



利用皇竹草处理消耗污泥焚烧烟气吸收废液

唐宇龙, 邱永洪, 陈灿明, 王丹阳, 蓝志聪, 吴启堂[✉]

华南农业大学资源环境学院, 广东省农业农村污染治理与环境安全重点实验室, 广州 510642

摘 要 本研究旨在探讨大生物量植物—皇竹草 (*Pennisetum Hybridum*) 在处理消耗污泥焚烧烟气吸收废液方面的潜力和适宜条件。首先, 对皇竹草的栽培基质进行了筛选, 以有机废液为水分和营养源, 对比了土壤、已处理过的污泥和新鲜污泥作为栽培基质的优劣。研究了不同大小或高度皇竹草对废液处理的效果和合适的工艺参数。结果表明, 高 COD 和 TN 的污泥焚烧烟气吸收废液没有对皇竹草生长产生明显不良影响, 使用已处理过的污泥作为栽培基质可获得最高株高和最大生物量的皇竹草, 并能消耗最多的有机废液。皇竹草起始株高与废液消耗量呈极显著的正相关关系, 即随着植株株高的增加, 废液消耗也增大, 150 cm 高的皇竹草经测算夏季每亩每年可处理消耗废液量高达 1 638 m³, 同时可收获皇竹草生物质。

关键词 皇竹草; 污泥焚烧; 栽培基质; 有机废液; 株高; 生物量

我国部分城市土地有限, 难以大规模利用城市土地进行污泥填埋。污泥焚烧可以大幅减少污泥体积, 并将污泥转化为污泥灰、烟气和热量, 是一种广泛使用的污泥处理技术^[1]。污泥中的病原体可以被高温有效灭活, 焚烧产生的灰渣可以被安全处置^[2]。然而, 焚烧过程中的废气含有较多污染物如氮氧化物、硫化物等^[3], 要经过脱硫、脱硝和除尘等处理后才能达标排放^[4]。污泥焚烧产生的尾气处理方法包括半干式喷雾干燥法、干式烟气净化和湿式洗涤法等^[5-6], 其中湿式洗涤法是效率最高的技术之一^[7]。本课题组采用一种负压内循环无烟尘排放有机废物焚烧系统^[8], 利用湿式吸收法可以同时实现脱硫脱硝和除尘, 但产生了较高浓度的有机营养型废液, 有待合理处置。

相似的高浓度有机营养型废液如猪场废水具有高 COD 和高氨氮等特点^[9]。其处理方法有上流式厌氧污泥床 (up-flow anaerobic sludge bed, UASB) 工艺^[10]、化学絮凝-磷酸铵镁结晶-MBR(membrane bioreactor) 组合工艺^[11]、序批式活性污泥法^[12] 及强化人工湿地^[13] 等。另外, 炼矿烟气酸性废水采用天然 CaCO₃ 将废水酸性中和, 此时 SO₄²⁻ 即可以 CaSO₄ 形式回收, 作水泥厂原料; Cl⁻ 转化为 CaCl₂, 再用结晶膜蒸馏技术对此废水处理, 回收 CaCl₂, 送往上游工艺回用, 蒸馏出的清水达标排放或再利用^[14]。然而, 这些组合处理系统需要较复杂的先进技术 (如厌氧氨氧化)、设备及人工维护, 且处理过程中可能产生额外的固体废物 (如污泥)^[15], 导致处理成本增加。若不经适当处理而排放, 这些成分会在土壤和地下水中积累, 对生态环境造成损害^[16]。用作肥料时, 如果过度施用到作物上会导致作物减产甚至死亡^[17], 并可能增加水体富营养化的风险。

为此, 在封闭条件下将废水废液低成本、低能耗完全消耗值得探讨, 而单独依靠植物吸收利用而非加热蒸发完全消耗掉高浓度废水/废液的研究未见报道。本研究针对焚烧处理污泥后产生的烟气吸收废液, 尝试是否可以利用废液栽培皇竹草, 而皇竹草生物大、吸收蒸腾能力强^[18], 有望同时实现废液的消耗和生物质的生产。实验废液装在不漏水的容器中不影响土壤和地下水, 产生的皇竹草可用作焚烧污泥的燃料以避免其所含污染物对食物链的影响。另外, 观察植株的生长状况和废液的消耗量之间的关系, 以探究大生物量皇竹草处理消耗废液的合适条件和工艺参数, 从而为利用皇竹草处理利用废液提供科学依据。

收稿日期: 2024-03-05 录用日期: 2024-12-11

基金项目: 广东省特支计划本土创新团队项目 (2019BT02L218)

第一作者: 唐宇龙 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为固废资源化利用, 1120867636@qq.com ✉通信作者: 吴启堂 (1962—), 男, 博士, 教授, 研究方向为固废资源化利用, wuqitang@scau.edu.cn

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试污泥：新鲜污泥取自东莞石鼓污水处理厂深度脱水污泥，其中重金属含量低于国家 A 级标准 (GB 4284-2018)，处理过的污泥为新鲜污泥在露天条件下经过水淋洗和陈化的污泥^[18]，土壤为广州旱地赤红壤。3 种基质的基本性状见表 1。

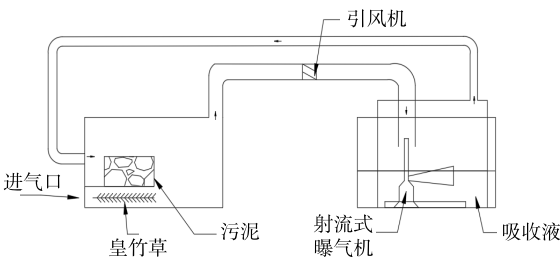
表 1 实验土壤和污泥的基本理化性质
Table 1 Basic physicochemical properties of soil and sludge

栽培基质	含水率/%	有机质/%	pH	TP/(g·kg ⁻¹)	TN/(g·kg ⁻¹)	TK/(g·kg ⁻¹)
土壤	21.41±0.73	0.52±0.01	7.29±0.04	1.37±0.06	0.55±0.01	4.11±0.42
处理后的污泥	7.89±0.08	10.40±0.63	6.31±0.02	43.48±0.30	16.09±0.68	6.55±0.93
新鲜污泥	37.75±2.64	10.24±0.50	5.66±0.02	44.78±2.11	20.54±0.54	6.77±0.39

注：数据为平均值±标准差，n=3。

供试皇竹草茎苗：取自广东省高校农村环境与生态农业重点实验室试验农场。选取粗壮的、芽眼突出的皇竹草老茎。

有机废液是自来水吸收了污泥与皇竹草混合焚烧烟气后形成的高浓度有机营养型废液，焚烧装置和方法采用课题组前期研究所使用的工艺，污泥焚烧系统的整体示意图如图 1 所示^[8]。本次研究每次加入吸收液约 250 L，焚烧后产生废液约 227.5 L，每次焚烧时长约 45 min，第 1 批次材料用量及所产生的废液中的主要污染物浓度见表 2。



注：数据为平均值±标准差，n=3。

图 1 污泥焚烧系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sludge incineration system

表 2 不同基质实验污泥焚烧烟气吸收废液的主要污染物浓度

Table 2 Concentrations of major pollutants in adsorption wastewater generated from sewage sludge incineration

批次	焚烧干污泥量/kg	焚烧干植物量/kg	废液pH	COD/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)
第1批	7.02	7.44	7.19±0.11	2214±107	65.28±1.35	0.32±0.09
第2批	6.30	5.00	7.54±0.11	1110±11.5	53.45±1.51	0.30±0.02
第3批	4.72	5.00	7.54±0.06	835.8±23.8	65.96±5.20	0.30±0.02
第4批	4.92	5.00	7.27±0.06	935.5±15.3	43.66±1.80	0.18±0.01

注：数据为平均值±标准差，n=3。

1.2 试验设计

1) 栽培基质筛选。实验设置 3 种基质处理，即新鲜污泥、已处理过的污泥和土壤，每个处理设置 4 个重复。采用塑料盆（上下半径和高度分别为：104、56、145 mm）栽培皇竹草，分别装入等体积的土壤或污泥，即 1.5 kg 新鲜污泥或已处理过的污泥、2 kg 土壤，每个盆里面扦插 2 株皇竹草茎苗，茎苗一节埋入基质内，一节露出表面，发芽后保留长势较好的一株。盆底部放置尼龙网和托盘，放入塑料水箱（560 mm×460 mm×290 mm）中。自实验当天开始，每箱加入第一批废液（7 L，约 3.8 cm 高），每日观察，当液面下降时加入废液，保证箱内液面高度始终高过托盘，并且每次加入废液后保持各箱内废液面在同一高度（3 cm），记录实验全过程加入废液的情况。

实验在塑料大棚内开展，起止时间为 2022 年 7 月 14 日—10 月 14 日。实验所用四批废液的施用时间如下：第 1 批施用时间：2022 年 7 月 14 日—7 月 30 日、第 2 批施用时间：2022 年 7 月 31 日—8 月 7 日、

第 3 批施用时间：2022 年 8 月 8 日—9 月 11 日、第 4 批施用时间：2022 年 9 月 12 日—10 月 14 日。实验过程 4 批废液的加入量见表 3。

2) 不同高度皇竹草处理利用废液。该实验焚烧污泥和皇竹草后得到的烟气吸收废液指标见表 4。在夏季 (2023 年 3—6 月) 取 20 kg 新鲜污泥, 置于园艺常用的透水种植袋, 并设置 4 个重复, 于室外每隔 14 d 扦插一批皇竹草, 培养期间经过降雨和浇水保持皇竹草正常生长, 获得 4 批不同高度的皇竹草, 株高分别为 15~23、90~120、140~150 和 150~175 cm。其中 1 袋皇竹草, 用于测定株高和生物量, 其余 3 袋皇竹草继续用于植物处理利用废液实验。废液处理实验在大棚内进行, 上述 4 批不同高度的皇竹草放入塑料水箱 (560 mm×460 mm×290 mm) 中, 每个处理高度设置 3 个重复, 并设置重新扦插皇竹草茎即 0 高度的处理以及无皇竹草的空白对照, 后 2 者采用的污泥袋也与种植了皇竹草的污泥袋一样在露天经降雨的淋洗处理。植物处理利用废液实验初始加入 7 L 废液, 实验期间每日观察, 记录废液高度和使用量, 当其中一箱废液基本耗尽时, 补充废液, 使各箱内废液液面均在 5 cm 高处。实验时间持续 30 d, 培养结束时最高皇竹草处理的 3 个重复其废液已消耗完毕, 而后, 收割各袋皇竹草, 量取其余处理各箱废液剩余量。

在秋冬季 (2023 年 10—12 月) 以前述相同的方式扦插种植皇竹草, 得到 5 批不同高度的皇竹草, 株高分别为 1~5、6~20、28~35、40~65、100~125 cm。并设置重新扦插皇竹草茎 (0 cm 高度) 的处理, 每个高度设置 3 个重复。于 2024 年 1 月进行 1 个月的废液植物处理利用实验, 初始加入 8 L 废液, 后续皇竹草栽培及废液加入方式与夏季时相同。

1.3 样品采集和分析

烟气吸收废液样品: 每次皇竹草和污泥焚烧完成后, 收集塑料水箱内的水样, 用玻璃瓶取 1 L 样品带回实验室进行分析测定。pH 采用 pH 计电位法; COD 采用重铬酸盐法 (HJ-636-2012); TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 (GB/T 11894-1989) 测定; TP 采用钼酸铵分光光度法 (GB 11893-89) 测定。

污泥及土壤样品: 实验开始之前采集污泥和土壤样品。各取一部分新鲜样品测定水分含量 (105 °C 烘干); 剩余部分在室内风干, 并研磨过 20、100 目尼龙筛, 保存备测。污泥及土壤样品的含水量、pH 值、TP 均参照《土壤农业化学分析方法》^[19], 全钾含量采用 HCl-HNO₃-HF 消煮-原子吸收光谱测定法 (GB/T 17138-1997) 测定。C、TN、S 含量采用元素分析仪法 (NY/T 3498-2019) 测定。

皇竹草样品: 实验开始及结束时, 测定皇竹草的株高。实验结束后测定皇竹草鲜重; 部分新鲜样品置于 105 °C 杀青 30 min, 然后 65 °C、48 h 烘干, 称取记录干重。干样用不锈钢粉碎机磨细过 0.25 mm 的尼龙筛, 放置于密封塑料袋备测 N、P、S、K 含量。植物 N、S 含量采用元素分析仪法 (NY/T 3498-2019) 测定, 植物 K 含量测定采用 H₂SO₄-H₂O₂ 微波消解-原子吸收光谱法, 其具体测定方法参照《土壤农业化学分析方法》^[19]。

1.4 数据处理与分析

使用 Microsoft Excel 处理数据和画图, 并使用 SPSS25 对实验数据进行方差分析和 Duncan 氏差异性检验。

表 3 不同栽培基质实验各批次废液加入量
Table 3 Amount of wastewater added to each batch in the cultivation substrate experiment

栽培基质	第1批	第2批	第3批	第4批
土壤	10.0±0.0	5.0±0.0	39±0.0	27.4±3.89
处理后的污泥	10.0±0.0	5.0±0.0	39.0±0.0	44.5±6.7
新鲜污泥	10.0±0.0	5.0±0.0	39.5±0.5	38.8±13.0

注: 数据为平均值±标准差, n=3。

表 4 植物处理利用污泥焚烧烟气吸收废液的性质和污染物含量
Table 4 Properties and pollutant content of adsorption wastewater generated from sewage sludge incineration used in phyto-treatment and reutilization experiments

焚烧批次	pH	COD	TN	TP
S1	6.79±0.00	1 085±29	67.48±1.79	0.15±0.01
S2	6.99±0.02	1 388±8	57.58±1.71	0.23±0.02
S3	6.73±0.00	1 047±10	60.06±1.72	0.21±0.02
S4	7.15±0.02	1 723±59	50.28±1.66	0.21±0.04
W1	7.59±0.01	1 276±29	55.23±1.02	0.18±0.02
W2	7.32±0.02	1 527±93	47.99±1.07	0.21±0.02

注: 数据为平均值±标准差, n=3。S 表示夏季产生和使用的吸收废液, W 表示冬季产生和使用的吸收废液。

2 结果与讨论

2.1 不同栽培基质对皇竹草生长和废液消耗量的影响

栽培基质筛选实验结果列于表 5。从表 5 可知，在污泥焚烧烟气吸收废液作为培养液条件下，不同的栽培基质中皇竹草茎苗均能够成活，成活率为 100%，废液也没有对后续皇竹草生长产生明显不良影响。使用污泥作为栽培基质，得到的皇竹草植株高度明显高于土壤基质，而且用已处理过的污泥作为栽培基质种出的皇竹草的生物量显著大于新鲜污泥和土壤。在废液消耗量方面，3 种基质没有显著差异，但处理后的污泥消耗废液最多，达到每盆 99 L。

本实验采用的土壤为广州旱地赤红壤，有效 N、P 养分低^[20]，而且本实验未施用肥料，加入的废液 P 浓度又较低，皇竹草可能因为 P 营养不足而生长较差。与赤红壤不同，污泥作为基质，养分丰富，而且较疏松（比重较小），有利于植物生长。但是未处理的新鲜污泥，含较多可降解的好氧有机物，使基质内部变成厌氧环境，以及含有小分子有机酸等植物根系毒性物质，一般不利于种子发芽和植物根系生长^[18,21]，经过堆肥或耐性植物处理后，污泥中的有害成分消除^[22]，更有利于植物根系生长，也有利于整株植物的生长。本实验新鲜污泥上皇竹草成活率 100%，且生长量大于赤红壤，表明该污泥植物毒性较低，以前的研究也遇到植物毒性低的新鲜污泥^[23]。以上分析结果表明，已处理过的污泥可以替代土壤作为皇竹草茎苗的培养基质，实现污泥资源化利用，并在废液的灌溉下，得到最大的皇竹草生物量和最大的废液消耗量。

2.2 不同高度皇竹草处理废液的效果

夏季时污泥上培育的皇竹草株高与生物量干重呈显著对数型正相关关系（图 2），可利用该关系式和测量株高来估算还在生长的皇竹草的生物量或产量。本实验的皇竹草起始干质量就是这样估算出来，从而采用差减法计算得到处理废液过程中皇竹草的干质量增加量（表 6）。

由表 6 可知，初始株高不同的皇竹草组在生物量上存在显著的差异。随着株高的增加，植株的鲜质量和干质量均呈现上升趋势。生长速度可用干质量增加量表示，起始株高在 140 以上的皇竹草干质量增加量较大。

各组皇竹草在养分方面存在显著差异，反映

表 5 不同栽培基质下皇竹草的生长指标和消耗废液量

Table 5 Growth parameters and wastewater consumption amount of pennisetum hydridum with different cultivation substrates

栽培基质	成活率/%	株高/cm	生物量干质量/kg	消耗废液量/L
土壤	100±0	164.25±28.21b	0.07±0.01b	82.05±3.95a
处理后的污泥	100±0	248.50±15.30a	0.24±0.03a	99.05±6.85a
新鲜污泥	100±0	210.75±17.45a	0.08±0.02b	93.75±12.35a

注：数据为平均值±标准差，n=3，同一列中不同字母表示处理之间差异显著(P<0.05)。

与赤红壤不同，污泥作为基质，养分丰富，而且较疏松（比重较小），有利于植物生长。但是未处理的新鲜污泥，含较多可降解的好氧有机物，使基质内部变成厌氧环境，以及含有小分子有机酸等植物根系毒性物质，一般不利于种子发芽和植物根系生长^[18,21]，经过堆肥或耐性植物处理后，污泥中的有害成分消除^[22]，更有利于植物根系生长，也有利于整株植物的生长。本实验新鲜污泥上皇竹草成活率 100%，且生长量大于赤红壤，表明该污泥植物毒性较低，以前的研究也遇到植物毒性低的新鲜污泥^[23]。以上分析结果表明，已处理过的污泥可以替代土壤作为皇竹草茎苗的培养基质，实现污泥资源化利用，并在废液的灌溉下，得到最大的皇竹草生物量和最大的废液消耗量。

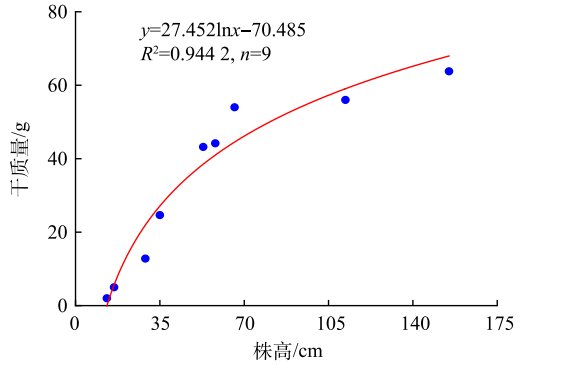


图 2 在夏季污泥上生长的皇竹草株高与生物量干质量之间的关系

Fig. 2 The relationship between plant height and biomass dry weight of *Pennisetum hydridum* growing on sludge in summer

表 6 夏季废液上生长的皇竹草植株生长状况及营养元素含量

Table 6 Growth status and nutrient element content of *Pennisetum hydridum* plants growing in waste liquid in summer

株高区间/ cm	初始株高/ cm	结束株高/ cm	鲜质量/ g	干质量/ g	干质量 增加量/g	N/ (g·kg ⁻¹)	P/ (g·kg ⁻¹)	K/ (g·kg ⁻¹)	S/ (g·kg ⁻¹)	有机物 含量/%
0	0.00±0.00e	39.90±4.84c	200.0±61.0cd	24.81±11.17b	24.81±6.22b	21.64±4.06a	8.22±0.57a	37.01±2.09a	3.91±0.47a	70.20±0.83a
15~23	18.17±5.95d	61.19±25.50c	306.7±303.8cd	53.56±52.85b	46.06±31.36b	17.04±4.80ab	7.90±0.55a	30.31±7.26b	4.21±0.42a	70.91±2.18a
90~120	103.3±18.4c	134.7±23.7b	468.3±290.4bc	88.12±57.15b	41.56±14.28b	12.47±1.94bc	4.88±1.26b	15.87±2.02c	2.93±0.37b	73.82±0.51b
140~150	145.0±20.4b	160.5±25.4a	970.8±568.7ab	283.9±167.8a	218.0±33.4a	8.55±0.42c	2.91±0.31c	9.31±0.71d	2.30±0.13c	76.39±0.41c
150~175	164.8±14.8a	182.2±11.0a	1 098±500a	333.7±154.8a	264.2±79.7a	8.34±0.70c	2.90±0.46c	9.74±1.28d	2.02±0.32c	75.61±0.74bc

注：株高区间为0表示新苗栽种。数据为平均值±标准差，n=3。同一列中不同字母表示处理之间差异显著（P<0.05）。

了皇竹草生长阶段中不同的生命活动,株高较高的皇竹草处在较成熟阶段,营养元素的含量相对较低,但是在体内逐渐积累较多的有机物(表 6),其热值可能增加而有利于焚烧。

夏冬两季株高较高即生物量较大的皇竹草每天消耗的废液量也较多,起始株高与消耗的废液量之间呈极显著的直线正相关关系(图 3)。由图 3 中的拟合方程可以推算出夏冬两季不同起始高度的皇竹草对废液的处理效果,具体见表 7。150 cm 高的皇竹草每天消耗的废液高度为 8.8 mm,以每亩有效栽培面积 500 m² 计算,每天可吸收消耗 4.5 m³ 废液(相当于 1 638 m³·a⁻¹)。在废液处理工程设计上,根据每天需要处理的废液量来选择合适的株高的皇竹草,种植在废液处理槽中。

实际上皇竹草可以长至 3~4 m 高^[24],因为它生长快、耗水量大,可用于生态固化疏浚土^[25]。根据表 6 可知,皇竹草的起始株高越大,皇竹草干重的增量也越大,与消耗废液量呈现一样的规律。株高 1~2 m 的皇竹草仍处于旺盛生长阶段,因此干质量增加量也就较大。但是,冬季由于气温较低,皇竹草生长较慢,单位面积每天处理消耗的废液量约为夏季的 50%,因此,在冬季应预先培育和选择株高较高(甚至高于 2 m)的皇竹草用于处理废液,其消耗的废液量就可以更大,同时在处理废液的过程中也能生产较多的干皇竹草。

2.3 技术可行性讨论

污泥干化焚烧尾气一般用湿法洗涤塔处理,焚烧烟气中的酸性物质与碱液发生中和反应生成含盐的脱酸废水,而后常采用化学沉淀+混凝沉淀+絮凝沉淀+中和+多介质过滤的组合工艺处理^[26],未见资源化利用污泥焚烧尾气吸收废液的报道。在资源化利用方面,何玮等^[27]研究了沼液施用于皇竹草的合适用量(0.016 67 t·m⁻²) (每亩约 11 t)。而本研究提出的植物处理废液技术,每亩每年处理消耗废液量可达 691~1 638 t(表 7),单位面积处理量大幅度提高。这主要得益于本实验的皇竹草只能吸收利用废液中的水分,而种植在土壤上的皇竹草可以吸收利用土壤中的水分,而且沼液中的 N 养分较高,用量大可造成 N 素供应过剩。

在成本方面,赵兵等^[28]针对生物质沼液(规模为 700 m³·d⁻¹),采用预处理+亚硝酸硝化/反硝化-AO(anaerobic oxid)+MBR+NF(nano-filter)工艺,运行成本约为 120 元·t⁻¹。本研究的运行成本估计约为 20 元·t⁻¹,主要包含人工(约 15 元·t⁻¹)和皇竹草种苗(含基质及袋子,5 元·t⁻¹)。贾永

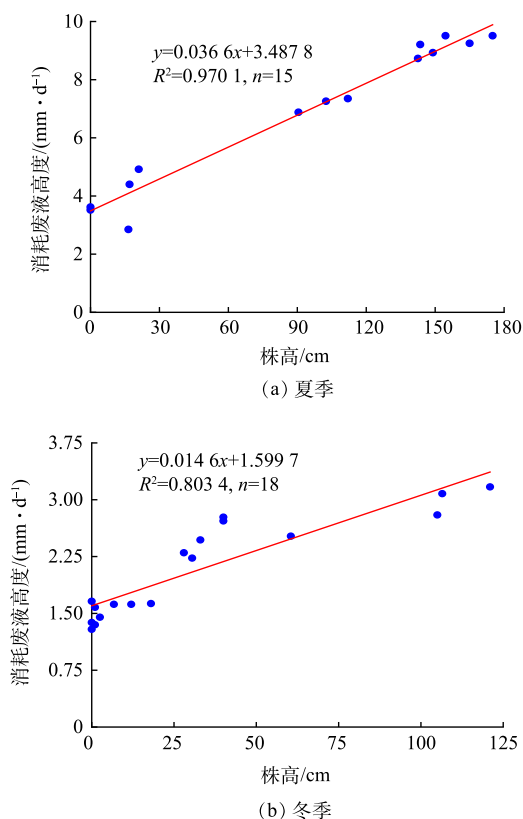


图 3 夏冬季皇竹草起始株高与消耗废液量之间的关系图

Fig. 3 The relationship between the initial plant height and the amount of wastewater consumed in summer and winter

表 7 不同起始株高皇竹草预计消耗废液量

Table 7 Estimated wastewater consumption amount by *Pennisetum hybridum* with different plant heights

季节和起始 株高/cm	消耗废液高度/ (mm·d ⁻¹)	每亩消耗废液量	
		(m ³ ·d ⁻¹)	(m ³ ·a ⁻¹)
S-100	7.15	3.57	1 304
S-110	7.51	3.76	1 371
S-120	7.88	3.94	1 438
S-130	8.25	4.12	1 505
S-140	8.61	4.31	1 572
S-150	8.98	4.49	1 638
S-160	9.34	4.67	1 705
W-100	3.06	1.53	558.4
W-110	3.21	1.60	585.0
W-120	3.35	1.68	611.7
W-130	3.50	1.75	638.3
W-140	3.64	1.82	665.0
W-150	3.79	1.89	691.6
W-160	3.94	1.97	718.3

注: S代表夏季, W代表冬季; 每亩有效栽培面积按500 m² 计算。

强等^[29]针对与本研究相近 COD 的造纸废水,采用 Fenton 氧化深度处理,总药剂成本为 $8 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$;本研究的耗材成本估计为 $5 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$,主要为皇竹草种苗及其基质和袋子。因此,皇竹草处理消耗废液技术在成本上具有一定的可行性。

3 结论

1) COD 在 $1\,000 \sim 2\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 内的污泥烟气吸收废液可直接用于栽培皇竹草,处理陈化后的污泥比当地自然土壤和新鲜污泥更为适合在实验条件下栽培皇竹草。

2) 皇竹草起始株高与消耗废液量呈极显著的线性正相关关系,该关系式可以用于根据需要的废液量推算出应采用的皇竹草株高。株高 100 cm 以上的皇竹草可同时实现废液的有效消耗利用和生物质生产,值得进一步优化和扩展。

参考文献

- [1] XU S, LU W, LIU Y, et al. Structure and diversity of bacterial communities in two large sanitary landfills in China as revealed by high-throughput sequencing (MiSeq)[J]. *Waste Management*, 2017, 63: 41-48.
- [2] LIANG Y, XU D, FENG P, et al. Municipal sewage sludge incineration and its air pollution control[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 295: 126456.
- [3] LI B, WANG F, CHI Y, et al. Study on optimal energy efficiency of a sludge drying-incineration combined system[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2014, 16(4): 684-692.
- [4] JADLOVEC M, VÝTISK J, HONUS S, et al. Pollutants production, energy recovery and environmental impact of sewage sludge co-incineration with biomass pellets[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2023, 32: 103400.
- [5] TANIKAWA D, MOTOKAWA D, ITOIRI Y, et al. Biogas purification and ammonia load reduction in sewage treatment by two-stage down-flow hanging sponge reactor[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 851: 158355.
- [6] 张秀云, 郑继成. 国内外烟气脱硫技术综述[J]. *电站系统工程*, 2010, 26(4): 1-2.
- [7] 刘海洋, 江澄宇, 谷小兵, 等. 燃煤电厂湿法脱硫废水零排放处理技术进展[J]. *环境工程*, 2016, 34(4): 33-36.
- [8] 吴启堂, 李思畅, 卫泽斌, 等. 一种负压内循环无烟尘排放有机废物焚烧处理系统和方法: CN202210904412.2[P]. 2022-11-15.
- [9] CHENG H, NARINDRI B, CHU H, et al. Recent advancement on biological technologies and strategies for resource recovery from swine wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 303: 122861.
- [10] YANG J, WANG D, LUO Z, et al. Anaerobic mono-digestion of pig manure in a leach bed coupled with a methanogenic reactor: Effects of the filter media[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 234: 1094-1101.
- [11] 郭会真, 陶智伟, 冯亮, 等. 化学絮凝-磷酸铵镁结晶-MBR 组合工艺处理养猪沼液研究[J]. *水处理技术*, 2017, 43(1): 86-90.
- [12] YANG H, DENG L, WANG L, et al. Comparison of three biomass-retaining reactors of the ASBR, the UBF and the USR treating swine wastewater for biogas production[J]. *Renewable Energy*, 2019, 138: 521-530.
- [13] GUO X, CUI X, LI H, et al. Purifying effect of biochar-zeolite constructed wetlands on arsenic-containing biogas slurry in large-scale pig farms[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279: 123579.
- [14] 王鹤, 李滦宁, 张凤君, 等. 结晶膜蒸馏处理吸收炼矿烟气酸性废水的研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2006, 36(Sup.): 144-146.
- [15] WU Z, ZOU S, ZHANG B, et al. Forward osmosis promoted in-situ formation of struvite with simultaneous water recovery from digested swine wastewater[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 342: 274-280.
- [16] SCAGLIONE D, TORNOTTI G, TELI A, et al. Nitrification denitrification via nitrite in a pilot-scale SBR treating the liquid fraction of co-digested piggery/poultry manure and agro-wastes[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 228: 935-943.
- [17] HARRINGTON C, SCHOLZ M. Assessment of pre-digested piggery wastewater treatment operations with surface flow integrated constructed wetland systems[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(20): 7713-7723.
- [18] HEI L, LEE C C C, WANG H, et al. Using a high biomass plant *Pennisetum hybridum* to phyto-treat fresh municipal sewage sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 217: 252-256.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [20] 刘安世, 刘树基, 何宜庚, 等. 广东土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [21] GASCÓ G, LOBO M C. Composition of a Spanish sewage sludge and effects on treated soil and olive trees[J]. *Waste Manage*, 2007, 27: 1494-1500.
- [22] WU Q T, HEI L, WONG J W C, et al. Co-cropping for phyto-separation of zinc and potassium from sewage sludge[J]. *Chemosphere*, 2007, 68(10): 1954-1960.
- [23] LIN X, CHEN C, LI H, et al. Comprehensive recycling of fresh municipal sewage sludge to fertilize garden plants and achieve low carbon emission: A pilot study[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 1023356.
- [24] 何勇, 李兴美. 不同施肥方法与栽培方式对皇竹草生长性能的影响[J]. *饲料研究*, 2023, 46(11): 110-112.
- [25] 陈广明, 张祝培, 毕世明, 等. 利用皇竹草生态固化浅表层疏浚土试验研究[J]. *水运工程*, 2021(9): 16-22.
- [26] 朱铭铭. 污泥干化焚烧项目中的污染识别及污染控制技术分析[J]. *建筑科技*, 2023(3): 131-135.

- [27] 何玮, 王琳, 张健. 沼液不同施用量对皇竹草产量及土壤肥力的影响[J]. 草业与畜牧, 2012(2): 5-8.
- [28] 赵兵, 蒋惠敏, 何月, 等. 深圳某生物质沼液处理厂工程设计[J]. 工业安全与环保, 2024, 50(1): 85-87.
- [29] 贾永强, 李伟, 贾立庄, 等. Fenton 氧化深度处理高浓度造纸废水的中试实验[J]. 环境工程学报, 2014, 8(1): 215-221.

(责任编辑: 曲娜)

Treatment and using-up of adsorption wastewater generated from sludge incineration by *Pennisetum Hybridum*

TANG Yulong, QIU Yonghong, CHEN Canming, WANG Danyang, LAN Zhicong, WU Qitang*

College of Natural Resources and Environment, Guangdong Provincial Key Laboratory of Agricultural & Rural Pollution Abatement and Environmental Safety, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

*Corresponding author, E-mail: wuqitang@scau.edu.cn

Abstract In order to to determine the potential and suitable conditions for the treatment and using-up of adsorption wastewater generated from sewage sludge incineration (AWGSI) by a high biomass plant *Pennisetum hybridum*, the organic and nutritional wastewater as the only water and nutrient source for the cultivation mediums, the comparison tests of planting *P. hybridum* were conducted among three types of substrates: soil, treated sludge and fresh sludge. Then the wastewater treatment effect of *P. hybridum* with different size or height as well as reasonable process parameters was studied. Results showed that AWGSI with high COD (Chemical Oxygen Demand) and total N had no obvious adverse effect on the growth of *P. hybridum*. The highest plant height and maximum biomass of *P. hybridum* could occur when the treated sludge was taken as the cultivation medium, and the highest amount of AWGSI could be consumed. There was a very significant linear positive correlation between the initial plant height of *P. hybridum* and the consumption of AWGSI, that is to say that the consumption of AWGSI increased with the increasing plant height. It was estimated that 24 570 m³ of AWGSI per year will be treated and consumed by *P. hybridum* with a height of 150 cm per ha in summer, together with a harvest of *P. hybridum* biomass.

Keywords *Pennisetum hybridum*; sludge incineration; cultivation medium; organic wastewater; plant height; biomass