

腐熟污泥对苗圃土壤肥力及酶活性的影响

曹希梅^{1*}, 王艳春², 郑 焱², 李子敬², 赵雪敏², 刘淑英^{1#}

¹甘肃农业大学, 资源与环境学院, 甘肃 兰州

²北京市园林绿化科学研究所, 北京

收稿日期: 2024年1月29日; 录用日期: 2024年3月19日; 发布日期: 2024年3月28日

摘 要

为探究腐熟污泥不同施用量对苗圃土壤肥力及酶活性的影响, 在北京市大兴区黄垓苗圃进行腐熟污泥不同施用量的田间试验。结果表明, 腐熟污泥施用可显著提高苗圃土壤养分含量, 且对0~20 cm土层的养分含量提升效果优于20~40 cm土层, AN的提升量较其他养分最高, 在0~20 cm土层, 施用腐熟污泥3 kg/m² (M3)土壤的AP含量最高, 较CK提高了55.84%; 施用腐熟污泥土壤容重和pH无显著影响, 施用腐熟污泥后土壤酶活性的变化趋势具有一致性, 较CK同时上升或下降, 同时土壤酶活性受施肥作用时间的影响较大, 影响效果各异。结果表明, 脲酶与蛋白酶活性均随施肥作用时间的推移而增加, 磷酸酶活性除3 kg/m² (M3)土壤随时间逐渐升高外, 其余三个处理均表现为先升高后降低的趋势; 蔗糖酶活性随时间的变化趋势为先升高后降低。综上, 施用腐熟污泥可以提升苗圃土壤质量, 提高土壤肥力状况, 腐熟污泥在园林绿化上的使用, 是污泥资源化利用的重要途径。

关键词

污泥还田, 林地土壤, 酶活性, 土壤养分, 循环利用

The Effect of Decomposed Sludge on Soil Fertility and Enzyme Activity in Nurseries

Ximei Cao^{1*}, Yanchun Wang², Yi Zheng², Zijing Li², Xuemin Zhao², Shuying Liu^{1#}

¹College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu

²Beijing Institute of Landscape and Greening Science, Beijing

Received: Jan. 29th, 2024; accepted: Mar. 19th, 2024; published: Mar. 28th, 2024

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 曹希梅, 王艳春, 郑焱, 李子敬, 赵雪敏, 刘淑英. 腐熟污泥对苗圃土壤肥力及酶活性的影响[J]. 有机化学研究, 2024, 12(1): 48-59. DOI: 10.12677/jocr.2024.121004

Abstract

To investigate the effects of different application rates of decomposed sludge on soil fertility and enzyme activity in nurseries, field experiments were conducted in Huangfa Nursery in Daxing District, Beijing. The results showed that the application of decomposed sludge significantly increased the nutrient content of nursery soil, and the effect of improving the nutrient content in the 0~20 cm soil layer was better than that in the 20~40 cm soil layer. The increase in AN was the highest compared to other nutrients. In the 0~20 cm soil layer, the application of decomposed sludge at a rate of 3 kg/m² (M3) resulted in the highest AP content in soil, which increased by 55.84% compared to CK; the application of decomposed sludge had no significant effect on soil bulk density and pH, but the trend of soil enzyme activity after the application of decomposed sludge was consistent, increasing or decreasing at the same time as CK. At the same time, soil enzyme activity was greatly affected by the application time, and the effects were different. The results showed that the activities of urease and protease increased with the passage of fertilization time. Except for the soil with a weight of 3 kg/m² (M3), the activity of phosphatase gradually increased with time, the other three treatments showed a trend of first increasing and then decreasing; the trend of sucrose enzyme activity over time is to first increase and then decrease. In summary, the application of decomposed sludge can improve the soil quality and fertility of nurseries. The use of decomposed sludge in landscaping is an important way for the resource utilization of sludge.

Keywords

Returning Sludge to the Field, Forest Soil Enzyme Activity, Soil Nutrients, Recycling

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

城市污泥是指城市生活废水处理后的沉淀物，它包含有机物、无机物、富含养分和重金属等成分。近年来，随着城市化进程的推进和人口增长。城市污泥的产量逐年增加，据统计，2019年我国污泥产量已超过6000万吨(以含水率80%计)，预计2025年我国污泥年产量将突破9000万吨[1]，同时，污泥处理处置没有与污水处理同步提升，污泥处理处置还没有真正实现稳定化、无害化、资源化，污泥处理处置问题未能得到有效解决，形势十分严峻。早期城市污泥通过填埋、焚烧等方法处理，虽然操作非常简便，见效快，但由于内部有害物质没有得到有效处理，极易造成水资源和大气环境的污染，且处理成本高，需要花费大量资源，这种处理方法被逐渐摒弃。

腐熟污泥含有丰富的有机物质和氮磷钾等养分，作为一种重要生产措施，在农业生产中被广泛应用，可以起到提升土壤肥力、酶活性和作物产量的积极作用[2][3]，但是污泥中存在重金属等有害物质，可能会对土壤养分、微生物活性等产生影响。相较于将污泥堆肥用于农业用途，将其施用于苗圃具有更高的安全性，这是因为苗圃与食品安全不直接相关，且森林生态系统具有较强的自我修复功能[4]。

尽管国际上已经有关于在苗圃利用污泥堆肥的历史和相关研究报道，但国内对于在苗圃利用污泥堆肥的研究报道较少。前期彭祚登[5]等对污泥林地利用对土壤养分等的影响开展了一系列研究，形成了初

步的认识。然而,对于土壤微生物、土壤酶活性的影响尚不明确。林地土壤通常具有薄而酸性的腐质层[6],土壤的持水性和养分持久性都较低[7]。施用污泥堆肥可以为林地提供有机基质,改善土壤质量[8],同时有助于增加林地土壤中的营养元素,并且成本较低[9],长期来看,施用污泥还有助于减小林地土壤容重、提升孔隙度[5]。此外,施用污泥还会影响土壤酶活性,作为土壤组分中最活跃的有机成分,土壤酶是生物过程的主要调节者,它与有机物质分解、营养物质循环、能量转移、环境质量等密切相关,参与各种生物化学过程。酶的分解作用是物质循环过程的限制性步骤,土壤酶的分解作用参与并控制着土壤中的生物化学过程在内的自然界物质循环过程,酶活性的高低直接影响物质转化循环的速率,因而土壤酶活性对生态系统功能有很大的影响。在几乎所有生态系统的监测和研究中,土壤酶活性的检测似乎成了必不可少的测定指标[10]。目前,关于对施肥处理对土壤肥力和土壤酶活性的研究比较广泛,并已经取得了一定的研究成果[11]。

研究污泥堆肥在苗圃施用对土壤的影响,可为污泥资源化利用提供参考,为恢复生态林地力衰退、生态修复提供参考,为可持续发展提供实际理论依据。

2. 材料与方法

2.1. 试验材料

供试无害化腐熟污泥取自北京市大兴区庞各庄污水处理厂,其基本指标见表1。

Table 1. Basic properties of test sludge
表 1. 供试污泥基本性质

项目	参数
pH 值	7.94
有机质 g/kg	203
总氮/g·kg ⁻¹	20.9
钾/g·kg ⁻¹	3.19
总磷/g·kg ⁻¹	26.1
EC/μS·cm ⁻¹	1.27*10 ³
总汞/(mg/kg)	6.77
总砷/(mg/kg)	9.88
总铬/(mg/kg)	51.0
总铅/(mg/kg)	22.8
总镉/(mg/kg)	<1

2.2. 试验地点

试验区位于北京市大兴区礼贤镇,该地属永定河洪积——冲积平原的一部分,为暖温带半湿润季风气候,具有夏季高温多雨,冬季寒冷干燥的特点。土壤类型为冲积性砂质壤土,保水保肥能力较差。试验地为黄垆苗圃 13 号地块,该地块主要用于种植、培育三倍体毛白杨,2022 年春季毛白杨出圃后,试验地未种植苗木,期间只进行中耕锄草管理。

2.3. 试验设计

2023 年 8 月,采用田间完全随机区组设计,将试验林地划分为等面积的若干区域(小区面积为 30 m ×

30 m), 采用不同污泥施用量处理布置于田间, 施用量(污泥干基重)和处理分别为: 0 kg/m^2 (CK)、 1 kg/m^2 (M1)、 2 kg/m^2 (M2)、 3 kg/m^2 (M3), 具体排列方式如图 1 所示。每个处理三个重复。采用人工撒施的方式将污泥施用在土壤表层, 施用后浇水使其保持湿润。同时, 为避免边缘效应, 小区间设置保护行, 间隔 3 m。

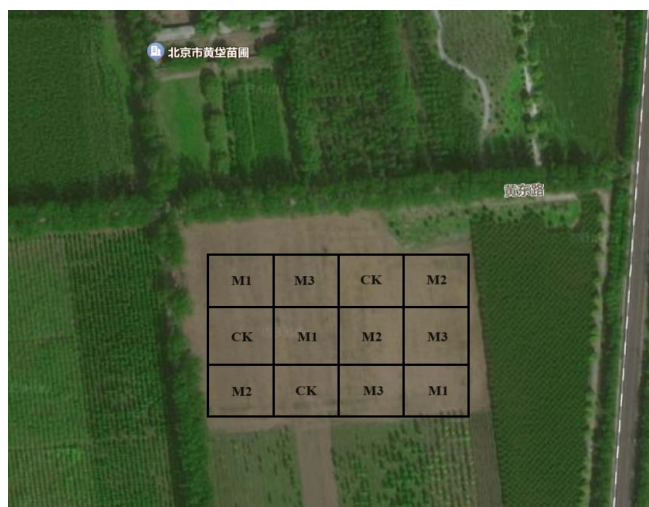


Figure 1. Specific distribution of experimental sites and sludge application amount

图 1. 试验样地具体分布及污泥施用量

2.4. 样品采集与分析

施肥前采集 0~20 cm 和 20~40 cm 土样用于测定试验地土壤本底值, 结果如表 2 所示:

Table 2. Physical and chemical properties of soil in the experimental site

表 2. 试验样地土壤理化性质

土层深度	pH 值	容重(BD)/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	有机质 (SOM)/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	碱解氮 (AN)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷 (AP)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 (AK)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
0~20 cm	8.11	1.38	7.55	34.84	57.3	258
20~40 cm	8.18	1.43	8.34	37.65	49.7	209

施肥林地平衡十天后, 每 1 个月采集土壤样品用于测定酶活性, 3 个月后测定土壤理化性质。采用电位法测定土壤 pH 值, 环刀法测定土壤容重(BD), 重铬酸钾外加热方法($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{-H}_2\text{SO}_4$ 法)测定有机质 (SOM)含量, 碱解扩散法测定碱解氮(AN)含量, $0.5 \text{ mol/L NaHCO}_3$ 浸提——钼锑抗比色法测定速效磷(AP)含量, $1.0 \text{ mol/L NH}_4\text{OAc}$ 浸提 - 火焰光度法测定速效钾(AK)含量[12], 靛酚蓝比色法测定脲酶水解尿素产生的 $\text{NH}_3\text{-N}$, 3,5-二硝基水杨酸比色法测定土壤蔗糖酶活性, 茚三酮比色法测定土壤蛋白酶活性, 磷酸苯二钠比色法测定土壤磷酸酶活性。

2.5. 数据处理

采用改进的内梅罗指数法[13] [14], 对土壤肥力质量进行综合评价。参照表 3 的分级标准, 对选择的指标参数进行均一化处理, 目的是建立统一标准的量纲关系, 从而实现不同指标之间比重的权衡, 处理

方法如下:

当属性值属于差的级别, 即 $C_i \leq X_a$ 时,

$$F_i = C_i / X_a (F_i \leq 1) \quad (1)$$

当属性值属于中等级别, 即 $X_a < C_i \leq X_c$ 时,

$$F_i = 1 + (C_i - X_a) / (X_c - X_a) (1 < F_i \leq 2) \quad (2)$$

当属性值属于较好级别, 即 $X_c < C_i \leq X_p$ 时,

$$F_i = 2 + (C_i - X_c) / (X_p - X_c) (2 < F_i \leq 3) \quad (3)$$

当属性值属于好级别, 即 $C_i > X_p$ 时,

$$F_i = 3 \quad (4)$$

其中, i 为某分类属性的分系数, C_i 为对应该属性的测定值, F_i 为经过标准化处理后的值, X_a , X_c , X_p 为分级指标。

Table 3. Classification standards for various soil indicators in the Nemeru evaluation method

表 3. 内梅罗评定法中各土壤指标的分级标准

土壤指标	内梅罗分级指标		
	x_a	x_c	x_p
pH	9	8	7
容重 BD	1.45	1.35	1.25
有机质 SOM	10	20	30
碱解氮 AN	60	120	180
有效磷 AP	5	10	20
速效钾 AK	50	100	200

此外, 由于土壤容重在 $1.14 \sim 1.26 \text{ g/cm}^3$ 之间是最优植物正常生长范围, 这个范围以外的土壤容重均不利于植被生长。针对不同范围的土壤容重标准化后数值极差较大的问题, 应对容重标准化阈值进行适当调整、处理, 具体方法如下:

当容重 $C_i \geq 1.45$ 时,

$$F_i = 1.45 / C_i (F_i \leq 1) \quad (5)$$

当 $1.35 \leq C_i < 1.45$ 时,

$$F_i = 1 + (C_i - 1.45) / (1.35 - 1.45) (1 < F_i \leq 2) \quad (6)$$

当 $1.25 \leq C_i < 1.35$ 时,

$$F_i = 2 + (C_i - 1.35) / (1.25 - 1.35) (2 < F_i \leq 3) \quad (7)$$

当 $1.14 \leq C_i < 1.25$ 时,

$$F_i = 3 \quad (8)$$

其次, 根据改进的内梅罗指数法, 得出土壤综合肥力指数的计算公式为:

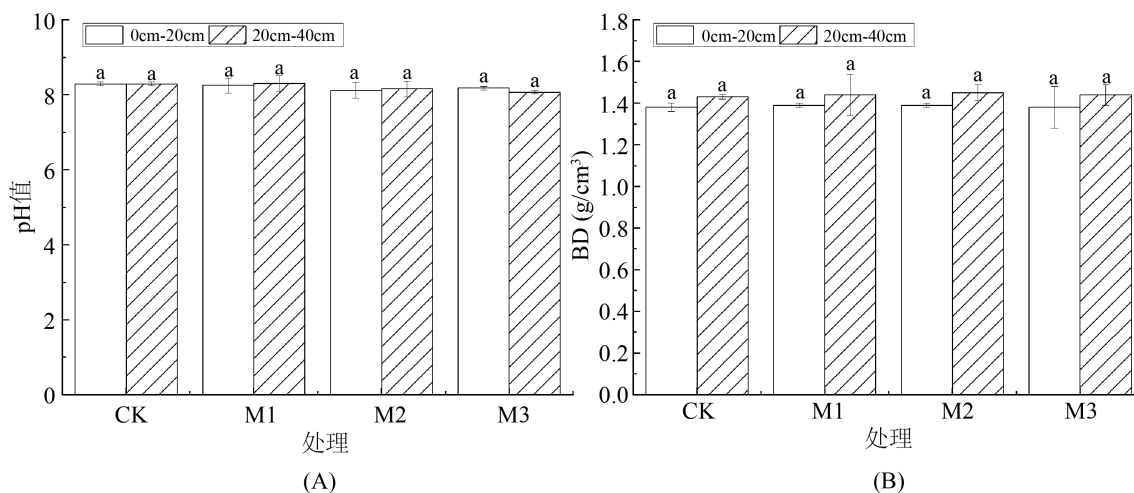
$$F = \frac{n-1}{n} \sqrt{\frac{(\bar{F}_i)^2 + (F_{i\min})^2}{2}} \quad (9)$$

式中： F 为土壤的综合肥力指数， \bar{F}_i 为土壤各个肥力指标分肥力指数平均值， n 为代入公式的测定指标个数， $F_{i\min}$ 为土壤各个肥力指标中肥力指数的最小值。

3. 结果与分析

3.1. 不同施肥处理对林地土壤理化性质及综合肥力指数的影响

由图 2 可知，施用腐熟污泥产品对土壤 pH 值的影响不显著，各处理间 pH 值基本相同，0~20 cm 和 20~40 cm 处土壤 pH 值基本接近，施用腐熟污泥能降低土壤 pH 值，但差异不显著；不同处理土壤 BD 在 1.38~1.45 之间，在 0~20 cm 土层，M1, M2, M3 较 CK 差异不显著，在 20~40 cm 土层，M1, M2, M3 较 CK 差异不显著。



Note: Different lowercase letters indicate significant differences between data from the same soil layer ($P < 0.05$), the same below.

注：不同小写字母表示相同土层数据间的差异显著性($P < 0.05$)，下同。

Figure 2. Effects of different fertilization treatments on soil pH and BD in forest land

图 2. 不同施肥处理对林地土壤 pH 值、BD 的影响

由图 3 可知，施用腐熟污泥产品可对苗圃土壤有机质含量产生影响，0~20 cm 土壤中，有机质含量由大到小排列为 M3 > M2 > M1 > CK；M3 的土壤有机质含量最高，达到了 13.2 g/kg，较 CK 提高了 30.69%，20~40 cm 土壤中，有机质含量从大到小依次为 M2 > M3 > M1 > CK；M2 的土壤有机质含量最高，较 CK 提高了 20.38%；施用腐熟污泥产品可显著提高 0~20 cm 和 20~40 cm 的土壤 AN 含量。在 0~20 cm 土层中，土壤 AN 含量由大到小依次排列为 M3 > M2 > M1 > CK；M3 的土壤 AN 含量最高，较 CK 提高了 42.53%；20~40 cm 土壤中，AN 含量从大到小依次为 M1 > M2 > M3 > CK；M1 的土壤 AN 含量最高，较 CK 提高了 70.31%。且在不同施肥处理下 0~20 cm 林地土壤 AN 含量高于 20~40 cm 林地土壤 AN 含量，表明施肥主要提升了表层土壤的养分含量。

不同施肥处理对土壤 AP 的影响如图 4 所示，施用腐熟污泥产品可显著提高 0~20 cm 和 20~40 cm 的林地土壤 AP 含量。在 0~20 cm 土层中，林地土壤 AP 含量由大到小依次排列为 M3 > M1 > M2 > CK；M3 的土壤 AP 含量最高，较 CK 提高了 55.84%；20~40 cm 土壤中，AP 含量从大到小依次为 M2 > M3 >

M1 > CK; M2 的林地土壤 AP 含量最高, 较 CK 提高了 28.88%; 施用腐熟污泥产品可改变 0~20 cm 和 20~40 cm 的土壤 AK 含量。在 0~20 cm 土层中, AK 含量由大到小依次排列为 M2 > M3 > CK > M1; M2 的土壤 AK 含量最高, 较 CK 提高了 13.57%; 20~40 cm 土壤中, AK 含量从大到小依次为 M2 > M1 > CK > M3; M2 的土壤 AK 含量最高, 较 CK 提高了 21.39%。

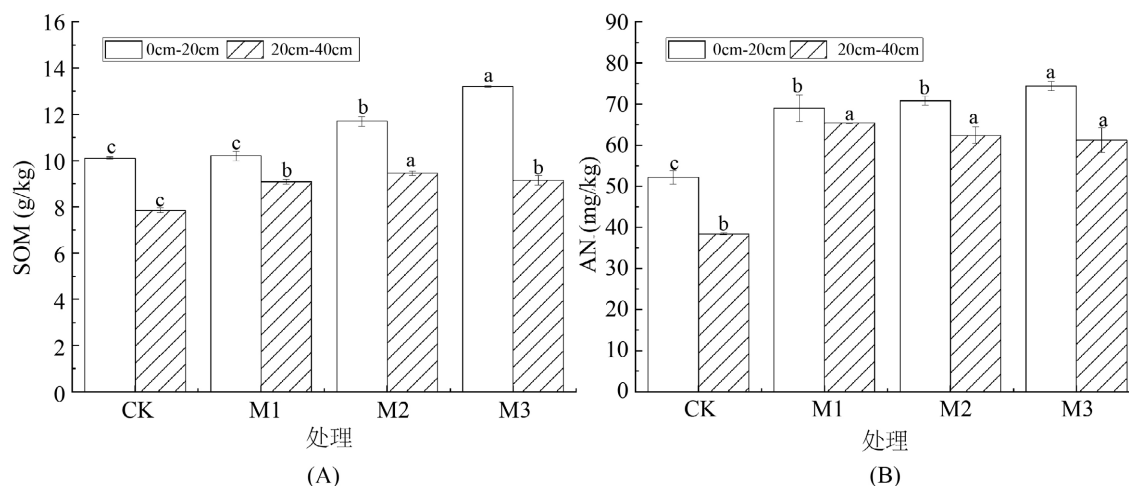


Figure 3. Effects of different fertilization treatments on soil SOM and AN values in forest land

图 3. 不同施肥处理对林地土壤 SOM 值、AN 值的影响

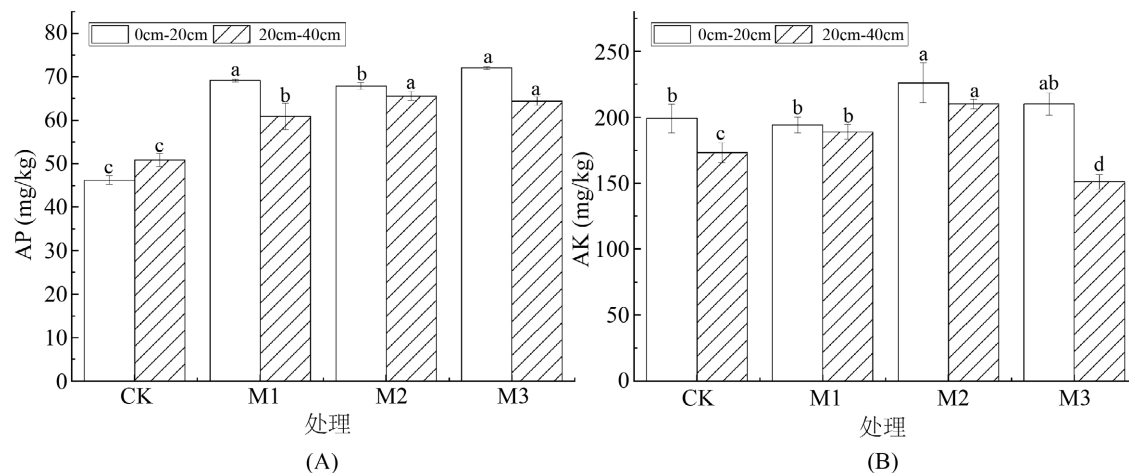


Figure 4. Effects of different fertilization treatments on AP and AK values of forest soil

图 4. 不同施肥处理对林地土壤 AP 值、AK 值的影响

Table 4. Comprehensive evaluation of soil fertility based on soil fertility index method

表 4. 基于土壤肥力指数法的土壤肥力综合评价

处理	F_i						\bar{F}_i	F
	pH	BD	SOM	AN	AP	AK		
CK 0~20 cm	1.71	1.70	1.01	0.87	3.00	2.99	1.91	1.24
CK 20~40 cm	1.71	1.20	0.76	0.64	3.00	2.73	1.69	1.06
M1 0~20 cm	1.75	1.60	1.02	1.15	3.00	2.94	1.86	1.25

续表

M1 20~40 cm	1.70	1.10	0.92	1.09	3.00	2.89	1.73	1.12
M2 0~20 cm	1.88	1.60	1.17	1.18	3.00	3.00	1.90	1.32
M2 20~40 cm	1.84	1.00	0.95	1.04	3.00	3.00	1.80	1.20
M3 0~20 cm	1.82	1.70	1.32	1.24	3.00	3.00	1.95	1.30
M3 20~40 cm	1.93	1.10	0.91	1.02	3.00	2.51	1.70	1.14

由表 4 可知, 施肥 100 天后, 不同处理土壤综合肥力指数(F)在 1.06~1.32 之间, 从 0~20 cm 土层来看, 各处理 F 的大小排序为: M2 > M3 > M1 > CK, M2 处理的 F 较 CK 提高了 6.45%; 从 20~40 cm 土层来看, 各处理 F 的大小排序为: M2 > M3 > M1 > CK, M2 处理的 F 较 CK 提高了 13.21%。

3.2. 不同施肥处理对林地土壤酶活性的影响

施肥处理对土壤酶活性的影响各异, 要因具体情况具体分析, 且施肥处理对 0~20 cm 土壤酶活性影响最显著, 所以对 0~20 cm 的土壤进行分析, 故本研究不对 20~40 cm 的土壤样本进行详细的土壤酶活性分析。

3.2.1. 不同施肥处理对林地土壤脲酶、土壤蛋白酶的影响

如图 5 所示, 土壤脲酶活性随施肥后时间的推移而增加, 施肥后的第一个月, 各处理脲酶活性表现为 CK > M3 > M1 > M2, M1、M2、M3 显著低于 CK ($p < 0.05$), 出现下降趋势, 分别下降了 38.08%, 42.26%, 23.27%; 第二个月, 其活性表现为 M1 > M3 > M2 > CK, M1、M2、M3 显著高于 CK, 出现上升趋势, 分别升高了 32.90%, 24.98%, 37.95, 但三个处理间差异不显著($p > 0.05$); 第三个月, 其活性表现为 M2 > M1 > M3 > CK, M1、M2、M3 间差异不显著但显著高于 CK, 分别提高了 43.63%、41.74%、32.76%。

如图 5 所示, 土壤蛋白酶活性随施肥后时间的推移而增加, 施肥后的第一个月, 各处理蛋白酶活性表现为 M1 > CK > M2 > M3; 第二个月, 其活性表现为 M1 > CK > M3 > M2, M1、M2、M3 较 CK 差异显著, 分别上升了 4.8%, -11.75%, -10.84%; 在第三个月, 各处理的蛋白酶活性由大到小表现为 M1 > M3 > M2 > CK, M1、M2、M3 较 CK 差异显著, 分别提高了 18.60%、3.12%、7.72%。

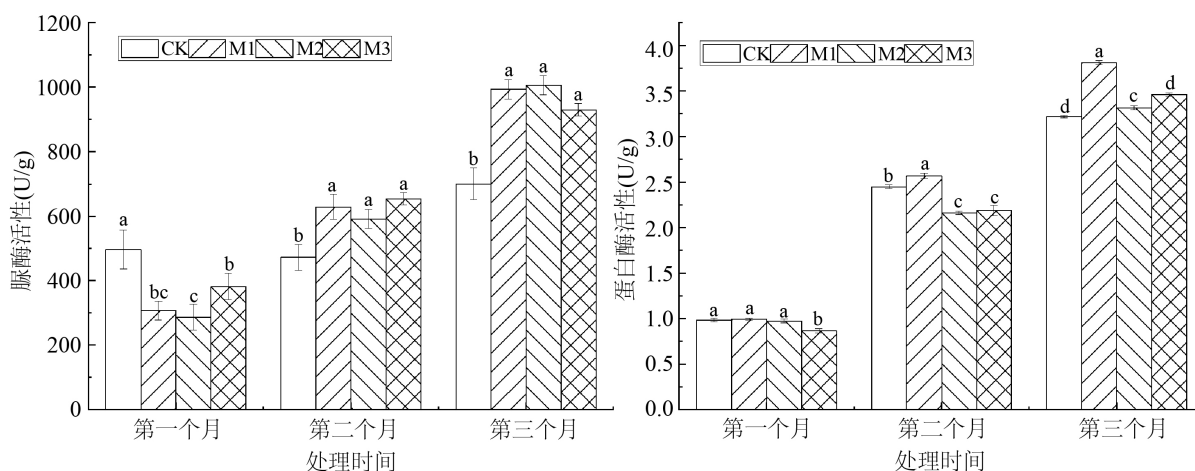


Figure 5. Effects of different fertilization treatments on soil urease and protease activity in forest land

图 5. 不同施肥处理对林地土壤脲酶, 蛋白酶活性影响

3.2.2. 不同施肥处理对林地土壤磷酸酶、蔗糖酶活性的影响

如图 6 所示, 施肥后随着时间的推移, M1、M2 林地土壤磷酸酶活性由大到小表现为第二个月 > 第一个月 > 第三个月, M3 林地土壤磷酸酶活性由大到小为第三个月 > 第二个月 > 第一个月, M1、M2 随时间推移表现为先升高后降低的趋势, M3 随时间推移呈升高趋势。施肥后第一个月, 各处理的磷酸酶活性表现为 M2 > M3 > CK > M1, M1、M2、M3 较 CK 差异显著, 分别提高了 -5.52%、19.1%、3.25%; 第二个月, 各处理的土壤磷酸酶活性表现为 M2 > CK > M3 > M1, M2 较 CK 差异显著, 上升了 15.64%, M1、M3 较 CK 差异不显著; 第三个月, 各处理的磷酸酶活性表现为 M3 > M2 > M1 > CK, M1、M2、M3 较 CK 差异显著, 分别提高了 12.28%、15.17%、60.25%。

不同处理对林地土壤蔗糖酶的活性随时间影响如图 6 所示, 蔗糖酶活性在四个处理下均表现为先升高后降低的变化趋势, 随着时间的推移, M1、M2、M3 的林地土壤蔗糖酶活性由大到小表现为第二个月 > 第一个月 > 第三个月, M1、M2、M3 随时间推移均表现为先升高后降低的趋势, 施肥后第一个月, 各处理的蔗糖酶活性表现为 M2 > CK > M1 > M3, M2、M3 较 CK 差异显著, 分别提高了 4.45%、-17.38%, M1 较 CK 差异不显著; 第二个月, 各处理的土壤蔗糖酶活性表现为 CK > M1 > M3 > M2, M1、M2、M3 较 CK 差异显著, 分别降低了 13.31%、20.91%、16.69%; 第三个月, 各处理的蔗糖酶活性表现为 M1 > M2 > M3 > CK, M1、M2、M3 较 CK 差异显著, 林地土壤蔗糖酶活性较 CK 分别提高了 36.83%、28.42%、27.1%。

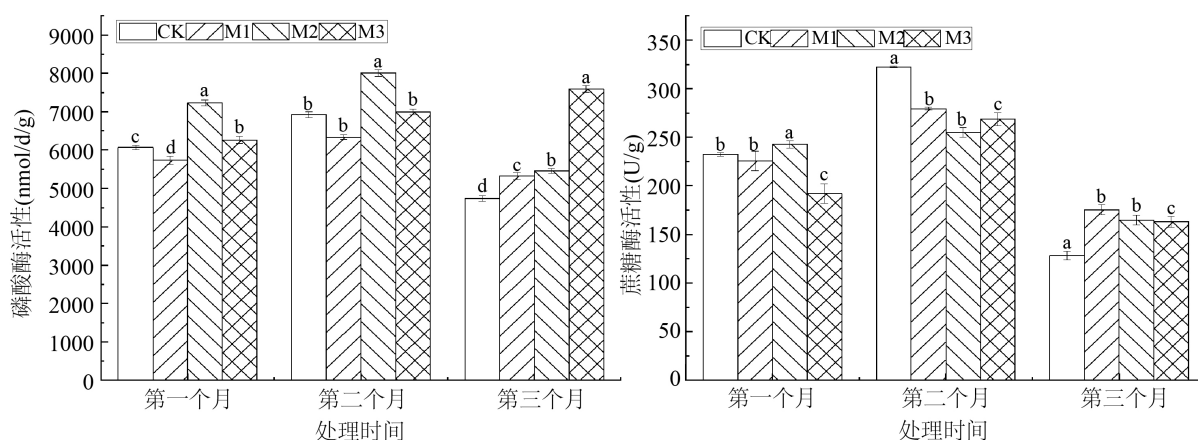


Figure 6. Effects of different fertilization treatments on soil phosphatase activity and sucrase activity in forested areas
图 6. 不同施肥处理对林地土壤磷酸酶、蔗糖酶活性的影响

4. 讨论

4.1. 不同腐熟污泥水平下土壤理化性质及综合肥力的特征变化

由于腐熟污泥的 pH 值略低于试验区土壤的 pH 值, 施用后土壤 pH 值略微降低, 但土壤容重几乎未变化。土壤养分变化是个长期复杂的过程, 在不同地区、气候条件和生态环境下表现出不同的变化特点 [15]。施肥 3 个月后, 氮磷钾等养分均有不同程度地提升, 且在不同处理下对 0~20 cm 土层养分含量的提升效果优于 20~40 cm 土层, 呈现出明显的表聚现象, 这与其它研究结果相一致 [16] [17]。从土壤综合肥力指数来看, 不施肥处理的碱解氮 F_i 值较低, 而修正的内梅罗公式计算出的土壤综合肥力指数突出了标准化后最差因子对土壤肥力的影响, 因此碱解氮含量限制其土壤综合肥力指数发展的主要因素。但综合来看, 当施肥量为 2 kg/m^2 时, 土壤 0~20 cm 和 20~40 cm 土层的土壤综合肥力指数提升最明显, 为最优处理。

4.2. 不同污泥水平下酶活性的特征

土壤酶是土壤生态系统中不可或缺的组成部分[18] [19], 作为土壤产生的生物催化剂, 它能够直接反映土壤中物质转化的情况, 在促进有机物的分解和营养元素的循环与转化方面发挥着重要作用。土壤酶是一个敏感的生物指标, 是评价土壤肥力的重要指标[20], 其活性受土壤 pH 值、温湿度、植被特征、养分特征等多种影响[21], 同时, 土壤中存在的微生物也会帮助转化土壤中的营养元素, 微生物的功能与土壤酶活性相关[10] [22]。目前对施肥处理下土壤肥力及土壤酶活性的研究较为广泛, 相关研究表明, 施肥处理对土壤肥力和土壤酶活性有着重要影响[23] [24] [25] [26]。

本研究中, 施肥后的第一个月, 除脲酶外, 施肥处理的土壤蛋白酶、磷酸酶、蔗糖酶活性均升高, 但脲酶活性降低, 且低于 CK, 原因可能是腐熟污泥中的重金属抑制了土壤脲酶对有机或含氮物质的水解过程[27] [28], 或者突然施加高浓度养分的肥料破坏了土壤原本稳定的生态环境, 抑制了土壤微生物活动, 从而降低了土壤酶活性[29]。第二、三个月, M1 的蛋白酶活性均显著高于 CK, 可能的原因是 M1 是较为适宜的处理, 当腐熟污泥浓度输入为 1 kg/m^2 时, 为林地土壤带来了较宜浓度的氮源, 从而促进了蛋白质和肽类的分解, 促进了土壤氮循环。

总体来看, 随着时间的推移, 阳光和雨水的共同作用下, 土壤与腐熟污泥发生作用, 逐渐融合, 土壤内部生态得到恢复, 养分得到补充, 酶活性得到提升, 表现为施用腐熟污泥产品的第二个月和第三个月, 包括土壤脲酶在内的 4 种酶活性均得到提升, 显著高于 CK。

一般情况下, 适当的土壤湿度有利于其酶活性保持较高水平, 但土壤过湿时, 酶活性减弱[26]。试验期间频繁的降雨也是降低土壤酶活性的重要因素, 土壤过湿或过干都不利于其微生物和植物的生长和繁衍。因此, 在不良的水热状况下, 土壤酶活性较低。

本文是针对北京大兴区的污泥进行了实验, 如果地理位置发生改变, 或者该区域的污泥特性发生改变, 则需要对腐熟污泥和地区土壤样本进行分析计算, 对具体情况进行科学严谨的分析。

总之, 土壤酶具有种类繁多、数量庞大、代谢多样的特点, 其在土壤物质转化和土壤肥力形成过程中的作用非常复杂[30] [31], 了解施用腐熟污泥对土壤酶活性及其周期变化的影响, 有助于更好地管理土壤肥力和促进土壤生态系统的健康发展。

5. 结论

1) 腐熟污泥的施用能显著提高苗圃土壤养分含量。

2) 在本研究的整个试验期内, 对于苗圃土壤而言, 土壤脲酶和土壤蛋白酶的活性变化趋势均为逐渐升高, 在施用腐熟污泥后的第三个月土壤脲酶活性和土壤蛋白酶活性均达到最高, 土壤磷酸酶和土壤蔗糖酶的变化趋势均表现为先升高后降低, 在施用腐熟污泥后的第三个月, M3 的土壤磷酸酶活性增长最大, 较 CK 增长 60.25%。

3) 施用腐熟污泥可以改善苗圃土壤内部生态环境和养分循环能力, 提高土壤肥力状况, 腐熟污泥在园林绿化上的使用, 是污泥资源化利用的重要途径。

项目基金

1. 课题名称: 园林绿化废弃物基质利用对林地绿地土壤微生物活性的影响; 课题编号: STZD202404; 课题类型: 园林绿化地生态功能评价与调控技术北京市重点实验室重点研发项目; 2. 课题名称: 河套平原盐碱地生态综合治理技术; 课题编号: 2022YFHH0144; 课题类型: 2022 年内蒙古自治区重点研发和成果转化计划(科技支撑黄河流域生态保护和高质量发展)。

参考文献

- [1] 戴晓虎. 我国污泥处理处置现状及发展趋势[J]. 科学, 2020, 72(6): 30-34, 4.
- [2] 刘锐敏. 堆肥污泥对不同杨树品种土壤酶活性和化学性质的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林农业大学, 2013.
- [3] 姚珂涵. 城市污泥添加对土壤养分动态的调控机制[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2022.
- [4] Denaix, L., Chryal, T., Balet, J., *et al.* (2011) Effects of Municipal Sewage Sludge Application on Soil and Purple Moor-Grass (*Molinia caerulea*) Contamination by Metals in a Maritime Pine Forest. *Water, Air, & Soil Pollution*, **219**, 239-249. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0702-8>
- [5] 杨文彬, 王海东, 彭祚登, 等. 施用污泥制有机营养土对沙地国槐榆树林土壤理化性质的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2021, 52(4): 559-566.
- [6] Junior, C.H.A., Brossi, M.J.D.L., Monteiro, R.T., *et al.* (2019) Effects of Sewage Sludge Application on Unfertile Tropical Soils Evaluated by Multiple Approaches: A Field Experiment in a Commercial *Eucalyptus* Plantation. *Science of the Total Environment*, **665**, 1457-1467. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.334>
- [7] Jabeen, R., Ahmad, A. and Iqbal, M. (2009) Phytoremediation of Heavy metals: Physiological and Molecular Mechanisms. *The Botanical Review*, **75**, 339-364. <https://doi.org/10.1007/s12229-009-9036-x>
- [8] Bramryd, T. (2013) Long Term Effects of Sewage Sludge Application on the Heavy Metal Concentrations in Acid Pine (*Pinus sylvestris* L.) Forests in a Climatic Gradient in Sweden. *Forest Ecology and Management*, **289**, 434-444. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.08.045>
- [9] Klink, A. (2017) A Comparison of Trace Metal Bioaccumulation and Distribution in *Typha latifolia* and *Phragmites australis*: Implication for Phytoremediation. *Environmental Science & Pollution Research*, **24**, 3843-3852. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8135-6>
- [10] 杨万勤, 王开运. 土壤酶研究动态与展望[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(5): 564-570.
- [11] 舒蛟靖, 陈奇伯, 王艳霞, 等. 华山松人工林土壤酶活性与理化因子的通径分析[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(9): 88-92, 97.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [13] 周文洁. 北京市通州区不同绿化用地土壤肥力特征及评价[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [14] 周伟, 王文杰, 张波, 等. 长春城市森林绿地土壤肥力评价[J]. 生态学报, 2017, 37(4): 1211-1220.
- [15] 张月欣, 麻云霞, 马秀枝, 等. 大青山不同林龄榆树林的土壤酶和养分特征[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(12): 168-176.
- [16] 贾慧果. 故宫古树不同生长环境土壤理化性质特征分析[J]. 现代园艺, 2024, 47(1): 35-38.
- [17] 刘强, 李苗苗, 何亚兰, 等. 黄土丘陵区不同施肥措施对土壤肥力及土壤酶活性的影响[J]. 北方园艺, 2023(21): 78-85.
- [18] 刘雷, 王梦亮, 王俊红, 等. 不同施肥方式对玉米生育期内根际土壤酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(6): 199-204.
- [19] 于群英. 土壤磷酸酶活性及其影响因素研究[J]. 安徽技术师范学院学报, 2001(4): 5-8.
- [20] 金志凤, 黄敬峰, 李波, 等. 基于 GIS 及气候-土壤-地形因子的浙江省茶树栽培适宜性评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 231-236.
- [21] 何跃军, 钟章成, 刘济明, 等. 石灰岩退化生态系统不同恢复阶段土壤酶活性研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(6): 1077-1081.
- [22] 阎佩云, 吴月, 贾小卫. 不同施肥处理对春季生菜土壤酶活性的影响[J]. 陕西农业科学, 2022, 68(8): 76-79.
- [23] 蒋如, 宁诗琪, 隋宗明, 等. 长期轮作施肥处理对植烟土壤有机碳组分和酶活性的影响[J/OL]. 土壤: 1-8. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=smPsKIJgVaDaaIH4K2-oycV8Wz0ABznuQZg_aX2phHoq60NIjRqskkmYekh8pz4t-i3KT308VY0t8_n1wDvOajwpXanLMKkYHIX2QKT2TBMqBRgLSrOowfOMTVI11dtYvOn2Tj4As=&uniplatform=NZKPT&flag=copy, 2023-12-27.
- [24] 邓慧玉, 马星竹, 刘子恺, 等. 40a 施肥措施对黑土土壤酶化学计量特征的影响[J/OL]. 环境科学: 1-12. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=smPsKIJgVaD0GaEtKiUsvrtOWHkXWgOaNZTmaiHv2pvyeOOPg0tO0OBmPzhyAambgT_gPQwwas6vOZOjeKa2yAnzsyGGFXI8EVpWYB_CbWPiimRpcqyosp1gBb0cUJOuRAVbN4YliU=&uniplatform=NZKPT&flag=copy, 2023-12-27.
- [25] 邹英武, 杜洋文, 程军勇, 等. 不同配方施肥对油茶林地土壤酶活性、微生物群落结构及产量和品质影响[J]. 中

-
- 国农学通报, 2023, 39(31): 113-121.
- [26] 林小兵, 柳开楼, 黄尚书, 等. 长期施肥对旱地红壤微生物生物量碳、氮和酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2023, 38(4): 119-128.
- [27] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- [28] 吕德国, 孟倩, 秦嗣军, 等. 冷凉地区不同施肥时期与方式对苹果根际微生物和土壤酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2010(4): 133-136.
- [29] 许永刚. 不同施肥方式对苹果园土壤养分及土壤酶活性的影响[J]. 绿色科技, 2016(9): 71-72.
- [30] 邱阳, 王亚军, 谢忠奎, 等. 砾石覆盖对农田土壤有机碳、微生物和土壤酶活性的影响[J]. 西北农业学报, 2011, 20(10): 176-180.
- [31] 曹慧, 孙辉, 杨浩, 等. 土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(1): 105-109.