

鸡粪和炉渣对疏浚土性质及皇竹草生长的影响

冯为迅¹, 谢姗宴¹, 苏立城¹, 彭维新¹, 苏思宁¹, 曾庆军², 曾曙才¹

(1.华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642; 2.中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: [目的] 探究鸡粪和炉渣添加对疏浚土的改良效果, 为疏浚土资源化利用提供理论依据。[方法] 以疏浚土为供试土壤, 皇竹草为供试植物开展盆栽试验, 设置 4 个处理, 分别为对照(CK)、添加 5% 鸡粪(T₁)、添加 5% 鸡粪+5% 炉渣(T₂)、添加 5% 鸡粪+10% 炉渣(T₃), 分析不同处理对疏浚土理化性质、皇竹草生长及养分吸收的影响。[结果] 与 CK 相比, 3 种处理均显著改善了疏浚土的理化性质。其中, T₃ 处理的容重显著低于其他处理, 总孔隙度和毛管持水量显著高于其他处理; 且土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾含量均为最高水平。鸡粪和炉渣添加显著促进皇竹草的生长及养分积累, T₃ 处理的促进效果最佳, 株高、生物量及地上部和地下部的 N、P、K 积累量均最大, 且显著高于其他处理。主成分分析方法综合评价结果显示: 不同处理对疏浚土的改良效果排序为 T₃ > T₂ > T₁。[结论] 添加鸡粪或鸡粪+炉渣能显著改善疏浚土的理化性质, 促进皇竹草生长和养分积累, 且 T₃ 处理对疏浚土的改良效果最佳。

关键词: 疏浚土; 土壤改良; 鸡粪; 炉渣; 皇竹草

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)01-0061-08

中图分类号: S156.99, X736

文献参数: 冯为迅, 谢姗宴, 苏立城, 等. 鸡粪和炉渣对疏浚土性质及皇竹草生长的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 61-68. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20220829.002; Feng Weixun, Xie Shanyan, Su Licheng, et al. Effects of chicken manure and slag on physicochemical properties of dredged soil and growth of *Pennisetum hybridum* [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 61-68.

Effects of Chicken Manure and Slag on Physicochemical Properties of Dredged Soil and Growth of *Pennisetum Hybridum*

Feng Weixun¹, Xie Shanyan¹, Su Licheng¹, Peng Weixin¹, Su Sining¹, Zeng Qingjun², Zeng Shucui¹

(1.College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China; 2.CCCC Fourth Aviation Engineering Research Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510230, China)

Abstract: [Objective] The improvement effects of chicken manure and slag addition on dredged soil were investigated in order to provide a theoretical basis for resource utilization of dredged lake soil. [Methods] A pot experiment was conducted with dredged soil as the test soil and *Pennisetum hybridum* as the planted species. Four treatments were established: control (CK, no additions of chicken manure and slag), addition of 5% chicken manure (T₁), 5% chicken manure + 5% slag (T₂), and 5% chicken manure + 10% slag (T₃). The effects of the different treatments on the physicochemical properties of the dredged soil, and on the growth and nutrient uptake of *Pennisetum hybridum* were analyzed. [Results] All three treatments significantly improved the physicochemical properties of the dredged soil compared with CK. T₃ had significantly lower bulk density and higher total porosity and capillary water holding capacity than the other treatments. Soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, alkaline hydrolysis nitrogen, available phosphorus, and available potassium content were all at the highest levels with T₃. The chicken manure and slag additions significantly increased the growth and nutrient accumulation of *Pennisetum hybridum*, with the T₃ treatment showing significantly greater plant height, biomass, and accumulation of nitrogen, phosphorus, and potassium in aboveground and belowground plant tissues than observed for the other

收稿日期: 2022-05-21

修回日期: 2022-07-09

资助项目: 中交四航工程研究院项目“基于先锋植物的疏浚土生态固化技术研究”(H20532)

第一作者: 冯为迅(1997—), 男(汉族), 广东省湛江市, 硕士研究生, 研究方向为森林生态学。Email: 1754090341@qq.com。

通信作者: 曾曙才(1971—), 男(汉族), 江西省宜春市, 博士, 教授, 主要从事森林生态学研究。Email: sczeng@scau.edu.cn。

treatments. The results of the comprehensive evaluation by principal component analysis showed that the capacity of the three treatments to improve dredged soil followed the order of $T_3 > T_2 > T_1$. [Conclusion] The addition of chicken manure or chicken manure + slag significantly improved the physicochemical properties of the dredged soil and promoted the growth and nutrient accumulation of *Pennisetum hybridum*, and the T_3 treatment had the greatest capacity to improve dredged soil.

Keywords: dredged soil; soil improvement; chicken manure; furnace slag; *Pennisetum hybridum*

中国每年因河湖、港口航道建设和维护所产生的疏浚土高达数十亿吨^[1],其中大多被作为固体废弃物露天堆放在沿岸布设的排泥区内未被利用,对环境产生了严重的污染,并造成大量土地资源浪费^[2]。积极推进疏浚土资源化利用,可有效缓解露天堆放所造成的土地资源浪费和生态环境污染问题。近年来,众多学者针对疏浚土资源化利用开展了大量的研究,将疏浚土应用到土地利用、填方、建筑、污水处理和能源回收等领域^[3-5]。其中,疏浚土的土地利用途径包括农林业利用、园林绿化、修复受损土地等^[6]。研究发现,经改良后的疏浚土理化性质显著改善,更适合植物生长。将有机肥和脱硫石膏作改良剂,可有效改善疏浚土的理化性质,显著促进植物生长^[7];将聚丙烯酰胺、秸秆和分子吸水树脂等改良材料与疏浚土进行绿化喷播,植被的出苗率和生长速率显著提高^[8];此外,将疏浚土与咖啡渣^[9]、生物炭^[10]、蚯蚓粪等^[11]材料配合使用,也可以改善疏浚土理化性质,同时携入大量养分,有效满足了植物的养分需求,进而促进植物生长。以上研究表明,改良后的疏浚土土地利用价值大大提高。

鸡粪作为典型的有机肥,可有效改善土壤理化性质,同时有助于增加土壤微生物多样性和酶活性,促进植物提质、增产^[12]。炉渣具有孔隙多、比表面积大、富含硅酸盐和磷酸盐的特点,可作改良剂改善土壤物理性状,并增加土壤的保水保肥性^[13-14]。皇竹草(*Pennisetum hybridum*)为多年生禾本科植物,因其根系发达、适应性强、生长迅速、耐旱耐贫瘠且营养丰富等特点,近年来被广泛应用于水土保持、荒坡治理、生态修复和饲草养畜等领域^[15]。皇竹草生物量大,

兼具大量蒸腾水分和加筋作用,可以增加浅表层疏浚土的承载力,起到固化疏浚土作用,同时,生产的皇竹草可以刈割还田或用作饲料^[16]。

本研究立足于疏浚土土地利用的限制因素,以疏浚土为研究对象,探究鸡粪和不同比例炉渣添加作改良剂对疏浚土的改良效果,同时以皇竹草为种植材料,通过盆栽试验研究不同处理对疏浚土理化性质及皇竹草生长和养分吸收的影响,旨在改良疏浚土的同时,充分发挥疏浚土的生产潜力,以期为实现疏浚土的资源化利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试疏浚土取自安徽某湖泊疏浚工程排泥区。在疏浚排泥区随机选取样点,取 0—60 cm 土层的土样,摊开风干后混匀,碾碎过 1 cm 筛备用。供试鸡粪是由山东肥丰源生物科技股份有限公司生产的腐熟有机肥;供试炉渣是从山东省枣庄市某煤厂购入的蜂窝煤残渣,鸡粪和炉渣均过 5 mm 筛备用。湖泊疏浚土、鸡粪和炉渣的基本理化性质见表 1,其中疏浚土中重金属铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)、镉(Cd)、镍(Ni)含量均低于《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)筛选值(表 2),可用于土地利用。

供试植物为皇竹草,种节采自华南农业大学生态农场,将种节扦插于装有疏浚土的育苗袋内,进行育苗,皇竹草株高生长至 20 cm 左右时,选择长势一致的植株移栽。盆栽用盆规格为高 31 cm,口径 29 cm。

表 1 供试材料的基本性质

Table 1 Basic properties of experimental materials

材料	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	总孔隙度/%	毛管持水量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	pH 值	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全钾/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
疏浚土	1.34	49.44	294.31	7.94	4.51	0.49	0.68	18.52
鸡粪	0.50	81.30	1 074.23	7.44	405.60	22.80	18.30	22.50
炉渣	0.57	78.42	797.88	10.58	12.80	0.53	1.00	20.75

1.2 试验地概况

试验地位于安徽省淮南市寿县瓦埠镇,为亚热带

季风气候,年平均气温为 14.8~14.9 °C,年平均降雨量为 931.8 mm。试验于 2020 年 8—12 月在安徽某

湖泊疏浚工程项目部(116°54'39"E, 32°19'51"N)试验棚进行。

表 2 湖泊疏浚土重金属背景值

Table 2 Background value of heavy metals in lake dredged soil

指标	湖泊疏浚土	土壤环境质量标准 (筛选值)
pH 值	7.94	>7.5
铜(Cu)/(mg·kg ⁻¹)	20.22	<100
锌(Zn)/(mg·kg ⁻¹)	48.57	<300
铅(Pb)/(mg·kg ⁻¹)	20.43	<170
镉(Cd)/(mg·kg ⁻¹)	0.17	<0.6
铬(Ni)/(mg·kg ⁻¹)	24.21	<190

1.3 试验设计

本研究设置 4 个试验处理:5 kg 疏浚土上添加基础质量 5% 的鸡粪(T₁)、T₁ 处理基础上添加基础质量 5% 的炉渣(T₂)、T₁ 处理基础上添加基础质量 10% 的炉渣(T₃)。以 5 kg 疏浚土不添加鸡粪或炉渣为对照(CK), 每个处理 5 个重复。每盆疏浚土的基础质量均为 5 kg, 各处理的添加物根据基础质量按试验设计比例额外添加, 与疏浚土混匀后干湿交替平衡 15 d, 期间若有下渗水流出则倒回盆中, 平衡完成后, 采集土壤样品, 然后移栽皇竹草, 每盆移栽 1 株。试验持续 3 个月, 期间进行统一浇水和除杂管理。

1.4 样品采集与分析

土壤样品采集与分析方法均参照《土壤农化分析》^[17]。其中, 容重、总孔隙度采用环刀法; pH 值采用 pH 计法; 有机质采用重铬酸钾容量法; 全氮采用凯氏定氮法; 碱解氮采用碱解扩散法; 全磷采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法; 全钾采用 NaOH 熔融—火焰分光光度计法; 速效磷采用盐酸和硫酸溶液浸提—钼锑抗比色法; 速效钾采用醋酸铵浸提—火焰光度法。每隔 1 周用卷尺测量植物株高, 试验结束后, 用电子天平称量植物各部位干重; 植物地上部、地下部样品用浓硫酸—过氧化氢消解后获得待测液, 分别采用奈氏比色法、钼锑抗比色法、火焰分光光度计法植株各部位氮(N)、磷(P)、钾(K)含量。

1.5 数据处理

所有试验数据利用 Microsoft Excel 2016 进行录入、整理, 采用 Origin 2018 软件绘图。运用 SPSS 22.0 对土壤理化性质和供试植物的生长指标进行单因素方差分析(one-way ANOVA)、Duncan's ($\alpha = 0.05$) 多重比较和主成分分析。图表中数据为平均值 ± 标准差。

采用以下公式计算养分累积量与株高生长率:

植物 N(P 或 K) 累积量(mg) =

植物 N(P 或 K) 含量(mg/g) ×
干物质累积量(g)

株高生长率(cm/d) = 两次株高差值(cm) /
两次测量相差时间(d)

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤物理性质的影响

土壤容重是衡量土壤松紧状况的指标, 也是衡量土壤肥力高低的重要指标之一; 土壤总孔隙度是指土壤通气状况, 反映土壤结构好坏; 毛管持水量是指土壤毛管上升水达到最大量时的土壤含水量, 是对植物有效的水分, 反映土壤的保水能力。因此这 3 个指标能反映土壤物理性质状况。

不同处理对疏浚土物理性质的影响明显(表 3)。与 CK 相比, T₁, T₂, T₃ 处理的土壤容重分别降低了 5.97%, 13.43%, 22.39%, 总孔隙度分别增加了 6.39%, 14.10%, 22.80%, 毛管持水量分别增加了 20.96%, 44.52%, 60.21%, 且各处理间均存在显著差异($p < 0.05$), 由于鸡粪有机肥比较疏松, 炉渣孔隙多、比表面积大, 因此鸡粪、鸡粪+炉渣可以降低疏浚土容重, 增加总孔隙度和毛管持水量。整体上看, T₃ 处理对疏浚土物理性质改良效果最优, 其次为 T₂ 和 T₁ 处理。

表 3 不同处理对土壤物理性质的影响

Table 3 Effect of different treatments on the physical properties of the soil

处理	容重/ (g·cm ⁻³)	总孔 隙度/%	毛管持水量/ (g·kg ⁻¹)
CK	1.34±0.03 ^a	49.44±1.05 ^d	294.31±5.37 ^d
T ₁	1.26±0.06 ^b	52.60±2.08 ^c	355.99±18.66 ^c
T ₂	1.16±0.04 ^c	56.41±1.46 ^b	425.33±21.76 ^b
T ₃	1.04±0.02 ^d	60.71±0.57 ^a	471.52±10.25 ^a

注: 表中同列不同小写字母表示处理间差异显著($p < 0.05$, Duncan's 法)。下同。

2.2 不同处理对土壤化学性质的影响

不同处理对疏浚土化学性质的影响见表 4。T₁, T₂ 和 T₃ 处理土壤 pH 值彼此间差异不显著, 但均显著低于 CK($p < 0.05$)。不同处理土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾含量趋势均表现为: CK < T₁ < T₂ < T₃。与 CK 相比, 添加鸡粪(T₁) 显著提高了土壤各养分含量($p < 0.05$), 其中有机质含量增幅最大(148.78%)。与 T₁ 相比, 添加鸡粪+5% 炉渣(T₂) 进一步提高了土壤各养分含量, 增幅为 3.60%~33.33%。与 T₂ 相比, 添加鸡粪+10% 炉渣(T₃) 使土壤各养分含量增加了 6.92%~43.83%, 除

有机质外,其他养分指标增加量均达到显著水平 ($p < 0.05$)。这表明添加鸡粪可以提高疏浚土养分含量,在鸡粪基础上再添加炉渣效果更佳, T_3 处理的土壤养分含量最优。

表 4 不同处理对土壤化学性质的影响

Table 4 Effect of different treatments on soil chemical properties

化学性质	处理			
	CK	T_1	T_2	T_3
pH 值	7.94±0.04 ^a	7.66±0.06 ^b	7.72±0.11 ^b	7.77±0.09 ^b
有机质/(g·kg ⁻¹)	4.51±0.38 ^c	11.22±1.25 ^b	12.08±0.63 ^{ab}	13.46±0.69 ^a
全氮/(g·kg ⁻¹)	0.49±0.02 ^d	0.63±0.04 ^c	0.84±0.06 ^b	1.03±0.05 ^a
全磷/(g·kg ⁻¹)	0.68±0.06 ^c	1.11±0.07 ^b	1.15±0.04 ^b	1.25±0.02 ^a
全钾/(g·kg ⁻¹)	18.52±0.47 ^c	20.06±1.04 ^b	21.23±0.61 ^b	22.70±0.65 ^a
碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	34.07±2.03 ^d	55.31±3.09 ^c	63.55±3.80 ^b	86.71±5.59 ^a
速效磷/(mg·kg ⁻¹)	10.64±1.14 ^d	17.06±0.84 ^c	19.77±1.22 ^b	24.66±1.24 ^a
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	89.09±3.52 ^d	103.79±6.21 ^c	123.54±6.95 ^b	177.69±9.56 ^a

注:表中同行不同小写字母表示处理间差异显著($p < 0.05$, Duncan's 法)。下同。

2.3 不同处理对皇竹草生物量及株高生长规律的影响

由表 5 可知, T_1 , T_2 和 T_3 处理皇竹草的株高和各部生物量均显著高于 CK ($p < 0.05$), 与 CK 相比, 株高分别增加了 19.10%, 23.39% 和 36.05%, 地上部生物量分别增加了 149.69%, 170.89% 和 231.63%, 地下部生物量分别增加了 89.64%, 122.07% 和 213.11%, 总生物量分别增加了 109.94%, 138.59% 和 219.38%。各处理间株高和各部生物量均表现为 $T_3 > T_2 > T_1 > CK$, 除 T_1 与 T_2 处理间的株高、地下部生物量无显著差异外, 株高和各部生物量在不同处理之间均存在显著差异 ($p < 0.05$)。说明鸡粪、鸡粪+炉渣改良的疏浚土能促进皇竹草株高生长, 提高各部生物量, 且 T_3 处理最佳。

表 5 不同处理对皇竹草株高和生物量的影响

Table 5 Effect of different treatments on plant height and biomass of *Pennisetum hybridum*

处理	株高/cm	地上部生物量/g	地下部生物量/g	总生物量/g
CK	116.50±5.07 ^c	28.68±1.26 ^d	14.67±1.10 ^c	43.35±2.04 ^d
T_1	138.75±8.62 ^b	54.39±1.90 ^c	36.63±2.75 ^b	91.01±3.31 ^c
T_2	143.75±2.99 ^b	63.69±3.83 ^b	39.74±2.75 ^b	103.43±3.59 ^b
T_3	158.50±3.11 ^a	89.80±4.69 ^a	48.65±2.12 ^a	138.45±6.33 ^a

不同处理皇竹草在种植期间株高的动态变化见图 1。各处理皇竹草株高在种植前 35 d 快速增长, 35 d 以后株高缓慢增加。种植 14 d 后, CK 处理株高低于 T_1 , T_2 和 T_3 处理, 42 d 后, T_3 处理株高高于其他处理, 鸡粪、鸡粪+炉渣改良的疏浚土能促进皇竹草株高生长。

由表 6 可知, 不同处理皇竹草株高生长率随种植时间变化呈先增加后减少, 其中在 21~35 d 时各处理生长率均达到最大值, 在 35 d 前各处理皇竹草株高生

长率均大于 1 cm/d, 35 d 后除 T_1 处理的 35~49 d 外, 各处理的株高生长率均小于 1 cm/d。在 63~91 d 时, T_2 和 T_3 处理生长率显著高于 CK 和 T_1 处理, 且 T_3 处理生长率显著高于 T_2 处理 ($p < 0.05$), 表明添加炉渣可以显著促进皇竹草后期的生长。

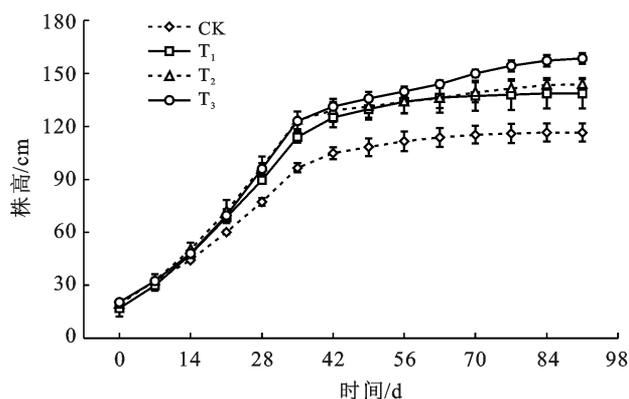


图 1 不同处理皇竹草株高随种植时间的变化

Fig.1 Variation of *Pennisetum hybridum* plant height with planting time for different treatments

表 6 不同时间各处理皇竹草株高生长率

Table 6 Height growth rate of *Pennisetum hybridum* in different treatments at different times

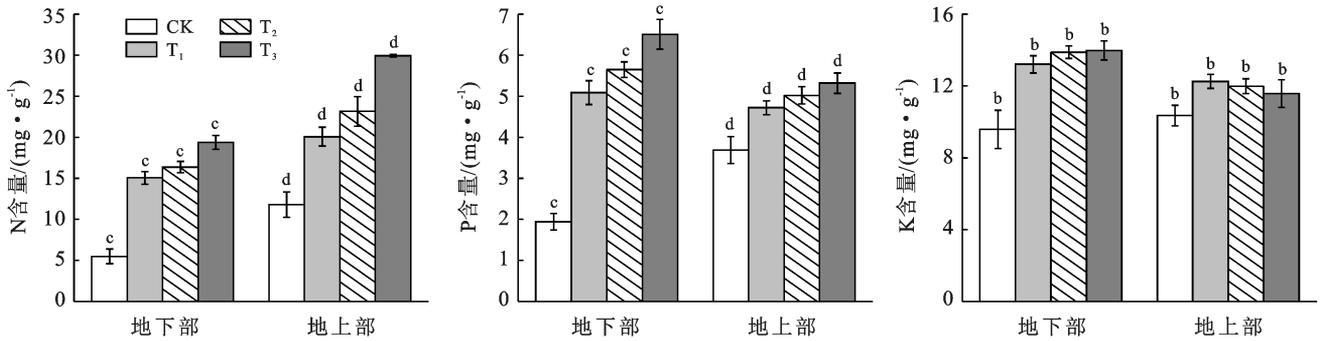
时间/d	不同处理皇竹草株高生长率/(cm·d ⁻¹)			
	CK	T_1	T_2	T_3
0—7	1.74±0.23 ^a	1.83±0.32 ^a	1.89±0.27 ^a	1.71±0.34 ^a
7—21	1.99±0.11 ^b	2.76±0.19 ^a	2.82±0.38 ^a	2.66±0.19 ^a
21—35	2.60±0.22 ^b	3.26±0.32 ^a	3.68±0.24 ^a	3.82±0.26 ^a
35—49	0.84±0.29 ^a	1.13±0.28 ^a	0.55±0.15 ^a	0.91±0.21 ^a
49—63	0.39±0.25 ^a	0.46±0.19 ^a	0.34±0.25 ^a	0.59±0.15 ^a
63—77	0.16±0.04 ^c	0.13±0.04 ^c	0.39±0.14 ^b	0.73±0.25 ^a
77—91	0.04±0.04 ^c	0.05±0.04 ^c	0.16±0.09 ^b	0.30±0.04 ^a

2.4 不同处理对皇竹草养分吸收的影响

不同处理对皇竹草地上部和地下部 N, P, K 等养分元素含量的影响见图 2。CK 处理的皇竹草各部养分

含量均显著低于其他处理。与 CK 相比,添加鸡粪(T_1)使皇竹草各部养分元素含量显著增加($p < 0.05$),其中地下部 N 含量增幅最大(173.64%)。与 T_1 相比,添加鸡粪+5%炉渣(T_2)使皇竹草各部 N, P 含量增加了 6.36%~15.39%,添加鸡粪+10%炉渣(T_3)后显著增加皇竹草各部 N, P 含量($p < 0.05$),增幅为

12.71%~49.10%,但地上部 K 含量降低了 5.55%,说明在鸡粪基础上添加 10%炉渣能促进皇竹草对 N 和 P 吸收,在一定程度上降低地上部 K 含量。与 T_2 相比,添加鸡粪+10%炉渣(T_3)使皇竹草各部 N, P 含量增加了 5.98%~29.22%。结果表明 3 种改良措施均可以显著提高皇竹草对养分的吸收。



注:不同小写字母表示处理间养分含量差异显著($p < 0.05$, Duncan's 法)。

图 2 不同处理对皇竹草地上部和地下部 N, P, K 含量的影响

Fig.2 Effect of different treatments on the N, P and K contents of the root and shoot of *Pennisetum hybridum*

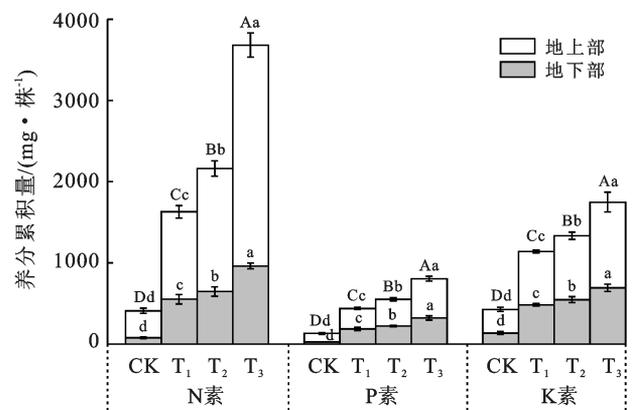
不同处理对皇竹草 N, P, K 累积量的影响见图 3。不同处理间皇竹草地上部、地下部和全株 N, P, K 累积量均表现为: $T_3 > T_2 > T_1 > CK$,且同一处理皇竹草地上部 N, P, K 累积量均大于地下部。与 CK 相比,添加鸡粪(T_1)使皇竹草各部 N, P, K 养分元素累积量显著增加了 124.58%~1 138.79% ($p < 0.05$)。与 T_1 相比,添加鸡粪+5%炉渣(T_2)使皇竹草各部养分元素累积量显著增加了 13.31%~40.76% ($p < 0.05$),添加鸡粪+10%炉渣(T_3)使皇竹草各部养分元素累积量显著增加了 43.24%~152.74% ($p < 0.05$)。与 T_2 相比,添加鸡粪+10%炉渣(T_3)使皇竹草各部养分元素累积量显著增加了 26.41%~76.56% ($p < 0.05$)。表明添加鸡粪对皇竹草养分累积量增加效果最好,在鸡粪的基础上添加炉渣也能增加皇竹草养分累积量,且 T_3 处理最佳。

植物体内不同营养元素比例可以反映对其需求程度。除 CK 处理外,3 种改良处理皇竹草的各部及全株养分累积量均表现为: $N > K > P$,由此可以知,施用鸡粪、鸡粪+炉渣后皇竹草对 N 吸收最大,因此在皇竹草种植中,应满足皇竹草对 N 元素的需求,适量补充 K 和 P 元素。

2.5 基于土壤和植物指标对疏浚土改良效果的综合评价

运用主成分分析对疏浚土的容重、总孔隙度、毛管持水量、pH 值以及有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾含量,皇竹草株高、总生物量、全株 N, P, K 含量、全株 N, P, K 累积量共 19 个指标综合

评价疏浚土改良效果。由碎石图(图 4)可知,前两个主成分特征值大于 1,影响疏浚土改良效果评价的前 2 个主成分包括了评价指标的大量信息,其中主成分 1 特征值为 16.673,贡献率为 87.753%,主成分 2 特征值为 1.598,贡献率为 8.409%,2 个主成分总贡献率为 96.163%,因此,通过主成分分析方法分析不同处理对疏浚土的改良效果是可靠的。



注:相同指标不同小写字母表示处理间地上部、地下部养分累积量差异显著,大写字母表示处理间全株养分累积量差异显著($p < 0.05$, Duncan's 法)。

图 3 不同处理对皇竹草养分累积量的影响

Fig.3 Effect of different treatments on nutrient accumulation of *Pennisetum hybridum*

19 个指标在 2 个主成分上的载荷图(图 5),除容重和 pH 值外,其他指标在第一主成分轴的正端,容重、株高、总生物量、全株 K 累积量、全株 P 累积量、全磷和有机质在第二主成分轴的负端,其他指标在第

二主成分轴的正端。对 2 个主成分进行综合评价,主成分的得分见表 7,由 SPSS 软件计算出的相应因子得分乘以相应特征值的算术平方根,分别计算出 2 个主成分得分,综合得分以主成分的贡献率对主成分得分进行加权平均,由此可见,不同处理对疏浚土改良效果的排序为: $T_3 > T_2 > T_1 > CK$ 。

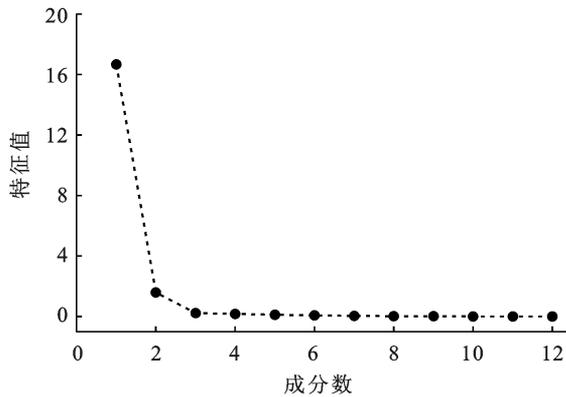


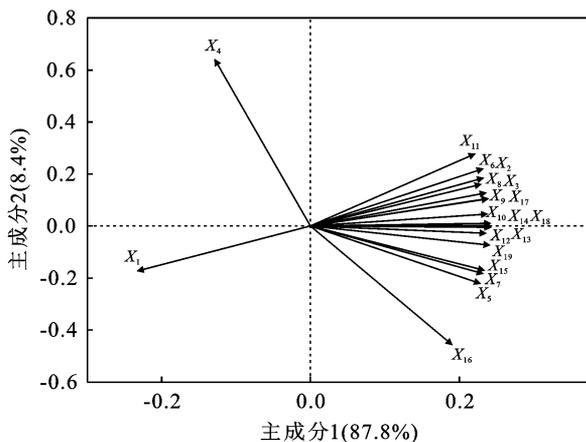
图 4 疏浚土改良效果主成分碎石图

Fig.4 Scree plot of principal components on dredged soil improvement effect

表 7 主成分分析综合得分

Table 7 Comprehensive score of principal component analysis

处理	主成分分值		综合得分	排序
	F ₁	F ₂		
CK	-5.85	0.94	-5.05	4
T ₁	-0.54	-1.55	-0.60	3
T ₂	1.48	-0.46	1.26	2
T ₃	4.90	1.07	4.39	1



注: X_1 为容重; X_2 为总孔隙度; X_3 为毛管持水量; X_4 为 pH 值; X_5 为有机质; X_6 为全氮; X_7 为全磷; X_8 为全钾; X_9 为碱解氮; X_{10} 为速效磷; X_{11} 为速效钾; X_{12} 为株高; X_{13} 为总生物量; X_{14} 为全株 N 含量; X_{15} 为全株 P 含量; X_{16} 为全株 K 含量; X_{17} 为全株 N 积累量; X_{18} 为全株 P 积累量; X_{19} 为全株 K 积累量。

图 5 疏浚土改良效果综合评价的主成分分析结果

Fig.5 Results of principal component analysis for the comprehensive evaluation of dredged soil improvement effect

3 讨论

3.1 鸡粪及炉渣添加下疏浚土理化性质变化的因素

本研究发现,添加鸡粪和不同比例炉渣显著影响了疏浚土的物理性质和化学性质。就物理性质而言,本研究中,在添加鸡粪的基础上添加不同比例炉渣均显著降低了疏浚土的容重,提高了总孔隙度和毛管持水量。有研究发现,将秸秆生物炭作为改良剂,可降低疏浚土容重,增加孔隙度^[10];丛玮玮^[11]将蚯蚓粪与疏浚土混合可降低容重,增加孔隙度;梅岭等^[18]将聚丙烯酰胺、高分子吸水性树脂、稻草秸秆对疏浚土进行改良,发现这 3 种材料在一定程度上降低疏浚土容重,增加孔隙度,提高持水能力;前人对疏浚土改良后的物理性质与本研究结果一致。由于疏浚土是细颗粒黏性的沉积物土,透气透水性差,而鸡粪密度较低,且含有丰富的有机质,能有效增强土壤团聚体水稳定性和机械稳定性^[19],另外,炉渣作为良好的透气透水基质,具有颗粒大,孔隙大的特点^[13],炉渣能提高土壤团聚体稳定性^[20],增加疏浚土强度^[21-22],很多学者发现鸡粪和炉渣均能有效降低土壤的容重,提高总孔隙度和毛管持水量^[23-25],进而提升土壤肥力,促进土壤水汽循环及植物根系呼吸、生长,与本研究结果相似。本研究中炉渣的添加显著改善了疏浚土的孔隙率和结构组合,进而增强了鸡粪对疏浚土物理性质的改良效果。

土壤养分是衡量土壤质量状况和影响植物生长的重要指标,本研究中鸡粪、炉渣添加显著提高疏浚土养分。鸡粪添加显著降低了疏浚土的 pH 值,这可能是因为鸡粪中含有的有机酸等多功能结构基团经土壤硝化作用后产生了部分 H^+ ,促使疏浚土 pH 值下降^[26]。而在添加鸡粪的基础上添加不同比例炉渣后,土壤 pH 值稍有升高,这是因为炉渣中的碱性氧化物进入土壤后会水解产生 OH^- ^[27],并且随着添加比例的增大加速了 OH^- 的生成^[28],所以当炉渣添加比例为 10% 时,疏浚土 pH 值略有上升。此外,添加鸡粪和不同比例炉渣显著增加了疏浚土的全量养分和碱解氮、速效磷、速效钾等有效养分,与弓萌萌等^[29]研究结果一致。这是因为鸡粪本身含有一定数量的养分,且以易于分解和释放的有效态为主,施入后能快速提高疏浚土的养分含量,并且鸡粪添加也携入了有益微生物和土壤酶,加快了土壤中有机的腐解和腐殖酸对土壤养分的活化速度,促进了土壤难溶性矿质养分的释放^[30]。而在鸡粪基础上添加炉渣后进一步提高了疏浚土的养分含量,一方面是因为炉渣含有的 Ca, Al, Fe, P 等元素^[31]进入土壤后被土壤酶

和土壤微生物转化成活性养分^[32],可以提高土壤养分^[14];另一方面,鸡粪中的有机质和腐殖质对炉渣中养分元素也有活化作用^[33]。相关研究表明,疏浚土经有机肥和脱硫石膏改良后,显著提高了有机质、速效磷和速效钾含量,碱解氮含量也有所提高^[7];施用生物炭可提高疏浚土全磷和速效磷含量^[10];添加蚯蚓粪可显著提高疏浚土有机质、铵态氮、硝态氮、速效磷和速效钾含量^[11]。前人对疏浚土进行改良后与本研究结果相似,表明鸡粪和炉渣作为改良剂能有效提高疏浚土养分含量。

3.2 皇竹草对疏浚土改良后的生长及养分吸收响应

疏浚土在添加鸡粪和不同比例炉渣后,显著促进了皇竹草的生长和养分吸收($p < 0.05$)。这与鸡粪本身富含养分有关,其添加可提高土壤营养元素含量,提升土壤肥力^[34]。Lazcano 等^[35]研究发现,施用鸡粪、猪粪和牛粪等有机肥能显著提高土壤中的有机质含量,其原因是此类有机肥本身含有丰富的有机质和腐殖质,且携带大量有益微生物,可增加土壤中微生物功能多样性和酶活性,促进有机质和腐殖质分解,释放更多的有效养分供植物吸收,进而促进植物生长。本研究中,皇竹草的生长对鸡粪和炉渣的添加响应显著,其主要原因是:①鸡粪和炉渣降低了疏浚土的容重,增加了总孔隙度,同时显著降低了土壤 pH,使其更接近适宜植物生长的 pH 范围,为皇竹草的生长发育创造了良好的基质环境^[36];②鸡粪施入土壤后,补充了大量 N 素,使土壤能渐进性、持续性供氮,这种供 N 方式更有利于植物根系吸收利用^[37],而鸡粪中的有机质既能促进无机 P、K 溶解,又能在分解过程中产生有机络合剂,将炉渣中的不溶性磷酸盐络合成为有效态养分,使土壤中维持较高有效养分水平供植物吸收^[38]。相关研究表明,利用有机肥—脱硫石膏^[7]、咖啡渣^[9]、生物炭^[10]、蚯蚓粪等^[11]材料对疏浚土进行改良,可以促进植物生长,与本研究结果相似。林明月等^[39]对皇竹草进行施肥,养分累积规律表现为: $N > K > P$,说明皇竹草在鸡粪和炉渣改良后疏浚土中养分累积规律与前人研究一致。鸡粪和不同比例炉渣的施入有效改善了疏浚土的理化性质,携入的大量养分提升了疏浚土的综合肥力,从而促进了皇竹草生长和植物体内养分的累积。

4 结论

(1) 添加鸡粪、鸡粪+炉渣可改善疏浚土的基本理化性质,可使疏浚土的容重明显降低、总孔隙度明显增加,持水能力与通气性加强,同时增加疏浚土有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾等养

分,因此添加鸡粪与炉渣可提高疏浚土的肥力。

(2) 疏浚土中添加鸡粪可以促进皇竹草生长和养分吸收,在鸡粪基础上再添加炉渣效果更佳,能进一步促进皇竹草对氮、磷、钾等营养元素的吸收,进而促进生长,提高生物量。

(3) 综合评价结果显示,不同处理对疏浚土的改良效果为: $T_3 > T_2 > T_1 > CK$,也进一步验证了 5% 鸡粪+10% 炉渣(T_3)处理对疏浚土的改良效果最佳,表明鸡粪和炉渣作为改良剂施用于疏浚土具有广阔的应用前景。经改良后的疏浚土用于种植皇竹草,不仅可以实现疏浚土的资源化利用,还能促进皇竹草生长从而提高产量。综上所述,未来在疏浚土资源化利用的探索中,可选用鸡粪和炉渣作为改良剂,选用皇竹草作为先锋植物。同时,对于添加其他不同比例的鸡粪和炉渣是否有利于疏浚土的改良以及其他废弃物是否可作为疏浚土改良剂,还有待进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] Wang Liangkai, Shao Yalu, Zhao Zilong, et al. Optimized utilization studies of dredging sediment for making water treatment ceramics based on an extreme vertex design [J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, 38: 101603.
- [2] 刘敏,钟继承,余居华,等.湖泊疏浚堆场淤泥污染及潜在生态风险评价[J].湖泊科学,2016,28(6):1185-1193.
- [3] 薄录吉,王德建,颜晓,等.底泥环保资源化利用及其风险评估[J].土壤通报,2013,44(4):1017-1024.
- [4] 贾飞跃,朱晓明,魏华,等.环保疏浚底泥资源化利用技术研究和应用进展[C]//2020 中国环境科学学会科学技术年会论文集(第二卷).南京,2020:400-406.
- [5] Capasso I, Liguori B, Ferone C, et al. Strategies for the valorization of soil waste by geopolymer production: An overview [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 288: 125646.
- [6] 薄录吉,王德建,汪军,等.苏南河道疏浚底泥农用对土壤及水稻生长的影响[J].土壤通报,2015,46(3):709-714.
- [7] 冯波,石鸿韬,陶润礼,等.环保疏浚底泥改良用于绿化种植土技术研究[C]//第十一届全国工程地质大会论文集.武汉,2020:38-43.
- [8] 陈虞祥.疏浚土配制喷播绿化基质配方研究[D].江苏镇江:江苏科技大学,2021.
- [9] Kim D, Kim M, Kim M, et al. Improvement of Saemangeum dredged soils using coffee sludge for vegetation soil [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2016, 2016:4698561.
- [10] Huang Xiangfeng, Li Shuangqiang, Li Shiyang, et al. The effects of biochar and dredged sediments on soil structure and fertility promote the growth, photosyn-

- thetic and rhizosphere microbial diversity of *Phragmites communis* (Cav.) Trin. ex Steud [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 697:134073.
- [11] 丛玮玮. 利用蚯蚓粪改良疏浚太湖底泥效果研究[D]. 江苏扬州:扬州大学, 2016.
- [12] Urra J, Alkorta I, Lanzén A, et al. The application of fresh and composted horse and chicken manure affects soil quality, microbial composition and antibiotic resistance [J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 135:73-84.
- [13] 王开峰, 彭娜, 刘德良. 面向矿山废弃地复垦的炉渣污泥人工土壤的理化特性[J]. *环境工程学报*, 2012, 6(8): 2875-2881.
- [14] 郑行洋, 王维奇, 王纯, 等. 铁炉渣在稻田土壤养分改良中的应用[J]. *实验室研究与探索*, 2013, 32(3):10-12.
- [15] 易自成, 贺俊波, 程华, 等. 镉对皇竹草构件生长及生理特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(2):276-282.
- [16] 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.
- [17] 鲍土旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 梅岭, 陈虞祥, 王雷, 等. 疏浚土配制喷播绿化基质的配比试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2023, 45(1):135-144.
- [19] Liao Wei, Liu Yan, Liu Chuanbin, et al. Acid hydrolysis of fibers from dairy manure [J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(14):1687-1695.
- [20] 朱秋丽, 曾冬萍, 王纯, 等. 废弃物施加对福州平原稻田土壤团聚体分布及其稳定性的影响[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(8):3000-3008.
- [21] Cikmit A A, Tsuchida T, Kang G, et al. Particle-size effect of basic oxygen furnace steel slag in stabilization of dredged marine clay [J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59(5): 1385-1398.
- [22] Liu Feiyu, Zhu Chengan, Yang Kejun, et al. Effects of fly ash and slag content on the solidification of river-dredged sludge [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2021, 39(1):65-73.
- [23] 李江涛, 钟晓兰, 赵其国. 畜禽粪便施用对稻麦轮作土壤质量的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(10):2837-2845.
- [24] Huang Rong, Wang Yingyan, Liu Jiang, et al. Partial substitution of chemical fertilizer by organic materials changed the abundance, diversity, and activity of nirS-type denitrifying bacterial communities in a vegetable soil [J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 152:103589.
- [25] Agbede T M, Oyewumi A. Soil properties, sweet potato growth and yield under biochar, poultry manure and their combination in two degraded Alfisols of humid tropics [J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 304:111331.
- [26] 李可, 孙彤, 孙涛, 等. 施用鸡粪有机肥对种植小油菜土壤微生物群落结构多样性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(10):2316-2324.
- [27] 杨金康, 杨秋云, 朱利楠, 等. 不同改良剂在石灰性潮土上对土壤—小麦体系镉的吸收转运的影响[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2021, 19(4):96-102.
- [28] 章萍, 王天琪, 钱光人, 等. 膨润土、煤渣在稳定底泥中对上覆水体及底泥 pH-Eh-COD 的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(3):422-426.
- [29] 弓萌萌, 王红, 张雪梅, 等. 不同有机肥施用量对苹果园土壤养分及酶活性的影响[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(3):74-78.
- [30] Opoku-Kwanowaa Y, Chen Xiaodong, Li Jianming, et al. Evaluation of the continuous application of different organic materials on soil surface charge and chemical properties along the soil profile of a typical mollisol [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2021, 31(1): 245-256.
- [31] 王晓彤, 周雅心, 蓝兴福, 等. 炉渣与生物炭配施对稻田土壤性质及微生物特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(1):333-343.
- [32] 金亚波, 寇智瑞, 韦建玉, 等. 有机物料对黄壤烟田土壤团聚体组成及土壤肥力的影响[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(8):9-16.
- [33] 龚雪蛟, 秦琳, 刘飞, 等. 有机肥料对土壤养分含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(4):1403-1416.
- [34] Cayci G, Temiz C, Sözüdogru Ok S. The effects of fresh and composted chicken manures on some soil characteristics [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2017, 48(13):1528-1538.
- [35] Lazcano C, Gómez-Brandón M, Revilla P, et al. Short-term effects of organic and inorganic fertilizers on soil microbial community structure and function [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49(6):723-733.
- [36] 王源, 朱毓蓉, 欧阳铖人, 等. 有机肥施用对植烟农田土壤肥力及烟叶质量的影响研究进展[J]. *土壤通报*, 2020, 51(4):1003-1009.
- [37] 杨生茂, 李凤民, 索东让, 等. 长期施肥对绿洲农田土壤生产力及土壤硝态氮积累的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(10):2043-2052.
- [38] 程艳丽, 邹德乙. 长期定位施肥残留养分对作物产量及土壤化学性质的影响[J]. *土壤通报*, 2007, 38(1):64-67.
- [39] 林明月, 许春辉, 苏以荣, 等. 平衡施肥对喀斯特地区牧草产量及品质的影响[J]. *农业现代化研究*, 2011, 32(4):502-504.