

小型农场、社区单位和家庭 的堆肥实践

王丽艳 乔玉辉 魏雨泉 阮征



致 谢

瑞士发展合作署（瑞发署）发起并资助了此活动，在城郊农场、社区和家庭开展有机废弃物堆肥。瑞发署感谢北京一分地农场的堆肥实践，并为本报告提供了相关信息。瑞发署特别要致谢中国农业大学的教师和学生，在新冠疫情特殊时期完成了堆肥和土壤采样及实验室测试分析工作。实验室测试结果，以及与农大乔玉辉教授带领的团队的深入讨论，为报告提供了坚实基础。瑞发署亦赞赏自然之友，积极倡导垃圾减量与分类；还有一直以来积极推进家庭厨余堆肥的北京农夫市集。

目 录

1. 概要	1
2. 农场、社区与家庭的堆肥实践	2
2.1 瑞发署有机堆肥项目背景	2
2.2 一分地农场简介	3
2.3 一分地农场堆肥实践	4
2.4 瑞士使馆堆肥实践	5
2.4.1 波卡西桶发酵 --- 尝试处理城镇家庭厨余	5
2.4.2 1立方小型堆肥	6
3. 堆肥及发酵产物分析	7
3.1 堆肥采样及测试方法	7
3.2 实验室测试结果分析	8
3.2.1 堆肥过程温度变化	8
3.2.2 理化指标	9
3.2.3 与氮转换有关的参数	10
3.2.4 影响土壤健康的参数	11
3.2.5 其他指标	12
3.2.6 波卡西发酵液肥测试结果	12
3.3 几点建议	13
4. 堆肥施用	13
4.1 堆肥在瑞士使馆的使用	13
4.2 一分地农场堆肥施用	14
4.3 一分地农场堆肥实践成本效益分析	14
5. 展望	15
参考文献	16

图表索引

图 1: 中国与北京城市垃圾增长趋势	1
图 2: 颜老师在一分地堆肥活动现场	2
图 3: Fuchs 先生给国际生在田间讲解	2
图 4: 一分地农场的小型翻耕机	3
图 5: 一分地农场开展堆肥经验分享活动	3
图 6: 稻壳 (左)、碾碎的树枝 (中) 和 蘑菇棒废弃物 (右)	4
图 7: 堆肥过程管理	5
图 8: 铲车翻堆	5
图 9: 王丽艳在介绍波卡西桶发酵堆肥	6
图 10: 瑞士使馆的堆肥箱	6
图 11: 堆肥过程温度变化曲线	9
图 12: 堆肥产物含水率	9
图 13: 堆肥产物电导率	9
图 14: 堆肥产物 pH 值	9
图 15: 堆肥产物含盐量	9
图 16: 堆肥产物养分含量	10
图 17: 堆肥样品的有机质含量	11
图 18: 堆肥产物腐殖质组分及胡富比	11
图 19: 堆肥产物的发芽率	12
图 20: 瑞发署花园植物	13
表格 1: 每个堆肥/发酵堆的详细信息	7
表格 2: 测试液肥参照的相关标准	8
表格 3: 波卡西桶发酵液肥测试结果	12
表格 4: 施用堆肥后棚内外土壤养分对比 (依据土壤肥力分级标准, 绿色、湖蓝色、黄色和红色分 别表示高、中高、中等和低级养分水平)	14
表格 5: 堆肥前后运行成本 (每个大棚每年)	15

缩写

农大	中国农业大学
EC	电导率
FiBL	有机农业研究所，瑞士 Frick 镇
农业部	农业农村部
住建部	住房和城乡建设部
发改委	国家发展与改革委员会
瑞发署	瑞士发展合作署(www.deza.ch)

1. 概要

中国自 2004 年便成为世界上最大的垃圾生产国，如今日均固体垃圾生产量达 4 亿吨，并还在以每年 8% 的速度增长。世界银行对全球发出预警，按现有速度增长，到 2050 年全球垃圾将增长 70%，达到 34 亿吨（Silpa Kaza, 2018）。



图 1：中国与北京城市垃圾增长趋势

随着经济的快速发展和人群消费水平的日益增长，中国城市固体废物增长迅猛，如图 1 所示。在城市固体废物中，像中国和印度这样的发展中国家，有机垃圾占比通常超过 50%；而这一数字在瑞士这样的发达国家只有 30~40%。中国国家统计局数字显示，目前有机垃圾主要通过填埋（52%）和焚烧（45%）两种方式处置，堆肥处理没有相关数据。

面对这种形势，2017 年国务院重申“城市居民垃圾分类”工作的重要性，并得到了国家发展与改革委（发改委）和住房与城乡建设部（住建部）的响应。垃圾分类要落实居民垃圾管理，实现减量、资源化利用和无害化处理的最终目标。

虽然发布了相关规定，但在实际生活中，有机垃圾、特别是城镇家庭产生的有机垃圾，并没有完全做到对环境友好的处置。根本原因是缺乏操作层面的法律法规，鼓励垃圾无害化处置。公众环保意识低。公众和社区缺乏有关垃圾分类和利用垃圾进行堆肥的知识。有机垃圾是大自然的一部分，理应通过资源化利用回归土壤。现有各种资源化利用技术，比如堆肥即被视为将有机垃圾转化为腐殖质的最好方法。堆肥能够最终减少垃圾焚烧或填埋的数量。

近些年，中国政府高度重视生态农业发展，制定了到“2020 年实现化肥和农药零增长”的目标。推进农业废弃物资源化利用，以有机肥替代化肥，得到了政府大力支持。堆肥——将秸秆等农业废弃物和牲畜粪便转化为有机肥，是减少农业废弃物、改良土壤的有效措施。

回顾中国农业生产的历史，堆肥在小农户中曾非常普及。只是在近三四十年的农业生产，为追求产量，传统堆肥逐渐被丢弃，让位于化肥。其结果是土壤质量下降、病虫害高发和杀虫剂的广泛使用。意识到化学品过量投入对环境和生态的负面影响，农民开始回到使用有机肥和堆肥的道路上来，以期从根本上长期改善土壤健康。

考虑到城市有机垃圾的数量，中小农户生产中产生的农业废弃物，瑞士发展合作署发起了有机废弃物堆肥项目，旨在减少总的垃圾生产量，通过堆肥技术，实现有机废弃物资源化再利用。

2. 农场、社区与家庭的堆肥实践

2.1 瑞发署有机堆肥项目背景

为探索解决中国城镇家庭厨余垃圾问题，和相当数量城郊中小农场农业垃圾的资源化利用，瑞发署启动了有机垃圾堆肥项目，旨在通过利用有机垃圾部分，减少垃圾总量，从而改善土壤健康。项目设计有两方面：

成果 1：选择社区和农场，试点有机垃圾堆肥

成果 2：宣传项目成果，提高公众意识，影响相关政策

为实现上述目标，瑞发署与一分地农场合作（农场介绍见后），开展各种堆肥实践。此外，瑞发署牵手自然之友，在北京启明幼儿园组织了一场启动活动，帮助幼儿园利用其新鲜厨余和园内树枝等园林垃圾进行堆肥。瑞士使馆也开展了类似堆肥实践，并对堆肥结果进行了测试。由于各种原因，原计划在社区开展的家庭厨余堆肥活动未能按计划实施。然而，瑞发署王丽艳博士自 2018 年一直在家践行博卡西桶堆肥，并影响了瑞士同事。本报告也提供了利用博卡西桶堆肥产生的液肥的测试结果。



图 2：颜老师在一分地堆肥活动现场



图 3：Fuchs 先生给国际生在田间讲解

项目实施过程中有幸得到如下三个专家团队的悉心指导，方使项目取得了扎实的成绩：

颜嘉城老师，朴门永续讲师，于 2019 年 5 月首先受邀来到一分地农场。他先后两次考察了一分地和周边农场，不仅对堆肥给予了现场指导，也对农场大棚种植和蔬菜防病抗病给予了宝贵建议。

Jacques Fuchs 先生，来自瑞士有机农业研究所的堆肥专家，他应邀给中国农业大学的研究生讲解堆肥课程。利用他来华工作机会，2019 年 10 月瑞发署邀请 Fuchs 先生考察了一分地农场。Fuchs 先生针对一分地农场在堆肥实际操作中遇到的各种问题一一给了解答和现场指导，包括堆肥原料选择与配比、翻堆注意事项、肥堆温度和湿度的控制、堆肥施用、堆肥场地以及堆肥产物的堆放存储等。

中国农业大学**乔玉辉**老师和她的团队，受瑞发署委托，乔老师和她的团队对一分地农场堆肥进行了跟踪指导，并对堆肥产物和农场施用堆肥前后的土壤进行采样、实验室测试和分析。农大的工作为本报告核心内容奠定了基础。

2.2 一分地农场简介

一分地农场位于京北昌平，拥有 120 亩玫瑰园、50 亩温室蔬菜大棚，另有 50 亩地主要种植鲜食玉米。北京周边六个郊区大约有 600 来个这样的中小型农场，面积在 50~200 亩，主要种植蔬菜水果，以供北京市民为主。



图 4：一分地农场的小型翻耕机

土壤健康。暖棚在夏季也会轮流进行闷棚。此外，北京冬季温度低，也有助于杀死冷棚内可能残留的虫卵。

成立于 2012 年的一分地农场一直走在有机种植的道路上。一个大棚每年大概使用 800 公斤鸡粪和 400 公斤羊粪。鸡粪约每吨 700 元，羊粪约每吨 400 元，价格中主要是运输费，羊粪来自 600 公里外的内蒙，鸡粪来自 200 公里外的河北。



图 5：一分地农场开展堆肥经验分享活动

一分地农场拥有 20 个塑料冷棚和 15 个砖墙暖棚，每个大棚占地约 1 亩。冷棚采取轮作生产，一年四级可提供茄子、黄瓜、西红柿和叶类菜等。暖棚只在秋冬季节种植蔬菜。在七、八月份的夏季，棚内温度过高，无法种植蔬菜。农场充分利用这两个月的时间：在五月份采收后，在棚内撒播玉米种子。两个月后，待这些玉米长到一米高左右，直接把他们和鸡粪、石灰等混合，然后盖上塑料薄膜。土壤温度在七八月可以升到 60 度以上，可杀灭土壤中残留的虫卵。一分地一直采用这种“闷棚”操作来维持

毕业于中国农业大学的总经理阮征在其农场职业生涯中对生态种植技术一直孜孜以求。在瑞发署堆肥项目的感召下，阮总决定在他的农场试验堆肥。自项目 2019 年 5 月启动以来，先后在农场举办了 4 场知识分享和经验交流活动，包括朴门永续讲师颜嘉城先生的两次到访，瑞士堆肥专家 19 年 10 月的考察。

2.3 一分地农场堆肥实践

何为堆肥？

堆肥是微生物分解堆肥原料中的有机质，将有机质转化为具有改善土壤结构和生物活性的腐殖质，从而使土壤和植物对疾病更具耐受力的生物过程。

影响最终堆肥品质的因素很多：堆肥原料要有合适的碳氮比，确保堆肥自然启动；堆肥过程管理，即控制肥堆温度和湿度，以及完全腐熟堆肥的保存。

一分地尝试使用了几种不同的堆肥原材料：



图 6：稻壳（左）、碾碎的树枝（中）和 蘑菇棒废弃物（右）

碳元素丰富的堆肥原料有：

- 含有 20%马粪的稻壳是最多使用的堆肥原料。稻壳来自一个马场，马场定期需要更换新鲜稻壳，所以非常愿意无偿向一分地提供换下来的稻壳。一分地需要支付每吨约 300 元的运输费；
- 农场产生的玉米秸秆；
- 农场里的树枝，粉碎成 2~3 厘米长度。瑞士专家 Jacques Fuchs 建议购买另一种能将树枝碾得更薄，而不仅仅是切碎的机器，那样表面积会增加，更加有益于堆肥。

氮元素丰富的堆肥原料有：

- 河北外购的鸡粪。北京禁止养殖家禽和牲畜；
- 农场生产和生活中一年到头产生的蔬菜秧子、蔬菜尾菜和垃圾；
- 为试验而添加的尿素。

总之，获取堆肥原材料的便捷性和价格是决定堆肥实践能否在经济上可持续开展的两个最为重要的因素。堆肥启动原料的最佳碳氮比是 30，但很难精确做到。在实际操作中，农夫应努力达到一个合适的碳氮比范围，即 25~35，并学会根据降解过程适时添加碳元素或氮元素，调整碳氮比。

堆肥技能是可以、也会通过实践逐步提高。在一分地农场，堆肥通常在冬天农活相对轻松的时候进行。其他季节，农夫要忙于农活。开始尝试的几个肥堆大小只有 4 个立方，这对于生产好的堆肥产品有些小。在瑞士专家现场指导后，后来的肥堆大约 2 米宽、1.8 米高、5~6 米长，也即有 15~20 立方大小。堆肥场地在两个温室大棚中间的空地。



图 7：堆肥过程管理



图 8：铲车翻堆

堆温度和湿度是影响分解过程的两个主要因素。温度一般在堆肥后 2~3 天就可以升到 60 多度，并可以保持几天，然后慢慢下降。温度下降到 40 度左右就应该进行翻堆。翻堆后温度会再次升高。也会发生温度超过 65 度，甚至达到 70 度的情况，这需要通过翻堆、加水等避免。根据不同堆肥原料，堆肥全过程一般需要 3~4 个月的时间才能将有机垃圾完全降解。

肥堆湿度应控制得恰到好处，即用拳头紧握堆肥没有水滴落下，张开手又不散开。湿度过低，生物分解过程可能会停止；湿度过高又可能出现不利于堆肥的厌氧环境，还会释放难闻的氨水味道。翻堆非常重要。由于翻堆工作繁重，堆肥开始几个月后，一分地农场决定租用铲车来翻堆，这样既节省了人力，翻堆也更高效。

除了露天堆肥，为了比较和积累经验，一分地还进行了如下尝试：

- a) 应一家私营堆肥伙伴请求，一分地尝试了棚内堆肥。棚内堆肥的优点是大棚采收后可以立即使用蔬菜秧子。但一方面由于私营公司催要堆肥产品，另一方面一分地不想耽搁了下一茬蔬菜的种植，棚内堆肥只进行了一个多月的时间。（本报告中对应于 2 号堆肥）
- b) 稻壳在露天自然堆放一年，以检验在自然堆放条件下的堆肥效果，其中一堆加了尿素，分别对应于本报告中的 6 号和 7 号堆肥。

每一个肥堆的大小、原料及配比、堆制时间等详细信息见下一章的表 1。

2.4 瑞士使馆堆肥实践

作为推广有机垃圾堆肥实践的发起者、倡议者和协调者，瑞士大使馆做了如下两种堆肥实践：

2.4.1 波卡西桶发酵 --- 尝试处理城镇家庭厨余

波卡西桶堆肥由日本和台湾传入中国，并在一群城镇环保热衷者中流行。波卡西在日语里是“有机物发酵”的意思。严格地讲，这不是有氧堆肥，而是厌氧发酵。发酵原料最好是家庭新鲜蔬菜水果垃圾。这些生物垃圾放入所谓的波卡西桶，每次放入

这些绿色垃圾后可加入有效微生物菌群，即 EM 菌以促进发酵。依据新鲜有机垃圾产生的多少，大约需要一至两个月填满一个 20 升的桶。在这一过程中，会产生一种黄色或淡褐色、有些发酵味道的“液肥”。波卡西桶装满后放置两个星期，半发酵的厨余垃圾表面会有一层白毛，这时可以把他们埋入花园或农场土壤，在土壤里继续完成后续的堆肥。把这种半发酵的厨余垃圾添加到 8 号堆肥中，证明是很好的启动剂，可以在冬天加速堆肥原材料以碳元素丰富的落叶为主的堆肥进程。



图 9：王丽艳在介绍波卡西桶发酵堆肥

市场上有几种波卡西桶生产商，提供 10 升和 20 升的堆肥桶，和相应的 EM 菌。观察到此种特殊堆肥方式的流行和人群对其的热衷，本项目的发起者王丽艳博士自行采购了两个桶，并自 2018 年开始在家里实践。在她的影响下，瑞士使馆的同事购买了另一品牌的波卡西桶练习堆肥。为了了解波卡西桶产出的液肥的营养和有机质水平，使馆将液肥样品送往农大测试，结果对应于本报告样品 10。

应该认识到，波卡西桶和 EM 菌的质量直接影响这种发酵方法的成功与否。即使发酵成功，其在社区的推广应用也受很多因素限制： a) 大多数城镇居民不会自愿投资购买波卡西桶和 EM 菌； b) 在家里使用波卡西桶非常苛刻，因为要将新鲜绿色有机垃圾从其他厨余中严格地分离出来； c) 对于没有自家花园的城镇家庭无法消纳半发酵的新鲜厨余。需要进一步结合社区垃圾管理，探索波卡西堆肥在社区持续开展的路径。

随着北京 2020 年开始实施城市固体废物分类，厨余垃圾已经从其他垃圾中分离出来。城市需要很好地规划设计其固废管理系统，以处理大量的厨余垃圾。

2.4.2 1 立方小型堆肥



图 10：瑞士使馆的堆肥箱

瑞士使馆还尝试了另一种利用落叶和树枝、适合适合社区、幼儿园或学校的堆肥方法。落叶和小的树枝收集后堆放到 1 个立方的木箱中。这种堆肥方法一般 11 月份秋末初冬季节进行。由于 11 月份缺乏干预，紧跟着圣诞和新年假期，堆肥并没有启动。在 2020 年 1 月加入两桶波卡西发酵的有机垃圾，并加水以增加肥堆的水分，肥堆温度才开始上升到 60-65 度。翻堆后检测到第二次升温接近 60 度。在第三次翻堆后，温度不再上升，维持在 40 度上下。此后，没有再进行翻堆。堆肥产物也送去检测，对应于堆肥 8 号样品。

3. 堆肥及发酵产物分析

3.1 堆肥采样及测试方法

为了解和不断提高堆肥质量，也为了让一分地在使用堆肥时更有把握，瑞发署委托中国农业大学对堆肥样品进行了采样和实验室测试。

1 号到 7 号肥堆分别采取 3 到 5 个堆肥样品，8 号堆肥样品和 10 号波卡西发酵液肥样品由瑞士使馆送到农大。9 号堆肥样品仅做了测试，其堆肥原材料是某公司餐厅厨余，堆肥方法估计是利用厌氧发酵设备，但具体发酵时间和发酵方法不得而知。应公司要求，本报告隐去其名称。

表 1 给出每个采样测试堆肥/发酵堆的详细信息：

表格 1: 每个堆肥/发酵堆的详细信息

编号	堆肥原料	配比	体积 (m ³)	堆肥开始至采样之间的天数
1	稻壳, 玉米秸秆, 鸡粪	1:1:1	4	75
2	稻壳, 玉米秸秆, 鸡粪 温室大棚内堆肥, 并利用了收货后的西红柿秧	1:1:1	4	55
3	稻壳, 玉米秸秆, 鸡粪 +树枝	1:1:1: 1	4	40
4	树枝, 鸡粪	5:2	4	45
5	树枝, 尿素	50:1	4	45
6	稻壳、尿素, 露天静置一年	50:1	16	380
7	稻壳, 露天静置一年	1	16	380
8	枯枝落叶 +波卡西半发酵家庭生厨余	10:1	1	210
9	公司餐厅厨余垃圾	-	-	-
10	波卡西发酵蔬菜+水果生厨余	1:2	0.02	7~15

目前中国还没有针对农场有机垃圾和家庭厨余堆肥的评价标准。农大参照如下标准进行实验室测试分析：

对于样品编号 1~8 参照 NY/T3442-2019：牲畜粪便堆肥技术规范，测试了如下几组参数作为评价堆肥质量、腐熟度和稳定性的指标。我们把这些参数按照他们对土壤的功效而不是物理化学特性分成 4 组，尽管这样分组从学术角度不一定正确：

- 1) 理化参数：含水率、电导率、含盐量及酸碱度 pH 值。这些参数相对简单，从不同方面反映了堆肥品质。这组参数主要受堆肥起始原料的影响。
- 2) 与氮转换有关的参数：全氮、速效氮（铵态氮及硝态氮），全磷和速效磷作为养分也放在这里。堆肥过程管理会影响氮的转化，即硝化和反硝化。硝态氮和铵态氮比例反映堆肥腐熟度和堆肥产品的稳定性。
- 3) 影响土壤健康的参数：把有机质和腐殖质与其他参数区别开来，是因为他们具有中长期改善土壤结构和土壤健康的特殊功效。富里酸、胡敏酸、胡敏素以及胡敏酸和富里酸的比例也进一步做了分析。

4) 发芽率：作为反映堆肥毒性的指标也做了测试，确保堆肥可以安全使用。

采样和测试共进行了两轮。第一轮对应肥堆编号 1~5 是在堆肥实践初期，肥堆只有 4 个立方。第二轮对应一分地农场肥堆编号 6 和 7，只有 1 个立方大小，因为一分地农场只是想看看，稻壳自然放置一年会发生什么，其中一堆加了少许尿素。此外，瑞士使馆堆肥样品 8 号，公司餐厅厨余发酵样品 9 号，以及波卡西发酵得到的液肥编号 10，都送往农大进行测试和分析。测试虽然参照同一标准，但两轮测试的参数不尽相同。第一轮测试更注重堆肥养分指标，所以没有测试含盐量；第二轮测试着重无害化指标，因而没有测试含水率。主要指标测试结果可以进行横向比对，得出一些初步结论。堆肥原料和过程管理肯定会影响堆肥产物和测试结果。另外，采样时机、采样地点以及从采样到测试之间的时间间隔，还有测试方法也多少会影响测试结果。为减小这些影响因素，农大做了 3 份采样，分别测试并取平均数，具体见后续章节。

对于波卡西发酵产生的液肥，因为尚没有国家标准，只好参照了如下几个不同的标准：

表格 2：测试液肥参照的相关标准

指标	参照标准
pH 值	NY/T 1973
总碳	NY 525-2012 有机肥行业标准
总氮和总磷	GB/T 17767.1：有机-无机复合肥料测定方法：总氮含量 GB/T 17767.2：有机-无机复合肥料测定方法：总磷含量
铵态氮和硝态氮	HJ666-2013 水质：氨氮的测试
化学需氧量	GB11914-89 水质：化学需要量的测试

3.2 实验室测试结果分析

3.2.1 堆肥过程温度变化

堆肥 1~5 号的温度做了记录，如图 11 所示。

堆肥中的温度和湿度是影响分解过程的两个主要因素。温度是一分地农夫唯一能测试的东西，据此农夫判断何时该进行翻堆。一个大致的准则是，肥堆温度下降，就该翻堆了。湿度虽可以测量，但一分地农夫基本是在实践中利用经验来掌握，即把堆肥捏在拳头里，没有水滴滴落。湿度应保持在 50%左右，因为过高的湿度，肥堆会进入厌氧条件，应予以避免。过低湿度，微生物会停止工作，堆肥会停止。过高或过低的湿度情况在堆肥管理中都应避免。

堆肥原料初始碳氮比和湿度控制合适的话，肥堆堆好后两三天，肥堆温度就可以升到 60 度以上，这是堆肥过程的**升温阶段**，此阶段细菌会首先分解堆肥原料中的糖分、蛋白质。每次肥堆温度开始下降后，就可以考虑翻堆操作。翻堆后，温度会再次上升。翻堆如果不够均匀充分的话，会影响温度抬升，这大概是肥堆 1 号的情况，第一次翻堆应该早点做。室外温度不会如我们想象的那样有多大影响。肥堆 1~5 号都是在 2019-2020 冬季堆制的，虽然起始时间略有不同。这就是**高温阶段（55~65 度）**，可以杀灭病原体，还有草籽。在头两个月翻堆 4~5 次后，温度会降下来，半木质化和木

质化物质开始被分解，这个阶段叫**冷却阶段**。此后尚需要 2 个月左右的时间，木质化纤维才会被完全降解和分解，即所谓的**腐熟阶段**（André W.G. et al, 2016）。一分地农场的经验是在腐熟期，每两周翻一次堆。

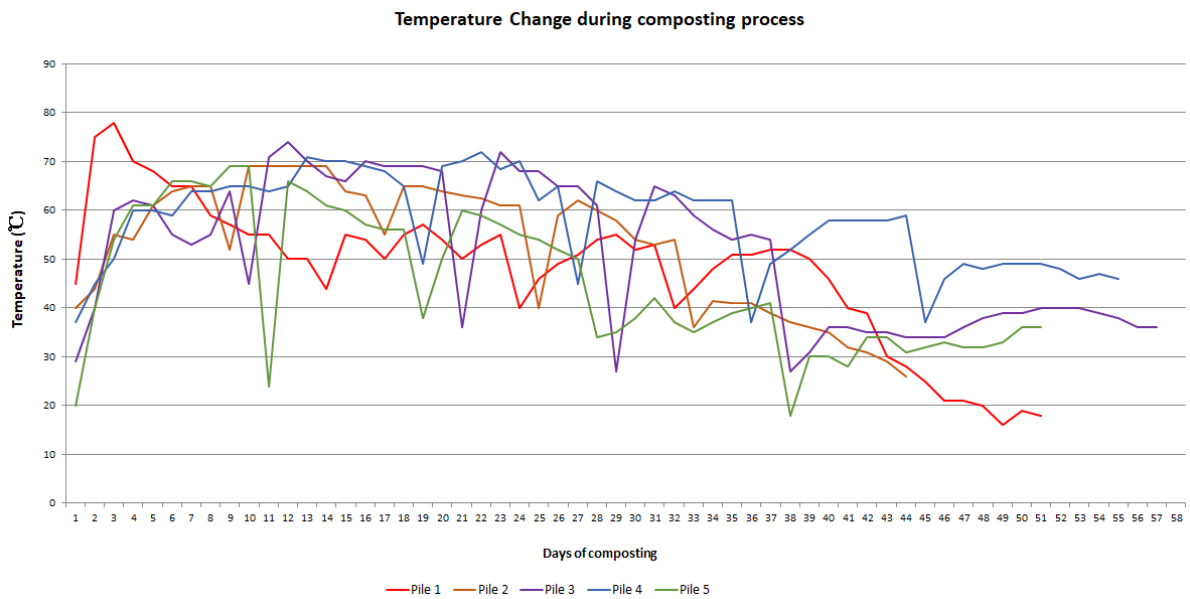


图 11：堆肥过程温度变化曲线

3.2.2 理化指标

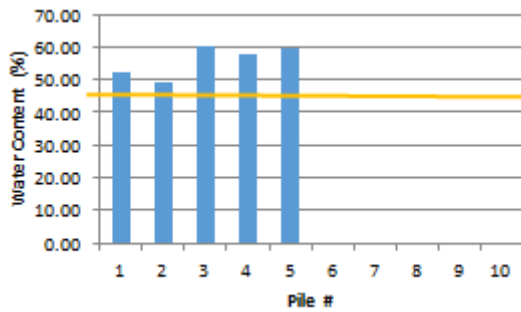


图 12：堆肥产物含水率

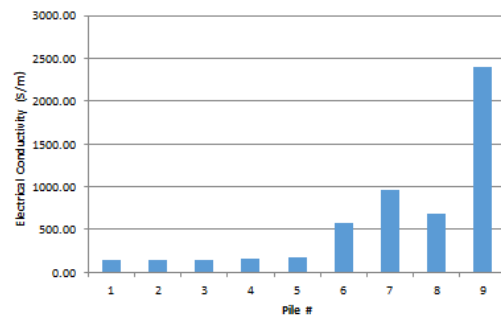


图 13：堆肥产物电导率

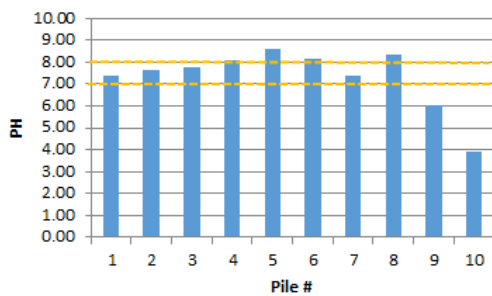


图 14：堆肥产物 pH 值

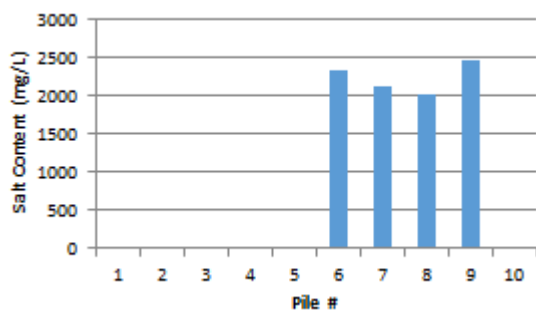


图 15：堆肥产物含盐量

含水率和电导率测试结果见图 12 和 13。黄线是标准给出的参考值，完全腐熟的堆肥含水率应在 45% 以下。堆肥 1~5 采样时间是在开始堆肥后的一到两个月，堆肥还没有完全完成，所以他们的含水率都高于标准给出的参考值。

电导率反映了氯离子、硝酸根、铵根和硫酸根的离子活动水平。第一轮堆肥 1~5 的测试结果均高于堆肥 6~9，后者采样时堆肥相对更完熟。私营公司堆肥产物的电导率不知何故出奇地高。

堆肥样品的 pH 值和含盐量见图 14 和 15。酸碱度图中的黄线是标准给出的参考范围，即堆肥产物应呈弱碱性，pH 值在 7~8 的范围。5 号堆肥产物 pH 值达到 8.5，可能与添加尿素有关。测试结果表明，私营公司堆肥产物 pH 值未达标，其含盐量也是几个堆肥样品中最高的，这大概与厨余中高的盐分有关。

波卡西发酵得到的液肥 pH 值低于 4，意味着这种液肥必须稀释 50~100 倍才能用于植物，这与波卡西桶生产商的建议一致。然而，最小稀释倍数并不太确定。

3.2.3 与氮转换有关的参数

图 16 给出所有堆肥产物的养分含量。第二轮没有测试总磷和速效磷。测试结果表明，所有堆肥产物养分都比较丰富，差异不大，除了私营公司 9 号堆肥的全氮水平远超出其他样品。有两点特别需要指出：

- 1) 堆肥养分水平与堆肥原材料有关。堆肥过程管理影响堆肥腐熟度。相比，速效氮中硝态氮占比更重要，因为硝态氮是植物能够吸收的形式，硝酸盐比例越高，说明堆肥腐熟程度和后期储存管理越好。第二轮测试结果，铵盐含量都不低，有可能因为堆肥完熟后保存不当，出现了反硝化现象。
- 2) 堆肥的价值并不在养分水平，而是下一节介绍的生物功能，因为那是其他有机或无机肥料不具备的东西。

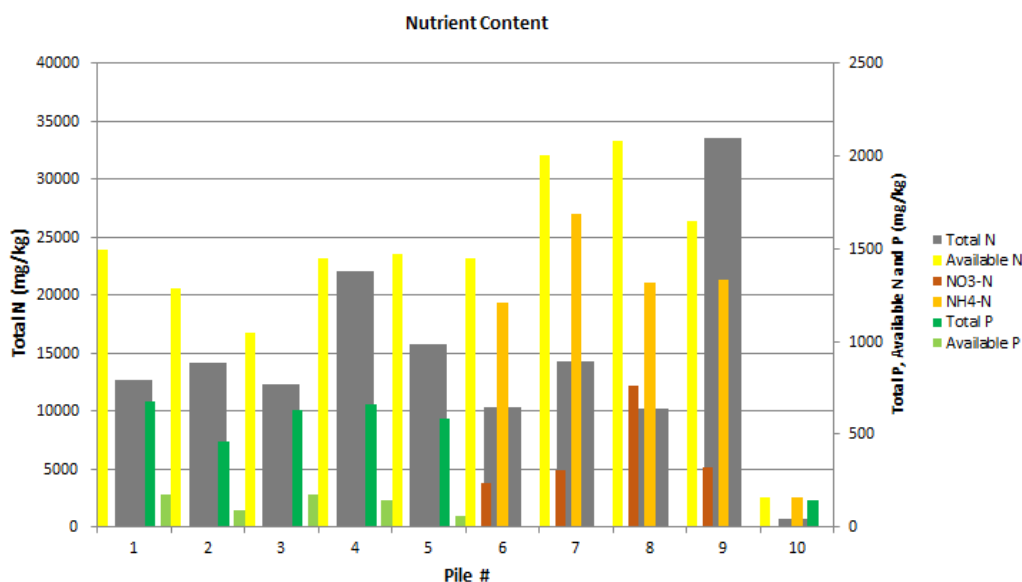


图 16: 堆肥产物养分含量

液肥的养分水平也放在这里，但因为标准不同和固体液体差异，并不具备可比性。可以看到的是，液肥里速效氮和总磷丰富，即养分很容易被植物吸收。液肥的更多测试指标见 3.2.6 节。

3.2.4 影响土壤健康的参数

堆肥能够提供化肥无法提供的有机质和腐殖质。有机质和腐殖质不仅能够提高土壤肥力，更能够改善土壤健康，使土壤和作物具有更好的抗病能力。堆肥腐熟度会影响腐殖质及其组分含量。测试结果表明，所有堆肥产物的有机质和腐殖质含量分别超过标准规定的 30% 和 20% 水平，说明堆肥产物生物活动水平良好。堆肥样品 1~3 号尚未完全腐熟，如果完全腐熟进行测试，结果应该更好。肥堆 8 号的有机质水平略低，这是由于堆肥主要原料是落叶的缘故。

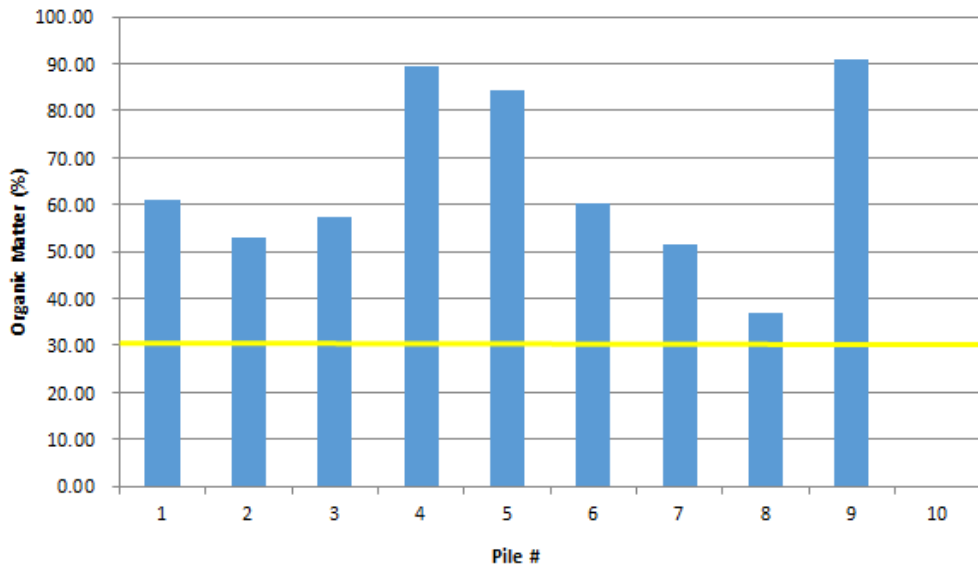


图 17：堆肥样品的有机质含量

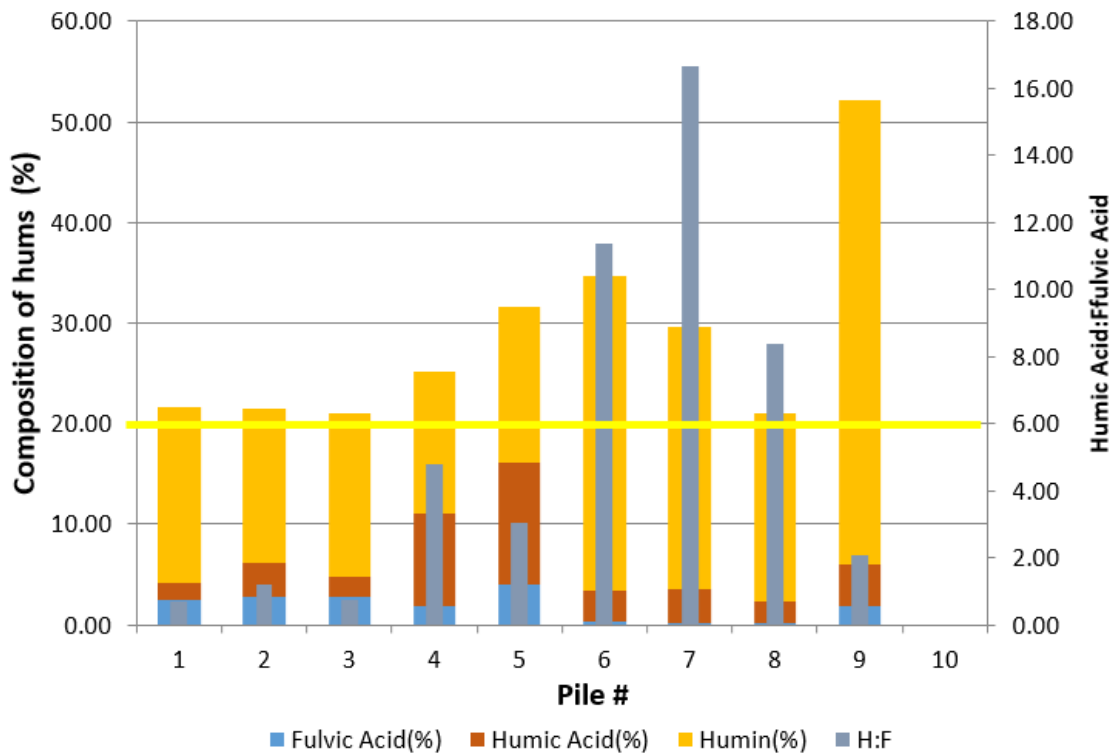


图 18：堆肥产物腐殖质组分及胡富比

进一步对腐殖质中的富里酸、胡敏酸和胡敏素进行了测试分析。胡敏酸和富里酸占比（胡富比 H:F）能够更好地反映堆肥品质，胡富比越高，堆肥品质越好。肥堆 1~3 号胡富比偏低，显示堆肥尚未腐熟。堆肥 6~8 完全腐熟则有较好的胡富比。特别要指出的是，私营公司堆肥产物的养分、有机质和腐殖质虽然都很高，但胡富比很低，这也反映出其堆肥过程比较差

3.2.5 其他指标

发芽率是检测堆肥产物品质和安全性的一个重要指标。所有堆肥发芽率的测试结果见图 19。8 号堆肥的发芽率最好、大于 80%，可以安全使用。这或许是因为 8 号堆肥在测试的时候已经堆制了 200 余天，基本完成了堆肥过程。9 号堆肥发芽率最差、不足 40%，不能直接施用。再考虑到 9 号堆肥的酸性 pH 值和高盐分，可以判定，9 号堆肥不适宜使用。

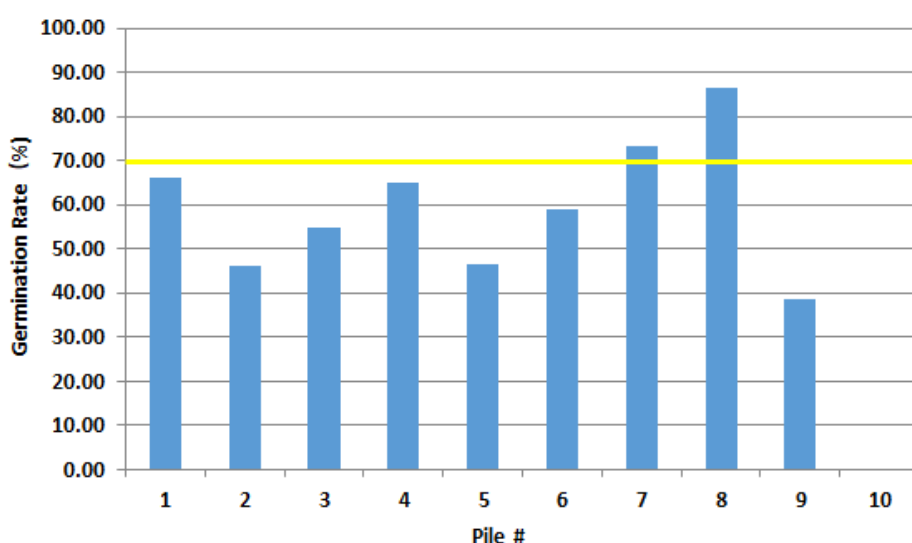


图 19：堆肥产物的发芽率

3.2.6 波卡西发酵液肥测试结果

波卡西发酵液肥参照了前述不同的测试标准，测试结果如下：

表格 3：波卡西桶发酵液肥测试结果

总碳 g/L	化学需氧量	pH 值	电导率 us/cm	全氮 mg/L	铵态氮 mg/L	硝态氮	总磷 mg/L
18.36± 0.04	358862±30	3.93±0.01	1283±167	758±30	163.23±0.50	1.00±0.07	148±4

波卡西发酵得到的液肥养分还是比较丰富的，特别是总磷和速效氮含量相对都比较高。化学需氧量非常高，说明微生物菌群活跃，但不确定是否是有益于土壤的菌群。

然而，液肥 pH 值只有 3.93，在施用于植物前需要稀释 5~100 倍。项目只收集了一个液肥样本，而且来自一个质量不甚令人满意的波卡西桶。要得出有说服力的结论，还需要测试其他波卡西桶发酵的液肥。

3.3 几点建议

从瑞发署资助的有限的项目活动中，可以给出如下几点初步建议：

- 1) 堆肥应确保一定天数的高温阶段，55 度以上 3 周，或 65 度左右一周（André W.G. et al, 2016），以杀灭各种虫卵、病原体和草籽。但要通过翻堆、加水、曝气等控制温度不超过 70 度。
- 2) 堆肥一般都需要 2~4 个月的时间才能腐熟，这与堆肥原料和堆肥过程管理有关。堆肥品质好坏更多地看其腐熟度，即腐殖质及其组分、发芽率等指标，而不仅仅是养分含量。
- 3) 氮元素丰富的堆肥原料会得到高的养分，有利于短期提高土壤肥力。但碳元素丰富的堆肥原料能够长时间保留在土壤中，对土壤健康有益。因此，为了长期固碳作用，建议一分地继续探索使用树枝作为堆肥原料堆肥。
- 4) 堆肥原料碳氮比对于堆肥很重要。单独使用枯枝落叶堆肥会很慢。加入一些新鲜绿色有机垃圾会有帮助，如 8 号堆肥案例。8 号堆肥综合指标都不错，值得在有花园的学校、公司、机构和社区进一步推广。
- 5) 在所有堆肥产品中，9 号堆肥表现最差。这家私营公司收集食堂厨余垃圾并进行堆肥的初衷应该给予肯定。但其堆肥设备可能只是一部加热设备，起到烘干厨余的作用，并不是真正意义上的堆肥，因为微生物分解需要 2 到 4 个月更长的时间。
- 6) 就堆肥原料而言，鸡粪含有高的氮磷钾，非常适宜。玉米秸秆富含碳元素。考虑到这些原料的可获得性和成本，建议一分地继续按照 1:1:1 比例使用稻壳、玉米秸秆和鸡粪堆肥。也可以尝试按照 2:1 或 3:1 比例，使用玉米秸秆和鸡粪堆肥。

4. 堆肥施用

4.1 堆肥在瑞士使馆的使用



图 20：瑞发署花园植物

瑞发署有一个 100 平米左右的花园。2020 年春天，瑞发署员工在花园里种植了西红柿、茄子、辣椒、生菜等。波卡西发酵液肥稀释后是地里唯一施用的肥料。收成不算太差。这次愉快的体验为发展都市农业提供了启示，是改善城市人居环境、改变居民生活方式的一次有益的尝试。

4.2 一分地农场堆肥施用

农场生产的堆肥主要用于温室大棚的基肥和追肥。在施用堆肥前，每个大棚每年平均施用 800 公斤鸡粪和 2 吨羊粪。施用堆肥后，羊粪不再施用。等量的鸡粪不是以有机肥的形式施到地里，而是作为堆肥主要原料，最终以堆肥的形式回到土壤。初步估算，2020 年温室大棚大约施用了 300 吨堆肥。

为了解堆肥施用效果，测试采取大棚内 5 个土壤样品，大棚外 2 个土壤样品作为比较参照。使用过堆肥的大棚刚采收了西红柿。作为参照的大棚外土壤从未施过任何肥料。测试结果平均后见表 4。

表格 4: 施用堆肥后棚内外土壤养分对比 (依据土壤肥力分级标准, 绿色、湖蓝色、黄色和红色分别表示高、中高、中等和低级养分水平)

	含水率 %	pH	有机质 %	全氮 mg/kg	速效氮 mg/kg	硝态氮 mg/kg	铵态氮 mg/kg	速效磷 mg/kg	速效钾 mg/kg
棚外	8.08	7.36	2.82	1460.5	48.06	40.33	7.73	25.71	103.36
棚内	7.87	7.4	3.08	2323.0	315.02	307.6	7.35	56.59	174.25

测试结果令人欣喜:

- 堆肥施用前后含水率和酸碱度变化不明显，均属于中性土壤；
- 棚内土壤有机质水平即使在种植一茬西红柿后依然高于棚外，都属于中高级水平；
- 棚内外土壤全氮水平都非常高，棚内是棚外的 1.6 倍。棚内硝态氮是棚外的 8 倍，显示种植西红柿后，土壤仍有较高的速效氮水平；
- 棚内速效磷和速效钾水平分别是棚外的 2.2 倍和 1.7 倍。

总之，施用堆肥后，土壤有机质、全氮、速效氮、速效磷和速效钾都大幅提高，表明堆肥能够改善土壤肥力，提高养分和有机质，但这也可能与棚内土壤长期施用有机肥有关。遗憾的是，棚内土壤施用堆肥前没有做采样测试。前已述及，堆肥对土壤环境的改善是一个中长期的过程。

4.3 一分地农场堆肥实践成本效益分析

一分地农场自 2019 年开始堆肥。没有做成本效益分析之前，一分地认为农场运行成本一定增加了，因为要额外采购堆肥原料、堆肥耗用了双倍的劳力、租用叉车翻堆、以及近一万元购买树枝粉碎设备。应瑞发署请求，一分地对堆肥施用前后实际运行成本做了一个初步估算，结果却出乎意料。

施用堆肥前，一分地每年每个大棚花费约 1760 元，包括 400 元劳动成本和 1360 元外购的鸡粪和羊粪。施用堆肥后，每年鸡粪花费不变。需要额外 120 元从合作马场购买稻壳，另外 100 元购买木屑以增加堆肥原料中的碳元素。劳动力成本翻倍。每年花费 4800 元租用叉车翻堆，平均到每个大棚每年大概 140 元。乍一看，感觉运行成本该是增加了。但是不要忘记，施用堆肥后，农场不再施用羊粪，每个大棚每年节约了大概 800 元。考虑 5 年设备折旧期，树枝粉碎机器的购置成本分摊到每个大棚每年约 50 元。这样算下来，农场施用堆肥后成本并没有增加，与堆肥前基本持平。

表格 5: 堆肥前后运行成本 (每个大棚每年)

堆肥前	鸡粪	羊粪	劳动力				
1760	560	800	400				
堆肥后	鸡粪	马场稻壳	劳动力	木屑	玉米秸秆	租用叉车	树枝粉碎机器
1770	560	120	800	100	0	140	50

施用堆肥的效益却是多方面的:

- 从中长期看, 土壤有机质和养分将提高, 土壤健康得到改善, 必将增强土壤和作物的抗病能力;
- 健康的土壤将生产出高质量的产品, 长远来看有助于提高农场效益;

这些效益在短期内或许不甚明显, 但已经足以让一分地下决心, 把堆肥进行下去。

5. 展望

中国政府确定了促进绿色生态农业发展的长期战略。自 2019 年 1 月 1 日起, 《中华人民共和国土壤污染防治法》颁布实施。该法规定, 每个组织和个人都有保护土壤、防治土壤污染的义务。为实现“2020 年化肥农药零增长”的目标, 政府提供补贴, 鼓励以有机肥替代化肥。尽管在中国农业生产的历史长河中, 堆肥曾经非常普及, 但在现代化农业发展的今天, 堆肥远没有成为改善农业生态的主流做法和解决方案。

在中国城郊地区有大量的中小型农场, 产生大量的农业废弃物。在畜禽业密集的地方, 动物产生的粪便对环境 and 生态产生诸多负面影响。利用农业废弃物和动物粪便进行堆肥, 可以很好地利用这些农业废弃物, 促进农业废弃物资源化循环再利用, 减少其对环境和生态的污染。

中国也需要一个像瑞士有机农业研究所这样的公认机构, 为堆肥提供指导, 确保堆肥品质, 使其得到安全和适宜的应用。需要制定一个国家或部门性的指南, 规范堆肥原料、合适的碳氮比、工艺管理及其堆肥施用。

对国内相关政策效果进行分析将很有意义, 比如评估化肥农药零增长目标下, 环太湖农业垃圾资源化利用对太湖水体和周边生态的改善。

2019 年, 中国政府颁布了国家战略, 在全国推行垃圾分类, 上海、北京、杭州、西安等成为首批试点城市。住房和城乡建设部在《关于在重点城市推进生活垃圾分类工作的通知》中进一步强调, 强制推行餐厨垃圾分类。处理城市固废, 尤其是大量的餐厨垃圾, 具有挑战性, 需要用系统的方法设计一套高效的的城市固废管理体系。

波卡西发酵的有效性和安全性仍需进一步研究和实践。农大采用的不同测试标准目的不同, 只得到一些物理和化学参数测试结果。遗憾的是, 波卡西发酵最突出的生物特性没能测量。半分解的绿色生厨余埋入土壤后的功效也需要评估, 以得出更有把握的结论, 再行推广。另外, 波卡西发酵方法对公众环境意识要求高, 需要得到社会认可。类似的方法在西班牙、印度和台湾都有成功的应用, 值得在中国社区进一步尝试。

参考文献

André W.G, van der Wurff, Jacques G. Fuchs, Michael Raviv and Aad J. Termorshuize, (2016), Handbook for composting and compost use in organic horticulture

EAWAG Policy Brief, (2017), Biowaste Management: the key to sustainable municipal solid waste management.

Silpa Kaza, Lisa Yao, Perinaz Bhada-Tata, and Frank Van Woerdan (2018), What a Waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050.