

田 甜, 韦锦坚, 陈远权, 等. 茶树的铝、硒、钙营养及互作研究综述[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(12): 29–33.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.12.007

茶树的铝、硒、钙营养及互作研究综述

田 甜, 韦锦坚, 陈远权, 韦持章, 陈海生

(广西南亚热带农业科学研究所, 广西龙州 532400)

摘要:重点论述了茶树的铝、硒、钙营养特性和钙铝、硒铝互作的研究进展, 并作出相应展望; 对不同茶树品种, 确定不同化学成分生成所需的最适铝浓度范围; 茶树耐铝机理有待进一步探求; 茶树对硒的吸收、转运途径和代谢机制有待进行跟踪和微观深入研究; 研究茶树的硒遗传特性, 以期富硒茶树品种的筛选和选育提供理论基础; 研究钙硒互作对茶叶品质及茶叶中钙硒含量的影响, 以期通过施用适宜配比的钙和硒肥, 提高非富硒地区茶叶硒含量; 探求铝硒钙互作对茶叶品质与茶叶中铝硒钙含量的影响以及互作机制, 对“富硒、低铝、高品质茶叶”的研究具有理论指导意义。

关键词:茶树; 铝; 硒; 钙; 互作; 研究现状; 展望

中图分类号: S571.106; Q945.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)12-0029-04

硒是人体必需微量元素, 具有抗脂质过氧化、清除体内自由基、提高机体免疫功能、抗癌防癌和抗衰老等作用^[1-2]。大量流行病学研究和干预试验结果表明, 硒化合物在癌症预防方面发挥着重要作用^[3]。随着社会经济的发展和人民保健意识的增强, 富硒食品越来越受到关注^[4]。茶树富硒能力较强, 通过饮茶的方式补硒方便易行, 是补硒的有效途径^[5], 但我国天然富硒区域和天然富硒茶产量均有限, 因此在非富硒地区推广富硒技术用于生产加工富硒茶具有很大的市场前景, 对提高茶叶品质和经济价值具有重要意义。茶树是喜铝植物, 合适的铝能促进茶树根系的发育, 但高浓度的铝会抑制茶树生长, 造成铝胁迫^[6-9], 尤其在我国的酸雨污染严重的区域, 高铝对茶树的毒害更严重; 茶叶产品中铝含量为 224 ~ 2 633 mg/kg, 茶汤中检测到的铝含量为 0.703 ~ 5.931 mg/L^[10], 铝具有生物毒性, 且在人体内具有积累性, 越来越多的报导认为, 人体积累过多的铝后会加速对钙和磷的排泄而使体内代谢失调, 还有人认为老年性痴呆是铝的毒性所致^[11]。因此, 在保证茶叶生长和品质的同时, 又能控制茶叶中的铝含量已成为了研究的热点。少数研究表明, 高铝条件下, 适宜浓度的钙或硒可以缓解铝胁迫^[12-15], 黄进研究了硒铝互作对茶树抗氧化系统的影响^[15], 但硒铝互作对茶叶品质以及对茶叶硒铝含量的影响等研究尚少, 外源钙对茶树硒吸收与品质的影响研究缺乏, 适量硒或钙缓解茶树铝毒害的机理尚需验证和探究。

本研究阐述了茶树的铝、硒、钙营养特性及钙铝、硒铝互作的研究进展, 并对茶树的铝、硒营养研究和铝硒钙互作进行了展望, 以期富硒茶树品种的筛选和选育、硒与钙及其他养分的配施、“富硒、低铝、高品质茶叶”的研究以及新型硒肥的研发提供一定基础。

收稿日期: 2015-10-21

基金项目: 广西壮族自治区公益性基金(编号: GXNYRKS201609)。

作者简介: 田 甜(1989—), 女, 山西翼城人, 硕士, 助理农艺师, 主要从事植物营养研究。E-mail: tiantian3854@qq.com。

通信作者: 韦锦坚, 高级农艺师, 主要从事茶树品种选育研究。

E-mail: 181993158@qq.com。

1 茶树铝、硒、钙营养特性

1.1 茶树的铝营养特性

茶树喜生于酸性、富含大量交换性铝的土壤中, 土壤交换性铝含量受多种因素影响。研究表明, 交换性铝含量随着 pH 值增加急剧减少; 向茶园提供铵态氮和有机质, 可使土壤交换性铝含量显著增加^[16-17]。茶树叶片中铝含量可达 5 ~ 16 g/kg, 远远高于一般粮食和饲料作物中 200 mg/kg 的平均含量, 是少见的富铝植物。不同叶龄茶叶铝的含量不同, 变化规律一般为老叶 > 成叶 > 嫩叶^[18], 此外, 不同器官之间铝含量的差异表现为叶 > 根 > 茎, 相同器官随着发育的成熟含铝量逐渐增加^[19]。廖万有认为铝元素被茶树根尖吸收有 2 种机制, 一方面可通过与 F⁻ 形成 Al-F 络合物进入根尖细胞, 另一方面可通过与 P 形成 Al-P 络合物被吸收, 后者是茶树吸收铝的主要方式, 而植物对 N、P、K 的需求量较多, 所以茶树吸收大量元素 P 的同时对铝的吸收也较多^[20]。李海生和张志权发现高铝土壤中对一般作物无效态的磷, 对茶树不一定是无效的, 并得出了铝可以促进茶树根系对磷的吸收和利用, 一定程度上体现了茶树对铝的耐性^[9], 和前人的研究结果^[21-22]一致。铝在茶树体内转移与分布的影响因素较多, 其中土壤 pH 值对茶树体内的铝向幼叶转移有显著影响, 且幼叶铝含量与土壤 pH 值呈显著正相关($r=0.779$)^[23]。

1.2 铝对茶叶品质及抗氧化系统的影响

研究表明, 适宜浓度的铝能促进茶树的生长发育, 促使茶树对营养元素的吸收, 以及提高茶树的生理活性和抗性, 并改善茶叶的品质^[6]。国内外许多学者证明, 适宜浓度的铝能显著提高茶叶中茶多酚、儿茶素类物质、咖啡碱、氨基酸、维生素 C、黄酮类化合物、可溶性糖、香气和叶绿素等主要化学成分含量^[14, 24-28]。马小雪等研究了土壤 pH 值及根部施铝对茶叶品质的影响, 发现根施铝浓度为 0.5 g/kg 时, 茶叶中茶多酚、氨基酸和咖啡碱含量均达到最大, 且土壤中交换性铝含量和 pH 值达到最适宜茶树生长的范围^[23]。黄进发现单铝条件下, 适宜浓度的铝处理后, 过氧化物酶(peroxidase, POD)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶

(catalase, CAT) 3 种酶活性较高, 证明外源适量铝可促进茶树代谢系统的效率^[15]。

外界适宜浓度的铝能促进茶树根的发育, 但高浓度的铝会损伤茶树抗氧化系统, 影响其生长和茶叶品质^[7]。罗亮等通过研究茶树在不同浓度铝处理下的生理响应, 发现高浓度的铝处理 (100 mg/L) 会降低 POD 和 CAT 活性, 提高丙二醛含量^[8]。段小华等发现茶树对低浓度铝适应性是通过提高抗氧化系统酶的活性和一些渗透调节物质 (脯氨酸和可溶性糖) 的含量来实现的, 而高浓度的铝 (30 mg/L) 则损伤茶树抗氧化系统^[29]。但是对于茶叶不同化学成分, 对铝的适宜范围各研究结果不尽相同, 所以有必要通过示踪元素的方法进行进一步研究, 并且茶树的耐铝机理有待进一步确定。

1.3 茶树的硒营养特性

茶树具有较强的富硒能力, 茶树体内 80% 的硒以有机化合物形式存在, 所以茶树是理想的天然富硒资源。钟颜麟等用 DAN 荧光法检测茶树硒的富集形态, 结果表明, 蛋白质硒占 79.25%, 是根茎叶硒的主要积累形式^[30]。高柱等利用氢化物-原子荧光光度法同样证明茶叶中硒主要以有机态的形式存在, 其中主要为蛋白硒, 其次为多糖硒、核酸硒等^[31]。土壤中的硒通过根尖被植物吸收, Anderson 研究结果表明其中硒酸盐与硫酸盐在根尖细胞膜上有相同载体结合位点, 故硒酸盐主要通过硫酸盐载体蛋白进入根尖细胞^[32], 然后通过木质部运往地上部; Li 等研究发现硒酸盐是硒在木质部伤流液中的主要存在状态^[33]。亚硒酸盐存在于偏酸性且还原性较强的土壤中, 主要通过水通道蛋白和磷酸盐载体蛋白被吸收^[34-35], 且大部分硒在根部直接转化后再进入木质部^[33]。

1.4 影响茶叶硒含量的因素

茶叶硒含量受多种因素影响, 其中土壤类型、茶树品种、茶树部位和施肥方式是主要因素^[36]。研究表明, 茶叶中硒含量与土壤中有效态硒含量呈显著正相关, 而土壤中有效态硒含量又受土壤类型影响。沙济琴等研究发现, 不同类型土壤的有效态硒含量大小顺序为砖红壤 > 红黄壤 > 红壤、酸性紫色土^[37]; 刘海燕等研究了影响贵州土壤硒含量的因素, 发现不同茶产地和同一产地不同深度的土壤硒含量差异极显著, 同时发现不同品种茶叶均为新叶硒含量明显高于老叶, 且新叶硒含量与土壤硒含量呈显著正相关^[38]。同一种植土壤上, 不同茶树品种之间茶叶硒含量差异显著。沙济琴等对闽东和闽南茶区的多个品种进行鲜叶硒含量分析, 得出同一立地条件下, 不同茶树品种间鲜叶硒含量差异达 1~4 倍^[37]; 江福英等认为不同品种间调控硒元素吸收、转运、转化、利用的基因型不同, 所以对硒的富集能力不同^[36]。不同茶树器官的硒含量差异明显, 但对于其分布规律尚存在分歧。顾谦等发现, 茶树所有器官中叶片的硒含量最高, 且老叶是嫩叶的 3 倍以上, 认为主要是由于在老叶中形成大分子蛋白质结合态硒, 使硒流动性变小, 从而造成硒在老叶中的积累^[39]; 钟颜麟等通过同位素示踪法研究茶树硒的富集特性, 结果表明, 茶叶中含硒量以老叶最多, 依次为果壳 > 老枝 > 嫩叶 > 根系和种子, 表明茶叶中的含硒量会随新梢的老化而增加^[40]; 江福英等表明茶树各器官硒含量排序为叶片 > 枝干 > 果壳 > 种子 > 根系, 而嫩叶、嫩枝 < 老叶、老枝^[36], 与顾谦等、钟颜麟等的观点一致; 但王雅玲等认为硒元素被根尖吸收后, 优先分配到茶树营养

生长旺盛的叶芽中^[41], 刘海燕等亦通过研究发现不同品种的茶叶均为新叶硒含量明显高于老叶^[38]。另外, 茶叶硒含量还受季节影响, 而茶叶加工过程对茶叶硒含量无影响。

1.5 外源硒对茶叶品质的影响

金建昌等通过盆栽方法, 研究了叶面喷施亚硒酸钠对茶叶中硒含量的影响, 发现叶面喷施亚硒酸钠能明显提高茶叶硒含量, 提高幅度跟亚硒酸钠的喷施浓度有关^[42]。黄进证明单硒作用下, 在低硒浓度下, SOD 活性显著增强, CAT、POD 活性也有所增加; 高硒浓度下 SOD 活性降低, CAT、POD 仍保持较高活性, 茶树生长受到抑制^[15]。胡秋辉等研究了硒生物肥, 并通过叶面喷施, 发现直接由新叶和芽吸收硒而生产的富硒茶叶, 与天然富硒茶叶中硒的化学本质是相同的^[43]。李静通过盆栽方法, 采用叶面喷施和土施 2 种方式研究外源硒肥对茶叶产量及品质的影响, 发现叶面喷施及土施亚硒酸钠 (Na_2SeO_3) 都能提高茶叶产量和硒含量, 并能改善不同采摘期的茶叶品质; 另外, 叶面喷施 Na_2SeO_3 能降低儿茶素的含量, 而土施 Na_2SeO_3 对儿茶素的含量无影响。李静认为施用亚硒酸钠后, Se 很可能提高了茶树体内的谷胱甘肽过氧化物酶 (glutathione peroxidase, GSH-Px) 活性, 缓解了自由基引起的膜脂过氧化作用, 从而提高茶叶产量, 改善茶叶品质^[44]。对于茶树对硒的吸收、转运、转化和利用途径还很模糊, 而且对于茶树的硒遗传特性研究缺乏, 另外, 硒和其他营养元素之间的交互作用尚需进一步研究。

1.6 茶树的钙营养特性

钙能维持细胞膜的稳定性, 维持细胞的正常功能, 从而为各化学品质的合成提供结构基础; 此外, 钙能调节细胞内的酸度, 使同化物质转化和运输正常运行。 Ca^{2+} 对茶树根系生理有重要作用, 缺钙会导致 ATP 水解酶活性下降, 当 Ca^{2+} 浓度小于 1 mmol/L 时, ATP 水解酶活性随供钙水平提高而提高^[12]。土壤中的 Ca^{2+} 主要通过质流转移到茶树根表面, Ca^{2+} 进入根系细胞, 在根系中通过横向短距离运输进入木质部。White 研究表明, 钙的吸收主要发生在尚未形成凯氏带的根尖和侧根形成部位^[45], 同时有研究发现部分 Ca^{2+} 可以由此通过离子通道流进内皮层细胞而转入共质体并到达木质部薄壁细胞组织^[46-47], 由木质部薄壁细胞组织进入中柱可能需要 Ca^{2+} -ATP 的驱动; 还有一些 Ca^{2+} 由内皮层细胞运出, 沿内皮层内侧的质外体途径进入木质部导管^[45,47]。钙在茶树体内属于难以移动的元素, 故随着器官的老化, 钙难以转移至幼嫩部位, 而在老器官中积累。茶树体内钙含量 (以 CaO 计) 为 2 000~12 000 mg/kg^[48]。在茶树年发育周期中, 4—6 月吸收的钙量占全年的 33%, 7—8 月占 23%^[49]。春梢嫩芽中钙含量 2 000 mg/kg, 秋后老叶 8 000 mg/kg, 落叶达 12 000 mg/kg。不同季节茶梢中钙含量表现为秋梢 > 春梢 > 夏梢^[48]。

1.7 茶树钙吸收的影响因素

影响茶树对钙素吸收的因素主要为土壤 pH 值和钙与其他元素之间的互作。相关研究表明, 土壤 pH 值在 5.0~6.0 时, 最有利于茶树对钙的吸收, 且土壤交换性钙含量随 pH 值升高而增加, 所以茶树对钙的吸收随之上升^[50]。吴洵通过多年的试验研究发现, 茶树各组织中 Ca/Mg 值则随组织老化而增大; 叶中 Ca/Mg 值 > 1, 根中 Ca/Mg 值 < 1; 土壤交换性钙、镁的含量以及钙镁比例均会影响茶树对土壤钙、镁的吸收; 缺

钙、缺镁或两者比例失调,对茶树产量和品质均有显著影响^[51]。有研究证明,施用硫酸铝,可以抑制茶树对钙的过量吸收。夏文娟等通过向土壤施加硫酸铝研究土壤化学性质的变化,发现添加硫酸铝后土壤 pH 值降低,交换性钙含量下降,而且铝与钙素的拮抗作用造成茶树对钙的吸收减少^[52]。

1.8 钙对茶树生长发育的影响

长期以来,茶树一直被认为是嫌钙植物,对钙过量比较敏感。伍炳华通过试验表明,茶树根系对 Ca^{2+} 的亲合力较高,能适应低钙酸性土壤,所以对低钙条件不敏感。茶树的所谓嫌钙是其适应酸性土壤的表现,其对土壤低钙的不敏感正好表明其根系对钙离子具有较强的亲合力或能以某种机理维持在较低供钙水平下的正常生理功能^[12]。申加枝等研究发现高钙离子浓度下,茶苗根尖数显著减少,根系活性降低,且根系表面形成白色粘膜,影响根系对其他养分的吸收,进而影响到茶树新梢中生化成分的合成^[53]。钙过量还会对镁离子的吸收产生拮抗作用,这些都会对茶树的生长发育产生影响^[51]。

2 茶树的钙铝互作研究进展

2.1 钙铝互作对茶树钙铝吸收的影响

段小华等通过研究钙铝互作对茶树钙铝吸收累积的影响,发现外源施加铝会降低根对钙的吸收但不影响茎和叶对钙的积累,而施加钙则会降低茶树各器官对铝的吸收和积累,增加茶叶中的钙含量,对其他矿质元素的吸收和累积则没有影响^[54]。段小华等进一步研究了钙铝互作对茶叶品质的影响,表明营养液在高铝条件下,增加钙的浓度能够增加茶叶各化学品质成分的含量,推断这可能与钙减轻铝对茶树的毒害作用有关^[14]。陈文荣等研究了不同浓度的钙对大豆铝毒的缓解作用,结果表明,150 mg/L 铝胁迫下,大豆植株生物量、根系活力、可溶性糖和可溶性蛋白质含量及 POD 活性显著下降,游离脯氨酸含量显著上升,外源施加适量的钙(320 mg/L)可显著削弱铝毒^[55]。罗虹等采取水培法,研究了不同水平的钙或硅对荞麦真叶期和初花期铝毒害的缓解效应,结果显示,在 Al^{3+} 胁迫下,适宜浓度的钙或硅能完全消除荞麦在初花期 Al^{3+} 对可溶性蛋白质形成的抑制效应,显著提高植株抗逆性,且钙的缓解效果略强于硅。但随着 Al^{3+} 浓度的提高,钙和硅的缓解效应减弱^[56]。李海生等研究不同铝水平下茶对铝及矿质养分的吸收与累积,发现与对照相比,各器官的含钙量下降,认为这可能归因于钙铝的拮抗作用^[9]。伍炳华证明,在 Al^{3+} 存在下, Ca^{2+} 的吸收受到一定抑制,但适宜的 Al^{3+} 可以提高 Ca^{2+} 的营养效率。 Al^{3+} (1 mmol/L 以下)的存在,可以促进缺钙培养的茶苗根系 ATP 水解酶活性,同时 Al^{3+} 可以部分替代钙的作用而提高 ATP 酶活性。在适宜的 Ca^{2+} : Al^{3+} (1.5 : 1.1) 条件下,茶苗根系 ATP 水解酶活性达到最高^[12]。

在茶树栽培上,过量钙毒害可能主要是由于土壤 pH 值过高而造成的,可以适当施用 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$,以降低土壤 pH 值,同时抑制茶树对 Ca^{2+} 的过量吸收;对于过酸的茶园土壤(pH 值 < 4),或活性 Al^{3+} 过高的土壤,可以施加含钙肥料,如石灰、钙镁磷肥或硝酸钙等^[12],在茶园中适当增施钙有助于提高茶叶化学品质,降低茶叶中铝的含量,提高茶叶的安全性^[14]。

2.2 茶树的钙铝互作机制

李航通过室内模拟试验,分析不同钙铝比条件下茶园土壤对铝的吸附特性和活性,发现在介质中铝初始浓度较低时,不同钙铝比的茶园土壤对铝的吸附量差异不明显,即茶园土壤中活性铝含量差异不大;在铝初始浓度较高时,随钙铝比的升高茶园土壤对铝的吸附量明显增加,即随钙量的增加茶园土壤中活性铝的含量下降。李航认为当吸附溶液中加入钙后,钙离子与土壤胶体表面负电荷相作用后被土壤胶体吸附, Al^{3+} 与被土壤吸附的 Ca^{2+} 进行交换后被土壤胶体吸附,所以钙存在情况下可以促进土壤对铝的吸附^[13]。也有研究认为,介质中 Ca^{2+} 浓度增大后,茶树根系吸收的 Ca^{2+} 量增加,由于电荷竞争,对 Al^{3+} 的吸收量减少;另外, Ca^{2+} 与 Al^{3+} 在载体上有相同结合位点,所以施入土壤中的 Ca^{2+} 与 Al^{3+} 会竞争载体,导致茶树根系对 Al^{3+} 吸收量减少^[57-58]。

2.3 铝铝互作对茶树抗氧化系统的影响

茶树适宜在酸性土壤条件下生长,而酸性条件下 Al^{3+} 的溶出增加,容易受到高浓度铝的胁迫效应。硒能提高植物的抗逆性,所以研究硒铝互作对茶树生长具有重要意义。黄进通过研究硒铝互作对几种重要抗氧化酶活性的影响,发现当硒铝都在适宜范围内时,茶树抗氧化性显著提高;当两者都在高浓度范围时, CAT 和 POD 活性较高,而 SOD 活性较低,此时 $\text{O}_2 \cdot$ 大量积累,茶树生长胁迫加剧。在高铝浓度下,适量硒的加入对 3 种酶的活性都有提高作用,说明高铝浓度处理下,加硒能降低茶树受到的铝胁迫^[15]。庞贞武等采用二次正交旋转组合设计,分别建立了水稻的幼苗存活率、地上部和根部鲜重及根脯氨酸含量对外源硒、铝、硅、磷 4 因素的回归模型,通过降维得到幼苗存活率对硒和铝的二元二次回归曲线,分析得出铝胁迫时,硒在 0.478 ~ 0.564 mg/L 时有缓解铝毒效果,但这一浓度范围仅限于对水稻品种金优 725 的研究,对于其他品种,尚待进一步确认^[59]。对于硒铝互作对茶叶品质及茶叶中硒铝含量的影响并未做研究,而且适量硒缓解茶树铝胁迫的机理也未做深入探讨。

3 展望

3.1 对茶树的铝、硒营养研究展望

茶叶中不同化学成分生成所需的介质中铝浓度范围不同,而且不同的品种间也有差异,但目前各研究尚未有统一结果,所以有必要对不同品种,通过建立茶多酚、咖啡碱、游离氨基酸等主要化学成分含量与外源不同铝浓度的回归方程,寻求不同化学成分生成所需的最适铝浓度范围,或者通过示踪元素的方法进行进一步研究,并且茶树的耐铝机理有待进一步探求。茶树为典型的富硒植物,但茶树对硒的吸收、转运途径和代谢机制还很模糊,有待通过同位素示踪法、细胞生物学以及分子生物学的理论和技术进行探究,而且对于茶树的硒遗传特性需深入探讨,以期富硒茶树品种的筛选和选育提供理论基础。另外,硒和其他营养元素之间的交互作用研究缺乏,而且仅局限于对因素交互设计试验宏观结果的简单判断分析,更深入的硒和其他元素间互作机理机制研究报道尚少,新型硒肥的研发也因此受阻。

3.2 对茶树的铝钙互作研究展望

钙是植物细胞膜的构架元素,具有稳定细胞膜结构的功

能,介质中钙含量的增加有利于植物根系对多种元素的吸收。所以在非富硒地区,研究钙硒互作对茶叶品质以及茶叶中钙硒含量的影响很有意义,以期通过施用适宜配比的钙和硒肥,提高非富硒地区茶叶中硒含量。

诸多研究发现,高铝浓度下,添加钙既可以降低茶树对铝的吸收和积累,又可以提高茶叶品质^[12~14,54];加硒能降低茶树受到的铝胁迫^[15,59]。但相关学者仅对硒铝互作在茶树抗氧化系统上的影响作了研究,而对茶叶品质以及茶叶中硒铝含量影响未作探讨,且适量硒或钙缓解铝毒的机理尚需深入研究。所以可以通过随机区组或者二次正交旋转组合设计,初步分析铝硒钙三者的协同拮抗关系,探求铝硒钙互作对茶叶品质与茶叶中铝硒钙含量的影响,并从细胞和分子水平上探究铝硒钙互作机制以及适量硒或钙缓解茶树铝胁迫的机理,这对硒肥与其他养分的合理配施、新型硒肥的研发以及对“富硒、低铝、高品质茶叶”的研究具有理论指导意义。

参考文献:

- [1] 李基文. 微量元素硒与健康的研究进展[J]. 职业卫生与应急救援, 2006, 24(2): 76-79.
- [2] 陈 铭, 刘更另. 高等植物的硒营养及在食物链中的作用(二)[J]. 土壤通报, 1996, 27(4): 185-188.
- [3] Patrick L. Selenium biochemistry and cancer: a review of the literature[J]. Alten Med Rev, 2004, 9(3): 239-258.
- [4] 陈必铤, 黄 键. 我国富锌和富硒功能食品研究现状[J]. 食品研究与开发, 1999, 20(1): 33-37.
- [5] 杜琪珍, 沈星芳, 方兴汉. 茶叶中的硒成分分析[J]. 茶叶科学, 1991(2): 133-137.
- [6] 郑功宇, 陈寿松, 苏培凌, 等. 铝对茶叶主要化学品质影响的研究进展[J]. 茶叶科学技术, 2013(3): 1-5.
- [7] 林郑和, 陈荣冰. 铝对茶叶叶片抗氧化系统的影响[J]. 热带作物学报, 2009, 30(5): 598-602.
- [8] 罗 亮, 谢忠雷, 刘 鹏, 等. 茶树对铝毒生理响应的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2): 305-308.
- [9] 李海生, 张志权. 不同铝水平下茶对铝及矿质养分的吸收与累积[J]. 生态环境, 2007, 16(1): 186-190.
- [10] Fujita K, Chaudhary M I, Adu - Gyamfi J J, et al. Dinitrogen fixation and growth responses to phosphorus and aluminum application in pigeon pea (*Cajanus cajan* L.) [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1995, 41(4): 729-735.
- [11] McLachlan D R C. Aluminum and the risk for Alzheimer's disease[J]. Environmetrics, 1995, 6(3): 233-275.
- [12] 伍炳华. 铝对茶树根系钙吸收及ATP水解活性的影响[J]. 中国茶叶, 1994(4): 18-19.
- [13] 李 航. 硅钙铝交互作用对茶园土壤铝的吸附能力和活性的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [14] 段小华, 胡小飞, 邓泽元, 等. 茶叶主要化学品质指标和茶树体部分微量元素的钙铝调控效应[J]. 西北植物学报, 2012, 32(5): 988-994.
- [15] 黄 进. 硒对茶树抗氧化系统的影响及其在品种间富集特性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- [16] 阮建云, 王国庆, 石元值, 等. 茶园土壤铝动态及茶树铝吸收特性[J]. 茶叶科学, 2003, 23(增刊1): 16-20.
- [17] 谢忠雷, 李 航, 汪精华, 等. 外源有机质存在下钙铝交互作用

对茶园土壤铝的吸附能力与活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2): 293-298.

- [18] Chenery E M. A preliminary study of aluminum and the tea bush [J]. Plant and Soil, 1955(6): 174-200.
- [19] Exley C, Schneidera C, Doucet F J. The reaction of aluminium with silicic acid in acidic solution: an important mechanism in controlling the biological availability of aluminium[J]. Coordination Chemistry Reviews, 2002, 228(2): 127-135.
- [20] 廖万有. 茶生物圈中铝的生物学效应及其研究展望[J]. 福建茶叶, 1995(4): 13-17.
- [21] Konishi S, Miyamoto S, Taki T. Stimulatory effects of aluminum on tea plant grown under low and high phosphorus supply [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1985, 31(3): 361-368.
- [22] Konishi S, Miyamoto S. Stimulatory effect of aluminum on the growth of tea plants with special reference to phosphorus absorption [J]. Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 1984, 55: 29-35.
- [23] 马小雪, 肖 斌, 闫列娟, 等. 不同酸度下外源铝对茶叶铝含量及品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(11): 187-191, 196.
- [24] 段小华. 影响茶树铝循环和茶叶品质因素的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
- [25] 杨凌云, 夏建国, 吴德勇. 施铝对川西蒙山茶茶叶品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(20): 6154-6156.
- [26] 黄 媛, 段小华, 胡小飞, 等. 模拟酸雨和铝调控对茶叶主要化学品质与铝积累的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2011, 19(3): 254-259.
- [27] 王小平, 刘 鹏, 罗 虹, 等. 铝氟交互处理对茶叶品质的影响[J]. 茶叶科学, 2009, 29(1): 9-14.
- [28] 郑伟伟, 刘 鹏, 徐根娣, 等. 铝对茶叶叶片主要化学成分的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(4): 822-826.
- [29] 段小华, 胡小飞, 邓泽元, 等. 模拟酸雨和铝添加对茶树生长及生理生化特性的影响[J]. 江西农业大学学报, 2012, 34(2): 304-310.
- [30] 钟麟麟, 刘勤晋. 茶硒赋存形态的研究[J]. 茶叶科学, 1992(2): 94.
- [31] 高 柱, 蔡芸梅, 彭传斌, 等. 富硒茶叶中硒的赋存形态研究[J]. 中国食物与营养, 2014, 20(1): 31-33.
- [32] Anderson J W. Selenium interactions in sulfur metabolism[M]//de Kok L J, Stulen I, Rennenberg H, et al. Sulfur nutrition and assimilation in higher plants - regulatory, agricultural and environmental aspects. The Hague, The Netherlands: SPB Academic Publishing, 1993: 49-60.
- [33] Li H F, McGrath S P, Zhao F J. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite [J]. New Phytologist, 2008, 178(1): 92-102.
- [34] Zhang L H, Hu B, Li W, et al. OsPT2, a phosphate transporter, is involved in the active uptake of selenite in rice[J]. New Phytologist, 2014, 201(4): 1183-1191.
- [35] Zhang L H, Yu F Y, Shi W M, et al. Physiological characteristics of selenite uptake by maize roots in response to different pH levels[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2010, 173(3): 417-422.
- [36] 江福英, 张文锦. 茶叶中硒积累的研究进展[J]. 茶叶科学技术, 2014(4): 5-9.
- [37] 沙济琴, 郑达贤. 茶树鲜叶含硒量影响因素分析[J]. 茶叶科学, 1996, 16(1): 25-30.

姚礼军,胡志超,王申莹,等.花生收获机收获台研究现状与关键技术分析[J].江苏农业科学,2016,44(12):33-38.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.12.008

花生收获机收获台研究现状与关键技术分析

姚礼军^{1,2}, 胡志超^{1,2}, 王申莹², 曹明珠², 王冰², 于昭洋²

(1. 安徽农业大学工学院, 安徽合肥 230036; 2. 农业部南京农业机械化研究所, 江苏南京 210014)

摘要:收获台在花生联合收获机中起着至关重要的作用,其工作性能的好坏直接影响了机器收获质量以及后续摘果的性能。目前运用在花生联合收获机上的收获台种类形式多样,其中典型代表的是挖-拔组合式(运用在花生联合收获机上)和捡拾式(运用在花生分段联合收获机上)。总结了花生收获台的演进历程和当今国内外花生收获机收获台常见类型,分析不同结构特征,简述其工作原理,找出工作时存在的问题。同时,对农业机械领域可借鉴的相关装置进行剖析和对收获台未来发展提出相应对策与展望,以期能为今后的研究提供参考依据。

关键词:花生;联合收获机;收获台;工作原理;结构特征;设备创新;关键技术

中图分类号: S225.7⁺3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)12-0033-06

我国是世界上种植花生的主要国家之一,种植面积和产量都位于世界前列,但我国的花生收获机械水平较发达国家(如美国)相对滞后,大部分花生种植区主要还是靠人工、半

机械作业收获为主,严重制约了花生生产的发展。近年来,随着人们对机械化生产的渴求以及科研单位水平的提升,花生收获机械有了较为全面的发展,主要类型有分段收获机械和联合收获机械。分段收获是由多种不同设备分别(分段)完成整个收获作业的过程,常用的分段收获设备有挖掘犁、挖掘收获机、摘果机、复收机、捡拾联合收获机等。联合收获是指由1台设备一次完成挖掘、抖土、摘果、清选、集果和秧蔓处理等收获作业,是当前集成度最高的花生机械化收获技术^[1-2]。挖掘捡拾是花生联合收获机的重要作业环节,也是花生联合收获的关键技术,收获台的结构设计、优化以及作业参数选定直接决定了花生收获机的作业性能。目前有关花生

收稿日期:2015-11-17

基金项目:国家现代农业花生产业技术体系项目(编号:CARS-14-机械化装备);中国农业科学院科技创新工程项目;花生智能化高效联合收获关键技术与装备研究项目(编号:2016YFD0702102)。
作者简介:姚礼军(1990—),男,安徽安庆人,硕士研究生,研究方向为机械化生产技术与装备。E-mail:1002526216@qq.com。
通信作者:胡志超,研究员,博士生导师,研究方向为农业技术装备。
E-mail:zchu369@163.com。

- [38] 刘海燕,黄彩梅,周盛勇,等. 茶叶锌、硒含量变化与种植土壤差异的研究[J]. 植物科学学报, 2015, 33(2): 237-243.
- [39] 顾谦,赵慧丽,童梅英,等. 茶叶中总硒含量及其影响因素的研究[J]. 生物数学学报, 1994, 9(5): 108-113.
- [40] 汪智慧,龚加顺,郭向华. 茶树硒营养的研究进展[J]. 土壤肥料, 2000(3): 3-6.
- [41] 王雅玲,潘根兴,刘洪莲,等. 皖南茶区土壤硒含量及其与茶叶中硒的关系[J]. 农村生态环境, 2005, 21(2): 54-57.
- [42] 金建昌,许晓路. 叶面喷施亚硒酸钠对盆栽茶叶硒含量的影响研究[J]. 江西科学, 2014, 32(1): 39-42.
- [43] 胡秋藩,潘根兴,朱建春,等. 硒提高茶叶品质效应的研究[J]. 茶叶科学, 2000, 20(2): 137-140.
- [44] 李静. 不同肥料品种及其用量对茶叶产量和品质的影响研究[D]. 雅安:四川农业大学, 2005.
- [45] White P J. The pathways of calcium movement to the xylem[J]. Journal of Experimental Botany, 2001, 52(358): 891-899.
- [46] Cholewa E, Peterson C A. Evidence for symplastic involvement in the radial movement of calcium in onion roots[J]. Plant Physiology, 2004, 134(4): 1793-1802.
- [47] Yang H Q, Jie Y L. Uptake and transport of calcium in plants[J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2005, 31(3): 227-234.
- [48] 姚元涛,宋鲁彬,田丽丽. 茶树钙素营养研究进展[J]. 落叶果树, 2011, 43(2): 37-39.

- [49] 童启庆. 茶树栽培学[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [50] 林智,吴洵,俞永明. 土壤pH值对茶树生长及矿质元素吸收的影响[J]. 茶叶科学, 1990(2): 27-32.
- [51] 吴洵. 茶树的钙镁营养及土壤调控[J]. 茶叶科学, 1994, 14(2): 115-121.
- [52] 夏文娟,张丽霞,向勤程,等. 添加硫酸铝对茶园土壤部分化学性质的影响[J]. 茶叶通讯, 2005, 32(3): 8-11.
- [53] 申加枝,胡建辉. 钙过量对不同茶树品种生化成分的影响差异[J]. 山东农业科学, 2014, 46(10): 74-76.
- [54] 段小华,胡小飞,邓泽元,等. 钙对铝胁迫下茶树钙铝及部分矿质营养吸收积累的影响[J]. 江西师范大学学报:自然科学版, 2012, 36(3): 321-325.
- [55] 陈文荣,刘鹏,徐根娣,等. 施钙处理对大豆铝毒缓解作用的研究[J]. 浙江师范大学学报:自然科学版, 2008, 31(2): 201-207.
- [56] 罗虹,刘鹏,李淑. 硅、钙对水土保持植物荞麦铝毒的缓解效应[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 101-104.
- [57] Rengel Z. Role of calcium in aluminium toxicity[J]. New Phytologist, 1992, 121(4): 499-513.
- [58] Wagatsuma T, Kaneko M. High toxicity of hydroxy-aluminum polymerions to plant roots[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1987, 33(1): 57-67.
- [59] 庞贞武,师瑞红,谢国生,等. 铝、硒、硅和磷复合处理对水稻幼苗生长的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(6): 1375-1382.

收获机收获台的研究和认识还很粗浅,严重制约了设备创新水平和效率。

1 花生收获台的演进历程

在花生联合收获机研制之前,国内外农机市场、垦区、种粮大户已经出现并投入使用多种机型,其结构简单,基本上只能够完成联合收获机收获台的部分功能,但工作性能稳定,在花生收获阶段大大减少了农民的劳动强度,缩短了抢收时间。从生产应用的时间上看,基本上是经历了由花生挖掘犁、花生挖掘犁、花生复收机到现代联合收获机收获台的演变过程。

1.1 花生挖掘犁

花生挖掘犁是最早研制的花生收获机械,其思路来源于普通耕作机械,结构形式也极为相像,与小四轮拖拉机或手扶拖拉机能够协调配套使用。在工作过程中,花生果系能被完全耕起,但果土无法分离,挖掘后还需进行人工抖土、整理捡拾花生等。该犁具的产生为当今的花生联合收获机挖掘收获台提供了研制思路和理论基础^[3]。其中具有代表性的是 4HW-60 型,结构如图 1 所示。

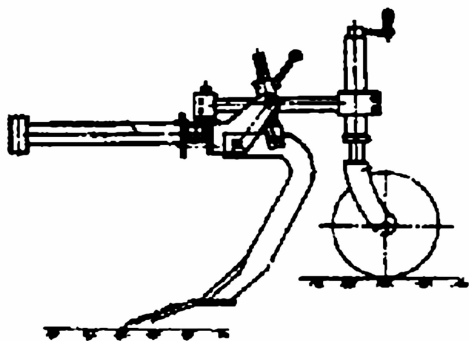


图1 4HW-60型花生挖掘犁

1.2 花生挖掘犁

花生挖掘犁相对挖掘犁功能相对齐全,能够一次性完成挖掘、抖土、抛秧铺放。根据不同地区差异,各个企业厂商、研究机构已研制并投入使用的机型种类各异,结构尺寸也不尽相同。典型机型有 4H-2 型(图 2)和 4HW-65D 型(图 3)。4H-2 型研制时间较早,结构简单,工作性能可靠;4HW-65D 型采用了链式升运结构,具有较好的抖土铺放功能,是花生联合收获机收获台的雏形^[4]。



图2 4H-2型花生收获机

1.3 花生复收机

花生复收机是在复收时使用的机器,将第 1 次收获后遗留



图3 4HW-65D型花生收获机

在土壤里的花生进行分离收获。该机型的结构与花生收获机类似,只是在结构上多出了分离装置,有助于从土壤中分离出残留的花生。由于我国大部分地区耕种模式采取的是一年两熟或是两年三熟,不适应这种复收作业,因此这种机型在我国没有得到推广,到目前为止该种机型的研制基本上停止^[5]。

1.4 花生联合收获机收获台

收获台是联合收获机的主要组成部分,由于工作原理的不同,捡拾联合收获机和花生联合收获机的收获台在结构上存在着很大的差异。在国内,随着机械化进程的加快,相关生产厂商及科研院所也相继研发出适合不同作业模式的花生联合收获机械,收获台的结构形式也随不同机器功能的需要存在相应差异。

2 国内外花生联合收获机收获台常见形式

收获台是花生联合收获机的关键装置,在降低损失率和提高作业顺畅性、性能稳定性上都具有举足轻重的作用。

2.1 联合收获机的收获台

花生联合收获装置的研究起步晚,技术有待完善。现在处于研制阶段的机型种类多样,按喂入方式分类,分为半喂入和全喂入 2 种类型。收获台的结构形式也随喂入方式的不同存在巨大差异。

台湾大地菱农业机械股份有限公司生产 TBH-3252 型自走式花生联合收获机(图 4)可以一次完成花生挖掘、拔株、夹持输送、摘果、清选、集果等作业工序^[6]。

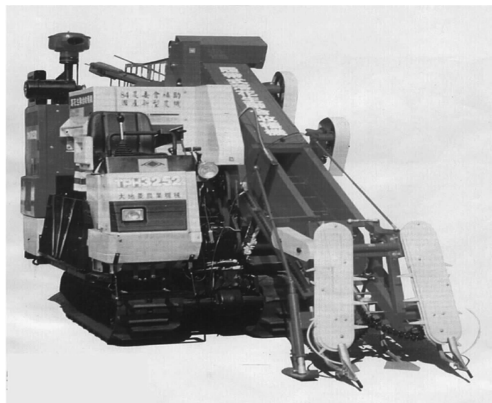


图4 4HQL-120型花生联合收获机

收获台位于机器的左前侧,结构形式与一般作物(如水稻)收获机收获台有很大差异。主要由挖掘装置、分禾装置、

扶禾装置、输送链等构成。随着机器的前进,分禾装置将松散待收的花生秧蔓向中间归拢集中,使秧蔓紧凑地进入扶禾装置,外侧的杂草或是临行秧蔓在外侧弧形分秧杆的作用下分隔开来,保证收获台夹禾的精确性。随后进入扶禾装置的秧蔓开始与 V 形张口的夹持链接触、夹紧,此时挖掘铲也开始进入土中将花生的主根铲断、松土;最终秧蔓经过 V 形区逐渐收紧,拔起带有荚果的秧蔓向后输送,进入摘果装置,完成收获台的挖-拔组合式起秧输送功能。该装置性能稳定,挖掘损失低,夹持秧蔓整齐,给摘果创造有利条件。

河南豪峰机械制造有限公司研制的全喂入 4HQL-120 型花生联合收获机(图 5)采用后置半悬挂方式与拖拉机联接,收获台工作幅宽 120 cm,挖掘铲为菱形多块组合式,铲片材料采用 65 Mn 钢,工作表面热处理至 HRC40-50,多个菱形铲片分别用螺栓固定在铲托上,更换简洁方便。针对壅土阻塞、秧蔓缠绕的问题,设计者在挖掘铲前面配置带有切秧盘的滚压限深装置,限深棍采用同挖掘铲工作幅宽等长的圆筒,工作时随拖拉机前进的同时并自身转动滚压果桔起到输导作用,避免缠绕,同时起到限深作用。在滚筒两边还设置了圆形切秧盘,其半径比滚筒半径大 60 mm,该距离保证能切断果秧及杂草,避免挖掘铲工作区外的果秧及杂草进入工作区缠绕机架^[7]。

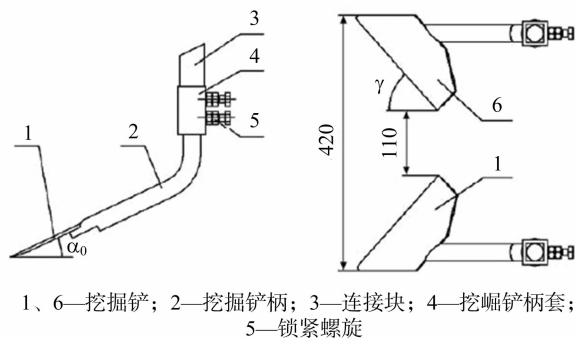


图5 4HQL-120型花生联合收获机

青岛农业大学研制的 4HQL-2 型全喂入自走式花生联合收获机行走系统采用橡胶履带式底盘,动力为 QC495L 柴油发动机,挖掘输送部件置于一侧,整体成侧向配置。在挖掘铲设计时,对主要参数(初始入土角,挖掘铲铲面与前进方向角)进行了严格限定,并且通过经大量田间试验调查与分析,最终确定初始入土角为 20°,挖掘铲铲面与前进方向形成的

滑切角为 48°(图 6)。本机采用了一种三带式夹持输送机构,通过单带和双带的重叠区实现强有力的夹持,弥补了平皮带夹持力不足的缺点。单带和双带的重叠区域控制在 0~5 mm,并且可以根据花生品种的不同进行调节^[8]。

农业部南京农业机械化研究所研制的 4HLB-2 型半喂入式花生联合收获机为近年研发出来的一种新型花生收获设备,花生植株挖掘起秧后由夹持链夹持秧蔓向后输送,完成清土和摘果作业。铲-链挖拔组合起秧是该机器收获台的关键



1、6—挖掘铲；2—挖掘铲柄；3—连接块；4—挖掘铲柄套；5—锁紧螺栓

图6 4HQL-2型全喂入自走式花生联合收获机挖掘装置结构

技术,研究团队对该类型花生起秧装置的结构设计和作业参数进行了充分优化^[9-10]。

挖掘铲的设计相对灵活,留有充足的调整空间来适应不同的作业条件,具有较好的通用性。扶禾装置采用拨指式扶禾器,与水平方向的倾斜角设计 80°,最低点距挖掘面距离 170 mm。夹持输送部件作为收获台的主要工作部件,包括夹持输送链条、主动链轮、被动链轮、压紧装置、自动张紧装置等,根据总体配置需要,扶禾速度比设计为 1.5(即扶禾速度与机器前进速度之比),夹持链条呈 35°倾斜,在这种状态下扶禾器拨指合成速度与夹持链的夹角为 82°,可实现起秧作业时花生秧蔓与夹持链近似垂直夹持状态。同时,夹持速度之比设计为 1.2(即夹持输送速度与机器前进速度之比),可实现夹持链合成速度与水平方向夹角为 92°,实现正拔作业。同时,在解析花生秧蔓扶禾运动过程的基础上,优化扶禾器拨指间距,确定了秧蔓扶禾次数和作用于一穴花生植株的拨指数的计算方法,分析了扶禾器、挖掘铲、夹持链的位置关系对起秧作业的影响,得出最佳位置参数^[11-12]。田间试验结果表明,该收获台起秧作业整齐、有序、顺畅,能够满足生产应用,田间起秧效果如图 7 所示。



图7 花生植株起秧状态

2.2 捡拾联合收获机的收获台

美国的花生机械化收获为典型的两段式收获模式,在挖

掘装置挖掘晾晒后采用捡拾联合收获机进行捡收获。该类机型均采用全喂入收获方式,收获台幅宽大,具有很高的工作

效率。

捡拾收获机的主要生产厂商有 AMADAS 公司、KMC 公司、Colombo 公司,各公司生产的机器收获台机构形式基本相似,在捡拾器的选取上大多采用滚筒弹齿式捡拾装置。同时,



图8 AMADAS公司生产具有大幅宽收获台的自走式收获机

KMC 公司采用小直径的弹齿捡拾滚筒,使捡拾花生秧时产生的冲击较小,减少捡拾过程中的损失(图 9)。为了辅助禾条的捡拾喂入,KMC 设计了几种辅助喂入装置,加装在弹齿捡拾器滚筒上方,提高了整机的工作性能。

Colombo 花生联合收获机开始运作于 2006 年,相比前 2



图9 KMC牵引式联合收获机

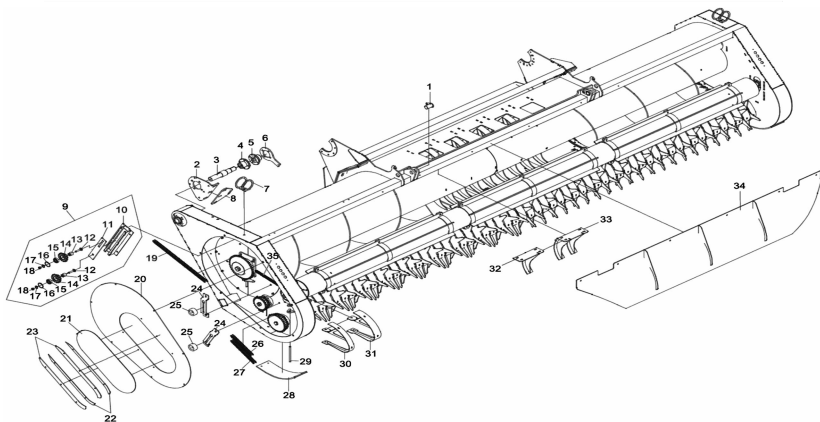


图10 Colombo公司齿流捡拾装置

我国的花生捡拾联合收获机的研究刚刚起步,代表机型是农业部南京农业机械化研究所研制的 4HL-8 型花生捡拾联合收获机。2014 年 10 月,该机在江苏泗阳完成田间试验,试验结果表明整机具有良好的适应性,工作性能优良,工作效率是半喂入两行花生联合收获机的 5~6 倍。该项技术的成功实践填补了国内空白,同时也为今后花生联合收获机的研制提供了指导方向以及科研基础。

捡拾收获台位于机器的最前端,工作幅宽 3 m,主要由行走轮、滚筒式弹齿捡拾装置、搅龙、压草器、滑草板、收获台台架等组成,如图 11 所示。在工作过程时,滚筒式弹齿捡拾机构的回转运动与机器前进方向相反,随着整机的水平直线运动,秧蔓在压草器的作用下被弹齿挑起,当运动至与滑草板处

各公司产品也有自身的创新之处,AMADAS 公司生产的收获机收获台幅宽大,拥有世界上最大生产效率的花生收获机,如图 8 所示。

家起步晚,但其产品有着自己的特点,在很多方面有独创的设计,整个收获台采用全液压驱动,能够实现灵活方便的无级变速。同时,采用更低的捡拾滚筒和双喂入搅龙,可以确保平稳、顺畅地喂入^[13-15]。在弹齿的选择上,也有较大创新,部分机型采用齿流式捡拾装置,如图 10 所示。

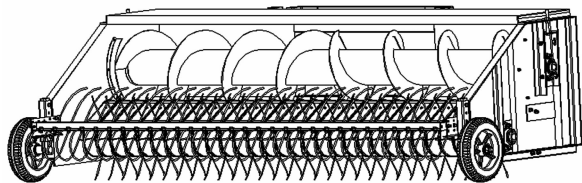


图11 4HL-8型花生捡拾联合收获机收获台

时,秧蔓与弹齿分离进入搅龙输送机,随后在搅龙的推挤作用下进入输送链输送至脱离装置,进而完成秧蔓的捡拾摘果。

3 对关键技术分析

在国内,花生联合收获机的研制起步较晚,目前研制较多

的为采用挖-拔组合式收获台的联合收获机,在技术上也取得了许多成功突破。但是,该机型对不同类型耕作农艺方式、土壤类型要求较高。而捡拾联合收获机作为分段收获的一种主要作业机械,工作方式与挖-拔组合式联合收获机有很大区别,挖掘作业由专门挖掘机挖掘铺放,再由捡拾联合收获机进行捡拾收获作业。该类型的收获台针对规模化种植模式设计,幅宽可设范围大,相对挖-拔组合收获台具有明显的优势。所以,对捡拾联合收获机收获台关键装置的分析具有重要意义。

3.1 可借鉴的相关技术

在美国,花生捡拾收获机的研制处于较高水平,产品多样,对美国本土花生品种的收获具有较好的适应性。由于我国的栽培品种、种植制度、以及生产条件与美国存在较大差异,引进的美国机型对我国花生的收获效果较差,尤其是捡拾环节也存在较大问题。如何针对国内的不同品种、地区差异、不同的作业模式,研发高效、性能优良的捡拾收获台,是研发国产捡拾联合收获设备急需解决的问题。农业机械种类繁多,研究内容丰富,与收获台相近技术的研究成果在农业机械领域得到了广泛的应用,相关研发装置可为花生捡拾收获机收获台的研究提供参考和借鉴。

3.1.1 捡拾压捆机 在国外,捡拾压捆机的研制距今有 100 多年的历史,技术成熟,研制的产品类型多,不仅可以适应于不同牧草的捡拾收获,还可以用于捡拾不同的秸秆。其弹齿滚筒式捡拾装置良好的捡拾效果和适应性对花生捡拾收获具有实际的借鉴意义^[16-17]。

弹齿滚筒式捡拾装置主要是由弹齿、弹齿杆、曲柄、凸轮盘、滚轮、滚筒护板等组成,结构如图 12 所示。滚筒盘固定在中间轴的两端,并随中间轴旋转,滚筒盘周向开有圆孔,弹齿杆用轴承正好安装在圆孔中;弹齿沿轴向并排固定在弹齿杆上,凸轮盘固定在外侧的支承板上。带有滚轮的曲柄固定在弹齿杆端部,当滚筒盘随中间轴旋转时弹齿杆也随之做圆周运动,同时端部的滚轮沿凸轮盘定向滑道滚动,以控制弹齿的运动轨迹。

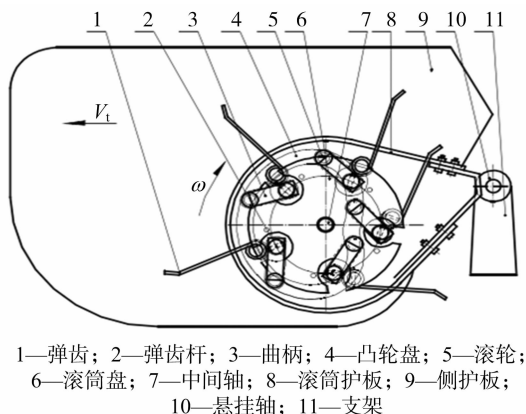


图12 弹齿滚筒式捡拾装置结构

与一般滚筒捡拾器相比,弹齿的运动轨迹主要由机器前进速度、中间轴回转速度以及凸轮盘的形状三者相互作用来确定,使其运动轨迹更加多样化。对于不同的物料以及不同作业条件,可以通过调节或是更换凸轮盘形状来适应作物捡拾,提高捡拾率,扩展机器的作业范围^[18-22]。所以,在对我

国花生种植品种的多样性以及不同地区作业方式的差异,该装置的借鉴可以提高机器的通用性。

3.1.2 油菜捡拾收获机 在 4SJ-1.8 自走式油菜捡拾收获机上运用的是齿带式捡拾装置,由于该捡拾器无缝隙,弹齿密集,触地捡拾,因此很少出现漏枝、掉棵、炸荚、飞穗、掉粒、损失率高等问题^[23],对铺形适应性好,捡拾喂入连贯、通畅。齿带式捡拾器比滚筒捡拾器质量轻,在含水率高的田块作业时通过性好,提高了作业效率。其结构如图 13 所示。

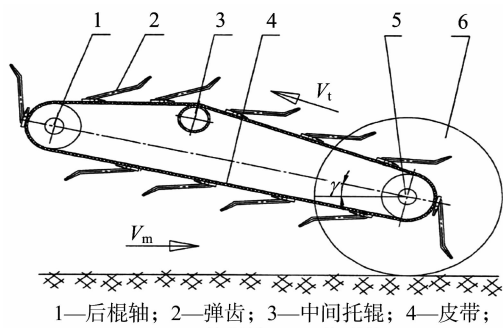


图13 齿带式捡拾器结构

该类型捡拾器较弹齿滚筒装置相比,用齿带结构代替了弹齿和滑草板,不仅简化了机械结构还减小了收获台运转时的噪音,提高了收获台工作顺畅性和可靠性,也给生产制造带来便捷。同时,弹齿与皮带的固定连接,安装紧固,可以增加弹齿横向的安装数量,缩短横向间隙,因此对捡拾矮小的谷物和条铺稀薄作物较为干净利索,落粒损失也较少,能够较好地控制捡拾率^[24-25]。

3.1.3 谷物收割机割台 在全喂入谷物联合收获机中,割台螺旋推运器的运用较为常见,装置结构紧凑,使用可靠,对谷物的喂入具有较高的均匀性,可以考虑将该装置借鉴运用到花生捡拾收获台上,改善机器运行顺畅性。

该装置主要是由螺旋和伸缩扒齿 2 个部分组成(图 14),机器运行时,螺旋将割下的谷物向中间推送至伸缩扒齿处,再由扒齿将谷物挑起流转 90°纵向送入输送装置。割台螺旋的主要参数有内径、外径、螺距和转速等,根据作物的不同,相关参数进行相关调整设置。同时,相关试验结果表明,输送的谷物不是充满螺旋叶片空间,而是一种非均匀性的输送过程,伸缩扒齿与螺旋叶片以及相关辅助叶片的使用能够很好地解决喂入不均匀性问题,提高机器工作顺畅性,为后续脱粒、清选提供有利条件^[26]。

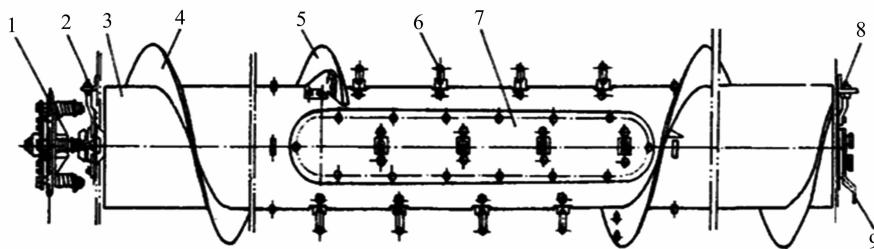
3.2 发展对策建议与技术展望

当前,花生捡拾联合收获机正处于研制和试验阶段,相关技术主要借鉴吸收国外先进技术。然而,面临国内复杂的花生品种以及耕作方式,相关技术创新不可避免。

根据我国不同地区花生种植的不同品种,系统研究收获期秧蔓和荚果的相关特性,建立完善的数据库,为收获台的设计提供数据参考,优化相关机构,提高机器捡拾率和工作顺畅性。

针对不同花生品种、土壤类型,收获台采用模块化设计,并建立相关通用标准,丰富相关装置类型,使作业生产更具明确性。

农业机械一般的工作环境相对恶劣,传统设计都缺乏精确计算,留有过的余量来保证机器的作业性能,材料和机器



1—主动链轮；2—左调节杆；3—螺旋筒；4—螺旋叶片；5—附加叶片；
6—伸缩扒齿；7—检视盖；8—右调节杆；9—扒齿调节手柄

图14 割台螺旋推运器结构

能量消耗就会出现大量的损失。因此,对收获台进行轻量化设计具有现实意义。

近年来,电子、传感、自动化等技术突飞猛进,机械的发展革新迎来了又一春天,如何将传统的农业机械与新兴技术相结合,是现在农业机械领域面临的新的机遇,应合理运用相关技术,采集分析数据,并在机器收获作业时进行实时监控调整。

4 结语

我国花生种植分布广,品种多,各地区种植条件有差异较大,对花生机械化生产提出更高的要求。研制出新型收获台,实现高效率、高适应性、高稳定性收获作业,具有重要意义。通过引进吸收国外先进技术,并借鉴国内农业机械相关技术是研制新型花生收获机械收获台的重要途径。运用电子信息、新材料、自动化等工业领域的新型技术,可为实现收获台高水平收获作业提供有力支撑^[27-28]。

参考文献:

- [1] 胡志超,王海鸥,彭宝良,等. 国内外花生收获机械化现状与发展[J]. 中国农机化,2006(5):40-43.
- [2] 王伯凯,吴 努,胡志超,等. 国内外花生收获机械发展历程与发展思路[J]. 中国农机化,2011(4):6-9.
- [3] 尚书旗,王方艳,刘曙光,等. 花生收获机械的研究现状与发展趋势[J]. 农业工程学报,2004,20(1):20-25.
- [4] 孙庆卫,王延耀,徐志瑞,等. 花生分段收获机的应用现状及进展分析[J]. 农机化研究,2012,34(1):234-237.
- [5] 程 晋. 花生收获作业机械发展现状概述[J]. 农业科技与装备,2013(2):47-48, 51.
- [6] 胡志超. 半喂入花生联合收获机关键技术研究[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2013:19-20.
- [7] 夏 放. 4HQL-120型花生联合收获机的研制与试验[J]. 农业机械,2008(4):44-47.
- [8] 尚书旗,李国莹,杨然兵,等. 4HQL-2型全喂入花生联合收获机的研制[J]. 农业工程学报,2009,25(6):125-130.
- [9] 胡志超,王海鸥,王建楠,等. 4HLB-2型半喂入花生联合收获机试验[J]. 农业机械学报,2010,41(4):79-84.
- [10] 胡志超,王海鸥,彭宝良,等. 半喂入花生摘果装置优化设计与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊1):131-136.
- [11] 胡志超,王海鸥,彭宝良,等. 4HLB-2型花生联合收获机起秧装置性能分析与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(6):26-31.

- [12] 胡志超,彭宝良,尹文庆,等. 4HL2型半喂入自走式花生联合收获机的研制[J]. 农业工程学报,2008,24(3):148-153.
- [13] 孙玉涛,尚书旗,王东伟,等. 美国花生收获机械现状与技术特点分析[J]. 农机化研究,2014(4):7-11.
- [14] Padmanathan P K, Kathirvel K, Duraisamy V M, et al. Influence of crop, machine and operational parameters on picking and conveying efficiency of an experimental groundnut combine[J]. Journal of Applied Sciences Research, 2007(8):700-705.
- [15] Kim N K, Hung Y C. Mechanical properties and chemical composition of peanuts as affected by harvest date and machine vision[J]. Transactions of the ASAE, 1993, 36(6):1941-1947.
- [16] 乌吉斯古楞. 弹齿滚筒式牧草捡拾器运动仿真及性能参数的试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
- [17] 王文明. 弹齿滚筒式捡拾装置参数分析和改进设计研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.
- [18] 王文明,王春光. 弹齿滚筒式捡拾装置参数分析与仿真[J]. 农业机械学报,2012,43(10):82-89.
- [19] 丁海泉,郁志宏,刘伟峰,等. 弹齿滚筒式捡拾装置运动学特性的理论分析[J]. 农机化研究,2015(10):76-78, 82.
- [20] 孙贵斌,孙召瑞,吴修彬,等. 基于 COSMOS Motion 的弹齿滚筒捡拾器运动仿真[J]. 农业装备与车辆工程,2010,48(8):37-39.
- [21] 乌吉斯古楞,刘伟峰,包那日那. 滚筒式捡拾器的运动仿真[J]. 农机化研究,2010,32(9):50-53.
- [22] 王国权,余 群,卜云龙,等. 秸秆捡拾打捆机设计及捡拾器的动力学仿真[J]. 农业机械学报,2001,32(5):59-61.
- [23] 吴崇友,易中懿. 我国油菜全程机械化技术路线的选择[J]. 中国农机化,2009(2):3-6.
- [24] 吴崇友. 齿带式油菜捡拾收获机设计与参数优化[D]. 南京:南京农业大学,2011.
- [25] 石 磊,吴崇友,梁苏宁,等. 油菜分段收获齿带式捡拾器的设计与试验[J]. 中国农机化,2011(4):75-78,82.
- [26] 耿端阳,张道林,王相友,等. 新编农业机械学[M]. 北京:国防工业出版社,2011:303-321.
- [27] 王东伟,王延耀,尚书旗,等. 大型花生捡拾摘果收获机的研究与分析[C]//中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集. 北京:中国农业工程学会,2011.
- [28] 陈有庆,王海鸥,胡志超. 半喂入花生联合收获损失成因与控制对策研析[J]. 中国农机化,2011,33(1):72-77.

吴孔阳,傅柏春,杨学义.我国污泥堆肥相关技术研究进展[J].江苏农业科学,2016,44(12):39-41.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.12.009

我国污泥堆肥相关技术研究进展

吴孔阳¹,傅柏春²,杨学义¹

(1. 洛阳师范学院生命科学学院,河南洛阳 471022; 2. 湖南水碧天蓝环保科技有限公司,湖南长沙 410005)

摘要:我国城镇污水厂建设普遍存在“重水轻泥”现象,导致大量污泥不能进行稳定化、无害化和资源化处理处置,我国污泥处理处置和生态环境将面临严峻挑战。简要介绍了我国污泥处理处置现状,着重就污泥堆肥相关技术进行介绍,并对污泥堆肥技术的发展方向作简要探讨。

关键词:污泥堆肥;超高温好氧;重金属;综合利用

中图分类号: X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)12-0039-03

2015 年 4 月 2 日,国务院正式发布《水污染防治行动计划》,亦称“水十条”,其中该计划明确了推进污水处理设施产生污泥处理处置的意见,并指出污泥应进行稳定化、无害化和资源化处理处置,禁止处理处置不达标的污泥进入耕地,地级及以上城市污泥无害化处理处置率应于 2020 年底前达到 90% 以上^[1]。在当前我国水环境非常严峻的背景下,出台该行动计划,将加大水污染防治力度,进一步提升污泥处理处置水平。另外,从《“十二五”全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划》数据上分析,目前我国污泥处理处置率低,任务艰巨,实现污泥的减量化、稳定化、资源化迫在眉睫^[2]。近年来国内专家学者从污泥成分、产品出路、技术法规和相关政策等方面对污泥处理处置进行了归纳分析和探讨^[3-6],本研究将主要从污泥堆肥相关技术方面介绍,以期为我国污泥处理处置相关研究提供一定的参考。

1 我国污泥处理处置现状简述

污泥是在污水进行处理之后所产生的(半)固态的物质,其中除含有水、氮、磷、钾等成分外,还含有大量病原微生物、重金属等有害有机物质^[7-8]。我国污泥处置目标不确定,投资不足,污泥在污水处理厂内未能实现稳定化处理,易在运输和处置环节出现二次污染隐患^[9]。目前我国剩余污泥处理处置工程量庞大,统计数据显示,目前污泥处理处置方式中,土地填埋占 60%~65%,发酵堆肥加农利用占 10%~15%,污泥自然干化综合利用占 4%~6%,污泥焚烧占 2%~3%,露天堆放和外运占 15%~20%,而现实环境中,绝大部分属于土地填埋、露天堆放和外运的污泥随意处置,真正实现安全处置的比例不超过 20%^[10]。

2 我国污泥处理处置技术存在的主要问题

国内对于剩余污泥的处理处置技术研究起步较晚,在技

术方面仍然很落后。已有的污泥处理处置工艺多采用国外技术,主要包括污泥浓缩、污泥稳定、污泥脱水、污泥干化焚烧、污泥卫生填埋、土地利用及其他污泥处置方法。分析我国现行污泥处理处置方式,不难发现,存在的主要问题是污泥处理处置技术尚未完全成熟,污泥高效综合利用效率偏低。即使目前开发投入使用的一些新的污泥处理技术,如“机械预浓缩—化学调理—隔膜压滤”的工艺、“泥水一体化”工艺等最终污泥处置方式仍然以填埋、做营养土或建筑材料等^[11-12]。然而污泥以填埋的方式进行处理通常不能达到无害化的要求,由于大多数的污泥填埋场是露天的,在有地表流水的情况下,没有经过无害化与稳定化的污泥很容易变成未处理前的形态,造成对环境比较大的污染隐患^[4]。此外,目前常见的污泥干化技术、焚烧技术等存在臭味难控制、占地面积大等问题^[13]。

3 污泥堆肥相关技术

根据微生物对氧气的需求,通常将污泥堆肥处理方法划分为好氧堆肥发酵和厌氧堆肥发酵。而好氧堆肥发酵又可以分为 3 种类型:条垛式发酵、槽式发酵、反应器发酵。条垛式工艺仅采用机械翻抛,充氧效果差,发酵时间长,发酵成品质量差^[14]。反应器发酵处理量较小,实际应用受限,工程应用案例少见^[15]。近年来,国内科研人员对污泥好氧堆肥工艺研究较多,且在实际工程应用中效果良好,比如桂厚瑛等研究开发的阳光棚开放槽污泥堆肥好氧发酵工艺^[16]和万若(北京)环境工程技术有限公司采用的 ENS 污泥堆肥工艺等^[17]。本研究就近年来在污泥堆肥相关技术上的研究作一概述。

3.1 调理剂在污泥堆肥中的应用

污泥堆肥化实质上是污泥中有机物在微生物的作用下,通过一系列生化反应实现有机物的转化和稳定化。自然条件下,堆肥周期长,效果差,容易导致大量氮损失等,添加调理剂可以很好地改善传统堆肥方法的不足。张晶等开展了利用稻草、木屑和麸皮作为调理剂进行室内城市污泥堆肥模拟试验的研究,结果发现白腐真菌能够提高堆体的温度、真菌数量、纤维素酶和半纤维素酶活性水平,降低氮素损失,促进硝态氮累积,全面提高堆体有效 N、P、K 含量^[18]。研究发现调理剂添加量对污泥堆肥过程温度和氧气变化也会产生影响,

收稿日期:2015-10-31

基金项目:河南省高等学校重点科研项目计划资助(编号:15A180050)。

作者简介:吴孔阳(1985—),男,河南商城人,博士,讲师,主要从事微生物学方面研究。E-mail:kywu2007@126.com。

马闯等研究了不同锯末调理剂添加量对污泥堆肥过程中温度和氧气变化的影响,结果表明,污泥和锯末以质量比 3.5 : 1 或 4 : 1 的比例可以进一步提高堆体升温速率,缩短达到高温好氧发酵所需温度的时间,延长堆体维持高温的天数^[19]。另外,调理剂粒径对污泥堆肥影响同样不容忽视。吴传栋等研究发现,新型可循环 LWK 调理剂的平均粒径为 30.8 mm 时,调理剂能够明显降低污泥堆体的氮素损失^[20]。在堆肥化过程中,氨挥发是高温好氧堆肥过程中氮素损失的主要途径^[21],研究发现以沸石作为调理剂可以显著降低氨挥发累积速率^[22]。

3.2 污泥堆肥过程中臭气的控制

污泥堆肥过程中释放的恶臭气体已成为制约堆肥无害化生产的主要因素。恶臭气体来源于堆肥过程中产生的挥发性有机物,包括含硫化物、含氮化合物和挥发性脂肪酸,组分复杂,消除这些气体较为困难。研究发现污泥成分及理化性质差异会影响堆肥过程中臭气的产生和排放,比如碳氮比、pH 值、含水率、颗粒度、有机质含量和微生物含量等^[23]。研究人员开展了对污泥堆肥过程中氨气排放特征的研究。钟佳等通过原位观测,研究了不同条件下机械翻堆条垛污泥堆肥过程中氨气的排放特征,结果表明强制通风+机械翻堆条垛工艺(ATP)条件下氨气排放因子略低于机械翻堆条垛工艺,并认为 ATP 是一种环境友好的污泥堆肥工艺^[24]。赵晨阳等研究了连续流强制通风槽式污泥堆肥工艺的氨气排放特征,结果发现较低的碳氮比虽小幅增加了氨气的排放量,却有助于减少总氮损失(试验组 16.1%,对照组 21.8%),并且采用“初期降低,末期升高”的通风方式,可以减少氨气累积排放量(试验组 66.86 g/m²,对照组 72.04 g/m²)^[25]。

目前有关污泥堆肥过程中臭气处理方法主要有物理方法、化学方法和生化方法,其中生化除臭方法具有效率高、成本低和环保等优势,成为近年来发展较快、应用较广的主要工艺^[26]。韩萌在研究蚯蚓堆肥处理污泥工艺中,探讨了以蚯蚓粪为主要填料的生物过滤器去除堆肥臭气的可行性,分别研究了容积负荷、载气类型、填料组成、温度等工艺条件对生物过滤器处理性能的影响,当在最适技术参数条件下,氨气去除率可达到 100%,生物过滤器能够有效去除氨气^[27]。陈益清等考察了菌剂挂膜、活性污泥挂膜和自然挂膜形成的生物滴滤塔对 H₂S 去除的影响,结果表明采用活性污泥挂膜形成的生物滴滤塔处理 H₂S 的能力比菌剂挂膜和自然挂膜的高,硫的转化率高达 60%^[28]。另外对原有生物除臭滤池填料的升级和改造,也是研究人员关注的问题,如果出现生物除臭滤池填料老化,会影响实际除臭效果。深圳深南电环保有限公司将原生物滤池除臭系统中的树皮填料更换为炭质生物媒填料,恶臭气体净化彻底,极大地改善了周边环境空气质量^[29]。

3.3 污泥堆肥过程中重金属形态变化的研究

污泥来源不同,重金属成分及含量差别较大,污泥中的重金属问题一直是污泥堆肥产品农用的主要因素之一,研究污泥堆肥过程中重金属形态及其生物迁移规律具有重要意义^[30-31]。诸多研究发现污泥堆肥过程中,一些重金属总量和化学形态结构发生明显改变,其可交换态比例会减少,生物有效性降低,比如重金属 Cd^[31-33],但也有与之相反的研究结果,孙西宁等发现除 Cd 外,经过堆肥化处理后所有重金属的

有效态含量均呈下降趋势。造成这种结果上的差异,很可能是由不同研究人员所采用的原料及堆肥工艺所致。另外王社平等以不同种类及不同比例的调理剂处理后形成的污泥堆肥成品为材料,采用顺序提取法分析堆肥、种植小白菜前后重金属形态的变化,研究表明污泥经过堆肥处理后,堆料中重金属 Cu、Zn 的 X-(KNO₃+H₂O)态含量降低,能达到重金属钝化的目的,减少生物毒性^[34]。文献[34]提及 X-分布为 KNO₃、H₂O、NaOH、EDTA、HNO₃ 提取态或残渣态(Residuat); Sposito 浸提法认为 X-KNO₃ 态和 X-H₂O 态为植物最易吸收的形态,称之为生物有效态,故原引用文献的作者将其合为 X-(KNO₃+H₂O)态。尽管研究表明,经过污泥堆肥工艺后,污泥中重金属含量降低,并能够符合相关控制标准,但是连续过量利用这种污泥,势必造成重金属在土壤中的累积和植物体的富集^[35]。

3.4 发展中的污泥堆肥新技术

污泥厌氧堆肥通常运行周期长,实际应用同样受限,研究人员开发了微生物燃料电池型厌氧堆肥技术,利用生物产电加速污泥有机物利用,且效果明显^[36-37]。杨文卿等采用自制的好厌氧堆肥综合反应器系统进行污泥厌氧堆肥实验,可以在 21 d 内完成一个堆肥周期,且堆肥过程各指标变化规律性强,堆肥效果稳定^[38]。

北京绿源科创环境技术有限公司联合中国科学院于 2013 年研发出超高温污泥好氧发酵技术,与普通高温好氧堆肥工艺相比,超高温污泥好氧发酵技术优势明显,二者比较见表 1。超高温好氧发酵堆肥技术可以实现堆体持续超高温发酵,达到深度污泥稳定化和无害化目的,极大地提高污泥发酵质量和效率,这对于好氧发酵技术在污泥处置上的推广应用具有极为重要的现实意义^[39]。

表 1 超高温污泥堆肥与普通高温污泥堆肥比较^[16]

项目	超高温好氧发酵	普通高温好氧发酵
最高温度	100℃以上	70℃
发酵周期	15~20 d	20~30 d
发酵后含水率	20%左右	40%左右
污泥减量效果	>75%	50%~60%
污泥稳定化	GI≥80%	GI≥60%
臭气	主要为氨气,无恶臭	氨气、硫化氢、二氧化硫及烷烃类气体,有恶臭
初始 C/N	(6~8):1	(20~35):1
病原体灭杀率	>99%	≥95%
外界环境温度	无影响	有影响

4 展望

长期以来,我国农田大量施用化肥,土壤酸化板结问题突出,通过施用有机肥,可以不断改良土壤。今后对有机肥的需求量将会不断增大,经污泥堆肥技术处理的有机肥,如果能够符合土地利用的要求,那么对于污泥资源化利用来说,无疑是一种理想的选择。因此,要进一步提高污泥堆肥的产品质量,解决污泥中重金属、臭气等问题。

要全面实现污泥的稳定化、无害化和资源化处理处置,今后还有很长的路要走。就污泥堆肥技术而言,尽管我国开展了许多相关研究,并在实际工程应用中取得一定成果,但是仍

然存在一些问题,比如污泥堆肥产品的质量及出路问题。国外城市污泥土地利用的比例均在不断提高,而我国因加工成本较高、溢价能力有限,以及管理部门的谨慎态度,使得城市污泥在土地利用上受到一定的限制^[3]。随着污泥堆肥相关技术研究的深入以及国际交流合作的推进,将逐步改善现有堆肥方法的不足或提高堆肥产品的质量,彻底解除目前堆肥过程中存在的难题。同时,通过管理部门出台污泥土地利用相关法律法规,消除污泥产品对公众的担忧,积极引导污泥堆肥产品进入土地利用,开辟资源循环利用新道路。

参考文献:

- [1] 国务院. 国务院关于印发水污染防治行动计划的通知[J]. 水政水资源,2015(3):14-21.
- [2] 国务院办公厅. “十二五”全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划[J]. 中国环保产业,2012(6):4-13.
- [3] 刘洪涛,张悦. 国情背景下我国城镇污水厂污泥土地利用的瓶颈[J]. 中国给水排水,2013,29(20):1-4.
- [4] 苏宏智. 我国城镇污泥处理处置技术探讨[J]. 科技致富向导,2015(8):143.
- [5] 阮辰昉. 我国污泥处理处置产业发展的方向性思考[J]. 净水技术,2015(S1):1-3.
- [6] 姜玲玲,孙荪. 我国污泥处理处置现状及发展趋势分析[J]. 环境卫生工程,2015,23(3):13-14.
- [7] 余庚星. 剩余污泥处理处置现状及资源化利用技术[J]. 科技致富向导,2015(18):150.
- [8] 周宏品. 污水处理厂污泥处理处置现状分析及建议[J]. 江西建材,2015(18):98.
- [9] 戴晓虎. 我国城镇污泥处理处置现状及思考[J]. 给水排水,2012,38(2):1-5.
- [10] 张大群. 污泥处理处置适用设备[M]. 北京:化学工业出版社,2012.
- [11] 龚根平,魏玉芹,黄新颖,等. 佛山南庄污水处理厂“交钥匙”工程的设计及调试运行[J]. 轻工科技,2015(8):99-100.
- [12] 王蓉. “泥水一体化”污泥处理处置技术研究[J]. 广东化工,2015,42(11):173-174.
- [13] 白莹,张天石. 污泥生物干化/好氧堆肥工艺应用实践[J]. 环境保护科学,2014,40(5):77-80.
- [14] 李光. 污泥好氧发酵工艺对比[J]. 中国资源综合利用,2013,31(3):26-27.
- [15] 李国学,张福锁. 固体废物堆肥化与有机复混肥生产[M]. 北京:化学工业出版社,2000.
- [16] 桂厚英,彭辉,桂绍庸,等. 污泥堆肥工程技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2015.
- [17] 张健,赵媛,吴溶,等. ENS污泥堆肥工艺及应用实践[J]. 中国给水排水,2011,27(6):21-24.
- [18] 张晶,鲁娟,孙学成,等. 接种白腐菌对城市污泥堆肥效果的影响[J]. 湖北农业科学,2015,54(11):2601-2605.
- [19] 马闯,李明峰,赵继红,等. 调理剂添加量对污泥堆肥过程温度和氧气变化的影响[J]. 浙江农业学报,2015,27(4):631-635.
- [20] 吴传栋,王科,李伟光,等. 调理剂投配比及粒径对污泥堆肥的影响研究[J]. 哈尔滨商业大学学报:自然科学版,2014,30(3):275-278.
- [21] Delaune P B, Moore P A Jr, Daniel T C, et al. Effect of chemical and microbial amendments on ammonia volatilization from composting poultrylitter[J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33(2): 728-734.
- [22] 许俊香,刘本生,孙钦平,等. 沸石添加剂对污泥堆肥过程中的氨挥发及相关因素的影响[J]. 农业资源与环境学报,2015,32(1):81-86.
- [23] 赵占楠,赵继红,马闯,等. 污泥堆肥过程中挥发性有机物(VOCs)的研究进展[J]. 环境工程,2014,32(11):93-97.
- [24] 钟佳,魏源送,赵振凤,等. 污泥堆肥及其土地利用全过程的温室气体与氨气排放特征[J]. 环境科学,2013,34(11):4186-4194.
- [25] 赵晨阳,魏源送,葛振,等. 连续流强制通风槽式污泥堆肥工艺的温室气体和氨气排放特征[J]. 环境科学,2014,35(7):2798-2806.
- [26] 陈俊,高定,陈同斌,等. 城市污泥堆肥厂臭气控制途径[J]. 建设科技,2010(21):41-43.
- [27] 韩萌. 水产品加工厂污泥堆肥产气特征及其臭气控制[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.
- [28] 陈益清,尹娟,蔡旺峰,等. 不同挂膜方式生物滴滤塔处理含H₂S恶臭气体[J]. 环境工程学报,2014,8(8):647-651.
- [29] 蒋惠敏,李辉,严平. 炭质生物媒填料在污泥干化除臭系统改造工程中的应用[J]. 给水排水,2014,40(8):44-47.
- [30] Liu Y, Ma L, Li Y, et al. Evolution of heavy metal speciation during the aerobic composting process of sewage sludge[J]. Chemosphere, 2007, 67(5):1025-1032.
- [31] 葛骁,卞新智,王艳,等. 城市生活污泥堆肥过程中重金属钝化规律及影响因素的研究[J]. 农业环境科学学报,2014,33(3):502-507.
- [32] 雷勋杰,曾正中,苟剑锋,等. 污泥堆肥化过程中重金属Cu、Zn、Cd的生物有效性研究[J]. 环境工程,2014,32(6):109-113.
- [33] 林云琴,周少奇. 城市污泥好氧堆肥过程中重金属的形态转化[J]. 生态环境,2008,17(3):940-943.
- [34] 王社平,程晓波,姚岚,等. 城市污泥堆肥及农用前后重金属形态变化的研究[J]. 中国农学通报,2015,31(23):116-121.
- [35] Lakhdar A, Iannelli M A, Debez A, et al. Effect of municipal solid waste compost and sewage sludge use on wheat (*Triticum durum*): growth, heavy metal accumulation, and antioxidant activity[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2010, 90(6):965-971.
- [36] 于航,姜珺秋,赵庆良,等. 微生物燃料电池型厌氧堆肥系统处理脱水污泥[J]. 哈尔滨工程大学学报,2013,34(8):1045-1051.
- [37] 黄更,姜珺秋,赵庆良,等. 生物产电加速厌氧堆肥污泥降解及产电性能[J]. 浙江大学学报,2013,47(5):883-888.
- [38] 杨文卿,黄旭方,卓倩,等. 一种新型可控堆肥反应器系统的快速厌氧堆肥研究[J]. 环境工程学报,2012,6(9):3329-3333.
- [39] 刘永跃,周顺桂,许宜北,等. 一种污泥超高温好氧发酵方法及其应用:中国,201310670909.3[P]. 2014-04-02.