

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.08.018

低钾生物质灰肥用价值综述*

李廉明 余春江 秦建光 方梦祥 骆仲泱

(浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027)

【摘要】 在国内外相关研究的基础上,对木灰这类典型生物质灰的组成和物理、化学特性进行分析,并阐述了木灰作为肥料施用后对作物、土壤表层植被、土壤微生物群和环境各方面的影响。木灰的K含量不高,但是具有较高的pH值,对酸性土壤的改良作用很明显。pH值的提高可以改变土壤中微生物结构,促进微生物的活动,增加土壤肥力。同时,木灰还具有大量元素富集的特点,施用后会改变土壤中元素的构成,增加土壤中N、K等植物生长必需元素的可利用量,从而促进作物的生长。根据目前研究情况,木灰肥用不但实现了元素循环,而且一定程度上提高和改良了土壤特性。

关键词: 生物质 燃烧 木灰 土壤特性 肥用价值

中图分类号: TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)08-0081-09

Fertilization Value of Biomass Ash with Low Potassium

Li Lianming Yu Chunjiang Qin Jianguang Fang Mengxiang Luo Zhongyang

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract

The typical components and physical/chemical characteristics of the ash were introduced based on the relative research works carried out all around the world, as well as its influences on plants, upper soil layer vegetation, soil microbial population and environment after application. Generally, this kind of ash has low potassium content, but high pH value due to high Ca content. It's a good remedy for acid soil. The high pH value is also valuable for improving composition of soil microorganism, enhancing their activities and thereafter increasing the fertility of soil. Meanwhile, the ash is rich in certain elements, which are critical to modify the elements constitution of soil and increase the availability of N and K in usual situation. As far as current research is concerned, the fertilization of wood ash achieves element circle, improves soil characteristic to some degree.

Key words Biomass, Combustion, Wood ash, Soil characteristic, Fertilization value

引言

生物质作为一种清洁的可再生能源被广泛用于发电行业。特别是北欧和北美,生物质直接燃烧发电技术已经进入大规模推广阶段,生物质燃烧规模巨大,相应也产生了大量的灰^[1-2],这些生物质燃烧固体产物以木灰为主。

我国的生物质直燃发电正处于起步阶段。秸秆

是我国生物质的主体,由于秸秆富含K,燃烧后产生的秸秆灰可以作为钾肥利用,但是由于秸秆收获强烈的季节性以及秸秆作为燃料的特殊物理、化学性质,使得国内很多直燃电厂将秸秆与木质生物质燃料混合燃用。这种混烧往往会显著降低生物质灰的K含量,使其近似属于木灰的范畴。生物质直燃产生的灰量巨大,需要有合理的利用途径。无论在国内外还是国内,考虑到生物质燃烧利用过程的物质循

收稿日期: 2009-08-19 修回日期: 2009-09-18

* 国家“973”重点基础研究发展计划资助项目(2007CB210208)

作者简介: 李廉明, 博士生, 主要从事生物质直接燃烧研究, E-mail: lilianming@zju.edu.cn

通讯作者: 余春江, 副教授, 主要从事生物质热化学转化利用研究, E-mail: chunjiang@cmeec.zju.edu.cn

环和直燃产业的可持续发展,探讨这种 K 含量较低木灰类生物质燃烧固态产物在农林业上的可利用性有重大意义。

芬兰和瑞典在 20 世纪对灰在农林业方面的应用进行了研究,但是由于对灰中重金属的顾虑,并没有考虑其在农林业方面的大规模应用,而采用填埋处理方式^[2-3]。随着生物质发电的发展,木灰的产量不断增加,运输成本和填埋场地的需求持续增加。同时迫于填埋处理在环保方面的压力,人们开始重新考虑木灰在农业和林业方面的应用。目前比较一致的结论认为木灰施用于土壤后不仅具有石灰效应,而且能够在一定程度上补充土壤养分。

本文在国内外相关研究的基础上,对木灰这类低钾生物质燃烧固态产物的组成和物理、化学特性进行论述,并详细阐述木灰作为肥料施用后对作物、土壤表层植被、土壤微生物群和环境的各方面影响。

1 木灰的特性

木灰的特性受以下几方面因素影响:燃料种类和产地、燃烧器种类、燃烧温度、燃料混合配比情况以及灰的收集存储方法等^[2-3]。由于在生物质燃烧过程中这些因素会频繁变化,直接导致灰特性差异巨大,往往难以找到具有普遍意义的灰特性数据。

1.1 物理特性

木灰通常呈粉末状。Etiengil L 等^[4]在某燃烧条件下测得木灰典型颗粒平均直径为 0.23 mm; Demeyer A 等^[2]发现造纸厂污泥灰的颗粒分布是: 8.98% 大于 2 mm, 25.1% 大于 0.50 mm, 34.3% 大于 0.25 mm, 47.3% 大于 0.106 mm。根据 USDA/FAO 标准,颗粒大小的分布涉及到了从粗砂到粘土的颗粒粒径。容积密度从纯木灰的 0.27 g/cm³ 到造纸厂废物灰的 0.51 g/cm³ 各不相同^[2]。

对于采用循环流化床燃烧的场所,由于固体颗粒的循环燃烧,产生的飞灰颗粒较细,平均粒径是 0.06 ~ 0.07 mm。

1.2 矿物学特性

灰的矿物学特性影响灰的淋溶特性。木灰是一

种复杂混合物, Etiengil L 等^[4]通过扫描电子显微镜发现木灰中含有多孔炭粒和不规则形状的无机颗粒。其中某些无机颗粒遇水膨胀之后能够生成稳定的晶体结构,这种结构在干燥后也不收缩^[4]。Etiengil L 等^[4]通过 XRD 分析揭示木灰中主要化合物是 CaCO₃, Demeyer A 等^[2]认为是燃料中 Ca²⁺ 矿化后产生的 CaO 与空气中 CO₂ 反应的结果。Steenari B M 等^[5]则指出 Ca 的化合物可能具有多种形式,既有 CaO、Ca(OH)₂, 也有 CaCO₃、硅酸钙和硅酸铝钙。一般认为燃烧温度在 1 000 ~ 1 200℃ 的层燃炉中生成硅酸钙,这些硅可能是燃料中的土壤和砂石带入的;而燃烧温度在 850℃ 左右的流化床锅炉中,硅酸钙的生成量很小^[5-6]。

同时, Steenari B M 等^[5-6]研究指出 K 和 Na 的存在形式是易溶于水的盐类,氯化物和硫酸盐,同时也有部分以难溶于水的长石(硅酸铝盐)形式存在。长石的形成同样与燃料中的土壤和砂石有关^[5]。XRD 分析显示磷的存在形式是磷灰石和其他磷酸钙盐^[6]。磷酸钙盐可能是燃烧过程产生的,也可能是灰的稳定过程中产生的^[5]。

Cox M 等^[7]认为在某些燃烧组织条件下由于受到床料影响,木灰还会含有大约 10% 的石英。

1.3 化学特性

1.3.1 碱度

木灰中有较高含量的碱性物质,这就导致了木灰具有较高的碱度。Steenari B M 等^[6]对在芬兰和瑞典采集的木灰样品的主要成分进行了分析统计,如表 1 所示。从表中可以发现, Ca、K、Na 是木灰的主要成分,也正是这些碱性物质使得木灰具有了较高的碱度。同时也发现,虽然碱性物质占主要地位,但是其含量的最大值和最小值之间差距很大,即燃料品种会在很大程度上影响灰的碱度。另外, Demeyer A 等^[2]指出木灰的碱度还受到燃烧温度和存放时间影响,燃烧温度越高和存放时间越长,木灰的碱度就越低。Etiengil L 等^[4]认为这是因为在燃烧温度较低时,灰中的主要成分是碳酸盐和重碳酸盐;燃烧温度达到 1 000℃ 以上时,氧化物则是灰中

表 1 芬兰和瑞典燃烧设备得到的灰主要成分质量分数^[6]

Tab. 1 Major elements mass fraction in wood fuel ashes from combustion units in Sweden and Finland^[6] %

成分	Ca	Mg	K	P	Na	Al	Fe	Mn	Si	S
中间值	17	1.9	4.2	0.9	0.7	1.4	1	1.2	7.6	0.5
最小值	1.4	0	0.7	0.1	0.1	0	0	0.2	0.2	0
最大值	54.9	6.7	15	2.7	3.6	6.8	9.5	2.8	31	6.5
取样序号	156	154	156	155	129	128	147	146	127	121

主要成分。而较长的存放时间会使氧化物与空气中的 H_2O 和 CO_2 反应最终生成碳酸盐。

1.3.2 元素组成

从表 1 中可以看出, Ca 和 Si 是木灰中的主导元素。木灰最主要的特点就是较高的 Ca 含量, 而 Si 的来源根据燃烧条件不同而不同: 流化床锅炉中是由于混入床料 Si 影响到了灰中的 Si 含量; 在层燃炉的灰中 Si 则更多是受到燃料中的土壤和砂石杂质的影响^[5]。余春江等^[8]认为高温条件下生物质原料中几乎所有的 Ca 都不会挥发, 而且形成的化合物具有较高的稳定性, 因此能够在灰中找到原料带入的所有 Ca; Si 是惰性元素, 不具挥发性, 原料中的 Si 经过高温后几乎全部在残留物质中。米铁等^[9]也认为 Ca 在灰渣中的固留率较高。李学恒等^[10]研究发现木灰中含 Ca 较多, 是主要元素。张军等^[11]对低钾生物质研究发现 Ca 和 Si 是灰中主导元素。

Demeyer A^[2]、Nieminen M 等^[12]认为由于 C 和 N 在燃烧过程中都可以被氧化并转化为气态, 所以在灰中不存在或者可忽略, 当然不完全燃烧可能导致 C 和 N 的存在, 特别是 C 的残留量。余春江等^[8]也认为 N 在高温下不稳定, 主要以 N_2 或者 NO_x 为主要形式进入气相, 并且对碱金属元素的析出似乎没有直接影响。

由于作物生长吸收大量 K 元素, 一般来说, 木灰中的 K 要比大多数煤灰高。如前所述, 木灰中 K 有易溶于水的形式, 也有难溶于水的形式。溶于水的部分可被作物再次利用, Steenari B M 等^[5]研究发现不同原料中这部分 K 占木灰中 K 总含量的差异很大, 可以从 6% 到 95%。造成的原因可能是燃料种类差别、测量方法的差别以及外部杂质带入含 K 的方石等。米铁等^[9]认为燃烧温度的不同也是造成差异的原因。

余春江等^[8]认为 S 的存在形式主要是各种硫酸盐。P 的存在形式是磷灰石和其他磷酸钙盐^[6], 因此木灰中 P 主要是以难溶于水的形式存在。

同时, 木灰中还含有许多微量元素, 比如 Mg、Zn、Cu、B 等。这些元素都是作物必需的营养元素, 但是含量太高时都会对作物造成伤害^[7]。

木灰中作物非必需元素的含量受到燃料产地、土壤状况等其他因素的影响也很大, Demeyer A 等^[2]研究发现由于经过高温燃烧, 一般来说每千克木灰中的 Se 和 Hg 的含量很低 ($< 0.5 \text{ mg}$), Cd 和 Co 含量相对较低 ($< 10 \text{ mg}$), 而 As、Ni、Cr 和 Pb 的含量较高一些, 例如典型的 As 含量达到 23.2 mg 以及典型的 Pb 含量为 65 mg 。

2 灰的预处理

燃烧工艺产生的干燥而没有经过处理的灰如果直接施用, 除了给土壤带来较多的盐类和较高碱度影响外, 粉尘也是一个不可忽略的问题^[1]。且未经处理的灰可能具有较高的腐蚀性^[1]。所以无论从灰的安全利用方面考虑, 还是从环保方面考虑, 灰的预处理非常必要。

2.1 预处理的方法

Maria Zevenhoven^[1]指出目前对木灰的预处理方法主要有以下几种。

(1) 自硬化方法是最简单易行的方法。这种方法是将灰堆在一个较大的空间里, 加湿并压紧, 数周之后即能达到施用要求。

(2) 灰加湿以后也可以通过轮鼓做成颗粒状。这种方法机械化程度较高, 产品质量好, 但是成本高。

(3) 施加压力使灰通过模子做成球状, 灰球质量很好。此方法对含碳量没有要求, 而前两种方法要求含碳量在 10% 以下。但是其成本过高, 违背了灰利用的初衷。

(4) 最近, 瑞典 ETC 还研究出一种热处理灰的方法, 这种方法可以同时脱出有机物化合物和分离重金属, 并且能够控制灰球的过滤特性^[1]。

2.2 预处理对灰特性的影响

由于灰的预处理要加水, 这样就可能造成某些元素的淋溶。淋溶率是预处理时必须关注的指标。

未处理的灰加水后, CaO 与水反应生成 $Ca(OH)_2$, $Ca(OH)_2$ 又与空气中的 CO_2 反应生成更为稳定的 $CaCO_3$ 。经过这两个变化后, Ca 的溶解率降低了, 灰变得更加稳定。这个过程对灰的利用来说非常重要, 因为它使灰的石灰石效应时间延长了。Steenari B M 等^[5]认为这样能够避免高 pH 值带来的不良反应, 而且在某些灰中, 预处理过程中能形成钙矾石, 这会减少 Ca 和 S 的溶解率, 更提高了灰的稳定性。

K 的化合物特性及其在灰中的存在形式决定了淋溶率较高的特性。对于流化床来说, 灰中 K 的淋溶率在 6% ~ 52% 范围内, 造成差异的原因可能是 K 存在形式的不同。Steenari B M 等^[5]针对层燃炉进行研究, 发现未处理灰中 K 的淋溶率在 10% ~ 40% 范围内, 认为这是由于 K 的熔点低, 容易富集在飞灰中, 而底灰中大多是不可溶形式的 K, 这是底灰中的 K 比飞灰与底灰的混合物中的 K 有更低的淋溶率的主要原因。米铁等^[9]研究发现松木灰在温度从 600°C 升到 800°C 时出现了钾长石。虽然降低了 K 的淋溶率, 但是同时也降低了有效 K 的含

量。

Mg 和 P 两种重要的作物营养元素在这个过程中,淋溶的并不多。Steenari B M 等^[5]认为这是由于 Mg 在灰中的主要形式是 MgO 和 MgSiO₃。Mg 和 P 不易溶于水的存在形式决定了它较低的淋溶率。

Zn 和 Cu 的淋溶率也比较低,为 0.1% ~ 4%; Fe 和 Mn 的淋溶率更低,为 0.01% ~ 0.05%。Steenari B M 等^[5]指出这是由于这两种元素在高 pH 值水溶液时更倾向于形成溶解率很低的氢氧化物。

对于重金属元素,淋溶率越高越好。但是 Steenari B M 等^[5]研究发现,一般来说 Pb、Cd 和 Hg 的淋溶率都很低: Cd 为 0 ~ 0.005 mg/L, Pb 为 0 ~ 0.010 mg/L 以及 Hg 为 0 ~ 60 ng/L。如果由于特殊情况这些元素能在灰中以水溶形式存在,那么淋溶率也会有相应提高。

3 木灰施用后的影响

木灰作为一种高碱性、元素高度富集的物质,施用后,必然会对土壤特性、土壤微生物群落以及作物的生长产生较大影响。

3.1 对土壤物理化学特性的影响

3.1.1 对物理特性的影响

有关木灰对土壤物理特性影响的文献较少。Demeyer A 等^[2]研究发现木灰施用后对土壤团粒结构,透气保湿性都有很大影响。由于木灰呈很细的粉末状,所以施用后可能会改变土壤的团粒结构。Etiengnil 等^[4]认为木灰中的无机物质颗粒遇水之后膨胀,可能会堵塞土壤空隙,降低土壤的透气能力,但是可以增加土壤的蓄水能力。Demeyer A 等^[2]指出随着木灰施用量增加,土壤溶液导电性增加,这是灰中可溶性盐溶解的缘故。当然,木灰不恰当施用也可能引起土壤盐碱化。

3.1.2 对化学特性的影响

与木灰对土壤物理特性的影响相比,土壤化学特性改变更多,所以大多数研究都是关注木灰对土壤化学特性的影响。林桢良^[13]认为木灰的施用是对养分元素的再分配,能够补充除 N 外所有的养分元素。木灰的高碱性和高度的元素富集,使得它能够成为改良酸性土壤的材料,并能够提供作物生长所需要的元素。在瑞典、芬兰等北欧国家,已经把木灰作为一种修复肥料施用在森林中,用来弥补和减轻由于森林不断砍伐造成的元素流失和土壤酸化。

大多数学者认为木灰施用后能够明显提升酸性土壤的 pH 值^[14-53],具有很强的中和作用。Saarsalmi A 等^[18,36]指出这种强烈的中和作用依赖于 Ca、Mg 和 K 的氧化物、氢氧化物和碳酸盐。

Demeyer A 等^[2]指出对于 pH 值比较低的酸性土壤以及有机物质含量低的土壤,施用木灰后 pH 值增长得更高一些。研究表明,在改良土壤方面,木灰要比石灰对土壤的作用快,并且会导致 pH 值急剧增长,但是持续的时间比较短。Demeyer A 等^[2]认为这主要是由于土壤中 K 和 Na 的氧化物、氢氧化物和碳酸盐造成的,这些化合物是水溶性的,在土壤中存在的时间不会太长。但是 Saarsalmi A 等^[18]研究表明木灰对土壤 pH 值的提升作用可以持续至少 16 年,这主要是由于木灰中存在长石的缘故。长石难溶于水,但是在土壤中可以缓慢分解风化,为土壤表层提供适度的碱性。可以说,由于易溶于水的物质和难溶于水的物质共同存在,木灰对土壤 pH 值影响既有短期效应也有长期效果,但总体是随着时间递减。另外,木灰对土壤的影响还与颗粒大小有关。Demeyer A 等^[2]、Holmberg S L 等^[29]、Kuba T 等^[41]都认为小灰粒比大灰粒影响更快。未处理的比处理过的木灰作用更加强烈,这是因为在处理过程中具有强烈反应能力的易溶于水的物质可能被淋溶。

木灰中通常只含有很少的 C 和 N,但是施用后会导致土壤有机碳溶解能力和硝化作用率增大。虽然也有实验表明,木灰施用 10 d 后,土壤中可利用 N 就开始呈现减少趋势,Mandre M 等^[14]认为这是由于木灰施用后引起矿化过程或者硝化过程变化所导致,而且这个影响是短期的。同时 Saarsalmi A^[36]、Pärn 等^[49]研究发现,虽然木灰中不含 N,但是它可以促进土壤中有机 N 的矿化,这样就增加了土壤中植物生长可利用 N 的含量。

实验表明木灰对土壤元素的影响是随着土壤深度的增加而递减的,同时也受到木灰施用量和木灰种类的影响。木灰中含有丰富的 K、Ca、Mg,施用后能增加土壤中这 3 种元素的含量^[2,14,16,18,27,36,37,49]。Parka B B 等^[37]认为 K 是在土壤所有深度都受木灰影响的元素,在施用量为 20 t/hm² 的情况下,0 ~ 10 cm 土壤层中 K 的含量是原来的两倍多,10 ~ 20 cm 中 K 含量增加的要少一些。李学恒等^[10]研究发现木灰中含 K 较多可以制作肥料。

Saarsalmi A 等^[18]认为木灰施用后,明显增加了土壤腐殖质层中 Ca 和 Mg 的总体含量及其水溶性物质含量。土壤中 Ca 的含量大幅提高。Park B B 等^[37]研究发现在 0 ~ 10 cm 土壤层中,Ca 含量随着木灰施用量明显增加。Saarsalmi A 等^[18]实验表明,施用未处理木灰(3 t/hm²)7 年后,Ca 含量是原来的 5 倍,16 年后,Ca 含量是原来的 4 倍。Voundi Nkana J C 等^[16]研究发现 Ca 含量的增加有助于增加 pH

值并增强 Al^{3+} 的中和作用,这对于作物生长有利。

木灰施用后土壤中 Mg 的富集状况和 Ca 相似, Saarsalmi A 等^[18]研究发现在 16 年后土壤中 Mg 含量仍然高于施用前,但是 Parka B B 等^[37]研究表明 Mg 含量增加只发生在 0 ~ 10 cm 土壤层中。同时 Mandre M 等^[14]研究发现在施用开始阶段,土壤中的 Mg 并不增加,在一年以后含量才会增长。

土壤中 P 大部分是以迟效性状态存在,因此土壤中全 P 含量并不能作为土壤 P 素供应的指标。全 P 的含量高并不意味着 P 素供应充足。木灰的加入能提高土壤全 P 含量,但是 Demeyer A 等^[2]认为由于木灰中 P 存在的形式都是难溶于水的,这导致木灰施用后土壤中可利用 P 的增加量小于 1%。Mandre M 等^[14]研究显示,在木灰施用一年后,土壤里的可利用 P 甚至有减少的趋势。这是因为在 pH 值大于 7 的时候,P 易与 $CaCO_3$ 和 $MgCO_3$ 发生反应导致 P 的有效性下降。

Kuba T 等^[41]发现木灰施用后,土壤中 Fe、Mn、Cu、Zn 的含量增加了,但是 Demeyer A^[2]、Voundi Nkana J C 等^[16]发现降低了 Fe、Mn、Cu、Zn 在土壤溶液中的水溶性和可利用性。Demeyer A 等^[2]认为这是土壤中 pH 值提高的缘故。杨丽娟等^[53]通过研究也发现木灰提高土壤 pH 值的同时,降低了 Fe、Mn、Cu、Zn 等微量元素的有效性。

木灰施用后土壤的有效离子交换容量(CEC)明显增强,Arvidsson H 等^[27]、Parka B B 等^[37]认为这种影响一般发生在 0 ~ 10 cm 土壤层中,也有发生在 1 ~ 20 cm 土壤层中的情况。有效离子交换容量的增强意味着能够被植物利用的离子增多。Arvidsson H 等^[27]研究还发现土壤的盐基饱和度(BS)在木灰施用后也提高了,特别是在 0 ~ 5 cm 土壤层。在 0 ~ 5 cm 土壤层,盐基饱和度提高 31% ~ 39%;在 5 ~ 10 cm 土壤层中,盐基饱和度提高 10% ~ 13%。Saarsalmi A 等^[18]发现在 16 年后,土壤的有效离子交换能力和盐基饱和度仍然在增长。盐基饱和度真正反映土壤有效(速效)养分含量,是改良土壤的重要依据之一。盐基饱和度越高,土壤有效养分含量越高,土壤呈中性、碱性;相反,盐基饱和度越低则说明土壤有效养分含量低,Al 离子含量较高,呈酸性。

另外,Voundi Nkana J C^[16]、Saarsalmi A 等^[18]研究发现木灰施用减少了土壤中可交换 Al 离子的存在。这就减少了 Al 离子对作物的毒害作用。

总之,木灰施用后对土壤化学特性影响持续时间较长。施用后,土壤中溶解有机碳、N、K、Ca、Mg 的可利用量明显增加;对 P 含量的影响不大;Fe、Mn、Cu、Zn 总量增加但是可被植物利用量减少;土

壤中可利用 Al 离子减少。此外,木灰施用后,土壤有效离子交换容量和盐基饱和度都得到增强和提高。

3.2 对土壤微生物群的影响

木灰的施用能够改变土壤微生物群体的活动和结构^[11,16,25,40]。Perkiomaki J 等^[17]研究发现木灰的施用会导致更强的呼吸作用和胸腺嘧啶脱氧核苷合成率。Jokinen H K 等^[22]通过实验证明,直接或者间接的 pH 值影响是引起土壤微生物群体活动和结构变化的原因。另外,Jokinen H K 等^[22]还发现溶解有机碳也是引起土壤微生物群体活动和结构变化的原因,同时它也受到 pH 值影响。pH 值和溶解有机碳含量越高,土壤微生物的活动受到的促进作用越强。pH 值影响土壤微生物群体的活动和结构的实质就是特定细菌群对较高 pH 值环境的适应,而不是所有微生物都能够适应这种环境。

Perkiomaki J 等^[17]通过田间实验表明,未处理木灰由于含有较活跃的氧化物和氢氧化物,对苔藓类植物有损害;处理过的灰更加稳定,能够避免可溶物质迅速溶解所造成的 pH 值急剧变化,从而减少对苔藓类植物的损害。

胡亚林等^[54]认为木灰施用增加了土壤微生物的活性,并且这一影响能持续较长时间,从而引起土壤中微生物群落结构的改变:一方面增加了土壤中微生物可利用的营养元素,另一方面改变了土壤物理性状。

另外,有学者研究了木灰施用后,土壤中潜在反硝化率(PDA)和潜在氨氧化率(PAO)的变化。Odlare M 等^[45]对此进行了实验,实验表明,木灰施用后潜在反硝化率减少到施用前的 16% ~ 56%,而潜在氨氧化率则在 82% ~ 205% 之间变动。Odlare M 等^[45]研究还发现木灰施用后对于潜在反硝化率立即会产生影响,并且在短时间和长时间内都有影响,这可能是由于木灰中微量的重金属对反硝化过程酶的毒害作用,也可能是其他因素造成的。pH 值的升高也不利于潜在反硝化作用的进行,而堆肥与木灰联合施用能够消除这种毒性^[45]。潜在反硝化率可以作为一种测试木灰对土壤微生物活动影响的手段。

3.3 对作物的影响

Pärn H 等^[49]认为,在欧洲,大多数木灰被利用在森林中,是用来弥补不断砍伐树木所造成的长期元素流失,并不是要获得树木短期内的增长。Saarsalmi A 等^[36]、Mandre M 等^[48]在针对松树的研究中发现,木灰施用后,松针组织中 K、B、Mg、Fe、Zn 含量增加,并且减小了 Mn 的浓度。但是 Parka B B

等^[37]在针对柳树的研究中也发现,木灰施用后,在叶、芽、茎组织中并没有出现营养元素的富集。Staffan J等^[50]认为虽然也有研究显示,木灰施用后,短期内树木组织中会有元素的富集,但是这并不能说明和树木的生长是有关的。

Voundi Nkana J C等^[18]在针对热带酸性土壤的研究中显示,作物中 P 含量并没有受到木灰施用的影响。这是由于虽然木灰中含有大量 P,但是较高的 pH 值使得大部分 P 不可溶,也就是土壤容易被作物吸收利用的 P 并没有因为木灰的加入而增多。

Saarsalmi A^[36]、Pärn H^[49]、Staffan J等^[50]在研究中发现木灰施用后对树木生长有促进作用,但同时也发现木灰对树木生长没有影响或者不明显,甚至降低了树木生长。Pärn H等^[49]认为这是因为木灰施用对树木生长的影响可能还受其他因素的干扰,如生长地点的条件、树木的种类、树木生长时间等。Saarsalmi A^[23]、Staffan J等^[51]还发现在土壤肥沃的地方施用木灰能够促进树干生长,在不够肥沃的地方则减缓树木的生长, Jacobson等^[50]认为这可能和土壤中的 N 含量有关。Saarsalmi A^[23]、Ozolincius R等^[46]研究显示,木灰和 N 肥联合施用后,对树木生长的促进作用很明显。在对柳树的研究中还发现,施用木灰后,虽然树木组织中没有出现元素的富集,但是却增加了树干的直径,与此同时减少了树干的数量,所以总产量并没有变化,研究者分析这可能是土壤中 N 含量低的原因。Parka B B等^[37]认为,在合适的条件下,例如在酸性土壤或者缺少阳离子的土壤中,木灰单独施用就可以增加树木的产量。

通常木灰的施用可以促进树木新芽的木质化,这与土壤中 K、Ca、Mg 含量成正相关关系,与土壤中 N 含量成负相关关系。而树木的增粗量又与树木新芽的木质化成负相关关系。因而木灰施用后对树木的影响是多层面的,根据不同情况有不同的趋势,但是施用木灰均对木质素沉积过程起到重要作用。Mandre M等^[14]认为木灰施用造成土壤 pH 值的升高, K 和 Ca 含量的增加可能是促进树木木质化的因素。但木质素的过度沉积也可能限制细胞的生长,并最终导致树木停止生长。

陈永柳^[55]研究发现施用木灰提高了土壤 pH 值,对提高水稻产量有良好效果。

3.4 重金属问题

木灰施用后,对土壤和树木中的 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 进行研究。林桢良^[13]对短期轮伐林进行研究发现木灰的应用不会导致重金属的移动。Ozolincius R等^[51]研究发现木灰的施用增加了当年

生松树针叶中 Cd、Pb、Zn 的浓度,但同时降低了 Ni、Cu 的浓度。Ozolincius R等^[51]还发现木灰中大部分重金属在施用后被束缚在土壤表层,并不向下层土壤渗透,2年后才在 20 cm 深的土壤层中发现 Zn,在 50 cm 的土壤层中发现 Ni,同时灰的施用并没有影响到 Cd、Cu、Cr 和 Pb 的过滤性。

Nieminen M等^[12]研究发现,重金属在其所研究的灰中都呈不可溶状态,木灰中的重金属形态也符合该规律。Fritze H等^[52]通过实验表明,木灰中 Cd 含量超过自然富集量的 100 倍时,土壤腐殖质层中没有发生微生物活性、微生物结构和生物多样性的变化,也没有出现对 Cd 的抵抗作用。而同样数量的 Cd 单独施用到土壤中,却会导致土壤呼吸作用减弱以及微生物结构的变化。Perkiömäki J等^[38]也认为木灰形成过程能够消除 Cd 的毒害作用,木灰中含有的 Cd 对腐殖质层微生物并没有影响。

Kepanen A等^[32]针对泥炭土和矿质土的实验表明,施用木灰后土壤中水溶性 Cd 和交换 Cd 的含量并没有增加。即使是在增加了 Cd 总含量的情况下,稳定的木灰以及较高的 pH 值仍然限制了 Cd 的活动。

4 结论

(1) 燃用木质类生物质后产生的 K 含量相对较低的木灰不属于常规可用作 K 肥的草木灰类物质,肥用价值通常不受重视,但是如果作为废物填埋处理,不仅处理费用很昂贵,而且容易造成环境污染。由于客观上该类木灰中依然含有大量植物生长所需元素,经过充分研究和评估,将其作为一种肥料施用到土壤中,一方面实现了对该类燃烧产物的无害化处理,另一方面能弥补生物质砍伐和收割所造成的土壤元素流失,具有重要的意义。

(2) 木灰作为肥料在运输和施用过程中易造成粉尘污染,最好进行预处理。预处理避免了污染,也减少了 pH 值和盐类对土壤的影响。考虑到预处理容易造成营养元素的淋溶,需要在预处理过程中选择合适的方法。

(3) 木灰的施用可以明显提高土壤的 pH 值,这能够降低 Al 和 Mn 元素对作物的毒性。同时也降低了重金属在土壤中的可用性。由于木灰能够提高土壤中 K、Ca、Mg 和 B 等植物营养元素的含量,所以木灰能够促进作物的生长。由于木灰中基本不含 N,所以木灰施用对作物生长的促进作用不明显,甚至在一些情况下会减缓作物的生长,木灰和 N 肥料联合施用能够较好地解决这个问题。另外,木灰的施用能够增加土壤腐殖质层中的活性和改善微生物

群体结构,这对提高土壤肥力有重要作用。

(4) 由于生物质机体中含有重金属,燃烧成灰的过程会造成一些重金属物质在木灰中富集,所以木灰的施用客观上增加了土壤中部分重金属的含量。虽然有实验证明这些重金属的可利用性并不高,但是它在土壤中的不断富集会和环境带来怎样的影响目前并不清楚。而且木灰作为一种强碱性肥

料不断施用在土壤中对整个地区的生态环境造成长期影响也还有待进一步探索。但是就目前的研究情况看,木灰作为肥料的施用实现了生物质利用过程中元素的循环,有一定的改良和提高土壤特性的作用。总体看来,木灰利用带来的好处大于可能存在的弊端。

参 考 文 献

- 1 Maria Zevenhoven. The utilization of biomass ash[R]. Turku: Faculty of Chemical Engineering of ABO Akademi University, 2001.
- 2 Demeyer A, Voundi Nkana J C, Verloo M G. Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview[J]. *Bioresource Technology*, 2001, 77(3):287~295.
- 3 Pitman R M. Wood ash use in forestry—a review of the environmental impacts[J]. *Forestry*, 2006, 79(5):563~588.
- 4 Etiegnil L, Campbell A G. Physical and chemical characteristics of wood ash [J]. *Bioresource Technology*, 1991, 37(2):173~178.
- 5 Steenari B M, Karlsson L G, Lindqvist O. Evaluation of the leaching characteristics of wood ash and the influence of ash agglomeration [J]. *Biomass and Bioenergy*, 1999, 16(2):119~136.
- 6 Steenari B M, Lindqvist O. Stabilisation of bio fuel ashes for recycling to forest soil[J]. *Biomass and Bioenergy*, 1997, 13(1~2):39~50.
- 7 Cox M, Nugteren H, Janssen Jurkovicova M. Combustion residues: current, novel, and renewable applications [M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2008.
- 8 余春江,骆仲泐,张文楠,等. 碱金属及相关无机元素在生物质热解中的转化析出[J]. *燃料化学学报*, 2000, 28(5):420~425.
Yu Chunjiang, Luo Zhongyang, Zhang Wennan, et al. Inorganic material emission during biomass pyrolysis[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2000, 28(5):420~425. (in Chinese)
- 9 米铁,陈汉平,吴正舜,等. 生物质灰化学特性的研究[J]. *太阳能学报*, 2004, 25(2):237~240.
Mi Tie, Chen Hanping, Wu Zhengshun, et al. Chemistry characteristic study on biomass ash[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2004, 25(2):237~240. (in Chinese).
- 10 李学恒,蒋安众,姜秀民,等. 木质能的燃烧特性[J]. *锅炉技术*, 1999, 30(4):17~20, 29.
Li Xueheng, Jiang Anzhong, Jiang Xiumin, et al. Combustion characteristic of wood energy[J]. *Boiler Technology*, 1999, 30(4):17~20, 29. (in Chinese)
- 11 张军,范志林,林晓芬,等. 灰化温度对生物质灰特征的影响[J]. *燃料化学学报*, 2004, 32(5):547~551.
Zhang Jun, Fan Zhilin, Lin Xiaofen, et al. Effect of ashing temperature on the characteristics of biomass ash[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2004, 32(5):547~551. (in Chinese)
- 12 Nieminen M, Piirainen S, Moilanen M. Release of mineral nutrients and heavy metals from wood and peat ash fertilizers: field studies in Finnish forest soils [J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2005, 20(2):146~153.
- 13 林桢良. 短期轮伐林作为生物质资源的综合环境影响分析[J]. *新能源*, 1995, 17(12):39~43.
- 14 Mandre M, Pärn H, Ots K. Short-term effects of wood ash on the soil and the lignin concentration and growth of *Pinus sylvestris* L[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 223(1~3):349~357.
- 15 Voundi Nkana J C, Demeyer A, Verloo M G. Effect of wood ash application on soil solution chemistry of tropical acid soils: incubation study[J]. *Bioresource Technology*, 2002, 85(3):323~325.
- 16 Voundi Nkana J C, Demeyer A, Verloo M G. Chemical effects of wood ash on plant growth in tropical acid soils[J]. *Bioresource Technology*, 1998, 63(3):251~260.
- 17 Perkiomaki J, Fritze H. Short and long-term effects of wood ash on the boreal forest humus microbial community[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34(9):1343~1353.
- 18 Saarsalmi A, Mälkönen E, Piirainen S. Effects of wood ash fertilization on forest soil chemical properties[J]. *Silva Fennica*, 2001, 35(3):355~368.
- 19 Lundkvist H, Eriksson H M. Wood ash recycling in Sweden—planning and design[C]//*The Forest Alternative: Principles and Practice of Residuals use. Prelim. Proc. Int. Symp. on the Use of Residuals as Soil Amendments in Forest Ecosystems*,

- UW, Seattle, WA, 1997.
- 20 Shieh C S. Wood ash in Florida; production and characteristics (phase I study) [R]. Gainesville: Research Center for Waste Utilization in Florida Institute of Technology, 1998.
 - 21 Livingston W R. Biomass ash characteristics and behaviour in combustion, gasification and pyrolysis systems [R]. Doosan Babcock Energy, 2007.
 - 22 Jokinen H K, Kiikkilä O, Fritze H. Exploring the mechanisms behind elevated microbial activity after wood ash application [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(8):2285 ~ 2291.
 - 23 Saarsalmi A, Kukkola M, Moilanen M, et al. Long-term effects of ash and N fertilization on stand growth, tree nutrient status and soil chemistry in a scots pine stand [J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 235(1~3):116 ~ 128.
 - 24 Saarsalmi A, Mälikönen E. Forest fertilization research in Finland: a literature review [J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2001, 16(6):514 ~ 535.
 - 25 Holmberg S L, Lind B B, Claesson E. Chemical composition and leaching characteristic of granules made of wood ash and dolomite [J]. *Environmental Geology*, 2000, 40(1~2):1 ~ 10.
 - 26 Levula T, Saarsalmi A, Rantavaara A. Effects of ash fertilization and prescribed burning on macronutrient, heavy metal, sulphur and ¹³⁷Cs concentrations in lingonberries [J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 126(3):269 ~ 279.
 - 27 Arvidsson H, Lundkvist H. Effects of crushed wood ash on soil chemistry in young Norway spruce stands [J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 176(1~3):121 ~ 132.
 - 28 Fritze H, Kapanen A, Vanhala P. Cadmium contamination of wood ash and fire-treated coniferous humus: effect on soil respiration [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1995, 54(5):775 ~ 782.
 - 29 Holmberg S L, Claesson T. Mineralogy of granulated wood ash from a heating plant in Kalmar, Sweden [J]. *Environmental Geology*, 2001, 40(7):820 ~ 828.
 - 30 Perkiomäki J. Wood ash use in coniferous forests: a soil microbiological study into the potential risk of cadmium release [C] // Finnish Forest Research Institute, Research Papers, 2004.
 - 31 Fritze H, Smolander A, Levula T, et al. Wood ash fertilization and fire treatments in a Scot pine forest stand: effects on the organic layer, microbial biomass, and microbial activity [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1994, 17(1):57 ~ 63.
 - 32 Kepanen A, Lodenius M, Tulisalo E, et al. Effect of different wood ashes on the solubility of cadmium in two boreal forest soils [J]. *Boreal Environment Research*, 2005, 10(2):135 ~ 143.
 - 33 Staffan J, Lena G. Effects on ground vegetation of the application of wood ash to a Swedish Scots pine stand [J]. *Basic and Applied Ecology*, 2001, 2(3):233 ~ 241.
 - 34 Zhang F S, Yamasaki S, Nanzyo M. Waste ashes for use in agricultural production: I. liming effect, contents of plant nutrients and chemical characteristics of some metals [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 284(1~3):215 ~ 225.
 - 35 Zhang F S, Yamasaki S, Kimura K. Waste ashes for use in agricultural production: II. contents of minor and trace metals [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 286(1~3):111 ~ 118.
 - 36 Saarsalmi A, Mälikönen E, Kukkola M. Effect of wood ash fertilization on soil chemical properties and stand nutrient status and growth of some coniferous stands in Finland [J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2004, 19(3):217 ~ 233.
 - 37 Parka B B, Yanaia R D, Sahma J M, et al. Wood ash effects on plant and soil in a willow bioenergy plantation [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2005, 28(4):355 ~ 365.
 - 38 Perkiömäki J, Kiikkilä O, Moilanen M et al. Cadmium-containing wood ash in a pine forest: effects on humus microflora and cadmium concentrations in mushrooms, berries, and needles [J]. *Can. J. For. Res.*, 2003, 33(12):2443 ~ 2451.
 - 39 Remigijus O, Iveta V. Effects of wood ash application on heavy metal concentrations in soil, soil solution and vegetation in a Lithuanian Scots pine stand [J]. *Forestry Studies*, 2005, 42:66 ~ 73.
 - 40 Ozolincius R, Armolaitis K, Ragutis A, et al. Influence of wood ash recycling on chemical and biological condition of forest arenosols [J]. *Journal of Forest Science*, 2006, 52:79 ~ 86.
 - 41 Kuba T, Tscholl A, Partl C, et al. Wood ash admixture to organic wastes improves compost and its performance [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2008, 127(1~2):43 ~ 49.
 - 42 Augusto L, Bakker M R, Meredieu C. Wood ash applications to temperate forest ecosystems-potential benefits and drawbacks [J]. *Plant and Soil*, 2008, 306(1~2):181 ~ 198.
 - 43 Naik T R, Kraus R N. Wood ash: as a new source of pozzolanic material [J]. *Concrete International*, 2001, 25:55 ~ 62.
 - 44 Marie Louise S, Olof A. Ash from cereal and rape straw used for heat production: liming effect and contents of plant nutrients and heavy metals [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1997, 93(1~4):93 ~ 108.
 - 45 Odlare M, Pell M. Effect of wood fly ash and compost on nitrification and denitrification in agricultural soil [J]. *Applied*

- Energy, 2009, 86(1):74~80.
- 46 Ozolincius R, Varnagiryte Kabasinskiene I, Stakenas V, et al. Effects of wood ash and nitrogen fertilization on Scots pine crown biomass[J]. Biomass and Bioenergy, 2007, 31(10):700~709.
- 47 Ozolincius R, Buozyte R, Varnagiryte Kabasinskiene I. Wood ash and nitrogen influence on ground vegetation cover and chemical composition[J]. Biomass and Bioenergy, 2007, 31(10):710~716.
- 48 Mandre M. Influence of wood ash on soil chemical composition and biochemical parameters of young Scots pine[C]. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences: Biology, Ecology, 2006, 55(2):91~107.
- 49 Pärn H. Effect of wood ash application on radial and height growth of young Scots pines (*Pinus sylvestris* L.)[J]. Forestry Studies, 2005, 42:48~57.
- 50 Staffan J. Addition of stabilized wood ashes to Swedish coniferous stands on mineral soils-effects on stem growth and needle nutrient concentrations[J]. Silva Fennica, 2003, 37(4):437~450.
- 51 Ozolincius R, Varnagiryte I. Effects of wood ash application on heavy metal concentrations in soil, soil solution and vegetation in a Lithuanian Scots pine stand[J]. Forestry Studies, 2005, 42:66~73.
- 52 Fritze H, Perkiomaki J, Saarela U, et al. Effect of Cd-containing wood ash on the microflora of coniferous forest humus[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2000, 32(1):43~51.
- 53 杨丽娟,李天来,付时丰,等.长期施肥对菜田土壤微量元素有效性的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(4):549~555.
Yang Lijuan, Li Tianlai, Fu Shifeng, et al. Effects of long-term fertilization on availability of micro-elements in vegetable soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(4):549~555. (in Chinese)
- 54 胡亚林,汪思龙,颜绍廬.影响土壤微生物活性与群落结构因素研究进展[J].土壤通报,2006,37(1):170~176.
Hu Yalin, Wang Silong, Yan Shaokui. Research advances on the factors influencing the activity and community structure of soil microorganism[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(1):170~176. (in Chinese)
- 55 陈永柳.水稻营养障碍因素调查与矫治[J].土壤肥料,1996(3):23~26.
-

(上接第 80 页)

- 8 周晓林,焦仁育,朱文锦,等.渔业自动投饵类型、结构原理及应用[J].渔业现代化,2003(6):46~47.
- 9 周晓林,姬广闻,焦仁育.网箱养鱼自动投饵机的设计与应用[J].淡水渔业,2003(2):36~37.
- 10 王永华.现代电气控制及 PLC 应用技术[M].北京:北京航空航天大学出版社,2003.
- 11 SC/T6023—2002 水产行业标准.投饵机[S].
- 12 Qiestad V, Pedersen T, Folkvoro A, et al. Automatic feeding and harvesting of juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) in a pond[J]. Modeling, Identification and Control, 1987, 8(1):39~46.
- 13 Papandroulakis N, Dimitris P, Pascal D. An automated feeding system for intensive hatcheries[J]. Aquac. Eng., 2002, 26(1):13~26.