

艾玉春,张永春,宁运旺. 氨法脱硫副产品硫酸铵的农业应用前景[J]. 江苏农业科学,2018,46(23):308-313.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.23.077

# 氨法脱硫副产品硫酸铵的农业应用前景

艾玉春,张永春,宁运旺

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业部江苏耕地保育科学观测实验站,江苏南京 210014)

**摘要:**介绍了氨法脱硫的技术特点和优势,比较了我国现行的硫酸铵国家标准和团体标准之间的差异,认为中国石油和化学工业联合会发布的团体标准 T/CPCIF 0006—2017《氨法脱硫副产硫酸铵》更符合当前需求。检测了氨法脱硫副产品硫酸铵的多种成分,认为硫酸铵在农业生产中具有广泛的适宜性。与尿素相比,硫酸铵作为肥料使用既属于环保产业副产品,也是一种多元速效肥料,其价值被严重低估,将在氮肥结构调整中发挥重要作用。根据硫酸铵的特点,分析了硫酸铵的农业适宜应用领域,预测我国农业未来对硫酸铵需求量为 1 830 万 t。

**关键词:**氨法脱硫;硫酸铵;农业应用;氮肥结构;需求量

**中图分类号:** X773      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1002-1302(2018)23-0308-05

我国是世界上最大的燃煤消费国,煤炭消耗量占全球总量的 48.2%<sup>[1]</sup>。二氧化硫是燃煤烟气的主要污染成分,对工业制品、农业生产和人体健康都可产生危害<sup>[2]</sup>。中国曾是世界上最大的二氧化硫排放国,2006 年排放量达到 2 588 万 t,此后逐年下降,至 2016 年排放量仍超过 1 800 万 t,居世界高位。随着我国社会主要矛盾的转变和人们对美好生活追求的需求越来越高,大幅消减二氧化硫排放量、改善环境质量、燃煤企业安装脱硫装置是必然趋势。

目前,约 80% 的火电厂都采用钙法烟气脱硫,但该法产生大量副产品脱硫石膏。由于成分复杂,重金属含量等难以控制,大多采用堆存处理,而这个处理会产生二次污染,严重影响了该脱硫技术的生态效益<sup>[3]</sup>。氨法烟气脱硫是一种利用氨或氨水作为脱硫剂,副产品为硫酸铵的脱硫技术,最早开发于 20 世纪 70 年代,90 年代逐渐得到应用。氨法脱硫工艺具有脱硫效率高、无二次污染、无废水排放、脱硫副产品经济价值高等优点,特别是随着氨逃逸控制、气溶胶控制、亚硫酸铵氧化、硫酸铵结晶等问题的解决,已逐渐成为一项较为成熟的脱硫技术<sup>[4]</sup>。与钙法脱硫技术相比,氨法脱硫除具备运行成本低、脱硫效率高、无二次污染(无废水和二氧化碳排放)等优点外,其最大优势还在于副产品硫酸铵,由于含有作物生长的必需元素氮和硫,理论上可直接用于农林业或作为生产复合肥的原料。但是,作为一种特殊技术背景下的硫酸铵,其有效成分是否符合肥料相关标准、是否会产生二次污染、在农业中的应用前景有待进一步研究。本研究通过对氨法脱硫副产品硫酸铵进行成分分析,并根据硫酸铵本身的性质特点,综合前人研究报道,尝试对氨法脱硫副产品硫酸铵在农业中的应用前景进行分析,以期对相关行业提供参考。

## 1 硫酸铵肥料相关标准

现行的 GB/T 535—1995《硫酸铵》中针对肥料级硫酸铵主要规定了外观、氮含量、水分含量、游离酸含量,而对铁、砷、重金属、水不溶物含量未作规定,适用于由合成氨与硫酸中和所制得的硫酸铵、炼焦所制得的副产硫酸铵,但不适用于火电厂脱硫法或其他烟气脱硫法生产的副产硫酸铵产品(表 1)。

表 1 GB/T 535—1995《硫酸铵》内容

指标	判别	优等品	一等品	合格品
外观		白色结晶,无可见机械杂质	无可见机械杂质	
氮(N)干基含量(%)	≥	21.0	21.0	20.5
水分(H <sub>2</sub> O)含量(%)	≤	0.2	0.3	1.0
游离酸(H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )含量(%)	≤	0.03	0.05	0.20
铁(Fe)含量(mg/kg)	≤	0.007	—	—
砷(As)含量(mg/kg)	≤	0.000 05	—	—
重金属(以 Pb 计,mg/kg)	≤	0.005	—	—
水不溶物含量(mg/kg)	≤	0.01	—	—

注:硫酸铵做农业用途时可不检验铁、砷、重金属、水不溶物含量等指标。

为解决烟气脱硫生产硫酸铵无标准可用的尴尬,中国石油和化学工业联合会于 2017 年发布了团体标准 T/CPCIF 0006—2017《氨法脱硫副产硫酸铵》。团体标准适用于火电厂脱硫法或其他烟气脱硫法生产的副产硫酸铵产品,该标准主要指标值与国家标准接近,并对镉、汞、砷、铅、铬等重金属含量作了规定(表 2)。从标准适用范围、内容和规定指标值来看,团体标准既是对国家标准的补充,同时对硫酸铵产品质量也提出了更高的要求。在我国社会主要矛盾已经发生转化,人们对美好生活的需求越来越高的今天,T/CPCIF 0006—2017《氨法脱硫副产硫酸铵》无疑更适应社会发展的需要。

## 2 氨法脱硫硫酸铵的农业适宜性

农业生产中,作物因肥料产生的危害(简称肥害)常表现为烧苗、萎蔫、死亡以及营养失衡等,常与土壤水分含量、肥料种类、施肥量、施肥方式以及作物生长特性有关,小面积肥害

收稿日期:2018-05-21

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFD0200805);江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(17)1001]。

作者简介:艾玉春(1969—),男,江苏泰州人,硕士,研究员,从事土壤肥料相关研究。E-mail:yuchunai@126.com。

表 2 T/CPCIF 0006—2017《氨法脱硫副产硫酸铵》

项目	判别	指标
外观		无可见机械杂质
氮(N)质量分数(干基,%)	≥	20.0
水分(H <sub>2</sub> O)质量分数(%)	≤	1.0
游离酸(H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )质量分数(%)	≤	0.3
镉(Cd)质量分数(%)	≤	0.001
汞(Hg)质量分数(%)	≤	0.000 5
砷(As)质量分数(%)	≤	0.001
铅(Pb)质量分数(%)	≤	0.005
铬(Cr)质量分数(%)	≤	0.005
氟化物(水溶性氟,以 F <sup>-1</sup> 计)质量分数(%)	≤	1

表 3 氨法脱硫硫酸铵成分分析

序号	检测项目	样品数 (个)	含量(%)									标准要求
			A1#	A2#	A3#	B1#	B2#	B3#	C1#	C2#	C3#	
1	外观	3	灰色粉状中粒,可见杂质少			浅灰色粉状粗粒,无可见杂质			淡灰色粉状细粒,无可见杂质			无可见机械杂质
2	水不溶物	3	0.49	0.73	0.68	0.22	0.40	0.13	0.26	0.29	0.16	—
3	N(以干基计)	3	20.92	21.03	20.85	21.39	21.45	21.12	20.81	21.11	20.99	≥20
4	水分	3	0.26	0.25	0.24	0.29	0.27	0.26	0.26	0.24	0.24	≤1.0
5	游离酸(以 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 计)	3	—	—	—	0.07	0.07	0.06	—	—	—	≤0.3
6	Hg	3	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	≤0.001
7	Cd	3	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	≤0.000 5
8	Pb	3	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	≤0.001
9	As	3	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出	≤0.005
10	Cr	3	0.000 1	0.000 2	0.000 2	0.003 0	0.002 0	0.002 0	0.000 3	0.000 4	0.000 3	≤0.005
11	Ni	3	未检出	0.000 1	0.000 1	0.001 0	0.000 4	0.000 4	0.000 2	0.000 2	0.000 2	≤0.06
12	缩二脲	3	0.002	0.160	0.030	0.030	0.060	0.020	0.020	0.040	0.060	≤1.5

注:本次检测分析选取 A、B、C 这 3 个项目的产品取样,分别在运行的不同时间段取得到样品 3 个,每个样品重复测定 3 次,表中数据为 3 次检测结果的平均值;表中 1~10 号检测项目参照 T/CPCIF 0006—2017《氨法脱硫副产硫酸铵》,11 号检测项目参照 GB/T 23942—2009《化学试剂 电感耦合等离子体原子发射光谱法通则》,12 号检测项目参照 GB/T 22924—2008《复混肥料(复合肥料)中缩二脲含量的测定》;Hg、Cd、Pb、As、Cr、Ni 的检出限量标准分别为 0.000 001%、0.000 01%、0.000 05%、0.000 1%、0.000 000 9%、0.000 05%。

### 3 硫酸铵作为氮肥使用的特点

#### 3.1 硫酸铵是一种环保产业的副产

我国农业中的主要氮肥品种是尿素,尿素是一种典型的高耗能产业产物,生产所需原料均严重依赖化石能源,其中约 60%、25%、15% 分别来自于煤炭、天然气、石油。煤基尿素的耗煤系数和耗电系数分达 1.55 t/t、1 030 kW·h/t,气基尿素的耗气系数和耗电系数分别达 1 000 m<sup>3</sup>/t 和 900 kW·h/t,油基尿素的耗油系数和耗电系数分别达 0.8 t/t 和 600 kW·h/t<sup>[5]</sup>。相比较而言,氨法脱硫得到的硫酸铵是一种以清洁燃煤烟气为主导技术的环保产业的副产物,其生产过程无化石能源投入,无三废排放,是一种变废为宝、化害为利的绿色环保产物。

#### 3.2 硫酸铵是一种多元速效肥料,其价值被严重低估

尿素是目前含氮量最高的氮肥(含氮 46.2%),施入土壤后,须经过脲酶水解转化为铵态氮后才能被作物吸收利用,一般需要 3~5 d。而硫酸铵除含氮外,还含作物生长所必须的养分——硫,其中纯品硫酸铵[(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>]含硫 24.2%。硫在作物生长发育及代谢过程中具有重要的生理功能,如硫是植物体内含硫蛋白质的重要组成成分,并参与某些生物活性物质如硫胺素、辅酶 A、乙酰辅酶 A 等的组成,硫还能促进豆科植物形成根瘤和增加固氮能力,缺硫条件下植物的正常生长会严重受阻,甚至枯萎、死亡,因此,硫又被称为是继氮、磷、钾

一般与施肥不当有关,而大面积肥害常与肥料中有害物质超出作物忍受能力有关。

肥料中有害物质主要包括氯离子、缩二脲、游离酸、重金属等,就硫酸铵而言,其可能的有害物质主要是游离酸和重金属。不同来源氨法脱硫副产品硫酸铵的分析结果(表 3)显示,外观、氮含量、水分含量均符合硫酸铵相关标准,有害物质游离酸、重金属(汞、镉、铅、砷、铬、镍)和缩二脲含量也远低于国家现行肥料标准和硫酸铵团体标准。表明氨法脱硫硫酸铵符合我国现行肥料标准要求,在农业生产中具有广泛的适宜性。

之后第 4 位植物生长必需的营养元素。另外,硫酸铵施入土壤后可立即解离为 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,均是作物可吸收利用的速效态。

值得注意的是,我国市场上硫酸铵的价格可能被严重低估。在美国,正是由于硫酸铵含氮和硫 2 种养分元素,硫酸铵的实物价格一直与尿素相当;如果不考虑硫,单以氮计算,硫酸铵中氮元素价格是尿素中氮元素价格的 2 倍以上。而在我国,以纯氮计算,市场上尿素单价约为 2 100 元/t,折合成纯氮价格为 4.5 元/kg,硫酸铵的单价约为 600 元/t,折合成纯氮价格为 2.8 元/kg,硫酸铵中氮元素价格反而只有尿素中氮元素价格的一半左右。以我国市场上相同组分的复合肥来计算硫酸钾中硫的价值,2017 年至今山东地区 45% 氯基复合肥价格 2 015.3 元/t,45% 硫基复合肥价格 2 238.2 元/t,相当于纯硫的价格为 3.49 元/kg[=(2 238.2-2 015.3)÷(0.15×32÷94÷0.8)÷1 000,其中 0.8 为硫酸钾中的硫所占比例的经验值],即硫酸铵中硫的价值约 838 元/t。我国硫酸铵价值严重低估,合理价格应为 1 500~1 650 元/t。

#### 3.3 使用硫酸铵可以减少氮肥损失,提高氮肥利用率

化肥是粮食的“粮食”,但全球每年用于粮食生产的氮肥只有 10% 被人类直接消费,大部分未使用的氮则广泛地分散到环境中,最终汇入地表水体,成为主要的面源污染源<sup>[6]</sup>。由此造成的水体富营养化和地下水硝酸盐超标,直接威胁人类饮水安全<sup>[7]</sup>。自 1993 年以来,我国一直是世界第一化肥消

费国。但化肥的大量施用、加上使用不合理等问题,致使肥料的不科学管理对环境产生了不良影响。《第一次全国污染源普查公报》指出,农业污染源(以下简称“农业源”)污染物排放对水环境的影响较大,其化学需氧量排放量占化学需氧量排放总量的 43.7%;农业源(包括种植业、畜禽养殖业和水产养殖业)也是总氮排放的主要来源,其排放量占排放总量的 57.2%。要从根本上解决我国的水污染问题,必须最大限度地提高肥料的氮素利用率,最大限度地减少氮从农田向环境的排放<sup>[8]</sup>。

尿素是我国最主要的氮肥品种,其在水解前为酰胺分子态,不能被土壤吸附,极易随水流失;转化后形成的碳酸铵也易水解产生氨挥发损失;留存于土壤中的铵离子还会发生硝化和反硝化损失。研究表明,通过淋洗、径流、氨挥发及硝化-反硝化过程等各种途径损失,尿素的(绝对)损失率(氮损失量占施氮量的比例)约为 52%<sup>[8]</sup>、净损失率(因施肥导致的氮素损失增加量占施氮量的比例)约为 35%<sup>[9]</sup>。与尿素相比,硫酸铵可立即解离为  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{SO}_4^{2-}$ ,这 2 种离子均是作物可吸收利用的速效态,其中  $\text{NH}_4^+$  既可被土壤胶体吸附,也可被作物直接吸收利用,不存在分子态损失。另外,由于硫酸铵还含有作物生长所必须的第四大元素硫,因此在不少报道中都显示硫酸铵比尿素具有更高的氮肥利用率。如在库布齐沙地柳枝稷上等量施氮 75、150、225  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,硫酸铵的氮肥利用率分别为 33.4%、37.1%、43.8%,而尿素的氮肥利用率分别为 16.4%、37.5%、15.5%<sup>[10]</sup>。施用加硫尿素可有效减少氨挥发和氮损失,显著提高白菜和花生的氮肥利用率<sup>[11]</sup>。与施加尿素相比,在水稻上施用硫酸铵可使氮肥利用率增加 3.5%~33.5%<sup>[12]</sup>。

3.4 硫酸铵在氮肥结构调整中具有重要作用

氮肥的赋存形式多种多样,可以是单一氮肥(如尿素、碳酸氢铵、氨溶液、液氨、硝酸铵和其他单质氮肥),也可以是二元肥料(如硝酸钾、硝酸磷肥、磷酸铵、硝酸钙和硫酸铵),还可以是三元复合肥。新中国成立以来,我国氮肥产业快速发展,随着产量的增加,高浓度氮肥尿素成为主要产品,占氮肥总量的 66.7%,氮肥产业存在产能过剩严重、氮肥品种单一、利用率低等问题,调整氮肥结构,该升级改造已有产品或者发展新产品是氮肥行业发展的必然趋势<sup>[13]</sup>。由于硫酸铵具有多元性、速效性、速溶性,从 1980 到 2012 年,一些发达国家的硫酸铵在氮肥品种结构中所占比例均呈上升趋势,而我国却呈下降趋势(表 4)。考虑到硫酸铵具备作物生长需要的硫元素,而我国有 50% 的土壤缺硫或潜在缺硫,且随着高浓度肥料的使用和大气沉降的减少,缺硫土壤面积还在逐步扩大(见第 4 节),可见,硫酸铵在我国氮肥品种结构调整中发挥重要作用。

4 硫酸铵肥料的适宜应用领域

4.1 硫酸铵肥料适宜于缺硫土壤上的所有作物

一般作物当季生长需从土壤中吸收 10~15  $\text{kg}/\text{hm}^2$  纯硫,随着作物产量的提升,作物从土壤中携出的硫含量呈增加趋势,因此为满足作物正常生长,须要不断向土壤补充硫。土壤硫主要通过施肥和大气沉降补充,在过去的几十年中,由于高浓度无硫肥料的使用比例增加,导致通过施肥补充土壤硫

表 4 1980—2012 年中国、德国、美国农业生产中的氮肥结构比较

氮肥结构	所占比例(%)					
	中国		德国		美国	
	1980 年	2012 年	1980 年	2012 年	1980 年	2012 年
硝酸钾	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
三元复合肥	2.1	4.7	13.8	1.2	16.5	0.0
硝酸磷肥	0.0	0.2	3.1	0.0	0.0	9.1
氨溶液	0.0	0.0	2.6	14.9	17.6	23.3
磷酸铵	0.7	7.1	0.0	0.0	5.9	17.2
硫酸铵	1.5	0.0	7.6	13.4	1.5	5.9
尿素	30.0	66.7	14.9	23.0	8.5	12.0
其他单质氮肥	60.3	23.4	1.8	19.2	1.3	3.6
硝酸铵钙	6.4	3.8	0.0	0.0	8.5	4.7
硝酸钙	0.0	0.5	55.6	28.4	0.0	0.0
液氨	0.0	0.0	0.6	0.0	40.3	24.2

越来越少,二氧化硫排放量逐年降低导致通过大气沉降补充土壤硫变少,使得全球范围内土壤缺硫面积呈扩大趋势<sup>[14-16]</sup>。土壤缺硫分布较广的地区有澳大利亚、新西兰、南美、北美以及非洲和亚洲的热带地区<sup>[17]</sup>。我国早期土壤缺硫主要分布在浙、赣、闽北、滇中、鄂、桂等地的丘陵山区<sup>[17-18]</sup>,近年来,我国有很多省和地区出现缺硫现象,如中部地区的山东<sup>[19]</sup>、河北<sup>[20]</sup>、河南<sup>[21]</sup>、安徽<sup>[22]</sup>、江西<sup>[16]</sup>、湖北<sup>[23]</sup>和东北的黑龙江<sup>[24]</sup>等。刘崇群等报道,我国南方 10 省土壤缺硫(有效硫含量小于 12  $\text{mg}/\text{kg}$ )占比 26.5%<sup>[25]</sup>;而据国际硫研究所调查,早在 2005 年中国就有 30% 以上的土地缺硫,20% 土壤潜在缺硫<sup>[26]</sup>;近年来,随着我国作物产量持续提高,高浓度无硫肥料的使用比例持续增加以及二氧化硫排放量持续降低,我国缺硫土壤面积进一步扩大。即使根据 2005 年的缺硫土壤比例和 2016 年我国耕地面积(1.35 亿  $\text{hm}^2$ )计算,我国现阶段缺硫耕地面积约为 0.40 亿  $\text{hm}^2$ ,潜在缺硫面积约 0.27 亿  $\text{hm}^2$ ,总缺硫面积约 0.67 亿  $\text{hm}^2$ 。

在缺硫土壤上,作物施用硫肥有明显增产效果。在缺硫地区施用硫肥,可以大幅提高作物产量。在我国南方丘陵山区,硫肥对我国水稻的增产幅度为 5%~20%;美国玉米增产幅度为 8%~28%,棉花为 14%~44%;加拿大小麦增产幅度为 38%~58%、油菜为 29%~39%、花生为 17%~22%<sup>[27]</sup>;印度水稻平均增产率为 29%<sup>[14]</sup>。合理施用硫肥,1  $\text{kg}$  硫肥可增加 8  $\text{kg}$  大豆、368  $\text{kg}$  甘蔗,还可以平衡作物养分,促进养分的吸收,提高肥料利用效率,使一般氮肥利用率提高 4.0%~39.2%,磷肥利用率提高 5.4%~10.5%<sup>[14]</sup>。

4.2 硫酸铵特别适宜于喜硫作物

施用硫肥可以促进作物产量和品质的提高,但对不同作物的效应不同,如有些作物缺硫可影响外观品质、增加硝酸盐含量,而对某些蔬菜如洋葱、大蒜的含硫氨基酸和风味物质含量有直接影响,把这些品质、风味与含硫有机物密切相关且本身对硫的吸收量较大的作物,称为喜硫作物。常见的喜硫作物有含萝卜素素的十字花科蔬菜(结球甘蓝、花椰菜、四季萝卜等)、含硫代葡萄糖苷的十字花科作物(油菜)、含硫蛋白的豆科作物(大豆)和百合科作物(洋葱、大蒜)。

大量报道显示,在喜硫作物上施用硫肥比一般作物具有更明显的增产效果。如在我国南方,喜硫作物油菜施用硫肥可增产 5.9%~36.8%,非喜硫作物水稻施用硫肥增产

2.1%~20.0%<sup>[22,25,28-29]</sup>。陈防等报道,1988 年以来湖北全省 29 个硫肥试验中有 21 个施硫增产,其中喜硫作物油菜和蚕桑分别增产 16.5%、17.6%,非喜硫作物早稻、晚稻、甘薯施硫后分别增产 13.8%、9.0%、11.2%<sup>[23]</sup>。

#### 4.3 硫酸铵可用于生产低氯或硫基肥料

氯也是作物生长的 16 种必需元素之一,但有些作物在氯离子吸收较多时不利于糖转化为淀粉,从而造成作物产量或品质降低,如烟草、桃树、葡萄、马铃薯、甘薯、甜菜、柑橘、甘蔗、西瓜、茶叶、櫻桃、咖啡、香蕉、火龙果、芒果、菠萝、猕猴桃、油桃、木瓜、山竹、榴莲、哈密瓜、油用牡丹、榨菜、荔枝、山药、芝麻、石斛、党参、人参等,通常称这些植物为忌氯植物。因此,为防止氯对作物产量和品质的影响,忌氯作物一般使用低氯肥料或不含氯的硫基肥料。由于氯一般通过氯化铵、氯化钾或以氯化铵、氯化钾为原料生产的复混肥投入,而在肥料原料的选择上可以硫酸铵替代氯化铵、以硫酸钾替代氯化钾,因此硫酸铵在忌氯植物上有更广的应用前景。

#### 4.4 硫酸铵可用于生产复合氮肥

氮肥形态主要包括酰胺态氮、铵态氮、硝态氮,多种形态的氮肥混合使用可发挥协同效应,提高氮肥利用率。尿素是含氮量最高的氮肥品种,其氮的形态为酰胺态,含氮量较低的小品种氮肥氯化铵和硫酸铵的氮肥形态为铵态氮。因此,利用尿素与氯化铵或硫酸铵生产复合氮肥,不但可以在氮肥形态上协同、而且还可以在氮素含量上协同,产生中浓度氮肥新品种,为作物生产提供更多的氮肥选择品种。近年来出现的脲铵氮肥就是一种较好的复合氮肥,根据化工行业标准 HG/T 4214—2011《脲铵氮肥》,其含氮量大于 26%,发展脲铵氮肥可综合利用各种副产氮肥资源,提高资源利用效率,还可起到节能减排,显著提高氮肥利用率作用。

### 5 我国农业中硫酸铵需求预测

#### 5.1 土壤硫的补充途径

除硫酸铵及其制成品外,我国耕地土壤硫的补充途径还有过磷酸钙、硫酸钾以及含硫尿素和灌溉水带入,由于灌溉水带入的硫与径流带出的硫基本平衡,含硫尿素使用量极少,本研究在预测时予以忽略。

农用硫酸钾含硫量为 21% 左右,主要用于忌氯作物如蔬菜、果树、烟草、薯类等,据《中国农业统计年鉴 2015》计算,在 1.35 亿  $\text{hm}^2$  耕地中,忌氯作物总种植面积 0.27 亿  $\text{hm}^2$ ,占耕地面积的 20%。过磷酸钙含硫 9% 左右,适用于所有耕地土壤和作物,目前我国过磷酸钙产量仅维持在 100 万 t/年左右<sup>[30]</sup>,通过过磷酸钙投入到 1.35 亿  $\text{hm}^2$  耕地的纯硫为 9 万 t/年左右。

#### 5.2 从土壤硫素平衡预测我国农业对硫酸铵的理论需求

土壤养分平衡普遍用于该养分的施肥量推荐或预测,以土壤系统为界,一般遵循“某种养分肥料投入量=作物携出某种养分量”。由于农作物中硫的含量与磷相当,可以用磷的携出量来估算硫的需求<sup>[17,31]</sup>。根据《2015 年中国统计年鉴》和主要农作物 100 kg 籽粒养分吸收量(表 5),可以计算出 2015 年我国农作物收获时从土壤中携出的总磷量约 405 万 t。因此,为维持土壤硫素平衡,在不考虑秸秆还田条件下,须要投入硫肥 405 万 t,其中通过过磷酸钙补充的硫为 9 万 t,

通过硫酸钾补充的硫为  $(405-9) \times 20\% = 79.2$  (万 t);理论上通过硫酸铵补充硫的需求量为  $(405-9) \times (1-20\%) = 316.8$  (万 t) 纯硫,折合硫酸铵 1 309 万 t。秸秆还田条件下,由于硫主要存在于含硫蛋白质中,而秸秆中的蛋白质含量一般只有籽粒的 1/3,可粗略估计作物收获时从土壤中携出的硫含量总计约  $405 \times 66.7\% = 270$  (万 t),通过硫酸铵补充硫的理论需求为  $316.8 \times 66.7\% = 211.3$  (万 t) 纯硫,折合硫酸铵 873 万 t。

表 5 2015 年中国主要农作物产量和养分吸收量

农作物	每 100 kg 经济产量的作物对 元素的吸收量 (kg)			总产量 (万 t)	吸磷量 (万 t)
	N	P	K		
水稻	2.1	0.5	2.6	20 361.2	111.1
玉米	2.7	0.5	2.0	21 848.9	107.8
小麦	3.0	0.5	2.1	12 192.6	59.9
蔬菜	0.4	0.1	0.4	73 512.0	50.1
油料	6.9	0.9	3.4	3 517.0	30.1
薯类	0.4	0.1	0.7	16 646.5	13.8
大豆	7.2	0.8	3.3	1 595.3	12.5
糖料	0.3	0.0	0.4	13 746.1	6.6
棉花	5.0	0.8	3.3	629.9	5.0
荞麦	3.3	0.7	3.6	402.7	2.8
高粱	2.6	0.6	2.5	289.2	1.6
烟草	4.1	0.4	5.0	337.4	1.5
谷子	2.5	0.5	1.4	174.6	1.0
大麦	2.7	0.4	1.8	169.9	0.7
西瓜	0.3	0.0	0.2	7 294.4	0.6

#### 5.3 从土壤硫素丰缺预测我国农业对硫酸铵的现实需求

5.3.1 我国耕地土壤中的硫 硫在自然界中分布很广,地壳中硫的含量平均为 0.06%,最多可达 0.15%。我国土壤全硫含量大致在 0~600 mg/kg,大多数在 100~500 mg/kg,其中水稻土 240 mg/kg,红壤 146 mg/kg,黄土 226 mg/kg,潮土 147 mg/kg,盐土 343 mg/kg<sup>[32]</sup>,含有机质多的土壤可以超过 500 mg/kg。土壤中的硫可分为无机硫和有机硫两大部分,我国湿润地区的表层土壤有机硫占 85%~94%,无机硫占全硫的 6%~15%,而北部和西部石灰性土壤无机硫占全硫的 39.4%~61.8%<sup>[25]</sup>。作物直接吸收的硫是无机硫,有机硫必须经过微生物矿化为无机态(硫酸盐)才能被作物吸收利用。

5.3.2 土壤硫临界值 土壤硫易存在于有机质含量低、高温多雨地带的土壤。判断土壤是否缺硫一般采用临界值方法判别。多数报道显示,土壤有效硫临界值在 10~30 mg/kg,如泰国玉米土壤有效硫临界值为 13 mg/kg,孟加拉国水稻土壤有效硫的临界值为 12 mg/kg,印度土壤有效硫低于 10 mg/kg<sup>[28]</sup>。在我国,通常当土壤有效硫 <10~16 mg/kg 时,作物有缺硫的可能,而对于大多数农作物而言,土壤有效硫临界值为 10~12 mg/kg<sup>[33]</sup>。邓纯章等指出,一般情况下,当土壤全硫含量在 0.02% 或有效硫含量在 20 mg/kg 以下时,施硫就有增产效果<sup>[29]</sup>。陕西省将土壤有效硫丰缺状况划分为 3 级: <10 mg/kg 时大部分农作物缺硫,10~20 mg/kg 为需硫较多的农作物可能缺硫、>20 mg/kg 不缺硫<sup>[34]</sup>。安徽省土壤硫丰缺分为 4 个等级:土壤有效硫 <8 mg/kg 时严重缺,8~16 mg/kg 缺乏,16~30 mg/kg 潜在缺乏,>30 mg/kg 为不缺<sup>[22]</sup>。贵州主要耕地土壤有效硫的分级标准: <12 mg/kg 土

壤缺硫,12~24 mg/kg 土壤潜在缺硫,>24 mg/kg 土壤不缺硫,在有效硫含量接近或低于 30 mg/kg 的土壤上,水稻、玉米、小麦、油菜和白菜施用硫肥均显著增产;当土壤有效硫含量范围在<16、16~30、30~40 mg/kg 时,作物施硫增产效果大于 5% 的试验个数占试验总数的比例分别为 100%、78%、62.5%,贵州省土壤推荐施硫的土壤有效硫含量为 30 mg/kg<sup>[35]</sup>。

**5.3.3 我国农业对硫酸铵的现实需求** 由于土壤、作物产量水平等不同,不同国家对硫肥的推荐用量也不同。马常宝报道,英国施硫量(纯硫)为 15~25 kg/hm<sup>2</sup>;北美地区一般作物推荐施硫量(纯硫)11~22 kg/hm<sup>2</sup>,谷类作物推荐施硫量(纯硫)17~34 kg/hm<sup>2</sup>,豆科作物推荐施硫量(纯硫)44~56 kg/hm<sup>2</sup>;中国粮食作物推荐施硫量为 20~40 kg/hm<sup>2</sup>,豆科作物、油料作物和蔬菜等喜硫作物施硫量(纯硫)为 30~60 kg/hm<sup>2</sup><sup>[14]</sup>。本研究按照纯硫保守推荐用量 30 kg/hm<sup>2</sup> 对我国硫酸铵的农业投入量作如下预测:缺硫(含潜在缺硫)土壤耕地面积共 0.67 亿 hm<sup>2</sup>,其中通过过磷酸钙补充的硫(纯硫)约为 4.5 万 t,按照 30 kg/hm<sup>2</sup> 补充量计算其补充面积仅为 0.001 亿 hm<sup>2</sup>,几乎可以忽略不计;由于忌氯作物占比 23.5%,剩余 0.67 亿 hm<sup>2</sup> 缺硫土壤中共有 0.51 亿 hm<sup>2</sup> 为非忌氯作物须要通过硫酸铵补充硫,按照 30 kg/hm<sup>2</sup> 计算其补充量为 153 万 t,相当于 632 万 t 硫酸铵。

**5.4 从发达国家对硫酸铵氮肥的使用比例预测我国农业未来对硫酸铵的需求**

我国土壤增施氮肥总能使作物获得显著而稳定的增产<sup>[35]</sup>,在因施用化肥增产 40%~50% 中<sup>[36]</sup>,施氮的增产率约占化肥增产率的 60%~70%<sup>[37]</sup>。近年来,我国农业对氮肥(纯氮)的消费基本维持在 3 300 万 t<sup>[38]</sup>。氮肥品种中,欧美发达国家的硫酸铵氮肥占有率呈增加趋势,为 5.9%~13.6%(表 4)。以欧美发达国家硫酸铵氮肥占有率平均值 9.75% 预测,我国硫酸铵直接作为氮肥(纯氮)的需求为 321.75 万 t,折硫酸铵 1 518 万 t。

考虑到硫酸铵具有非常好的溶解性,是液态氮肥的良好原料,而液态氮肥在欧美发达国家氮肥占有比例为 14.9%~23.3%,平均为 19.1%<sup>[38]</sup>。由于除硫酸铵外,表 4 中尿素、磷酸铵、硝酸钾、硝酸(铵)钙、液氨也是配制氮溶液的原料,故按照硫酸铵在液态氮溶液占有 1/6 预测,硫酸铵作为液态氮肥用量为 3 300×0.191×(1/6)÷0.21=500(万 t)(21.2% 为硫酸铵的纯品含氮量,一等品及优等品的含氮量均为 21%)。因此,从发达国家对硫酸铵氮肥的使用比例预测我国未来农业对硫酸铵的需求为 1 330+500=1 830(万 t)。

#### 参考文献:

- [1] 朱法华,王 圣. 如何推动我国煤炭总量消费控制[J]. 环境保护,2012(12):37-40.
- [2] 张昭利. 中国二氧化硫污染的经济分析[D]. 上海:上海交通大学,2012.
- [3] 马双忱,温佳琪,万忠诚,等. 中国燃煤电厂脱硫废水处理技术研究进展及标准修订建议[J]. 洁净煤技术,2017,23(4):18-28.
- [4] 栾 辉,唐智和,翟小娟,等. 氨法脱硫工艺存在的问题及应对措施[J]. 油气田环境保护,2016,26(6):29-31.

- [5] 刘洪涛,陈同斌,郑国砥,等. 有机肥与化肥的生产能耗、投入成本和环境效益比较分析——以污泥堆肥生产有机肥为例[J]. 生态环境学报,2010,19(4):1000-1003.
- [6] 杨林章,吴永红. 农业面源污染防控与水环境保护[J]. 中国科学院院刊(专题:土壤与可持续发展),2018,33(2):168-175.
- [7] 张亦涛,王洪媛,刘 申,等. 氮肥农业效应与环境效应国际研究发展态势[J]. 生态学报,2016,36(15):4594-4608.
- [8] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(2):259-273.
- [9] 宁运旺,张永春. 基于土壤氮素平衡的氮肥推荐方法——以水稻为例[J]. 土壤学报,2015,52(2):281-292.
- [10] 陶 梦,苏德荣,吕世海,等. 氮肥对库布齐沙地柳枝稷产量、氮肥利用率及土壤硝态氮残留的影响[J]. 草业科学,2018,35(2):415-422.
- [11] 雷利斌. 加硫尿素 N、S 在土壤中的转化及其作物效应研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2006.
- [12] 赵洪涛,周健民,范晓晖,等. 太湖地区主要类型水稻土上施用不同硫肥对水稻氮、硫吸收的影响[J]. 土壤学报,2006,43(5):864-867.
- [13] 黄高强,武 良,李宇轩,等. 我国氮肥产业发展形势及建议. 现代化工,2013,33(10):5-9.
- [14] 马常保,高祥照,译. 全球土壤缺硫与硫肥应用情况[J]. 中国农技推广,2008,24(8):31-33.
- [15] 陈克文. 作物的硫素营养与土壤肥力[J]. 土壤通报,1982(5):43-49.
- [16] 范业成,叶厚专. 江西硫肥肥效及其影响因素研究[J]. 土壤通报,1994,25(3):135-137.
- [17] 刘崇群. 土壤硫素和硫肥施用问题[J]. 土壤学进展,1981(4):11-19.
- [18] 李书田,林 葆. 土壤中植物有效硫的评价[J]. 植物营养与肥料学报,1998,4(1):75-83.
- [19] 王 东,鞠正春,于振文,等. 山东省麦田有效硫含量及分布[J]. 山东农业科学,2011(5):50-54.
- [20] 邓占华,刘树昌. 华北中部平原麦田土壤供硫水平及施硫肥效果研究[J]. 河北农业科学,2010,14(2):36-38.
- [21] 孙克刚,张泽彦,王学勤. 河南省土壤硫素含量状况及硫肥增产效应研究[J]. 农资科技,2003(2):13-16.
- [22] 张继棒,竺伟民,章力干,等. 安徽省土壤有效硫现状研究[J]. 土壤通报,1996,27(5):222-225.
- [23] 陈 防,鲁剑巍,宁昌会,等. 湖北省硫肥施用效果初探[J]. 土壤肥料,1997(3):12-15.
- [24] 迟凤琴,魏 丹,申惠波,等. 黑龙江省主要类型稻田土壤硫现状与硫肥效果的研究[J]. 土壤肥料,1999(6):7-11.
- [25] 刘崇群,曹淑卿,陈国安,等. 中国南方农业中的硫[J]. 土壤学报,1990,27(4):399-404.
- [26] 董 燕,译. 中国硫肥需求与研究[J]. 中国农技推广,2008,24(9):33-34.
- [27] 刘崇群. 硫肥的重要性和我国对硫肥的需求趋势[J]. 硫酸工业,1995,5(5):20-23.
- [28] 滕险峰. 土壤中硫的组成及其对植物有效性研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2000.
- [29] 邓纯章,龙碧云,侯建萍. 我国南方部分地区农业中硫的状况及硫肥的效果[J]. 土壤肥料,1994(3):25-27.
- [30] 李庆忠,纪海石,耿银银,等. 过磷酸钙增效技术与发展前景分析[J]. 磷肥与复肥,2016,31(8):24-27.

孟祥海,沈贵银. 江淮生态经济区农田氮磷平衡与种养结合进程分析:以江苏省淮安市为例[J]. 江苏农业科学,2018,46(23):313-317.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.23.078

# 江淮生态经济区农田氮磷平衡与种养结合 进程分析:以江苏省淮安市为例

孟祥海<sup>1,2</sup>, 沈贵银<sup>1</sup>

(1. 江苏农业科学院农业经济与发展研究所,江苏南京 210014; 2. 淮阴师范学院经济与管理学院,江苏淮安 223001)

**摘要:**农田氮磷平衡分析可以确定农田生产系统内的氮磷盈余量,是农田养分管理的重要方法。运用土壤表观养分平衡理论,分析江淮生态经济区主要板块淮安市 2000—2015 年 16 年间农田氮磷养分平衡状况,并基于环境库兹涅兹曲线理论,验证了淮安市种养结合进程与经济增长之间的关系。研究得出,2000—2015 年 16 年间淮安市农田普遍存在氮磷盈余,且氮磷盈余总量和盈余强度呈现“W”形波动状态;16 年间,全市农田氮盈余量有所增加,磷盈余总量和氮磷盈余强度有所下降,农田化肥氮磷投入占农田氮磷总投入量的比重总体呈现上升趋势,化肥的过量投入是造成农田氮磷盈余的主要驱动因素。基于环境库兹涅兹曲线(EKC)理论检验结果表明,淮安市农田化肥氮磷投入占农田氮磷总投入的比重随着人均 GDP 的增长呈现倒“U”形曲线变化趋势,农田化肥氮磷投入比重仍处于曲线上升阶段,自发达到下降拐点还需较长时间,政府应强化种养结合政策干预,加大对农业面源污染的治理力度。

**关键词:**农田氮磷平衡;种养结合;EKC;江淮生态经济区

**中图分类号:** S158;S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)23-0313-05

江淮生态经济区是江苏省“1+3”重点功能区战略的重要组成部分,重在打造区域生态竞争力,涉及到淮安、宿迁、扬州、泰州和盐城 5 市,具体包括淮安、宿迁 2 个设区市全域以及里下河地区的高邮、宝应、兴化、建湖、阜宁等县(市),区域面积 2.69 万 km<sup>2</sup>,约占全省面积的 25%,是全省水网最密集和农业最发达的地区,2015 年该区域粮食、肉类产量分别为 1 348.29 万、105.21 万 t,占全省的 38%、28%;农作物播种面积,化肥施用量分别为 229.76 万 hm<sup>2</sup>、79.71 万 t,占全省的 30%、25%<sup>[1]</sup>。近年来江淮生态经济区农业面源污染形势愈发严峻,中国科学院南京地理与湖泊研究所于 2011 年 12 月发布的《中国五大淡水湖泊保护与发展报告》指出,洪泽湖每

年入湖污染物的总量已经大大超过了湖泊自净的能力,且对洪泽湖周边产业调查发现,湖区万元产值污染水平以畜禽养殖业的排污水平最高。江苏省环境科学院研究院监测发现,高邮湖农业面源污染占总污染负荷的 50% 以上,其中总氮、总磷污染负荷最大,比重分别为 68.5%、72.3%<sup>[2]</sup>。氮磷是农业生产中最重要的养分基础,也是日益明显的环境污染因素。农田氮磷平衡分析可以确定农田生产系统内的氮磷盈余量,以此对农田养分投入进行管理,是农田养分管理的重要方法。畜禽粪便含有丰富的养分资源,是农田氮磷养分的重要来源,粪肥还田用于作物生产是其最合适的去向。但特定区域内畜禽养殖数量规模及其排放的粪肥超过农作物生长需要和土壤自净能力时,养分盈余问题就会显现,造成农业面源污染<sup>[3]</sup>。2014 年以来,中央政府密集出台了《畜禽规模养殖污染防治条例》等一系列养殖环保政策法规,各地纷纷重新划定禁养区,加大了环保执法力度,畜禽规模养殖正面临巨大的环保压力,同时新政策更加突出畜禽粪便的资源化利用,以种养结合、循环利用为主体,解决粪肥还田利用瓶颈问题,已成为当前治理畜禽养殖污染的主要路径。然而随着我国畜禽养殖业规模化比例的迅速提高,养殖规模化和农田超碎化的现实矛盾日益尖锐,传统的畜禽粪便进入种植业实现资源化利用的通道被阻断,种养结合阻力重重,化肥替代粪肥成为农作

收稿日期:2018-03-18

基金项目:国家社会科学基金青年项目(编号:16CJY052);江苏省高校哲学社会科学一般项目(编号:2015SJB685);中国博士后科学基金(编号:2018M632259);江苏省农业科学院基本科研业务专项[编号:ZX(18)6005]。

作者简介:孟祥海(1983—),山东日照人,博士,副教授,从事资源与环境经济研究。E-mail:mxhleh@126.com。

通信作者:沈贵银,博士,研究员,从事农业经济研究。E-mail:shengy@cass.cn。

[31] 王庆仁,林 葆. 植物硫营养研究的现状与展望[J]. 土壤肥料,1996(3):16-19.

[32] 冯元琦. 中国的硫资源及其利用[J]. 化肥设计,1997,35(5):46-49.

[33] 肖厚军. 贵州省主要耕地土壤硫素状况及硫肥效应研究[D]. 重庆:西南农业大学,2003.

[34] 尹迪信,阎献芳,肖厚军,等. 贵州省土壤硫素状况及影响因素调查[J]. 贵州农业科学,1995(1)5-8.

[35] 林 葆,李家康. 我国化肥的肥效及其提高的途径——全国化肥试验网的主要结果[J]. 土壤学报,1989,26(3):273-279.

[36] 金继运,李家康,李书田. 化肥与粮食安全[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(5):601-609.

[37] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报,2008,45(5):915-923.

[38] 黄高强. 我国化肥产业发展特征及可持续性研究[D]. 北京:中国农业大学,2014.