

Agricultural and Environmental Uses for
Flue Gas Desulfurization (FGD) Gypsum

烟气脱硫石膏 在农业和环境上的应用

李小平 毛玉梅 贺 坤 编著



科学出版社

烟气脱硫石膏 在农业和环境上的应用

李小平 毛玉梅 贺 坤 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统介绍了烟气脱硫石膏的农业应用和经济影响,美国7个州和中国若干省(自治区、直辖市)的农业大田试验和工程示范,以及农业烟气脱硫石膏安全使用指南。本书还讨论了烟气脱硫石膏控制农业面源磷流失的机理;介绍了一些烟气脱硫石膏在矿山复垦和土壤修复方面的成功案例。使用烟气脱硫石膏加速围垦滩涂土壤的脱盐过程是我国首先开拓的一个新的应用领域,已经引起了国内外多方的注意。本书最后着重讨论了烟气脱硫石膏的生态安全性,介绍了烟气脱硫石膏生态安全性的评估方法、烟气脱硫石膏中重金属的浸出特性,及其对土壤、土壤生物、淡水和底栖生物、植物生理及植物籽实等的影响,并提出了安全使用烟气脱硫石膏的政策建议。

本书汇集了最近10年烟气脱硫石膏在农业和环境应用方面的主要成果,适合作为农业和环境保护,特别是从事土壤改良、矿山复垦和富营养化控制方面研究和应用的科研人员的参考书。本书也可以作为正在使用烟气脱硫石膏的第一线广大科研和管理人员的使用指南,为他们的科研和生产实践提供重要的设计依据、成功案例和基础数据。

图书在版编目(CIP)数据

烟气脱硫石膏在农业和环境上的应用 / 李小平, 毛玉梅, 贺坤编著. — 北京: 科学出版社, 2017.8

ISBN 978-7-03-052778-3

I. ①烟… II. ①李… ②毛… ③贺… III. ①烟气脱硫-工业废物-石膏-应用-农业-研究②烟气脱硫-工业废物-石膏-应用-环境工程-研究 IV. ①TQ177.3 ②S14 ③X5

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第100401号

责任编辑: 马俊 付聪 郝晨扬 / 责任校对: 邹慧卿
责任印制: 肖兴 / 封面设计: 北京铭轩堂广告设计有限公司

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年8月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2017年8月第一次印刷 印张: 15 1/4 插页: 10

字数: 295 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者简介

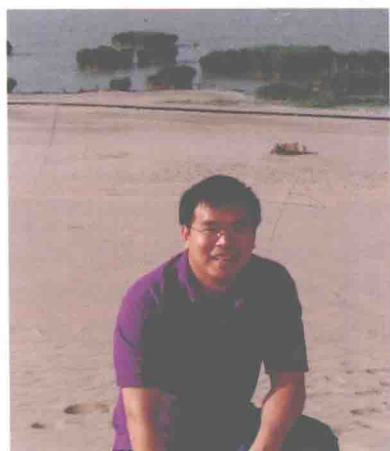


李小平 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室教授，博士生导师。1998 年获美国加利福尼亚大学(戴维斯分校)生态学博士，曾任美国国家环境保护局生态健康研究中心研究员，上海市环境科学研究院副院长，科技部 863 滇池项目责任专家，中国环境科学学会土壤与地下水环境专业委员会委员，先后获省部级科学技术进步奖二等奖 2 项，上海市科学技术进步奖一等奖和三等奖各 1 项，在国内外重要刊物上发表过近百篇论文并编撰多部专著。

毛玉梅 上海市农业学校讲师。华东师范大学生态学博士，美国俄亥俄州立大学访问学者(2014~2015 年)，主要研究方向为土壤改良和生态修复。曾参加多项“十一五”国家水专项和环境保护公益项目，在国内外刊物上发表了十余篇论文。



贺坤 上海应用技术大学讲师。华东师范大学生态学博士，主要研究方向为生态景观规划和生态修复。主持或参与过国家自然科学基金、上海市科学技术委员会重点研发项目等，在国内外刊物发表论文十余篇，编撰专著(教材)四部。



序

我还在上海市环境科学研究院担任主管科研的副院长时，就对烟气脱硫石膏产生了兴趣。由于燃煤电厂普遍采用湿法脱硫技术，产生了大量脱硫副产品，环境保护管理部门采取了经济刺激政策鼓励综合利用烟气脱硫石膏。

在做了一些调查研究之后，我和我的团队逐渐形成了一个假设，即我们可以利用烟气脱硫石膏中 Ca^{2+} 与 Na^{+} 的交换能力和江南 1000mm 以上的年降水量，加速围垦滩涂盐渍土的自然脱盐过程，为沿海地区的高速发展创造新的土地资源。经过几年的努力和积累，终于申请到了一项环境保护公益项目，进行烟气脱硫石膏改良滩涂盐碱地的科学研究和工程示范。通过 3 年的实验室和野外工程研究，我们的科学假设得到了验证，烟气脱硫石膏只需用 2~3 年便可以完成滩涂盐碱地 10 年的脱盐过程，生长出非盐生的草本和木本植被。本书的第 4 章介绍了我们的研究成果和发明专利(专利号：201310742993.5)。

在我们开始研究之前，清华大学就已经在利用烟气脱硫石膏改良内陆盐碱地方面取得了骄人的成果。更幸运的是，在研究和工程示范过程中，我们得到了美国俄亥俄州立大学的 Warren Dick 教授及其团队的支持和帮助。Warren Dick 教授是美国烟气脱硫石膏农业和环境有益应用的开拓者，他先后两次实地考察了在上海南汇和崇明滩涂的示范工程，和我们一起经历了 3 年的现场试验研究。我也两次造访俄亥俄州立大学在伍斯特(Wooster)的农业中心，不仅向美国同行学习理论和实验技术，还参观了美国伊利湖流域(俄亥俄州境内)烟气脱硫石膏的试验大田；他们的试验规模之大，研究水平之高，令人赞叹。我的一位博士生在 Warren Dick 教授的指导下于伍斯特农业中心研修一年，专攻烟气脱硫石膏的环境应用。另一位博士生也将烟气脱硫石膏控制农业面源磷的流失作为研究方向，并取得了不错的进展。他们的努力，不仅大大拓宽了我们对烟气脱硫石膏有益应用的视野，也使我们利用烟气脱硫石膏控制农业面源和水体富营养化，充满信心和期待。

在与中外专家学者不间断的相互学习和交流中，我们清楚地意识到烟气脱硫石膏已经不再是“废弃物”，而是一种宝贵的资源。在积累了许多烟气脱硫石膏在农业和环境上的研究成果和应用案例之后，我们萌发了要写这本书的念头，试图从农业和环境有益应用的角度，将这一宝贵的资源介绍给大家。

烟气脱硫石膏的化学分子式很简单，作用机理在任何一本传统的教科书中都能找到，早已为人们所认识。矿物石膏也在百年之前就有了一些工业和农业上的应用。为了确保大气和生态环境质量，控制二氧化硫排放已经成为全人类的共识。

由此产生的烟气脱硫石膏由于其纯度高、产量大、生态安全性好、应用前景广泛，正在越来越密切地融入我们今天的生活，如用于清洁空气、农业生产，用作建筑材料等。2016 年 5 月底，国务院颁布了《土壤污染防治行动计划》（俗称“土十条”），提出 2017 年在新疆生产建设兵团推行烟气脱硫石膏改良盐碱地。中国在农业和环境上大规模使用烟气脱硫石膏在即，我们谨献上这部《烟气脱硫石膏在农业和环境上的应用》作为这一巨大工程的序曲。

李小平

2017 年 3 月

前 言

石膏作为土壤改良剂有很长的历史。我国是世界上较早利用石膏的国家之一,古籍《神农本草经》就有关于石膏的发现与利用的记载。到宋元时期,石灰、石膏、硫磺等开始作为肥料使用,主要用于冷浸田改良。这些肥料呈碱性,可以中和酸性的冷浸田。

在美国,最早记录石膏用于土壤改良的是芝加哥大学的 William Crocker 博士,时任纽约扬克斯著名的汤姆森植物研究所(Thompson Institute for Plant Research in Yonkers)主任。1918 年 William Crocker 博士记录了北美应用石膏改良土壤的历史,最早可以追溯到美国殖民时期(the colonial period of the United States)。这部科学历史书最初以油印本流行,并于 1922 年由美国石膏工业协会(Gypsum Industries Association, Chicago, IL)印刷成册,以满足公众的需求。

20 世纪 80 年代末美国《清洁空气法》的实施,由燃煤电厂烟气除尘脱硫产生的新材料大量涌现,人们发现以硫酸钙为主的脱硫副产品——烟气脱硫石膏,可以用来修复废弃的露天煤矿高度退化的土壤。由于矿物石膏作为土壤改良剂的悠久历史,美国的科学家很自然地将烟气脱硫石膏的应用推广到农业领域,并在 20 世纪 90 年代建立了美国农业利用烟气脱硫石膏网络(national network for use of FGD gypsum in agriculture),调查和研究烟气脱硫石膏替代矿物石膏作为土壤改良剂的可能性和应用效果。

2002 年,美国粉煤灰协会(American Coal Ash Association)首次公布烟气脱硫石膏在农业上的应用。从此,美国农业烟气脱硫石膏的使用量从当时的 7.8 万 t 上升至 2014 年 1300 万 t;其中最大增幅是在 2013~2014 年,烟气脱硫石膏使用量翻了一番。这表明,越来越多的农民注意到烟气脱硫石膏作为土壤改良剂所带来的实际效益。当然,烟气脱硫石膏在农业和经济方面的诸多科学研究,以及政府的积极提倡,对推动烟气脱硫石膏的广泛应用起到了重要的作用。

烟气脱硫石膏在农业上得以如此广泛应用的最主要的原因之一是燃煤电厂的烟气脱硫过程在清洁空气的同时阻碍了大气硫循环,很大程度上减少了原本应该沉降到农田土壤中的硫元素。美国的大学和研究机构普遍发现农业作物和农田缺硫,一致推荐使用硫肥提高产量;而烟气脱硫石膏中高含量、高溶解度的硫酸钙,可以直接有效地为植物所吸收,使其成为理想的硫肥。在我国,使用烟气脱硫石膏提高土壤硫含量和作物产量鲜有报道,这也许值得我国科学家重视。

人们在使用烟气脱硫石膏作为硫肥/土壤改良剂时,还发现了其诸多的农业和

环境效益, 主要为: ①作为植物营养钙和硫的营养源; ②改善酸性土壤中植物根系生长; ③改善含高钠和高镁土壤的结构, 增强土壤的渗透率; ④增加土壤固碳能力; ⑤与畜禽粪便和氮肥联合使用, 可以增强植物对氮的吸收, 提高氮肥的效率。事实上, 烟气脱硫石膏与畜禽粪便和氮肥的联合使用, 在美国已经有了一些值得关注的案例。美国科学家认为, 烟气脱硫石膏对环境的影响大部分是积极的, 即使施用累积达到 80 年, 也只有极少的负面结果被发现。因此, 烟气脱硫石膏在可持续的农业生产系统中有广泛应用前景。美国计划为今后的研究设立一个平台, 增加科学界关于烟气脱硫石膏在农业生产中可持续利用的知识, 使土地和资源管理者了解烟气脱硫石膏提高种植系统的生产力和可持续性的作用, 同时发挥其有益的环境效益。

目前, 烟气脱硫石膏最具前景的应用领域是富营养化的控制。烟气脱硫石膏可以有效地减少农业面源可溶性磷的流失, 改善接受水体(湖泊和河流)的水质。美国科学家的研究清楚地表明, 烟气脱硫石膏可以减少农田径流 40% 的可溶性磷, 这对近年来正在遭受藻类水华困扰的五大湖流域和佛罗里达州等地, 是一项可以立竿见影地控制水体富营养化的措施。烟气脱硫石膏另一个重要的潜在应用是改良滩涂围垦的盐碱地, 这是中国科学家开拓的烟气脱硫石膏最新的应用领域。烟气脱硫石膏可以加速围垦滩涂的脱盐过程, 从而大大提高沿海城市土地利用的空间。

美国烟气脱硫石膏大田现场试验工程由各个电力公司资助的研究机构——美国电力科学研究院(Electric Power Research Institute, EPRI)主导, 在美国 7 个州建立了大田试验研究网络, 进行了长达 10 年的现场试验和工程示范。各州的高等院校为烟气脱硫石膏的农业应用提供了实验室和现场试验技术支持, 以及检测和评价分析。2008 年美国国家环境保护局联合美国农业部积极支持烟气脱硫石膏的农业应用, 并于 2014 年完成了烟气脱硫石膏生态安全性评价, 确认使用的烟气脱硫石膏中重金属的含量均低于美国国家环境保护局关注的限值。2016 年我国国务院颁布了《土壤污染防治行动计划》(俗称“土十条”), 提出 2017 年在新疆生产建设兵团推行烟气脱硫石膏改良盐碱地。美国在由烟气脱硫石膏生产和销售的电力工业部门主导、科研院校提供科研和技术支持、政府在确保生态安全的前提下实施政策引导的做法, 很值得我们学习和借鉴。

烟气脱硫石膏的使用不会对所有土壤都有益; 盐碱性土壤、排水性差的黏质土壤、某些含 Al^{3+} 的酸性下层土壤, 以及缺乏钙和硫的土壤可能获益最大。除了营养元素硫外, 烟气脱硫石膏对作物产量的有益影响是间接的, 往往需要 3~5 年或者更长时间才能获得作物产量及土壤化学和物理性质的变化。虽然近期的研究评估了烟气脱硫石膏从高磷含量的土壤中减少可溶性磷的作用, 但仍需要有更多的科研投入, 以确定烟气脱硫石膏的最佳使用量、地表径流最大磷削减量, 以

及种植系统中磷可利用性三者的相互关系。尽管科学家已经在烟气脱硫石膏的生态安全方面做了一些工作,但还需要进行更多的关于烟气脱硫石膏作为土壤改良剂使用的风险评估以解决公众的担忧。

有人总结了使用烟气脱硫石膏的知识缺口和未来的研究方向。

(1) 烟气脱硫石膏影响硫的生物地球化学过程和全球硫循环的研究。

(2) 不同作物对硫的响应研究, 烟气脱硫石膏的最佳使用量和使用频率。

(3) 钙和硫与其他植物营养元素之间的相互作用。

(4) 烟气脱硫石膏增加根的伸长对施肥和抗旱的影响。

(5) 确定对不同土壤(如内陆盐碱地、沿海盐渍土、酸性土壤和黏土等)物理和化学性质都有有益影响所需要的钙的合适浓度。

(6) 烟气脱硫石膏对土壤重金属迁移和转化的影响, 以及持续的土壤监测以确保连续使用不会造成土壤重金属的超载。

(7) 烟气脱硫石膏减少农田径流可溶性磷迁移的机理和实效, 以及流域使用烟气脱硫石膏的管理策略。

(8) 长期使用烟气脱硫石膏对土壤中有机碳和无机碳封存的影响。

(9) 烟气脱硫石膏对养殖业和畜禽粪便管理的影响, 如提高饲料质量, 改善铺垫材料和减少畜禽粪便营养物流失等。

(10) 烟气脱硫石膏的其他应用, 如矿山复垦、土壤和沉积物修复等。

(11) 烟气脱硫石膏对产量提高、土地利用、生态环境变化、总体土壤质量的综合评价, 如烟气脱硫石膏使用获得最大的农业效益所需要的时间, 以及短期经常产生的负面影响等经济学评价。

希望本书能为回答和解决上述问题, 打下一个坚实的科学和实践基础。

编 者

2017年1月27日

目 录

1 烟气脱硫石膏	1
1.1 烟气脱硫石膏的来源和特性	1
1.1.1 烟气脱硫石膏的来源	1
1.1.2 烟气脱硫石膏的特性	3
1.2 我国燃煤电厂脱硫和烟气脱硫石膏产量	7
1.2.1 我国燃煤电厂脱硫	7
1.2.2 我国燃煤电厂烟气脱硫对 SO_2 减排的贡献	9
1.2.3 我国燃煤电厂烟气脱硫石膏的产量和质量	10
1.3 烟气脱硫石膏的有益用途	13
1.3.1 我国烟气脱硫石膏的综合利用	13
1.3.2 美国烟气脱硫石膏的综合利用	14
2 烟气脱硫石膏的农业用途	18
2.1 概述	18
2.2 烟气脱硫石膏的农业应用	19
2.2.1 烟气脱硫石膏是作物营养元素 Ca 和 S 的重要来源	19
2.2.2 烟气脱硫石膏可以改善下层土壤酸度和 Al^{3+} 的毒性	22
2.2.3 烟气脱硫石膏的 Ca 可以改善高钠碱性土壤	23
2.2.4 烟气脱硫石膏可以改善土壤结构, 减少土壤侵蚀	24
2.2.5 烟气脱硫石膏可以促进许多作物的根部生长	26
2.2.6 烟气脱硫石膏可以控制土壤可溶性磷的流失	27
2.3 烟气脱硫石膏对农业经济的影响	28
2.3.1 增加产量和年收入	29
2.3.2 改善肥效	29
2.3.3 改善土壤质量	30
2.3.4 总体效益	31
2.4 美国电力科学研究院及其他地区的研究和示范	31
2.4.1 北达科他州(小麦)	33
2.4.2 俄亥俄州(混合干草和玉米)	34
2.4.3 新墨西哥州(苜蓿和盐碱土壤)	34
2.4.4 印第安纳州(玉米和大豆)	37
2.4.5 威斯康星州(苜蓿)	39

2.4.6	阿肯色州(棉花)	39
2.4.7	亚拉巴马州(棉花)	43
2.4.8	俄亥俄州(烟气脱硫石膏对土壤化学特性的改变)	45
2.5	我国的研究和示范	47
2.5.1	新疆	51
2.5.2	宁夏	53
2.5.3	天津	54
2.5.4	内蒙古	54
2.5.5	上海	56
2.6	烟气脱硫石膏安全使用指南	57
2.6.1	烟气脱硫石膏安全使用的原则和计算公式	57
2.6.2	按作物的需求量使用烟气脱硫石膏	58
2.6.3	按用途使用烟气脱硫石膏	60
3	烟气脱硫石膏控制农业面源磷的研究与应用	62
3.1	概述	62
3.2	烟气脱硫石膏控制农田径流磷的机理	64
3.2.1	改善土壤结构, 减少农田径流	64
3.2.2	增加土壤对磷的吸持能力, 减少磷的流失	65
3.3	烟气脱硫石膏对磷形态的影响	66
3.3.1	磷的形态	66
3.3.2	不同形态磷的溶解度	69
3.3.3	MINTEQ 程序计算下不同形态磷的溶解度	72
3.3.4	各种形态无机磷的提取方法	74
3.3.5	烟气脱硫石膏对滨海土壤磷形态的影响	76
3.3.6	烟气脱硫石膏对家禽废弃物磷形态的影响	80
3.4	烟气脱硫石膏控制农业面源磷	81
3.4.1	美国得克萨斯州	81
3.4.2	美国威斯康星州	83
3.4.3	美国亚拉巴马州	84
3.4.4	美国俄亥俄州	86
3.4.5	美国马里兰州	88
3.4.6	我国宁夏西大滩	90
3.4.7	其他研究	91
4	烟气脱硫石膏对围垦滩涂土壤的脱盐作用	95
4.1	科学假设	95
4.2	烟气脱硫石膏对滩涂盐碱土脱盐效果的土柱试验研究	96

4.2.1	材料与方法	96
4.2.2	结果与分析	98
4.2.3	讨论	108
4.2.4	结论	111
4.3	烟气脱硫石膏对滩涂盐碱地改良的盆栽试验	112
4.3.1	研究方法	113
4.3.2	结果与分析	115
4.3.3	小结	120
4.4	烟气脱硫石膏对滩涂盐碱地的脱盐作用的工程示范	120
4.4.1	研究地点和示范工程建设	120
4.4.2	试验材料	122
4.4.3	烟气脱硫石膏对围垦滩涂土壤化学性质的影响	125
4.4.4	烟气脱硫石膏对不同土层碱化度的影响	137
4.4.5	烟气脱硫石膏对滩涂盐碱土的脱盐作用	142
4.4.6	烟气脱硫石膏对围垦滩涂植物的影响	145
4.4.7	主要结论	154
5	烟气脱硫石膏在矿山修复/复垦上的应用	156
5.1	概述	156
5.2	煤矿废弃物堆场的覆盖和复垦	156
5.2.1	案例一: Otsego 煤矸石堆场	159
5.2.2	案例二: Freeport 煤矸石堆场	160
5.2.3	案例三: Rehoboth 废弃煤矸石堆场	161
5.2.4	案例四: COCCO 煤矸石蓄水池	162
5.2.5	案例五: Conesville AML Highwall 的修复	163
5.2.6	案例六: Rock Run Valley 的修复	164
5.2.7	烟气脱硫石膏: 煤矸石碱基改良剂	167
5.3	复垦后 20 年的变化: Fleming 露天煤矿	168
5.3.1	修复方案设计、试验材料和采样方法	168
5.3.2	烟气脱硫石膏对表面径流和渗滤液水质的影响	171
5.4	烟气脱硫石膏对污染土壤重金属的修复	175
5.4.1	对围垦滩涂重金属 Cd/Pb 的修复	175
5.4.2	重金属在燃煤烟气脱硫石膏改良盐碱土壤中的迁移	177
5.4.3	烟气脱硫石膏对重金属污染沉积物中 Cd/Cu 的稳定固定化作用	179
6	烟气脱硫石膏的生态安全性	182
6.1	概述	182
6.2	美国对烟气脱硫石膏生态安全性的评估	183

6.2.1	烟气脱硫石膏的风险评估方法	183
6.2.2	烟气脱硫石膏化学特性的系统比较	186
6.3	燃煤电厂烟气脱硫石膏的重金属问题	192
6.3.1	烟气脱硫石膏的浸出特性	192
6.3.2	烟气脱硫石膏对土壤重金属 (Cd、Cu、Ni、Zn、Pb、Cr) 的作用	200
6.3.3	烟气脱硫石膏对土壤重金属 Hg 的作用	204
6.3.4	烟气脱硫石膏对土壤蚯蚓的影响	206
6.3.5	烟气脱硫石膏对淡水和底栖生物的影响	208
6.3.6	烟气脱硫石膏对植物生理的影响	209
6.3.7	烟气脱硫石膏对植物籽实重金属含量的影响	213
6.4	烟气脱硫石膏的使用原则和政策建议	214
6.4.1	我国若干燃煤电厂烟气脱硫石膏的重金属含量	214
6.4.2	烟气脱硫石膏的使用原则	216
6.4.3	建议采用的烟气脱硫石膏农业和环境用途的重金属限值	218
主要参考文献		220
致谢		233
图版		

1 烟气脱硫石膏

1.1 烟气脱硫石膏的来源和特性

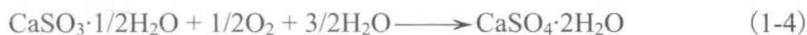
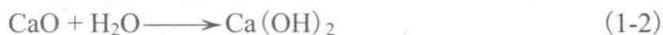
1.1.1 烟气脱硫石膏的来源

石膏(gypsum)是二水硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)，可以来源于多种不同的途径。矿物石膏是一种全球常见的由沉积岩形成的矿物，通过采矿/采石的方式获取；烟气脱硫石膏(flue gas desulfurization gypsum, FGDG)则是燃煤电厂的副产品，是一种与天然石膏有着相同化学结构的人工合成物质(United States Environmental Protection Agency, 2008)。石膏的其他来源还包括在不同化学生产过程中产生的磷石膏(phosphogypsum)、柠檬酸副产石膏(citrogypsum)和氟石膏(fluorogypsum)。

石灰石-石膏湿法工艺是目前应用最广泛、技术最成熟的烟气脱硫技术，约占已安装烟气脱硫机组容量的 70%。该方法以石灰石(limestone, 主要成分为 CaCO_3)为脱硫剂，通过向吸收塔内喷入吸收剂浆液，与烟气充分接触混合，并对烟气进行洗涤，使得烟气中的 SO_2 与浆液中的 CaCO_3 及鼓入的强氧化空气反应。1t SO_2 就能副产烟气脱硫石膏 2.7t；一个 30 万 kW 的燃煤电厂，如果燃煤含硫 1%，每年就要排出烟气脱硫石膏 3 万 t。图 1-1 是典型的石灰石-石膏湿法工艺示意图， SO_2 吸附反应方程式如下：



也可以表达为更复杂的化学反应方程式：



或者



图 1-2 是美国著名的威斯达-杰弗瑞能源中心及烟气脱硫石膏堆场，它采用的

就是石灰石-石膏湿法脱硫工艺。

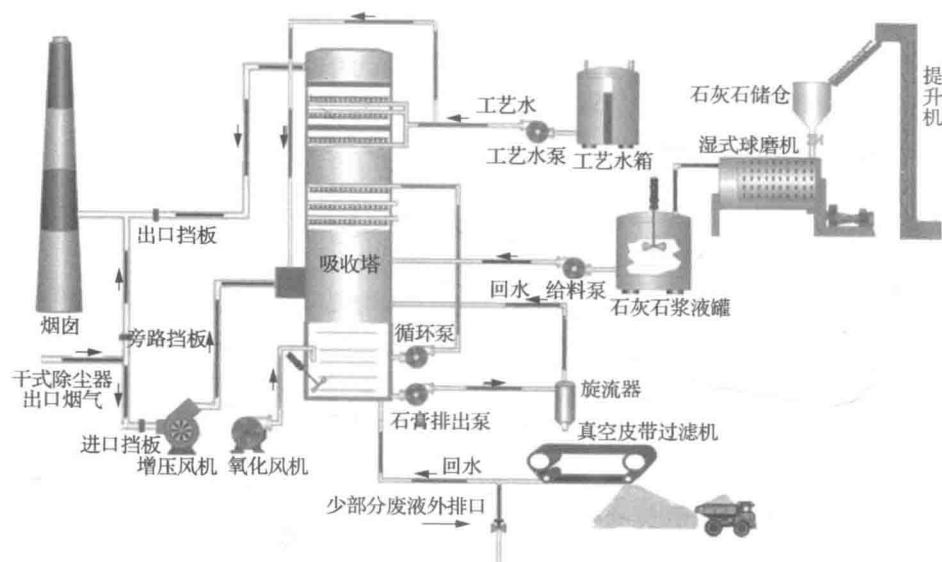


图 1-1 典型的石灰石-石膏湿法工艺示意图(彩图请见文后图版)

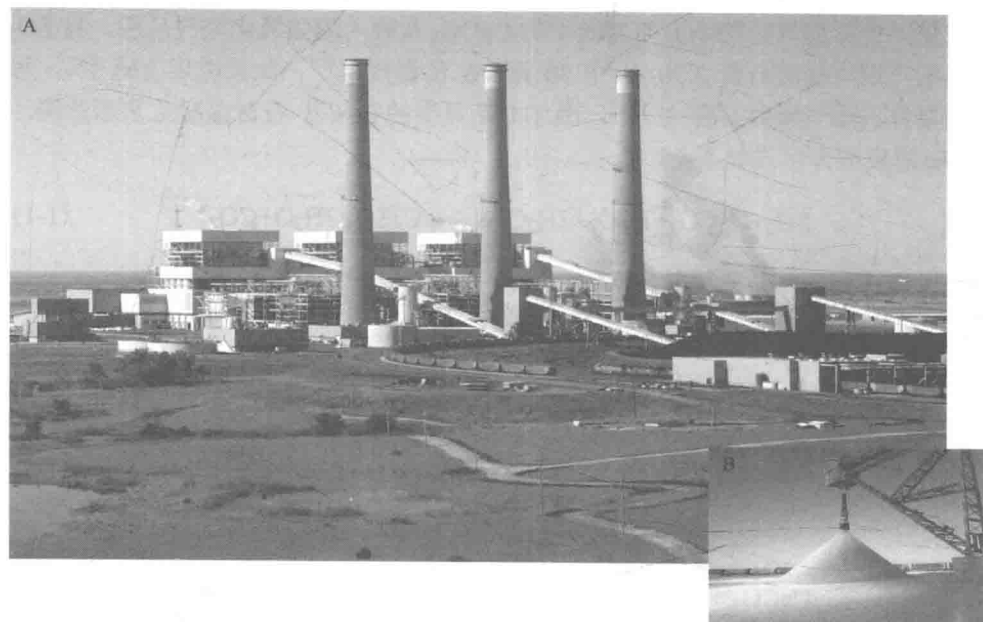


图 1-2 美国威斯达-杰弗瑞能源中心(A)及烟气脱硫石膏堆场(B)(彩图请见文后图版)

1.1.2 烟气脱硫石膏的特性

烟气脱硫石膏和矿物石膏拥有相似的物理化学性质，其化学组成均为二水硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)，具有 5 种形态和 7 种变体。与矿物石膏相比，烟气脱硫石膏更加纯净；两者在化学成分、机械性能及原始形态上的差别，使两种石膏所生产的工业制品在许多性能(如脱水特性、煅烧后熟石膏的力学性能、流变性能、易磨性等)上也产生了差别。但在农业和环境上，烟气脱硫石膏和矿质石膏都可以在各种土壤和水文地质条件下作为土壤修复剂使用。

1.1.2.1 烟气脱硫石膏的外观

烟气脱硫石膏一般表现为疏松且水分含量较大的细颗粒，水分占 10%~20%。一般情况下，烟气脱硫石膏的颜色近似白色微黄；如果脱硫时混入一些杂质如粉煤灰等，产生的烟气脱硫石膏颜色发黑。烟气脱硫石膏通常更细腻均一，粒径 99% 以上小于 $250\mu\text{m}$ ，主要集中在 $30\sim 60\mu\text{m}$ 。图 1-3 和图 1-4 分别展示了烟气脱硫石膏的一般外观和其在扫描电镜下的形态。

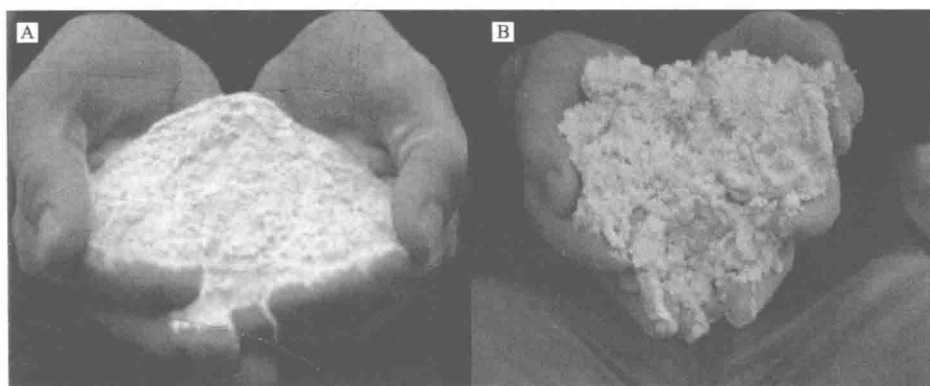


图 1-3 烟气脱硫石膏的外观

A. 脱水的烟气脱硫石膏；B. 未脱水的烟气脱硫石膏

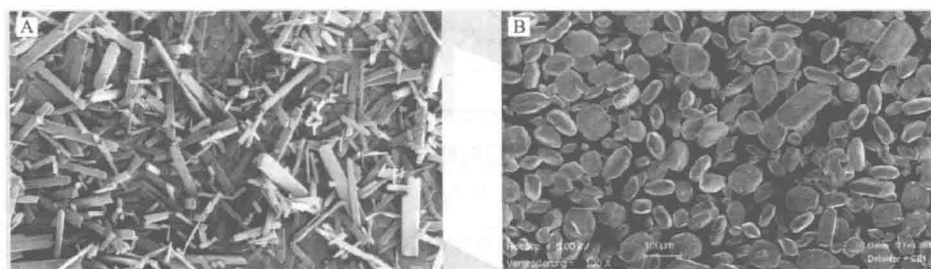


图 1-4 电镜下的烟气脱硫石膏

A. 针状晶体；B. 标准晶体

1.1.2.2 化学成分和化学性质

通常用同样方法测定烟气脱硫石膏与矿质石膏，然后将二者进行比较。一般来说，烟气脱硫石膏是一种纯度非常高的化学石膏。我国的烟气脱硫石膏纯度为75%~90%，其纯度远远低于发达国家先进脱硫工艺生产技术所生产的烟气脱硫石膏。例如，日本和欧洲的一些国家，它们利用先进的设备和生产技术生产的烟气脱硫石膏纯度可达96%以上。

表 1-1 给出了烟气脱硫石膏与矿物石膏的成分比较。与矿物石膏相比，烟气脱硫石膏无论化学品质还是物理特性，都优于矿物石膏。虽然烟气脱硫石膏和矿质石膏的主要组分都是 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ，但烟气脱硫石膏中的 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 含量高于矿质石膏，有时烟气脱硫石膏也包含少量的石英(SiO_2)，矿质石膏包含石英和白云石 $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ 。

表 1-1 烟气脱硫石膏与矿物石膏的成分比较 (Dontsova et al., 2005)

特性/元素	FGDG	矿物石膏
矿物学和物理学特性		
矿物	石膏/石英	石膏/石英/白云石
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}/\%$	99.6	87.1
水分/%	5.55	0.38
不可溶残渣/%	0.40	12.9
粒径>250 $\mu\text{m}/\%$	0.14	100
所含植物所需的大量和微量营养元素		
S/%	18.7	15.1
Mg/%	0.03	1.35
Ca/%	23.0	19.1
B/(mg/kg)	26.7	9.4
P/(mg/kg)	16.7	30.6
Fe/(mg/kg)	264	1045
Mn/(mg/kg)	5.5	14.6

表 1-2 提供了烟气脱硫石膏和方解石化学性质的对比。与方解石相比，烟气脱硫石膏的溶解度远远高于方解石，烟气脱硫石膏中可溶性的 Ca^{2+} 含量高于方解石中的可溶性 Ca^{2+} 含量 (United States Environmental Protection Agency, 2008; Amezketa et al., 2005)。因此在土壤利用钙源时，和方解石相比，只需施用很少剂量的烟气脱硫石膏就能提供和方解石等量甚至更多的可溶性 Ca^{2+} ，并且烟气脱