰。根据酸碱滴定曲线即可计算肥料滴定至不同 pH 需消耗的酸或碱量。肥料中的铵态氮、硝态氮和有机氮的含量采用流动分析仪测定,取 0.10 g 复合肥于 100 ml 聚乙烯离心管中,加入 50 ml 去离子水,振荡 1 h,离心过滤后取上清液测定铵态氮、硝态氮和总氮含量。

1.3.2 肥料本身酸度对土壤酸化的影响 称取 60.0 g 过 60 目筛的江西红砂岩作为试验用土,选择 pH<5 的氨硝比相当的俄罗斯复合肥和硫酸钾型挪威复合肥 1,以及以有机氮为主的日本复合肥等 3 种肥料,按照复合肥的氮含量为 0、100、200、300、400、500 和 600 mg/kg 的比例分别向上述土壤中添加肥料(处理表示为 CK、N100、N200、N300、N400、N500、N600)。根据 0~20 cm 土层土壤重量为 10 000 kg/hm² 土计算,分别相当于复合肥氮添加量为 0、225、450、675、900、1 125、1 350 kg/hm²。其中,复合肥以溶液的形式添加,分别吸取 10 ml 配置好的肥料溶液添加到 60.0 g 土样中,补充水分 5 ml 至土壤含水量为 17%,搅拌均匀后,分装在 3 个聚乙烯离心管中,在 25 °C 的环境条件下培养 1 d,培养结束后分别取 10.0 g 鲜土测定土壤 pH 与交换酸的含量。本组试验选择了 3 种肥料,每种肥料设置 7 个处理,3 次重复。

1.3.3 肥料本身酸度和氮转化对土壤酸化的质子贡献比较 选择 pH<5 的氨硝比相当的俄罗斯复合肥和硫酸钾型挪威复合肥 1,以及以有机氮为主的中东复合肥和铵态氮为主的鲁西复合肥等 4 种肥料作为研究对象,按照复合肥料氮含量为 200 mg/kg(相当于 450 kg/hm²)的比例分别加入 200.0 g 供试土壤中,添加去离子水调节土壤含水量为 17%,于 25 °C 培养箱中进行培养。分别在第 0、2、5、10、20、30、45、60 天取 10.0 g 鲜样测定土样的 pH,并于第 0、5、60 天称取 5.0 g 鲜土提取土样溶液测定不同形态氮的含量。试验所使用的肥料直接加入粉末状,以不加肥料处理为对照,该组共 5 个处理,3 次重复。由于土壤初始 pH 为 5.74,肥料酸度对土壤酸化的贡献根据肥料滴定曲线计算 pH 5.74 时所贡献的质子以及每种肥料氮含量为 200 mg/kg 土的实际肥料施用量。氮

转化主要分析氮的矿化和硝化,其中以第 5 天和 60 天分别相对第 0 天的溶液中无机氮和硝态氮的净变化量进行计算,每净矿化产生 1 mol 铵态氮消耗 1 mol 质子,而每 1 mol 铵态氮硝化产生 2 mol 质子。氮转化产生的质子为每一时期土壤中净氮硝化产生的质子与氮矿化消耗质子量的差值,并进一步计算复合肥料施用直接贡献的质子与氮转化产生质子的比值。

1.4 测定方法

土壤 pH 的测定:取 10.0 g 鲜土,按照水土比为 2.5:1(*V:m*)的比例加入去离子水,然后使用 pH 复合电极(Thermo Scientific Orion Star A211)测定^[14]。土壤各形态氮含量的测定:取 6.0 g 鲜土于 50 ml 塑料离心管,加入 25 ml 2 mol/L KCl 溶液,震荡 1 h 后离心过滤,取上清液,运用流动分析仪测定土壤中的铵态氮、硝态氮和全氮的含量^[15]。土壤交换性酸总量的测定:取 10.0 g 鲜土,采用 1 mol/L KCl 交换-中和滴定法测定^[14]。

1.5 数据统计与分析

本试验使用 Microsoft Excel 2013 对数据进行整理,运用 Origin 2018 绘制图表,利用 SPSS 22.0 进行差异显著性检验(LSD, Duncan, $P<0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 不同复合肥的特征分析

本试验所选用的 12 种氮磷钾三元复合肥料的性质如表 1 所示,主要包括市面上应用较广泛的 5 种进口复合肥和 7 种国产复合肥,这些复合肥氮磷钾的含量各异,从低浓度的 250 g/kg 到高浓度的 600 g/kg。按照肥料中氮的主要存在形态,可将复合肥料分为 4 种以铵态氮为主、5 种铵硝态均衡型和 3 种有机氮为主的肥料。供试肥料中 pH 4.0~5.0 的复合肥占 58.3%,90% 以上的肥料 pH<7.0,其中日本复合肥和 中东复合肥的 pH 最低,接近 4.0。这主要是因为化成复合肥是通过各种化学反应合成的复合肥,主要用磷酸、合成氨和钾等基础原料直接加工而成;复混肥生产的常用原材料主要有磷酸二铵、磷酸一铵、硝酸磷肥、硝酸钾和磷酸二氢钾等。因此,主要是复合肥生产的原料呈酸性,导致肥料呈酸性。

采用电位滴定法测定了肥料含酸量,结果发现当酸性肥料的滴定终点为 pH 7.0 时,一般复合肥的 pH 越低,其贡献出的质子越多。根据肥料 pH 计算出的肥料溶液质子浓度与肥料本身所携带的酸量呈显著正相关关系,相关系数 r 为 0.748,表明根据肥料本身的 pH 即可初步反映肥料携带酸量。从具体数据来

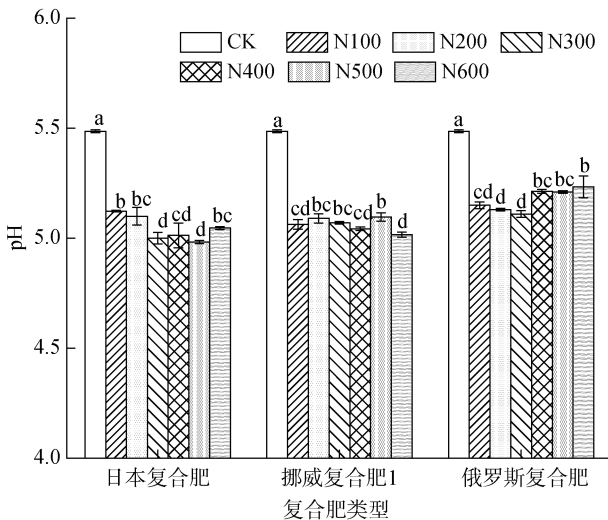
看,这 12 种复合肥料含酸量可高达 1.95 mol/kg,表明这些复合肥本身呈酸性,可不同程度地造成土壤酸化。由 Guo 等^[3]的研究结果可知,我国每年因酸沉降输入土壤的质子可达 0.4~2.0 kmol/hm²。根据当前我国的农业生产实际情况,肥料的合理施氮量大约在 150~250 kg/hm²^[16]。以施用 N 200 kg/hm² 为准计算酸性复合肥每年会产生 0.35~3.26 kmol/hm² 的质子,因此一般酸性复合肥施用直接输入土壤的质子量与酸沉降产生的质子量接近,但其最大值可为酸沉降的 1.6 倍。实际上目前集约化生产中肥料的施用量,特别是果树、蔬菜、茶叶等种植的施用量远高于 N 200 kg/hm²,常可高达 1 200 kg/hm²^[17]。因此预期相对酸沉降,复合肥本身携带的酸量对土壤酸化的促进作用更强。

2.2 复合肥不同加入量对土壤 pH、交换性酸的影响

为了量化复合肥本身的酸度对土壤酸化的直接影响,本研究选择 pH<5、氨硝比相当的俄罗斯复合肥和硫酸钾型挪威复合肥 1,以及以有机氮为主的日本复合肥等 3 种肥料,分别在 6 种氮浓度梯度下进行试验。由图 1 可以看出,未施肥时,土壤 pH 为 5.49,添加复合肥显著降低了土壤的 pH。土壤 pH 可以直观表征土壤活性酸的强度,不同肥料处理组土壤的 pH 均显著低于 CK 处理组的 pH,说明施加复合肥明显降低了土壤 pH。随着复合肥施用量的增加,土壤 pH 几乎都呈现出逐渐下降的趋势;而且挪威复合肥 1 和日本复合肥本身的 pH 低,其促进土壤 pH 下降的作用也较强。当氮加入量为 500 mg/kg 时,日本复

合肥处理后的土壤 pH 最低,与 CK 相比, pH 下降了 0.51 个单位。当施入的氮含量为 600 mg/kg 时,挪威复合肥 1 处理土壤 pH 最低,为 5.02。表明强酸性复合肥本身携带的酸性物质会明显促进土壤酸化。

土壤交换性酸是土壤交换性 Al 和交换性 H⁺ 的总量,是指示土壤酸度变化的一个重要容量指标^[18],更能反映土壤酸度的高低。由图 2 所示,在不同肥料氮施加水平下,不同肥料处理后土壤中交换性酸均呈现出相同的变化趋势,即随着外源施加复合肥含氮量的升高,土壤交换性酸量也相应增加,特别是俄罗斯复合肥,再次证明复合肥本身携带的质子施加土壤后会促进氢铝转化导致土壤交换性酸度显著增加,且肥料投入量越高,导致土壤酸化程度越强。Rodroguz 等人^[19]的研究也表明施氮量会显著影响土壤的总酸度,当施氮量从 100 kg/hm² 升高到 200 kg/hm² 时,土壤的平均交换性酸总量从 6.57 mmol/kg 增加到 8.21 mmol/kg。从不同肥料对比来看,总体而言,同一施氮量下,施用复合肥导致土壤交换性酸增加的顺序为俄罗斯复合肥>日本复合肥>硫酸钾型挪威复合肥 1,这与肥料本身的酸度大小顺序相反,也与同样氮加入量下肥料的质子贡献量大小顺序不同(表 1)。以 N 200 mg/kg 为复合肥加入量的处理为例,俄罗斯复合肥、硫酸钾型挪威复合肥 1 和日本复合肥中的交换性酸含量分别为 7.92、5.43 和 5.34 mmol/kg。这主要是因为肥料施用对土壤酸度的影响除了受本身酸度的影响外,肥料中组分与土壤黏土矿物之间的相互



(图中小写字母不同表示同一肥料在不同氮加入量处理间的差异显著 ($P < 0.05$), 下同)

图 1 施加不同含氮量复合肥培养 1 d 后土壤 pH 的变化
Fig.1 Changes of soil pH after one-day incubation when acid compound fertilizers were applied with different nitrogen contents

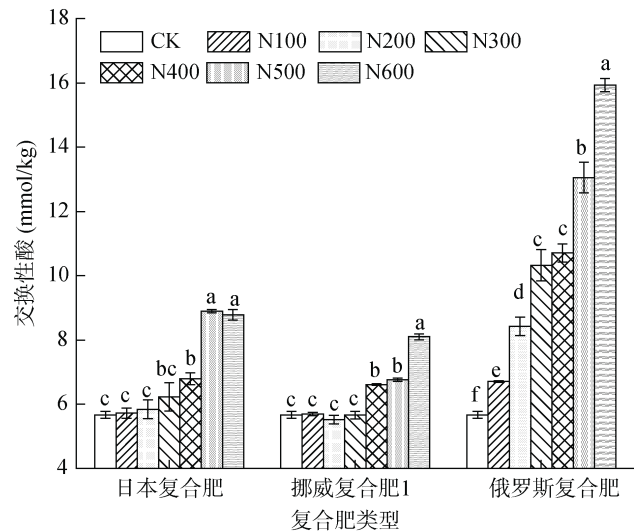


图 2 施加不同含氮量复合肥培养 1 d 后土壤交换性酸的变化

Fig.2 Changes of soil exchangeable acidity after one-day incubation when acid compound fertilizers were applied with different nitrogen contents

作用也对土壤酸度产生影响。具体为日本复合肥中有有机氮肥和挪威复合肥中的硫酸根等可以在红壤表面发生专性吸附，该过程释放的羟基可中和土壤酸度，因此本身酸度高的日本复合肥和挪威复合肥 1 处理土壤中交换性酸量反而低于俄罗斯复合肥处理土壤。

2.3 复合肥本身酸度对土壤酸化的质子贡献

肥料施入土壤中对土壤酸度的影响,除了受本身酸度的影响外,肥料中氮转化过程诱导质子的产消量是最主要的因素。为了相对比较肥料本身酸度与肥料施入土壤后引起的氮矿化消耗质子量和硝化产生质子量对土壤酸化的贡献,本研究选择了 pH<5 的俄罗斯复合肥、挪威复合肥 1、中东复合肥和鲁西复合肥 4 种不同类型肥料作为研究对象,分别加入到 pH 5.74 的土壤进行培养。结果表明肥料加入到土壤中的当天就明显降低了土壤的 pH, pH 大小顺序为对照>中东复合肥>鲁西复合肥~挪威复合肥>俄罗斯复合肥(图 3),这与表 1 中肥料本身的 pH 和所含酸量大小并不一致,这主要是因为肥料对土壤 pH 的影响除了受本身酸度的影响外,中东复合肥中的有机氮以及鲁西复合肥和挪威复合肥中的硫酸根在土壤中专性吸附过程中能释放出羟基,因此这 3 种肥料虽然本身酸度高,但加入土壤后对土壤的酸化作用反而不如俄罗斯复合肥。

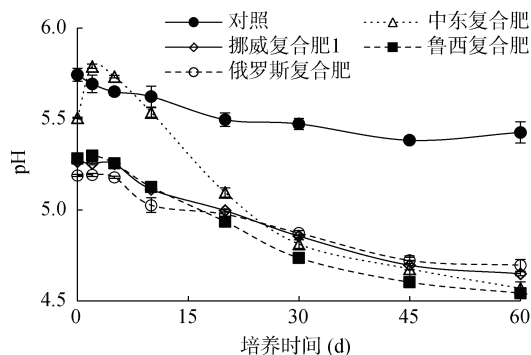


图 3 添加不同复合肥料对土壤 pH 动态变化的影响
Fig. 3 Effects of adding different compound fertilizers on dynamic changes of soil pH

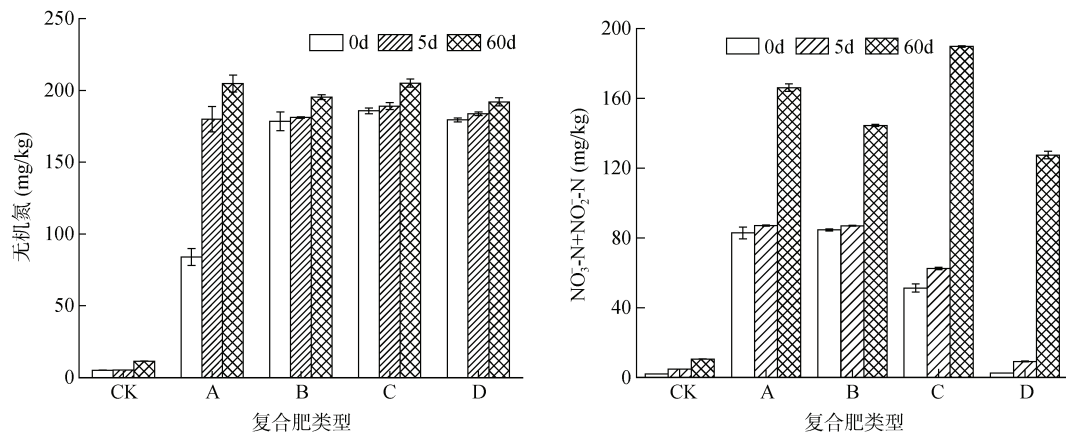
根据肥料本身酸度和复合肥施加到土壤培养过程中无机氮和硝态氮的净增加量,即可计算出肥料直接输入质子量、氮矿化消耗质子量和氮硝化产生质子量(表 2)。结果表明中东复合肥中有机氮的矿化水解作用主要发生在培养试验的前 5 d,因此与第 0 天相比,培养第 5 天大幅增加了土壤溶液中总无机氮的含量(图 4),矿化作用会消耗质子(表 2),并提高土壤的 pH(图 3)。而土壤中氮的硝化作用则主要发生在培养 5 d 以后,硝化作用会产生大量质子并导致土壤 pH 显著降低,土壤中肥料氮的添加导致土壤酸化作用更显著(表 2、图 3 和图 4)。从肥料氮直接输入质子与氮转化产消质子的比值来看,在氮硝化作用较弱的培养前期,(除中东复合肥由于有机氮大量水解消耗质子导致比值为负值外,其比值可达 0.41~2.05,表明肥料氮直接输入质子对土壤酸化起着重要的贡献)。而培养 60 d 后,由于肥料施入的无机氮约 85% 呈硝态氮,绝大部分铵态氮被硝化产生大量的质子,因此肥料氮直接输入质子与氮转化产生质子的比值均小于 0.05,这个比值小说明铵态氮肥的大量施用造成硝化产酸过程是导致土壤酸化的主要原因,而肥料氮直接输入质子的相对贡献较小。本试验中施入的有机氮和铵态氮绝大部分发生了硝化作用,但实际土壤中部分铵态氮被植物吸收会减弱硝化作用,以及硝态氮被植物吸收会释放出等当量的羟基,因此大田土壤中氮转化产酸量会显著低于本试验计算值,反过来也表明肥料氮直接输入质子对土壤酸化的相对贡献会更大。因此,长期施用酸性复合肥料时,肥料本身酸度对土壤酸化的作用也不容忽视。

试验结果还表明以铵态氮为主的鲁西复合肥硝化作用会产生大量质子,而以有机氮为主的中东复合肥则由于有机氮矿化消耗质子,氨硝比相当的挪威复合肥和俄罗斯复合肥硝化产酸量明显减低,最终导致鲁西复合肥对土壤酸化的质子贡献相对明显高于后

表 2 添加 N 200 mg/kg 复合肥对土壤酸化直接贡献的质子以及培养过程中氮转化产消的质子量

Table 2 Protons contributed directly to soil acidification by adding compound fertilizers of N 200 mg/kg and amount of protons produced from nitrogen mineralization and nitrification during incubation

肥料种类	肥料质子输入量 (mmol/kg 土)	氮矿化消耗质子量 (mmol/kg 土)		氮硝化产生质子量 (mmol/kg 土)		肥料输入质子量/氮转化产生 质子量	
		5 d	60 d	5 d	60 d	5 d	60 d
挪威复合肥 1	0.239	0.08	0.62	0.66	10.74	0.41	0.02
俄罗斯复合肥	0.126	0.30	0.44	0.42	7.34	1.04	0.02
中东复合肥	0.302	6.86	8.18	1.22	18.55	-0.05	0.02
鲁西复合肥	0.669	0.24	0.93	0.56	16.62	2.05	0.04



(CK: 对照; A: 挪威复合肥 1, B: 俄罗斯复合肥, C: 中东复合肥, D: 鲁西复合肥)

图 4 施加不同肥料后培养 0、5 和 60 d 土壤无机氮和硝态氮含量的变化

Fig. 4 Changes of soil inorganic nitrogen and nitrate nitrogen contents after applied different acid compound fertilizers and incubated for 0, 5 and 60 days

三者(表 2)。由于铵态氮的硝化过程是土壤中肥料质子产生的主要来源,因此应尽量选择以有机氮、硝态氮为主的复合肥,南方可变电荷土壤还可以选择硫酸钾型复合肥,以降低复合肥料本身酸度和硝化过程引起的土壤酸化作用。

3 结论

通过对我国农业上广泛使用的国内外复合肥进行调研发现绝大部分复合肥呈酸性,其 pH 可低至 4.0,其对土壤酸化的质子贡献与酸沉降相当。添加酸性复合肥至土壤中可显著降低土壤 pH 和增加土壤的交换性酸量,表明施用酸性复合肥会明显促进土壤酸化。尽管施用强酸性复合肥直接的质子输入量在肥料施加到土壤的初期对土壤酸化的相对贡献较大,后期主要是氮的硝化产酸作用,但长期酸性复合肥本身酸度对土壤酸化的贡献也不容忽视。因此,为降低化肥施用引起的土壤酸化作用,应选择复合肥本身酸度较低,且以有机氮、硝态氮为主的复合肥,南方可变电荷土壤还可以选择硫酸钾型复合肥。

参考文献:

[1] 唐贤,梁丰,徐明岗,等. 长期施用化肥对农田土壤 pH 影响的整合分析[J]. 吉林农业大学学报, 2020, 42(3): 316–321.

[2] 徐仁扣,李九玉,周世伟,等. 我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 160–167.

[3] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008–1010.

[4] 韩天富,柳开楼,黄晶,等. 近 30 年中国主要农田土壤 pH 时空演变及其驱动因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(12): 2137–2149.

[5] 郝天象. 不同氮肥管理和种植体系的农田土壤酸化定量研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.

[6] 曹涤环. 复合肥的合理选用[J]. 湖南农业, 2016(10): 13.

[7] 王家生,何随成,佟晔. 当前国内外肥料发展的趋势及特点[J]. 农业经济, 2003(8): 26.

[8] 贾可,沈兵,曲艳娣,等. 施肥复合化率及复合肥消费现状与变化分析(二)[J]. 肥料与健康, 2020, 47(3): 1–5.

[9] 包耀贤,黄庆海,徐明岗,等. 长期不同施肥下红壤性水稻土综合肥力评价及其效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 74–81.

[10] 崔新卫,张杨珠,高菊生,等. 长期不同施肥处理对红壤稻田土壤性质及晚稻产量与品质的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(6): 190–197.

[11] 孙绳军,李锋,张德成,等. 不同肥料防控苹果园土壤酸化的效果[J]. 落叶果树, 2020, 52(1): 53–55.

[12] 孟红旗,刘景,徐明岗,等. 长期施肥下我国典型农田耕层土壤的 pH 演变[J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1109–1116.

[13] 李平,钟敏芝,周铭德. 水稻施用硝酸磷钾复合肥与常规复合肥对比试验[J]. 现代农业科技, 2008(21): 184, 186.

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[15] Li J Y, Wang N, Xu R K, et al. Potential of industrial byproducts in ameliorating acidity and aluminum toxicity of soils under tea plantation[J]. Pedosphere, 2010, 20(5): 645–654.

[16] 巨晓棠,张翀. 论合理施氮的原则和指标[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 1–13.

[17] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 1.21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008–1017.

[18] 林涵. 长期不同施肥对黑土酸度变化的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2014.

[19] Rodriguez M B, Godeas A, Lavado R S. Soil acidity changes in bulk soil and maize rhizosphere in response to nitrogen fertilization[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2008, 39(17/18): 2597–2607.