

微营养素技术与生物滤池和天然介质过滤相结合的污水处理系统的全规模中试研究

杜思源

江门市赛科环保科技有限公司 广东 江门 529000

摘要: 在过去的十年中,许多发展中国家开展了一系列低成本废水处理研究。在农村和离网地区的污水处理方面,关于蚯蚓过滤 (VermiFilter - VF) 和人工湿地 (Constructed Wetlands - CWs) 等天然介质过滤 (Natural Media Filtration - NMF) 技术的研究较多。

在本研究中,我们主要是采用微量营养素技术 (Micronutrient Technique - MNT)、蚯蚓过滤 (VF) 和天然介质过滤 (NMF) 的综合技术,建造一个处理能力为 10m³ (10 吨) 的污水处理中试池,并将该技术命名为“MVN”。MVN 技术是一种低成本、中效、无污泥产生、无异味的污水处理系统,是农村和离网应用的一种很好的替代处理方法。

本项研究为期长达 18 个月,旨在确定 MVN 技术在废水处理过程中的有效性。从本次中试的研究结果发现,采用 MNT 工艺可以提高污水处理的产量和效率,并有利于促进污水处理和循环利用。也有研究表明,使用 NMF 和 VF 技术并不能抑制 MNT 的有效性。

关键词: MNT- 微量营养素技术; NMF- 天然介质过滤; VF- 蚯蚓过滤; COD- 化学需氧量; BOD- 生物需氧量; TSS- 总悬浮固体; O&G- 油脂

1.0 引言

打鼓岭岭英公立学校成立于 1949 年,位于香港新界北区大鼓岭乡郊农村地区。它曾是附近几个村庄唯一的教育机构。1958 年,在当时现有学校中正式成立为公立学校 (简称 - LYPS)。虽然自 1980 年代以来农业活动和农村人口有所减少,但在这种情况下,该学校入学人数依然不减,得以幸存下来并继续蓬勃发展。

LYPS 现在是打鼓岭区的唯一一所现代化乡村学校,约有 450 名学生。2015 年 9 月,新大楼落成,以适应近年来入学人数的增长,如图 1 所示。

学校 (包括新大楼) 位于郁郁葱葱的绿树丛中,没有连接到公共污水管网。学校所在地没有污水或废水处理系统。相反,盥洗区和厕所产生的废水被收集在校园不同地方的污水收集池和化粪池中。这种设计就像香港郊区的许多其他设施一样,是 50 年前的标准排水系统之一,此后一直没有得到改进。

在开展这个项目之前,目前的做法带来了几个环境挑战:

1、一部分未经处理的废水流入附近的农田,造成土壤和水质污染。

2、定期清空污水收集箱并进行维修的费用很高。随着入学和访客人数增加,学校每 2-3 周需支付一次服务费用。此外,服务成本还会随着通货膨胀而上升。

3、污水储存池区域有恶臭。

4、因为唯一的水源是可口淡水,可用于所有场合,包括冲厕所和灌溉。在一个缺水的世界里,这是一种浪费的

做法。



图 1. 打鼓岭岭英公立学校鸟瞰图和现场 MVN 系统

现有的“小规模”或“零污泥或低污泥”的成套处理装置,如 RBC (旋转生物接触器)、MBR (膜生物反应器)、MBBR (移动床生物膜反应器) 等,资金和运营成本都太高。对于学校来说,难以管理,同时也占用了学校很多宝贵的设施空间。本课题的重点是分析与过滤技术集成相关的 MNT 和 MVN 的有效性。与传统的厌氧消化相比,采用 VF 和 NMF 技术的 MNT 工艺可以提高生产效率,从而表明了该试点研究的有效性。(Pali Sahu 等人,2015 年)

1.1 微量营养素技术原理 (Micronutrient Technique - MNT)

MNT 技术是一种基于植物的有机微量营养素化合物 (见表 1),已被证明能刺激好氧、厌氧和兼性细菌。MNT 技术的应用非常灵活,无需考虑污水处理厂的规模,也可以是污水贮留池或化粪池设施。有研究表明 MNT 的活性成分可显著提高污水处理厂的微生物活性和代谢率,同时保持、改善废水质量 (如减少污泥) (J.E.Burgess 等,1999) (论文 # 1、2 & 3.2020)。微生物活性的增强与需要处理的生物固体数

量的减少直接相关，这种情况体现在将 MNT 混合物添加到进水口的工厂中。污水中 MNT 的存在可通过以下方式加速污水的生物转化。

这些生长因子分为四大类：氨基酸、嘧啶、维生素和矿物质。(J.E.Burgess et.al 1999) (论文 # 1 2020)。

以下是处理废水的典型混合物。不同的 MNT 组分的相对浓度和比例已被明确设计为刺激兼性厌氧菌(表 1)，并且已在生物柴油和特种纸工业污水处理厂的两个成功案例研究中进行了实验。(论文 #2 & 3, 2020, 2020)。

表 1. 典型的 MNT 混合物

组件	化学式	含量 (%)	
		最小值	最大值
七水合硫酸锌	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	3	4
一水硫酸锰	MnSO ₄ ·H ₂ O	2	3
(水溶性) 蛋白		2.3	3.3
苯甲酸	COH ₅ COOH	0.2	0.5
5- 羟甲基糠醛	C ₆ H ₆ O ₃	0.2	0.5
羟基丁二酸	C ₄ H ₆ O ₅	0.2	0.5
水	H ₂ O	87.4	82.5
MNT 成分总量%	/	100	100

MNT 通过使微生物获得关键的微量元素来刺激兼性细菌种群，兼性细菌种群负责水解废水进水中的浑浊物和其他生物固体。在使用 MNT 的处理池中，生物固体能被更完全和快速的水解。而水解步骤是许多污水处理池生物去除固体的限速步骤。

MNT 促进固体水解有以下几个现象可以证实，首先是使用 MNT 的工厂中浑浊物积累的消失。以及随着时间的推移，贮水池和污水贮留池中 TSS 和 TDS 的显著去除率。

在开始处理的前 30 至 60 天，从储水箱壁和处理池其他部位观察到的浑浊物 / 污泥持续减少 (Oldham,2013; Villard,2012; Hoover,2013)。

当将 MNT 应用于缺氧储存罐时，也能观察到它有明显的效果。在这种情况下使用 MNT 技术，COD 和 TSS 积累的生物固体的去除率显著，并且滤液的清晰度也得到极大的提高。在缺氧储存罐中添加 MNT 后，可以观察到一个明显的结果是二氧化碳和甲烷气体的细小气泡释放到表面。据观察，市政污水贮留池的污泥在处理前积累了多年，使用 MNT 技术后，其生物固体去除率超过 80% (Derk , 2014)。

典型的活性污泥废水处理池会刺激曝气池中微生物絮凝物的形成。由于氧被絮凝体的外部好氧区从污水中剥离，故活性污泥微生物絮凝体的内部形成局部厌氧环境。通常，这些区域中的细菌不能有效地分解废水。MNT 刺激絮凝物内部的兼性细菌种群，使它们更活跃地以污水中的乙酸为食。因此，兼性厌氧菌消耗了较高百分比的有机负荷，而需

氧菌消耗了较低百分比的有机负荷。由于兼性细菌能够将很大一部分的生物质转化为二氧化碳和其他气体，而不是好氧细菌将其转化为生物质，因此这对减少植物中产生的生物质具有显著的效果。图 2 中描述了该过程。这种分解有利于蚯蚓消化和增强其新陈代谢，以进一步降解污染物。

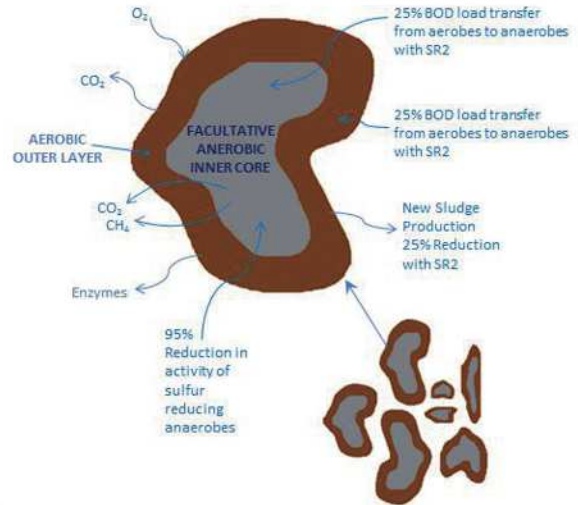


图 2. 微量营养素技术 (MNT) 对絮状生物反应的影响

1.2 蚯蚓过滤 (VermiFiltration – VF) 技术

蚯蚓过滤是传统过滤工艺与污水处理技术相结合的废水处理技术。蚯蚓堆肥通常在一个含有蚯蚓培养床或蠕虫床的箱体中进行。在放置以下成分之一 (即锯末，果壳或椰壳废料和甘蔗废料) 后将其放置进去。

蚯蚓已有 6 亿年历史，是生态系统工程师 (Himanshu Gupta, 2015)，它的身体充当了生物过滤器，能够将 BOD 降低 80- 90 %，COD 降低 70- 80 %，TDS 降低 80- 90 %，TSS 降低 70- 80%。浑浊物、脂肪或油脂的含量也可以降低 70- 88 %。(Telang and Patel , 2015) (Himanshu Gupta , 2015)

整个过程是通过“ 喂食” 和“ 生物降解” 来完成的。采集浑浊物后，再收集 TDS 和 TSS。它的作用原理是通过研磨土壤颗粒，实现导水和自然通气。在厌氧消化过程之前，使用蚯蚓过滤来捕集所需的有机污泥材料，以便进行下一步处理 (Manyuchi et al , 2013)。该工艺的优点主要是只需要 500 毫米的天然土壤、蚯蚓等基质成分，如 500 毫米的锯末，500 毫米的果壳或椰壳废料以及甘蔗废料，这些形成了 2 米厚的蠕虫床。这个过程不会产生任何气味，并且非常环保。

在本项研究中所使用的蚯蚓叫依费特氏蠕虫 (E.fetida)，该物种以其活跃的脂肪体、高度耐盐和耐化学物质而闻名，能在 pH 值为 4 的环境下生存。通过对不同种类的蚯蚓进行大量研究表明，依费特氏蠕虫是各种污水处理的最佳物种之一。在此 VF 反应器中加入了 2 千克的依费特氏蠕虫，如图 3 所示。



图 3. 依费特氏蠕虫

天然过滤技术 (Natural Filtration Technique - NFT)

天然过滤技术是被广泛使用的过滤技术，甚至帮助许多中世纪平民净化了他们的水。在废水处理中也可以使用这种过滤技术。天然过滤技术是利用不同材料（如，沙子、牡蛎壳、植物、木炭、椰子、木片、鹅卵石和砾石等）进行组合过滤的方法。在天然过滤中，不同的过滤层被用来过滤不同粒径的悬浮颗粒。通常，这些材料按照自上而下的形式被储存在不同的模型腔室内，水在重力作用下从上到下流动。卵石床用于过滤废水中的大块物质，包括塑料材料、金属物质和玻璃等。任何直径超过 5 毫米的材料都会被过滤在这个 200 毫米的卵石床中。沙床可以过滤较小的悬浮颗粒，在这个 300 毫米厚的沙床中，小到 25 微米的沙粒都可能被过滤 (Nzung'a et al ,2020)。木炭床通常用于天然过滤室的下层，木炭中的碳在一定程度上有助于吸附脂肪、油脂和任何大于 1 微米的颗粒。木炭床 (150 毫米厚) 还可以降低废水中的铅、氮氧化物和硫氧化物的含量。椰子床 (100 毫米厚) 因其有纤维层而用于过滤水。在商业应用上，椰子碳过滤器用于过滤氯颗粒、悬浮物和有挥发性有机化合物 (Volatile Organic Compounds , VOC)、隐孢子虫和贾第鞭毛虫以及溶解的无机物 (Ncube et al ,2018)。天然介质过滤技术 (NFT) 通常与其他过滤技术综合使用。该 NFT 的总厚度约为 1.2 米，如图 4 所示。



图 4. NFT 反应堆

3.0 方法与材料

3.1 MVN 系统

每天 10 立方米 MVN 进水处理系统仅占用了 100 平方米的学校农田。该系统包含许多可持续的功能，其性能优于一些传统技术。

MVN 是一种低能耗、少安装、低运行和维护成本的系统。与同类技术相比，其能耗最多可降低 80%。预算为 250 万港币的系统，仅用了 10 个月的建设时间和 3 个月的调试时间，对于这种规模的项目而言，这是非常短的现场安装时间。该系统使用 PLC 远程控制，无需全职人员参与，并且操作简单。因其没有机械设备或通风设备，所以噪音非常低。

众所周知，MNT 和 VF 在废水处理过程中不会产生异味。由于该系统是一个过滤系统，因此产生的污泥几乎为零。饱和的虫床和天然基质可以作为富含营养的有机肥料在附近的农田中充复利用。VF 系统能够在多变的气候条件下运行。(Himanshu Gupta ,2015 年)。该系统每隔 10 分钟用定时器喷洒废水，如果进水量增加，PCL 程序也会相应的增加喷洒时间。该系统使用尺寸为 30 η m 的园艺型喷头，能够防止残留固体堵塞。

已有研究使用不同的方法来探索如何使 MNT 与 VF 和 NFT 有效结合。本研究中使用的所有 MNT 测量方法均是对每 200ppm 废水进行评估 (论文 # 2 和 3 ,2020)。为了测量微生物活性和代谢率，本项目采用了四种测量方法，即 pH、温度、COD、BOD5、TSS、NH3- N、DO 和 TP。根据香港法律，我们还需要抽取大肠杆菌计数样本，以符合排放标准。

采用这些方法，进水和出水样本都已经收集到。在整个 4 月份，我们分别收集了在不使用 MNT 的情况下以及使用 MNT 的情况下废水样本的数据。

通过一些后续步骤的处理，如 MNT，它适合 LYPS 的节水计划，产生适合应用于非饮用的循环水，如图 5 所示。

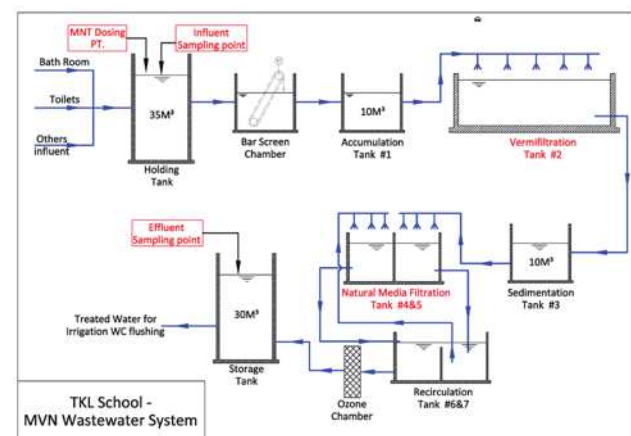


图 5. MVN 处理系统的总体布置

4.0 结果与分析

在下面这一节中，测量了 18 个月期间的数值结果，数据用以下图形格式呈现。对于每组的关联因素，先给出进水结果，再给出使用 MVN 系统后的出水结果。

本研究案例分为以下四部分（《水污染管制条例》，第 358 章第 21 条）。

首先，我们测试了处理 / 系统的效率，例如 pH、温度、COD、BOD、TSS、NH₃- N、TP 和 DO 等。由于浑浊物因子级别较小，因而在本研究中被忽略。

第二，还测定了 mg/L 中的残留金属，即 Fe、B、Ba、Hg、Se、Cd，以及其他“个别有毒金属”和“总有毒金属”。

第三，对总氰化物、酚类、硫化物、硫酸盐、氟化物、氯化物、磷、氨态氮、硝态氮、亚硝酸盐氮和总表面活性剂等化学残留量（mg/L）进行了检测。

第四，按照当地规定检测 CFU/100mL 中的大肠杆菌等病原体。

4.1 pH 和温度条件下的进水和出水测量

从下面的进水和出水测量结果中发现，pH 值逐渐接近基准 pH7 或略高于基准 pH7 时，变化为 4%。这是发生在 MNT 处理后。海水的温度在整个 18 个月中波动很小，只有 1% 的变化。

两者均表明其生物生长状况良好。这可能是由于储存槽中存在 MNT 时消化系统中的集体代谢变化所致。

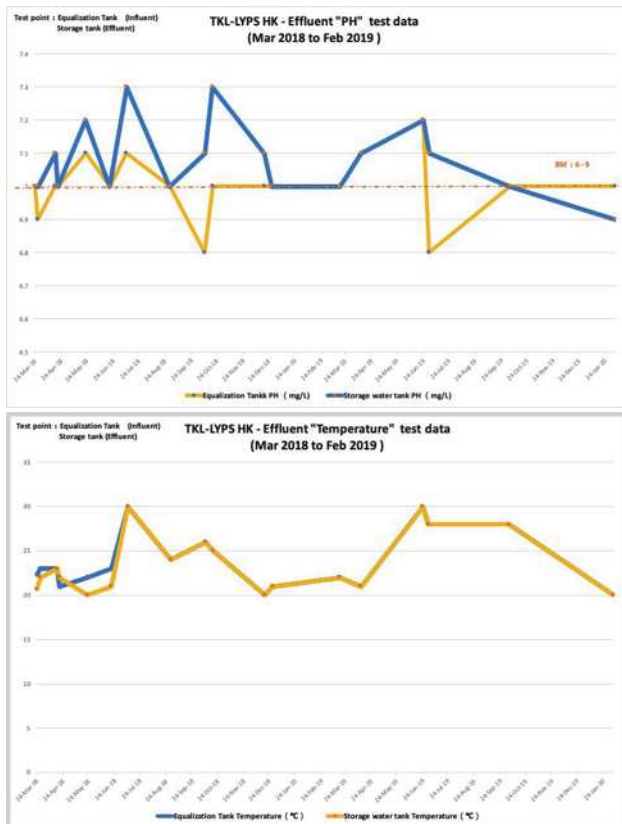


图 6. 进水和出水的 pH 和温度测量

4.2 COD 和 BOD5 条件下的进水和出水测量

BOD 是衡量微生物生长的有机基质 (Weirich, Silverstein & Rajagopalan, 2015)。与 COD 的测量方法类似，它会导致细菌在分配系统中重新生长并造成微生物污染。MVN 对 COD 和 BOD₅ 有较好的去除效果。以下我们总结了 18 个月的 COD 去除率平均为 75% 以上，而 BOD₅ 去除率平均为 85% (Himanshu Gupta, 2015)。尽管 COD 和 BOD₅ 均符合当地排放标准，但从其他的 VF 研究中，我们了解到 COD 和 BOD₅ 的去除率均可能达到 90% 以上 (Himanshu Gupta, 2015)。这部分的研究还需要在 MNT 中做进一步的工作，这可能与 VF 的有效性产生反作用，反之亦然。

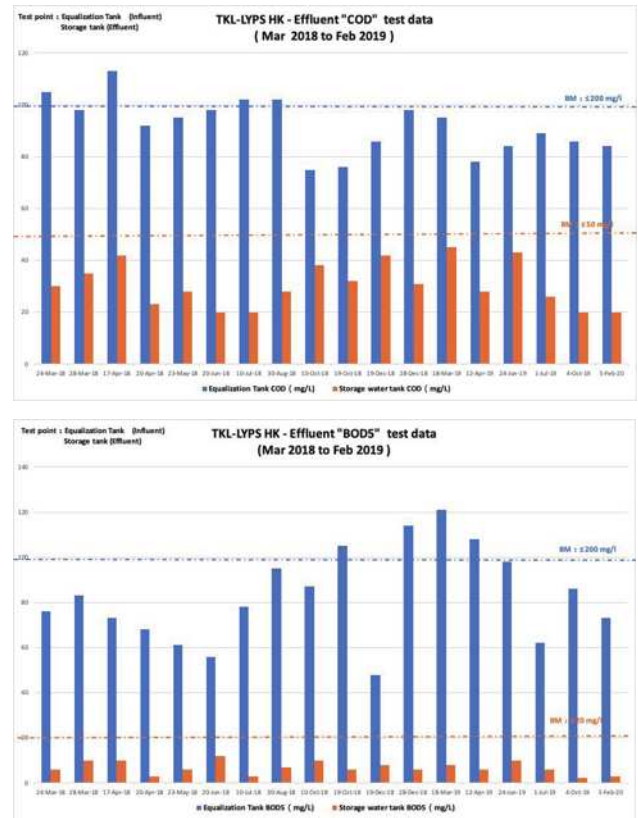
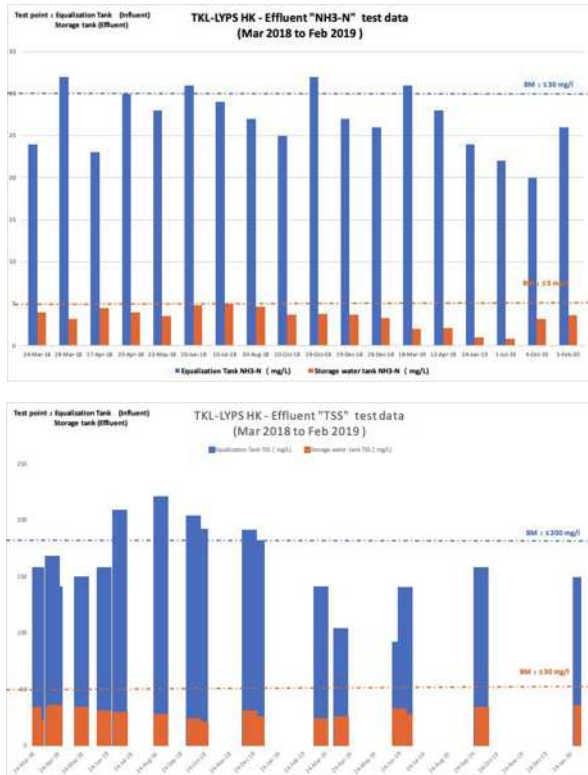


图 7. COD 和 BOD 的进水和出水测量

4.3 TSS 和 NH₃-N 条件下的进水和出水测量

MVN 对 TSS 和 NH₃- N 有较好的去除率。以下我们总结了 18 个月的 TSS 去除率平均为 85%，NH₃- N 去除率平均为 87%。这符合我们在本研究中的预期。


 图 8. TSS 和 NH₃-N 的进水和出水测量

4.4 TP 和 DO 条件下的进水和出水测量

MVN 对 TP 和 DO 具有良好的去除率。以下我们总结了 18 个月 TP 去除率的平均值为 91%，DO 增量为 +350%。这符合我们在本研究中的预期。

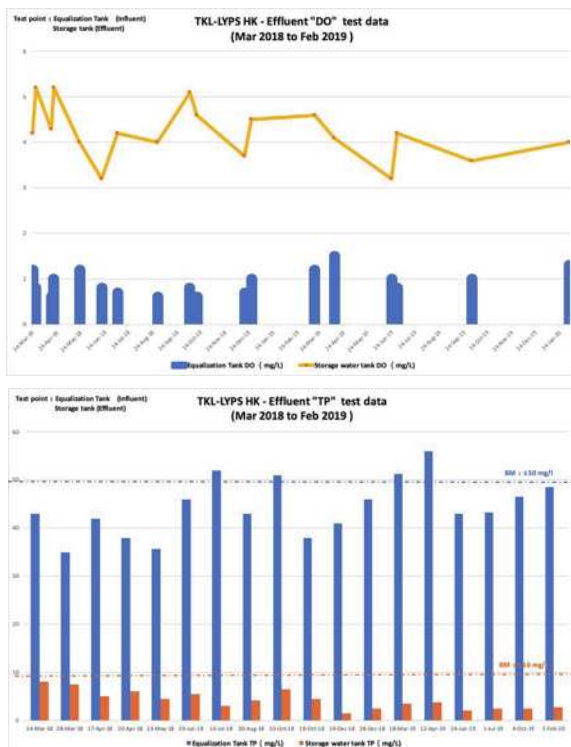


图 9. TP 和 DO 的进水和出水测量

4.5 与“HOKLAB”香港排放标准相比的废水测量

经过 18 个月的运行，MVN 系统处于稳定状态。研究小组采用经过认证的实验室流程将其与香港排放标准进行了比较，我们称之为 HOKLAB 测试。

在 2020 年 2 月的数据中，我们发现所有四类测试数据都符合标准。

MVN 达到了所有六个项目的去除率，其中 COD 为 75%，BOD₅ 为 85%，TSS 为 87% 和 O & G 为 60%。尽管检测到色度 = 12HU，但在香港标准中没有具体提及，如图 10 所示。

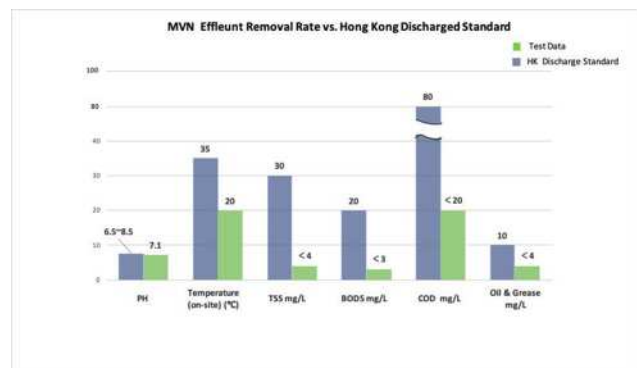


图 10. 2020 年 2 月的 MVN 出水数据对比 HOKLAS 标准 (A. 去除率)

在下列类别的“化学和金属残留物”中，有四项引起了我们的注意：(图 11)

酚类—数据表明比 0.1mg/L 的标准高 900%。在 2020 年 2 月的采样中记录小于 1mg/L。酚类化合物的抗氧化活性归因于清除自由基，提供氢原子、电子或螯合金属阳离子的能力。简而言之，臭氧消毒处理显著增加了废水中的酚和酚类化合物。(Igor, Cristine et al, 2017)。但是，残留的酚类仍然能够满足法定排放标准。

硫酸盐—数据表明比 10mg/L 标准高 100%。数据记录为 20mg/L。与世界卫生组织建议的饮用水标准相比，20mg/L 等于 20,000μg/L (建议为 250 至 500μg/L)。硫酸盐可以通过天然介质过滤处理的过程自然生成，该过程包括含有石膏和其他常见矿物质的岩石和土壤。由于经过 MVN 处理的水不是用于人类饮用，因此这并不是问题。硫的最常见形式是充分氧化的硫酸盐，而硫酸盐可能对植物营养至关重要。但是，该系统中没有像 H₂S 这样的有害气体。

汞和镉—在 MVN 废水中含有 0.02 毫克 / 升的微量汞和镉。与香港 0.01 mg/L 的排放标准相比，仍高出 100%。调查追溯到学校设施中的旧管道工程，那里的一些管道工程已超过 60 年的历史。由于铁质排水工程的腐蚀作用，可能会造成系统中的重金属。接下来需要进一步研究 VF 处理能力对重金属去除率的影响。

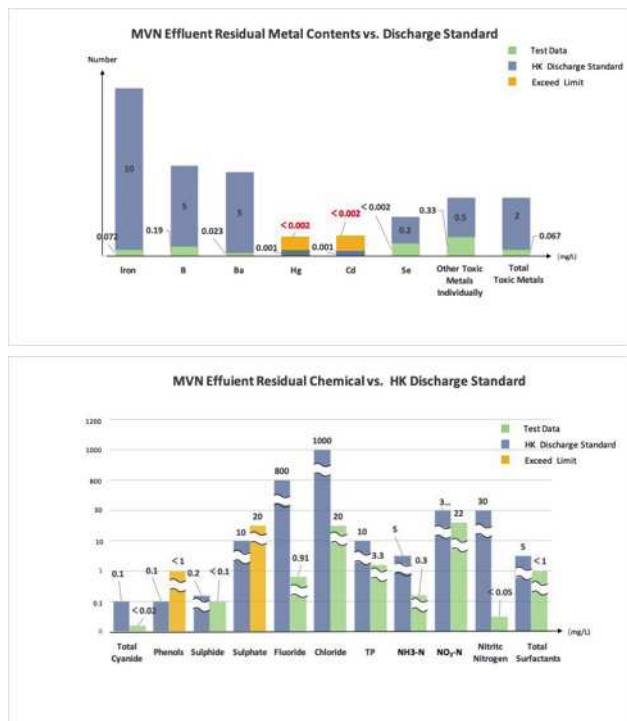


图 11. 2020 年 2 月的 MVN 出水数据对比 HOKLAS 标准 (B & C 残留化学和金属)

5.0 结论

MVN 是一种有效的低成本污水处理系统，适用于离网或农村。根据现有数据，我们发现 MVN 系统特别适合应用于回收或非饮用水。

需要对 MNT 和 VF 处理可能产生的一些微小反作用作更进一步研究。进入 VF 反应器之前，可能需要作一定时间的滞留，以便它为污染物提供外加的新陈代谢。因此，蚯蚓更容易消化各种化学物质和金属。NMF 反应器也需要选择天然介质，以促进大量的硫酸盐沉淀在废水中。

最后，臭氧消毒处理需要仔细校准。基于酚类在废水中的增加，有如此的沉积量是不正常的。

致谢：本研究得到香港赛马会 [2016- 0150] 资助。

转载：International Journal of Engineering Science Technology and Research (IJESTR) Issn. 2456- 0464 , Vol 5, Issue 5,Sept- Oct 2020 page 12- 24

参考文献：

[1].Agu, i.v .,Ibiene, A. A.,& Okpokwasili, G. C.(2017)。微量元素和大量元素对炼油废水生物处理中酚类降解的影响。国际微生物学研究杂志，1- 12。
 [2].Ge, H.,Batstone, D. J.,& Keller, J.(2013)。通过厌氧污泥消化处理和能量回收在短污泥龄运行好氧废水处理。水资源研究，47(17),

6546- 6557。
 [3].Kim S. C.(2016)。应用响应面法优化预处理造纸废水的混凝—絮凝工艺。工业化学学报，38,93- 102。
 [4].Manyuchi, L.,Kadzungura, L.,& Boka, S.(2013)。利用赤子爱胜蚓对灌溉用污水进行蚯蚓过滤。
 [5].Ncube, P.,Pidou, M.,Stephenson, T.,Jefferson, B.,& Jarvis, P.(2018)。pH 值变化对使用多媒体过滤器深度过滤废水的影响。水资源研究，128,111- 119。
 [6].Nzung 'a, S. O.,Kiplagat, K.,& Paul, O.(2020)。在热带地区使用适当的低成本天然材料处理饮用水的技术。微生物学与食品科学，9(4)，2294- 2300。
 [7].Ozgun, H.,Dereli, R. K.,Ersahin, me.,Kinaci, C.,Spanjers, H.,& van Lier, J. B.(2013)。厌氧膜生物反应器在城市污水处理中的应用：综合方案、局限性和展望。分离纯化技术，118,89- 104。
 [8]. Qasim S. R. (2017)。污水处理厂：规划、设计和运行。Routledge。
 [9].Telang S.,& Patel, H.(2015)。蚯蚓生物过滤——一种低成本处理乳品废水的方法。中国科学(d 辑：地球科学)，34(7)，935 - 941。
 [10].Weirich, S. R.,Silverstein, J.,& Rajagopalan, B.(2015)。日益分散的污水处理设施管网出水生物需氧量和氨氮的模拟。环境工程学报，32(3)，232- 239。
 [11]. Zhou, L., Peng, B., & Xiao, K. (2017)。活性污泥法中微量元素对印染废水处理的作用。水环境科学学报，29(3)，431 - 434。
 [12].P.Melidis, G.D. Gikas, C.S. Akratos, va Tshirintzis· 垂直流湿地初步沉降城市污泥的浇水研究。色雷斯德谟克利特大学环境工程系，67100 Xanthi,Greece 2009 Elsevier B.V。
 [13].Sarika Telang, Hema Patel 蚯蚓生物过滤 - 一种低成本处理乳品废水的方法。Savitribai Phule Pune University, D. Y. Patil College of Engineering, Akurdi, Pune 44, India. International Journal of Science and Research (IJSR) ISSN (Online): 2319- 7064 Index Copernicus Value (2013)
 [14].Dong Wang, Er Nie, Xingzhang Luo, Xiaoying Yang, Qun Liu, Zheng Zheng 多级蚯蚓生物滤池中试脱氮性能研究：操作条件影响及氮形态转化。2015.Springerlink.com
 [15].J. E. Burgess, J. Quarmby, and T. Stephenson, 微量元素在工业废水活性污泥生物处理中的作用 Biotechnology Advances 17 (1999) 49- 70
 [16].J. E. Burgess, J. Quarmby, and T. Stephenson, 微量营养素的补充对特定含磷工业废水生物处理的强化。化学工程师学会 ,应用化学，第 77 卷，B 部分，1999 年 7 月
 [17].J. E. Burgess, J. Quarmby, and T. Stephenson, 微量营养素的补充对利用活性污泥法优化工业废水处理的强化。第 33 卷，第 18 期，3707± 3714 页，1999 年。爱思唯尔科技有限公司
 [18].Pali Sahu1, Swapnali Raut2 和 Sagar Mane3 利用蚯蚓过滤处理小型工业废水。土木工程与城市规划：国际期刊 (CiVEJ) 第 2 卷，第 1 期。2015 年 3 月 1 日

- [19].Peter Owusu- Antwi, Richard Buamah, Helen Essandoh 地下渗滤的潜力对生物便池处理技术在废水管理中的研究, 2015年12月
- [20].Himanshu Gupta 蚯蚓对废水处理效果的研究进展 ABES Engineering College, Ghaziabad, U.P.(India)2015 IJEDR |Volume 3, Issue 3 |ISSN: 2321- 9939 International Journal of Engineering Development and Research
- [21].《水污染管制条例》(香港法例第358章第21条), 参照乙类内河水, 排水及污水系统、内河及沿海水域的污水排放标准技术报告。
- [22]. 伊戈尔·奥塔维奥·米纳特尔 1号, 克里斯汀·万兹·博尔赫斯 1号, 玛丽亚·伊莎贝拉·费雷拉 1号, 赫克托·阿朗佐·戈麦斯 1号, 郑妍·奥利弗·陈 2号和朱塞皮娜·佩斯·佩雷拉·利马 1号
- 1 圣保罗州立大学, UNESP, 博图卡图, 巴西
- 2 美国农业部的 Jean Mayer, 在美国马萨诸塞州波士顿塔夫茨大学从事减缓衰老的人类营养研究酚类化合物: 功能特性, 加工的影响和生物利用度 <http://dx.doi.org/10.5772/66368>。2017
- [23]. 奥德姆·克雷格工厂经理, 2013年就职于 Mississauga Ontario 的 Maple Lodge 农场污水处理厂。
- [24]. 布拉德·胡佛 2013年担任安大略省埃弗顿市的城市污水处理运营经理。