

粉煤灰对土壤性质改善及肥力提升的作用研究进展^①

季慧慧¹, 黄明丽¹, 何 键¹, 杨凡昌¹, 徐荣臣², 张凤魁², 颜冬云^{1*}

(1 青岛大学环境科学与工程学院, 山东青岛 266071; 2 鲁化好阳光生态肥业有限公司, 山东滕州 277527)

摘要:我国粉煤灰生产量巨大, 农业生产中合理利用粉煤灰是提高粉煤灰综合利用水平的重要途径之一。本文综述了近年来粉煤灰在土壤结构改良、促进作物生长发育以及粉煤灰衍生肥对农业生产的作用等方面的研究进展。最后, 对粉煤灰农业资源化利用风险进行了分析, 并根据当前粉煤灰研究中存在的主要问题, 指出了今后粉煤灰农用研究的重点。

关键词:粉煤灰; 改良; 土壤; 作物

中图分类号: S143; X131; S156 文献标识码: A

粉煤灰是燃煤企业在生产过程中排放出的固体废物。随着我国能源工业稳步发展和电力工业的迅速发展, 粉煤灰排放总量逐年增加。我国粉煤灰排放量从2000年约1.5亿t到2013年约5.32亿t, 平均年递增18.2%, 根据灰色预测模型估计, 到2020年中国粉煤灰排放量将达到9亿t^[1-2]。粉煤灰的不恰当处理不仅占用了大面积土地, 还对环境造成污染^[3-4]。

粉煤灰粒细质轻、多孔松散、比表面积大、活性基团较多且吸附能力较强^[5], 能够促进土壤颗粒的团聚作用, 粉煤灰的理化性质决定了粉煤灰可以用作土壤改良剂及肥料填充剂, 为农作物生长发育创造良好

的条件, 提高农作物的品质。

1 粉煤灰的理化性质

粉煤灰颗粒大致分为珠状、渣状、钝角、碎屑、粘聚颗粒5种^[6]。粉煤灰的化学成分主要是: SiO₂、Al₂O₃、FeO、Fe₂O₃、CaO、TiO₂等^[7](表1), 密度大多在2.1~2.6 g/ml, 体积质量(容重)主要在1.0~1.8 g/ml。粉煤灰体积质量、比重均小于土壤, 孔隙度大于土壤, 粉煤灰的特性决定了它在农业应用方面潜力巨大。粉煤灰的组成和性质随燃煤组成、燃烧条件和处理方法等因素的不同而不同^[9]。

表1 粉煤灰的主要化学组成^[8]
Table 1 Chemical compositions of flyash

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Loss
含量(%)	33.9~59.7	16.5~35.4	1.5~15.4	0.8~9.4	0.7~1.9	0.7~2.9	0.2~1.1	0~1.1	1.2~23.5
均值	50.6	27.2	7.0	2.8	1.2	1.3	0.5	0.3	8.2

粉煤灰中含有一定量的铁, 膜状铁的胶结作用及铁在腐殖质和黏土矿物晶格间的桥梁作用是土壤团聚化的重要机制^[10]。它可使大于5 mm的水稳定性团聚体减少, 使5~1 mm及0.5~0.25 mm的团聚体增加, 进而改善土壤结构及通气透水性^[11]。

2 粉煤灰的农田施用效应

2.1 粉煤灰对土壤结构及理化性质的影响

由于粉煤灰形成过程中产生大量的孔洞和网格

玻璃质^[12], 同时粉煤灰沙粒含量达87%以上, 粉煤灰加入土壤后会增加土壤砂性, 增加土壤视密度、比重及饱和导水率, 提高土壤通气性, 降低土壤体积质量, 增加土壤的孔隙率, 缩小膨胀率, 增加土壤微生物活性, 增加土壤抗侵蚀能力, 对水、肥、气、热有很好的保存和传导作用^[13-17]。郑海金等^[18]通过盆栽试验发现, 粉煤灰施加到土壤后, 土壤黏粒含量显著降低, 且适量施入粉煤灰后土壤中的重金属含量均低于“土壤环境质量标准值”一级标准。吴家华等^[19]指出,

基金项目: 国家自然科学基金项目(31400371; 51279075)和产学研横向课题(40401160009)资助。

* 通讯作者(yandongyun666@hotmail.com)

作者简介: 季慧慧(1992—), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 研究方向为环境化学。E-mail: jihuihui1992@163.com

粉煤灰可显著提高白浆土微生物活性,增加芽孢菌含量,提高青霉菌活性,从而增强土壤生物的抗性,同时粉煤灰可以提高固氮微生物活性,使有益微生物占优势,改善土壤生态环境,为作物生长创造有利的环境。Sarangi 等^[20]在对水稻的研究中发现,加入粉煤灰后土壤中转化酶、脱氢酶蛋白酶活性明显增加。Gourab 等^[21]研究表明,粉煤灰用量在 5、10 t/hm² 时,土壤中磷酸酶、芳基硫酸酯酶活性增强,而脱氢酶活性不受影响。Garampalli 等^[22]用 3 种不同剂量的粉煤灰改良土壤,发现作物根部生物量有显著的增强。此外,在土壤中施入粉煤灰能够降低土壤导水率,提高田间持水量^[23-26]。李广慧等^[27]用粉煤灰改良栗钙土的研究表明,粉煤灰、栗钙土的饱和导水率分别为 1.15×10^{-4} 、 3.84×10^{-5} cm/s,把粉煤灰加入到土壤中可以起到提高土壤含水量和减少地表径流的作用。农业部提出,针对砂姜黑土“旱、涝、僵、瘦”等问题,可采用掺粉煤灰等措施改善土壤性状,提高土壤保水保肥能力^[28]。魏俊岭等^[29]研究表明,在砂姜黑土中施入粉煤灰可提高土壤有机质含量,增加土壤孔隙度,提高土壤水分稳渗速率,为土壤水分入渗性能提升提供理论依据。赵亮等^[30]通过大量的土柱积水入渗试验发现,在沙质土壤中施入粉煤灰可以有效地减小土壤入渗能力,增强沙土持水性,粉煤灰土壤改良层中含水率较沙土有明显提高,有效水分滞留时间显著增加。

2.2 粉煤灰对作物生长发育的影响

粉煤灰中含有农作物生长所需的钙、镁、锌、锰、硼等营养元素^[5, 31],可以提高种子发芽率^[32],提高农作物对养分的吸收率,增加对病虫害的抗性^[33],对植株特别是幼苗有保护作用,可防止小麦锈病及果树黄叶病等^[34],进而提高作物产量^[24, 35]。研究表明^[36-37],粉煤灰可以代替肥料为土壤提供微量元素,在土壤中施入粉煤灰能促进作物对铜、锌、锰等微量元素的吸收,促进作物增长,提高作物产量。郑学博等^[38]在沿淮砂姜黑土上施用粉煤灰种植小麦和玉米,分别较常规施肥增产 1.6% 和 14.4%。吴家华等^[19]试验证实,黏质土壤上施用适量粉煤灰对小麦、玉米、水稻等作物都有显著的增产效果。Yunusaa 等^[25]在温室大棚施用粉煤灰,发现粉煤灰可以加快油菜早期生长发育,提高油菜籽产量。Mitra 等^[39]认为粉煤灰与有机废弃物形成的完整植物养分供应系统,可安全有效地提高酸性土壤作物产量以及植物对养分的吸收。Pathan 等^[40]证实,植物的有效含水量随着粉煤灰的加入而逐渐增加。Garg 等^[13]发现,施用粉煤灰的土壤与未

施入粉煤灰土壤相比,小麦叶片面积明显增大,根长密度以及小麦产量增加。Mohan^[41]通过研究发现,在土壤中施加 20% 的粉煤灰后,麻风树叶绿素含量增加,进而提高光合速率。Khan 等^[42]在施入粉煤灰的土壤种植番茄,结果表明添加粉煤灰后番茄植株叶子生长旺盛,产量显著增加。刘山林^[43]在排土场农业复垦中,施用粉煤灰改良土壤并进行田间试验结果表明,施加粉煤灰后谷子的株高增长,且粉煤灰施用量越大,每穗颗粒数越多,亩产量越高。粉煤灰、农家肥、化肥同时施入土壤中,其改善土壤肥力和农作物生长状况效果更为明显。

3 粉煤灰衍生肥的农业生产效应

3.1 粉煤灰复合肥的肥效

由于粉煤灰是矿物质燃烧的直接产物,富含矿物质元素,可替代部分肥料的添加剂,能得到一种很好的复合肥,增产效果好,价格便宜。目前在发达国家已得到广泛的应用^[40, 44-45],例如,美国利用粉煤灰制作硫肥、硼肥,日本将粉煤灰作硅酸质肥料,澳大利亚利用粉煤灰制作镁肥^[11]。粉煤灰本身含有多种植物可利用的营养成分,其中 SiO₂ 含量很高,利用粉煤灰生产硅肥可以为水稻、花生、玉米等喜硅作物生长提供所必需的物质。张凤刚和陈静^[46]利用燃煤电厂排放的粉煤灰制成增效硅肥,在水稻生长的不同时期施用,可弥补单一硅肥营养不足和一般化肥无硅的缺点,对提高水稻产量有明显效果。将粉煤灰作为硅肥施入土壤,可以有效提高土壤供硅能力,尤其在稻田,不仅能改善稻田硅素肥力情况,还能促进水稻对硅养分的吸收,从而提高水稻产量,改善水稻品质^[47]。电力中央研究所开发了添加粉煤灰(10%)的蔬菜栽培化肥,试验证明,施用粉煤灰化肥后圆白菜和萝卜的产量增加 10% ~ 15%,土豆和山药的产量增加 7% ~ 8%,蔬菜类保鲜期和块茎类甜度也有所增加^[33]。

粉煤灰具有较强的吸附作用,利用其吸附性,可直接将氮、磷、钾等肥料和粉煤灰按所需比例进行混合、造粒、干燥,配制成粉煤灰复混肥^[48]。王海辉等^[49]施用粉煤灰多元复混肥种植水稻,结果表明粉煤灰多元复混肥能增加土壤养分,为水稻提供所需的多种营养元素,促进水稻生长发育,提高水稻产量及经济效益。孙克刚等^[50]证实,用混料法生产的粉煤灰复混肥使氮磷钾利用率提高,流失率减小。全卓仁^[51]利用粉煤灰多元复混肥在大田小区试种水稻,发现粉煤灰多元复混肥对作物植株性状的生长优势明显优于常规施肥法,比常规施肥法增产 19.1%。赵青等^[52]研究

表明,粉煤灰多元复混肥可以提高土壤有效养分含量,有利于花生的生长发育,提高产量。杜慧玲等^[53]在供试土壤上种植小麦,结果表明粉煤灰配合施用硝酸磷肥和氮肥,显著增加了各种微生物的数量,提高了土壤中酶的活性。邱现奎等^[54]以粉煤灰为包膜材料对普通肥料进行包膜后进行农田施用,发现施用粉煤灰包膜缓释肥可以降低大白菜功能叶的 HCO_3^- -N 含量,一定程度降低有机酸含量,提高了收获期大白菜球叶中可溶性糖和维生素 C 的含量。

3.2 粉煤灰磁化肥的肥效

土壤中大多数细菌具有趋磁性,磁场可以改变某些细菌酶的结构和活性^[55]。粉煤灰含有一定量的易磁化物质,粉煤灰磁化率为 $(308 \sim 385) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ^[56],这些磁质经磁化后成为磁化肥,将使粉煤灰肥效增强,减少施肥量^[57],有效地改善、调节土壤和农作物的磁环境,促进土壤中各种养分的形成和农作物的吸收,提高作物产量^[58-59]。研究表明,施用粉煤灰磁化肥可以改善土壤团粒结构,提供作物需要的微量元素。由于磁化粉煤灰具有剩磁衰减时间,因此对当季作物和后续作物都能起到增产作用^[60]。张玉昌等^[61]施用粉煤灰磁化肥与等养分非磁化肥相比,作物增产 5%~35%,氮利用率提高 5%,磷利用率提高 2.7%。孙克刚等^[62]通过对杂交油菜施用粉煤灰磁化复混肥的试验研究,初步证明了粉煤灰磁化复混肥较同等氮、磷、钾的复混肥、未磁化粉煤灰复合肥以及当地群众习惯施肥,具有显著增产效果。孙联合等^[63]在砂姜黑土区施用粉煤灰磁化肥种植小麦的增产效应试验中发现,施用粉煤灰磁化肥可以促进小麦生长发育,增加有效分蘖,提高成穗数,增加穗粒数,提高千粒重。

4 粉煤灰农业资源化利用的风险

多数关于粉煤灰中重金属污染问题的研究认为,适量施用粉煤灰不会造成土壤重金属污染,粉煤灰对重金属有钝化作用^[64-65]。粉煤灰中含有对重金属具有专性吸附作用的铝(Al)、硅(Si)、铁(Fe)、锰(Mn)等氧化物,可以增加土壤对重金属的专性吸附^[66]。王显茂^[67]通过蔬菜试验发现,施用 0~12% 范围内的粉煤灰,不产生植株毒害症状。朱学红等^[68]测定粉煤灰中重金属元素在作物中的富集情况,结果表明每平方米土地施用 60 kg 粉煤灰,作物器官中重金属含量远远低于国家粮食卫生标准规定值。孙子武等^[69]在砂姜黑土中每亩施用 40 t 粉煤灰对小麦玉米进行轮作,发现小麦、玉米等作物体内的铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr)、砷(As)、汞(Hg)等有毒元素与对照田相比差异不明显,土壤中这 5 种元素的含量与粉煤灰施用量

的相关性不显著,没有出现富集或异常,且均低于土壤环境质量标准。吴家华等^[70]对施入粉煤灰后的石灰性黏质土壤及粮食中的镉、铬、铅、砷、汞的含量进行初步评价,认为每公顷土地施用不超过 60 万 kg 的粉煤灰不会造成土壤、粮食污染。李念等^[71]运用粉煤灰化学改良工程手段对潼关县某村庄散户冶炼黄金导致的重金属污染农田进行原位修复,结果表明经粉煤灰改良后,土壤铅、汞和镉有效态质量分数平均值分别降低 31.83%、28.57%、24.36%,表明粉煤灰对重金属铅、汞和镉有一定的钝化作用。由此可知,粉煤灰可减弱重金属的迁移能力。Kumar 等^[72]研究表明,施入 4% 的粉煤灰可以使水稻产量增高,并且不会给对土壤及作物带来金属污染。Houben 等^[73]进行的露天盆栽试验结果也表明,土壤中施加一定量的粉煤灰后,白羽扇豆含镉、铅的含量分别约为未施加粉煤灰土壤的 81% 和 61.5%,并认为这是由于粉煤灰的施入抑制了离子态重金属的活性,进而减弱了其生物有效性。

5 展望

尽管粉煤灰在农业方面的研究已经取得很大进展,但仍然存在问题需要深入探讨。前期研究结果主要建立在短期、控制变量单一或切入点比较单纯的基础上,粉煤灰长期施用是否会对土壤、环境及人类健康产生危害等后效研究不足,并缺乏对典型土壤的理化性质、微量元素的含量及变化规律的系统研究。

粉煤灰的综合利用,已成为我国经济建设中国一项重要技术经济政策,是解决我国化石能源污染及资源缺乏的重要辅助手段。但任何事物均有两面性,如何充分提高粉煤灰在农业上的使用优势,降低其潜在毒性,是当前亟需解决的关键问题。

参考文献:

- [1] 吴元锋, 仪桂云, 刘全润, 等. 粉煤灰综合利用现状[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(6): 100-104
- [2] 孙淑静, 刘学敏. 我国粉煤灰资源化利用现状、问题及对策分析[J]. 粉煤灰综合利用, 2015(3): 45-48
- [3] Yao Z T, Ji X S, Sarker P K, et al. A comprehensive review on the applications of coal fly ash[J]. Earth-Science Reviews, 2015, 141(141): 105-121
- [4] 华明, 黄顺生, 廖启林, 等. 粉煤灰堆场附近农田土壤硒环境污染评价[J]. 土壤, 2009, 41(6): 880-885
- [5] 李方文, 魏先勋. 粉煤灰在环境工程中的应用[J]. 污染防治技术, 2002(3): 27-29
- [6] 欧阳小琴, 夏为民, 熊亮. 粉煤灰资源综合利用的现状[J]. 能源研究与管理, 2002(4): 24-26
- [7] Blissett R S, Rowson N A. A review of the multi-component utilisation of coal fly ash[J]. Fuel, 2012, 97(7): 1-23

- [8] 茅沈栋, 李镇, 方莹. 粉煤灰资源化利用的研究现状[J]. 混凝土, 2011(7): 82–84
- [9] 毛景东, 杨国治. 粉煤灰资源的农业利用[J]. 生态与农村环境学报, 1994, 10(3): 73–75
- [10] 汪海珍. 粉煤灰对土壤和作物生长的影响[J]. 土壤与环境, 1999(4): 305–308
- [11] 王兆锋, 冯永军, 张蕾娜. 粉煤灰农业利用对作物影响的研究进展[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2003, 34(1): 152–156
- [12] 杨尽. 利用矿物改良土地整理新增耕地贫瘠土壤研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010
- [13] Garg R N, Pathak H, Das D K, et al. Use of flyash and biogas slurry for improving wheat yield and physical properties of soil[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2005, 107(1/2/3): 1–9
- [14] 徐仁扣. 酸化红壤的修复原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 126
- [15] 焦有. 粉煤灰的特性及其农业利用[J]. 农业环境与发展, 1998(1): 23–26
- [16] 赵挺洁, 白耀东. 粉煤灰在改良土壤中的应用研究[J]. 北方环境, 2011(11): 139–140
- [17] Adriano D C, Weber J T. Influence of fly ash on soil physical properties and turfgrass establishment[J]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30(2): 596–601
- [18] 郑海金, 曾峰海, 欧立业. 粉煤灰对土壤性质和草坪生长的影响[J]. 土壤, 2005, 37(2): 205–209
- [19] 吴家华, 刘宝山, 董云中, 等. 粉煤灰改土效应研究[J]. 土壤学报, 1995(3): 334–340
- [20] Sarangi P K, Mahakur D, Mishra P C. Soil biochemical activity and growth response of rice *Oryza sativa* in flyash amended soil [J]. Bioresource Technology, 2001, 76(3): 199–205
- [21] Roy G, Joy V C. Dose-related effect of fly ash on edaphic properties in laterite cropland soil[J]. Ecotoxicology & Environmental Safety, 2011, 74(4): 769–775
- [22] Garampalli R H, Deene S, Reddy C N. Infectivity and efficacy of *Glomus aggregatum* and growth response of *Cajanus cajan* (L.) Mill sp. in flyash amended sterile soil[J]. Journal of Environmental Biology, 2005, 26(4): 705–708
- [23] Kalra N, Harit R C, Sharma S K. Effect of flyash incorporation on soil properties of texturally variant soils[J]. Bioresource Technology, 2000, 75(1): 91–93
- [24] Sharma S K, Kalra N, Singh G R. Soil physical and chemical properties as influenced by flyash addition in soil and yield of wheat[J]. Journal of Scientific & Industrial Research, 2002, 61(8): 617–620
- [25] Yunusaa I A M, Eamusa D, Desilvaa D L, et al. Fly-ash: An exploitable resource for management of Australian agricultural soils[J]. Fuel, 2006, 85(16): 2337–2344
- [26] Parab N, Sinha S, Mishra S. Coal fly ash amendment in acidic field: Effect on soil microbial activity and onion yield[J]. Applied Soil Ecology, 2015, 96: 211–216
- [27] 李广慧, 许虹, 邵伟, 等. 粉煤灰改良栗钙土物理性质的实验研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(6): 113–115
- [28] 中华人民共和国农业部. 农业部关于大力开展粮食绿色增产模式攻关的意见[EB/OL]. 2015-02-04 http://www.moa.gov.cn/zwl/m/tzgg/tz/201502/t20150210_4402974.htm
- [29] 魏俊岭, 金友前, 郜红建, 等. 施肥措施对砂姜黑土水分入渗性能的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014(8): 965–971
- [30] 赵亮, 唐泽军, 刘芳. 粉煤灰改良沙质土壤水分物理性质的室内试验[J]. 环境科学学报, 2009, 29(9): 1951–1957
- [31] Adriano D C, Weber J, Bolan N S, et al. Effects of high rates of coal fly ash on soil, turfgrass, and groundwater quality[J]. Water Air & Soil Pollution, 2002, 139(139): 365–385
- [32] Mahale N K, Patil S D, Sarode D B, et al. Effect of fly ash as an admixture in agriculture and the study of heavy metal accumulation in wheat (*Triticum aestivum*), mung bean (*Vigna radiata*), and urad beans (*Vigna mungo*)[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2012, 51(5): 897–906
- [33] 黄定国, 王文华, 吴玉敏. 实用粉煤灰利用技术在日本的研发现状[J]. 煤炭加工与综合利用, 2006(3): 47–49
- [34] 李少辉, 赵澜, 包先成, 等. 粉煤灰的特性及其资源化综合利用[J]. 混凝土, 2010(4): 76–78
- [35] Basu M, Pande M, Bhadoria P B S, et al. Potential fly[J]. Progress in Natural Science, 2009(10): 1173–1186
- [36] Spark K M, Swift R S. Use of alkaline flyash-based products to amend acid soils: Plant growth response and nutrient uptake[J]. Soil Research, 2008, 46(7): 578–584
- [37] Kalra N, Jain M C, Joshi H C, et al. Flyash as a soil conditioner and fertilizer[J]. Bioresource Technology, 1998, 64(3): 163–167
- [38] 郑学博, 周静, 崔键, 等. 不同施肥措施对沿淮区麦—玉周年产量及氮素利用的影响[J]. 土壤, 2012, 44(3): 402–407
- [39] Mittra B N, Karmakar S, Swain D K, et al. Fly ash—A potential source of soil amendment and a component of integrated plant nutrient supply system[J]. Fuel, 2005, 84(11): 1447–1451
- [40] Pathan S M, Aylmore L A, Colmer T D. Properties of several fly ash materials in relation to use as soil amendments[J]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32(2): 687–693
- [41] Mohan S. Growth of biodiesel plant in flyash: A sustainable approach response of *Jatropha curcus*, a biodiesel plant in fly ash amended soil with respect to pigment content and photosynthetic rate[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 8(s1/2): 421–425
- [42] Khan M R, Khan M W. The effect of fly ash on plant growth and yield of tomato[J]. Environmental Pollution, 1996, 92(2): 105–111
- [43] 刘山林. 粉煤灰用于排土场农业复垦的试验研究[J]. 华北科技学院学报, 2014(11): 75–79
- [44] Bhattacharya S S, Chattopadhyay G N. Increasing bioavailability of phosphorus from fly ash through vermicomposting[J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31(6): 2116–2119
- [45] Schutter M E, Fuhrmann J J. Microbial responses to coal fly ash under field conditions[J]. Journal of Environmental Quality, 1999, 28(2): 648–652
- [46] 张凤刚, 陈静. 水稻施粉煤灰增效硅肥效果好[J]. 电力科技与环保, 1995, 11(2): 63–64

- [47] 王祎玮, 侯迎迎, 王祖伟. 粉煤灰在土壤改良和污染治理中的研究进展[J]. 资源节约与环保, 2014(10): 142-143
- [48] 何凤鸣, 张建平, 等. 粉煤灰肥料的研究及进展[J]. 粉煤灰综合利用, 1998(3): 39-42
- [49] 王海辉, 赵青, 李国桢, 等. 粉煤灰多元复混肥水稻配方研究[J]. 江西农业大学学报: 自然科学, 2002, 24(2): 196-199
- [50] 孙克刚, 杨占平, 李永胜, 等. 粉煤灰复合肥及粉煤灰磁化复合肥生产工艺研发[J]. 粉煤灰综合利用, 2002(3): 11-13
- [51] 金卓仁. 粉煤灰多元复混肥及增产效果[J]. 化肥工业, 1997, 24(1): 27-30
- [52] 赵青, 史力有, 李国桢, 等. 粉煤灰多元复混肥花生配方研究[J]. 江西农业大学学报: 自然科学, 2002, 24(2): 200-203
- [53] 杜慧玲, 李恋卿, 潘根兴, 等. 粉煤灰结合施肥对土壤微生物和酶活性的效应[J]. 土壤与环境, 2001, 10(1): 20-22
- [54] 邱现奎, 董元杰, 胡国庆, 等. 新型包膜缓释肥对大白菜生理特性、产量及品质的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 375-382
- [55] 刘莉, 杨尽, 苏小丽. 粉煤灰在土壤改良中的机理研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(31): 17512-17513
- [56] 董元杰, 史衍玺. 粉煤灰作土壤侵蚀的磁示踪剂研究初报[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 155-159
- [57] 武艳菊, 刘振学. 减轻环境压力利用粉煤灰生产肥料[J]. 磷肥与复肥, 2005, 20(2): 58-59
- [58] 何凤鸣, 张建平. 粉煤灰废料的研究及进展[J]. 粉煤灰综合利用, 1998(3): 39-42
- [59] 李贵宝, 焦有, 郭井水. 粉煤灰农业利用展望[J]. 粉煤灰综合利用, 1999(3): 48-52
- [60] 孙克刚, 宋江春. 大豆施用粉煤灰磁化肥增产肥效研究[J]. 大豆科学, 2000, 19(4): 381-385
- [61] 张玉昌, 邹宇超, 武志杰. 多元磁化肥的开发与生产[J]. 磷肥与复肥, 1999(2): 50-51
- [62] 孙克刚, 张学斌, 汪立刚, 等. 杂交油菜施用粉煤灰磁化肥的效应[J]. 土壤与环境, 2001, 10(3): 224-226
- [63] 孙联合, 郭中义, 孔子明. 砂姜黑土区小麦施用粉煤灰磁化复合肥增产效应研究. 现代农业科技, 2010(6): 284-286
- [64] 生骏, 陆文静, 王洪涛. 粉煤灰对污泥堆肥过程和土地施用后交换态重金属(Cu,Zn,Pb)的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1367-1371
- [65] 张鸿龄, 孙丽娜, 孙铁珩. 钝化污泥人工土壤熟化过程中重金属的潜在环境效应研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(4): 493-501
- [66] 郝双龙, 丁园, 余小芬, 等. 粉煤灰和石灰对突发性污染土壤中重金属化学形态的影响[J]. 广东农业科学, 2012, 39(3): 55-57
- [67] 王显茂. 粉煤灰资源化途径及效益分析[J]. 粉煤灰综合利用, 2006(3): 52-53
- [68] 朱学红, 赵若尘, 付素平. 粉煤灰在污泥制肥中的应用[J]. 中国资源综合利用, 2006, 24(8): 28-29
- [69] 张子武, 孙克刚, 孙克振, 等. 粉煤灰中重金属元素在小麦、玉米各器官的富集情况[J]. 河南农业科学, 2000, 29(3): 15-16
- [70] 吴家华, 董云中, 刘宝山, 等. 粉煤灰中有害元素对土壤、粮食影响的初步评价[J]. 土壤学报, 1995, 32(2): 194-201
- [71] 李念, 李荣华, 冯静, 等. 粉煤灰改良重金属污染农田的修复效果植物甄别[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 213-219
- [72] Kumar A, Sarkar A K, Singh R P, et al. Yield and trace metal levels in rice (*Oryza sativa*) as influenced by flyash, fertilizer and farmyard manure application[J]. Indian Journal of Agricultural Sciences, 1998, 68(9): 590-592
- [73] Houben D, Pircar J, Sonnet P. Heavy metal immobilization by cost-effective amendments in a contaminated soil: Effects on metal leaching and phytoavailability[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012, 123: 87-94

Effects of Flyash on Promoting Soil Properties and Fertility: A Review

JI Huihui¹, HUANG Mingli¹, HE Jian¹, YANG Fanchang¹, XU Rongchen²,
ZHANG Fengkui², YAN Dongyun^{1*}

(1 College of Environmental Science and Technology, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China;
2 Luhua Well Sunshine Ecotypic Fertilizer Co., Ltd., Tengzhou, Shandong 277527, China)

Abstract: The emission of flyash is in large quantity in China, how to use it reasonably in agricultural activities is significant to improve the comprehensive utilization of flyash. This paper reviewed the effects of flyash on improving soil structure and promoting crop growth and the effects of flyash-derived fertilizer on agricultural production, analyzed the risks in agricultural resource utilization of fly-ash, and pointed out the focuses of the future study on the utilization of flyash in agriculture.

Key words: Flyash; Ameliorate; Soil; Crop