

烟气脱硫废弃物在盐碱地土壤改良中的应用研究进展^①

李凤霞^{1,2}, 杨涓³, 许兴^{1*}, 杨建国², 郑国琦³, 肖红燕²

(1 宁夏大学农学院, 银川 750021; 2 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 银川 750002;

3 宁夏大学生命科学学院, 银川 750021)

摘要: 综述了烟气脱硫废弃物在盐碱地土壤改良中的应用研究, 包括烟气脱硫废弃物的来源、性能, 脱硫废弃物改良碱性土壤的原理、施用技术和方法, 讨论了脱硫废弃物改良盐碱地的作用效果及其对土壤环境和食品安全的影响, 并对今后的进一步研究提出了展望。

关键词: 烟气脱硫废弃物; 盐碱地; 改良; 应用

中图分类号: S156.4

随着科学技术的发展及人类物质文明和精神文明生活不断增长的需要, 人们对赖以生存的资源与环境, 不仅要科学地管理和保护, 更要合理地开发利用, 以保障日益增长的需要。对于一个具有 13 亿人口的大国在面临着大面积耕地面积减少、淡水资源匮乏的情况下, 我们必须将盐碱地这样的土地资源进行大力的开发, 它具有巨大的开发潜力。20 世纪 90 年代后期至今, 不少国家都在为脱硫废弃物的再生资源化利用开发工作而努力, 在理论和实践上都取得了较大的成果^[1]。燃煤烟气脱硫废弃物在建筑业一直都有很广泛的用途, 由于人们对燃煤烟气脱硫废弃物的进一步认识, 其在农业生产方面也有了新的应用途径。各国学者都从各自学科的角度对其进行了研究, 并取得了一定的效果^[2]。

1 脱硫废弃物概况

1.1 脱硫废弃物的来源

中国是以煤为主要能源的大国, 而且我国电力工业近年来也迅速发展起来, 粉煤灰和燃煤废气的排放已成为日益严重的生态污染, 对生态环境构成巨大威胁。近年来在这方面引入了烟气脱硫技术以减少二氧化硫排放, 二氧化硫就以硫酸钙形式被固定下来, 生成了一种烟气脱硫 (FGD) 副产物, 主要含有 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 又称燃煤脱硫石膏或烟气脱硫废弃

物^[2-3]。据统计, 目前全世界脱硫石膏的年排放量约 1.5 亿 t, 我国脱硫废弃物的年排放量也超过 100 万 t, 并有逐年增长的势头^[4-5]。因此大量的固体废弃物堆置不仅会造成二次污染, 还会占用大量的土地, 同时造成 Ca、S 等元素的资源浪费^[6]。

1.2 脱硫废弃物的性质

脱硫废弃物的主要成分是结晶硫酸钙, 颜色白色、乳白、乳黄, 其酸碱度与天然石膏相当, 呈中性或略偏碱性。脱硫废弃物是与天然石膏相同或等值的原料和产品; 从质量上看, 脱硫废弃物纯度较高, 成分稳定。与天然石膏相比, 脱硫废弃物的主要成分含水量较高; 粒度较小, 成粉状; 含水溶性盐类较多^[1]。不同产地形成的脱硫废弃物中硫酸钙的含量不尽相同, 但是含量大都在 85% 以上。

2 脱硫废弃物对盐碱地的改良技术

2.1 脱硫废弃物改良盐碱地的施用方法

脱硫废弃物的施用方法一般为基施。因为考虑到追施容易出现 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 还没有来得及到达作物的根层并改善土壤的理化性质而随灌溉水一起被排掉等问题不被大家所采用。因此, 通常都采用秋后深耕和冬灌之前基施, 这样脱硫废弃物施用后能被深埋入土壤, 经过与土壤充分的混合和一个冬天的溶解, 脱硫废弃物中的 Ca 能够将土壤中的代换性 Na 及时置

^①基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2007BAC08B01) 和国家自然科学基金项目 (40961020) 资助。

* 通讯作者 (xuxingscience@126.com)

作者简介: 李凤霞 (1977—), 女, 宁夏固原人, 博士研究生, 主要从事牧草栽培与土壤微生物方面的研究。E-mail: lifengxia1211@sina.com

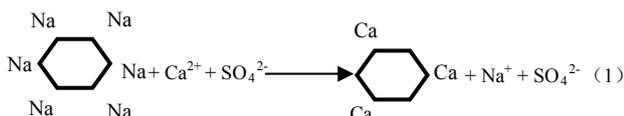
换出来,随着春季灌溉等措施能够将置换出的 Na 运到土壤表层随水排掉。也有在春季进行基施的,但是,脱硫废弃物中的 Ca 置换土壤中的代换性 Na 需要一定的时间,而春季作物发芽出苗是植物一生中生长最关键的时候,在这期间土壤的碱化度和 pH 值还很高,对作物的出苗不利,因此改良效果缓慢。吕二福良和乌力更^[7]指出把脱硫废弃物与 60 cm 土层的土壤全部混匀改良效果最好,但受现实条件的制约,成本高,不可取;如果与 20 cm 土层混匀的改良效果远大于表层施用的改良效果。

2.2 脱硫废弃物改良盐碱地的施用量

对于脱硫废弃物改良盐碱土的施用量依土壤类型如碱土、盐土或土壤的碱化度 (ESP)、Na 吸附比 (SAR)、土壤中 pH 大小有关系。因为土壤中碱化度和 Na 吸附比和土壤中 pH 值的大小决定土壤中有多少可代换性 Na,而这些代换性 Na 的量与之进行置换的 Ca 呈一定的比例关系,从而决定脱硫废弃物的施用量。另外,脱硫废弃物的施用量与施入土层的深度也有关系。王金满等^[2]提出脱硫废弃物用量 7.5 t/hm^2 和淋洗水量 $1200 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 的处理组合对碱化土壤改良效果最佳。

2.3 脱硫废弃物改良碱性土壤的原理

碱性土壤由于胶体中含有过量代换性 Na^+ 、可溶性碳酸盐,因而土壤的 pH 值高 ($\text{pH} > 8.5$),与土壤胶体粒长期接触,成为含 Na 的胶体粒子。碱化土壤改良的关键就是直接或间接提供二价阳离子 (Ca^{2+}) 来置换土壤胶体中的交换性 Na^+ 。土层中掺入脱硫废弃物后,因 Ca^{2+} 比 Na^+ 对土壤中胶体粒的吸附能力强,原已吸附的 Na^+ 会和土壤溶液中的 Ca^{2+} 发生离子交换^[5-8] (式 1)。而含 Ca^{2+} 胶体微粒的外层不吸附水分子,胶体微粒自己能互相靠近而聚团,土壤就不会板结。水分子渗入微粒之间时会使微粒团膨胀,然后在干燥过程中使土层龟裂。该过程反复进行后,土壤就形成团粒结构,从而有利于农作物根系生长和吸收水分、养分。同时 Na^+ 被置换下来后形成的 Na_2SO_4 可随水移动排除出土壤,进而降低碱化土壤的 pH^[5]。



3 脱硫废弃物对土壤的改良效果研究

目前,我国开展了不少烟气脱硫废弃物改良内陆盐碱地的试验性研究,也建立了示范性工程。如沈阳市康平县、内蒙古托克托县均进行了烟气脱硫废弃物

改良苏打碱化土壤的玉米大田试验,改良效果明显^[9-10]。沿海地区滩涂及盐碱地改良较少,宁波太极环保公司曾利用金属铜矿冶炼炉渣作吸收剂进行烟气脱硫,将脱硫废弃物改良宁波慈溪庵东镇江南村盐碱地,取得了一定的成效^[11]。宁夏银北灌区利用脱硫废弃物种植油葵等改良盐碱地,获得了良好效果^[12]。赵瑞^[9]对内蒙古默川地区碱化土壤进行了调查研究,进行了小麦、玉米的盆栽试验,提出碱土改良,不必以彻底消除交换性 Na 为目标,只要 $\text{ESP} < 10\%$,就可以认为改造好了。

国内外利用脱硫废弃物对土壤的改良应用研究主要集中在如紫花苜蓿、油葵、大豆、玉米、花生、萝卜、桉树、苜蓿、橡树、小麦、羊茅、水稻、辣椒、花椰菜、燕麦、葡萄以及甘蔗等^[13-31]。而对盐碱地改良效果评价主要集中在以下几个方面。

3.1 改善土壤理化性质

施脱硫废弃物可增强土壤的离子吸附能力,提高土壤持水性。另外碱土各特征值都发生了显著变化。石懿等^[32]提出在使用脱硫废弃物后土壤 0~15 cm 的 SAR 以及 pH 值较对照均有了明显的降低,且不同处理的试验效果差异较大。由于供试土壤的渗透性较差,Na-Ca 交换后,0~15 cm 土层代换出的盐分不能全部被淋洗排出土体,在土体下层附集,这无疑说明了碱土改良是一个较漫长的过程^[10]。任坤等^[33]通过室内土柱混合置换试验提出碱化土壤经过不同浓度的 CaSO_4 溶液淋溶,土壤的 pH 值、电导率和饱和水力传导度均得到了不同程度的降低。这与王金满等^[2]、陈欢等^[4]、李焕珍等^[10]的研究结果一致。Aman 等^[34]的空间模式研究表明,随着脱硫废弃物的应用,土壤对 CaSO_4 的需求显著地降低。吕二福良^[7,29]提出碱化度不同,土壤的改良效率亦不同,随着碱化度的升高,脱硫废弃物的改良效率显著提高;碱化度越高,提高的幅度越大。宁夏银北马雪莲等^[12]指出不同施用量的脱硫物均可降低土壤的全盐含量和 pH 值。李茜等^[35]以烟气脱硫废弃物和糠醛渣配合施用改良宁夏盐碱地,改良后的土壤 pH 值、可溶性盐和 ESP 都有显著降低。因此,用烟气脱硫废弃物改良碱化土壤具有极大的推广应用价值。

3.2 提供植物营养元素

脱硫废弃物作为土壤改良剂或者土壤调节剂蕴藏着丰富的元素,尤其富含 Ca 和 S,是作物两个必不可少的养分元素。对许多作物而言 S 肥也很需要。由于大气中 S 沉积有所下降,大部分 N、P 化肥不再含有大量的 SO_2 。S 素不仅能构成某种特定形态与结构的蛋白质,

含硫氨基酸是细胞内某些化合物的重要介质, 维生素 B、维生素 H 的合成也需蛋氨酸参与^[36]。S 还能提高叶绿体内 Fe 的活性, 增加叶绿素含量。S 可影响小麦的籽粒硬度, 增加油料作物的含油量。在某些国家, S 已成为农业生产中作物产量的限制因素, 如孟加拉国, S 是仅次于 N 的第 2 限制因素。作物缺 S 已遍及印度全国的多种作物。在澳大利亚的新南威尔士州, 因土壤缺 S 竟导致某些油菜产量损失高达 80%, 含油量减少 20%, 为此, 农业生产中 S 的研究已愈来愈受到植物营养学家的广泛关注^[37]。S 与根瘤菌和自生固 N 菌的固 N 作用有关, 并可增加植物的抗寒、抗旱性, 提高水分利用率。徐光胜等^[6]在酸性土壤也得出同样的结论, 即适宜的脱硫废弃物可强烈刺激花生根瘤生长繁殖, 使根瘤数量和质量成倍增长。

Ca 不仅是植物必需的矿质营养元素之一, 而且对于维持细胞壁、细胞膜及膜结合蛋白的稳定性, 调节无机离子运输有很大作用。土壤溶液中较低或不足的 Ca 水平严重阻碍根系的生长^[11,38-39]。脱硫废弃物提高作物的生长, 为花生提供 Ca 源, 提高土壤保水性, 降低土壤板结。Eduardo^[25] 研究发现 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 应用不仅增加免耕系统小麦的产量, 也增加了小麦叶片中 Ca 和 S 的含量。

3.3 提高作物抗逆性

当植物受到逆境胁迫时, 细胞质游离 Ca^{2+} 浓度明显上升, 启动基因表达, 引起一系列生理变化, 从而提高植物对逆境的适应性, 同时 Ca^{2+} 在阻止膜脂过氧化反应及保护膜膜的完整性方面具有重要作用, 它能增加膜的流动性, 从而提高植物的抗逆能力。Ca 与植物的诸多生理功能都有密切关系^[3,40]。许多研究证实外源 Ca^{2+} 能减轻非生物逆境 (如盐胁迫等) 对植物细胞的伤害。盐胁迫下, 植物叶片叶绿素含量不仅直接关系着植物的光合同化过程, 而且也是衡量植物耐盐性的重要生理指标之一。随着脱硫废弃物施入量的增加, 叶绿素含量不断增加, 最直接的影响就是生物量的增加^[41]。美国爱荷华州立大学研究表明^[28], 土壤中 Ca 源的施加, 提高了辣椒的质量和抗病性, 延长果实采收后的贮存寿命。研究证实脱硫废弃物可明显提高紫花苜蓿的生理机能^[11]。

3.4 提高作物产量和品质

Rahmat 等^[26] 分别以不同脱硫废弃物施用量应用到水稻、小麦轮作系统土壤中, 施用量为 2 t 的处理, 产量提高 13.8%。同时所有与产量相关的性状如千粒重、穗长、单位面积株丛数等都显著增加。研究报道 1 t/hm² 和 2 t/hm² 的脱硫废弃物应用分别提高小麦产量

25.25% 和 65.66%^[26]。2004 年在美国伍斯特淤泥壤土中 67 kg/hm² 的脱硫废弃物应用可以增加 40% 的苜蓿干重, 而在俄亥俄州地区 24 kg/hm² 的烟气脱硫废弃物应用可以增加苜蓿产量 5% ~ 6%^[42]。在巴西中部研究表明 30 cm 深的土层中施加石灰能使根系深入生长并可以提高大麦的平均产量 1 300 kg/hm²^[43]。宁夏盐碱地的脱硫废弃物试验表明, 不同施用量的脱硫物, 均可提高油葵的出苗率、生物量和产量, 22.5 t/hm² 的脱硫废弃物施用量可增加苜蓿产量 60%^[12]。脱硫废弃物可明显提高全盐含量 0.4% 的滨海盐渍土胁迫下紫花苜蓿的生理机能, 有效提高紫花苜蓿的生物量。此外, 脱硫废弃物可提供如 Si、Fe 等植物必需或有益的矿质元素, 这也是使紫花苜蓿增产的一个重要原因^[11]。另外, 徐胜光等^[16-17]、李尚均等^[19] 在广东酸性土壤也得出适量施用脱硫废弃物可有效提高花生、萝卜、桉树等生长量和产量。

3.5 脱硫废弃物施用对土壤环境及植物安全的影响

当脱硫废弃物施用于土壤时, 伴随而来的问题是, 脱硫废弃物是否有潜在的对环境和农作物污染的风险。虽然脱硫废弃物富含植物所必需的一些营养元素, 但与此同时也富含一些微量重金属, 如果农作物对这些重金属元素产生富集, 则会通过食物链使其危害逐级放大。因此, 生态环境安全性评估成为该领域研究的重要热点之一。

3.5.1 对土壤环境的影响 研究表明, 脱硫废弃物施用减少 P 向可溶性形式的转换, 可以减少 P 径流到邻近的溪流、湖泊或地下水中, 避免径流水质成为富营养化水体。并能增强土壤中解磷细菌和碱性磷酸酶活性, 增强土壤中 P 的释放作用^[15]。刘常珍等^[44] 通过盆栽淋洗试验提出外源 S 施入土壤后可抑制土壤 N 的淋失, 其作用机制是由 S 元素氧化产生的 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 作用所致。因此认为 S 元素是适用于蔬菜土壤的硝化抑制剂之一, 特别是有效 S 含量低的土壤。Milchunas 等^[45] 报道, 土壤高 Se 浓度会使植物中的 S 含量减少。这说明其间有相互拮抗作用。Denier 和 Neue^[46] 对菲律宾的稻田甲烷排放进行了监测, 得出 6.66 t/hm² 的脱硫废弃物应用减少了 55% ~ 70% 的甲烷排放量, 同时伴随有机物质含量的提高, 这可能是因为硫酸盐还原细菌抑制了甲烷生产过程, 脱硫废弃物应用试验区土壤溶液中 SO_4^{2-} 的浓度远远高于文献报道的最低浓度, 这是硫酸还原细菌与甲烷形成过程竞争成功的原因。Lee 等^[47] 提出脱硫废弃物改良温室土壤促进土壤微生物活性。Mikko 等^[48] 研究了 FGD 对 Ohion 中东部煤矿中心区地下水质量的影响, 指出脱

硫废弃物显著增加地表水和地下水中酸度及 Fe、Al、S 和 Ca 离子含量。盆栽试验及土壤淋溶试验表明, 燃煤烟气脱硫废弃物中的总 Pb、Cd、Cr、As、Se、Ni、Cu 等指标, 基本上都低于国标最高容许量和土壤环境质量二级标准, 符合国家控制标准, 但普遍高于土壤自然背景值含量, 个别省份的总 Cd 和总 Cr 甚至在土壤自然背景值以下^[5,14,16-17,49]。Stehouwer 等^[50]提出即使脱硫废弃物中的飞灰高达 40%, As、Ba、Cd、Cr、Pb、Hg、Se 也不会超过美国环保局 (EPA) 农用污泥标准。

3.5.2 对植物安全的效应 Haneklaus 和 Paulsen^[51]指出缺S土壤还会使作物对N肥的利用率降低, 导致地下水中NO₃⁻-N 的积累而带来环境问题。Stehouwer 等^[52]用盆栽试验研究了 3 种烟气脱硫废弃物在苜蓿和高羊茅上的修复作用, 提出烟气脱硫废弃物增加了植物中Ca、Mg和S的含量, 烟气脱硫废弃物对苜蓿修复后滤液中Zn和Mn的含量降低, 而苜蓿和高羊茅盆栽中Al的含量都降低, 滤液中B和Cu等微量元素没有增加。植物中除了B和Mo以外的微量元素都没有增加^[53]。进一步的盆栽试验表明, 收获物花生的重金属含量均低于我国无公害食品卫生标准。Woodbury 等^[54]在兰辛, 纽约粉煤灰填埋场附近, 以 11.2 t/hm² 的 CaSO₄·2H₂O应用研究表明, 连续 3 年的结果显示脱硫废弃物可以降低植物中Se的积累。Soder等^[55]模拟瘤胃发酵试验表明脱硫废弃物应用并没有影响到瘤胃发酵及瘤胃微生物。在酸性土壤研究表明, 施用脱硫废弃物后花生、萝卜、甘蔗和水稻的可食部分重金属均无超累积现象, 未导致农产品重金属的富集残留污染, 不影响农产品安全品质^[6,16-18,49]。

4 展望

上述研究在不同程度上对脱硫废弃物在不同地区的土壤改良或农业生产应用进行了具有开创性的研究, 对于了解和充分认识土壤改良的理论基础、应用方法、采取措施和发展过程起到了积极的作用。在脱硫废弃物对土壤改良效果的评价中, 除了上面提出的土壤理化性质、作物产量和品质、植物抗逆性、土壤环境和食物安全方面以外, 土壤酶活性及土壤微生物和微生物多样性也是评价盐碱地改良效果的重要生物指标^[56]。许多学者研究表明, 土壤微生物能较早地预测土壤质量的变化, 是土壤质量变化最敏感的指标, 也是土壤健康的决定性因素, 应该加强这方面的研究。另外, 脱硫废弃物因含有丰富的金属元素, 受到广泛的关注, 虽然目前研究表明其对土壤和植物没有造成

威胁, 但是还应该注意其长期效应, 并进行长期定位监测, 并加强对这部分研究的监测力度。脱硫废弃物的应用对植物及食品的安全问题应该得到进一步的评价。

参考文献:

- [1] 郑丽萍. 烟气脱硫副产物的综合利用. 内蒙古环境保护, 2004, 16(2): 14-16
- [2] 王金满, 杨培岭, 石懿, 任树梅. 脱硫副产物对改良碱化土壤的理化性质与作物生长的影响. 水土保持学报, 2005, 19(3): 34-37
- [3] 李淑仪, 蓝佩玲, 徐胜光, 廖新荣, 陈昌和, 徐旭常. 燃煤烟气脱硫副产物在酸性土壤的农业资源化利用. 生态科学, 2003, 22(3): 222-226
- [4] 陈欢, 王淑娟, 陈昌和, 徐旭常, 李跃进, 乌力更, 张伟华. 烟气脱硫废弃物在碱化土壤改良中的应用及效果. 干旱地区农业研究, 2005, 23(4): 38-42
- [5] 姜瑜. 烟气脱硫石膏农业资源化利用研究进展. 安徽农业科学, 2007, 35(28): 8 950-9 040
- [6] 徐胜光, 蓝佩玲, 廖新荣, 蓝佩玲. 花生施用燃煤烟气脱硫副产物研究初报. 土壤与环境, 2001, 10(1): 23-26
- [7] 吕二福良, 乌力更. 石膏不同施用方法改良碱化土壤效果浅析. 内蒙古农业大学学报, 2003, 24(4): 130-134
- [8] 耿春女, 钱华, 李小平, 罗启仕, 戴海夏, 程曦. 脱硫石膏农业利用研究进展与展望. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(12): 15-19
- [9] 赵瑞. 煤烟脱硫副产物改良碱化土壤研究(博士学位论文). 北京: 北京林业大学, 2006
- [10] 李焕珍, 徐玉佩, 杨伟奇, 张重善, 李纪柏. 脱硫石膏改良强度苏打盐渍土效果研究. 生态学杂志, 1999, 18(1): 25-29
- [11] 吴保庆, 郭洪海. 烟气脱硫石膏对盐胁迫下紫花苜蓿生理的影响. 山东农业科学, 2008(2): 45-47
- [12] 马雪莲, 罗成科, 许强, 沈振荣. 燃煤烟气脱硫废弃物对宁夏银川北部中度盐碱地及油葵生长发育的影响. 安徽农业科学, 2007, 35(10): 3 046-3 047
- [13] 王景艳, 邓力群, 隆小华, 刘玲, 刘兆普. 滨海盐渍化土壤引种油葵的试验研究. 土壤, 2008, 22(1): 123-126
- [14] 李淑仪, 蓝佩玲, 徐胜光, 廖新荣, 陈昌和, 徐旭常. 燃煤烟气脱硫副产物在酸性土壤上施用的效果. 生态环境, 2003, 12(3): 263-268
- [15] 李晓娜, 张强, 陈明昌, 章衡. 不同改良剂对苏打碱土磷有效性影响的研究. 水土保持学报, 2005, 19(1): 71-74
- [16] 徐胜光, 李淑仪, 蓝佩玲, 廖新荣, 陈昌和, 徐旭常. 燃煤烟气脱硫副产物对花生作物营养效应及其机理. 生态科学, 2003,

- 12(4): 415-418
- [17] 徐胜光, 李淑仪, 蓝佩玲, 廖新荣, 陈昌和, 徐旭常. 燃煤烟气脱硫副产物对萝卜的作用及其机理研究. *生态科学*, 2003, 22(3): 232-236
- [18] 徐胜光, 李淑仪, 蓝佩玲, 廖新荣, 陈昌和, 徐旭常. 燃煤烟气脱硫副产物用于桉树的效果与机理. *浙江林学院学报*, 2004, 21(1): 15-21
- [19] 李尚均, 李淑仪, 蓝佩玲, 廖新荣, 简明. 燃煤烟气脱硫副产物对桉树生长影响的研究. *桉树科技*, 2007, 24(1): 1-7
- [20] Clark RB, Zeto SK, Ritchey KD, Baligar VC. Maize growth and mineral acquisition on acid soil amended with flue gas desulfurization by-products and magnesium. *Fuel*, 1997, 28(15): 1 441-1 459
- [21] Stout WL, Priddy WE. Use of flue gas desulfurization(FGD) by-product gypsum on alfalfa. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1996, 27(9): 2 419-2 432
- [22] Clark RB, Baligar VC. Growth of forages legumes and grasses in acidic soil amended with flue gas desulfurization products. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2003, 34(1):157-180
- [23] Chen L, Dick WA, Nelson S. Flue gas desulfurization by-products additions to acid soil: Alfalfa productivity and environmental quality. *Environment Pollution*, 2001, 114(2): 161-168
- [24] Crews JT, Dick WA. Liming acid forest soil with flue gas desulfurization by-product: growth of Northern oak and leachate water quality. *Environment Pollution*, 1998, 103(1): 55-61
- [25] Eduardo FC, Ltacir CF, Gabriel B. Fernando José Garbuio. *Scientia Agricola*, 2002, 59(2): 357-364
- [26] Rahmat UK, Raza G. Muhammad sohail khan and akber hussam gurmanl. *Pakistan Journal of Biological Science*, 2007, 10(21): 3 865-3 869
- [27] Ritchey KD. High-calcium flue gas desulfurization products reduce aluminum toxicity in an appalachian soil. *Journal of Environ. Qual.*, 1999, 25: 1 401-1 410
- [28] Kathleen D, Rajeev A. Effect of Gypsum Applications on Oraganic Crop Production and Postharvest Quality (Research Report). Iowa: February 22, 2003: 1-14
- [29] 吕二福良. 不同碱化度土壤在煤烟脱硫废渣改良过程中的物理化学变化及改良效果的研究 (硕士学位论文). 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2004
- [30] 王金满, 杨培岭, 张建国. 脱硫石膏改良碱化土壤过程中的向日葵苗期盐响应研究. *农业工程学报*, 2005, 21(9): 33-37
- [31] Viator RP, Kovar JL, Hallmark WB. Gypsum and compost effects on sugarcane root growth, yield, and plant nutrients. *Agron. Journal*, 2002, 94: 1 332-1 336
- [32] 石懿, 杨培岭, 张建国, 王金满, 段剑波, 项光明. 利用和分析脱硫石膏改良碱化土壤的机理. *灌溉排水学报*, 2005, 24(4): 4-9
- [33] 任坤, 任树梅, 杨培岭. CaSO₄在改良碱化土壤过程中对其理化性质的影响. *灌溉排水学报*, 2006, 25(4): 77-80
- [34] Aman UB, Ahmad B, Akbar HG. Spatial patterns in gypsum requirement before and after gypsum application. *Pakistan Journal of Biological Science*, 2000, 3(10): 1 580-1 582
- [35] 李茜, 孙兆军, 秦萍, 罗成科, 沈振荣. 燃煤烟气脱硫废弃物和糠醛渣对盐碱土的改良效应. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(4): 70-73
- [36] 韩文炎, 石元值, 马立峰, 阮建云, 许允文. 茶园土壤硫素状况及对硫的吸附特性. *茶园科学*, 2003, 23(增刊): 27-33
- [37] 王庆仁, 林葆. 植物硫营养研究的现状与展望. *土壤肥料*, 1996(3): 16-19
- [38] 卫丽, 黄晓书, 李鹏坤, 张慧琴, 王同朝. 植物硫氧还蛋白研究进展. *贵州农业科学*, 2006, 34(6): 129-131
- [39] 谢瑞芝, 董树亭, 胡昌浩. 植物硫素营养研究进展. *中国农学通报*, 2002, 18(2): 65-69
- [40] 陈立松, 刘星辉. Ca²⁺与果树抗逆性的关系. *亚热带植物科学*, 2001, 30(4): 61-67
- [41] 张和臣, 尹伟伦, 夏新莉. 非生物逆境胁迫下植物钙信号转导的分子机制. *植物学通报*, 2007, 24: 114-122
- [42] Liming C, Warren A, Dich SN. Flue gas desulfurization by-product as liming and sulfur source for alfalfa and soybean. *Agron Journal*, 2005, 97: 265-271
- [43] 李新国, 曾斌, 杨晓红, 何利刚, 王会良, 孙中海. 不同钙盐对温州蜜柑抗冻性的影响. *应用生态学报*, 2008, 19(8): 1 665-1 669
- [44] 刘常珍, 赵言文, 胡正义, 高义民, 徐成凯, 毕冬梅, 肖新. 硫元素对蔬菜地土壤NO₃⁻淋溶损失的影响. *南京农业大学学报*, 2004, 27(3): 54-57
- [45] Milchunas DG, Lauenroth WK, Dodd JL. The interaction of atmospheric and soil sulfur on the sulfur and selenium concentration of range plants. *Plant and Soil*, 1983, 72: 117-125
- [46] Denier van HA, Neue HU. Impact of gypsum application on the methane emission from a wetland rice field. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, 8(2): 127-134
- [47] Lee YB, Bigham JM, Dick WA, Jones FS, Ramsier C. Chemical and physical properties of dry flue gas desulfurization products. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34: 7-17
- [48] Mikko L, James W, Harold W, Chin YP, He YT, Samuel JT. Effect of flue gas desulfurization (FGD) by-product on water quality at

- an underground coal mine. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30: 1 371-1 381
- [49] 徐胜光, 蓝佩玲, 廖新荣, 陈昌和, 徐旭常, 李淑仪. 燃煤烟气脱硫副产物的重金属环境行为. *生态环境*, 2005, 14(2): 38-42
- [50] Stehouwer RC, Sutton P, Dick WA. Compost and calcium surface treatment effects on subsoil chemistry in Acidic minespoil columns. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32: 781-788
- [51] Haneklaus S, Paulsen HM, Gupta. Influence of sulfur fertilization on yield and quality of oilseed rape and mustard. 10th international rapeseed congress. Canberra Australia, 1999: 26-29
- [52] Stehouwer RC, Sutton P, Dick WA. Transport and plant uptake of soil-applied dry flue gas desulfurization by-products. *Soil Science*, 1996, 161(9): 562-574
- [53] 徐旭常, 陈昌和, 王淑娟. 西部燃煤电站开发与生态环境. *节能与环保*, 2003(4): 45-47
- [54] Woodbury PB, Arthur MA, Rubin GL, Weinstein H, Mccune DC. *Water, Air and Soil Pollution*. Netherlands: Springer, 1999: 421-432
- [55] Soder KJ, Saporito LS, Stout WL. Effect of gypsum application level to grass pasture, grass hay, and corn silage on fermentation by rumen microorganisms in continuous culture. *Animal Feed Science and Technology*, 2007, 132: 3-4
- [56] 唐玉姝, 魏朝富, 颜廷梅, 杨林章, 慈恩. 土壤质量生物学指标研究进展. *土壤*, 2007, 39(2): 7-13

Research Advances on Alkaline Soil Improvement by Flue Gas Desulphurization Byproducts

LI Feng-xia^{1,2}, YANG Juan³, XU Xing¹, YANG Jian-guo², ZHENG Guo-qi³, XIAO Hong-yan²

(1 College of Agronomy, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2 Agriculture Resource and Environment Institute, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Science, Yinchuan 750002, China; 3 College of Life Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: This paper reviewed the research advances on the application of flue gas desulphurization byproducts in alkaline soil improvement, including the source and performance of flue gas desulphurization byproducts, the principles, techniques and methods of application with desulphurization byproducts in alkaline soil, discussed the application effects of desulphurization byproducts on soil environment and on food safety, and also prospects the future study.

Key words: Flue gas desulphurization byproducts, Alkaline soil, Improvement, Application