

# 粉煤灰在生态修复中的应用与展望

王 勇 孙俊民 王沛玮 王茂月 李运改  
大唐同舟科技有限公司 北京 100043

**摘 要:** 随着各种资源的枯竭和技术的进步,作为一种常见的大宗工业废弃物,粉煤灰并非只是环境负担,它同时也是一种潜在的生态修复资源,粉煤灰在生态修复中具有巨大的潜力和价值。本文将探讨粉煤灰在生态修复领域的应用,并对未来相关技术和发展前景进行展望。

**关键词:** 粉煤灰; 生态修复; 应用; 展望

生态修复是指通过人为手段恢复、改善或重建受到破坏的生态系统,以恢复其原有的生态功能和结构。

生态修复的方法多种多样,应根据不同的生态系统类型和受损程度选择合适的修复方法,常见的修复方法包括<sup>[1-5]</sup>:

水体修复:包括生物修复、化学修复和物理修复等方法,如植物滤池、人工湿地和水体循环系统。

土壤改良和植被恢复:包括添加有机物质、土壤改良剂,促进土壤微生物活动,通过植被的重新种植和生长,恢复受损的植被覆盖,重建生态系统的结构和功能。

小流域及地形地貌修复:包括小流域充填、矿山生态修复和废弃矿坑的复垦,通过土地复绿、水土保持等措施,恢复待修复区域的生态环境。

## 一、粉煤灰在生态修复中的应用的理化性能

粉煤灰是一种人工火山灰质材料,其自身仅具有微弱的胶凝值,但当以粉状及有水存在时能在常温下与氢氧化钙反应形成具有胶凝性的化合物。粉煤灰性能具有较大的波动性,它不仅与煤种、煤源有关,同时亦取决于锅炉的类型、运行条件、收尘及排灰方式,因此,各电厂粉煤灰的性能不同。参考相关文献,粉煤灰理化性能如下:密度 $1.83\text{--}2.16\text{g/cm}^3$ ,容重 $0.57\text{--}0.85\text{g/cm}^3$ ,自然沉积后毛管孔隙度为 $60.1\%\text{--}68.8\%$ ,渗透速度为 $6.15\text{--}11.68\text{mm/min}$ ,比表面积 $1.36\text{--}3.21\text{cm}^2/\text{g}$ 。

综上所述,粉煤灰物理特性类似中沙土,其化学成分主要为 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,二者约占粉煤灰总量的70%以上,其它含量较高的还有Fe、Ca、Mg、K、Na等。粉煤灰由于是高温燃烧产物,缺乏有机质,但具有较好的渗透性能,粉煤灰颗粒组成、密度等方面类似粘性土、砂性土,粉煤灰特殊的理化特性决定其可作为一种生态修复的基

础材料。

## 1.粉煤灰在水体修复中的应用

粉煤灰在水体净化中可发挥重要作用。其主要作用包括物理吸附、化学沉淀等方面,对水体中的污染物质起到去除和净化的效果<sup>[6-11]</sup>。

### 2.物理吸附

粉煤灰的物理吸附作用主要是通过其多孔结构、表面电荷、静电吸引力、化学吸附等机制来吸附水体中的有机物和重金属离子。

多孔结构:粉煤灰具有多孔结构,这些孔道提供了大量的表面积,有利于污染物分子在其表面上吸附。

表面电荷:粉煤灰表面通常带有一定的电荷,这种电荷能够与水中带电的污染物相互作用,促进吸附过程。

静电吸引力:粉煤灰表面的电荷与水中带电的污染物之间存在静电吸引力,使得污染物向粉煤灰表面迁移并被吸附。

化学吸附:除了静电吸引力外,粉煤灰表面的一些活性位点还能够与污染物分子发生化学吸附,增强吸附效果。

孔隙大小:粉煤灰的孔隙大小对吸附效果有重要影响。合适的孔隙大小可以使污染物分子更容易进入孔隙内部并被吸附。

研究表明,粉煤灰可以作为吸附剂用于水体净化,粉煤灰中的细颗粒物具有较大的比表面积和孔隙结构,具有良好的吸附性能,可以吸附水体中的悬浮物、有机物质和重金属离子等污染物,将其固定在粉煤灰颗粒表面或孔隙中,从而达到净化水体的效果。吸附过程受pH值、粉煤灰用量和接触时间等因素的影响较大。随着pH值的增加,粉煤灰的吸附效果逐渐增强,在中性或碱性条

件下最佳。粉煤灰用量和接触时间对吸附效果也有显著影响,适当增加粉煤灰用量和接触时间可以提高吸附率。

### 3. 化学沉淀

粉煤灰在水体修复中的化学沉淀作用是通过吸附、化学沉淀、碱性调节和物理隔离等多种机制共同作用实现的。

**重金属离子吸附:**粉煤灰中含有大量的氧化铁、氢氧化铁等物质,具有较强的吸附能力。当粉煤灰与水中的重金属离子接触时,这些离子会被粉煤灰表面的活性位点吸附,从而使水体中的重金属离子浓度降低。

**化学沉淀:**粉煤灰中的氧化铁和氢氧化铁等物质可以与水中的部分重金属离子发生化学反应,形成难溶性的沉淀物。这些沉淀物会逐渐沉淀到水底,从而使水体中的重金属离子得到去除。

**碱性调节:**粉煤灰本身具有一定的碱性,可以对水体的pH值进行调节。适当调节水体的pH值可以促进重金属离子的沉淀和吸附。

**物理隔离:**粉煤灰颗粒在水中的存在会形成一种过滤层,阻止重金属离子的进一步扩散和迁移,从而实现了重金属离子的物理隔离效果。

粉煤灰中的化学成分可以与水体中的磷酸盐和重金属等污染物发生化学反应,形成沉淀物或沉淀复合物,将有机物质、重金属离子等污染物固定在沉淀物中,从而实现水体中污染物的沉降和去除。同物理吸附一样,化学沉淀效果受pH值、粉煤灰用量和接触时间等因素的影响较大。

## 二、粉煤灰在土壤改良和植被恢复中的应用

粉煤灰改良土壤主要是通过改良土壤结构、提供养分和肥力、微生物等方面进行。粉煤灰对植物生长的影响除上述原因外,主要体现在抑制土壤病害、增加抗逆性和促进生长发育等方面。

### 1. 改良土壤结构

粉煤灰可为土壤提供大量的细颗粒物和微量元素,改善土壤的PH等物理性能,从而提高土壤的水分保持能力等特性。粉煤灰改良土壤结构的主要作用和原理如下:

**提供细颗粒物:**粉煤灰含有大量的细颗粒物,可以填充土壤孔隙,增加土壤的密实度和孔隙度,改善土壤的质地和结构。细颗粒物的添加有助于土壤颗粒的紧密排列,增加土壤的比表面积和微孔容积,有利于土壤的气体交换和水分保持<sup>[12-18]</sup>。

**改善土壤通透性:**粉煤灰的添加可以改善土壤的通

透性和透气性,增加土壤的渗透性和排水性,防止土壤板结和积水,有利于根系生长和发育,提高土壤的耕作性和利用效率。

**调节土壤pH值:**粉煤灰中含有碱性成分,如氧化钙、氧化钾等,其添加可以中和土壤酸性,调节土壤的pH值,改善土壤的酸碱度,提供适宜的生长环境,促进植物的生长和发育。

### 2. 改善土壤养分

**提供养分:**粉煤灰中含有丰富的微量元素和有机物质,如硅、铁、锰、锌等微量元素,以及有机碳、氮、磷等有机物质。这些养分对植物生长发育具有重要作用,其添加可以增加土壤中的养分含量,为植物提供所需的营养物质,促进植物的生长和发育。

**改善土壤肥力:**粉煤灰中的有机物质和微量元素可以提高土壤的肥力,促进土壤微生物的活动和有机质的分解,增加土壤的肥力和生物活性。其添加可以改善土壤结构,增加土壤的肥力和保水保肥能力,提高土壤的耕作性和利用效率。

**减少土壤养分流失:**粉煤灰的添加可以改善土壤结构,增加土壤的肥力和保水保肥能力,减少土壤中养分的流失和淋洗,提高土壤的肥力和养分利用效率,为植物的生长和发育提供良好的生长环境。

### 3. 对微生物有益

粉煤灰对土壤微生物的影响主要包括改变微生物群落结构和多样性、增加微生物数量和活性、提高土壤微生物的代谢活性和酶活性、促进微生物与植物根系之间的共生关系等方面。

**生物多样性:**粉煤灰的添加可以改变土壤微生物的生境环境,对土壤微生物的群落结构和多样性产生影响。相关研究表明,粉煤灰的添加可能导致土壤微生物群落结构的变化,降低土壤微生物的多样性。

**微生物数量:**粉煤灰中的有机物质和微量元素对土壤微生物的生长和繁殖具有刺激作用,其添加可以增加土壤中微生物的数量和活性。研究表明,粉煤灰的添加有利于土壤中细菌和真菌的生长和繁殖。

**微生物活性:**粉煤灰中的有机物质和微量元素对土壤微生物的代谢活性和生理功能具有影响,其添加可以提高土壤中微生物的代谢活性和酶活性。研究表明,粉煤灰的添加可以促进土壤中蔗糖酶、脲酶等酶活性的提高,加速有机物质的分解和循环。

**促进共生关系:**粉煤灰的添加可以改善土壤微生物

的生存环境,促进土壤微生物与植物根系之间的共生关系,提高土壤微生物的生态功能。研究表明,粉煤灰的添加可以增加土壤中固氮细菌和磷酸解磷菌的数量和活性,促进氮、磷等养分的循环和转化。

#### 4.对植被恢复的积极作用和原理

抑制土壤病害:粉煤灰中的微生物和有机物质对土壤中的病原微生物具有一定的抑制作用,可以减少土壤中病原微生物的数量和活性,降低植物发生病害的风险,促进植物健康生长。

增加抗逆性:粉煤灰中的微量元素和有机物质可以提高植物的抗逆性,增强植物对干旱、盐碱、病虫害等不利环境的适应能力,保障植物正常的生长和发育。

促进生长发育:粉煤灰的添加可以促进植物的生长和发育,增加茎叶生物量和根系生长,加快植物的生长速度,提高植物的产量和品质。

综上所述,粉煤灰的适量合理应用可以改善土壤环境,提高植物的生长速度和产量,促进土壤生态系统的健康和稳定。

### 三、粉煤灰填充及在及在地形地貌生态修复中的应用

粉煤灰可以用作充填材料填充土地,填补空隙或不平整的地表,以达到平整地表、增加地基承载能力或改善地基稳定性的目的。另一方面,我国北方地区存在大量的矿坑及矿山沉降区、水土流失造成的沟壑、小流域的治理等地形地貌急需进行填充治理;南方地区尤其沿海地区的软土地基、滩涂等地质类型也需采用性能稳定的材料进行填充和改善。综上所述,采用粉煤灰作为充填原料进行地形地貌的修复,其意义体现在以下几个方面:

填充性:粉煤灰具有较小的颗粒大小和较好的流动性,可以填充各种形状和大小空隙,填平不平整的地表,使地表更加平整。

稳定性:粉煤灰经过干燥或固化后,可以形成稳定的充填层,能够承受一定的荷载和压力而不发生变形或沉降,从而增加地基的承载能力和稳定性。

环保性:粉煤灰是一种工业废弃物,利用粉煤灰作为充填材料可以有效减少废弃物的排放,具有环保和资源化利用的优势。

### 四、粉煤灰在生态修复中的未来发展趋势及展望

#### 1.多功能化应用

未来粉煤灰在生态修复领域的发展趋势之一是多功能化应用。除了传统的土壤改良剂和填料材料外,还将

探索其在植被恢复、水质改善、湿地保护等方面的应用,实现粉煤灰资源的最大化利用。

#### 2.生物多样性保护

未来粉煤灰在生态修复中的应用将更加注重生物多样性的保护和促进。针对不同生态系统的特点,开展粉煤灰在改善生物栖息地、提高物种多样性和保护濒危物种等方面的应用研究。

#### 3.环境友好性和安全性

未来粉煤灰在生态修复领域的发展趋势之一是提高其环境友好性和安全性。通过技术改进和工艺优化,减少粉煤灰中的有害成分,确保其在生态修复过程中对环境和人体健康的安全性。

#### 4.可持续发展

未来粉煤灰在生态修复中的应用将更加注重可持续发展原则。从资源利用、环境风险评估、生态系统适应性、社会参与与共享、长期监测与管理等方面综合考虑,实现生态修复项目的可持续发展和长期稳定。

#### 5.跨学科合作

未来粉煤灰在生态修复领域的发展将需要跨学科合作和综合研究。结合土壤学、植物学、生态学、环境科学等多个学科的知识和技术,共同探索粉煤灰在生态修复中的最佳应用方式和效果评估方法。

### 参考文献

- [1]冯江,王尾.环境生态学导论[M].北京:高等教育出版社,20025
- [2]杨京平,卢剑波.生态恢复工程技术[M].北京:化学工业出版社,2002
- [3]钱易,唐孝炎等.环境保护与可持续发展[M].北京:高等教育出版社,1999
- [4]郭怀成,尚金城,张天柱.环境规划学[M].北京:高等教育出版社,2001
- [5]功智先.生态学概论[M].济南:山东大学出版社,1989
- [6]郭新亮.燃煤电厂粉煤灰综合利用技术研究[D].西安:长安大学,2009
- [7]Panday KK, Prasad G, Singh VN.Copper(II) removal from aqueous solutions by fly ash[J].Water Res, 1985, 19(7):869-873
- [8]H é quet V, Ricou P, Lecuyer I, Le Cloirec P. Removal of Cu<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup> in aqueous solutions by sorption

onto mixed flyash[J].Fuel, 2001, 80(6):851-856

[9]Alinnor IJ.Adsorption of heavy metal ions from aqueous solu-tion by fly ash[J].Fuel, 2007, 86(5-6):853-857

[10]Mohan S, GandhimathiR.Removal of heavy metal ions frommunicipal solid waste leachate using coal fly ash as an adsor-bent[J].J Hazard Mater, 2009, 169(1-3):351-359

[11]Itskos G, Koukouzas N, Vasilatos C, Megremi I, Moutsat-sou A.Comparative uptake study of toxic elements from a-queous media by the different particlesize-fractions of fly ash[J].J Hazard Mater, 2010, 183(1-3):787-792

[12]郭连杰.日本煤炭灰渣综合利用简介[J].粉煤灰综合利用, 1997(3): 105

[13]肖利, 梁天任.日本粉煤灰利用的研究与开发[J].粉煤灰动态, 1996(1): 39

[14]宋晓红.日本粉煤灰利用简述[J].粉煤灰综合利

用, 1994(4): 74

[15]Ghodrati M, Sims.J.T. Enhancing the Benefits of Fly Ash as a Soil Amendment by Pre -leaching[J].Soil Science,1995,159(4):244-252

[16]Hongling Zhang, Lina Sun, Tieheng Sun, Guofeng Ma. Principal Physicochemical Properties of Artificial Soil Composed of Fly Ash, Sewage Sludge and Mine Tailing[J]. Bull Environ Contam Toxicol,2007,79:562 - 565

[17]Gorman, J. M., Sencindiver, J. C., Horvath, D. J., Singh, R. N., & Keefer, R. F. Erodibility of fly ash used as a topsoil substitute in mine land reclamation[J]. Journal of Environmental Quality, 2000,29:805 - 811

[18]Mitra, B. N., Karmakar, S., Swain, D. K., & Ghosh, B. C.(2005). Fly ash a potential source of soil amendment and a component of integrated plant nutrient