

施用堆肥污泥对土壤肥力及植物生长的影响

侯 锋^{1,3}, 何 芸², 高 霖¹, 千里里³, 吴嘉曦², 王怡然¹,
蒋鲁佳^{1,2}, 曹效鑫¹, 杨海全^{2,*}

(1. 贵州筑信水务环境产业有限公司, 贵阳 550081; 2. 中国科学院地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; 3. 国投信开水环境投资有限公司, 北京 101101)

摘要: 土地利用有望成为市政污泥处置的主要途径。本研究以好氧堆肥的市政污泥为研究对象, 通过田间试验, 设置不同堆肥污泥施用量: 0%、30%、50%、70%、100% (堆肥污泥与土壤体积配比), 研究堆肥污泥施用对土壤肥力、植物生长以及土壤重金属含量的影响。结果表明: 堆肥污泥施用未造成土壤酸碱化, 土壤肥力等级由三级一般土壤提升为二级肥沃土壤, 土壤主要营养组分含量随污泥施用量的增加均显著提高, 其中堆肥污泥添加比例为 50% 时土壤有机质增加 1.9 倍、碱解氮增加 3.0 倍、有效磷增加 9.5 倍、速效钾增加 3.7 倍。堆肥污泥添加比例为 50% 时木春菊组长势最好, 添加比例为 30% 时鼠尾草组和高羊茅 & 黑麦草组长势最佳, 但是不同添加比例下早樱组生长并无显著差异。尽管施用堆肥污泥会导致试验区土壤重金属含量略有升高, 但远低于《城镇污水处理厂污泥处置林地用泥质》(CJ/T 362-2011) 所规定的污染物指标及其限值, 未造成土壤重金属污染。本研究将为堆肥污泥的土地利用提供理论依据和数据支撑。

关键词: 堆肥污泥; 土壤改良; 土壤肥力; 植物生长

中图分类号: X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2024)01-0053-12 **DOI:** 10.14050/j.cnki.1672-9250.2023.51.008

污泥作为污水净化过程中产生的副产物, 富含氮、磷、有机质等营养物质, 还含有病原菌、重金属、难降解有机物等有害物质^[1-3]。当污泥未经处理直接排放进入自然环境时, 将对周边生态环境造成严重影响^[4]。国家生态环境部数据显示, 2021 年全国纳入排放源统计调查的污水处理厂共 12 586 家, 污水处理量达 862.1 亿吨, 污泥产生量为 4 592.1 万吨^[5]。随着城市发展及污水厂提质增效、清污分流与管网改造, 污泥产量将会进一步增加, 研究表明我国污泥产量将以每年 6%~10% 的速度快速增长^[6]。因此污泥处置已成为全国乃至全球亟需解决的关键环境问题。

市政污泥的处置主要考虑两方面, 一是污水处理厂的污泥达到减量化、稳定化、无害化、资源化的目标; 二是污泥的安全处置问题^[7]。目前主要通过焚烧、卫生填埋、建材利用以及堆肥土地利用等方法来处理污泥。由于焚烧减量经济成本高, 易生成

致癌物二噁英、颗粒物等大气污染物^[8], 且由于现阶段我国污泥产量巨大及经济发展的限制, 该方法无法在国内大规模的推行; 污泥填埋会占用大量土地资源, 同时由于污泥脱水困难、含水率高、污水渗漏易造成严重地下水污染事件^[9]。污泥建材利用的处置效果明显且有一定的利用价值, 如脱水污泥用于烧制水泥, 干化污泥用于烧制水泥、陶粒和砖等, 但这些处置方式需要调整生产工艺、增加设备以及高成本的前处理过程, 生产成本明显增加, 因此只能作为污泥处置的备选手段^[10]。污泥堆肥后在非农地上施用对环境的不良影响很小, 具有一定的经济效益, 同时达到了资源化、减量化、无害化的目的。在 2022 年 9 月 22 日由国家发展改革委、住房城乡建设部、生态环境部印发的《污泥无害化处理和资源化利用实施方案》中, 鼓励符合标准要求的污泥作为肥料或土壤改良剂用于国土绿化、园林建设、废气矿场以及非农用的盐碱地和沙化地。因

收稿日期: 2023-02-08; 改回日期: 2023-03-29

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2022]一般 201); 中国科学院战略性先导科技专项(XDB40020401); 中央引导地方科技发展资金项目(黔科中引地[2021]4028)

第一作者简介: 侯 锋(1961-), 男, 研究员, 主要从事污水处理及流域水环境治理研究。email: houfeng@sdic.com.cn.

* 通讯作者: 杨海全(1987-), 男, 高级工程师, 主要从事生源要素生物地球化学研究。email: yanghaiquan@vip.skleg.cn.

此堆肥污泥土地利用将是市政污泥未来处置的主流方向。

市政污泥中含有丰富的有机质、氮、磷、钾等养分,是良好的有机肥料资源^[11]。污泥中的大分子有机物在微生物作用下可以分解成小分子有机物,从而改善土壤结构^[3],提高土壤肥力^[12-13],促进植物生长^[14-15]。Tejada等^[16]研究发现,将污泥施用于典型旱地后土壤板结状况得到有效改善,土壤孔隙度增加。Zuo等^[17]在滩涂上施加污泥后,不仅改善了土壤物理结构、增加土壤养分,还提高了甜高粱的生物量。孙昱等^[18]将污泥施用于榆树林后发现适量的污泥可有效提高榆树的树高、胸径及叶绿素含量等。也有学者将污泥与钙基添加剂^[19]、食物垃圾^[20]、园林废弃物^[21]混合堆肥后用于土壤改良,污染物消纳的同时也达到废弃物资源化利用的目的。本研究选择堆肥污泥为研究对象,扩大堆肥污泥施加比例,采用田间试验栽种不同类型的重金属耐受植物,探究不同投加量的堆肥污泥对土壤肥力以及植物生长的影响,为堆肥污泥在国土绿化和园林建设等方面的应用提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计及分析方法

1.1.1 供试材料

本研究使用的堆肥材料包括市政污泥、辅料(秸秆、油枯等,秸秆:油枯=10:1混合物)和微生物菌剂(添加量1 kg/t)。在田间试验之前,将所有堆肥材料混匀,在喷洒生物除臭剂和e-PTFE膜覆盖后,置于50~65℃温度和5%~15%氧气环境下好氧

堆肥15天,然后移至转存处自然腐熟5~10天,备用。处理后的供试污泥含水率为35.9%±0.5%,堆肥污泥养分含量显著高于土壤养分含量,其中堆肥污泥有机质、碱解氮和速效钾、有效磷含量分别是供试土壤的5倍、10倍和14倍(表1)。

堆肥污泥和土壤中重金属含量分析发现,Cr、Zn、Cd和Pb 4种有毒重金属含量较高,而Hg、As、Ni、Cu等含量较低,故本研究选择Cr、Zn、Cd和Pb 4种重金属为研究对象,分析堆肥污泥中重金属污染风险。堆肥污泥和土壤中4类重金属总量低于《城镇污水处理厂污泥处置林地用泥质》(CJ/T 362-2011)所规定的限值。4类重金属各形态含量分析结果显示,Cr、Zn和Pb主要以残渣态和有机结合态为主,生态环境危害较低。而Cd主要以铁锰态为主,稳定性较弱,具有较强的迁移能力。

1.1.2 实验设计

本研究在中国科学院地球化学研究所红枫湖高原湖泊生态系统研究站开展,该区域地处低纬高原亚热带季风性湿润气候区,干湿分明,年均气温14.4℃,平均降雨量达1200 mm^[22]。

本研究选择易繁殖、具有观赏价值、常用于土地修复等特点的早樱、鼠尾草、木春菊和高羊茅 & 黑麦草等植物作为供试物种。于2021年10月至2022年10月开展模拟研究。试验场地设置4个实验组(3组草本:2 m×2 m;1组木本:1 m×3 m),每组5块小区,面积约4 m²,对应5个堆肥污泥添加梯度,分别为T0(0%)、T1(30%)、T2(50%)、T3(70%)、T4(100%)(图1),百分比表示堆肥污泥和样地表层土壤在0~40 cm深度中的体积比。

表1 供试土壤及堆肥污泥的理化特性

Table 1 The physicochemical properties of soil and composted sewage sludge

样品	pH	有机质	全氮	碱解氮	全钾	速效钾	全磷	有效磷	Cr	Zn	Cd	Pb
		g/kg						mg/kg				
土壤	7.25	43.07	1.72	0.17	16.97	0.11	310.85	23.12	45.47±8.7	79.78±17.1	0.43±0.09	21.10±3.1
堆肥污泥	7.34	263.13	16.87	1.83	29.09	1.06	8023.41	340.74	80.89±1.5	917.15±9.65	1.43±0.03	32.33±1.2
CJ/T 362-2011	5.5~8.5	>180	氮磷钾养分(N+P ₂ O ₅ +K ₂ O)(g/kg干污泥)>25						<1000	<3000	<20	<1000

表2 堆肥污泥的不同重金属形态含量与占比

Table 2 Contents and proportions of different forms of heavy metals in composted sewage sludge

元素	水溶态	交换态	铁锰态	有机结合态	残渣态
Cr	0.14±0.02 (0.2%)	0.41±0.01 (0.5%)	0.30±0.07 (0.4%)	23.92±0.29 (29.6%)	55.83±6.80 (69.0%)
Zn	3.22±0.40 (0.4%)	66.10±4.54 (7.2%)	179.96±1.73 (19.6%)	324.77±5.28 (35.4%)	332.36±12.97 (36.2%)
Cd	0.03±0.00 (2.1%)	0.37±0.20 (25.9%)	0.83±0.14 (58.0%)	0.17±0.04 (11.9%)	0.23±0.03 (16.1%)
Pb	0.02±0.00 (0.1%)	0.15±0.01 (0.5%)	0.65±0.01 (2.0%)	11.14±1.41 (34.5%)	21.94±3.42 (67.9%)

施加堆肥污泥后稳定 15 天,分别于 2021 年 11 月、2022 年 3 月、6 月和 9 月采集试验区各实验组土样。在每个重复样方内,随机采集 3~5 个取样点,采集 0~20 cm 表层土样,去除凋落物层,混合均匀,四分法取样。样品冷冻干燥、研磨、过筛(100 目)后,放置于低温干燥箱中备用。同时,采用 0.1 cm 精度卷尺测定移栽植物的株高、灌高等生长参数。其中株高指苗木乔木露出地表的根茎部至树冠顶部之间的垂直距离;灌高指从地表面到灌木正常生长顶端的垂直高度。由于高温天气以及疫情不便浇水,导致高羊茅 & 黑麦草组于秋季(9 月)采样前大部分死亡,故高羊茅 & 黑麦草组没有秋季生长数据。

1.1.3 土壤理化性质测定

污泥的矿物组成采用扫描电镜(日本电子 JSM-7800F 型)与能谱仪(英国 edax apollo XL 型)进行分析。化学性质测定方法参照《土壤农化分析》(第三版)^[23],pH 值采用 pH 计(Mettler Toledo)测定。有机质及全氮采用有机元素分析仪(Vario Macro cube)测定,其中 TOM=TOC×1.724,1.724 为 Van Bemmelen 因数^[23]。碱解氮测定采用碱解扩散法。全磷测定采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法,速效磷测定采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提-紫外分光光度法。全钾和速效钾测定采用 1.0 mol/L CH₃COONH₄ 浸提-电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES-7400)进行分析。Zn、Cd、Pb、Cr 总量通过 HF-HNO₃ 消解,各形态含量通过 BCR 法提取后,由电感耦合等离子体质谱(Neptune plus 7700)测定。通过测定土壤标准物质(GBW-07407,GSS-7)进行参考,计算标准回收率进行全过程的分析质量控制(标准回收率在 90%~110%之间)。设置 3 个空白对照组,每 5 个样插入 1 个

平行样品,平行样品间相对偏差均小于 5%,以平行样的平均值作为实验最终数据,以满足实验对测试结果精密度和准确度的要求。

1.1.4 土壤肥力评价

采用内梅罗指数法计算土壤综合肥力指数(integrated fertility index,IFI)^[24]。将土壤 pH 值及有机质、全氮、有效磷和速效钾含量指标分别代入式(1),计算其分肥力系数 IFI_i,再根据公式(2)计算 IFI:

$$IFI_i = \begin{cases} \frac{x}{x_a} & x \leq x_a \\ 1 + \frac{(x - x_a)}{(x_c - x_a)} & x_a < x \leq x_c \\ 2 + \frac{(x - x_c)}{(x_p - x_c)} & x_c < x \leq x_p \\ 3 & x_p < x \end{cases} \quad (1)$$

$$IFI = \sqrt{\frac{(IFI_{i\text{平均}})^2 + (IFI_{i\text{最小}})^2}{2}} \times \left(\frac{n-1}{n}\right) \quad (2)$$

式中, x 表示土壤各指标测定值, x_a 与 x_p 分别为分级标准的下、上限, x_c 介于分级标准的上、下限间; x_a 、 x_c 、 x_p 的分级标准参考第二次全国普查标准。IFI_{i平均}、IFI_{i最小} 分别是土壤各指标的分肥力均值与最小值; n 表示土壤指标个数。根据 IFI 值将土壤肥力分为 4 类^[25]:<0.9 为四级,贫瘠;0.9~1.8 为三级,一般;1.8~2.7 为二级,肥沃;>2.7 为一级,很肥沃。

1.2 数据处理及分析方法

数据处理在 EXCEL 中完成。图件的制作由 Origin 2021 软件绘制。采用 SPSS 26 软件进行 Pearson 相关性分析,当相关系数的绝对值趋于 1 时($p \leq 0.05$),表示两组数据间的线性关系较强,两组数据存在相关性。

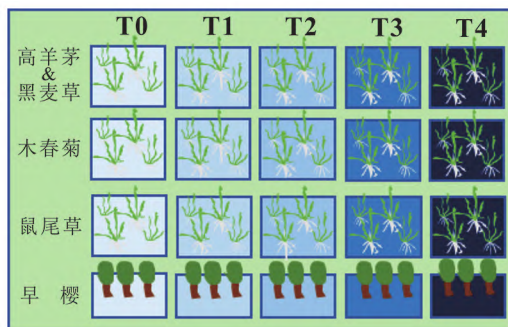


图 1 田间试验设计图与植物生长实物图

Fig.1 The design draft of the field experiment and photos showing plant growth

2 结果与讨论

2.1 堆肥污泥施用对植物生长的影响

试验开展一年后,不同比例堆肥污泥施用使早樱田间组树木增长高度在不同季节均低于对照组,其中 T3 试验组株高显著高于其他处理组(图 2)。除 T4 组在春季生长较慢外,鼠尾草田间组中其他污泥处理组的株高随季节的变化均与对照组一致,整体呈现 $T1>T2=T3>T0>T4$ 。这说明施肥比例为 30% 时有利于鼠尾草的生长,当施肥量超过 30% 后堆肥污泥在一定程度上将会抑制鼠尾草的生长。

不同处理组中木春菊长势均较好,但是在冬季和春季, T4 组中木春菊的生长受到轻微的抑制作用,这可能是 100% 的堆肥污泥中营养浓度过高,导致植物根部细胞不能够通过渗透作用从土壤当中吸收水分,从而造成了烧苗^[26]。补充水分后,木春菊生长情况整体呈现 $T2>T3>T1>T4>T0$ 的趋势。因此,适合木春菊生长的最佳施肥比例为 50%。

整体上看,施用堆肥污泥显著促进了高羊茅 & 黑麦草田间组植物的生长,表现为 $T4>T3>T1>T2>$

$T0$ 。进一步分析发现,前期 T1 处理组长势较快,而 T4 处理组则具有长期优势。杨桐桐等^[27]在研究中指出污泥堆肥产品的施入有利于高羊茅对营养元素氮、磷和钾的吸收,进而促进了高羊茅 & 黑麦草的生长,但是这种促进作用在试验初期较为缓慢,直到试验后期方才显现出来。但由于后期生长速度快,高羊茅 & 黑麦草因过高出现倒伏,需人工处理,故体积比为 30% 时堆肥污泥使用成本最低。

2.2 堆肥污泥施用对土壤肥力的影响

2.2.1 堆肥污泥施加后土壤 pH 的变化

土壤 pH 是农业土壤质量和生产力的重要指标,是控制土壤溶液中营养物质和污染物的吸附、迁移和生物利用度的主要因素^[28]。试验期间,堆肥污泥处理后早樱田间组的土壤 pH 整体高于对照组,其中冬季和夏季差异最为显著。整体来看,堆肥污泥处理后 pH 均表现出先降低后升高,最后趋于稳定的变化特征(图 3)。其中草本植物鼠尾草、木春菊和高羊茅 & 黑麦草田间组的季节变化趋势一致,木本植物早樱则不同。鼠尾草田间组土壤 pH 冬季高于对照组外,春季、夏季和秋季的

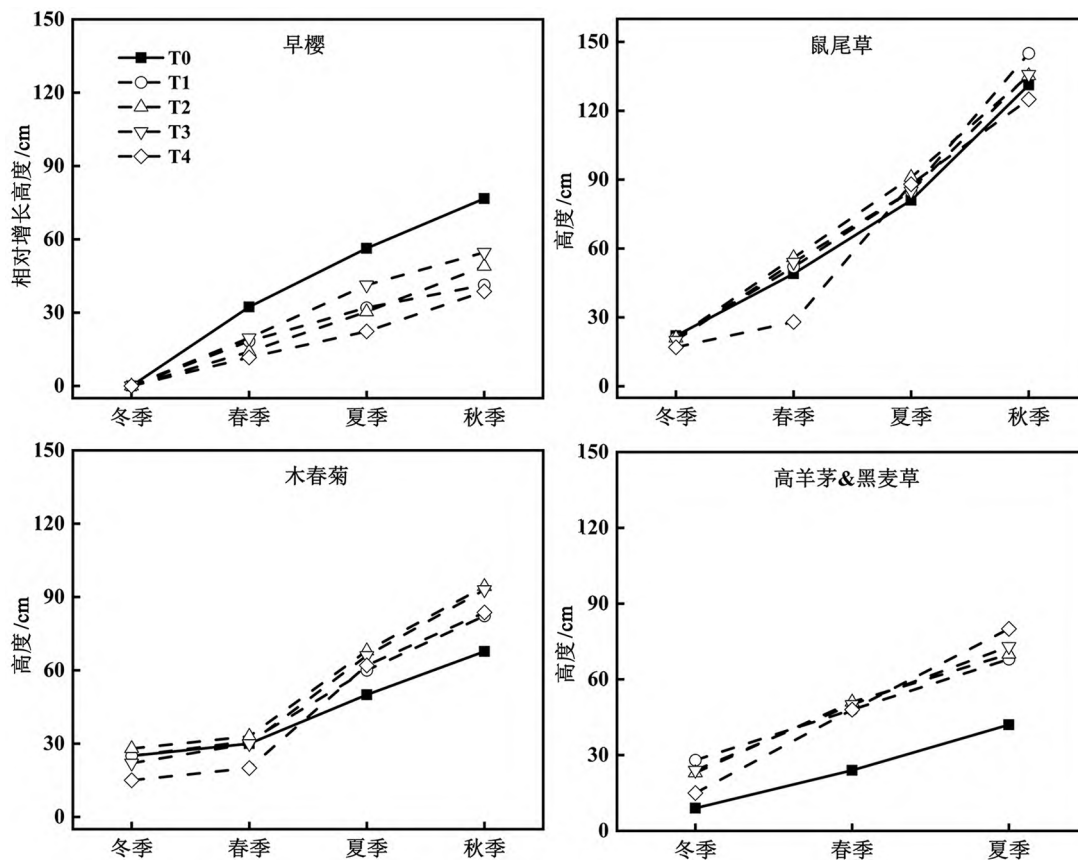


图 2 施用堆肥污泥后植物生长高度的季节变化

Fig.2 The seasonal changes of plant height after the application of composted sewage sludge

pH 均低于对照组,并随季节变化呈现先降低后升高特征。其中 T4 处理的土壤 pH 在冬季最高,春季最低。

木春菊田间组土壤 pH 变化与早樱、鼠尾草的变化趋势相同,均呈现冬季高于对照组,春季均低于对照组特征。高羊茅 & 黑麦草田间组 T1 和 T4 组的 pH 变化趋势与对照组基本一致, T2 组土壤 pH 随着季节的变化呈不断上升趋势,而 T3 呈先降低后上升的趋势。总体而言,施加堆肥污泥后土壤 pH 呈中性或弱碱性(6.6~8.2),不同比例堆肥污泥的土壤 pH 均在投加初期(冬季)出现不同程度升高(除高羊茅 & 黑麦草田间组 T2 组外),之后土壤 pH 开始降低,在春季达到最低,这可能是由于施加堆肥污泥后,污泥中有机质的降解产生一定量的有机酸,降低了土壤 pH^[29]。而夏秋季节 pH 升高,可能是土壤通过吸附有机物矿化释放的 H⁺ 所致^[30]。整体而言,试验区土壤 pH 变化范围均符合污泥林地使用标准(表 1),堆肥污泥的施用对土壤酸碱度的影响较小。

2.2.2 堆肥污泥施加后土壤有效磷的变化

有效磷(AP)是土壤中可被植物吸收的磷组分,土壤中 AP 含量是指能为当季作物吸收的磷量^[23]。相对于对照组,施加堆肥污泥后,土壤 AP 含量都有不同程度的提高。对于早樱和鼠尾草(图 4),AP 含量随堆肥污泥添加量增加而增加,并在夏季达到最大值,秋季降低。对于木春菊田间组,土壤中 AP 含量呈现 T4>T2>T1>T3>T0 的变化趋势,其中 T4 组 AP 含量在春季达到最大值,其余组 AP 含量在秋季相对较高。

高羊茅 & 黑麦草田间组土壤 AP 含量呈现 T4>T3>T1>T2=T0 的变化趋势,从冬季至夏季期间,土壤 AP 含量显著升高,夏季土壤 AP 含量最高,由于土壤 AP 与其生长情况呈现显著正相关关系(图 5),故施肥比例为 T4 组时高羊茅 & 黑麦草长势最好(图 2)。扫描电镜与能谱图结果显示堆肥污泥主要含有 K、C、O、S、Au、Si、Al、Fe 等元素,主要由含氧盐类矿物、氧化物、氢氧化物以及硫化物等矿物组分组成,其次还包含部分生物碎屑(图 6)。

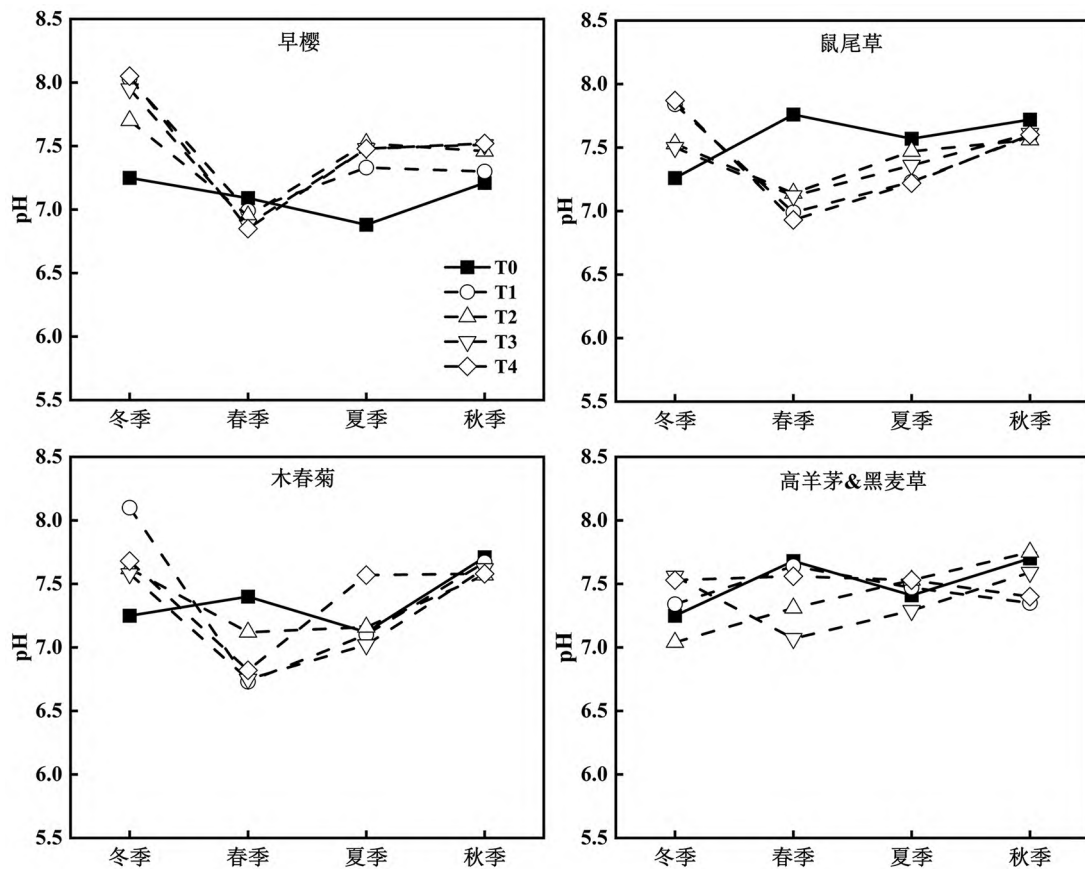


图3 施用堆肥污泥后土壤 pH 值的季节变化

Fig.3 The seasonal changes of soil pH values after the application of composted sewage sludge

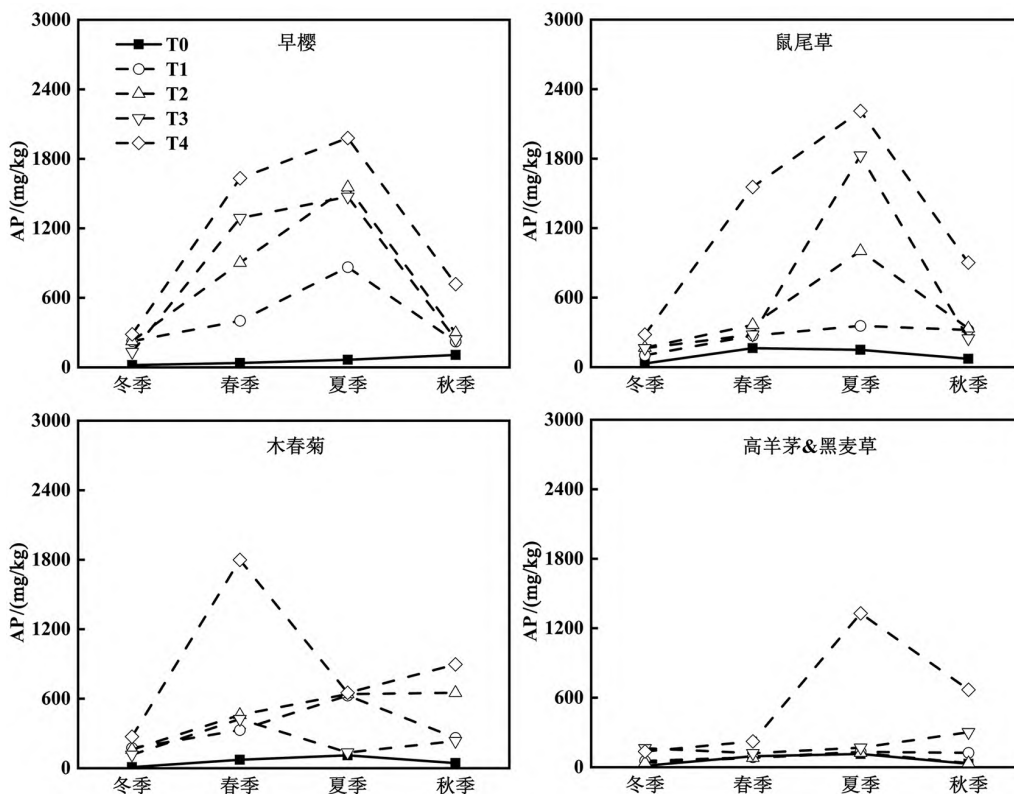


图4 施加堆肥污泥后土壤有效磷(AP)含量的季节变化

Fig.4 The seasonal changes of contents in soil available phosphorus values after the application of composted sewage sludge

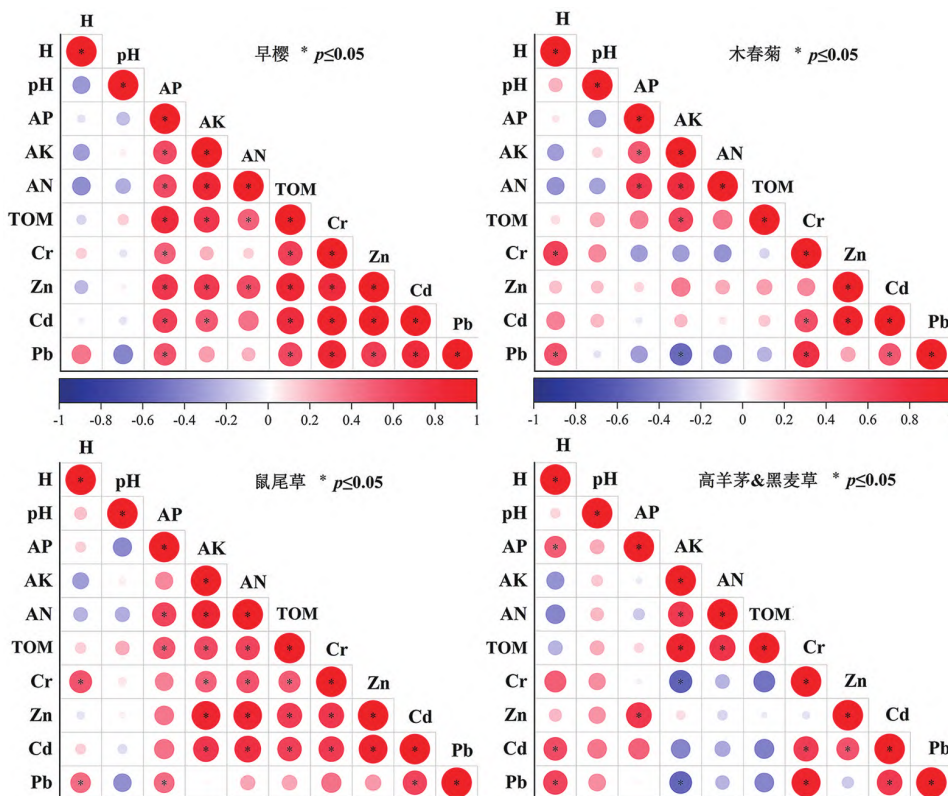


图5 Pearson 相关性热图分析

Fig.5 Analysis in pearson correlation heat map

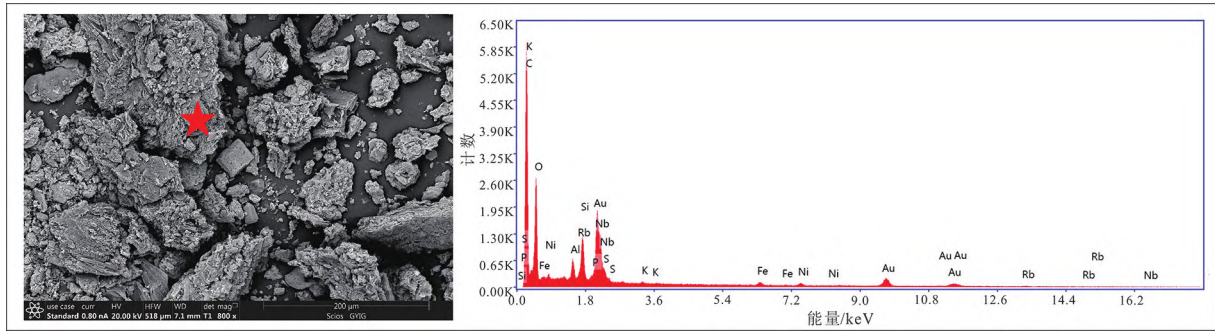


图 6 堆肥污泥的扫描电镜图(SEM)与能谱图

Fig.6 Scanning electron microscope (SEM) and energy spectrum of composted sewage sludge

结合 XRD 分析,污泥主要以氧化物、碳酸盐和黏土矿物为主。试验期间土壤 AP 含量整体呈现先升高后下降的趋势,可能是由于黏土矿物具有较强的吸附性,堆肥污泥的过量施用将导致土壤速效养分被吸附,从而使土壤 AP 等有效养分含量降低^[31]。施加堆肥污泥组土壤 AP 含量均高于对照组,施肥比例较大时土壤 AP 含量变化范围大,施肥比例为 30%时土壤 AP 变化相对较小,肥效较稳定。

2.2.3 堆肥污泥施加后土壤速效钾的变化

速效钾(AK)是土壤肥力的重要参数,是植物生长发育所必需的营养元素。早樱田间组在施加不同比例的堆肥污泥后,不同季节土壤 AK 含量均高于对照组,其中 T4 组含量最高,T3 组 AK 含量在春季达到最高(图 7)。鼠尾草田间组土壤 AK 整体呈下降趋势,其中 T4 组的 AK 含量高于对照组和其他处理组,同时,T1、T2 和 T3 组的 AK 含量均在其他季节低于对照组(除冬季外)。对于木春菊田间

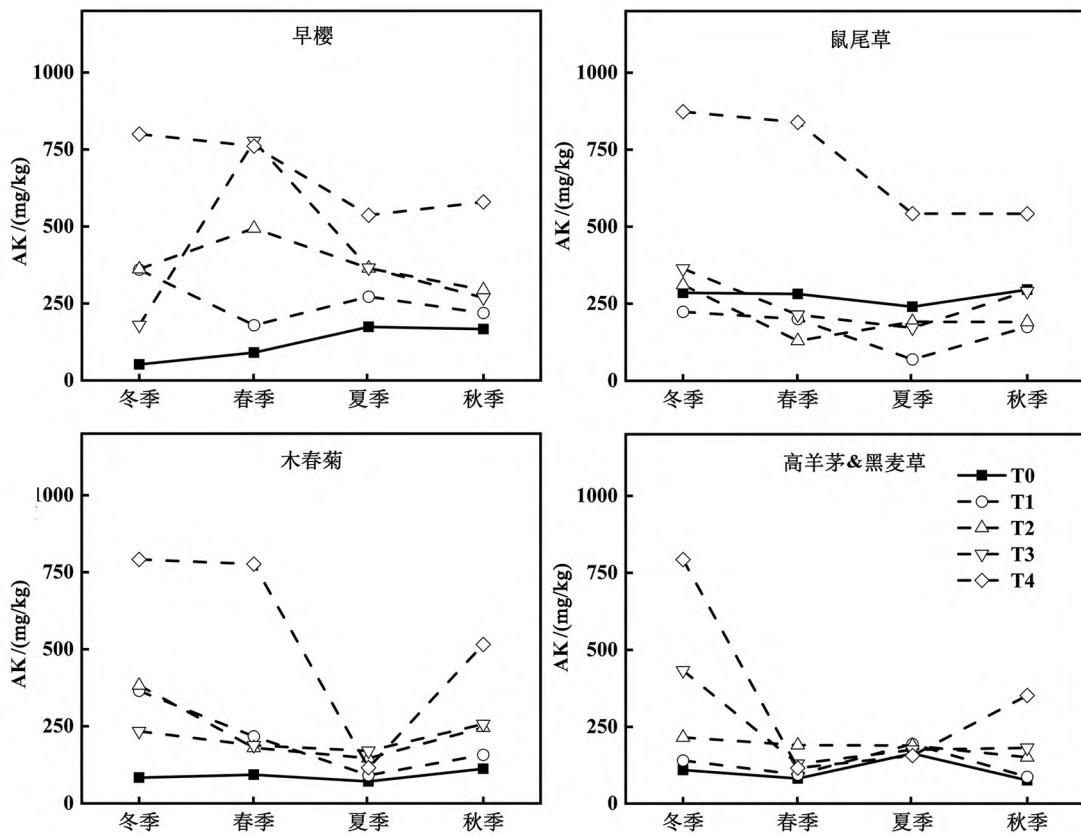


图 7 施加堆肥污泥后土壤速效钾(AK)含量的季节变化

Fig.7 The seasonal changes of contents in soil available potassium values after the application of composted sewage sludge

组,不同处理的土壤 AK 含量均高于对照组,其中 T4 组在冬季和秋季 AK 含量与对照组有较大差异。不同处理的高羊茅 & 黑麦草田间组土壤 AK 含量均高于对照组,其中 T4 组在冬季差异最显著。整体而言,堆肥污泥的施用使土壤 AK 含量显著提高。不同堆肥比例的早樱组、木春菊组和鼠尾草组土壤 AK 含量整体呈现逐渐降低并趋于稳定的变化趋势,而高羊茅 & 黑麦草处理组土壤的 AK 含量在春季降低后又略有增加。结合不同植物在各季节的生长情况,木春菊和鼠尾草在夏季长势较好,而高羊茅 & 黑麦草组在春季长势更茂盛,对 AK 的吸收强,土壤有效养分含量降低。

2.2.4 堆肥污泥施加后土壤碱解氮的变化

全氮量通常用于衡量土壤氮素的基础肥力,而土壤碱解氮(AN)与作物生长关系密切^[23]。早樱田间组中所有污泥施用试验组土壤 AN 含量均明显高于对照组,并随污泥添加比例的增加显著升高(图 8)。这与孙重阳^[32]的研究结果相似,施加堆肥污泥的比例与土壤 AN 含量呈正相关。鼠尾草田间组 T4 组的 AN 含量远高于对照组和其他处理组,其中

在春季含量最高,并且 T1 处理组 AN 含量随季节变化趋势与对照组一致。不同添加比例的木春菊田间组 AN 含量在春季最高,在夏季最低。高羊茅 & 黑麦草田间组 T1 组的 AN 含量与对照组无显著差异,各处理组冬季土壤 AN 含量均高于对照组,其中 T4 组土壤 AN 含量最高,春季 T2、T3 和 T4 组土壤 AN 含量与对照组差异明显。

整体而言,早樱、鼠尾草(T3 组除外)、木春菊、高羊茅 & 黑麦草田间处理组土壤 AN 含量的季节变化趋势相同,春季含量最高,夏季降至最低。这种季节变化可能与 AP、AK 含量变化有关,相关性显示(图 5)早樱、鼠尾草和木春菊田间组土壤 AN 与 AP、AK 呈显著正相关关系,而高羊茅 & 黑麦草田间组土壤 AN 含量变化与 AK、有机质相关。污泥的施用改善了土壤的理化性质,并促进了土壤微生物的活性,微生物能够利用污泥中的活性物质作为底物,产生并释放激素,从而对植物的生长和代谢产生影响,即堆肥污泥中生物活性物质对植物氮素利用具有促进作用^[33]。结合植物生长情况(图 2),较高的氮素含量促进了植物生长。

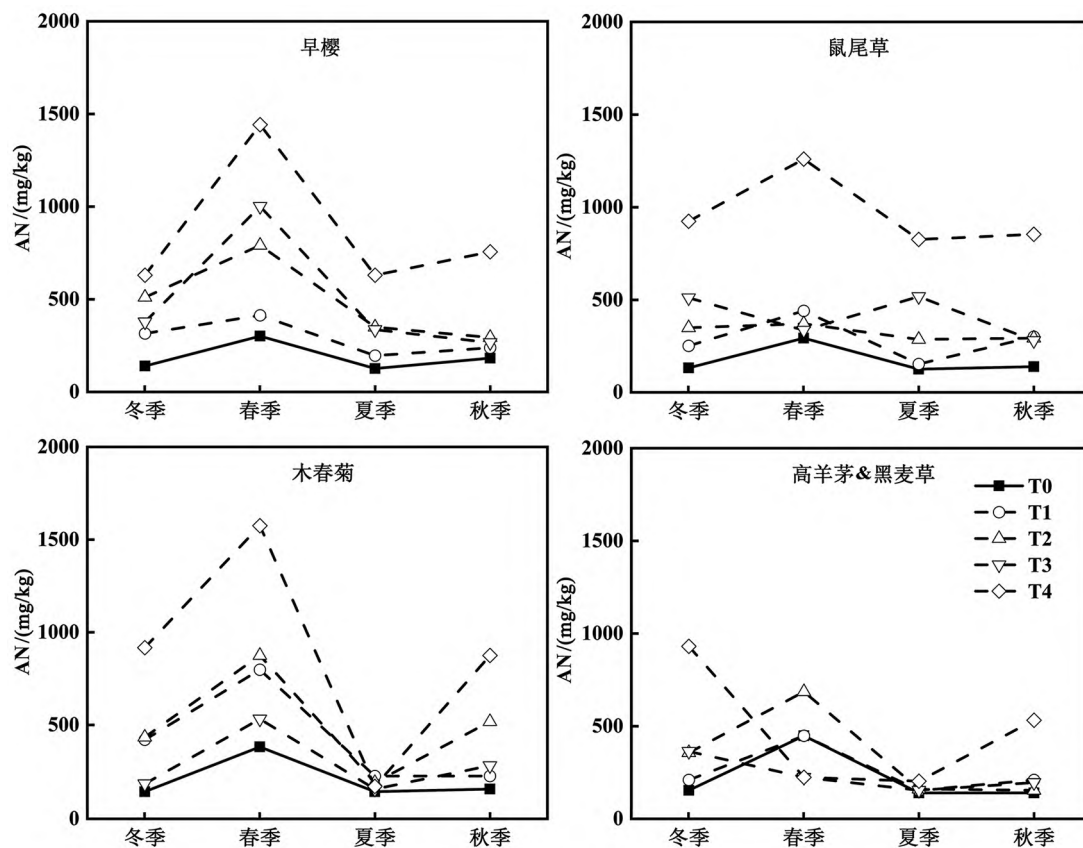


图 8 施加堆肥污泥后土壤碱解氮(AN)含量的季节变化

Fig.8 The seasonal changes of contents in soil alkali-hydrolyzed nitrogen values after the application of composted sewage sludge

2.2.5 堆肥污泥施加对土壤肥力的影响

土壤有机质是衡量土壤质量的重要指标,也是植物和微生物的主要营养储备^[4],能有效增强土壤的保肥供肥能力和养分有效性。施加堆肥污泥明显提高了土壤肥力(表 3),其中早樱、木春菊、高羊茅 & 黑麦草田间组中对照组土壤肥力等级为三级,施加堆肥污泥后,肥力等级提升为二级肥沃土,其中木春菊和高羊茅 & 黑麦草田间组土壤在施肥比例为 70%时肥力最高,早樱及鼠尾草田间组土壤在施肥比例为 100%时肥力最高。

表 3 施用堆肥污泥后土壤综合肥力

Table 3 Comprehensive fertility of soil after application of composted sewage sludge

处理	早樱	鼠尾草	木春菊	高羊茅 & 黑麦草
T0	1.07	1.98	1.15	1.33
T1	2.12	2.12	1.97	1.48
T2	2.16	2.16	2.19	1.90
T3	2.17	2.19	2.19	2.16
T4	2.17	2.19	2.18	2.14

本研究中土壤有机质含量整体上随污泥施用量增加而增加,季节变化明显(图 9)。同时堆肥污泥的施加对土壤中养分的积累也有重要影响,全氮、全磷、全钾的含量明显增加,这与刘锐敏^[34]、丁超群等^[35]研究结果一致,其中冬季 TK 含量最高,春季降低,随后缓慢增加。

2.3 堆肥污泥施用对土壤重金属的影响

堆肥污泥施用后,各添加比例田间组土壤 Zn 含量整体高于对照组,特别是 T4 组显著高于其他组(图 10)。早樱田间组土壤 Zn 含量在不同比例堆肥污泥中差异较大,整体表现为 T4>T2>T1>T3>T0。堆肥污泥施用一年后木春菊田间组 T3 中 Zn 含量显著增加,最高达到了施肥初期的 3.48 倍,其他试验组 T1、T2、T3 添加比例之间土壤 Zn 含量差异不大。施用堆肥污泥初期和一年后施用比例 100% 的土壤 Cd 含量均显著高于对照组(图 10)。早樱田间组土壤 Cd 含量在堆肥污泥施用一年后较施用初期略有增加,但 T3 组初期 Cd 含量较低,一年后增加了 60.3%。木春菊田间组施用一年后土壤 Cd 含量

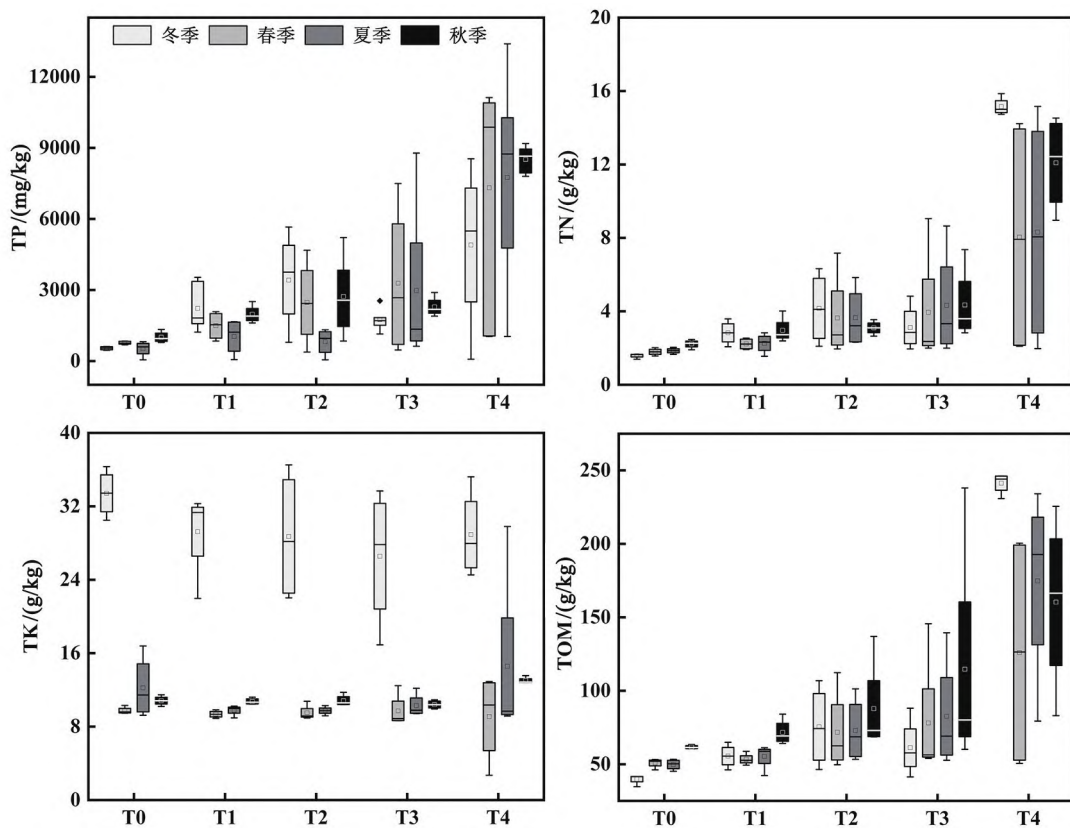


图 9 施加堆肥污泥后土壤的养分(TOM、TN、TP、TK)含量变化

Fig.9 Seasonal changes of contents in soil nutrients (total organic matter, total nitrogen, total phosphorus and total potassium) after applying composted sewage sludge

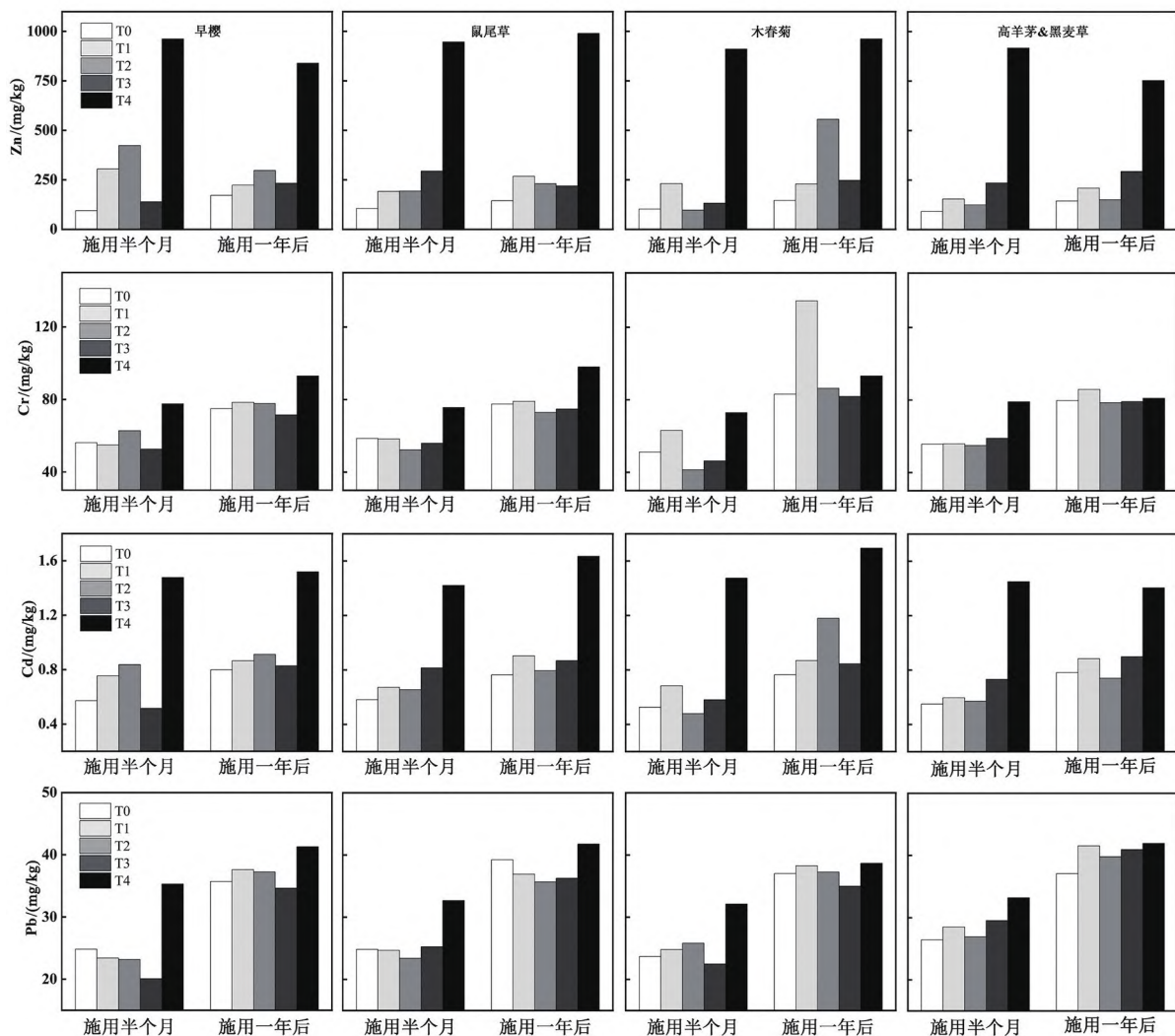


图 10 施用堆肥污泥后土壤重金属含量的变化

Fig.10 The difference of contents in soil heavy metals after the application of composted sewage sludge

明显增加,其中 T2 组 Cd 含量增加至施用初期的 2.73 倍。早樱田间组土壤中重金属 Zn 与 Cd 之间呈极显著正相关(图 5),施肥初期及施肥一年后土壤 Zn 与 Cd 变化趋势一致。鼠尾草田间组土壤中 Zn 和 Cd 呈极显著正相关,堆肥污泥施用后土壤 Zn 和 Cd 变化趋势相同。木春菊田间组土壤 Zn、Cd 含量与 TOM、AP 呈极显著正相关,与 Cr、Pb 含量呈显著正相关。

施加堆肥污泥后土壤 Cr 含量高于对照组,其中早樱组和鼠尾草组施肥比例为 T4 时最为显著,施肥比例为 T2、T3 时相对较低。施用堆肥污泥一年后各试验组土壤 Cr 含量均有所增加,且不同施加比例之间差异变小,这可能是重金属在不同试验组水平迁移所致。堆肥污泥施用一年后各田间组土壤 Pb 含量显著高于施用初期(图 10)。堆肥污泥施用

初期,T4 试验组土壤 Pb 含量显著高于其他组,但是施肥一年后,各试验组土壤 Pb 含量差异减小。其中,木春菊相关性图(图 5)显示土壤中重金属 Pb 含量与 AK 呈显著负相关,结合堆肥污泥施用初期时土壤 AK 含量高,因而土壤 Pb 含量较低,堆肥污泥施用一年后土壤 AK 含量整体呈下降的趋势,对应的土壤重金属 Pb 含量显著升高。土壤 Pb 含量与 Zn、Cr、Cd 之间无相关关系,故堆肥污泥施用后土壤 Pb 含量变化趋势与 Zn、Cr、Cd 不同。鼠尾草和木春菊田间组土壤中重金属 Cr、Pb 含量与生长情况呈现正相关关系(图 5),其中土壤 Cr、Pb 含量在 T2 和 T3 组相对较低,在 T4 组含量高,对应的鼠尾草长势在不同施肥比例时为 $T1 > T2 = T3 > T4$,而木春菊表现为 $T2 > T3 > T1 > T4$ (图 2),因此高 Cr、Pb 含量对鼠尾草和木春菊有抑制作用。

综上所述,堆肥污泥施用比例 30%~70%时,土壤中重金属含量缓慢增加,但显著低于施用比例 100%土壤重金属含量,而 100%施用比例的田间组土壤重金属含量也未超过污泥林用标准下限值,其中堆肥污泥施加比例为 100%时土壤 Zn 含量接近标准所规定的阈值。堆肥污泥施用初期土壤 pH 略有降低(图 3),这使得固定重金属离子的吸附位点减少,从而导致土壤中 Zn、Pb、Cr 等重金属可交换态组分含量上升,易被植物吸收或被淋溶进入地下水。这又在一定程度上抵消了由有机物增加而引起的重金属的积累^[36]。因此堆肥污泥施加比例不超过 70%即可避免土壤重金属风险,堆肥污泥施用不会造成土壤重金属污染,满足污泥林用标准。

3 结论

1) 堆肥污泥施用后土壤 pH 值在 5.5~8.5 之间,满足《城镇污水处理厂污泥处置林地用泥质》

(CJ/T362-2011) 标准,未导致土壤酸碱化;施加堆肥污泥明显提高了土壤肥力,其中早樱、木春菊、高羊茅 & 黑麦草田间组土壤肥力等级由三级一般土壤提升为二级肥沃土壤。

2) 木春菊、鼠尾草、高羊茅 & 黑麦草在施加堆肥污泥后长势良好。其中木春菊生长最适宜的堆肥污泥添加比例为 50%,鼠尾草组和高羊茅 & 黑麦草组最佳施肥比例为 30%,早樱作为木本植物,试验期长势并不明显,仍需长期观测。

3) 施用堆肥污泥后土壤重金属含量略有增加,但仍然低于林用标准下限值,不会造成土壤重金属污染。

富含营养物质的堆肥污泥,是一种理想的土壤改良剂,可用于林地绿化、废弃矿场等土壤的改良。此外,喀斯特石漠化地区土层浅薄,水分和养分调蓄能力低,而堆肥污泥则具有养分含量高、无重金属污染风险等特点。因此,堆肥污泥应用于喀斯特地区石漠化土壤改良有望成为石漠化治理的一种新途径。

参 考 文 献

- [1] Cieslik B M, Namieśnik J, Konieczka P. Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 90: 1-15.
- [2] 崔荣煜, 周天水, 王东田, 等. 国内污泥成分特性的研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(S2): 256-261.
- [3] Geng H, Xu Y, Zheng L K, et al. An overview of removing heavy metals from sewage sludge: achievements and perspectives[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 266: 115375.
- [4] Singh R P, Agrawal M. Variations in heavy metal accumulation, growth and yield of rice plants grown at different sewage sludge amendment rates [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010, 73(4): 632-641.
- [5] 中华人民共和国生态环境部. 2021 年中国生态环境统计年报[R]. 2023-01-18.
- [6] Chen G Y, Wang X T, Li J, et al. Environmental, energy, and economic analysis of integrated treatment of municipal solid waste and sewage sludge: a case study in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 647: 1433-1443.
- [7] 戴晓虎. 我国城镇污泥处理处置现状及思考[J]. *给水排水*, 2012, 48(2): 1-5.
- [8] 方平, 岑超平, 唐子君, 等. 污泥焚烧大气污染物排放及其控制研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(10): 70-80.
- [9] 张贺飞, 徐燕, 曾正中, 等. 国外城市污泥处理处置方式研究及对我国的启示[J]. *环境工程*, 2010, 28(S1): 434-438.
- [10] 李金红, 何群彪. 欧洲污泥处理处置概况[J]. *中国给水排水*, 2005, 21(1): 101-103.
- [11] 钱觉时, 谢从波, 谢小莉, 等. 城市生活污水污泥建材利用现状与研究进展[J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(5): 829-836, 891.
- [12] Cui Y B, Zhang W J, Zhao K, et al. Stabilized sludge fertilizer from sludge drying reed bed for sandy soil amendment[J]. *Journal of Residuals Science & Technology*, 2017, 14(3): 1-8.
- [13] Antoniadis V, Koutoubas S D, Fotiadis S. Nitrogen, phosphorus, and potassium availability in manure and sewage sludge-applied soil[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2015, 46(3): 393-404.
- [14] Angin I, Yaganoglu A. Effects of sewage sludge application on yield, yield parameters and heavy metal content of barley grown under arid climatic conditions[J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2012, 14(5): 811-815.
- [15] 王黛莹. 污泥生物炭的制备及对土壤性质和农作物生长的影响研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
- [16] Tejada M, Gonzalez J L. Influence of organic amendments on soil structure and soil loss under simulated rain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 93(1): 197-205.
- [17] Zuo W G, Gu C H, Zhang W J, et al. Sewage sludge amendment improved soil properties and sweet sorghum yield and quality in a newly reclaimed mudflat land[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 654: 541-549.
- [18] 孙昱, 彭祚登, 熊建军, 等. 高级厌氧消化制污泥有机肥对油松和榆树林木生长及养分积累的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(10): 55-63.
- [19] Chen Z, Li Y Z, Peng Y Y, et al. Feasibility of sewage sludge and food waste aerobic co-composting: physicochemical properties, microbial community structures, and contradiction between microbial metabolic activity and safety risks[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 825: 154047.

- [20] Chen J J, Aihemaiti A, Xia Y, et al. The effect of soil amendment derived from P-enhanced sludge pyrochar on ryegrass growth and soil microbial diversity[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 813: 152526.
- [21] 司莉青, 陈利民, 郑景明, 等. 城市污泥与园林废弃物堆肥混合添加对土壤改良的影响[J]. *草业科学*, 2018, 35(1): 1-9.
- [22] 黄维, 贾仰文, 黄国如, 等. 红枫湖流域非点源污染时空分布及管理措施[J]. *水资源保护*, 2022, 38(5): 190-195, 203.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] 冀拯宇, 周吉祥, 郭康莉, 等. 连续施用无害化污泥堆肥对沙质潮土肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(5): 1276-1284.
- [25] 吴杰, 常会庆, 王启震. 堆肥污泥连续施用对酸性砂土肥力影响及养分积累风险[J]. *核农学报*, 2021, 35(11): 2606-2615.
- [26] 卢绍泉, 姚合英. 作物肥害产生的原因及防止对策[J]. *现代农村科技*, 2016(17): 26.
- [27] 杨桐桐, 封莉, 张立秋. 城市污泥堆肥产品施用对沙荒地土壤理化性质及高羊茅生长的影响[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(4): 2462-2468.
- [28] Hamdi H, Hechmi S, Khelil M N, et al. Repetitive land application of urban sewage sludge: effect of amendment rates and soil texture on fertility and degradation parameters[J]. *CATENA*, 2019, 172: 11-20.
- [29] Franco-Otero V G, Soler-Rovira P, Hernández D, et al. Short-term effects of organic municipal wastes on wheat yield, microbial biomass, microbial activity, and chemical properties of soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48(2): 205-216.
- [30] Bartmiński P, Plak A, Dębicki R. Buffer capacity of soil as indicator of urban forest soil resistance to degradation[J]. *Polish Journal of Soil Science*, 2012, 45(2): 129-136.
- [31] 李婧, 陈森, 周艳文, 等. 凹凸棒石施用对镉污染土壤理化性质及小白菜生长的影响[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(29): 101-103, 173.
- [32] 孙重阳. 堆肥污泥改良吉林省西部盐碱地的技术研究[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2018.
- [33] de Andrés E F, Tenorio J L, del Mar Albarrán M, et al. Carbon dioxide flux in a soil treated with biosolids under semiarid conditions[J]. *Compost Science & Utilization*, 2012, 20(1): 43-48.
- [34] 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]. 长春: 吉林农业大学, 2012.
- [35] 丁超群, 白莉萍, 齐洪涛. 堆肥污泥施用于杨树后土壤理化性质及土壤污染风险[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(7): 2381-2387.
- [36] 杨秀敏, 任广萌, 李立新, 等. 土壤 pH 值对重金属形态的影响及其相关性研究[J]. *中国矿业*, 2017, 26(6): 79-83.

Effects of the Application of Composted Sewage Sludge on Soil Fertility and Plant Growth

HOU Feng^{1,3}, HE Yun², GAO Lin¹, GAN Lili³, WU Jiayi², WANG Yiran¹,
JIANG Lujia^{1,2}, CAO Xiaoxin¹, YANG Haiquan²

(1. Guizhou Zhuxin Water Environment Co. Ltd, Guiyang 550081, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 3. SDIC Xinkai Water Environment Investment Co. Ltd, Beijing 101101, China)

Abstract: The land use is expected to be the main disposal way of municipal sludge. The field experiment was set with different application amounts of aerobic compost of municipal sewage including 0%, 30%, 50%, 70%, 100% (the volume ratio of composted sewage sludge to soil) to explore the effects of composted sewage sludge application on soil fertility, plant growth and soil heavy metals contents. The results showed that the application of composted sewage sludge did not cause soil acidification, and the level of soil fertility was improved from tertiary level to the secondary one. The contents of main nutrient components in soil increased significantly with the increase in sewage sludge compost application. When the addition proportion of composted sewage sludge was 50%, 1.9 times of organic matter, 3.0 times of alkali-hydrolyzed nitrogen, 9.5 times of available phosphorus and 3.7 times of available potassium were observed compared with the control. The growth rate of *Argyranthemum frutescens* (Linn.) Sch.-Bip was the highest when the addition proportion of composted sewage sludge was 50%, and that of *Salvia japonica* Thunb. and *Festuca elata* Keng ex E. Alexeev & *Lolium perenne* Linn. were 30% with best growth. However, there was no significant difference of the growth of *Cerasus subhirtella* (Miq.) Sok. with different addition proportion. Although the application of composted sewage sludge would lead to a slight increase in soil heavy metals content, it was far below than the pollutant index and limit value stipulated in "Disposal of sludge from municipal wastewater treatment plant-Quality of sludge used in forestland" (CJ/T362-2011), and did not cause soil heavy metals pollution. This study will provide a theoretical basis and data support for the land utilization of composted sewage sludge.

Key words: composted sewage sludge; soil improvement; soil fertility; plant growth